

# ZBORNIK RADOVA

## PROCEEDINGS

**21. SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI**  
**21<sup>st</sup> NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE**

**14. MEĐUNARODNI SKUP O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI**  
**14<sup>th</sup> INTERNATIONAL NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE**

University of Slavonski Brod  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod  
HR-35000 Slavonski Brod, Trg I. B. Mažuranić 2

HEP-Group  
HEP-Plin Ltd.  
HR-31000 Osijek, Cara Hadrijana 7

University of Pécs  
Faculty of Engineering and Information Technology  
H-7624 Pécs, Boszorkány u. 2

PLIN2023   
konferencija-plin.unisb.hr

**Suorganizator**  
**Co-organizer**



**Uz potporu**  
**Supported by**

Ministarstvo znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske  
Ministry of Science and Education of the Republic of Croatia

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja  
Ministry of Economy and Sustainable Development

**Osijek, 27.09.- 30.09.2023.**

## PLIN 2023

### ZBORNIK RADOVA 14. MEĐUNARODNOG SKUPA O PRIRODNOM PLINU, TOPLINI I VODI

### PROCEEDINGS OF 14<sup>th</sup> INTERNATIONAL NATURAL GAS, HEAT AND WATER CONFERENCE

Izdavač / Publisher: Sveučilište u Slavonskom Brodu

Email: [plin@unisb.hr](mailto:plin@unisb.hr)

URL: <https://konferencija-plin.unisb.hr/>

All papers are reviewed.

The authors are only responsible for the contents and accuracy of all published material. The Editors do not accept any liability for the contents and accuracy of articles, or responsibility for any mistakes (editorial or typographical), nor for any consequences that may arise from them.

#### Urednici / Editors:

Pero RAOS, glavni urednik

Dražan KOZAK

Marija RAOS

Josip STOJŠIĆ

Igor SUTLOVIĆ

Zlatko TONKOVIĆ

#### PLIN 2023 Organizacijski odbor / PLIN 2023 Organization committee:

Marija RAOS, Hrvatska, predsjednica organizacijskog odbora

Josip STOJŠIĆ, Hrvatska, zamjenik predsjednice organizacijskog odbora

Josip CUMIN, Hrvatska

Miroslav DUSPARA, Hrvatska

Renata ĐEKIĆ, Hrvatska

Nada FLANJAK ROŠOČI, Hrvatska

Ismeta HASANBEGOVIĆ, BiH

Zvonimir KLAIĆ, Hrvatska

Miroslav MAZUREK, Hrvatska

Mirjana Mia PODGAJAC, Hrvatska

Pero RAOS, Hrvatska

Igor SUTLOVIĆ, Hrvatska

Zlatko TONKOVIĆ, Hrvatska

Nikola VIŠTICA, Hrvatska

Sponzori / Sponsors



Izlagачi / Exhibitors



PLIN 2023 Počasni odbor / PLIN 2023 Honor committee:

Ivan SAMARDŽIĆ, predsjednik, Hrvatska  
Frane BARBARIĆ, Hrvatska  
Vlado GUBERAC, Hrvatska  
Gabriella MEDVEGY, Mađarska  
Damir PEĆUŠAK, Hrvatska  
Tomislav ŠAMBIĆ, Hrvatska

PLIN 2023 Programski odbor / PLIN 2023 Program committee:

Dražan KOZAK, predsjednik, Hrvatska  
Antun STOIĆ zamjenik pred., Hrvatska  
Bálint BACHMANN, Mađarska  
Darko BAJIĆ, Crna Gora  
Eraldo BANOVAČ, Hrvatska  
Károly BELINA, Mađarska  
Ivan BOŠNJAK, Hrvatska  
Aida BUČO-SMAJIĆ, BiH  
Zlatan CAR, Hrvatska  
Robert ČEP, Češka  
Majda ČOHODAR, BiH  
Darko DAMJANOVIĆ, Hrvatska  
Ejub DŽAFEROVIĆ, BiH  
Antun GALOVIĆ, Hrvatska  
Hrvoje GLAVAŠ, Hrvatska  
Nenad GUBELJAK, Slovenija  
Sergej HLOCH, Slovačka  
Nedim HODŽIĆ, BiH  
Željko IVANDIĆ, Hrvatska  
Željka JURKOVIĆ, Hrvatska  
Ivica KLADARIĆ, Hrvatska  
Milan KLJAJIN, Hrvatska  
Janez KOPAČ, Slovenija  
Grzegorz KROLCZYK, Poljska  
Stanislaw LEGUTKO, Poljska  
Leon MAGLIĆ, Hrvatska  
Siniša MARIČIĆ, Hrvatska  
Andrijana MILINOVIĆ, Hrvatska  
Damir MILJAČKI, Hrvatska  
Mladimir MILUTINOVIĆ, Srbija  
Ferenc ORBÁN, Mađarska  
Branimir PAVKOVIĆ, Hrvatska  
Denis PELIN, Hrvatska  
Miroslav PLANČAK, Srbija  
Dalibor PUDIĆ, Hrvatska  
Marijan RAJSMAN, Hrvatska  
Marko RAKIN, Srbija  
Miomir RAOS, Srbija  
Pero RAOS, Hrvatska  
Alessandro RUGGIERO, Italija

Aleksandar SEDMAK, Srbija  
Marinko STOJKOV, Hrvatska  
Josip STOJŠIĆ, Hrvatska  
Ana SUTLOVIĆ, Hrvatska  
Igor SUTLOVIĆ, Hrvatska  
Tomislav ŠARIĆ, Hrvatska  
Mladen ŠERCER, Hrvatska  
Damir ŠLJIVAC, Hrvatska  
Zlatko TONKOVIĆ, Hrvatska  
Zdravko VIRAG, Hrvatska  
Nikola VIŠTICA, Hrvatska  
Jurica VRDOLJAK, Hrvatska  
Marija ŽIVIĆ, Hrvatska





## Sadržaj / Contents

### **POZVANO PREDAVANJE / INVITED LECTURE**

ISPITIVANJE UČINKOVITOSTI GORIVNIH ĆELIJA MALE SNAGE ZA EDUKACIJSKE SVRHE .. 1  
D. Pelin, A. Brandis, M. Bačak

### **PLIN I PLINSKA TEHNIKA / GAS AND GAS TECHNIQUE**

SOME TECHNICAL ASPECTS OF BLENDING HYDROGEN WITH NATURAL GAS ..... 11  
Gy. Vasvári, J. Vajda

### **ENERGETIKA I TOPLINSKA TEHNIKA / ENERGETICS AND HEATING TECHNIQUE**

CARBON DIOXIDE EMISSIONS COSTS IN MINERAL FERTILIZERS PRODUCTION..... 21  
V. Božić, I. Sutlović, D. Miletić, J. Böhm

PEDELEC EFFICIENCY ANALYSIS IN THE AREA OF THE CITY OF OSIJEK ..... 29  
S. Aračić, H. Glavaš, D. Dorić

UTJECAJ ASIC SKLOPOVLJA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ  
MREŽI ..... 43  
M. Beretić, Z. Klaić, H. Adrić, M. Primorac, M. Vukobratović

PROJICIRANJE EMISIJA CO<sub>2</sub> U ISTOČNOJ HRVATSKOJ U SVRHU ODREĐIVANJA POTICAJA  
ZA PRIMJENU CCS TEHNOLOGIJE..... 53  
F. Vodopić, D. Karasalihović Sedlar, D. Vulin

### **VODA / WATER**

KRATKI PREGLED: RAZVOJ KANALIZACIJSKIH SUSTAVA KROZ POVIJEST ..... 70  
D. Obradović, A. Ivanković

TEXTILE DYEING WITHOUT THE USE OF AN AQUEOUS MEDIUM ..... 82  
I. Čorak, A. Sutlović, L. Savić

UZGON NA OBJEKTIMA ODVODNJE URBANIH PODRUČJA ..... 91  
S. Maričić, D. Rudvald

WATERLESS I. E. PIGMENT DIGITAL TEXTILE PRINTING..... 103  
M. Glogar, M. Tkalec

### **URBANIZAM I GRADITELJSTVO / URBAN PLANNING AND CONSTRUCTION**

ROK I TROŠKOVI MEHANIZIRANIH RADOVA ZA IZVEDBU I ODRŽAVANJE HIDROTEHNIČKIH  
GRAĐEVINA..... 112  
D. Vidaković, V. Moser, K. Čosić, E. Desnica

GREENHOUSE GASES AND WATER ..... 122  
S. Franjić

ŽIVOTNI CIKLUS GFRP (POLIMERI OJAČANI STAKLENIM VLAKNIMA) U GRADITELJSTVU.....	132
A. Jurić, T. Štefić, K. Pavelić	
POZICIJA MAŠINSKIH INSTALACIJA KAO INŽENJERSKIH OBJEKATA U REGULATIVI CRNE GORE.....	139
M. Krstajić	
ELEMENTI PROTUPOŽARNE ZAŠTITE U SUSTAVU VENTILACIJE .....	149
D. Novoselović, M. Karakašić, I. Svalina, M. Brechelmacher, Iva Samardžić	
<b><u>KONSTRUIRANJE I PROIZVODNE TEHNOLOGIJE / DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGIES</u></b>	
MEASUREMENT WITH LASER RANGEFINDER.....	159
H. Glavaš, L. Egredžija, R. Kljaić, D. Koprivanac	
BENDING MOMENT.....	171
B. Grizelj, M. Stoić, V. Starčević, M. Čuletić Čondrić	
PRODUCT DEVELOPMENT OF CONVEYOR BELTS SYSTEM WITH A FOCUS ON STRUCTURAL FEATURES .....	181
J. Marijić, M. Vilić, I. Grgić, M. Karakašić, Ž. Ivandić	
3D MODELIRANJE I IZRADA KALUPA ZA IZRAVNO PREŠANJE ELASTOMERNIH IZRATKA.....	190
S. Švoger, A. Čikić, N. Delić, M. Pintarić	
VIRTUALNA STVARNOST: OSNOVNA PODJELA I PRIMJENA U 3D OBLIKOVANJU .....	200
S. Švoger, A. Čikić, Z. Busija, M. Pintarić	
ECONOMICAL DESIGN OF VERTICAL STORAGE TANKS .....	209
T. Zsebe, Gy. Vasvári, F. Orbán	
PROJECT MANAGEMENT OF BOILER ASSEMBLY IN A WASTE INCINERATION PLANT .....	219
S. Šimunović, R. Lujčić, A. Milinović, Iva Samardžić	
ANALYSIS OF CONTACT MATERIALS IN FINNED TUBE HEAT EXCHANGERS: SOLDERS, SOLDERABILITY.....	229
T. Bitó, D. Csonka, T. Zsebe, Z. Meiszterics, S. Fenyvesi, Gy. Vasvári	
TESTING THE EFFECTIVENESS OF THE ELECTROCHEMICAL PROCESS OF MATERIAL CLEANING.....	240
T. Šolić, D. Marić, Iva Samardžić, I. Gostrec, Ivan Samardžić	
UTJECAJ TOPLE DEFORMACIJE NA KVALITETU ZAVARA ŠAVNE CIJEVI IZ ČELIKA MIKROLEGIRANOG NIOBIJEM NAMJENJENIM ZA VODOVODNE INSTALACIJE .....	250
I. Samardžić, S. Rešković, B. Grizelj, T. Brlić, D. Marić	



# Ispitivanje učinkovitosti gorivnih ćelija male snage za edukacijske svrhe

## *Testing the efficiency of low power fuel cells for educational purposes*

D.Pelin<sup>1,\*</sup>, A.Brandis<sup>1</sup>, M.Bačak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: dpelin@ferit.hr

### Sažetak

Koristeći Lucas-Nülle didaktičko-multimedijalnu opremu s dvije gorivne ćelije ukupne snage do 1 W, elektrolizatora i različitih tipova trošila, ispitana je učinkovitost kako pojedinačne gorivne ćelije, mješovitih spojeva dvije gorivne ćelije, tako i elektrolizatora pri različitim opterećenjima. Uz korištenje virtualne mjerne instrumentacije, koja je dio didaktičke opreme, snimljene su  $u-i$  i  $p-i$  karakteristike jedne gorivne ćelije i paralelnog/serijskog spoja dvije gorivne ćelije. Ovi pokusi su korisni za identifikaciju ispravnosti rada gorivnih ćelija, te je za jedan slučaj pokazano kako onečišćenje membrane utiče na snimljene  $u-i$  i  $p-i$  karakteristike. Opisan je postupak mjerenja i postupak izračuna učinkovitosti gorivne ćelije i elektrolizatora ali i čitavog sustava kojeg čine elektrolizator i gorivne ćelije. Vrednovane su izračunate vrijednosti učinkovitosti na osnovu provedenih mjerenja za različite spojeve gorivnih ćelija pri različitim opterećenjima, ali istim strujno-naponskim karakteristikama pojedinačnih gorivnih ćelija.

**Ključne riječi:** obnovljivi izvori energije, gorivne ćelije, ispitivanje karakteristika, učinkovitost, didaktička oprema.

### Abstract

Using the Lucas-Nülle didactic-multimedia equipment with two fuel cells with a total power of up to 1 W, electrolyzers and different types of loads, the efficiency of single fuel cells, mixed connections of two fuel cells, and electrolyzers at different loads was tested. With the use of virtual measuring instrumentation, which is part of the didactic equipment, the  $v-i$  and  $p-i$  characteristics of one fuel cell and the parallel/series connection of two fuel cells were recorded. These experiments are useful for identifying the proper operation of fuel cells, and in one case it was shown how membrane contamination affects the recorded  $u-i$  and  $p-i$  characteristics. The procedure for measuring and calculating the efficiency of the fuel cell and electrolyser, but also of the entire system consisting of the electrolyser and fuel cells, is described. The calculated efficiency values were evaluated based on the measurements for



different connections of fuel cells at different loads, but with the same current-voltage characteristics of individual fuel cells.

**Key words:** renewable energy choices, fuel cells, characteristics testing, efficiency, didactic equipment.

## 1. Uvod

Zbog nedostatka konvencionalnih izvora električne energije i sve većeg zagađenja okoliša, traže se alternativni izvori za proizvodnju električne energije, tzv. obnovljivi izvori energije [1]. Jedan od takvih izvora je i gorivna ćelija. Važna prednost je što kod procesa pretvorbe energije u gorivnoj ćeliji ne dolazi do stvaranja ugljičnog dioksida, koji je razlog globalnog zatopljenja [2].

Kao i kod većine izvora energije tako i kod gorivnih ćelija potrebno je vrednovati proces pretvorbe kroz efikasnost, tj. učinkovitost pretvorbe energije. Razvoj gorivnih ćelija još je u tijeku, odnosno njihova tehnologija nije dosegla sam vrhunac, bez obzira što im je učinkovitost veća nego kod ostalih obnovljivih izvora električne energije [3].

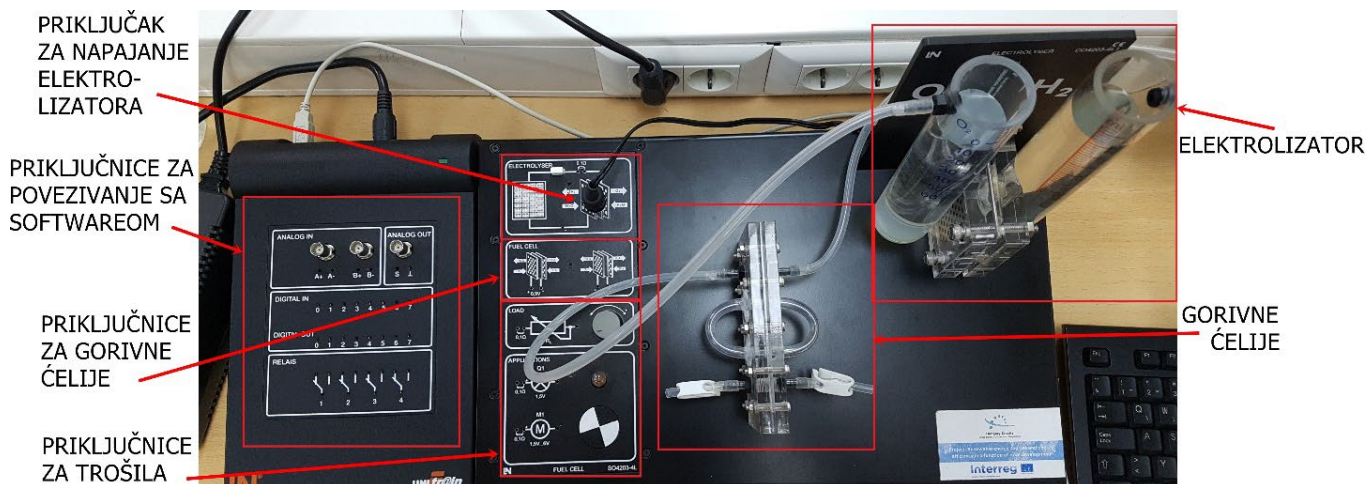
Teoretska učinkovitost gorive ćelije definirana je kao odnos korisne električne energije na izlazu i ulazne energije (entalpije vodika) pri temperaturi od 25°C uz gornju ogrjevnu moć čistog vodika iznosi 83% (ili 94.5% na osnovi donje ogrjevnosti) [4]. Realno, učinkovitost sustava proizvodnje električne energije iz gorivnih ćelija značajno pada zbog utjecaja koncentracije reaktanata, polarizacijskih i omskih gubitaka, te gubitaka elektroničkih energetskih pretvarača koji osiguravaju stabilnost izlaznog napona, kao i zbog gubitaka na mjernoj i kontrolnoj opremi. Dodatno u obzir treba uzeti još i gubitke pri proizvodnji vodika; npr. proizvodnja vodika reformiranjem prirodnog plina. Stoga se korisnost može smanjiti na svega 20 - 30 % [5]. Tako je prema pregledanoj literaturi, mjerenjima zabilježena učinkovitost, na primjeru jedne gorivne ćelije, od 34 % [6].

Cilj rada je ispitati učinkovitost kako pojedinačne gorivne ćelije, mješovitih spojeve s dvije gorivne ćelije, tako i elektrolizatora pri različitim opterećenjima koristeći Lucas-Nülle didaktičko-multimedijalnu opremu [7], koja se sastoji od dvije gorivne ćelije ukupne snage do 1 W, elektrolizatora i različitih tipova trošila. Treba napomenuti da je ova oprema prilagođena za edukacijske svrhe, tj. za korištenje na laboratorijskim i konstruktivnim vježbama u okviru kolegija koji su vezani uz proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Prvo će se uz korištenje virtualne mjerne instrumentacije, koja je dio didaktičke opreme, snimiti  $u-i$  i  $p-i$  karakteristike jedne gorivne ćelije i paralelnog/serijskog spoja dvije gorivne ćelije. Ovi pokusi su korisni za identifikaciju ispravnosti rada gorivnih ćelija, te će se za jedan slučaj pokazati kako onečišćenje membrane utiče na snimljene karakteristične vrijednosti  $u-i$  i  $p-i$  karakteristika. Zatim će se opisati postupak mjerenja i postupak izračuna učinkovitosti gorivne ćelije i elektrolizatora ali i čitavog sustava elektrolizator i gorivne ćelije. Na kraju će se vrednovati izračunate vrijednosti učinkovitosti na osnovu provedenih mjerenja za različite spojeve gorivnih ćelija pri različitim opterećenjima, ali istim  $u-i$  karakteristikama pojedinačnih gorivnih ćelija.

## 2. Didaktičko-multimedijalna oprema Lucas- Nulle

Na slici 1. prikazana je maketa opreme koja je korištena za određivanje pokusa. Maketa se sastoji od elektrolizatora, dvije gorivne ćelije, te tri različita trošila. Kao trošila koriste se: promjenjivi otpornik, žarulja sa žarnom niti i električni motor.



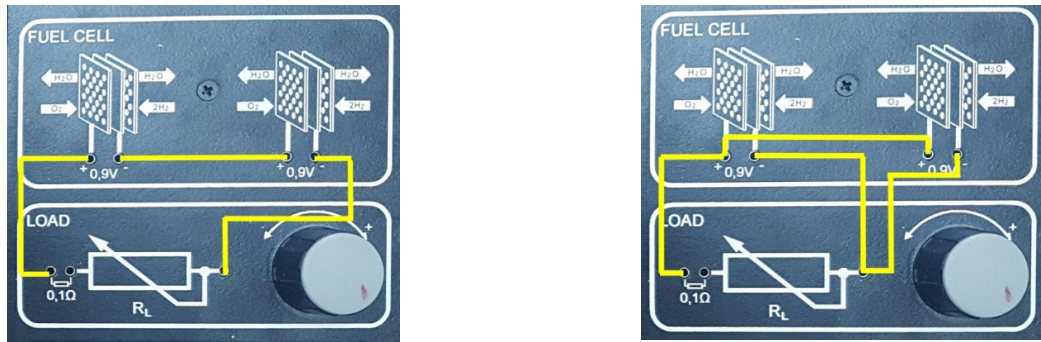
Slika 1. Izgled makete s naznačenim podsustavima

Gorivna ćelija je elektrokemijski uređaj koji radi na principu pretvaranja kemijske energije u električnu [8]. Princip rada je sličan kao kod baterije, ali gorivna ćelija nema mogućnost skladištenja električne energije. Gorivna ćelija sastoji se od dvije elektrode (anoda i katoda) i katalizatora. Za rad su potrebni gorivo i oksidans. Na anodnu stranu dovodi se gorivo, dok se na katodnu stranu dovodi oksidans. Kao gorivo se koristi vodik, dok je kisik oksidans. Katalizator razdvaja vodik na elektrone i protone (vodikove ione) koji dolaze do membrane (središta ćelije) i uz pomoć katalizatora spajaju se s kisikom i stvaraju vodu. Elektroni koji ne mogu proći kroz membranu prolaze kroz vanjski krug na koji je priključeno električno trošilo. Velika prednost gorivnih ćelija je što je voda jedini nusproizvod, tako da nema negativnog utjecaja na okoliš. Više o podjelama gorivnih ćelija, građi te samom kemijskom procesu razdvajanja iona opisano je u radu [9], a u ovom radu fokusirat će se na eksperimentalnom određivanju učinkovitosti gorivnih ćelija, elektrolizatora i čitavog sustava.

### 2.1. Načini spajanja gorivnih ćelija

Na slici 2. prikazani su načini spajanja gorivnih ćelija. U oba primjera spoj ćelija je opterećen promjenjivim otpornikom kao trošilom. Na ovaj način moguće je ispitivati i spojeve više gorivnih ćelija; serijski i paralelan spoj, te raditi usporedbu vezanu uz način spajanja ćelija.

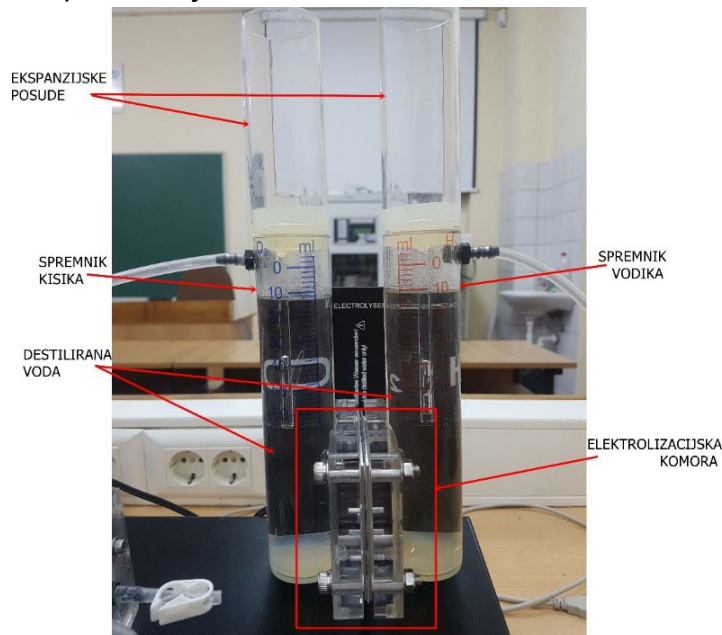




**Slika 2.** Prikaz načina spajanja gorivnih ćelija; lijevo-serijski spoj; desno-paralelni spoj

## 2.2. Elektrolizator

Gorivne ćelije za rad trebaju vodik i kisik. Jedan od načina dobivanja tih plinova je elektroliza vode. Elektroliza vode je proces rastavljanja molekule vode na atome vodika i kisika [2]. Upravo se proces elektrolize koristi i na Lucas-Nülle maketi, a za elektrolizu se koristi elektrolizator. Na slici 3. prikazan je elektrolizator s makete.



**Slika 3.** Elektrolizator s makete

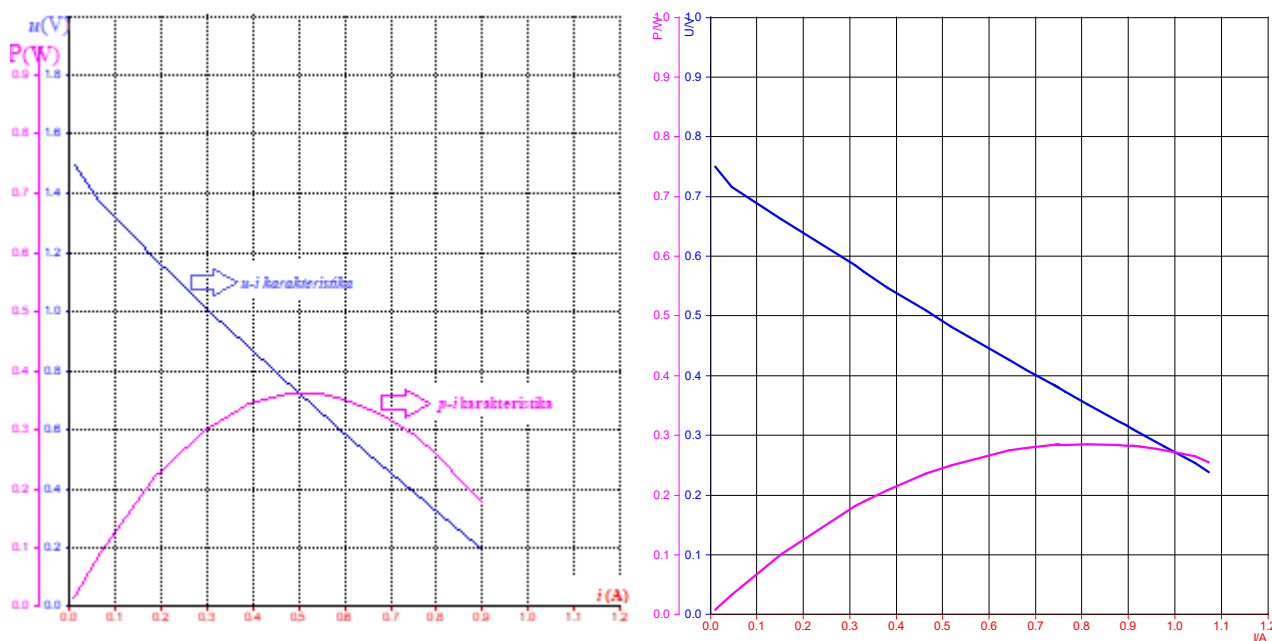
Elektrolizator je uređaj koji se sastoji od dva spremnika koji su punjeni destiliranom vodom, elektrolizacijske komore, te priključaka za spajanje na anodu i katodu gorivne ćelije. Destilirana voda je obvezna za korištenje na ovoj maketi, jer sve ostale vode imaju primjese, te se u njihovom sastavu nalaze i neki drugi elementi, a ne samo vodik i kisik. Spremnici za vodik i kisik imaju poklopce na koje su dodane i ekspanzijske posude u koje ide voda potisnuta od proizvedenih plinova. Najvažniji dio elektrolizatora je elektrolizacijska ili reakcijska komora, koja je omeđena dvjema elektrodama, odnosno anodom i katodom.

## 2.3. Pokusi ispitivanja karakteristika gorivnih ćelija

Proizvođač opreme zajedno s maketom isporučuje i CD s predloženim pokusima kojima se testira ispravnost opreme i potvrđuju teorijske osnove vezane uz područje primjene makete.

Nakon prolaženja kroz predložene pokuse, autori su mišljenja da je razina pripremljenih vježbi prikladna za srednjoškolsko obrazovanje, ali da nije dovoljna za visokoškolsko obrazovanje. Dio predloženih pokusa će se ipak koristiti i pri određivanju učinkovitosti gorivnih ćelija pa će se ovdje istaći, a kasnije pozvati na potrebne pokuse: pokusi dokazivanja kemijskog sastava vode, pokus mjerenja proizvedenog vodika i pokus mjerenja stope propuštanja plinova.

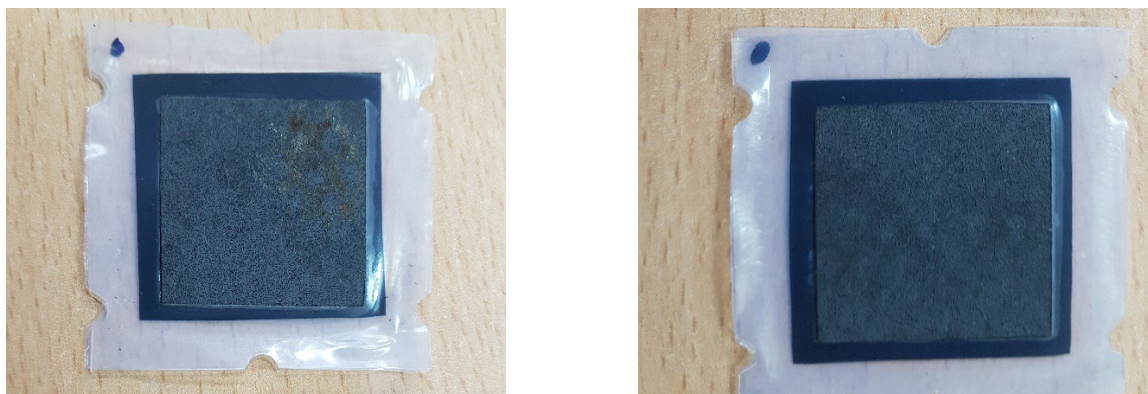
Postupak izvođenja pokusa je da se spremnik napuni vodikom do 50 ml, a promjenjivi otpornik, koji se koristi kao teret ćelijama, postavi na najveći otpor. Pomoću virtualnog snimača karakteristika (virtualna mjerna oprema makete), snima se karakteristika gorivne ćelije, tako da se otpor postepeno smanjuje. Snimanje se završava kada se otpor smanji na najmanju moguću vrijednost. Na ovaj način snimljene su  $u-i$ , te  $p-i$  karakteristike serijskog i paralelnog spoja dvije gorivne ćelije, slika 4



**Slika 4.** Snimljene karakteristike; lijevo-serijski spoj; desno-paralelan spoj

Maksimalan napon dviju serijski spojenih gorivnih ćelija iznosi  $U_{maks}=1,5$  V. Porastom otpora napon opada gotovo pa linearno. Najveća snaga dviju serijsko spojenih ćelija iznosi  $P_{maks}=0,36$  W. Pri mjerenju karakteristika paralelnog spoja zabilježen je maksimalan napon u iznosu od  $U_{maks}=0,75$  V. Porastom otpora napon opada gotovo linearno. Najveća snaga dviju paralelno spojenih ćelija iznosi  $P_{maks}=0,29$  W. U slučajevima praktične primjene kada je potreban veći napon koristiti će se serijski spoj ćelija, dok će se u slučajevima u kojima treba veća struja koristiti paralelan spoj gorivnih ćelija. Rezultati gore izvedenih pokusa ukazuju na to da je snaga gorivnih ćelija neznatno veća pri serijskom spoju.

Snimanje  $u-i$  i  $p-i$  karakteristika treba provesti uvijek prije primjene gorivnih ćelija. Njihovim provođenjem moguće je detektirati neispravnosti u radu. Iz iskustva u laboratoriju, ova mjerenja se smatraju temeljnim pokusima kojima se otkriva zaprljanost membrane što znatno utječe na učinkovitost rada gorivne ćelije. Jedan takav primjer, zaprljanosti membrane otkriven mjerenjima karakteristika, prikazan je na slici 5.



Slika 5. Membrana gorivne ćelije prije (lijevo) i poslije (desno) čišćenja

### 3. Ispitivanje učinkovitosti gorivnih ćelija

Učinkovitost se određuje kao omjer između korisne izlazne energije i ukupne ulazne energije. Kod gorivnih ćelija korisna izlazna energija je proizvedena električna energija, a ulazna energija je entalpija ili gornja toplinska vrijednost goriva, tj. vodika [2]. Pošto se maketa sastoji od gorivnih ćelija i elektrolizatora, za računanje učinkovitosti u obzir se uzima učinkovitosti elektrolizatora i gorivnih ćelija. Ukupna učinkovitost sustava računa se kao umnožak pojedinih učinkovitosti:

$$\eta_s = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (1)$$

gdje je:  $\eta_s$  - učinkovitost sustava,  
 $\eta_i$  - pojedinačna učinkovitost podsustava,  
 $n$  - broj podsustava.

Učinkovitost gorivnih ćelija je omjer električne energije, odnosno električnog rada koji se obavi na trošilu i kemijskog rada, odnosno umnoška kalorijske (ogrjevne) vrijednosti vodika i potrošenog volumena vodika:

$$\eta_{gc} = \frac{W_{el}}{W_{ch}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{H_{H_2} \cdot V} \quad (2)$$

gdje je:  $W_{el}$  - električni rad [W],  
 $W_{ch}$  - kemijski rad [W],  
 $U$  - napon [V],  
 $I$  - struja [A],  
 $t$  - vrijeme [s],  
 $V$  - potrošen volumen vodika [ml].

$H_{H_2}$  - kalorijska vrijednost vodika  $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$ ,

Kalorijska vrijednost vodika iznosi:  $H_{H_2} = 11920 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = 11,92 \frac{\text{J}}{\text{ml}} [1]$ .

Na maketi se struja mjeri na šant otporniku (vrijednost otpora šanta je  $0,1 \Omega$ ) što znači da na njemu postoji pad napona, odnosno i on troši dio energije koju daju gorivne ćelije.





Energija koja se gubi na šantu je toplinske prirode i kada se uzme u obzir dobije se krajnji izraz za određivanje učinkovitosti:

$$\eta_{gc} = \frac{U \cdot I \cdot t + I_s^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} \quad (3)$$

gdje su:  $I_s$  - struja šanta [A]

- $R$  -otpor šanta [ $\Omega$ ]

### 3.1. Određivanje učinkovitosti za paralelni spoja dvije gorivne ćelije pri fiksnom opterećenju

Kao ogledni primjer računanja učinkovitosti odabran je paralelni spoj gorivnih ćelija i elektrizatora. Za određivanje učinkovitosti gorivnih ćelija koristi se promjenjivi otpornik, tako da kroz njega teče struja od 1 A. Nakon što se spremnik napuni vodikom isključi se elektrolizator i zatvori strujni krug, te nakon 180 sekundi očita volumen vodika koji je preostao u spremniku. Razlika između početne razine i razine koja je preostala je volumen potrošen od strane gorivnih ćelija. Zabilježi se napon  $\cdot R$  koji ćelije daju. Mjerenje je ponovljeno tri puta, te je uzeta srednja vrijednost, tablica 1.

**Tablica 1.** Podaci za određivanje učinkovitosti paralelnog spoja gorivnih ćelija

Broj mjerenja	$I$ [A]	$U$ [V]	Potrošen vodik [ml]
1.	1	0,33	19
2.	1	0,34	19
3.	1	0,35	19
Sr.vrijednosti	1	0,34	19

U obzir treba uzeti i stopu propuštanja koja se određuje iz pokusa mjerenja stope propuštanja plinova (0,6 ml/min). Pošto su mjerenja trajala tri minute, sustav je propustio 1,8 ml vodika. Taj volumen treba oduzeti od volumena potrošenog vodika. Prema izrazu (3) učinkovitost spoja gorivnih ćelija;  $\eta_{GC,p}$  iznosi:

$$\eta_{GC,p} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} = \frac{0,34 \cdot 1 \cdot 180 + 1^2 \cdot 0,1}{11920 \cdot (19 - 1,8) \cdot 10^{-3}} = 0,3 \text{ ili } 30\%$$

Učinkovitost paralelnog spoja ćelija iznosi 0,3 ili 30%, što znači da se manje od trećine ulazne energije pretvori u korisnu električnu energiju.

Učinkovitost elektrolizatora;  $\eta_{el}$  se računa prema izrazu:

$$\eta_{el} = \frac{H_{H_2} \cdot V}{U \cdot I \cdot t} \quad (4)$$

U izrazu (4) pad napona na šantu je zanemaren, jer je razlika u rezultatima učinkovitosti sa i bez tog pada napona zanemariva. Pri određivanju učinkovitosti elektrolizatora, spremnik vodika je ispražnjen, te je zatim namještena struja elektrolize 1,2 A. Nakon 180 sekundi očitana je razina vodika u spremniku. Mjerenja su ponovljena tri puta, te je ponovno za određivanje učinkovitost uzeta srednja vrijednost. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 2.

Pri izračunu učinkovitosti u obzir opet treba uzeti stopu propuštanja, pa se vrijednost koja iscuri u tri minute mjerenja zbroji proizvedenom volumenu vodika.

**Tablica 2.** Podaci za određivanje učinkovitosti elektrolizatora

Broj mjerenja	$I$ [A]	$U$ [V]	Proizvedeni vodik [ml]
1.	1,2	1,74	26
2.	1,2	1,74	26
3.	1,2	1,74	25
Sr.vrijednosti	1,2	1,74	25,67

Prema izrazu (4) učinkovitost elektrolizatora;  $\eta_{el}$  iznosi:

$$\eta_{el} = \frac{H_{H_2} \cdot V}{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R} = \frac{11920 \cdot (25,67 + 1,8) \cdot 10^{-3}}{1,74 \cdot 1,2 \cdot 180} = 0,8712$$

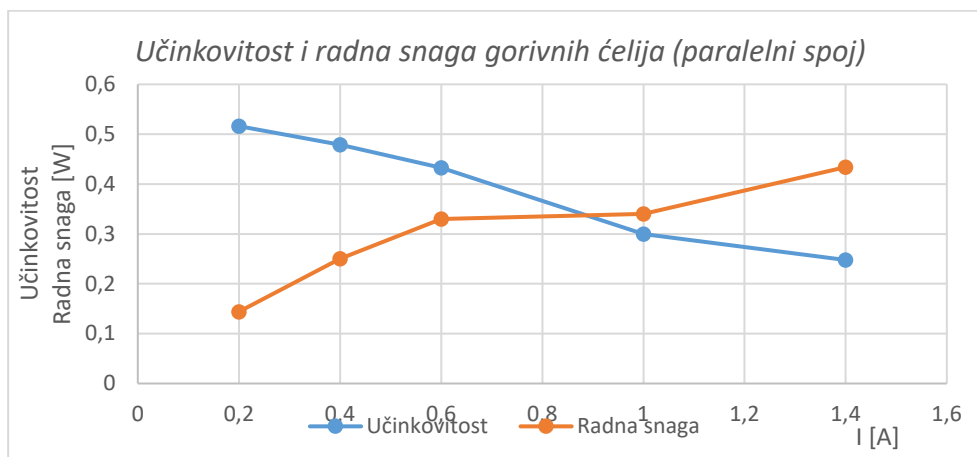
Učinkovitost elektrolizatora je 87,1 % što ukazuje da je proces elektrolize energetski mnogo učinkovitiji u odnosu na pretvorbu kemijske energije u električnu u gorivnoj ćeliji. Sada je ukupna učinkovitost sustava određena prema izrazu (1):

$$\eta_s = \eta_{el} \cdot \eta_{gc,p} = 0,8712 \cdot 0,3 = 0,26136 \text{ ili } 26,1 \%$$

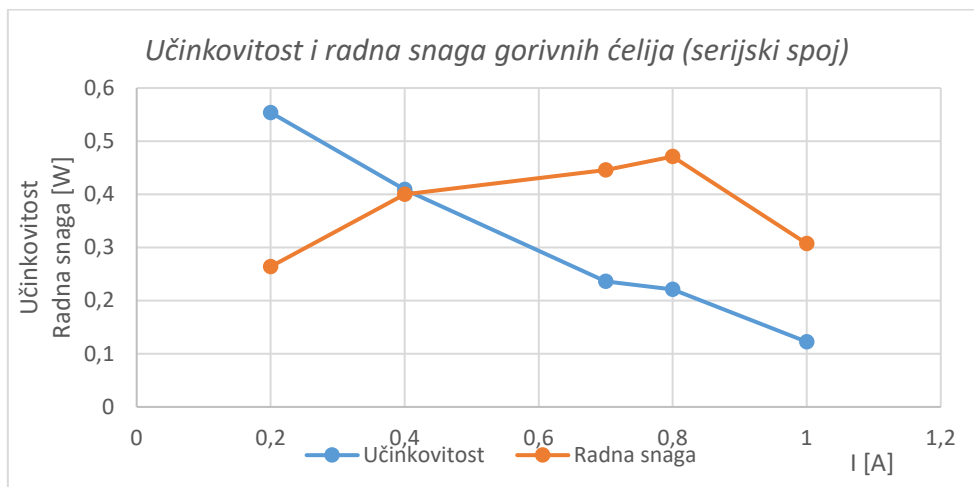
Učinkovitost sustava iznosi 26,1 %. Malo više od četvrtine ulazne energije pretvori se u korisnu električnu energiju. Ovime su potvrđene vrijednosti koje su pronađene pri pregledu područja rada.

### 3.2. Određivanje učinkovitosti za različita opterećenja mješovitog spoja dvije gorivne ćelije

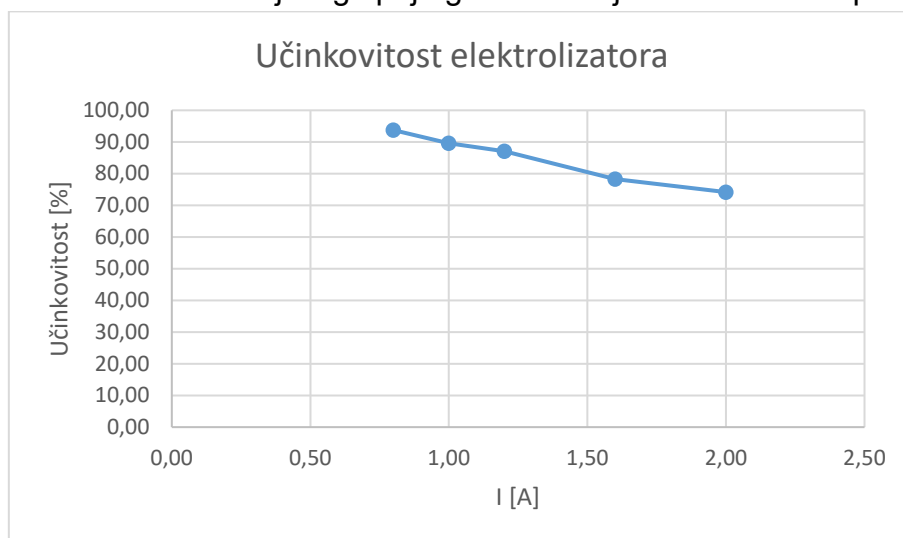
U prethodnom poglavlju proveden je postupak izračunavanja učinkovitosti provođenjem mjerenja na spoju gorivnih ćelija i elektrolizatora, ali samo pri fiksnom opterećenju, tj. pri konstantnoj struji. Kako je poznato da učinkovitost ovisi o mijenjanju struje [10], a porastom struje elektrolize raste napon, ali i volumen proizvedenog vodika napravljena je detaljna analiza učinkovitosti uz mijenjanja iznosa struje za paralelan i serijski spoj dvije gorivne ćelije. Rezultati su za različite spojeve gorivnih ćelije prikazane na slici 6-7, a za elektrolizator na slici 8.



**Slika 6.** Učinkovitost paralelnog spoja gorivnih ćelija u ovisnosti o opterećenju



**Slika 7.** Učinkovitost serijskog spoja gorivnih ćelija u ovisnosti o opterećenju



**Slika 8.** Učinkovitost elektrolizatora u ovisnosti o struji elektrolize

Treba prokomentirati rezultate, u smislu da ćelije imaju najveću učinkovitost i radnu snagu za različite vrijednosti opterećenja. U praktičnim primjenama se teži nazivnoj radnoj snazi, pri čemu se ne gleda uvijek na najveću moguću iskoristivost. Kod serijskog spoja ćelija najveća radna snaga postiže se pri strujama 0,7 A i 0,8 A, pri čemu je izračunata učinkovitost od 30 % do 40 %. Kod paralelnog spoja najveća radna snaga je pri najvećoj struji, kada je učinkovitost ćelija oko 25 %.

Kada se učinkovitost gorivnih ćelija pomnoži s učinkovitošću elektrolizatora za odgovarajuće opterećenje, dobije se maksimalna učinkovitost sustava sa serijsko spojenim gorivnim ćelijama u iznosu od 51,92%, odnosno za paralelan spoj gorivnih ćelija u iznosu od 48,38%. Ove vrijednosti su višestruko veće nego što su učinkovitosti fotonaponske pretvorbe čime se potvrđene hipoteze iz pregleda područja.

Kako je najveća učinkovitost elektrolizatora pri niskim opterećenjima, tzv. podopterećenje, u primjenama ipak treba očekivati manju učinkovitost od izračunate.



#### 4. Zaključak

Izračunata je učinkovitost za dvije gorivne ćelije pri različitim načinima spajanja na osnovu mjerenja i provedenih pokusa s didaktičko-multimedijalnom opremom. Paralelan spoj gorivnih ćelija ima najveću snagu pri najvećem opterećenju, pri čemu je izračunata učinkovitost od oko 25 %, dok je za serijski spoj najveća snaga zabilježena pri srednjim opterećenjima u iznosu od 30 % do 40 %.

Maksimalna učinkovitost sustava za serijski spoj dvije gorivne ćelije iznosi 51,92 %, dok za paralelni spoj iznosi 48,38 %. Bitno je napomenuti da su to učinkovitosti ćelija pri jakosti struje od 0,2 A što odgovara podopterećenom radu gorivne ćelije.

Također treba naglasiti, da se izračunata učinkovitost isključivo odnosi na proizvodnju električne energije, te da bi se pri kogeneraciji, odnosno korištenju i toplinske energije vode kao nusproizvoda kemijskih reakcija u gorivnim ćelijama učinkovitost znatno povećala.

#### 5. Literatura

- [1] Neven Duić, Iskorištavanje obnovljivih izvora energije, energetska učinkovitost i smanjenje emisija stakleničkih plinova kao pokretač razvoja "zelene ekonomije" u Hrvatskoj do 2050. Sveučilište u Zagrebu- Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb; preuzeto s internet stranice :  
[www.obnovljivi.com/pdf/PDF\\_OBNOVLJIVI\\_COM/Duic\\_21\\_HED\\_Forum\\_ZELENA\\_EKONOMIJA.pdf](http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF_OBNOVLJIVI_COM/Duic_21_HED_Forum_ZELENA_EKONOMIJA.pdf)
- [2] James Larminie, Fuel Cell Systems Explained, Oxford Brookes University, UK, 2003;
- [3] J.H. Hirschenhofer, Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Federal Energy Technology Center P.O. Box 880, 1998.
- [4] Toni Bjažić; Adaptivno upravljanje istosmjernim uzlaznim pretvornikom napajanim gorivnim člankom, FER Zagreb, 2010; preuzeto s internet stranice:  
<https://www.bib.irb.hr/493392>
- [5] Matija Šinko; Makroskopsko modeliranje PEM gorivnih ćelija; FER Zagreb, 2010; preuzeto s internet stranice:  
[https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/DR09MSinko.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/DR09MSinko.pdf)
- [6] Hussein A Kazem, Experimental analysis of the performance characteristics of PEM Fuel Cells// International Journal of Scientific and Engineering Research, Volume 7, Issue 2, February, 2016; (ISSN 2229-5518 ).
- [7] Lucas-Nülle; didaktička oprema za podučavanje; dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/>
- [8] Frano Barbir; PEM Fuel Cells, theory and practice, Elsevier, London, 2013. (ISBN 978-0-12-387710-9)
- [9] Pelin, Denis ; Stojkov, Marinko ; Šljivac, Damir ; Glavaš, Hrvoje: Application of the Fuel Cells in Generating Electrical Energy and Heat; Proceedings of the 2nd International Natural Gas , Heat and Water Conference, 2011.
- [10] J. HwangH.-S Hwang; Parametric studies of a double-cell stack of PEMFC using Grafoil (TM) flow-field plates; Journal of Power Sources 104(1):24-32, January 2002, (DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00865-5).



# Some technical aspects of blending hydrogen with natural gas

Gy. Vasvári<sup>1,\*</sup>, J. Vajda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [vasvari.gyula@mik.pte.hu](mailto:vasvari.gyula@mik.pte.hu)

## Abstract

Energy scarcity and environmental considerations pose new challenges for the energy industry. They require a reduction in the use of fossil fuels which are currently predominant and their replacement by renewable energy sources. One such renewable energy source could be green hydrogen which is produced in an environmentally friendly way. By blending green hydrogen in the system, a certain amount of natural gas might be replaced. The hydrogen can be mixed centrally into the natural gas distribution pipeline. The blending can also be done at the point of consumption, in which case the hydrogen is produced at the consumer's site.

As regards the application issues, it is important to clarify the suitability of current gas appliances for the combustion of the natural gas-hydrogen mixture and whether the various system components (pipelines, gas pressure regulators, gas meters, etc.) can be used without problems for this new fuel.

**Keywords:** hydrogen, green hydrogen, renewable energy sources, mixed gas, natural gas-hydrogen mixture, gas system components

## 1. Introduction

The use of green hydrogen has the potential to address energy scarcity and environmental challenges by helping to reduce carbon emissions and make the energy industry more sustainable. As green hydrogen is still relatively expensive, the production costs of renewable energy sources remain high. Further research, development and price reduction are needed to make it widely available and competitive with conventional fossil fuels. Hydrogen can be produced by electrolysis, but there are other conventional ways of producing hydrogen. Hydrogen can also be produced using fossil fuels (such as natural gas), which produces carbon dioxide emissions, which are not environmentally friendly. Using energy from our renewable energies (wind, hydro, photovoltaic) to produce green hydrogen and blend it into the natural gas distribution pipeline could go some way to replacing conventional natural gas. This would gradually reduce the use of fossil fuels and emissions. Another option is to produce hydrogen directly at the point of consumption using an on-site electrolysis reactor at the energy user's premises. This process can be used, for

example, in places where sufficient renewable energy sources are available, such as small-scale renewable energy sources. Expanding the possibilities, there are now good options for storing hydrogen on a small and industrial scale.

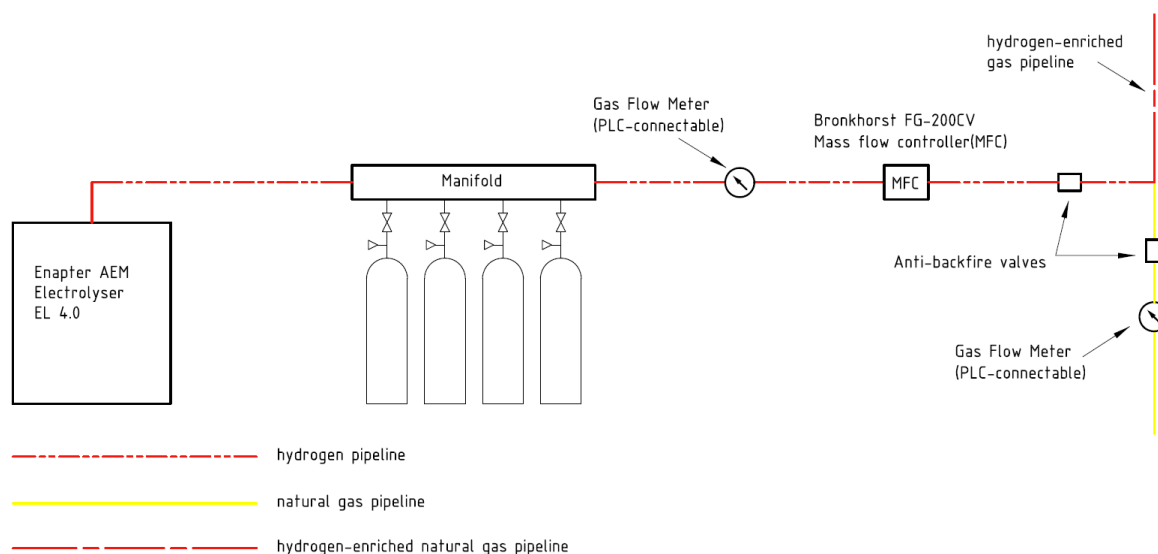
## 2. Hydrogen blending at the point of consumption

An example of on-site hydrogen blending is shown in Figure 1. where hydrogen is produced using the commercially available Enapter AEM Electrolyser EL 4.0. The main features of this anion exchange membrane electrolyzer are as follows:

Hydrogen production: max. 500 l/h;  
Volume: 0.46 x 0.64 x 0.27 m;  
Mass: 42 kg;  
Output: 99.9% pure hydrogen, max. pressure 35 bar;  
Power requirement: 2,4 kW;  
Energy consumption: 4,8 kWh/Nm<sup>3</sup> hydrogen;  
Price: approx. 8.000 €

An important component of the system is the Bronkhorst FG-200CV mass flow controller with a maximum flow rate of 540 l/h, installed in the hydrogen pipeline.

The addition of hydrogen to natural gas alters the characteristics of the fuel gas. Depending on the combustion system, burner design, and other operating conditions, these alterations can lead to higher combustion temperatures and laminar combustion velocities, and may also result in changes in flame positions and shapes. For gas appliances originally designed to operate on natural gas, these effects could pose certain risks, such as the possibility of flashback, reduced operational safety, material degradation, increased emissions of nitrogen oxides, and efficiency losses. [1]



**Figure 1.** Hydrogen production and blending at the point of use



## 2.1. Hydrogen-Enriched Natural Gas (HENG)

Hydrogen-Enriched Natural Gas (HENG) is a blend of hydrogen and natural gas that is created by introducing hydrogen into the natural gas distribution system. The hydrogen content in HENG can vary, but commonly, it is in the range of 5% to 20%, meaning that the mixture contains 5% to 20% hydrogen gas by volume, with the rest being natural gas.

## 3. Technical issues to be clarified

A number of technical issues need to be clarified before a new energy carrier (in this case, a natural gas-hydrogen mixture) can be introduced.

These issues arise in relation to the new fuel:

1. combustion properties,
2. production and storage possibilities,
3. areas of use,
4. safety aspects,
5. application issues.

This paper focuses on points 1, 2, and 5.

### 3.1. Combustion properties

The properties of hydrogen (including its combustion characteristics) are listed below.

- Its raw material is available in unlimited quantities (e.g. in the form of water).
- Several production methods can be used on an industrial scale.
- Its combustion product is water, it does not pollute the environment.
- It can be used to generate electricity directly through fuel cells, and can also be used to generate electricity on a microscale.
- It has a high energy density per unit mass:  
 $H_{s,n}=39 \text{ kWh/kg} = 3,5 \text{ kWh/m}^3$   
for comparison, similar properties of methane:  $H_{s,n}=15 \text{ kWh/kg} = 11 \text{ kWh/m}^3$
- Wide explosion concentration range: 4-77 %, (H natural gas: 5-15 %).
- High flame temperature (with air): 2045 °C (methane: 1875 °C).
- Liquefiable gas.
- During burning it does not produce carbon dioxide but it does form atmospheric pollutant nitrogen oxides
- It would be an obvious option for storing energy generated by wind and solar power.
- Blended with natural gas hydrogen substitute hydrocarbons. It can also be used in vehicles to replace conventional fuel.



### 3.2. Production of hydrogen, [2-3]

Hydrogen can be produced by natural gas cracking (steam reforming), where natural gas is converted into carbon monoxide and hydrogen at  $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  using a nickel-coated or alumina catalyst ring, and the two gases are separated in a further process, see Figure 2. Prior to the reforming step, the natural gas undergoes a preliminary cleaning process and is then converted with steam in the reformer, maintaining a molar ratio of  $\text{C} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 2.5$ . The reforming reactions take place at temperatures of up to  $850^{\circ}\text{C}$  and a pressure of approximately 20 bars, as outlined in the following main reactions:

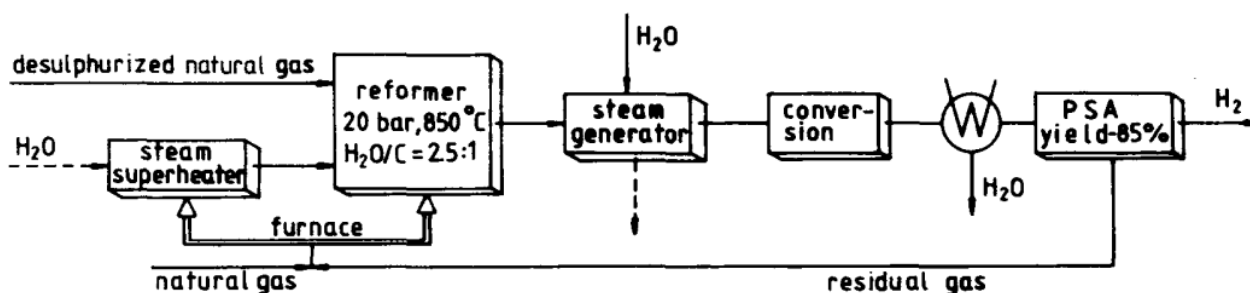
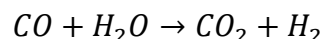
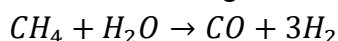
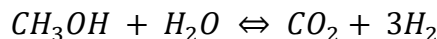


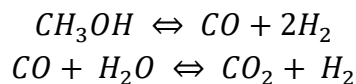
Figure 2. Conventional hydrogen production [2]

Once water condenses, the resulting dry gas mixture is directed to a pressure swing adsorption plant, where high-purity hydrogen is produced with an approximate yield of 85%. The quality of the residual gas is comparable to lean gas and is utilized for fueling the steam reformer, supplying about 1/7 of its heat demand. The remaining heat necessary for the process is generated through the combustion of natural gas.

A similar process is the reforming of methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). The steam reforming of methanol occurs through the following reaction [3]:



This reaction can be seen as the combined result of methanol decomposition and the water-gas shift reactions:



Thermodynamically, the steam reforming of methanol becomes feasible at temperatures exceeding  $160^{\circ}\text{C}$ . Achieving a high conversion of methanol is possible by operating at elevated temperatures and with higher molar ratios of water to methanol.

The most environmentally friendly but most expensive hydrogen production process is the method using electricity from renewable energy sources (e.g. solar power generation), which



is based on the electrolysis of water. In this case, the electrical conductivity of the water is usually improved by mild acidification or alkalisation.

**Table 1.** Energy demand for hydrogen production (Data from reference [4])

Procedure	Energy demand [kWh/Nm <sup>3</sup> ]
Natural gas decomposition	0.05
Methanol decomposition	0.05
Electrolysis	4.51

There are also attempts to produce hydrogen biologically.

Hydrogen production by photobiological means is also possible. The Biological Research Centre of the Hungarian Academy of Sciences in Szeged has developed its own method to produce hydrogen gas using algae plants. The results of this research could be an environmentally friendly alternative for hydrogen production. The principle of the process is that at night, green algae produce hydrogenase enzymes in an oxygen-free environment. When exposed to light, hydrogen production is triggered. During photosynthesis, large amounts of oxygen are produced and the hydrogenase enzymes lose their activity and hydrogen production stops. Hydrogen production can be enhanced by stressing the algae, but this can quickly lead to cell death.

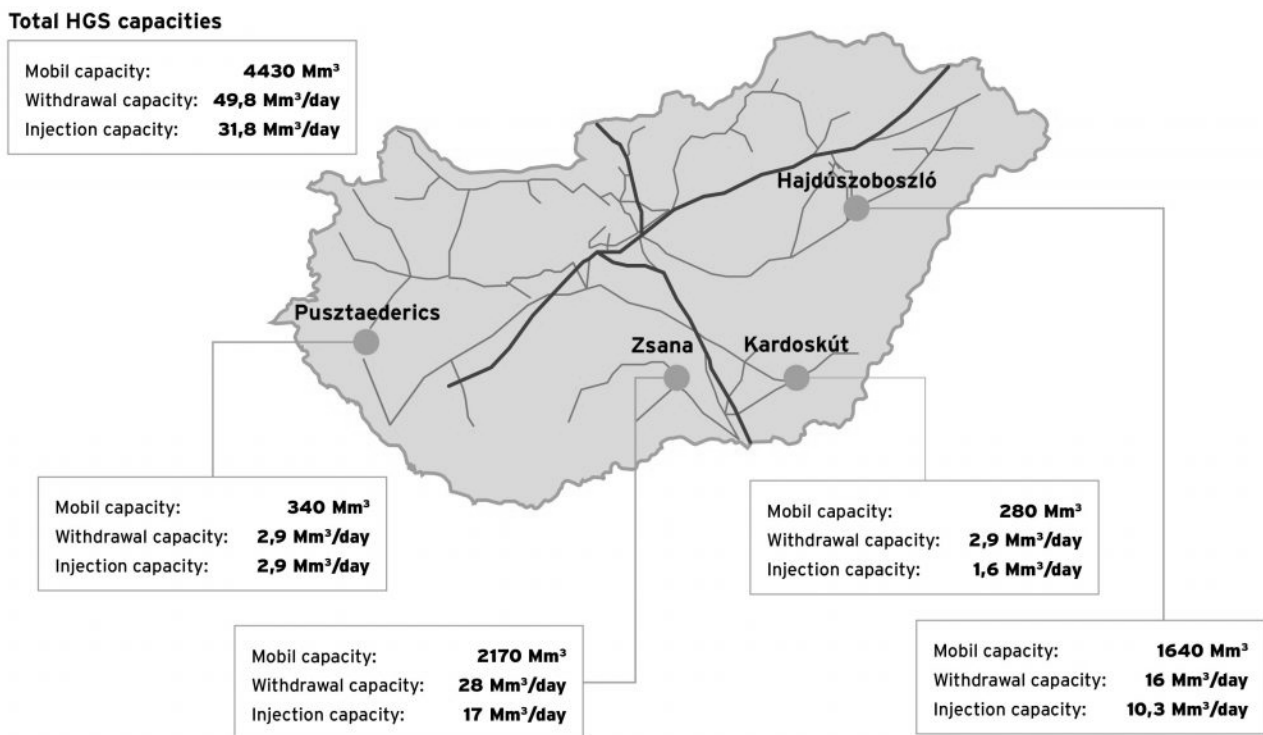


**Figure 3.** Single-celled green alga *Chlamydomonas reinhardtii* under the microscope [11]

### 3.3 Industriail-scale hydrogen storage

Storage can take place in gaseous and liquid form in tanks and cylinders at pressures up to 200 bar. In solid form the gas may be stored as metal hydrides, nanostructured materials. It can also be stored in tanks, cavities and porous layers as hydrogen or converted to methane. Hydrogen can be converted to methane by reacting with carbon dioxide. The methane produced can be fed into the natural gas grid and stored in existing gas storage facilities in porous rock. The total storage capacity in Hungary in the four storage facilities is 4,43 billion

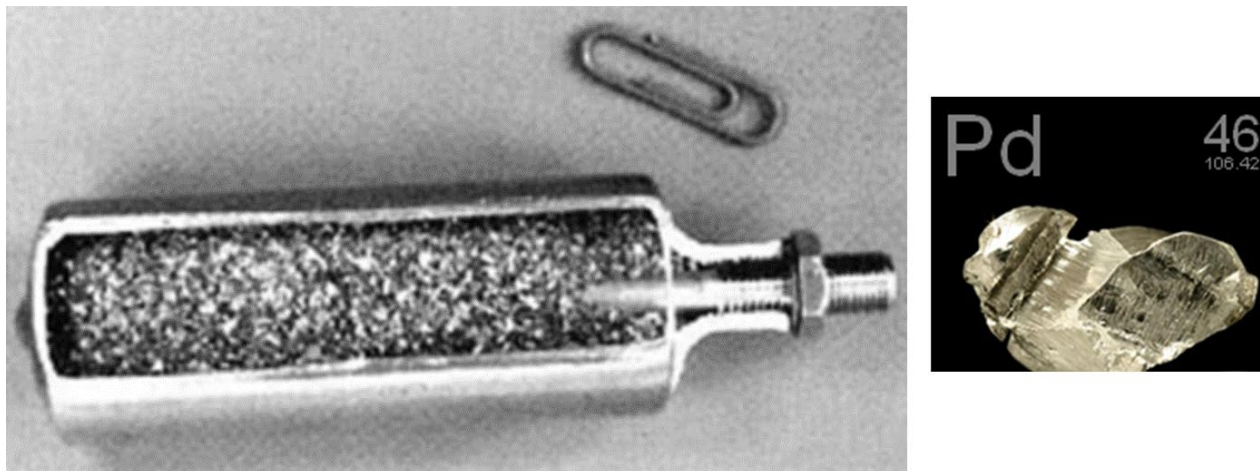
m<sup>3</sup>, which is about 2/3 of Hungary's annual natural gas demand. In Hungary, gas storage facilities have a porous geological structure. In most cases, the rock is sandstone (Hajdúszoboszló, Pusztaederics, Kardoskút), with one exception (Zsana), where it is limestone. These geological formations, from which gas extraction has been completed, have been converted into underground gas reservoirs because they have been found suitable. [6]



**Figure 4.** Capacities of Hungarian Gas Storage (HGS) [6]

### 3.4 Metal-hydrid container

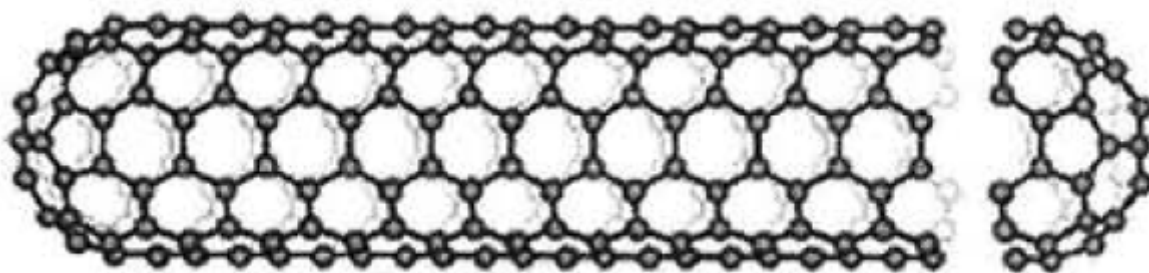
There are also solid-state containers that absorb hydrogen and bind it on their surface. Of course, the hydrogen can then be recovered from these metal hydrides. This way, metal hydrides can be used as hydrogen storage, see in Figure 5. In the metal lattice, the hydrogen fills the space between the lattices and expands the crystal lattice. An example of such a material is palladium, which can trap 500-900 m<sup>3</sup> of hydrogen per 1 m<sup>3</sup>. Absorption occurs when hydrogen is absorbed and desorption occurs when it is released. [8]



**Figure 5.** Metal-hydride container [8]

### 3.5 Nanostructured storage

Storage in nanostructured materials has been made possible by new synthesis processes, where small (1-100 nm) nanostructured materials with appropriate spatial structures and specific properties are created. For example, such nanostructured materials can be prepared on a carbon base in the form of nanotubes. Their small size significantly affects the adsorption and dissociation of hydrogen in these materials. The maximum amount of hydrogen that can be bound in carbon-based nanotubes at a specific surface area of 1315 m<sup>2</sup>/g is 3.0% by weight. [8]



**Figure 6.** Carbo Nano Tank (CNT) [8]

## 4. Application issues of HENG (Hydrogen-Enriched Natural Gas) [1][7][9]

In 2016, the German DVGW (German Technical and Scientific Association for Gas and Water) carried out extensive research to confirm that hydrogen can be added to natural gas at a maximum concentration of 10% by volume for domestic and small consumer gas applications.

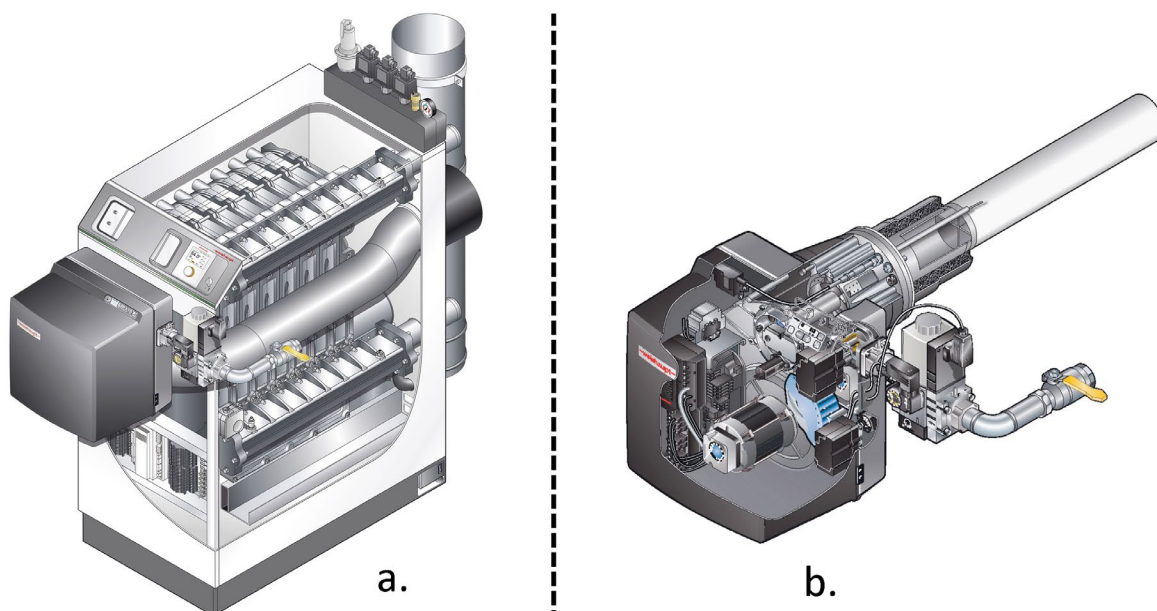
It should be noted that the addition of hydrogen to natural gas causes a change in combustion air demand, combustion quality and, through the combustion heat, in the performance of the gas appliance. In the study, a total of 174 gas appliances of different



types installed in a gas supply district were loaded for a total of 2683 hours with a natural gas-hydrogen mixture containing 2, 3, 4, 6.5 and 9 % hydrogen by volume, alternating between 2, 3, 4, 6.5 and 9 % hydrogen by volume. The main findings of the study were as follows:

- No negative effects were observed in the operation of the gas appliances as a result of hydrogen mixing during the several months of hydrogen loading period, under the typical appliance settings used in practice and the control of hydrogen concentration at the appliance.
- On average, the CO emissions have decreased and the number of appliances with outliers in this respect has decreased.
- Trouble-free control, start-up, shut-down and operational behaviour even under high hydrogen concentrations and worst-case conditions.
- Reduction in maximum power by a few percentage points due to lower heat of combustion per unit volume.

An increasing number of manufacturers of various gas system components are declaring the suitability of their equipment for natural gas-hydrogen mixtures. For example, the manufacturer's declaration states that the Weishaupt WTC-GB 470-A and 620-A condensing gas boilers can be fired with 20 % hydrogen. Fiorentini has also issued similar declarations for its gas pressure regulators.



**Figure 7.** WTC-GB condensing gas boiler (a) and its gasburner (b) [12]

In Germany, tensile tests have been carried out on steel transmission lines of L360 material cyclically loaded at 80 bar, distinguishing between cleavage, ductile and mixed fracture surfaces. It was found that micro-cracks in the tubular material lead to penetration of hydrogen atoms into the crystal lattice and thus to brittle fracture, that cyclic loading causes





a faster growth of cracks and that the properties of the tubular material can change even at a few percent hydrogen loading, and care must be taken to ensure that the tubular material used is suitable for hydrogen transport.

A second series of tests was carried out to determine the amount of gas that leaks through plastic distribution lines when they are clamped. Based on 190 test results, it was found that the amount of gas leakage depends on the gas composition (density and viscosity) and that the amount of gas leakage is hardly different from that of pure methane up to 30 % vol hydrogen, but increases significantly above that.

The results of the studies carried out so far on the applicability of the natural gas-hydrogen mixture are encouraging, but further studies under all possible operating conditions are needed to ensure that this new fuel can be used without problems and accidents in all gas system components.

## 5. Conclusions

Events in recent years suggest that hydrogen will play a significant role in future energy systems, as a means of large-scale energy storage, transmission and decarbonisation in challenging sectors such as mobility and industry. Hungary and other EU Member States are planning to promote the direct injection of hydrogen into existing natural gas infrastructure. In the near future, appliances and equipment could be supplied with a mixture of hydrogen and natural gas. In addition to the injection of blended gas through the gas network, attention should be paid to the production and storage of hydrogen that can be hydrogenated close to the point of use. On-site production and storage of hydrogen could be an excellent option for storing the surplus energy that is periodically generated in small-scale energy sources for residential users. This could also relieve the electricity grid from the additional burden of intermittent renewable sources (e.g. solar panels). Hydrogen in on-site storage, mixed with natural gas, could be combusted in a combustion plant to generate heat or even used in a fuel cell to generate electricity.

Given the significant differences between the physical and chemical properties of natural gas and hydrogen, a switch to hydrogen-enriched natural gas or even pure hydrogen could have implications for the combustion processes of residential and commercial appliances, both in terms of performance and safety. The consequences are obviously more pronounced the higher the hydrogen content of the fuel gas. How appliances and equipment respond to higher hydrogen content in the gas is an important consideration. This raises a number of considerations relating to the quality of the gas. The addition of hydrogen affects gas quality properties such as relative density, calorific value, adiabatic flame temperature and laminar burning rate. Many researchers and experts are working on solving these challenges and the results are promising. Equipment for the production, storage and combustion of hydrogen is now available, but its widespread deployment is still limited by high prices. The production, storage and widest possible use of green hydrogen is a good alternative to reduce the environmental impact.

## 6. References

- [1] Leicher, J.; Schaffert, J.; Cigarida, H.; Tali, E.; Burmeister, F.; Giese, A.; Albus, R.; Görner, K.; Carpentier, S.; Milin, P.; et al. The Impact of Hydrogen Admixture into Natural Gas on Residential and Commercial Gas Appliances. *Energies* 2022, 15, 777. <https://doi.org/10.3390/en15030777> **(journal article)**
- [2] Oertel, Michael; Scmitz, Johannes; Weirich, Walter; Jendrysek-Neumann, Ditmar; Schulten, Rudolf. Steam Reforming of Natural Gas with Integrated Hydrogen Separation for Hydrogen Production. *Chern. Eng. Technol.* 10 (1987) 248-255 Verlagsgesellschaft mbH, D6940 Weinheim, 1987 **(journal article)**
- [3] Pan, Chao; He, Ronghuan; Li, Qingfeng; Jensen, Jens Oluf; Bjerrum, Niels J.; Hjulmand, Henrik Andersen; Jensen, Anders Børsting. Integration of high temperature PEM fuel cells with a methanol reformer. *Journal of Power Sources* 145 (2005) 392–398 **(journal article)**
- [4] Szilágyi, Zsombor; Vajda, József. A hidrogén szerepe az energiatárolásban. *Épületgépész X.évfolyam*, 2021/1. március **(journal article)**
- [5] Mahajan, Devinder; Tan, Kun; Venkatesh, T.; Kileti, Pradheep; Clayton, Clive R. Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies* 2022, 15, 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>
- [6] <https://mvm.hu/en/Tevekenysegunk/Gaztarolo> **(website)**
- [7] DVGW. Wasserstoff—Schlüssel für das Gelingen der Energiewende in Allen Sektoren; Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e.V. (DVGW): Bonn, Germany, 2019
- [8] Emödi, I.; Tölgyesi, Z.; Zöldy, M. Alternatív Járműhajtások. Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft. Budapest, 2006. ISBN 963 9005 738 **(book/chapter in book)**
- [9] Melania, M. W.; Antonia, O.; Penev, M. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Technical Report NREL/TP-5600-51995 March 2013 **(book/chapter in book)**
- [10] Nagy, Valéria ; Podmaniczki, Anna; Vidal-Meireles, André; Tengölics, Roland; Kovács, László ; Rákhely, Gábor ; Scoma, Alberto; Tóth, Szilvia Z. Water-splitting-based, sustainable and efficient H<sub>2</sub> production in green algae as achieved by substrate limitation of the Calvin–Benson–Bassham cycle *Biotechnol Biofuels* 11, 69 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1069-0> **(journal article)**
- [11] [https://mta.hu/tudomany\\_hirei/zoldalga-hidrogentermeles-fotoszintezis-mta-szbk-109797](https://mta.hu/tudomany_hirei/zoldalga-hidrogentermeles-fotoszintezis-mta-szbk-109797)**(website)**
- [12] <https://www.proidea.hu/termekujdonsagok-1/professzionalis-kondenzacios-gazkazan-20868.shtml>**(website)**



# Troškovi emisije ugljičnog dioksida u proizvodnji mineralnih gnojiva

## *Carbon dioxide emissions costs in mineral fertilizers production*

V. Božić<sup>1,\*</sup>, I. Sutlović<sup>2</sup>, D. Miletić<sup>3</sup>, J. Böhm<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Vodovod grada Vukovara d.o.o., Vukovar, Croatia

<sup>2</sup> University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia

<sup>3</sup> Ina d.d., Zagreb, Croatia

<sup>4</sup>Terra Energy Generation Company d.o.o., Zagreb, Croatia

\* Corresponding author. E-mail: bozic.vlatka@gmail.com

### Abstract

The production of mineral fertilizers is an important segment of agriculture. Production of ammonia, urea and mineral fertilizers represents an important part of the Croatian industrial tradition in the field of agriculture and petrochemical industry. It produces mineral fertilizers using natural mineral raw materials, natural gas, atmospheric nitrogen and oxygen, which results in greenhouse gas emissions. Schemes and block diagrams of ammonia and urea production are presented in the paper. Also, the process of ammonia synthesis using the medium-pressure Kelleg process from natural gas and the process of urea synthesis from residual carbon dioxide are described. Direct and indirect greenhouse gas emissions especially those of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from urea and ammonia production are analysed. The method of calculating the preliminary free allocation of emission units is presented and the preliminary total amount of emission units is determined by summing up the allocation of all sub-installations. By adding up the allocation of free emission units for each sub-facility, total amount of free emission units for the plant are calculated. The total annual costs of carbon dioxide emissions were obtained by subtracting the total amount of free emission units from the total carbon dioxide emission.

**Key words:** carbon dioxide, fertilizer, emission, ammonia, urea

### 1. Introduction

Although technological and economic progress affects various segments of the environment, this paper concentrates on the production of mineral fertilizers, which is a source of carbon dioxide emissions. The use of mineral fertilizers is important for the agricultural segment. In the following, the production process of ammonia and urea, which

are further used in the fertilizer production process, is analyzed. Ammonia synthesis processes can be divided according to the total pressure of the reaction mixture, and this analysis concentrates on the medium-pressure Kelleg process. At the same time ammonia and mineral fertilizers production is source of greenhouse gases CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O and with other human activities such as burning of fossil fuels, energy transformations, agricultural activities and similar activities greatly contribute to the accumulation of excessive emissions in the atmosphere. In effort to control lower effectively greenhouse gases emissions certain climate and energy policies were introduced. An example of such a policy is the "Cap and trade" system, according to which each member of the system receives a certain amount of free emission permits. It is obliged to pay additionally for the excessive emission of greenhouse gases. In further analysis part of technological chain of mineral fertilizers production is shown in order to define main sources of greenhouse gases.

## 2. Ammonia production process

According to the total pressure of the reaction mixture, ammonia synthesis processes can be divided into:

- low pressure (100 to 150 bar),
- medium pressure (200 to 500 bar),
- high pressure (800 to 1000 bar).

Low-pressure processes are rarely used, as they result in a low utilization of ammonia, around 8 to 13%.

The medium-pressure process is also called the Kelleg process. This process produces ammonia in a mineral fertilizer factory in Croatia.

The high-pressure process is also called the Claude process. It includes the Haber-Bosch process, which is carried out at a temperature of 500°C and a pressure of 1000 bar. This process is rarely used due to high costs at high pressure, although the utilization of ammonia is high and amounts to about 40% [1].

Natural gas is used as a raw material for the production of ammonia. Its composition may vary within the permitted limits dominantly containing methane.

The overall process is broken down for simplicity. The ammonia production process is carried out through six reactions:

- (1) separation of sulfur compounds from natural gas,
- (2) steam reforming of methane,
- (3) conversion of carbon monoxide into carbon dioxide,
- (4) removal of carbon dioxide,
- (5) methanation of remaining CO and CO<sub>2</sub>,
- (6) process of direct synthesis of ammonia.

The total reaction of all stages can be expressed stoichiometrically as  

$$7 \text{ CH}_4 + 8 \text{ N}_2 + 2 \text{ O}_2 + 10 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 16 \text{ NH}_3 + 7 \text{ CO}_2 .$$





The basic raw materials for the synthesis of ammonia, hydrogen and nitrogen, are obtained by special procedures in separate production units. For initial laboratory research, hydrogen was obtained by electrolysis of water, and then from water gas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) by the coke gasification process. Catalytic conversion of separated CO by hydration reaction with water vapor ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) with Fe/Cr catalyst increases hydrogen yield. Today, it is obtained exclusively by the process of steam reforming of natural gas, methane, with water vapor and with a Ni catalyst, ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ ). The result of this process called synthesis gas [2]. The described process of ammonia production from synthesis gas is shown in the block diagram in Figure 1.

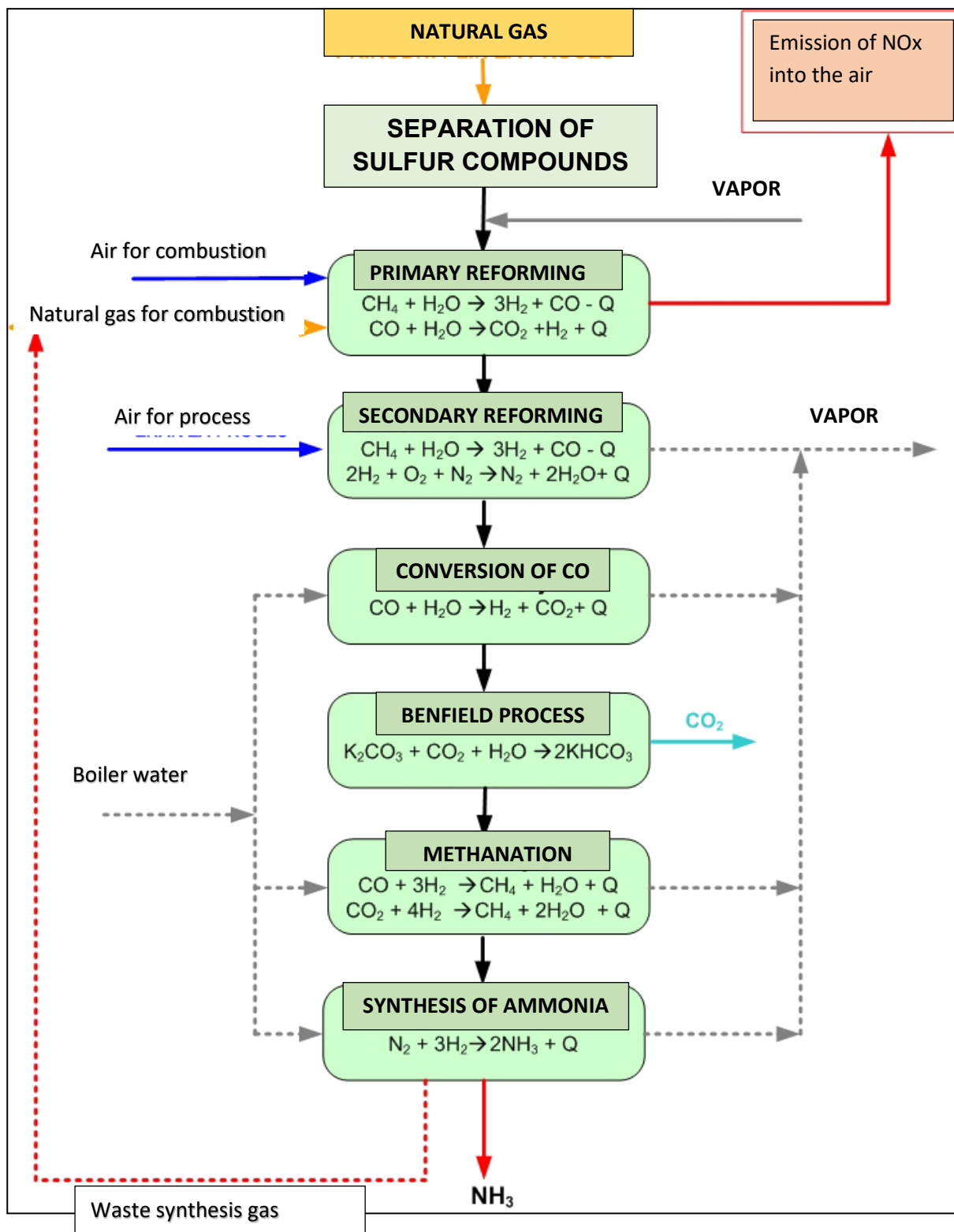


Figure 1. Block diagram of ammonia production from synthesis gas [1]

The process takes place in the following order:

1) Separation of sulfur compounds from natural gas

Sulfur compounds are removed from natural gas until the sulfur content is less than 1 mg kg<sup>-1</sup>. The process is carried out in two stages:

1a) Hydrosulfurization of methane

$S-R + H_2 \rightarrow H_2S + H-R$  with Co/Mo-oxide as a catalyst

Process conditions: pressure around 20-40 bar and temperature 350-400 °C. At high pressures and with the presence of hydrogen Co/Mo or Ni/Mo, decomposition of organic compounds occurs and hydrogen sulfide is formed.

1b) Separation of H<sub>2</sub>S

The hydrogen sulfide formed in 1a) is separated by oxidation to elemental sulfur or by reaction with solid ZnO. This takes place inside two desulfurizers, and the total amount of ZnO catalyst must enable a nominal 6 months of operation per vessel [3].

2) Steam reforming of methane (obtaining hydrogen)

$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2 \quad \Delta H = + 206 \text{ kJ mol}^{-1}$

The conversion of methane with water to obtain synthesis gas is an endothermic reaction. During this part of the process, NO<sub>x</sub> is directly emitted into the atmosphere.

3) Conversion of carbon monoxide into carbon dioxide

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad \Delta H = - 41.2 \text{ kJ mol}^{-1}$

It is about carrying out a substitution conversion. Considering that it is a reversible reaction, high temperatures favor the speed of the reaction, and low temperatures favor equilibrium. The process is carried out in two stages, while a different catalyst is used in each stage. Along with carbon dioxide, an equivalent amount of hydrogen is also formed [2].

4) Removal of carbon dioxide

In countercurrent columns, with the help of a K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution or monoethanolamine, CO<sub>2</sub> is removed from the outlet gases. The removal process is carried out in two stages through the contact of the gas with the Benfield solution using columns with fillers. Benfield solution contains an aqueous solution of potassium carbonate and carbon dioxide. During the Benfield process, CO<sub>2</sub> is emitted into the atmosphere (shown by the blue arrow in Figure 1 [4]).

5) Methanation of remaining CO and CO<sub>2</sub>

After CO<sub>2</sub> absorption, the gas mixture contains about 0.2% CO and up to 500 mg kg<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>.

$CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$

The process is carried out in the methanator at a temperature of about 300°C. The methanator is a container with a nickel-based catalyst layer. Nickel accelerates the reaction

of carbon monoxide and carbon dioxide with hydrogen, whereby methane and water are produced as reaction products. It is an exothermic reaction [2].

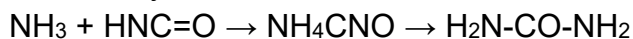
#### 6) Process of direct synthesis of ammonia

Through the process of direct synthesis, ammonia can be obtained by reacting a stoichiometric mixture of nitrogen and hydrogen, whereby the resulting ammonia is separated.

In general, the process is carried out at high pressure and temperature, which reduces the carbon in the steel. Steel loses its mechanical properties. The original reactors were made of steel pipes, which were of little durability. The problem was solved by C. Bosch, who made a reactor according to the "tube-in-tube" principle [2].

### 3. Urea production process

The first synthesis of urea was carried out in 1828 by Friedrich Wöhler.



The synthesis took place from ammonia and isocyanic acid through ammonium cyanate to urea. Today's production of urea is carried out through the following two stages:



The optimal conditions for conducting are a temperature of 170°C and a pressure of 140 bar. It is an exothermic reaction that is carried out with a large stoichiometric excess of ammonia. Ammonium carbamate is formed.



The optimal conditions for conducting the second stage are a pressure of 100-200 bar and a temperature of 160-180°C. However, the reaction takes place very quickly already at 160°C. This stage of urea production implies an endothermic reaction by which an excess of CO<sub>2</sub> or NH<sub>3</sub> is added to ammonium carbamate, and the balance shifts towards the formation of urea. The newly formed urea solution is a good solvent for unreacted NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>. The process itself can be improved to a utilization of 85% by optimizing the heat flow [2].

### 4. System of trading permits for carbon dioxide emissions (EU ETS)

The EU has implemented the European Emissions Trading System (EU ETS). The ETS is based on a cap-and-trade system. This system regulates the emission of greenhouse gases (GHG) into the atmosphere. Cap and trade means that the government limits the amount of gases released into the environment by allocating a certain amount of permits to each industry that is part of the system. At the same time, direct or indirect trading of licenses is allowed. Permits are issued once a year, according to pre-defined criteria. Each permit allows the company to emit one ton of emissions [5].

The prices of EU permits for CO<sub>2</sub> emissions vary every day. On July 22, 2023, they amounted to EUR 95,850 per permit.



The ultimate goal of this mechanism is to reduce greenhouse gas emissions by forcing some companies to reduce CO<sub>2</sub> emissions or pay a fine if they don't. In this way, each company is enabled to choose the most profitable and efficient combination of buying and selling in order to ultimately contribute to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions [6].

### 5. Example of a estimate for the preliminary allocation of free emission units for an ammonia production sub-installation

The final process of ammonia production includes all direct and indirect processes that contribute to its production along with the intermediate product hydrogen. However, the reference value does not cover the production of ammonia from other intermediate products. The total consumption of electricity within the limits of the system is taken into account for indirect emissions.

The preliminary allocation of free emission units for the ammonia production sub-installation is calculated as follows:

$$(1) F_{p,k} = \frac{Em_{direct} + Em_{Netto\ imported\ heat}}{Em_{direct} + Em_{Netto\ imported\ heat} + Em_{indirect}} \times BM_p \times HAL_p \times CLEF_{p,k}$$

$F_{p,k}$  - annual preliminary allocation for the benchmark sub-installation for the product producing ammonia in year k (EUA)

$BM_p$  - reference value for ammonia (EUA/product unit); the value can be found in the European Commission document on climate change for the current period

$HAL_p$  - historical level of activity, the arithmetic mean value of annual production during the reference period, which was determined by the collected reference data (product unit); the exact value can be found in the document Delegated Regulation of the EU Commission

$CLEF_{p,k}$  - applicable carbon leakage exposure factor for product p within year k; value can be found in the Document on the Harmonized Free Allocation Methodology for the EU ETS (2020)

$Em_{direct}$  - direct emissions within the boundaries of the ammonia production system during the reference period

$Em_{Netto\ imported\ heat}$  - emissions from each net measurable heat taken by the ammonia sub-installation from some other installations covered by the ETS and other installations not covered by the ETS during the reference period

$Em_{indirect}$  - indirect emissions from electricity consumption. of energy within the limits of the ammonia production system during the reference period [7].

$Em_{indirect} = electricity\ consumption\ energy \times 0.376$

$Em_{indirect} = 36660.208\ MWh \times 0.376 = 13\ 784.23821\ MWh$

$$F_{p,k} = \frac{163\ 428,0\ CO2\ eq + 56\ 485,0\ CO2\ eq}{163\ 428,0\ CO2\ eq + 56\ 485,0\ CO2\ eq + 12\ 188\ 023,43\ CO2\ eq} \times 23\ 958\ 607 \left( \frac{EUA}{units\ of\ product} \right) \times 1,619\ units\ of\ product \times 1 = 687\ 479,5054\ EUA$$

The calculation was made based on the approximate values of individual factors.



## 6. Conclusion

In the last few decades of the last century, under the leadership of the United Nations and the World Meteorological Organization, key steps were taken in defining energy and climate stability for the coming century. Three mechanisms have been proposed to achieve this goal, and one of them is the trading of CO<sub>2</sub> emissions, the so-called Cap and trade mechanism. In this way, the EU tried to force polluters to reduce greenhouse gas emissions into the environment. In accordance with this mechanism, each member of the system receives a certain amount of free emission permits. It is obliged to pay additionally for the excessive emission of greenhouse gases. One form of industry that is subject to this mechanism is the mineral fertilizer production industry.

Greenhouse gas emissions primarily occur in combustion processes, energy production and ammonia production (CO<sub>2</sub> emission) and nitric acid production process (N<sub>2</sub>O emission). As part of this paper, the method of calculating the preliminary free allocation of emission units is presented. The preliminary total amount of emission units for the facility is calculated by adding up the allocations of all sub-facilities. The prices of EU permits for CO<sub>2</sub> emissions vary every day. Thus, on July 22, 2023, they amounted to EUR 95,850 per permit. Taking into account the preliminary allocation of free emission units in the production of mineral fertilizers and the price of EU permits, it is possible to calculate how much an individual plant must pay for excessive CO<sub>2</sub> emissions.

## 7. Literatura

- [1] Private communication
- [2] Janović, Zvonimir. Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi. Zagreb: Hrvatsko društvo za goriva i maziva, 2005. (ISBN 953-97942-2-6)
- [3] Private communication
- [4] Grgić, Ivan; Hrnčević, Lidia. European Union emissions trading system // Nafta i plin, 40(2020) 163– 164; 70-82. (ISSN 2718-3114)
- [5] <https://climatechange.novascotia.ca/nova-scotias-cap-trade-program> (accessed May 19, 2023)
- [6] Tumara, Dražen. Methodology of carbon dioxide emission calculation (master's degree thesis). University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, 2015.
- [7] Guidance on determining the allocation at installation level, Guidance Document n°2 on the harmonised free allocation methodology for the EU ETS (2020), European commission directorate – general climate action, Directorate B - European and International Carbon Markets, 2020.



# **PEDELEC efficiency analysis in the area of the City of Osijek**

## ***Analiza učinkovitosti PEDELEC-a na području Grada Osijeka***

**S. Aračić<sup>1</sup>, H. Glavaš<sup>1,\*</sup>, D. Dorić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Osijek, Croatia

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [hrvoje.glavas@ferit.hr](mailto:hrvoje.glavas@ferit.hr)

### **Abstract**

The use of PEDELEC is becoming increasingly popular around the world. In the context of transport and energy efficiency policies, PEDELEC are promoted as one of the solutions to reduce traffic congestion and pollution in urban areas. The justification of their use in urban areas is often questioned. The paper describes the historical development of PEDELEC, its technical characteristics, and different transport strategies with a focus on reducing dependence on private transport and promoting the use of bicycles, as well as factors influencing the choice of transport mode. Using the open source software GIS, two characteristic bicycle routes in the City of Osijek were mapped and the traffic speed was determined.

**Key words:** PEDELEC, electric bicycles, efficiency, traffic, city.

### **Sažetak**

Upotreba PEDELEC-a bilježi rast i popularnosti diljem svijeta. U sklopu prometne i energetske učinkovitosti PEDELEC se promovira kao jedno od rješenja za smanjenje prometnih gužvi i onečišćenja gradskih sredina. Često se preispituje opravdanost njihove uporabe u urbanim sredinama. Rad opisuje povijesni razvoj PEDELEC-a, njegove tehničke karakteristike, te različite prometne strategije s naglaskom na smanjenje ovisnosti o individualnom prijevozu i poticanje korištenja bicikala, kao i čimbenike koji utječu na odabir prijevoznog sredstva. Korištenjem GIS podrške otvorenog koda mapirana su dva karakteristična biciklistička pravca Grada Osijeka i određena je brzina prometovanja.

**Ključne riječi:** PEDELEC, električni bicikli, učinkovitost, promet, grad





## 1. Introduction

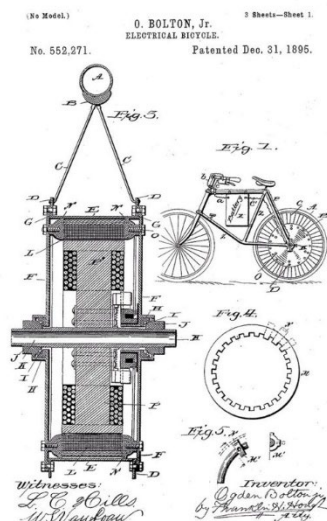
The task of the work is to analyze the real possibilities of application of PEDELEC in the territory of the city of Osijek, i.e. other energy efficiency strategies in transport, changes in means of transport. The working methodology and the research plan are based on the set goal. The research of the topic was conducted in four phases [1]. The historical development of PEDELEC and its technical characteristics are presented, and trends in the development of electric bicycles are listed. Transport strategies and guidelines for the development of transport infrastructure in Europe were analyzed. The choice of transport modes and the bicycle infrastructure of the city of Osijek were studied. Practical research included mapping of two bicycle routes in Vukovarska and Svačićeva streets. The results of the mapping were analyzed in detail and presented with numerical indicators and graphically. Based on the created diagrams of the speed of movement and a map showing the speeds of movement, areas with reduced speed of movement and factors affecting the speed of movement..

## 2. The history of the development of the bicycle with a focus on electromobility

Electric bicycles have a long history dating back to the 19<sup>th</sup> century. The first bicycles, called "Vélocipède" with pedals, were constructed in 1817 in Germany by Karl Freiherr von Drais. In the following years, the bicycle continued to develop, and in 1864 James Slater invented a chain that allowed the wheels to move independently. In 1870, James Starley added spokes to the wheels, which improved the bicycle's durability and stability. In 1885, John Starley Kemp designed a modern bicycle, the Rover, with two equally sized wheels and a frame that allowed the rider to sit upright. In 1888, rubber wheels appeared, improving riding comfort. In the 1990s and 2000s, electric bicycles became popular in Asia and Europe, particularly in China, Germany, Sweden, and the Netherlands, due to growing environmental awareness and the need for cheaper and more accessible transportation. Today, electric bicycles are one of the fastest growing categories of transportation, available in a variety of models and configurations for a wide range of uses.

During the 20th century, bicycles continued to evolve, and thanks to advances in battery technology and electric motors, electric bicycles gradually became available. In 1975, Panasonic introduced its first electric "pony" bicycle, and in 1989, Sanyo introduced NiCd batteries that improved battery performance and life. In 1993, Yamaha introduced its Pedal Assist System (PAS), and in 2002, European legislation on electric mobility, EU 2002/24/ EC, introduced regulations for electric vehicles. The definition of PEDELEC was given by the EU and is valid throughout Europe and may differ from definitions in the rest of the world. According to the same EU directive (standard EN15194) for motor vehicles, a PEDELEC is considered a bicycle only if it meets the criteria that the motor power does not exceed 250 W and the driving speed assisted by the electric motor does not exceed 25 km/h, [2].





**Figure 1.** The Electric Bicycle Patent - Ogden Bolton Jr [3]

In the 1990s and 2000s, electric bicycles became popular in Asia and Europe, particularly in China, Germany, Sweden, and the Netherlands, due to growing environmental awareness and the need for cheaper and more accessible transportation. Today, electric bicycles are one of the fastest growing categories of transportation, available in a variety of models and configurations for a wide range of uses. In 1975, Panasonic introduced its first electric "pony" bicycle, and in 1989, Sanyo introduced NiCd batteries that improved battery performance and life. In 1993, Yamaha introduced its Pedal Assist System (PAS), and in 2002, European e-mobility legislation, EU 2002/24/ EC, introduced regulations for electric vehicles. Mass, higher average speeds, and stronger acceleration, while there are no significant differences from the classic bicycle in other aspects. When riding, the biggest problems for the driver are hills and strong wind, which are not typical for the area of the city of Osijek. Despite the double mass of a classic bicycle, it allows easier overcoming of significant height differences, wind and reduces the load for people who should not be exposed to excessive physical effort [4]. Figure 2 shows the basic structure of the PEDELEC, where it can be seen that the electric bicycles are very similar to the classic bicycles and the only real difference is the additional electrical components: motor, battery, controller and screen of the control unit. The controller is an important part of the PEDELEC, which controls the operation of the motor and provides adequate assistance while riding by regulating the speed and torque of the motor. The system is based on Pedal-Assist-System (PAS) which manages the information it receives from the sensors through which it detects the activity of the pedals and provides assistance only when they move. The control unit for changing the assistance level, lighting, battery status and displaying current settings is usually located on the steering wheel. Most PEDELECs offer the ability to choose from 3 to 5 levels of assistance, depending on the model and manufacturer. Some models have an additional walk assist setting that provides assistance even when the rider is not on the bike to help push and reduce the need to lift the bike.

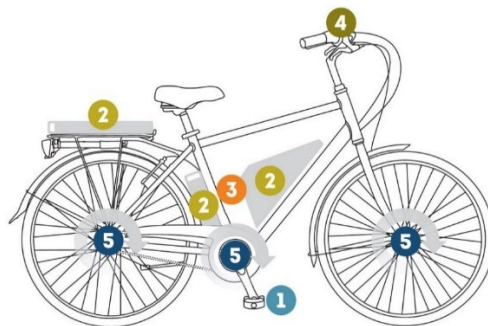


Figure 2. Basic structure of PEDELEC [5]

"Quad Sensor System" - The Yamaha Quad X2 system uses four sensors, Figure 3. In addition to the torque and cadence sensors, an incline sensor and a speed sensor are used. In this way, a level of assistance is achieved that is adapted to the current riding conditions [1]. The Quad system also has an automatic support mode (Figure 4), in which the controller automatically adapts the support level to the riding conditions.

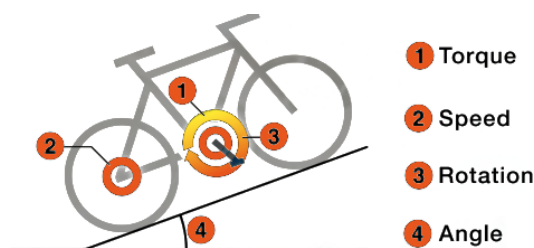


Figure 3. Quad sensor system

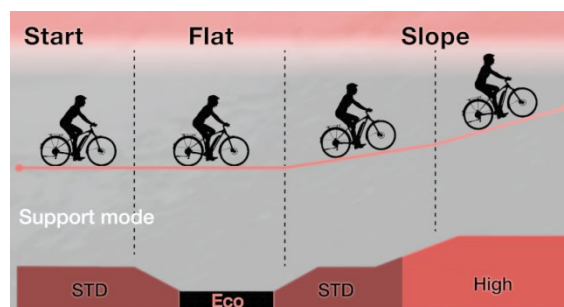
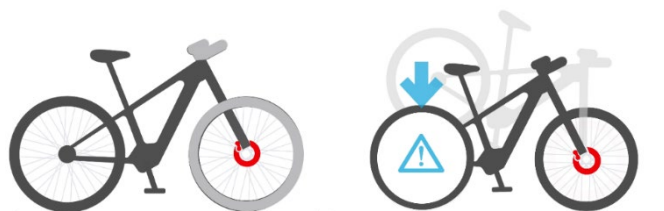


Figure 4. Automatic Support Mode

Among the trends in the development of PEDELEC charges is the tendency to increase the efficiency of batteries and motors to increase autonomy. Connectivity is evolving, they use features such as data transmission via Bluetooth and Wi-Fi, mobile and web applications through which it is possible to manage the settings in more detail or access the data stored on the ride computer [6]. An example of such a system is the app of the Shimano e-tube project - Free Shift and Auto Shift functionality of PEDELEC [7]: Free Shift - allows shifting while the pedals are not turning, the motor automatically shifts the front gear while the pedals are stationary, the gearbox simultaneously moves at the appropriate speed. In this setting, the rider still decides independently on the gear change, based on

which the system makes the change while the pedals are stationary and the bike is moving. Auto Shift - based on information about speed, cadence and pedal force, the control system shifts to the most appropriate gear completely independently. Integration of electronics, battery, brakes and other components into the bicycle frame. Parts designed primarily for electric bicycles are developed alarm and locking systems Bosch ABS (anti-lock braking system) braking system for PEDELEC, controls braking on the front wheel so that it prevents the front wheel to lock and prevents the rear wheel to lift [8], Figure 5 PEDELEC of different designs and uses, including urban, road, mountain and folding models, which allows a greater variety of choice and adaptability to the needs of users.



**Figure 4.** Bosch ABS braking system, [8]

### 3. Transport strategies and cycling infrastructure in Osijek

The number of inhabitants in urban areas of Europe has grown to 70% of the total population [9], which puts a great strain on the transport infrastructure and requires new transport strategies. In 2020, the European Commission presented the Green Paper "Towards a new culture for urban mobility". The Green Paper was the starting point for a broad consultation process with all relevant stakeholders on the possible role of the EU and the actions it should take. The consultation confirmed the added value of EU-level action in many areas of urban transport [10]. The use of bicycles has numerous health benefits, reduces air pollution, reduces congestion and shortens travel time. For this reason, transport strategies place great emphasis on the use of bicycles and PEDELEC. The city of Osijek follows the EU guidelines, which can be seen in Figure 5.



**Slika 5.** Bike sharing project "Bajsom na posao", [11]

Transport strategies are part of the European Union's broader goal of reducing greenhouse gas emissions from transport and creating a sustainable and resource-



efficient transport system. the EU Green Paper "Strategy for Sustainable and Smart Mobility - Steering European Transport into the Future" is a starting point for discussing and gathering stakeholder views to shape future policy and action on energy efficiency in transport. The strategy to increase the use of public transport and reduce dependence on individual transport aims to encourage people to use public transport as a viable alternative to individual car travel. By developing integrated public transportation systems, it enables people to easily and conveniently combine different modes of transportation. These include integrated single-ride tickets that allow people to switch between buses, trains, streetcars, and other forms of public transportation without having to buy multiple tickets. Integrated systems make it easier for users to transfer between different modes of transportation and encourage their use. Encourage the use of energy-efficient vehicles. The development of bike-share and rent-a-bike services can significantly encourage the use of bicycles as the primary mode of transportation. The Bicycle and Pedestrian Infrastructure Improvement Strategy aims to encourage people to choose sustainable modes of transportation such as bicycling and walking. Building safe bicycle crossings at intersections, marking clear lines, and signalling to alert motorists to the presence of bicyclists. Ensuring adequate bicycle parking in public places, such as public transit stations, makes it easier to reach desired destinations by bicycle. The strategy to promote innovation and technological advancement aims to encourage the development of advanced technologies and alternative fuels to achieve more energy-efficient vehicles. Innovations in vehicle design and technology can help improve energy efficiency. Examples include lighter materials, aerodynamic design, improved propulsion systems, and advanced energy management systems. [12].

Combining and integrating different modes of transportation, such as road, rail, river, and maritime, and using intermodal hubs and connecting them efficiently optimise the duration and cost of transportation.

PEDELEC has a number of advantages compared to the classic bicycle, there are many factors that influence the choice of a transport mode in urban transport, some of the most important are:

- availability of transport, buses, streetcars, bicycles or cab services.
- speed of the mode of transportation as well as the time it takes to arrive at the destination.
- price, including fuel price, maintenance costs, parking costs, etc.
- safety of using a mode of transportation, including traffic safety
- impact of transportation on the environment, e.g., pollutant emissions and noise.
- transportation comfort, e.g., seat comfort, legroom, and air conditioning.
- ease of use, including ease of routing, parking, etc.

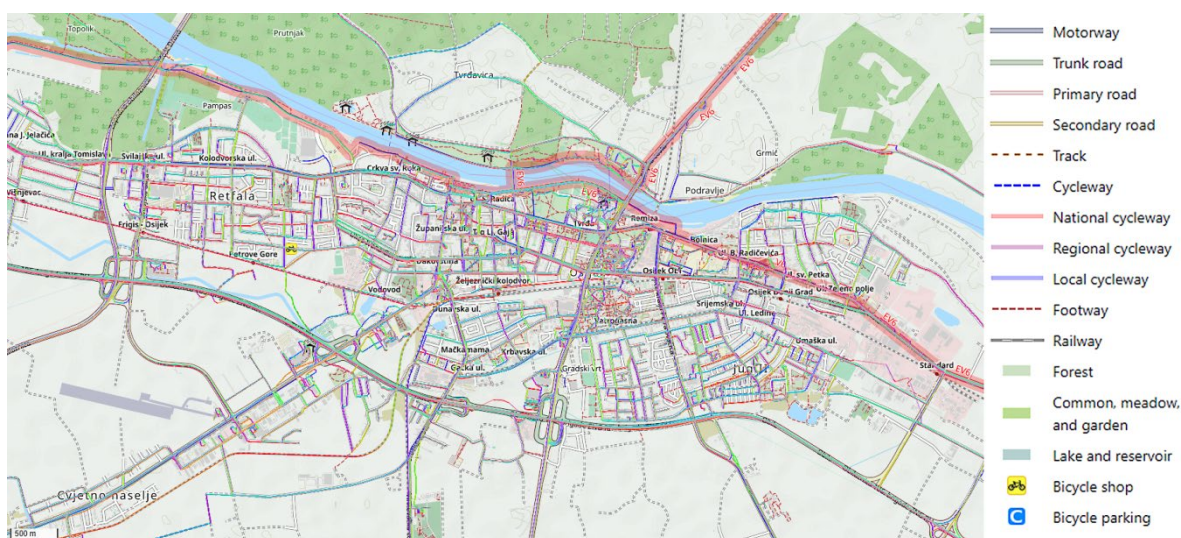
The quality of cycling infrastructure can be assessed in different ways and using different scales and criteria. Some of the factors that are considered are:

- Presence of protective fencing, layout and width of bike lanes, safety of traffic signals and other traffic signals, etc.



- Connectivity, i.e., whether there is a clear, easily understood, and interconnected network of bike lanes that provides easy access to various destinations, as well as good connections to other modes of transportation such as streetcars or buses.
- How quickly and efficiently you can get around by bike compared to other modes of transportation, as well as the time it takes to get from one place to another.
- The quality of the surface of the paths, without holes and obstacles, which allow comfortable and safe cycling.

Osijek is one of the few cities in the Republic of Croatia that has an extensive cycling infrastructure (Figure 6), [13].



**Figure 6.** Transport infrastructure in the city of Osijek, openstreetmap.org

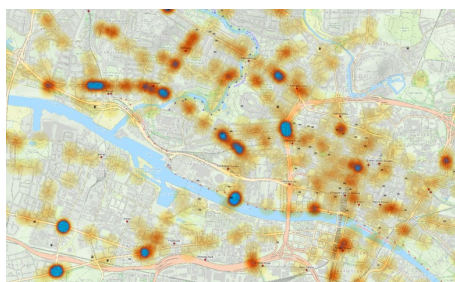
In Osijek, cycling is a way of life and a leisure activity on 40 km of cycling paths [14]. The city covers an area of 169 km<sup>2</sup> with an average elevation of 94 metres. Due to the flat terrain, Osijek with its former 100,000 inhabitants can be reached daily by bicycle by 20% of the 11,599 inhabitants of Čepin, 7,376 inhabitants of Tenja, 5,480 of Bilje and 4,101 of Josipovci [4].

#### 4. Mapping bicycle routes in Osijek with the help of open source software

Mapping is the process of visualizing spatial data on maps or other visual media. This includes the representation of physical and human features on the ground, such as geographic features, road networks, settlements, boundaries, natural resources, buildings, and more. The purpose of mapping is to link geographic coordinates with spatial data and create a model of the real environment [15]. Mapping can be useful to visualize spatial data and discover patterns and relationships between different elements, which can help in decision making and planning of different activities [16].

A geographic information system (GIS) is a system for collecting, monitoring, storing, managing, and analyzing all types of spatial data [17]. Spatial data can be anything around us, a building, a car, a tree, or a person. They include data obtained from GPS, satellites, aerial photography, and other sources. GIS is used in many fields, including urban

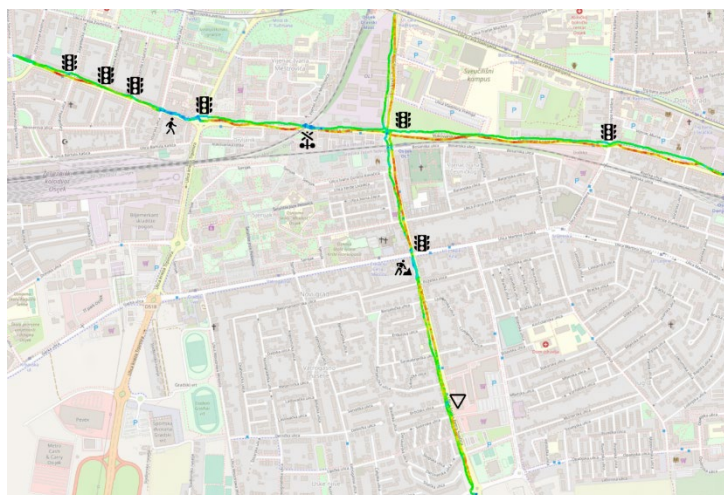
planning, natural resource management, planning, architecture, agriculture, and many other fields. They can be used to make decisions based on spatial data, such as risk assessments, market analysis, infrastructure management, and the like. Simplistically, the difference between GIS and mapping could be described as mapping enables static analysis, while GIS enables dynamic analysis [18]. Figure 7 shows an overview of bicycle accident blackspots in Glasgow that can be used to take preventive measures.



**Slika 7.** Overview of cycling accident blackspots in Glasgow, [19]

#### 4.1 Mapping of two streets routes, Vukovarska and Svačićeva

For a practical example, the cycling routes in Vukovarska Street with a length of 2.85 km and Svačićeva Street with a length of 1.94 km were mapped. The mapping was carried out in two rounds. The first time with a classic bicycle and the second time with a PEDELEC in order to make a comparison with this mode of transport. The mapping was carried out using the CycleDroid application to record the distance traveled and the GPS visualizer to display the data on the map, Figure 8



**Slika 8.** Two urban routes where traffic speed analysis was performed, [1]

CycleDroid is a mobile application for tracking bicycle trips on Android devices. The application uses the GPS device of your mobile device to track your movement and create a detailed map of your cycling route. In addition, the application allows you to monitor various statistics during your ride, such as speed, distance, time, elevation gain, and more. The intuitive user interface makes it easy to start and stop recording bike trips. During the ride, you can monitor detailed statistics and current parameters, as well as the current



location on the map. You can set goals, such as distance or ride time, and get information about how close you are to your goals [20]. GPS Visualizer is a free web application for visualization, analysis and processing of GPS data. It allows using GPS data in different formats, including GPX, KML, CSV and displaying them on an interactive map [21].

#### 4.2 Speed of bicycle traffic on Vukovarska and Svačićeva streets

In analyzes, times and average movement speeds are often given without total times and speeds, which can give an unrealistic picture of the time needed for the trip. Travel speeds vary depending on road conditions, traffic, infrastructure, weather conditions, and driver preferences. The difference between the overall average speed and the average movement speed is related to the different way they are calculated.

- The overall average speed represents the average of all speeds during the entire trip, including the time the cyclist was stopped.
- The average movement speed represents the average speed during the time the cyclist was in motion.
- Total time represents the total time taken to cover the entire distance. This includes all aspects of travel, including the time the cyclist is stopped or decelerating at traffic lights, railroad crossings, or other factors.
- Movement time indicates only the time spent in active movement, excluding standing time.

Table 1 shows the parameters of bicycle and PEDELEC cycling in Svačićeva street.

**Table 1.** Cycling indicators of bicycle and PEDELEC in Svačićeva street

	Length (km)	Time (h:mm:ss)			Average speed (km/h)		
		Active cycling	Total cycling	$\Delta t$	Active cycling	Total cycling	$\Delta v$
Bicycle	1.94	0:08:38	0:10:09	0:01:21	13.51	11.49	2.02
PEDELEC		0:06:01	0:07:24	0:01:23	19.34	15.73	3.61
$\Delta$		0:02:37	0:02:45		5.83	4.24	

The visualization of the speed on the route including traffic lights, level crossings and road works can be seen in Figure 9.

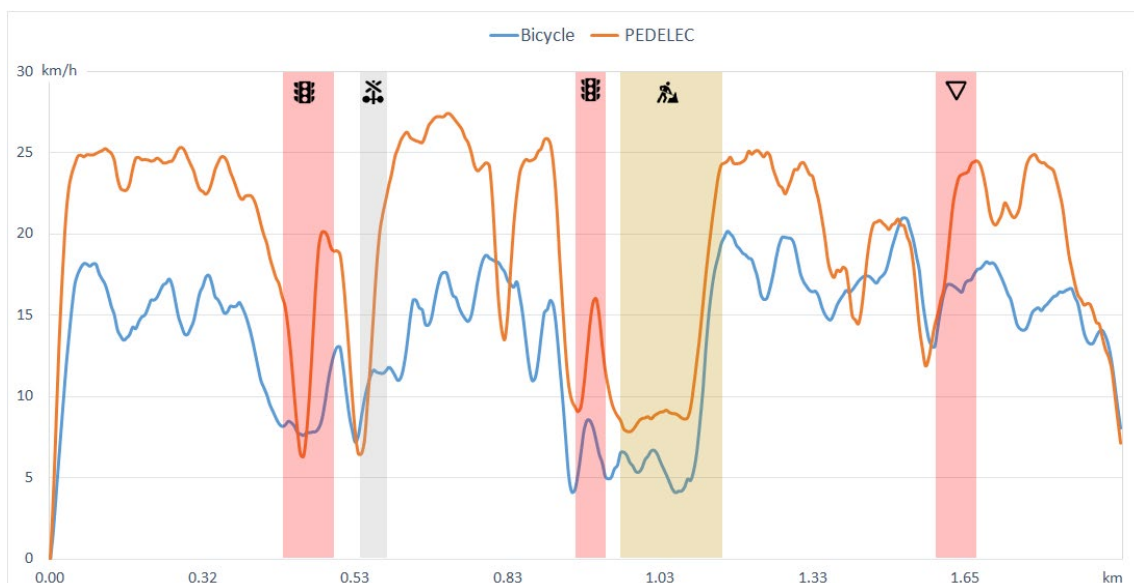


Figure 9. Bicycle traffic speeds on the Svačićeva street route

Table 2 shows the parameters of bicycle and PEDELEC cycling on Vukovarska street. Visualization of speed on Vukovarska street including traffic lights, conflict zones with the pedestrian path and level crossings is shown in Figure 10.

Table 2. Speeds of movement on the route along Vukovarska street

	Length (km)	Time (h:mm:ss)			Average speed (km/h)		
		Active cycling	Total cycling	Start	Active cycling	Start cycling	Total
Bicycle	2.85	0:14:40	0:17:15	0:02:35	11.68	9.93	1.75
PEDELEC		0:08:58	0:09:29	0:00:31	19.04	18.01	1.03
$\Delta$		0:05:42	0:07:46		7.36	8.08	

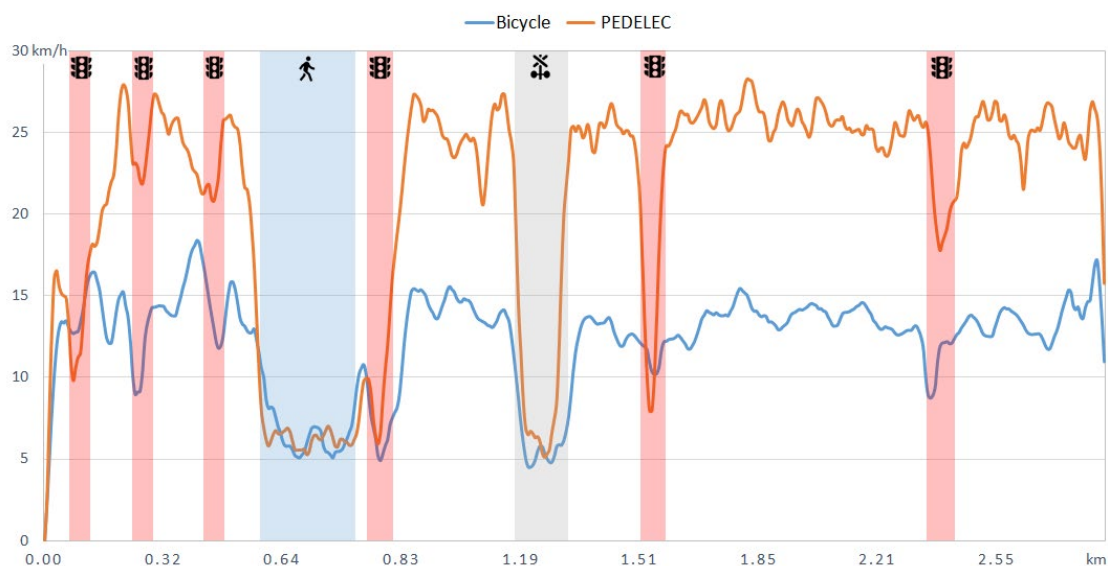


Figure 10. Bicycle traffic speeds on the Vukovarska street route



The conducted measurements show that the average speed of traffic in Osijek is by bicycle (12.5-14.6 km/h) and by PEDELEC (20-22.8 km/h). Although there is no universal optimal speed and it can be different for each individual, it is possible to estimate approximate values, taking into account factors such as safety, infrastructure, weather conditions, physical fitness or individual rider preferences. On the observed routes, speeds were somewhat lower compared to the aforementioned measurements in Osijek and also compared to other studies. The main reason for the lower speeds during the research is the strong easterly and southeasterly winds, on the basis of which it can be said that the optimal driving speed for PEDELEC on the studied sections would be between 18 and 22 km/h, depending on the weather conditions and the rider's preferences.

#### 4.3 Elements of the infrastructure and circumstances that reduce the speed

By analyzing the mapped routes, it is possible to determine the areas and elements of the traffic infrastructure that lead to reduced travel speeds.

##### **Traffic lights**

At traffic signal controlled intersections, speeds of both bicycle types are reduced due to waiting for a green light or slowing down to pass through intersections, which is visible on the map and diagrams. In these areas, speeds varied depending on the duration of the traffic light cycle and traffic density.

##### **Railroad crossings**

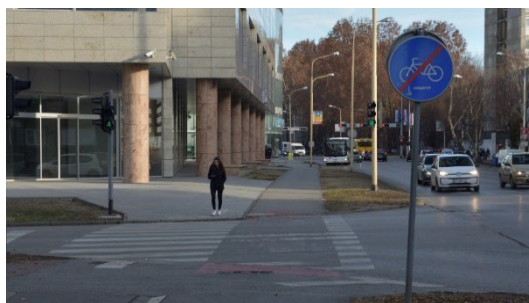
At grade crossings, it is necessary to reduce speed or stop to allow the train to pass. Despite the speed reduction, safety is the priority, so the rules for safe crossing of the tracks must be followed. At the level crossing in Vukovarska Street, the speed reduction is much more pronounced, as the passage through the protective barrier is very narrow and unsuitable for cyclists.



**Figure 11.** Railroad crossing in Vukovarska Street

##### **Cycle track interruptions**

The interruption of the tracks significantly reduces the speed of traffic. The Vukovarska section is characterized by the interruption of the cycle track between the intersection with Istarska and Trpimirova Ulica (Figure 12), which leads to the greatest speed reduction on the analyzed routes.



**Figure 12.** Interruption of the cycle track in Vukovarska street

### Works on transport infrastructure

Areas where works are carried out require special care for cyclists. The works often lead to speed reductions or require detour to alternative routes to ensure the safety of cyclists. In such situations, it is of great importance to follow the instructions and warnings of the relevant authorities or workers on site to ensure the safety of all road users.

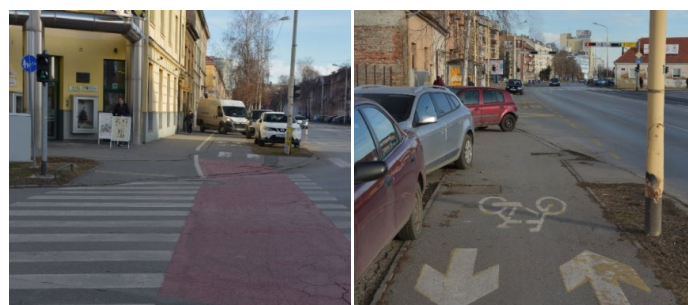
### Other obstacles and restrictions

Portions of the route that cross bus stops (Figure 13) may affect the safety and speed of bicyclists and public bus transit users. Curbs and unpredictable passenger movement further complicate the situation and increase the potential for danger.



**Figure 13.** The bus station crossed by the cycle track

The problem is represented by illegally parked cars, Figure 14.



**Figure 14.** Vehicles parked on the cycle track

Blocks between paths are often of different heights compared to the pedestrian and bike lanes that separate them, posing a safety hazard because bikes slip at a small angle when crossing. Potholes on roads are another obstacle for bicyclists. They can be dangerous



and cause damage to bicycles or lead to accidents if they are not visible or cannot be avoided.



**Figure 15.** Damage and demarcation of the pedestrian and bicycle path

## 5. Conclusion

Cycling has a long tradition in Osijek, because the relief of the city is ideal for getting around by bicycle, one of the fastest means of transport, which brings numerous benefits, such as improving health, reducing air pollution, reducing crowding and shortening travel times on short routes. PEDELEC allows for flexible route choice and faster arrival at the destination, which is especially important on urban routes. The advantage of PEDELEC in urban areas is the ability to take advantage of the developed bicycle infrastructure and existing bicycle rental system, break through crowds, or avoid crowds by using alternative routes. Seasons and weather can affect transportation choices; rain, snow, or high winds can affect transportation choices as well as safety and comfort while riding. In the warmer months, riding a PEDELEC can be more enjoyable because you do not have to wear as many layers of clothing, the temperatures are comfortable, and you sweat less than on a conventional bicycle. Despite the assistance of an electric motor, riding a PEDELEC still requires a certain amount of physical activity, so it can be a good choice for riders who want to maintain or improve their fitness. For people with health problems, physical limitations, or for those who do not want to expose themselves to intense physical activity while riding a classic bicycle, the PEDELEC can be a suitable alternative. Despite the higher price compared to classic bicycles, the higher movement speeds, lower physical stress and easier hygienic maintenance justify its daily use. The results presented in this paper are the basic parameters that can be used to analyze the justification of the application of energy efficiency measures in transport.

## 6. Literature

- [1] Aračić, S., Analysis of the efficiency of PEDELEC in the territory of the city of Osijek, Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technologies Osijek, 2023.
- [2] Glavaš, H., Barić, T., Keser, T. "Pedelec - bicycles with electric assistance", 35th Conference Automation in Traffic 2015, Zagreb
- [3] Cyclist, Introduction to Electric Bicycles, [www.cyclist.co.uk/in-depth/introduction-to-electric-bikes-everything-you-need-to-know](http://www.cyclist.co.uk/in-depth/introduction-to-electric-bikes-everything-you-need-to-know), accessed 04/30/2023

- 
- [4] Glavaš, H., Dorić, D., Aračić, S., "Practical application of pedelecs in the area of the city of Osijek," 38th conference Automation in Traffic 2018, Zagreb
- [5] Peugeot Cycles, Characteristics of an electric bicycle, <https://cycles.peugeot.com/advice-features-electric-bike>, accessed 04/30/2023
- [6] E-bike trends expected in 2022, <https://electricbikereport.com/e-bike-trends-2022/> accessed 04/30/2023
- [7] Shimano Technologies, <https://mtb.shimano.com/technologies>, accessed 04/30/2023
- [8] Bosch eBike ABS, [www.bosch-ebike.com/en/products/abs](http://www.bosch-ebike.com/en/products/abs), accessed 04/30/2023
- [9] Statista, Share of urban population worldwide in 2022, [www.statista.com/statistics/270860/urbanisation-by-continent](http://www.statista.com/statistics/270860/urbanisation-by-continent), accessed 04/30/2023
- [10] EUR-lex, Green Paper - Towards a new culture for urban mobility, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/LSU/?uri=CELEX:52007DC0551>, accessed 04/30/2023
- [11] Mart Cities, 'Bajsom na posao' project, <https://pametni-gradovi.eu/sastavnice-pametnog-gradapromet-i-mobilnost/projektom-bajsom-na-posao-osijek-omogucuje-besplatno-njajmljivanje-bicycles-twice-a-day-for-30-minutes>, accessed 04/30/2023
- [12] EUR-lex, Strategija za održivu i pametnu mobilnost, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=CELEX%3A52007DC0551>, accessed 04/30/2023
- [13] <https://www.openstreetmap.org/#map=14/45.5536/18.6913&layers=CG>, accessed 04/30/2023
- [14] Glavaš, H., Karakašić, M., Petrović, I., Vidaković, D. "Pedelec li-ion battery pack lifetime", The 8th International Conference on Industrial Engineering and Environmental Protection, 2018 Zrenjanin
- [15] Spyro-soft, What is geospatial mapping, and how does it work?, <https://spyro-soft.com/blog/what-is-geospatial-mapping-and-how-does-it-work>, accessed 04/30/2023
- [16] G2, What Is GIS Mapping?, [www.g2.com/articles/gis-mapping](http://www.g2.com/articles/gis-mapping), accessed 04/30/2023
- [17] ACTS, What's the Difference Between GIS and Mapping?, [www.aligningchange.com/whats-the-difference-between-gis-and-mapping](http://www.aligningchange.com/whats-the-difference-between-gis-and-mapping), accessed 04/30/2023
- [18] Studylib, Difference between GIS map and paper or electronic map, <https://studylib.net/doc/7076635/difference-between-gis-map-and-paper-or-electronic-map-wh>, accessed 04/30/2023
- [19] Urban data cyclist, Exploring Glasgow's Bike Crash Hotspots, <https://urbandatacyclist.com/2017/09/12/blog-post-title-2-2/>, accessed 04/30/2023
- [20] Michał Marschall, CycleDroid, Google Play, APK, accessed 04/30/2023
- [21] GPS Visualizer, [www.gpsvisualizer.com/](http://www.gpsvisualizer.com/), accessed 04/30/2023





# Utjecaj ASIC sklopovlja na kvalitetu električne energije u distribucijskoj mreži

## *Influence of ASIC hardware on power quality in the distribution network*

M. Beretić<sup>1,\*</sup>, Z. Klaić<sup>2</sup>, H. Adrić<sup>2,\*</sup>, M. Primorac<sup>2</sup>, M. Vukobratović<sup>3</sup>

1 \_

<sup>2</sup> Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

3 \_

\*Autor za korespondenciju. E-Mail: heidi.margus@ferit.hr

### Sažetak

Porastom broja potrošača povećava se i količina energetske elektronike u elektroenergetskom sustavu koja ima značajan utjecaj na pokazatelje kvalitete električne energije. Energetska elektronika u elektroenergetskoj mreži može uzrokovati značajne promjene napona i frekvencije koje mogu dovesti do raznih problema s opskrbom električne energije. Trošila s energetsom elektronikom najčešće su uzrok pojave viših harmonika. U ovom radu analiziran je utjecaj integriranih krugova za specifičnu primjenu - ASIC (engl. *Application Specific Integrated Circuit*) na pokazatelje kvalitete električne energije. Mjerenja su provedena na jednom ASIC uređaju te su rezultati upotrijebljeni za simulacije i analize utjecaja položaja ASIC uređaja u elektroenergetskoj mreži na kvalitetu električne energije.

**Ključne riječi:** kvaliteta električne energije, harmonici, ASIC sklopovlje, model distribucijske mreže, simulacija utjecaja ASIC-a

### Abstract

Increasing number of consumers leads to increase of power electronics in power system which has a significant impact on the power quality. Power electronics connected to power grid can cause voltage and frequency changes causing various problems with energy supply. Harmonics in grid are often caused by power electronics. In this paper, influence of ASIC devices on power quality is presented. Measurements of power quality are carried out on one ASIC device. The results were used for simulations and analyzes of the influence of the location of ASIC devices in the power grid on the power quality.

**Key words:** power quality, harmonics, ASIC device, distribution system model, ASIC impact simulations

## 1. Uvod

Spajanjem novih potrošača na mrežu, povećava se i količina elektroničkih uređaja koji utječu na kvalitetu električne energije. Mjerenjem i analiziranjem kvalitete električne energije prema pravilima zadanim normama, osigurava se sigurna i neprekidna opskrba električnom energijom krajnjim korisnicima. Uređaji s energetsom elektronikom kao što su ispravljači, izmjenjivači i slični, utječu na kvalitetu električne energije. Jedan takav uređaj je i ASIC sklopovlje čiji je utjecaj na kvalitetu električne energije analiziran i opisan u ovome radu. ASIC uređaji koriste se za rudarenja kriptovaluta, te je njihov broj (a time i instalirana snaga) značajno porastao u posljednjih par godina. U ovom radu detaljnije se razmatra utjecaj ASIC sklopovlja na struje viših harmonika. Drugi dio rada opisuje pojam kvalitete električne energije, s posebnim naglaskom na više strujne harmonike i prikazano je mjerenje kvalitete električne energije sa spojenim ASIC uređajem kao i analiza dobivenih rezultata. Zatim su provedene simulacije na modelu mreže s priključenim ASIC uređajima koji su spajani na različitim lokacijama te je u trećem dijelu rada analiziran njihov utjecaj.

## 2. Kvaliteta električne energije

Pojam kvalitete električne energije nije jednoznačan, ali može se opisati kao stanje elektroenergetskog sustava u kojem isporučena električna energija i njeno korištenje omogućavaju normalan i siguran rad opreme korisnika, [1]. Pravilnici i norme prema kojima se definira i analizira kvaliteta električne energije su: „Mrežna pravila distribucijskog sustava,” NN 74/2018., [2], „Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 52/2020 [3], norma HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010), [4] te norma HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002), [5]. Parametri kvalitete električne energije definirani prema normi EN 50160 su: frekvencija, kolebanje napona u NN mreži, treperenje, THD, nesimetričnost te viši harmonici, [4]. U ovome radu stavit će se naglasak na harmonike. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD – *Total Harmonic Distortion*) i ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (TDD – *Total Demand Distortion*) su dva parametra koja se koriste za opisivanje harmonika. THD može opisati izobličenje u naponskom ili strujnom valnom obliku te se prema normi [4] izražava na slijedeće načine:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdje su:

$THD_U$  – ukupno harmonijsko izobličenje (napona)

$U_h$  – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

$U_1$  – srednja vrijednost temeljne veličine.

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Gdje su:

$THD_I$  – ukupno harmonijsko izobličenje (struje)

$I_h$  – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

$I_1$  – srednja vrijednost temeljne veličine.

TDD je za razliku od THD-a omjer izmjerene harmonijske struje i struje pri maksimalnom opterećenju, i može se prikazati slijedećim izrazom:

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_L^2}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

gdje je:

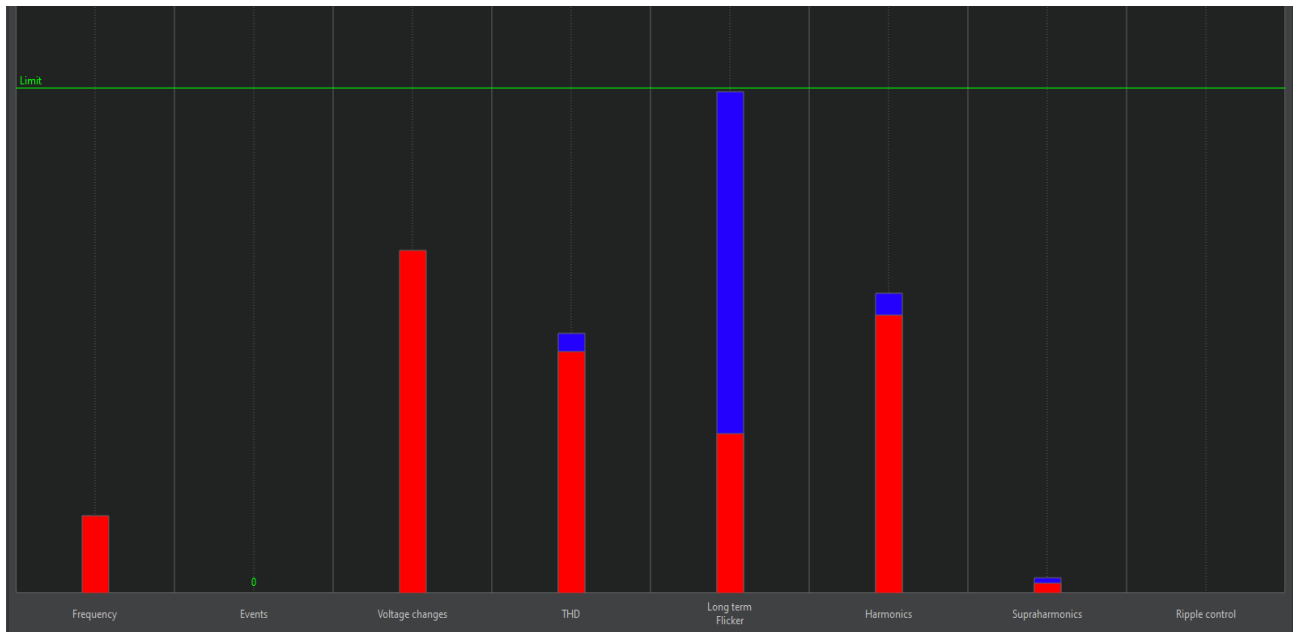
$TDD$  – ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju

$I_h$  – izmjerena harmonijska struja

$I_L$  – struja pri maksimalnom opterećenju.

## 2.1. Analiza rezultata mjerenja kvalitete električne energije

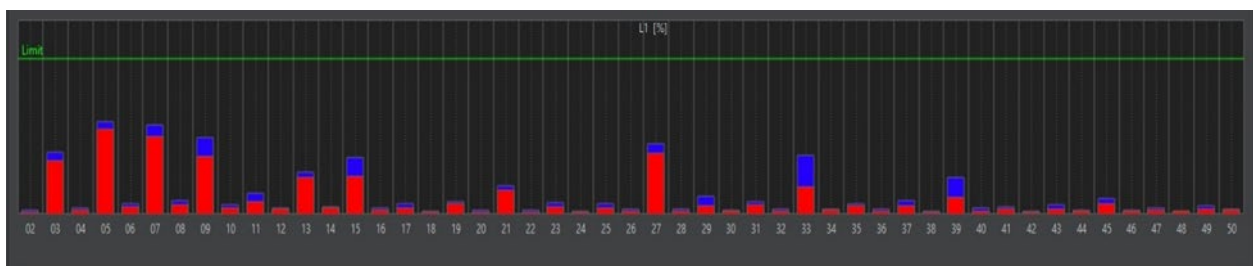
Mjerenja kvalitete električne energije provedena su pomoću mjernog uređaja A-Eberle PQ-Box 200. Mjerenja su provedena na niskonaponskoj mreži Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, na jednoj fazi na kojoj je bio spojen uređaj ASIC i u trajanju od dva tjedna. ASIC uređaji zamijenili su klasični način rudarenja kriptovaluta pomoću grafičkih kartica. ASIC je čip integriranog kruga koji je napravljen za određenu svrhu što znači da je svaki ASIC uređaj odnosno sklopovlje za rudarenje određene kriptovalute. ASIC uređaji ne služe samo za materijalnu dobit. Oni omogućavaju sigurnost i daljnji napredak blockchain infrastrukture. Mjerenja za ovaj rad provedena su na ASIC uređaju Antminer S9j nazivne snage 1350 W, u naponskom rasponu od 11.6 V do 13 V. Normalno može raditi na temperaturama od 0° C do 40° C, pri čemu je temperatura čipova na 95° C. Antminer S9j prilikom svog normalnog rada proizvodi buku u iznosu od 76 dB, [6]. S obzirom da su rezultati mjerenja za 1. i 2. tjedan vrlo slični, u radu će se prikazati analiza za prvi mjerni tjedan. Na idućoj slici (Slika 1.) prikazani su rezultati mjerenja kvalitete električne energije za prvi mjerni tjedan.



Slika 1. Pokazatelji kvalitete električne energije

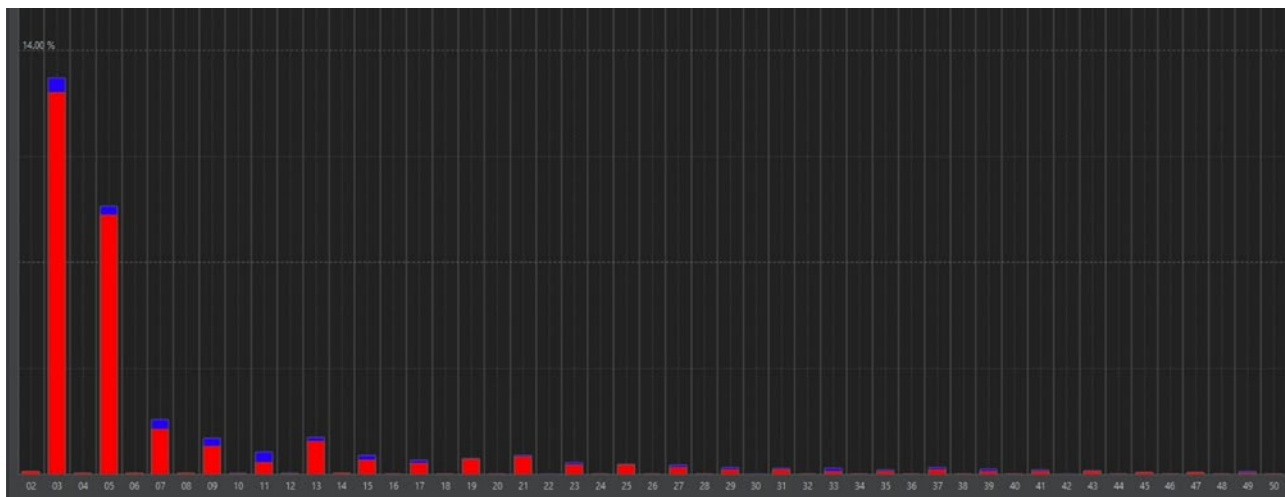
Prema prethodnoj slici, zaključeno je kako su svi parametri unutar vrijednosti koje propisuje norma. Norma propisuje i zadane vrijednosti za pojedinačne harmonike stoga je dalje u radu prikazana analiza vrijednosti pojedinačnih harmonika.

Slika 2. prikazuje harmonijske spektre napona kao relativne vrijednosti gdje je vidljivo kako su neparni harmonici značajno izraženiji od parnih harmonika te imaju veći utjecaj na oblik napona. Najdominantniji je 5. harmonik, a ističu se još i 7., 3., 13., i 9. harmonik.



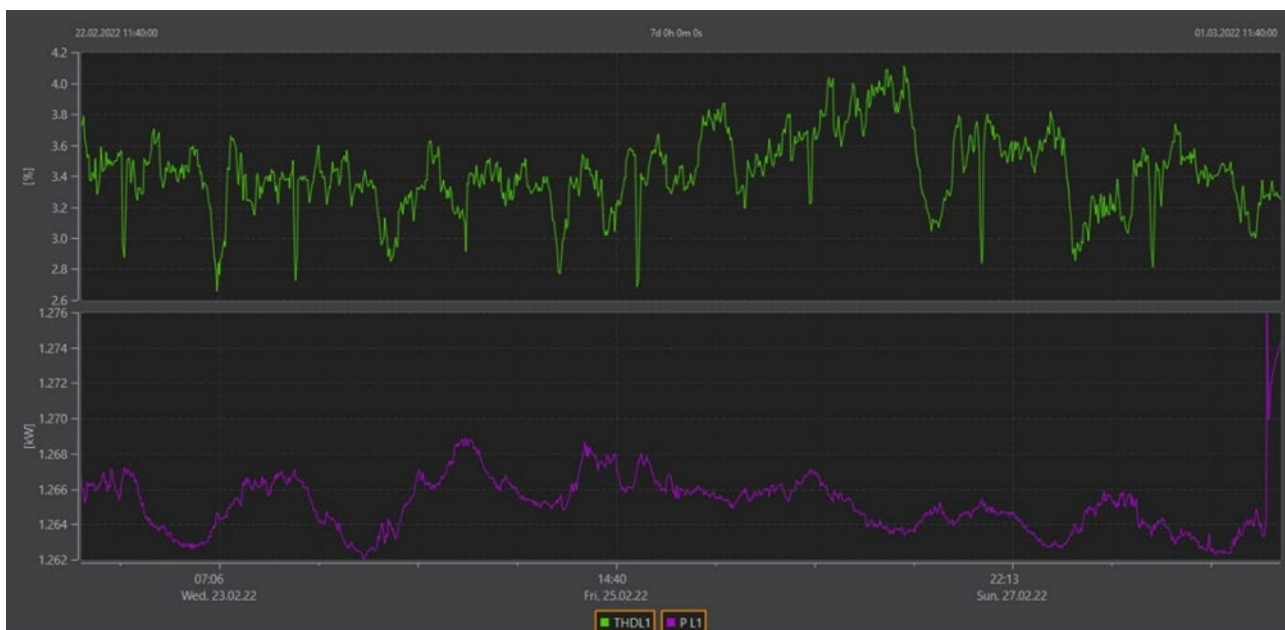
Slika 2. Harmonijski spektar napona - relativne vrijednosti

Harmonijski spektar struje tijekom prvom mjernog tjedna i njegove vrijednosti prikazane su na slici 3. Najdominantniji je 3. harmonik, a 5., 13., i 21. harmonici su također izraženijih vrijednosti.



Slika 3. Harmonijski spektar struje - relativne vrijednosti

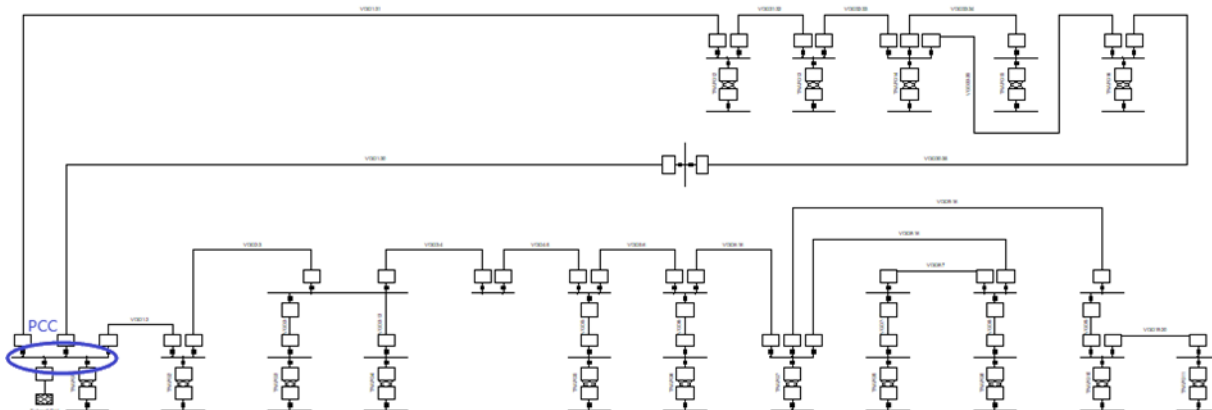
Ovisnost djelatne snage trošila i ukupno harmonijsko izobličenje napona prikazano na slici 4. THD napona nalazi se u rasponu vrijednosti od 2.5% i 4.5% što je ispod vrijednosti od 8% koja je propisana normom. Snaga trošila također je konstantna i vrijednost joj je gotovo u svim periodima između 1.26 kW i 1.27 kW. Uspoređujući dijagram THD-a napona i radne snage trošila može se zaključiti kako promatrano trošilo nema značajan utjecaj na harmonijsko izobličenje napona.



Slika 4. Ukupno harmonijsko izobličenje napona (zelena) i snaga kroz tjedan (ljubičasta)

### 3. Simulacija i analiza modela mreže s utjecajem viših harmonika

Niskonaponska mreža na kojoj će se analizirati utjecaj ASIC uređaja na kvalitetu električne energije prikazana je na idućoj slici (Slika 5.).



Slika 5. Mreža s utjecajem viših harmonika

Mreža je dio distributivne 10 kV mreže te se sastoji od 40 sabirnica, 16 transformatora (10/0,4 kV) i 24 nadzemna voda. Na niskonaponske izvode spojeni su potrošači ukupne snage 2.4 MW. Uz stalne potrošače, na niskonaponske izvode također su spojeni ASIC uređaji koji su modelirani kao potrošači koji su izvor strujnih harmonika. Kako se ASIC uređaji rijetko samostalno spajaju u mrežu, većinom su izvedeni kao postrojenja od nekoliko kilovata, podaci dobiveni mjerenjem su skalirani prikladno modelu mreže koji će se koristiti za simulacije. Na odabrane sabirnice za simulaciju spojeno je 20 ASIC uređaja te se analizira napon, frekvencija i ukupno harmonijsko izobličenje (THD) na točki zajedničkog spoja (PCC). Također se analizira i THD na dalekovodima koji povezuju PCC s ostatkom niskonaponske mreže, te THD prema nadređenoj mreži. Analizirana su tri slučaja gdje se mijenja mjesto spajanja ASIC uređaja. U prvom slučaju ASIC uređaji su spojeni direktno na PCC čvor, u drugom slučaju su spojeni na sabirnice najdalje od PCC čvora, dok su u trećem slučaju spojeni na sabirnice najbliže PCC čvoru.

#### 3.1. Slučaj 1 (ASIC uređaji spojeni direktno na PCC čvor)

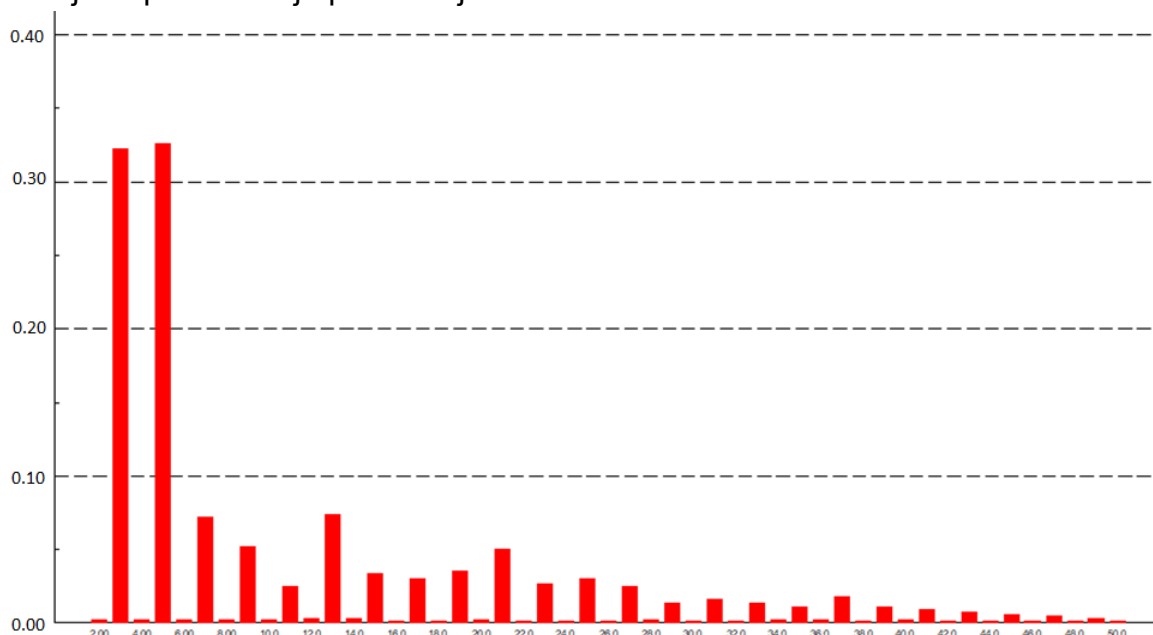
U prvom slučaju analizirani su rezultati simulacije kada su ASIC uređaji spojeni direktno na PCC čvor te su rezultati prikazani u Tablici 1 (Slučaj 1.).

Tablica 1. Rezultati simulacije

Slučaj	Napon [p.u.]	Frekvencija [p.u.]	THD <sub>U</sub> (na PCC čvoru) [%]	THD <sub>U</sub> (na vodu 1-2) [%]	THD <sub>U</sub> (na vodu 1-30) [%]	THD <sub>U</sub> (na vodu 1-31) [%]	THD <sub>U</sub> (prema nadređenoj mreži) [%]
1.	1.02	1.00	1.25	0.469	0.475	0.437	0.876
2.	1.01	1.00	0.76	1.059	0.287	0.264	0.519
3.	1.04	1.00	2.45	2.300	1.785	0.759	1.695



Uspoređujući simulacijom dobivene rezultate i vrijednosti propisane normom EN 50160, sve vrijednosti su unutar dozvoljenih granica. Nakon spajanja ASIC uređaja na PCC čvor, vrijednost ukupnog harmoničkog izobličenja (THD<sub>U</sub>) je 1.25, što je daleko od granične vrijednosti norme EN 50160 (8 % U<sub>N</sub>). Napon je porastao, a frekvencija je ostala jednaka. Harmonijski spektar struje prikazan je na Slici 6.

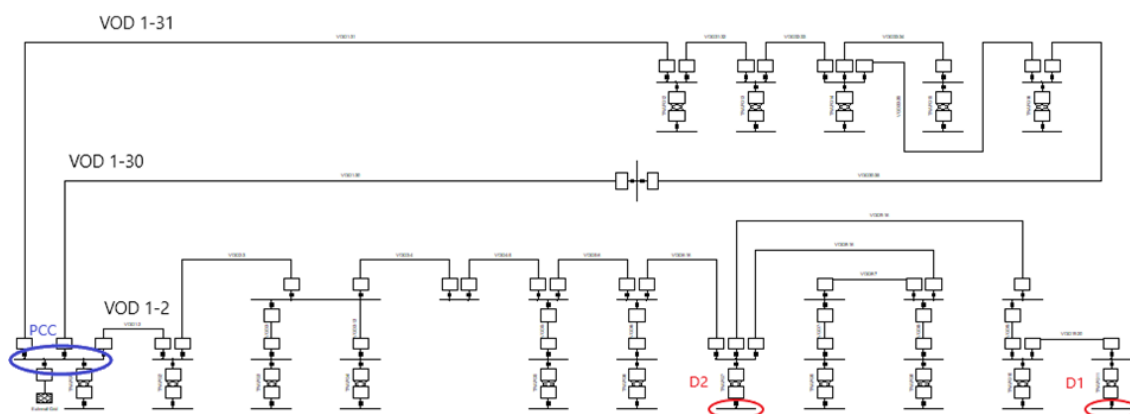


Slika 6. Harmonijski spektar struja za slučaj 1

Najdominantniji strujni harmonici su 3. i 5. čije vrijednosti se kreću oko 0.3 %. Također iz rezultata prikazanih na prethodnoj slici (Slika 6.) vidi se i izraženija vrijednost 7., 13. i 21. strujnog harmonika čije su vrijednosti nešto niže od 0.1 %.

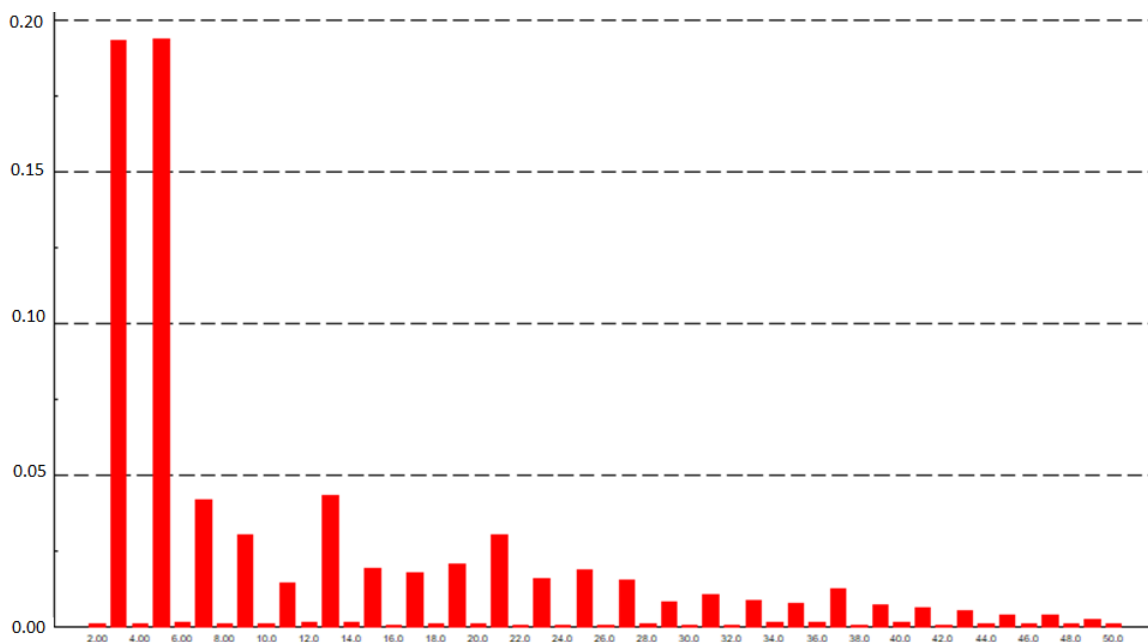
### 3.2. Slučaj 2 (ASIC uređaji spojeni na sabirnice najudaljenije od PCC čvora)

Raspored spajanja ASIC uređaja u mreži za slučaj kada su uređaji spojeni u točke koje su najudaljenije od PCC čvora prikazan je Slikom 7. Za simulaciju u drugom slučaju odabrane su sabirnice D2 (udaljena 3.225 km od PCC-a) i D1 (udaljena 3.395 km od PCC-a).



Slika 7. ASIC uređaji spojeni najudaljenije od PCC čvora (slučaj 2)

Vrijednosti dobivene simulacijom za drugi slučaj prikazane su također u Tablici 1 (Slučaj 2.). U ovom slučaju vrijednosti dobivene simulacijom također su unutar granica propisanih normom. Uspoređujući rezultate dobivene simulacijom za drugi slučaj s rezultatima prvog slučaja (prema Tablici 1.) spajanjem ASIC uređaja na najudaljenije sabirnice vrijednosti napona su niže (za 0,01 p.u.) dok je frekvencija ostala jednaka. Promijenile su se i vrijednosti THDU-a u odnosu na prvi slučaj te se vrijednost THDU-a na PCC čvoru snizila za 0.49 % - sada iznosi 0.76 %. Jedina vrijednost THDU-a koja je porasla u drugom slučaju je vrijednost THDU-a na vodu 1-2 (na kojem su spojeni ASIC uređaji) i to za 0.59% (sada iznosi 1.059). Na slici 8. prikazan je strujni harmonijski spektar za ovaj slučaj.

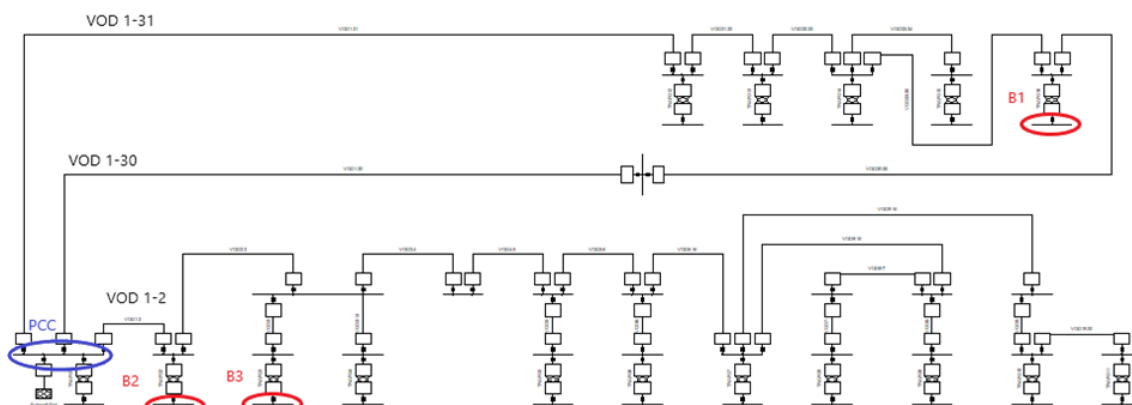


Slika 8. Harmonijski spektar struje za Slučaj 2

Promatrajući vrijednosti prikazane prethodnom slikom (slika 8.), vidljivo je da su dominantni strujni harmonici 3. i 5. reda čije su se vrijednosti snizile u ovom slučaju (u odnosu na prvi slučaj) te sada iznose oko 0.2%, a prate ih 13., 15. i 27. strujni harmonici s vrijednostima oko 0.05 %.

### 3.3. Slučaj 3 (ASIC uređaji spojeni na sabirnice najbliže PCC čvoru)

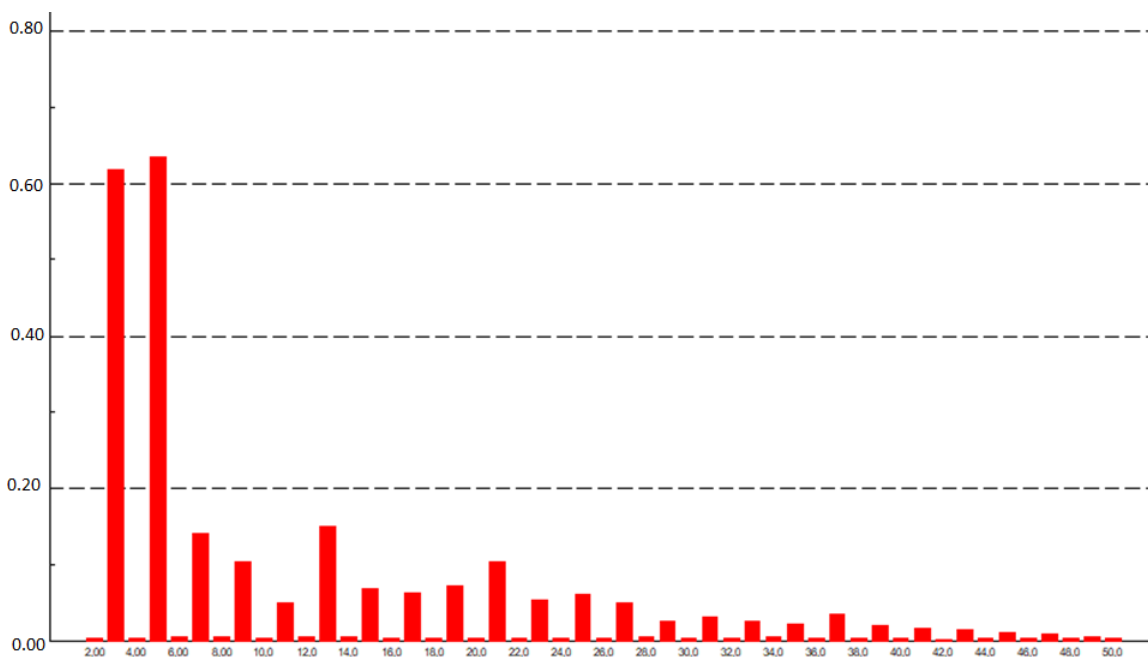
U trećem slučaju ASIC uređaji spojeni su na sabirnice najbliže PCC čvoru. Slika 9. prikazuje raspored odabranih sabirnica za simulaciju trećeg slučaja: B1 (udaljena 0,512 km od PCC), B2 (udaljena 0,728 km od PCC) i B3 (udaljen 1,118 km od PCC).



Slika 9. ASIC uređaji spojeni najbliže PCC čvoru (slučaj 3)

U Tablici 1. prikazani su rezultati dobiveni simulacijom mreže za treći slučaj u kojoj su ASIC uređaji spojeni blizu PCC čvora (Slučaj 3). Spajanje ASIC uređaja blizu PCC čvora uzrokovalo je porast napona u odnosu na prethodne slučajeve (0.02 p.u. u odnosu na slučaj 1 i 0.03 p.u. u odnosu na slučaj 2). Frekvencija je ostala jednaka. THD<sub>U</sub> je znatno porastao u svim definiranim točkama u odnosu na prethodne slučajeve. Na PCC čvoru THD<sub>U</sub> je porastao za 1.2% u odnosu na prvi slučaj (sada je 2.45 %), dok u odnosu na drugi slučaj porastao za 1.69 %. Najveći porast THD<sub>U</sub> u trećem slučaju vidljiv je na vodu 1-2, gdje je porastao u odnosu na prvi slučaj za 1.831 % (sada je 2.3 %). Sve promatrane vrijednosti i dalje zadovoljavaju ograničenja propisana normom EN 50160.

Cijeli strujno harmonijski spektar za treći slučaj prikazan na Slici 10. Analizom strujnog harmonijskog spektra i u ovom slučaju ponovno su dominantni 3. i 5. strujni harmonici čije su vrijednosti sada porasle u odnosu na prethodne slučajeve te iznose oko 0.6 %.



Slika 10. Harmonijski spektar struje za Slučaj 3

Dakle, vrijednosti strujnih harmonika kao i vrijednosti THD<sub>U</sub> bile su najviše u trećem slučaju gdje su ASIC uređaji bili spojeni najbliže PCC čvoru. Najdominantniji strujni harmonici općenito su 3. i 5. strujni harmonici te su njihove vrijednosti u 3. slučaju bile oko 0.6 %, dok su u prvom slučaju imali vrijednost oko 0.3 %, a u drugom slučaju 0.2 %. THD<sub>U</sub> na PCC čvoru u trećem slučaju porastao je više od 1 % u odnosu na prethodne slučajeve (1.2 % u odnosu na prvi slučaj i 1.69% u odnosu na drugi slučaj).

## 5. Zaključak

U posljednjih nekoliko godina povećana je količina uređaja koji se sastoje od energetske elektronike kao što je i sam ASIC uređaj. Iako su takvi uređaji potrošači relativno malih snaga, imaju utjecaj na elektroenergetsku mrežu. Jedan takav uređaj spojen je na niskonaponsku mrežu FERIT-a te je mjerena kvaliteta električne energije u periodu od 2 tjedna. Mjereni podaci su analizirani i prikazani u radu, te je naglasak stavljen na strujni harmonijski spektar. Mjerenja provedena na jednom uređaju, a snimljeni podaci su upotrijebljeni za simulacije rada mreže postrojenja ASIC uređaja u distribucijskoj mreži. Simulacije su provedene za tri slučaja s različitim lokacijama spajanja ASIC postrojenja. U sva tri slučaja analizirani su i uspoređeni iznosi ukupnog harmonijskog izobličenja napona (THD<sub>U</sub>) te spektar struja viših harmonika. Očekivano, u sva tri slučaja spektar harmonika struja je vrlo sličan jer se mjerila struja istog trošila, međutim ovisno o analiziranom slučaju razlikuju se iznosi pojedinih redova harmonika. Rezultati simulacija za sva tri slučaja (s različitim mjestima spajanja ASIC uređaja) pokazali su kako odabir mjesta spajanja takvih postrojenja na mrežu ima utjecaj na THD<sub>U</sub> kao i na strujni harmonijski spektar. Važno je još napomenuti kako su u svakoj od provedenih simulacija svi pokazatelji kvalitete električne energije bili unutar ograničenja koje propisuje norma EN 50160.

## 6. Literatura

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranham, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality, Second Edition", 2004.
- [2] Mrežna pravila distribucijskog sustava," NN 74/2018
- [3] Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava," NN 52/2020
- [4] HRN EN 50160:2012 – Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2010), veljača 2012.
- [5] HRVATSKA NORMA HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002))
- [6] Bitmain, <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/360020079754-S9j-Specifications>, 2019.



## Projiciranje emisija CO<sub>2</sub> u istočnoj Hrvatskoj u svrhu određivanja poticaja za primjenu CCS tehnologije

### *Projecting CO<sub>2</sub> Emissions in Eastern Croatia for The Purpose of Determining Incentives for the Deployment of CCS Technology*

F.Vodopić<sup>1\*</sup>, D. Karasalihović Sedlar<sup>1</sup>, D. Vulin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [filip.vodopic@rgn.unizg.hr](mailto:filip.vodopic@rgn.unizg.hr)

#### Sažetak

Cilj rada je ubrzavanje primjene tehnologije hvatanja i skladištenja CO<sub>2</sub> (CCS) kroz definiranje sustava poticaja po toni uhvaćenog CO<sub>2</sub> na primjeru istočne hrvatske. U radu su projicirane cijene emisijskih jedinica prema tri linearna scenarija rasta. Također, iz zakonskog akta preuzete su količine emisijskih jedinica koje se planiraju prodati na dražbama. Dio prihoda od prodaje emisijskih jedinica alociran je određeni broj godina u novo osnovani CCS fond uz pretpostavku četiri različite veličine fonda, a koji će se koristiti za isplaćivanje poticaja emiterima za hvatanje CO<sub>2</sub> u trajanju od 10 godina. U svrhu određivanja točnog iznosa poticaja, projicirane su CO<sub>2</sub> emisije za četiri emitera primjenom geometrijskog Brownovog gibanja u Pythonu: NEXE (cementni sektor), DS Smith Belišće (sektor papirnih proizvoda) te UNI VIRIDAS i TE-TO Osijek (termo-elektrane toplane). Postavljena je gornja granica za iznos poticaja koja iznosi 80 EUR/t. Rezultati su optimistični budući da iznosi poticaja za najvećeg emitera (NEXE) variraju između 8 i 81 EUR/t. Najmanji iznos poticaja za ostale emitere iznosi 20 EUR/t, dok se gornja granica od 80 EUR/t postiže pri većim veličinama CCS fonda. Gotovo 60 % izračunatih iznosa poticaja za manje emitere rezultira vrijednostima iznad graničnih, što predstavlja priliku za stvaranje CCS klastera u istočnoj Hrvatskoj, odnosno mogućnost poticanja više emitera istovremeno. To bi omogućilo emiterima stvaranje i korištenje zajedničke transportno-skladišne infrastrukture, uz istovremeno smanjenje troškova cjelokupnog CCS vrijednosnog lanca.

**Ključne riječi:** CO<sub>2</sub>, CCS, poticaji, emisije

#### Abstract

The aim of the work is to accelerate the deployment of carbon capture and storage technology (CCS) through the definition of an incentive system per ton of captured CO<sub>2</sub> by using eastern Croatia as an example. The emission allowance prices are forecasted according to three linear growth scenarios. Also, the quantities of emission allowances that



are planned to be sold at auctions were taken from the legal act. Part of the income from the sale of emission allowances is allocated for a certain number of years in the newly established CCS fund, assuming four different fund sizes, which will then be used to pay incentives to emitters for capturing CO<sub>2</sub> for a period of 10 years. In order to determine the exact amount of incentives, CO<sub>2</sub> emissions were forecasted for four emitters using geometric Brownian motion in Python: NEXE (cement sector), DS Smith Belišće (paper & pulp sector) and UNI VIRIDAS and TE-TO Osijek (thermal power plants). An upper limit has been set for the incentive amount, which is 80 EUR/t. The results are optimistic since the incentive amount for the largest emitter (NEXE) varies between 8 and 81 EUR/t. The minimum amount of incentives for other emitters is 20 EUR/t, while the upper limit of 80 EUR/t is reached for larger sizes of the CCS fund. Almost 60% of the calculated incentive amounts for smaller emitters result in values above the upper limit, which represents an opportunity to create a CCS cluster in eastern Croatia, that is, the possibility of incentivizing more emitters at the same time. This would allow emitters to create and use a common transport-storage infrastructure, while simultaneously reducing the costs of the entire CCS value chain.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, CCS, incentives, emissions

## 1. Uvod

Emisije stakleničkih plinova globalni su problem koji se mora rješavati na globalnoj razini, sukladno Pariškom sporazumu [1]. Europski zeleni plan [2] predviđa povećanje smanjenja emisija stakleničkih plinova na 55% u usporedbi s razinama iz 1990. godine. Dodatno, prema Zelenom planu, EU planira postati klimatski neutralna do 2050. godine, što znači da će imati ekonomiju s neto nulnim emisijama stakleničkih plinova.

Da bi se postigli navedeni ciljevi, potrebna je implementacija održivih sustava energetike kako bi se riješili vidljivi antropogeni utjecaji na klimatske promjene [3, 4]. Nužnost Implementacije spomenutih sustava može se smjestiti u širi okvir kada se razmotri u svjetlu pandemije COVID-19 [5]. Nadalje, trenutačno dostupni resursi trebaju se odgovornije koristiti tijekom energetske tranzicije, posebno kroz razvoj kružnog gospodarstva [6, 7] i implementacijom čistih tehnologija [8, 9]. Na primjer, korištenje obnovljivih izvora energije u javnim i privatnim objektima, elektrifikacija javnog prijevoza i energetska obnova pokazali su se značajnim pri smanjenju emisija stakleničkih plinova uz istovremeno smanjenje ukupnih troškova [10, 11]. Osim toga, budući energetske sustavi mogli bi se uglavnom oslanjati na alternativna goriva poput vodika, biodizela, e-goriva, amonijaka i alkoholnog goriva [12].

Iako je došlo do ubrzane primjene obnovljivih izvora energije, posebno kroz posljednjih nekoliko desetljeća [13], druge tehnologije, kao što je i tehnologija hvatanja i korištenja CO<sub>2</sub> (*engl. Carbon Capture and Storage, CCS*), također bi se trebale uzeti u obzir u svrhu ubrzanja dekarbonizacije.

Broj planiranih/operativnih CCS projekata u EU raste. Na primjer, 2021. godine broj planiranih/operativnih CCS projekata iznosio je 51, uz planirano skladištenje oko 50 Mt CO<sub>2</sub>/god. do 2030. godine. 2022. godine broj planiranih/operativnih projekata CCS-a



povećao se na 65, uz planirano skladištenje oko 60 Mt CO<sub>2</sub>/god. do 2030. godine [14]. Važnije od samog povećanja količine CO<sub>2</sub> koji se planira skladištiti je i povećan broj zemalja koje planiraju implementirati CCS projekte, čime se znatno doprinosi razvoju europske CCS mreže.

Iako broj planiranih projekata u Europi raste, troškovi CCS-a mogu značajno varirati. Općenito, prijavljeni troškovi CCS-a variraju između 60 USD/t i više od 120 USD/t [15].

Nadalje, Paltsev i dr. [16] istražili su ulogu CCS-a u sektorima koji teško mogu smanjiti emisije (proizvodnja cementa, čelika i kemijska industrija) i zaključili da su globalni troškovi smanjenja emisija znatno viši bez implementacije CCS-a. Također, proizvodnja nisko ugljičnog cementa iznimno je ovisna o primjeni CCS tehnologije.

Slično tome, Leeson i dr. [17] također su zaključili da odgođena implementacija CCS-a u industriji znatno povećava troškove dekarbonizacije. Proveli su tehnološko-ekonomsku analizu primijenjenu na sektore proizvodnje čelika, cementa, prerade nafte i papira. Autori su definirali raspon troškova između 40 i 70 USD po toni izbjegnuto CO<sub>2</sub>.

Što se tiče hvatanja CO<sub>2</sub>, pretpostavlja se da većina postrojenja ima stopu hvatanja od 90% [18]. Autori raspravljaju o literaturi koja proučava mogućnost značajnog premašivanja 90% hvatanja (koncept „dubokog“ CCS-a) u pogledu najnovijih napredaka u procesima i dizajnu korištenih materijala.

Hvatanje CO<sub>2</sub> također se može primijeniti na postrojenju za proizvodnju vodika iz prirodnog plina (plavi vodik). George i dr. [19] zaključuju da će plavi vodik vjerojatno postati najisplativija opcija proizvodnje, ne samo kao nisko ugljična alternativa srednjoročno, već i kao dugoročno rješenje za proizvodnju vodika.

Razmatrajući poslovne modele, Kapetaki i Scowcroft [20] ponudili su pregled poslovnih modela CCS projekata u Sjevernoj Americi i Europi. Autori su zaključili da uspješan razvoj projekta dobro korelira s jasnim regulatornim okvirom te ranim i trajnim angažmanom dionika radi prihvaćanja javnosti.

Zhang [21] je proveo komparativnu analizu zakonodavnih okvira za razvoj hvatanja, korištenja i skladištenja CO<sub>2</sub> (*engl. Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS*) u Europi, Kini i na Bliskom istoku. Ključni regulatorni problemi za Europu su identificirani: operatori postrojenja odgovorni su za sve ekološke/okolišne obveze tijekom trajanja projekta (mjerjenja, izvještavanja i monitoring), dok su mehanizmi prijenosa odgovornosti na nadležno državno tijelo strogi i kompleksni. Što se tiče regija Kine i Bliskog istoka, zaključeno je da nisu uspostavili specifičan zakonodavni okvir za CCUS i da je poželjno precizno definiranje postupka za odobrenje projekata uz odredbe o mehanizmima odgovornosti.

Jedna od najvažnijih direktiva EU vezana uz razvoj CCS tehnologije je i EU ETS Direktiva [22]. Ona predstavlja uspostavu sustava trgovanja emisijskim jedinicama (EUA) koje predstavljaju dozvolu za emitiranje jedne tone ekvivalenta CO<sub>2</sub> unutar EU. EU ETS uključuje emisije iz stacionarnih postrojenja i sektora zrakoplovstva te pokriva približno 40% emisija stakleničkih plinova u EU. Sustav je definiran je kao "Ograniči i Trguj" sustav (*engl. Cap and Trade*), što znači da je postavljena granica za količinu emisija koja se smanjuje svake



godine, dok je emiterima/sudionicima na tržištu dopušteno trgovati emisijskim jedinicama kako bi bili u skladu s Direktivom. Posljedično, svake godine emiteri trebaju predati količinu EUA koja je jednaka njihovim potvrđenim emisijama za tu određenu godinu. Ako to ne učine, emiteri se kažnjavaju sa 100 EUR za svaki EUA koji nedostaje uz kupnju nedostajućih količina EUA po tržišnoj cijeni.

Trenutačno je EU ETS u četvrtoj fazi koja će trajati od 2021. do 2030. Tu fazu karakterizira postavljena gornja granica od 1.571.583.007 EUA s linearnim faktorom smanjenja (*engl. Linear Reduction Factor, LRF*) od 2,2%. To znači da će se granica svake godine smanjivati za 43.003.515 EUA, odnosno, da će EUA nestati negdje između 2057. i 2058.

Aktivnosti važne za ovaj rad koje spadaju pod nadležnost ove direktive su:

- Hvatanje CO<sub>2</sub> iz postrojenja koje je dio EU ETS-a u svrhu transporta i geološkog skladištenja,
- Transport CO<sub>2</sub> cjevovodom za geološko skladištenje i
- Geološko skladištenje CO<sub>2</sub>.

Dakle, postrojenja koja hvataju CO<sub>2</sub> iz svog toka dimnih plinova, transportiraju ga cjevovodom i podzemno ga skladište, ne trebaju predati određenu količinu EUA koja je jednaka tonama adekvatno uhvaćenog, transportiranog i uskladištenog CO<sub>2</sub>, budući da će se ta količina emisija računati kao neemitirana. Ovo izbjegavanje troškova za operatere postrojenja unutar EU ETS tržišta predstavlja jedan od ključnih pokretača za potencijalnu implementaciju CCS tehnologije.

Od značaja za ovo istraživanje je i činjenica da države članice EU svake godine dobiju određenu količinu EUA, a koja ovisi o emisijskom udjelu pojedine države članice u ukupnim emisijama EU. Dio emisijskih jedinica dodjeljuje se besplatno emiterima ovisno o njihovoj učinkovitosti, dok se ostatak prodaje na dražbama.

U ovom radu, spomenuti prihodi od prodaje emisijskih jedinica na dražbama koristit će se kao izvor financiranja primjene CCS tehnologije u Hrvatskoj.

Cilj je definirati sustav poticaja (na primjeru istočne Hrvatske) po toni uhvaćenog CO<sub>2</sub>, na način da se osnuje CCS fond u kojem će se nekoliko godina alocirati postotak sredstava od prodaje EUA na dražbama, kako bi se naposljetku poticaji isplaćivali emiterima 10 godina. Detaljan način određivanja točnog iznosa poticaja prikazan je u drugom poglavlju rada.

## 2. Metodologija

Proces određivanja iznosa poticaja za primjenu CCS tehnologije može se sistematski definirati na sljedeći način:

- Projekcija cijene EUA
- Projekcija količine EUA prodanih na dražbama
- Osnivanje CCS Fonda
- Projekcija emisija CO<sub>2</sub>
- Određivanje iznosa poticaja

Za projekciju cijene EUA definirana je polazišna točka od 90 EUR/EUA za 2023. godinu, dok će cijena u daljnjem razdoblju do 2027. (pet godina) rasti prema tri scenarija:

1. Niski scenarij – 2,77 EUR/godišnje
2. Srednji scenarij – 5,95 EUR/godišnje
3. Visoki scenarij – 9 EUR/godišnje

Sljedeći korak je procjena količine EUA prodanih na dražbama u Hrvatskoj. Sukladno „Odluci o donošenju Plana korištenja financijskih sredstava dobivenih od prodaje emisijskih jedinica putem dražbi u Republici Hrvatskoj od 2021. do 2025. godine“ definirane su količine emisijskih jedinica koje će se prodavati na dražbama do 2025. godine. Budući da se u ovom radu razmatra period od pet godina (do 2027. godine), količina emisijskih jedinica za prodaju na dražbi smatrala se konstantnom nakon 2025. godine (Tablica 1.)

**Tablica 1.** Količina emisijskih jedinica za prodaju na dražbama u Hrvatskoj

Godina	Količina EUA
2023	2238000
2024	2910000
2025	2846500
2026	2846500
2027	2846500

Nakon što su poznata kretanja cijena EUA i njihovih količina za prodaju na dražbama, množenjem se određuju prihodi od prodaje. Sljedeći korak je osnivanje CCS fonda, koji podrazumijeva izdvajanje određenog postotka sredstava od prodaje EUA na dražbi. U svrhu ovog istraživanja definirane su četiri veličine CCS fonda:

1. 5 %,
2. 10 %,
3. 20 % i
4. 30 % ukupnih prihoda od prodaje EUA na dražbama.

Trajanje alociranja sredstava u CCS fond ovisit će i o veličini emitera za kojeg se žele odrediti poticaji. Ukoliko su godišnje CO<sub>2</sub> emisije emitera veće od 150 000 tona, sredstva će se alocirati u fond pet godina, dok će za sve manje emitere alociranje trajati 2 godine.

Nakon što su sredstva alocirana u CCS fond, potrebno je projicirati emisije CO<sub>2</sub> za pojedine emitere (Slika 1.) kako bi se mogli odrediti točni iznosi poticaja za razdoblje od 10 godina.



Slika 1. Prostorna raspodjela emitera u Istočnom klasteru [23].

Skup emitera koji je uzet u razmatranje spada u regiju istočne Hrvatske, a sastoji se od: postrojenja za proizvodnju cementa „NEXE“, postrojenja za proizvodnju ambalaže i papirnatih proizvoda „DS Smith Belišće“ te dvije termoelektrane-toplane „TE-TO Osijek“ i „UNI VIRIDAS“.

Obzirom da emisije CO<sub>2</sub>, mogu značajno varirati na godišnjoj razini, za njihovu je projekciju korišten analitički oblik stohastičke diferencijalne jednačbe koja opisuje geometrijsko Brownovo gibanje:

$$S_t = S_0 e^{((\mu - \frac{\sigma^2}{2})t + z_t \sigma)} \quad (1)$$

Gdje je:

$S_t$  – Emisije CO<sub>2</sub> u godini t (tone)

$S_0$  – Emisije CO<sub>2</sub> u nultoj godini (tone)

$\mu$  – drift (-)

$\sigma$  – volatilnost (-)

$z_t$  – nasumična varijabla (-, [0,1])

Dok se statistički parametri drifta i volatilnosti mogu izračunati na sljedeći način:

$$\mu = \bar{E} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (E_i - \bar{E})^2}{T-1}} \quad (3)$$

Pri čemu je:

T- vremensko razdoblje (godine)

E- povijesne emisije CO<sub>2</sub> (tone)





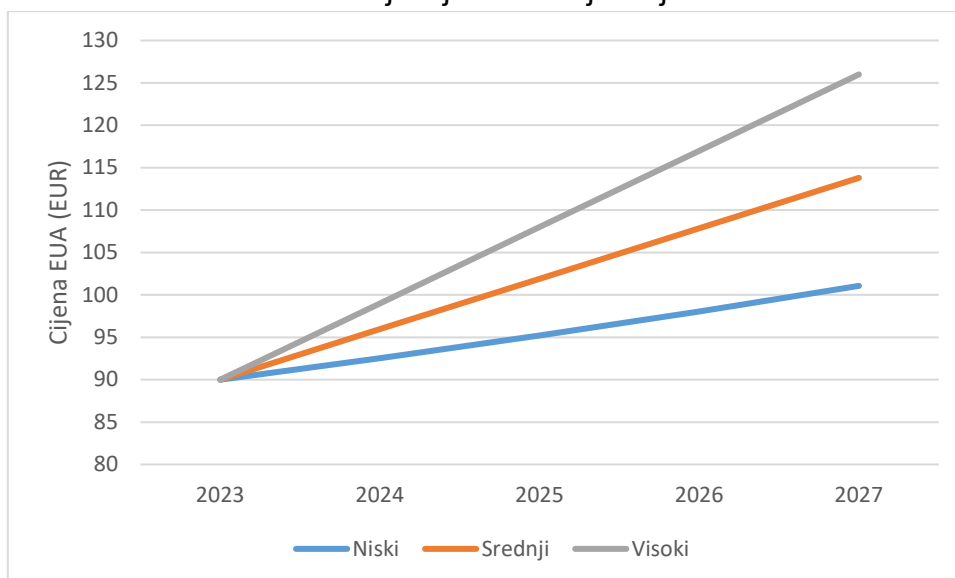
Iz jednadžbi je razvidno da primjenom geometrijskog Brownovog gibanja, projekcije CO<sub>2</sub> emisija ovise isključivo o povijesnim emisijama. Sam izračun je izveden u Pythonu, simulirajući 5000 slučajeva za svakog emitera. Zatim su definirane tri percentilne krivulje koje su korištene kao referentni scenariji budućeg kretanja emisija CO<sub>2</sub>:

1. P90, 90-ti percentil
2. P50, 50-ti percentil
3. P10, 10-ti percentil

Naposlijetku, uz poznate scenarije emisija CO<sub>2</sub> i iznose sredstava u CCS fondu, moguće je definirati iznose poticaja za svakog emitera u trajanju od 10 godina.

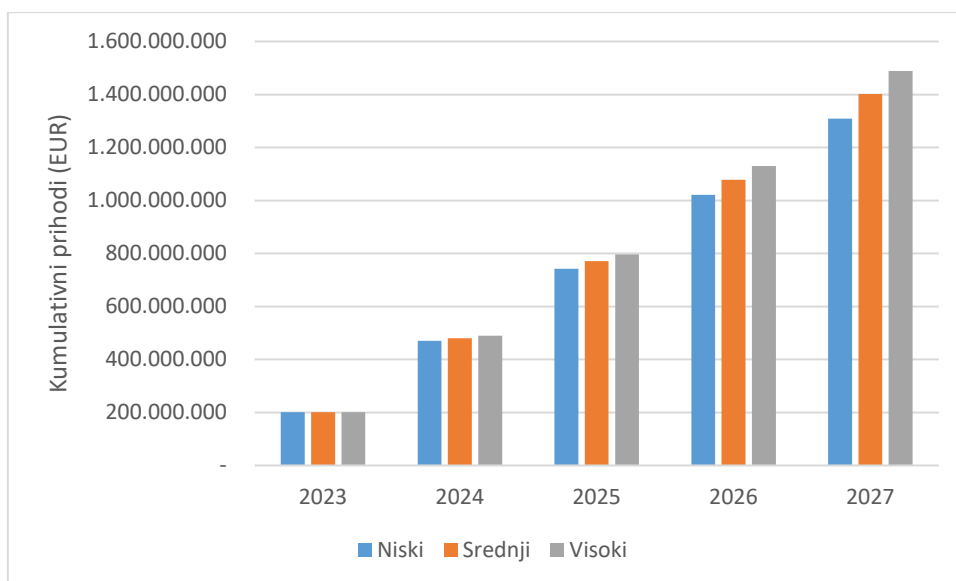
### 3. Rezultati

Na slici 2. prikazana su buduća kretanja cijene emisijskih jedinica.



**Slika 2.** Projekcija cijena EUA

Iz slike je razvidno da će cijene EUA, ovisno o scenariju, u 2027. godini varirati između 100 i 126 EUR. Uz poznate cijene EUA i njihove količine koje će se prodavati na dražbama, moguće je prikazati i kumulativne prihode (Slika 3.)



**Slika 3.** Kumulativni prihodi o prodaje EUA na dražbama

Prikaz kumulativnih prihoda je od velikog značaja budući da će se sredstva određeni niz godina alocirati (akumulirati) u CCS fond. S obzirom da će trajanje alociranja iznositi dvije godine za manje emitere (<150 000 tona CO<sub>2</sub> godišnje) i pet za veće emitere (>150 000 tona CO<sub>2</sub> godišnje), potrebno je prikazati akumulirana sredstva u CCS fondu u 2024. i 2027. godini (Tablica 2.).

**Tablica 2.** Sredstva u CCS fondu ovisno o njegovoj veličini (EUR)

Veličina CCS fonda	Cijena EUA	2024.	2027.
5%	Niski	23.534.402	65.423.604
	Srednji	24.031.725	70.080.979
	Visoki	24.475.500	74.431.575
10%	Niski	47.068.803	130.847.207
	Srednji	48.063.450	140.161.958
	Visoki	48.951.000	148.863.150
20%	Niski	94.137.606	261.694.414
	Srednji	96.126.900	280.323.915
	Visoki	97.902.000	297.726.300
30%	Niski	141.206.409	392.541.622



	Srednji	144.190.350	420.485.873
	Visoki	146.853.000	446.589.450

Iz tablice se zaključuje da, ovisno o veličini fonda, u 2024. godini sredstva u CCS fondu iznose između 24 i 147 milijuna EUR, dok u 2027. godini variraju između 65 i 447 milijuna EUR. Može se zaključiti kako akumulirana sredstva u sklopu CCS fonda predstavljaju značajan potencijal za poticanje primjene CCS tehnologije. Kako bi se odredio točan iznos poticaja za svakog od promatrana četiri emitera, potrebno je izračunati projekcije njihovih CO<sub>2</sub> emisija (jednadžba 1) pomoću povijesnih kretanja istih (Tablica 3.)

**Tablica 3.** Povijesne emisije CO<sub>2</sub> (kt)

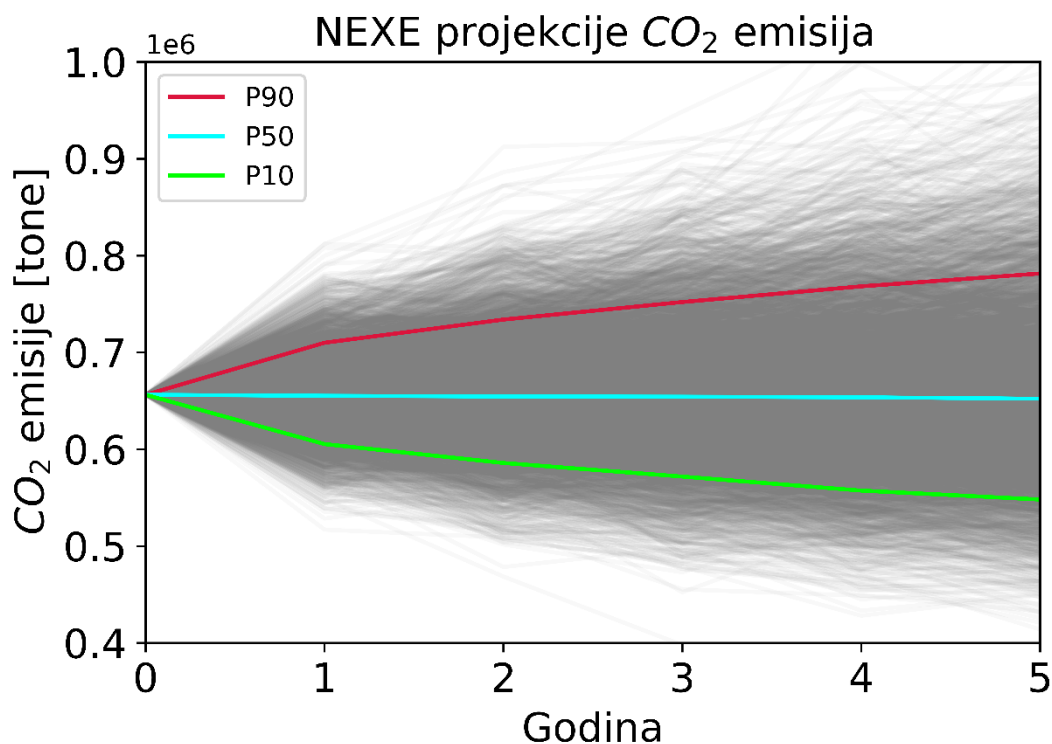
Emiter	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013
NEXE	656	635	646	651	637	601	516	520	489	436
DS Smith Belišće	96	101	96	94	90	90	78	43	59	61
UNI VIRIDAS	105	105	103	101	102	95	96	/	/	/
TE-TO Osijek	45	70	57	66	74	96	99	91	119	121

Iz tablice je vidljivo da jedino NEXE spada u kategoriju velikih emitera, dok ostali mogu biti klasificirani kao mali. Prije samog određivanja budućeg kretanja CO<sub>2</sub> emisija, potrebno je izračunati statističke parametre, volatilitnost i drift (jednadžbe 2 i 3, Tablica 4.).

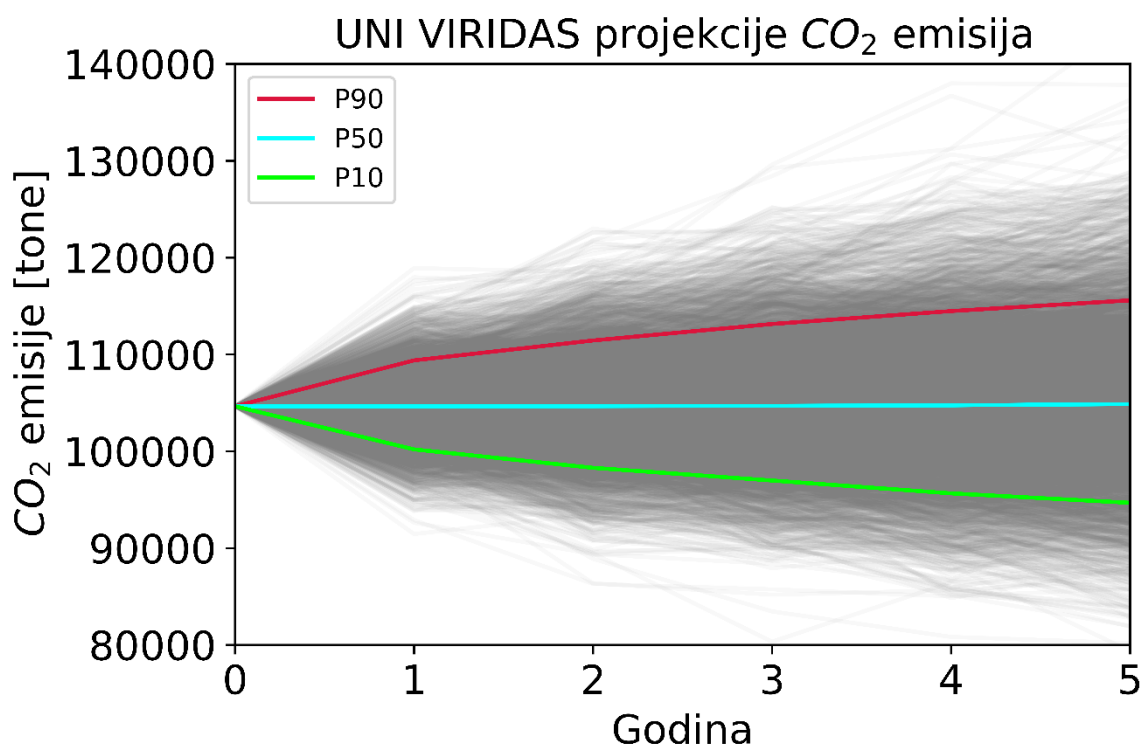
**Tablica 4.** Izračunate vrijednosti volatilitnosti i drifta

Emiter	$\sigma$ [-]	$\mu$ [-]
NEXE	0,0622	0,0481
DS Smith Belišće	0,0393	0,0135
UNI VIRIDAS	0,0342	0,0185
TE-TO Osijek	0,2419	-0,0900

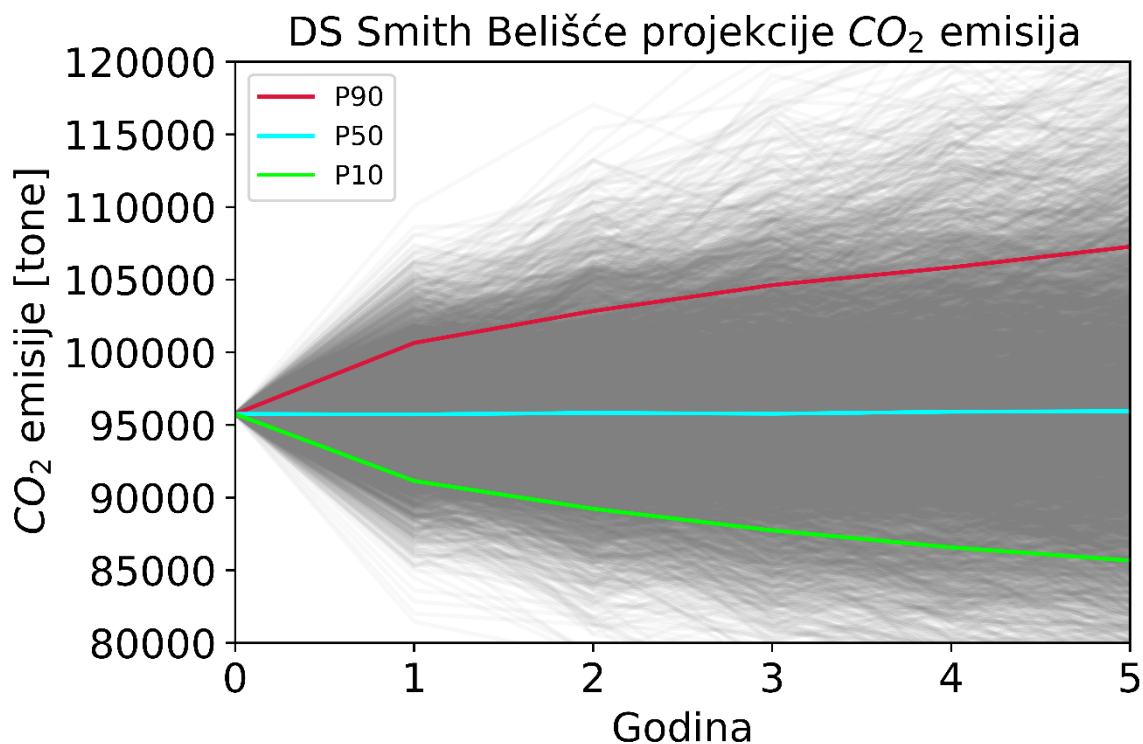
Iz tablice se uočava da se izračunate volatilitnosti kreću između 3 i 24 %, pri čemu volatilitnost postrojenja TE-TO Osijek odstupa od ostalih, zbog značajnih fluktuacija povijesnih emisija. Driftovi također variraju između -9 i 1,5 % pri čemu drift za TE-TO Osijek ponovno odstupa zbog istih razloga kao i za volatilitnost. Sljedeće slike prikazuju projekcije CO<sub>2</sub> emisija za odabrana četiri emitera (Slike 4., 5., 6. i 7.), pri čemu nulta godina prikazuje 2022., a peta 2027. godinu.



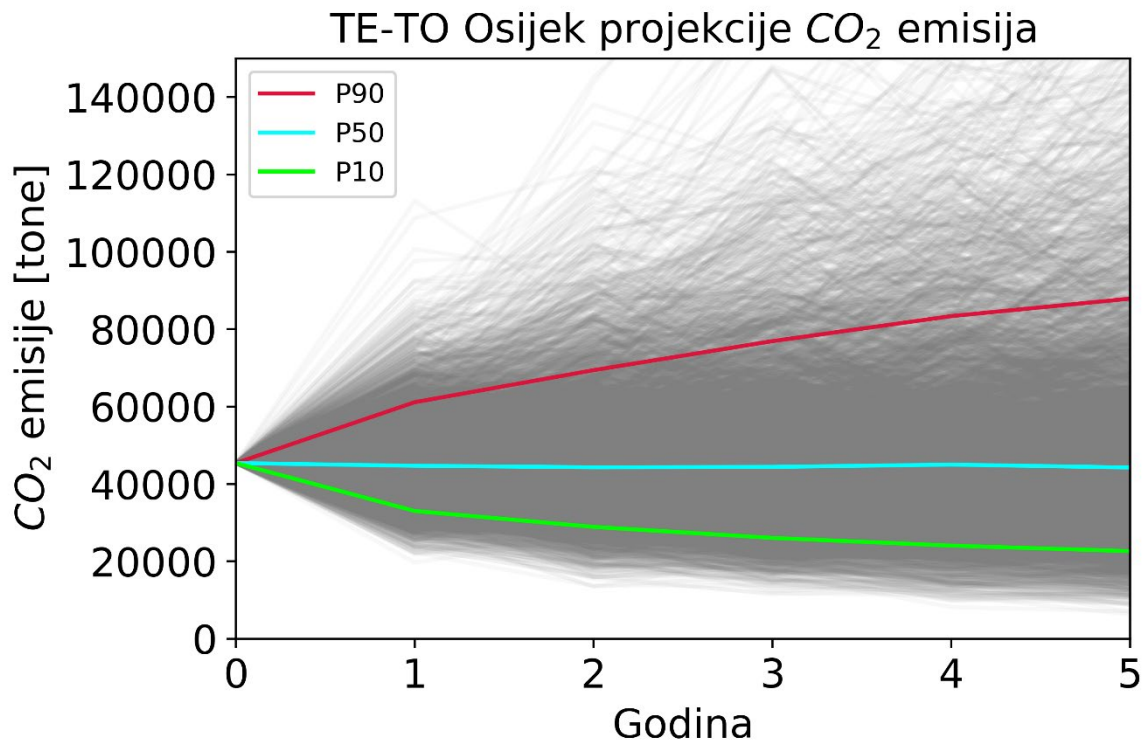
Slika 4. projekcije CO<sub>2</sub> emisija za NEXE



Slika 5. Projekcije CO<sub>2</sub> emisija za UNI VIRIDAS



Slika 6. Projekcije CO<sub>2</sub> emisija za DS Smith Belišće



Slika 7. Projekcije CO<sub>2</sub> emisija za TE-TO Osijek



Iz slika se može zaključiti kako P90 scenariji predstavljaju povećanje emisija, P10 smanjenje, dok je P50 definiran isključivo driftom. Tablicom 5. prikazane su projicirane emisije odabranih emitera u 2027. godini ovisno o scenariju.

**Tablica 5.** CO<sub>2</sub> emisije emitera u 2027. godini ovisno o scenariju (tone)

NEXE, P90	784777
NEXE, P50	657565
NEXE, P10	550167
UNI VIRIDAS, P90	115344
UNI VIRIDAS, P50	104703
UNI VIRIDAS, P10	94716
DS Smith Belišće, P90	107060
DS Smith Belišće, P50	95949
DS Smith Belišće, P10	85670
TE-TO Osijek, P90	88992
TE-TO Osijek, P50	44614
TE-TO Osijek, P10	22477

Uz poznate vrijednosti emisija u 2027. godini i sredstava u CCS fondu u 2024. i 2027. godini (ovisno o veličini emitera), moguće je odrediti desetogodišnji iznos poticaja, na način da se sredstva u fondu podijele sa deseterostrukim vrijednostima emisija CO<sub>2</sub> (Slika 8.).



Scenariji CO <sub>2</sub> emisija emitera	NEXE, P90			NEXE, P50			NEXE, P10			UNI VIRIDAS, P90			UNI VIRIDAS, P50			UNI VIRIDAS, P10			DS Smith Belišće, P90			DS Smith Belišće, P50			DS Smith Belišće, P10			TE-TO Osijek, P90			TE-TO Osijek, P50			TE-TO Osijek, P10														
	Niski, 5%	Srednji, 5%	Visoki, 5%	Niski, 10%	Srednji, 10%	Visoki, 10%	Niski, 20%	Srednji, 20%	Visoki, 20%	Niski, 30%	Srednji, 30%	Visoki, 30%	Niski, 5%	Srednji, 5%	Visoki, 5%	Niski, 10%	Srednji, 10%	Visoki, 10%	Niski, 20%	Srednji, 20%	Visoki, 20%	Niski, 30%	Srednji, 30%	Visoki, 30%	Niski, 5%	Srednji, 5%	Visoki, 5%	Niski, 10%	Srednji, 10%	Visoki, 10%	Niski, 20%	Srednji, 20%	Visoki, 20%	Niski, 30%	Srednji, 30%	Visoki, 30%												
	8	9	9	17	18	19	33	36	38	50	54	57	20	21	21	41	42	42	82	83	85	122	125	127	22	22	23	44	45	46	88	90	91	132	135	137	26	27	28	53	54	55	106	108	110	159	162	165
	10	11	11	20	21	23	40	43	45	60	64	68	22	23	23	45	46	47	90	92	94	135	138	140	25	25	26	50	51	52	99	101	103	149	152	155	53	54	55	106	108	110	211	215	219	317	323	329
	12	13	14	24	25	27	48	51	54	71	76	81	25	25	26	49	50	51	98	100	102	147	150	153	27	28	29	55	56	57	110	112	114	165	168	171	105	107	109	209	214	218	419	428	436	628	642	653

Scenariji cijene EUA i veličine CCS fonda

Slika 8. Iznosi poticaja (EUR/t uhvaćenog CO<sub>2</sub>)

Na slici se uočavaju dvije skale boja. Iznosi poticaja za NEXE iskazani su u nijansama plave, dok su za ostale emitere prikazane skalom od narančaste do crvene. Tomu je tako zbog podjele na velike i male emitere, budući da se pri određivanju iznosa poticaja za NEXE



koriste vrijednosti sredstava u CCS fondu u 2027. godini (5 godina alociranja), a za DS Smith Belišće, UNI VIRIDAS i TE-TO Osijek vrijednosti sredstava u CCS fondu u 2024. godini (2 godine alociranja).

Obzirom na značajne CO<sub>2</sub> emisije NEXE-a, relevantni iznosi poticaja postižu se samo pri većim veličinama CCS fonda (20 i 30%) te iznose između 33 i 81 EUR/t. Ukoliko se promatraju manje veličine CCS fonda (5 i 10%), poticaju mogu varirati između 8 i 27 EUR/t. Emiteri UNI VIRIDAS i DS Smith Belišće imaju slične emisije CO<sub>2</sub> pa su im stoga i iznosi poticaja slični. Već i pri manjim veličinama CCS fonda od 5 i 10% mogu se doseći učinkovite vrijednosti poticaja između 22 i 57 EUR/t, dok pri većim veličinama fonda (20 i 30%) poticaji iznose između 82 i 171 EUR/t. Važno je naglasiti kako realizacija isplate poticaja od 171 EUR/t nije realistična, tj. previsoka je uzimajući u obzir predviđeno kretanje cijena EUA, stoga autori preporučuju postavljanje gornje granice iznosa poticaja na 80 EUR/t.

Uzimajući u obzir relativno niske emisije za TE-TO Osijek, iznosi poticaja premašuju preporučenu gornju vrijednost i pri najmanjoj veličini CCS fonda od 5%, a vrijednosti su između 26 i 109 EUR/t. Tako širok raspon poticaja za jednu veličinu CCS fonda može se objasniti visokom volatilnošću koja uzrokuje značajne razlike u emisijama ovisno o scenariju. Ekstremno visoki iznosi poticaja (80 do 653 EUR/t) za male emitere u slučaju većih veličina CCS fonda od 20 i 30% predstavljaju priliku za stvaranje CCS klastera u istočnoj Hrvatskoj, odnosno mogućnost poticanja više emitera istovremeno. To bi omogućilo emiterima stvaranje i korištenje zajedničke transportno-skladišne infrastrukture, uz istovremeno smanjenje troškova cjelokupnog CCS vrijednosnog lanca.

#### 4. Zaključak

Na temelju prikazanih rezultata projiciranja CO<sub>2</sub> emisija i definiranja sustava poticaja za CCS tehnologiju, može se zaključiti:

- CO<sub>2</sub> emisije mogu se uspješno projicirati primjenom geometrijskog Brownovog gibanja budući da su definirane samo povijesnim kretanjem emisija, a koje pak ovise o brojnim parametrima poput vrste korištenih energenata, učinkovitosti proizvodnog procesa, poslovne politike tvrtke itd.
- Veći CCS fond i veće cijene EUA, podrazumijevaju i više uhvaćenog CO<sub>2</sub> koji se može poticati.
- Modeliranje veličine CCS fonda trebalo bi se provoditi na način koji će rezultirati najvećim interesom dionika s najmanjom mogućnošću financiranja kako bi se omogućila što šira primjena CCS tehnologije.
- Scenariji projiciranja emisija, uglavnom određeni volatilnostima, zajedno s veličinama CCS fonda imaju najveći utjecaj na iznose poticaja.
- Promjene scenarija kretanja cijena EUA najmanje su utjecale na iznose poticaja zbog unaprijed definiranih graničnih uvjeta, tj. zbog male razlike između scenarija.

Za NEXE, kao jedinog predstavnika velikih emitera u promatranom području, optimalni iznosi poticaja postižu se pri većim veličinama CCS fonda od 20 i 30 %.

Puno optimističniji rezultati prikazani su za manje emitere gdje se preporučena gornja granica poticaja od 80 EUR/t dostiže i pri najmanjoj veličini fonda za TE-TO Osijek, odnosno veličinom CCS fonda od 20 % za UNI VIRIDAS i DS Smith Belišće. Ovakvi rezultati stvaraju mogućnost za razvoj klastera za CCS u istočnom dijelu Hrvatske, što omogućuje poticanje više emitera. Osim toga, takav pristup omogućava emiterima da zajednički koriste transportne i skladišne infrastrukture, što rezultira smanjenjem ukupnih troškova u cijelom CCS vrijednosnom lancu. Od velikog je značaja i činjenica da su iznosi poticaja za male emitere određeni na temelju sredstava u CCS fondu nakon samo dvije godine alociranja sredstava, što predstavlja dodatnu priliku za ubrzavanje primjene CCS tehnologije u Hrvatskoj.

## 5. Zahvala

Ovo istraživanje povezano je s doktorskom disertacijom i financirano od strane Hrvatske Zaklade za Znanost, DOK-2020-01-8850.

## 6. Literatura

1. Paris Agreement, 2016. Paris Agreement, Official Journal of the European Union [WWW Document]. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01)).
2. Green Deal, 2019. The European Green Deal [WWW Document]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&tnqhx0026;from=EN>.
3. Kılış, Ş., Krajačić, G., Duić, N., Rosen, M.A., Ahmad Al-Nimr, M., 2021. Accelerating mitigation of climate change with sustainable development of energy, water and environment systems. *Energy Convers Manag* 245, 114606. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114606>
4. Kılış, Ş., Krajačić, G., Duić, N., Rosen, M.A., Al-Nimr, M.A., 2022. Effective mitigation of climate change with sustainable development of energy, water and environment systems. *Energy Convers Manag* 269, 116146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116146>
5. Mikulčić, H., Zhang, Z., Baleta, J., Klemeš, J.J., 2021. Sustainable development in period of COVID-19 pandemic. *J Clean Prod* 328, 129577. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129577>
6. Seljak, T., Baleta, J., Mikulčić, H., 2023. Integration of energy systems, circular economy and efficiency measures. *Cleaner Chemical Engineering* 5, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100088>
7. Baleta, J., Mikulčić, H., Klemeš, J.J., Urbaniec, K., Duić, N., 2019. Integration of energy, water and environmental systems for a sustainable development. *J Clean Prod* 215, 1424–1436. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.035>
8. Mikulčić, H., Baleta, J., Klemeš, J.J., 2022a. Cleaner technologies for sustainable development. *Clean Eng Technol* 7, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100445>
9. Astiaso Garcia, D., Dionysis, G., Raskovic, P., Duić, N., Al-Nimr, M.A., 2023. Climate change mitigation by means of sustainable development of energy, water and

- environment systems. *Energy Conversion and Management*: X 17, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100335>
10. Matak, N., Krajačić, G., 2020. Assessment of mitigation measures contribution to CO<sub>2</sub> reduction in sustainable energy action plan. *Clean Technol Environ Policy* 22, 2039–2052. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01793-y>
  11. Matak, N., Mimica, M., Krajačić, G., 2022. Optimising the Cost of Reducing the CO<sub>2</sub> Emissions in Sustainable Energy and Climate Action Plans. *Sustainability* 14, 3462. <https://doi.org/10.3390/su14063462>
  12. Stančin, H., Mikulčić, H., Wang, X., Duić, N., 2020. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 128, 109927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>
  13. Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., Kalogirou, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renew Energy* 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
  14. IOGP, 2022. Map of CCUS projects in Europe [WWW Document]. <https://iogpeurope.org/resource/map-of-eu-ccus-projects/>.
  15. Global CCS Institute, 2021. TECHNOLOGY READINESS AND COSTS OF CCS [WWW Document]. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/03/CCE-CCS-Technology-Readiness-and-Costs-22-1.pdf>.
  16. Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H., Herzog, H., 2021. Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation. *Appl Energy* 300. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322>
  17. Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., Fennell, P.S., 2017. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 61. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.020>
  18. Dods, M.N., Kim, E.J., Long, J.R., Weston, S.C., 2021. Deep CCS: Moving beyond 90% Carbon Dioxide Capture. *Environ Sci Technol* 55. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07390>
  19. George, J.F., Müller, V.P., Winkler, J., Ragwitz, M., 2022. Is blue hydrogen a bridging technology? - The limits of a CO<sub>2</sub> price and the role of state-induced price components for green hydrogen production in Germany. *Energy Policy* 167, 113072. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113072>
  20. Kapetaki, Z., Scowcroft, J., 2017. Overview of Carbon Capture and Storage (CCS) Demonstration Project Business Models: Risks and Enablers on the Two Sides of the Atlantic, in: *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1816>
  21. Zhang, H., 2021. Regulations for carbon capture, utilization and storage: Comparative analysis of development in Europe, China and the Middle East. *Resour Conserv Recycl* 173. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105722>
  22. EU ETS Directive, 2003. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC (Text





with EEA relevance) [WWW Document]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0087>.

23. Vulin, D., Močilac, I.K., Jukić, L., Arnaut, M., Vodopić, F., Saftić, B., Sedlar, D.K., Cvetković, M., 2023. Development of CCUS clusters in Croatia. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 124, 103857. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103857>



# Kratki pregled: Razvoj kanalizacijskih sustava kroz povijest

## *A Short Review: Historical Development of Sewer Systems*

D. Obradović<sup>1\*,2</sup>, A. Ivanković<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup>Ekonomski fakultet u Osijeku, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dobradovic@gfos.hr](mailto:dobradovic@gfos.hr)

### Sažetak

Kanalizacijska infrastruktura zauzima jako važno mjesto u razvoju civilizacije. Kako je sve veći broj stanovnika, tako raste i količina otpadne vode što postaje velik problem današnjice. Pouzdana infrastruktura temelj je za društveni i ekonomski razvoj države. Kanalizacijski sustav jedan je od glavnih gradskih infrastrukturnih sustava u službi očuvanja javnog zdravlja. Pojavom industrijske revolucije u 19. stoljeću te, posljedično, porastom broja stanovnika uočava se kako više nije moguće otpadnu, korištenu vodu ispuštati bez pročišćavanja u prirodni okoliš te počinje razvoj postrojenja za obradu otpadnih voda. Također, u 18. i 19. stoljeću postaje vidljivo kako poboljšanje sanitarne infrastrukture smanjuje stopu smrtnosti. Tada postaje jasno kako se treba ulagati u gradnju kanalizacijskih sustava. Međutim, odvođenje otpadnih voda, odnosno gradnja kanalizacijskih sustava je počela još davno prije kod starih civilizacija kao što su civilizacije na Bliskom istoku, sjevernoj Africi i sl. Prema tome, kanalizacijski sustavi nisu privilegija današnjice. U radu će se kratko, tekstom i slikama, prikazati razvoj kanalizacijskih sustava kroz povijest. Također, bit će prikazan razvoj kanalizacijskih sustava u Europi i Republici Hrvatskoj.

**Ključne riječi:** kanalizacijski sustavi, otpadne vode, povijest, razvoj, sanitarna infrastruktura

### Abstract

Sewer infrastructure plays a very important role in the development of civilization. As the population grows, so does the waste water volume, which creates a major problem today. Reliable infrastructure is the basis for the social and economic development of the state. The sewer system is one of the main urban infrastructure systems in the service of preserving public health. With the emergence of the industrial revolution in the 19th century and, consequently, with the increase in population, it is no longer possible to dispose waste, used water without purification into natural environment thus leading to development of waste water treatment plants. Also, in the 18th and 19th century it became evident that the



improvement of sanitary infrastructure reduces the mortality rate, which resulted in understanding the necessity of investing in the construction of sewer systems. However, waste water drainage, i.e. the construction of sewer systems, began long time ago with ancient civilizations, such as civilizations in the Middle East, North Africa, etc. Therefore, sewer systems are not the privilege of today. The paper will briefly present, with text and pictures, the development of sewer systems throughout the history. The development of sewer systems in Europe and the Republic of Croatia will also be presented.

**Key words:** sewer systems, wastewater, history, development, sanitary infrastructure

## 1. Uvod

Iako je kanalizacijski sustav nešto mlađi od vodoopskrbnog sustava, isti je veoma važan u kruženju vodnih resursa u prirodi. Od nastanka ljudske zajednice postoji potreba za osiguranjem uvjeta za opskrbu pitkom vodom kao i za druge ljudske djelatnosti. Istovremeno se postavlja i pitanje zbrinjavanja iskorištenih otpadnih voda. Ovim pitanjima su se bavile civilizacije, od davnina do danas, a bavit će se i u budućnosti, jer su to pitanja bez kojih nema normalnog života na Zemlji [1]. Iako je mnogo napisano o povijesti vodoopskrbnih sustava, nedostaju odgovarajući podaci o gospodarenju otpadnim vodama. To je iznenađujuće jer nedostatak sanitarnih uvjeta utječe na ljudski razvoj u istoj ili čak većoj mjeri nego nedostatak čiste vode. Općenito se smatra da sanitarni uvjeti imaju značajan utjecaj na financijske resurse, kao i na napredak čovječanstva [2].

Primijećeno je da ulaganje u sanitarnu infrastrukturu i razvoj iste ima velik utjecaj na smanjenje mortaliteta stanovništva [3], [4], [5] što su autori [4], [5] u radovima istražili i utvrdili. Analizirano područje je bilo Engleska, Wales, Švicarska, Švedska i Finska. Autori istraživanja [4] bave se problematikom i istraživanjem utjecaja poboljšanja sanitarne infrastrukture na smrtnost u urbanim sredinama. Njihov fokus je proučavanje poboljšanja opskrbe vodom i razvoja učinkovitih kanalizacijskih sustava. Vjerojatno su takva poboljšanja najviše utjecala na zdravlje smanjujući izloženost bolestima koje se prenose vodom i hranom [4].

Opskrba vodom i odvodnja se stoljećima sastojala od transporta svježje, čiste vode do gradova te ispuštanja onečišćene vode u prirodni okoliš. Međutim, s porastom broja stanovnika u gradovima kao posljedice industrijske revolucije u 19. stoljeću takvo nešto više nije bilo moguće. Pojava epidemija potaknula je razvoj postrojenja za obradu otpadnih voda [6].

Nevjerojatno je koliko se povijesti nalazi na kraju kanalizacijskog sustava: od prehrane, higijenskih navika, upotrebe lijekova pa sve do intimnih navika. Nema pouzdanijeg izvora za spoznaju običaja i ponašanja društva nego kroz njegove otpadne tvari, kao i činjenice da je navedeno izvan percepcije ljudi. Također, ne postoji sociološka analiza koja je istinitija od analize otpadne vode [2].

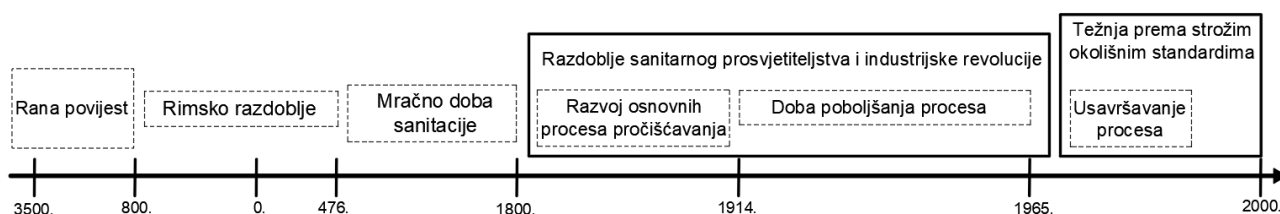
Victor Hugo napisao je da se „Povijest ljudi ogleda u povijesti kanala“ [2], [7], [8]. O istinitosti navedenoga dovoljno govori podatak kako je utvrđeno da je moguće detektirati koronavirus

u otpadnim vodama kanalizacije [9], [10] što može biti od velike pomoći kod praćenja epidemije. Nadalje, Hugo navodi: „Kanal Pariza je stara strašna stvar. On je bio grobnica, on je bio sklonište. Zločin, inteligencija, društvena buna, sloboda savjesti, misao, krađa, sve što ljudski zakoni gone ili su gonili skrivalo se u ovoj rupi (...) Kanal, to je savjest jednoga grada. Sve se tu stječe i tu se suočava. Na tomu mokrome mjestu ima mraka, ali nema više tajni. Svaka stvar ima svoj istinski oblik, ili barem svoj konačni oblik“ [8].

Razvoj kanalizacijskog sustava mogao bi se, prema povijesnim razdobljima, podijeliti na pet glavnih razdoblja:

- Rana povijest
- Rimsko razdoblje
- Mračno doba sanitacije
- Doba sanitarnog prosvjetiteljstva i industrijsko doba
- Doba strogih ekoloških standarda [2].

Navedeno je pregledno prikazano na slici 1.



**Slika 1.** Razvoj sanitacije kroz povijest (prema [2])

Teško je točno definirati i locirati mjesta ili područja gdje se odvod otpadnih voda najprije počeo primjenjivati, ali se svakako može reći da je to bilo u kolijevkama velikih civilizacija Staroga svijeta: Bliskom istoku, sjevernoj Africi te Srednjem i Dalekom istoku. Postoje očuvani primjerci javnih zahoda i kupališta starih dvije ili više tisuća godina koji bi se mogli koristiti i u današnje vrijeme [11].

Kada se govori o mogućnostima za dostatnim osiguranjem kanalizacijskih sustava za stanovništvo, treba naglasiti da u mnogo država zahtjevi za kanalizacijskim sustavom uvelike premašuju dostupne resurse za osiguranje iste. Čimbenici poput financija, inženjerskih vještina te administrativnih mogućnosti ograničavaju broj novih kanalizacijskih sustava koje bi bilo moguće istovremeno financirati, odnosno izvesti [12].

## 2. Stanje razvoja kanalizacijskih sustava u povijesti

Dobro je poznato i dokumentirano da većina tehnoloških dostignuća relevantnih za vodoopskrbu i otpadne vode nisu dostignuća današnjih inženjera, već sežu unatrag prije više od pet tisuća godina. Već tijekom brončanog doba takav razvoj je bio vođen nužnošću učinkovite upotrebe prirodnih resursa, kako bi se civilizacije učinile otpornijima na destruktivne prirodne pojave, te poboljšao životni standard, kako na javnoj tako i na privatnoj razini. S obzirom na navedeno, Minojci na otoku Kreti (oko 3200. - 1100. pr. Kr.) i nepoznata civilizacija (oko 2600. - 1900. pr. Kr.) u dolini Inda, u gradovima Mohenjo-Daro, Harappa i

Lothal razvila je napredne, udobne i higijenske stilove života, što se očituje učinkovitim kanalizacijskim sustavima, kupaonicama i zahodima s ispiranjem, koji se mogu usporediti s današnjim modernim sustavom otpadnih voda. Nevjerojatan napredak i razvoj struktura za kupanje, sanitarnih i drugih instalacija može se pratiti od minojskih palača i kuća u Mohenjo-Daru, Harappi i Lothalu do gradova starog Egipta, helenističkog razdoblja, kineskih dinastija i carstva do objekata izgrađenih tijekom rimskog razdoblja [13].

Najstarija pronađena cijev izrađena je od pečene gline i potječe iz 4. st. prije naše ere, a osim nje pronađeni su još i koljena i T-dijelovi [14], [15] što je prikazano na slici 2. Pronađena je tijekom iskapanja u Belovom hramu u Nipuru, Babilon [16].



**Slika 2.** Koljeno i T-spojnica pronađeni u Belovom hramu [17]

Države Mezopotamskog Carstva Asirija i Babilon obilježene su velikim napretkom u civilizaciji tijekom 2. tisućljeća pr. Kr. Ruševine mezopotamskih gradova sadrže dobro izgrađene sustave oborinske odvodnje i sanitarne kanalizacije. Na primjer, drevni gradovi Ur i Babilon, smješteni u današnjem Iraku, imali su učinkovite sustave odvodnje oborinskih voda [18].

U Egiptu, u vrijeme faraona, bilo je normalno da svetišta i gradovi imaju fekalnu i oborinsku kanalizaciju. Danas se smatra da su Egipćani prvi počeli primjenjivati cijevne drenaže od pečene gline za odvodnju hramova i svetišta [11]. U Jeruzalemu su nečistu vodu odvodili kanalima u bazene za taloženje te je poslije mulj korišten kao gnojivo što je jedan od najstarijih primjera pročišćavanja otpadnih voda [19].

Najpoznatija kanalizacija starog vijeka je bila ona u Rimu, poznata kao „*Cloaca maxima*“, u doslovnom prijevodu „najveća kanalizacija“ [20]. Bila je visine 5 m, širine 4 m i 738 m duljine te su se u nju ulijevali manji kanali na koje su bili spojeni kućni kanali. Također su postojali i javni zahodi [19]. *Cloaca Maxima* je sagrađena u vrijeme cara Tarquinia Pricca (6. st. pr. Kr.), a još i danas služi jednom dijelu Rima odvođeći otpadne i oborinske vode u Tiber. Građena je iz eruptivnog kamena [3]. Postoji velika vjerojatnost da je *Cloaca maxima* sagrađena po koritu nekog vodotoka čija je prvotna namjena bila odvodnja i isušivanje močvarnih površina. Kasnije mu je funkcija proširena na odvodnju otpadnih voda [11]. Gradovi Rimskog carstva poznavali su kanalizacijski sustav i odvodnju otpadnih voda te su pridavali veliku važnost tome [3]. Da se zaključiti da su antički Rimljani vodili računa o vodi



i kanalizaciji [21]. Izljevno mjesto kanalizacije *Cloaca Maxima* u rijeku Tiber, u Rimu prikazano je na slici 3.



**Slika 3.** Izljevno mjesto kanalizacije *Cloaca Maxima* u rijeku Tiber [22]

### 3. Povijest kanalizacijskih sustava u Europi

Gradnja kanalizacijskih sustava u Europi bila je potaknuta velikim epidemijama, poput epidemija kuge. Jedna od najranijih pronađenih pisanih bilješki koja potvrđuje postojanje kanalizacijskog sustava u Pragu potječe iz 1310. godine. Iako, pitanje centraliziranog uklanjanja otpadnih voda nije igralo nikakvu ulogu u prvih nekoliko stoljeća postojanja Praga i, kao i u ostatku Europe, kruti i tekući kućni otpad, je izbacivan na ulicu, a otpad su „raščistili“ uglavnom vjetar i kiša [23].

U Parizu, u srednjem vijeku (486. do 1453. godine) kanalizacija je prvo bila na ulici gdje se otpadna voda iz domaćinstava bacala na ulice što je pogodovalo razvoju i širenju bolesti te epidemija. Međutim, navedeni koncept se napušta te do 1914. godine 68 % svih zgrada Pariza ima direktan priključak na kanalizaciju. Danas je kroz mali dio pariške kanalizacije moguće proći putem Muzeja kanalizacije [24] (*Le Musée des Égouts de Paris*) [25], što je prikazano na slici 4.



**Slika 4.** Muzej kanalizacije Pariza [26]



Do sustavne gradnje kanalizacijskih sustava dolazi početkom 19. stoljeća i to u Velikoj Britaniji, Francuskoj, Njemačkoj te nakon toga u ostalim europskim zemljama. Krajem 19. stoljeća gotovo svi veći europski gradovi imali su neku osnovnu mrežu kanalizacijskog sustava. Prvi veći kanalizacijski sustav u Europi je dovršen 1842. godine u Hamburgu [11]. U Austro-Ugarskoj monarhiji u 18. i 19. stoljeću su izgrađene kanalizacijske mreže u Beču, Pragu, Brnu, Černovicama, Mariboru, Ljubljani, Trstu, Zagrebu i drugdje [11]. Također, veće kanalizacije se grade i u Bukureštu, Sofiji, Beogradu [11]. U Beogradu su prije izgradnje moderne kanalizacije postojali podzemni zidani kanali. Općinski odbor je 1885. godine donio odluku da se napravi kanalizacija Beograda po općem ili razdjelnom sustavu. Godine 1905. je ministar građevine odobrio Generalni projekt kanalizacije, a 1932. godine je počela izrada projekata moderne kanalizacije za Zemun i Novi Beograd [27].

#### 4. Razvoj kanalizacijskih sustava u Hrvatskoj

Dioklecijanova palača u Splitu koju su sagradili Rimljani početkom 4. stoljeća imala je sustav vodoopskrbe i odvodnje. Odvodni sustav je odvodio vode iz kupališta, preljevne vode te oborinske vode. Pretpostavlja se da su se fekalije, otpadci hrane i slični kruti otpad životinja skupljali u posebne jame koje su se s vremena na vrijeme praznile. Dosadašnja istraživanja kanalizacijskog sustava Dioklecijanove palače u Splitu velikim dijelom potvrđuju da je ona bila opremljena česmama, fontanama, kupalištima, kupaonicama i nužnicima (*latrinae*), odnosno svim uređajima koji su se koristili u rimsko doba [28]. Autori navedenog rada [28] zaključili su da „sustav odvodnje otpadnih i oborinskih voda Dioklecijanove palače, kao i sustav zaštite od vanjskih površinskih i podzemnih voda, predstavlja izvrstan primjer dobre rimske inženjerske prakse i rješenja“ [28].

Arheološkim istraživanjima u posljednjih četrdesetak godina u povijesnoj jezgri Dubrovnika pronađeno je mnogo nalaza srednjovjekovne kanalizacije. Sustav kanalizacije Dubrovnika potječe iz 14. i 15. stoljeća [29]. U Dubrovačkom se statutu određuju parametri za izgradnju septičkih jama i kanala za odvod [29].

Iskapanjima na području Pule otkriven je veliki broj kolektora građenih u rimsko doba koji su bili izgrađeni iz kamenog зида u postojanom vezivu te su odvodili otpadne vode u more [11]. U Zagrebu je na temelju iskopina utvrđeno da je još u vrijeme Rimljana naselje Andautonija imalo vodovod i odvodnju. Najstarija kanalizacija nađena je prilikom izgradnje tržnice na Dolcu u ostatcima samostana cistercita [3]. Određeni, značajniji datumi u razvoju kanalizacije Zagreba su 1880. godina kada su pokrenute inicijative za izgradnju kanalizacije, napravljen popis svih poznatih kanala te uvođenje tehničke evidencije. Zatim, 1892. godine izrađena je projektna dokumentacija te je počela intenzivna izgradnja, a 1930. izgrađen je glavni odvodni kanal s ušćem u rijeku Savu kod Ivanje Reke. Godine 1953. počinje izgradnja kanalizacije Novog Zagreba te je 1970. godine izrađen idejni projekt kanalizacije grada Zagreba na lijevoj obali [3].

Teritorijalno širenje Osijeka i povećanje broja stanovnika potaknulo je gradsko poglavarstvo u drugoj polovici 19. stoljeća na rješavanje gradskog vodovodnog i kanalizacijskog sustava. Odlučilo se za izgradnju glavnih sabirnih kanala u Gornjem gradu, Donjem i Novom gradu



te u smjeru jug – sjever. Tvrđa je od 1779. godine imala kanalizaciju čiji je kanal vodio u Dravu [30].

U Republici Hrvatskoj prevladava mješoviti sustav odvodnje, dok je razdjelni sustav rjeđi. U kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, odnosno crnomorskom slivu prevladava mješoviti kanalizacijski sustav, a u jadranskom slivu prevladava razdjelni sustav [31], [32]. Mreža javne odvodnje Republike Hrvatske u 2022. godini iznosila je 14.179 km [33].

## 5. Noviji pravci razvoja: Alternativni kanalizacijski sustavi

U Europi se najviše koriste dvije glavne vrste kanalizacijskih sustava: razdjelni, mješoviti te modificirane verzije jednog od ta dva [34]. U mješovitom ili skupnom tipu kanalizacije otpadne i oborinske vode se s područja grada odvođe jednim odvodnim sustavom do uređaja za pročišćavanje otpadnih voda [35]. Kod razdjelnog ili separatnog sustava odvodnje uglavnom postoje dvije kanalizacijske mreže, i to jedna koja služi za odvođenje oborinskih voda i druga koja je namijenjena za kućanske i industrijske otpadne vode [36], [37]. Međutim, postoje i druge, može se reći, nešto novije vrste kanalizacijskih sustava.

Jedna od alternativnih vrsta kanalizacijskog sustava je vakuumski kanalizacijski sustav. Koncept vakuumnog kanalizacijskog sustava pojavio se već krajem 19. stoljeća [38], [39], kada je tehnološki razvoj omogućio inženjerima konstruiranje uređaja za pumpanje otpadnih voda [40]. Nizozemski inženjer i bivši kapetan u američkoj vojsci Charles Thieme Liernur izumio je 1868. godine pneumatski sustav (negdje navedeno 1886.) [39], [41], [42], [43] gdje je kanalizacija položena na ujednačenoj dubini bez obzira na nagib, a bila je od cijevi od lijevanog željeza pod vakuumom od pola atmosfere [44]. Pneumatski sustav je prvi put pušten u rad 1871. u dva okruga u Amsterdamu [42]. Vakuumska kanalizacija primjenjuje se u slučajevima kad je potpuno ravan teren, ako je visoka razina podzemnih voda, nepovoljan uzdužni profil, nestabilno tlo itd. [45].

Dio stranice opisa patenta pneumatskog kanalizacijskog sustava prikazan je na slici 5.

# UNITED STATES PATENT OFFICE.

CHARLES THIEME LIERNUR, OF BERLIN, GERMANY.

## PNEUMATIC SEWERAGE SYSTEM.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 482,439, dated September 13, 1892.

Application filed February 17, 1887. Serial No. 227,963. (No model.) Patented in Germany November 11, 1886, No. 40,488.

*To all whom it may concern:*

Be it known that I, CHARLES THIEME LIERNUR, a citizen of the United States of America, residing at Berlin, Germany, have invented certain new and useful Improvements in Pneumatic Sewerage of which I declare the

the line *y y* of Fig. 2. Fig. 4 is a vertical section of a district-reservoir in connection with the main sewer-pipe. Fig. 4<sup>a</sup> is a section of the signal. Fig. 5 is an end view, and Fig. 6 a top view or plan, partly in section, of the main receiving apparatus at the pumping.

**Slika 5.** Dio naslovnice patenta pneumatskog kanalizacijskog sustava [41]



Tlačna kanalizacija ili kanalizacija pod pritiskom primjenjuje se u onim dijelovima kanalizacijske mreže gdje ne postoje uvjeti za gravitacijsku odvodnju [46], a tlačna kanalizacija kao cjelina je rijetkost [36]. Tlačna kanalizacija primjenjuje se od početka 1960-ih, a tijekom godina sustav se konstantno razvijao te danas u mnogim razvijenim zemljama predstavlja siguran tehničko-ekonomsko isplativi sustav odvodnje, posebno za mala ruralna naselja i izolirane gradske četvrti [47].

Budući da je cjevovod za tlačnu kanalizaciju projektiran kao vodonepropusan, cijevni priključci osiguravaju minimalno istjecanje kanalizacije. Ovo može biti važno kada se razmatra u područjima podložnim onečišćenju podzemnih voda. Dvije glavne vrste tlačnih kanalizacijskih sustava su *septic tank effluent pump* (STEP) i *grinder pump* (GP). Nijedno ne zahtijeva nikakve izmjene na vodovodu unutar kuće [48].

Nadalje, kondominijalni kanalizacijski sustav je konceptualno sličan konvencionalnom gravitacijskom kanalizacijskom sustavu. Naziv „kondominijalna kanalizacija“ opisuje kanalizacijsku mrežu izvedenu korištenjem cijevi malih promjera koje su položene u plitke rovove pri što manjem nagibu s ciljem smanjenja ukupnih troškova izgradnje. Naziv „kondominijalni“ dolazi od portugalske imenice „*condominio*“ što u prijevodu znači stambeni blok [49], [50]. Budući da su cijevi malog promjera, potrebno je manje vode za prijenos fekalija te se tako štedi voda [51]. Primjenjiv je za gusto naseljena periurbana područja, na različitim tlima, od pjeskovitih do stjenovitih, u područjima visokih podzemnih voda [50].

## 6. Zaključak

Često se smatra da je odvođenje otpadnih voda, odnosno nastanak kanalizacijskog sustava novijeg postanka i da je to privilegija današnjeg vremena u kojem živimo. Međutim, navedeno nije istina. Već civilizacije Starog svijeta poput Babilonaca i Asiraca poznavale su pojam kanalizacije te su je i gradili. Također, u Grčkoj i Rimu su građeni kanalizacijski sustavi tako da je u Rimu u 6. stoljeću pr. Kr. u vrijeme cara Tarquinia Pricca sagrađena *Cloaca Maxima*. U Hrvatskoj, neki od gradova, odnosno građevina koji su u vrijeme Rimskog carstva imale kanalizaciju su Dioklecijanova palača u Splitu, povijesna jezgra Dubrovnika, Pula, Zagreb (u vrijeme Rima naselje Andautonija) te dio Osijeka - Tvrđa koji je već 1779. godine imao kanalizaciju.

Prethodno navedeni kanalizacijski sustavi bili su gravitacijski, a osim toga, krajem 19. stoljeća se javlja vakuumski kanalizacijski sustav. Također, postoje i tlačna kanalizacija, kondominijalna kanalizacija kao i drugi alternativni kanalizacijski sustavi. Potrebno je staviti težnju na nove alternativne načine odvodnje jer broj stanovništva raste, postojeći kanalizacijski sustavi stare, postaje ih sve teže i teže održavati te se povećava briga o zaštiti okoliša.

## 7. Literatura

[1] Uskoković, Predrag. Osnovne karakteristike sistema za snabdevanje vodom i odvođenje otpadnih voda bitnih za razmatranje njihovog održavanja, Kujundžić, Branislav (ur.),



- Savremena eksploatacija i održavanje objekata i opreme vodovoda i kanalizacije, Beograd: Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, 2010, pp. 79-101.
- [2] Lofrano, Giusy; Brown, Jeanette. Wastewater management through the ages: A history of mankind // *Science of The Total Environment* 408 (2010), 22; 5254–5264. (ISSN 0048-9697)
- [3] Kosić, Krešimir (ur.). Kanalizacija 1892. - 1992., Zagreb: Javno poduzeće “Kanalizacija” Zagreb, Zagreb, 1992.
- [4] Harris, Bernar; Helgertz, Jonas. Urban sanitation and the decline of mortality // *The History of the Family*, 24 (2019), 2; 207–226. (ISSN 1873-5398)
- [5] Hinde, Andrew; Harris, Bernard. Mortality decline by cause in urban and rural England and Wales, 1851–1910 // *History of the Family*, 24 (2019), 2; 377–403. (ISSN 1873-5398)
- [6] Loosdrecht, van Mark C. M.; Nielsen, H. Per; Lopez-Vazquez M. Carlos; Brdjanovic, Damir. Eksperimentalne metode u obradi otpadnih voda. UK: IWA Publishing, 2016. (ISBN 978-953-7968-47-2)
- [7] Wald, Chelsea. Waste Not: A Brief History of the Urban Sewer System, [Online]. Dostupno na: <https://lithub.com/waste-not-a-brief-history-of-the-urban-sewer-system/> (Pristupljeno 14.07.2023.).
- [8] Hugo, Victor. Jadnici, Zagreb: Globus Media, Zagreb, 2005. (ISBN 953-7160-92-0)
- [9] Jutarnji.hr. Kanalizacija možda krije ključ zaustavljanja drugog vala, Koronavirus moguće je detektirati u otpadnim vodama na čemu znanstvenici već rade, [Online]. Dostupno na: <https://www.jutarnji.hr/vijesti/svijet/kanalizacija-mozda-krije-kljuc-zaustavljanja-drugog-vala-koronavirus-moguće-je-detektirati-u-otpadnim-vodama-na-cemu-znanstvenici-vec-rade-10363069> (Pristupljeno 17.07.2023.).
- [10] Jmii, Habib; Gharbi-Khelifi, Hakima; Assaoudi, Raouia; Aouni, Mahjoub. Detection of SARS-CoV-2 in the sewerage system in Tunisia: a promising tool to confront COVID-19 pandemic // *Future Virology*, 16 (2021), 11; 751–759. (ISSN 1746-0808)
- [11] Kos, Zorko. Vodoprivreda gornjeg Jadrana: povijest vodnoga graditeljstva na vodnom području Primorsko-istarskih slivova, II. Kanalizacijski sustavi, knjiga 1. Istarska županija. Rijeka: Adamić, 2006. (ISBN 953-219-264-6)
- [12] Reed, A. R. Sustainable Sewerage: Guidelines for Community Schemes. London, UK: Intermediate Technology Publications & Water, Engineering and Development Centre; 1995. (ISBN 1853393053)
- [13] Angelakis, N. Andreas; Rose, B. Joan (ur.). Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries. IWA Publishing; 2014. (ISBN 9781780404851)
- [14] Alić, Marsela. Otpadne vode kroz povijest // *Hrvatska vodoprivreda*, XXV (2017), 218; 100–104. (ISSN 1330-321X)
- [15] Cast Iron Pipe Reserach Association. Handbook of Cast Iron Pipe for Water, Gas, Steam, Air, Chemicals and Abrasives. Chicago, Illinois, USA, 1927.
- [16] History of clay pipes, 2020. [Online]. Dostupno na: <https://wellspring.com.my/2020/12/13/history-of-clay-pipes/> (Pristupljeno 25.07.2023.)

- [17] A Hampden Charter School of Science Class of 2015 (Senior Thesis Project): Fatiha A. Muhammad, Drainage 2.0, 2015. [Online]. Dostupno na: <https://sites.google.com/a/hampdencharter.org/stormdrain2/background-research/appendix> (Pristupljeno 18.07.2023.)
- [18] De Feo Giovanni; Antoniou, George; Fardin, Hilal Franz; El-Gohary, Fatma et al., The Historical Development of Sewers Worldwide // Sustainability, 6 (2014), 6; 3936–3974. (ISSN 2071-1050)
- [19] Zrnić, Jovan; Zrnić, Predrag. Tehničar 5 građevinski priručnik. Beograd: Građevinska knjiga; 1979.
- [20] Rubeša, Josip. Cloaca Maxima - uzor modernoj kanalizaciji // Hrvatske vode, 24 (2016), 98; 295–300. (ISSN 1330-1144)
- [21] Grozdanović, Stefan. Hidrotehnička infrastruktura Starorimskog Viminacijuma // Vodoprivreda, 47 (2015); 273-275, 141–147. (ISSN 0350-0519)
- [22] Encyclopædia Britannica. Cloaca Maxima. [Online]. Dostupno na: <https://www.britannica.com/topic/Cloaca-Maxima#/media/1/121939/126113> (Pristupljeno 14.07.2023.)
- [23] Palas, Jan; Jásek, Jaroslav; Benes, Ondrej. A brief history of the sewerage system in Prague and the role of William Heerlein Lindley, 401-417, Angelakis, N. Andreas; Rose, B. Joan (ur.). Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries. IWA Publishing; 2014. (ISBN 9781780404851)
- [24] Rubeša, Josip. Kanalizacija Grada Pariza // Hrvatske vode, 26 (2018), 106; 293–300. (ISSN 1330-1144)
- [25] Le Musée des Égouts de Paris. The City Below The City 2023. [Online]. Dostupno na: <https://musee-egouts.paris.fr/en/> (Pristupljeno 24.07.2023.)
- [26] Le Paris des PEP. Musée des égouts de Paris, La gestion des eaux usées dans une métropole 2023. [Online]. Dostupno na: [https://leparisdespep.com/wp-content/uploads/2018/04/Musee\\_des\\_Egouts\\_de\\_Paris1.jpg](https://leparisdespep.com/wp-content/uploads/2018/04/Musee_des_Egouts_de_Paris1.jpg) (Pristupljeno 17.07.2023.)
- [27] Kujundžić, Branislav (ur.). Kanalizacija Beograda 1905 -1975. Beograd: NIP “Export-press”; 1975.
- [28] Marasović, Katja; Perojević, Snježana; Margeta, Jure. Antička kanalizacija Dioklecijanove palače u Splitu // Građevinar, 66 (2014), 3; 237–249. (ISSN 1333-9095)
- [29] Žile, Ivica. Srednjovjekovna kanalizacija grada Dubrovnika // Starohrvatska prosvjeta, 3 (2007), 34; 437–349. (ISSN 0351-4536)
- [30] Živaković-Kerže, Zlata. Voda i grad: Povijest vodoopskrbe grada Osijeka. Osijek: Hrvatski institut za povijest, Podružnica za povijest Slavonije, Srijema i Baranje, Slavonski Brod, Vodovod-Osijek d.o.o., 2007. (ISBN 978-953-6659-28-9)
- [31] Hrvatske vode. Strategija upravljanja vodama. Zagreb: Hrvatske vode; 2009.
- [32] Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske. Strategija upravljanja vodama. Zagreb, 2008.
- [33] Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske. Priopćenje, Javna odvodnja u 2022. Zagreb: 2023. [Online]. Dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2023/hr/58075> (Pristupljeno 18.07.2023.)



- [34] Botturi, Alice; Ozbayram, E. Gozde; Tondera, Katharina; Gilbert, I. Nathalie et al. Combined sewer overflows: A critical review on best practice and innovative solutions to mitigate impacts on environment and human health // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51 (2020), 15; 1585-1618 (ISSN 1547-6537)
- [35] Margeta, Jure. Kontrola negativnih utjecaja preljevniha voda kanalizacije // *Građevinar*, 63 (2011), 07, 651–660. (ISSN 1333-9095)
- [36] Margeta, Jure. Kanalizacija naselja. Split, Osijek, Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Institut građevinarstva Hrvatske; 1998. (ISBN 953-96691-6-2)
- [37] Obradović, Dino. Doprinos povećanju učinkovitosti održavanja kanalizacijskih sustava primjenom modela procjene troškova održavanja, doktorska disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2022.
- [38] Tang, Jing; Li, Min; Wang, Baozhen. An Introduction to Vacuum Sewerage System and its Applications in China // *Advanced Materials Research*, 610-613 (2013), 2467-2471 (ISSN 1662-8985)
- [39] Obradović, Dino; Šperac, Marija; Marenjak, Saša. Maintenance issues of the vacuum sewer system // *Environmental Engineering*, 6 (2019), 2; 40–48. (ISSN 1849-4714)
- [40] Miszta-Kruk, Katarzyna. Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data // *Engineering Failure Analysis*, 61 (2016); 37–45. (ISSN 1873-1961)
- [41] Liernur, Thieme Charles. Pneumatic sewerage system. Patent No. 482,439, 1892. [Online]. Dostupno na: <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/43/79/272979016ac685/US482439.pdf> (Pristupljeno 18.07.2023.)
- [42] Scott, Adam. The Liernur system at Amsterdam // *Journal of the Society of Arts*, 24 (1876), 671. (ISSN 00359114)
- [43] Gikas, Petros; Ranieri, Ezio; Sougioultzis, Dimitrios; Farazaki, Maria; Tchobanoglous George. Alternative collection systems for decentralized wastewater management: an overview and case study of the vacuum collection system in Eretria town, Greece // *Water Practice & Technology*, 12 (2017), 3; 604–618. (ISSN 1751-231X)
- [44] Read, Geoffrey F. Vacuum sewerage. Sewers, Elsevier, 2004, p. 327–338. (ISBN 978-0-7506-5083-0)
- [45] Ljubisavljević, Dejan; Obrenović, Marko. Nestandardni kanalizacioni sistemi: vakumska kanalizacija i kanalizacija pod pritiskom // *Vodoprivreda*, 42 (2010), 246-248; 237–244. (ISSN 0350-0519)
- [46] Simović, Veselin (ur.). Leksikon građevinarstva, Zagreb: Masmedia, 2002. (ISBN 953-157-110-4)
- [47] Hrskanović, Ivan. Održavanje sustava odvodnje naselja, diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2016.
- [48] United States Environmental Protection Agency (EPA). Wastewater Technology Fact Sheet, Sewers, Pressure. Niskayuna, New York, 2002.



- [49] Mara, Duncan; Sleight, Andrew; Tayler, Kevin. PC-Based Simplified Sewer Design, School of Civil Engineering, University of Leeds, LEEDS, 2001. (ISBN 0-904280-01-2)
- [50] Šperac, Marija; Obradović, Dino. Odvodnja otpadnih voda alternativnim kondominijalnim kanalizacijskim sustavom // *Proceedings of the 9th international natural gas, heat and water conference - PLIN 2018* / Raos, Pero; Galeta, Tomislav, Kozak, Dražan et al. (ur.). (ISSN 1849-0638). Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, 26. – 28.09.2018., 199-208.
- [51] Runko Luttenberger, Lidija. Prilog uspostavi decentraliziranih sustava otpadnih voda // *Pomorski zbornik*, 40 (2002),1; 553-560. (ISSN 0554-6397)



## ***Textile dyeing without the use of an aqueous medium***

**I. Čorak<sup>1\*</sup>, A. Sutlović<sup>1</sup>, L. Savić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>University of Zagreb Faculty of Textile Technology, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

\*Corresponding author. E-mail: [ivana.corak@tff.unizg.hr](mailto:ivana.corak@tff.unizg.hr)

### **Abstract**

Water is known as a very valuable resource for life due to its multifunctional properties. It is well known that the textile industry is one of the biggest water consumers, for example it is used in many pre-treatment and finishing processes in the textile industry, such as washing, bleaching, dyeing and finishing. The 'wet process' of dyeing is responsible for about 20% of global industrial water pollution. There have been many efforts to reduce water consumption, i.e., reusing wastewater, recycling water, changing conventional equipment. Nevertheless, substantial water usage remains a daily reality within the textile industry. In response to this issue, a novel technology known as Supercritical Fluid Dyeing Technology has been introduced in order to prevent water consumption. This technology aims to eliminate water consumption during the dyeing process by employing CO<sub>2</sub>, which possesses the unique ability to exist in both liquid and gaseous states under specific pressure and temperature conditions. In supercritical carbon dioxide dyeing processes, industrial CO<sub>2</sub> emissions are used as a medium for dyeing instead of water that dissolves and transfers the dye to the fibers, which achieves fast and even dyeing, and no additional chemicals and organic solvents are used in the process. After dyeing, CO<sub>2</sub> can be separated from the dye. Furthermore, cleaning and drying processes are not required, which reduces CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption. This innovative method, compared to the traditional dyeing process, can significantly reduce waste discharge and energy consumption.

**Key words:** supercritical carbon dioxide, water pollution, textile dyeing, eco-friendly process

### **1. Introduction**

Water, with its myriad of essential functions, is regarded as a life-sustaining resource of immense value. It is noteworthy that the textile industry stands as one of the largest consumers of water. In the textile domain, water serves as the solvent in numerous pretreatment and finishing operations, including washing, bleaching, dyeing, and finishing. The conventional method of textile dyeing requires vast quantities of fresh water which, post-process, transforms into chemical-laden wastewater [1-5]. Regardless of how sophisticated water-based dyeing technologies have become, the fact is that great amount of water is still polluted [2]. The textile industry is currently responsible for 3% of CO<sub>2</sub> emissions, and this is predicted to increase to 10% by 2030. The 'wet process' of dyeing is responsible for about

20% of global industrial water pollution. The industry also uses about 1.5 trillion liters of water per year. The stated amount is sufficient to meet the consumption needs of 5 million people in the same period of time [6]. Approximately, it takes about 100-145 liters of water for processing 1 kg of textile material. There have been efforts to reduce water consumption, i.e., reusing wastewater, recycling water, changing conventional equipment, but it is still high in the textile industry. A new technology, called Supercritical Fluid Dyeing Technology, has been introduced for dyeing textile material without water. For this process, CO<sub>2</sub>, which has the ability to exist in both a liquid and gaseous state at a certain pressure and temperature, is used [1, 7].

Conventional wet dyeing processes simultaneously produce large amounts of wastewater containing dyes with chemical auxiliaries and require considerable energy for drying after dyeing. In addition, the residual dye left after processing cannot be easily separated and recycled. Attempts to replace water with organic solvents are also problematic due to their toxicity. To address these issues, considering ecological impact, energy conservation, and the 3R principle (reduce, reuse, and recycle), a dyeing procedure using supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>) was developed as an alternative to conventional wet dyeing [1, 3, 7-14]. The inception of this research dates back to 1988 when Schollmeyer secured a patent for an innovative dyeing method for textile fibers utilizing scCO<sub>2</sub>. This novel approach introduced a fresh perspective on mitigating water usage within the textile industry [3, 15].

## 2. Supercritical carbon dioxide

A supercritical fluid is characterized as a material kept beyond its critical temperature and pressure thresholds. In such circumstances, the substance assumes distinct attributes, with neither condensation into a liquid nor evaporation into a gas occurring [1, 11], as depicted in the Figure 1.

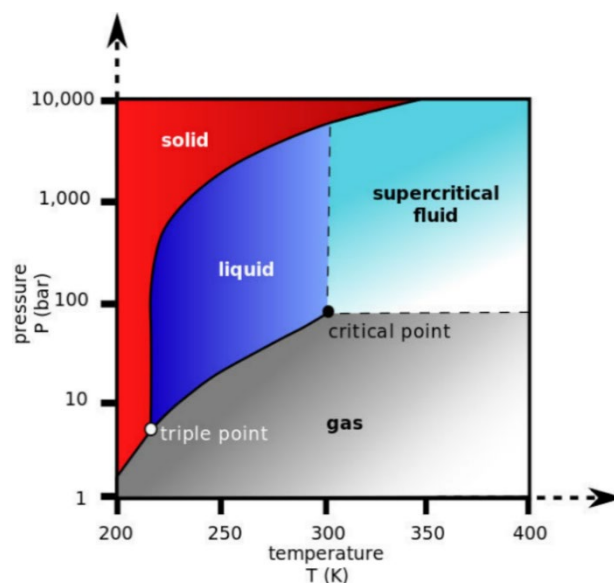


Figure 1. Phase diagram of carbon dioxide [1]

Although numerous substances have been used as supercritical fluids, carbon dioxide is the most commonly used. Supercritical CO<sub>2</sub>, which can mitigate water discharge, is an

affordable, non-toxic and non-flammable option [1, 3, 4, 8-14, 16]. It has low critical parameters (31°C, 73.8 bar), and carbon dioxide can also be recycled [3, 4, 10, 11, 13, 14]. The density and solubility of supercritical fluids are similar to liquids, but the viscosity and diffusion properties are similar to gases. By expansion or cooling below the critical temperature, their ability to dissolve is lost and, consequently, a dispersed or liquefied dissolved substance falls out. The key property of scCO<sub>2</sub>, which enables dyeing, is its ability to dissolve hydrophobic substances including disperse dyes [11].

### 3. Dyeing process

ScCO<sub>2</sub> exhibits a density akin to that of a liquid, a characteristic that promotes the dissolution of hydrophobic dyes, as well as a viscosity and diffusion properties similar to those of a gas, factors that can accelerate dyeing durations relative to traditional water-based methods. In contrast to the customary dyeing technique, the process utilizing supercritical carbon dioxide merely requires alterations in pressure and temperature parameters, eliminating the need to dry the textile material. Upon completion of the procedure, the released CO<sub>2</sub> is in a gaseous state, resulting in diminished CO<sub>2</sub> emissions and energy utilization [1, 4].

In scCO<sub>2</sub> dyeing processes, industrial CO<sub>2</sub> emissions are used as a medium for dyeing instead of water that dissolves and transfers the dye to the fibers, which achieves fast and even dyeing, and no additional chemicals and organic solvents are used in the process. After dyeing process, CO<sub>2</sub> can be separated from the dye [1, 3, 5, 8, 10, 12, 14, 17]. This innovative method, compared to the traditional dyeing process, can significantly reduce waste discharge and energy consumption [5, 9, 10, 13]. Comparison of traditional dyeing and supercritical CO<sub>2</sub> dyeing is presented in Table 1.

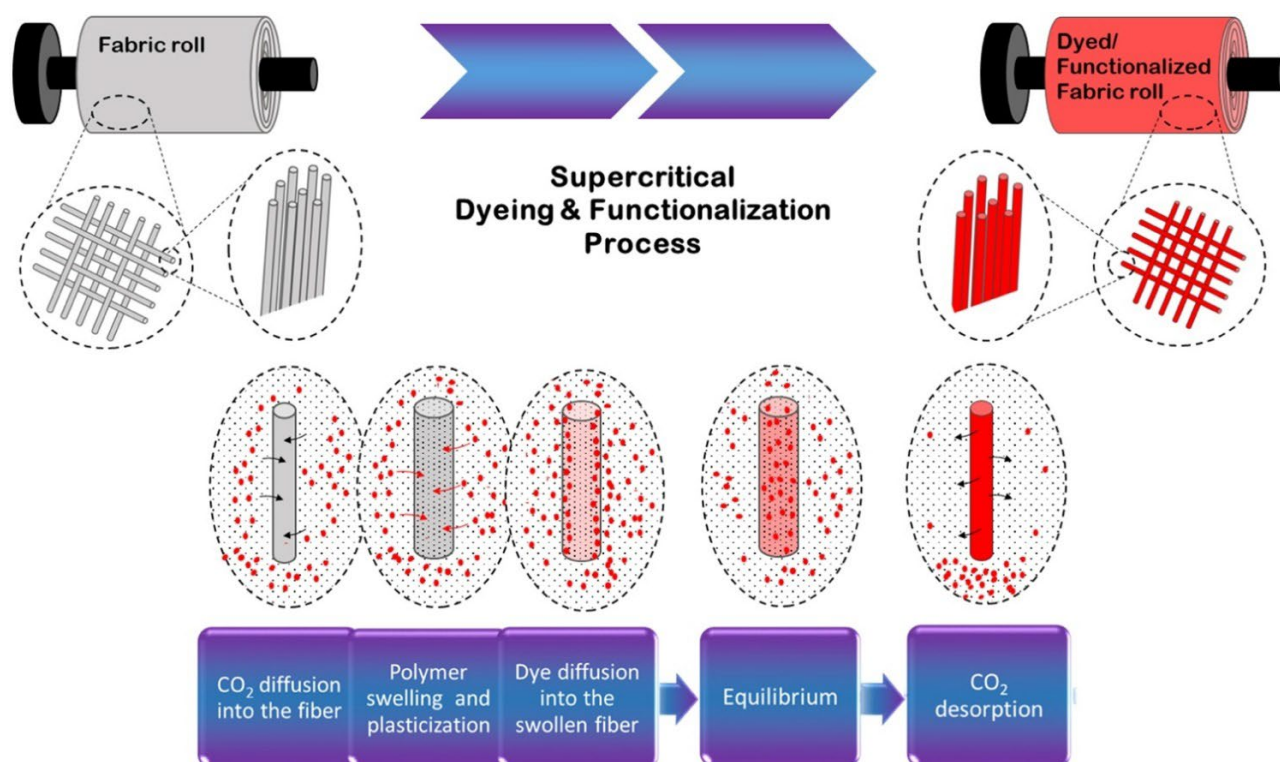
**Table 1.** Comparison of traditional dyeing and supercritical CO<sub>2</sub> dyeing

Feature	Traditional Dyeing	Supercritical CO <sub>2</sub> Dyeing
Water	High consumption	None used
Chemicals	Various required	Reduced need
Energy	High consumption	Lower consumption
Pollution	Significant water pollution	Minimal water pollution, potential reduced air pollution
Efficiency	Multiple cycles may be needed	Fast, even dyeing, often in single cycle
Waste	Large volumes of wastewater	Minimal waste, CO <sub>2</sub> can be collected for reuse
Cost	More cost-effective short term	Higher initial cost, potential long-term savings

As depicted in Figure 2, the supercritical dyeing or functionalization procedure transpires in distinct stages, beginning with the fabric in its initial state and concluding with the dyed or functionalized fabric roll. This process involves an intricate series of events [18]:



1. The initial step in the supercritical dyeing process is the diffusion of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into the fiber. This occurs when the fabric is exposed to supercritical CO<sub>2</sub>, facilitating the CO<sub>2</sub> molecules to penetrate the fiber's structure.
2. Subsequently, the interaction between CO<sub>2</sub> and the polymer matrix within the fiber induces swelling and plasticization of the polymer. This phenomenon can be characterized as an expansion of the polymer matrix's framework instigated by the supercritical CO<sub>2</sub>. Such an event bolsters the permeability of the fiber, facilitating efficient penetration of the dye into its structure.
3. Following the swelling and plasticization of the fiber, the dye diffuses into the now swollen fiber. Given the increased permeability of the fiber due to the previous stage, the dye molecules can effectively infiltrate the fiber's interior.
4. The process then progresses towards equilibrium. At this stage, the dye is evenly distributed within the fiber, ensuring a uniform coloration or functionalization.
5. The final stage involves the desorption of CO<sub>2</sub>, leaving behind the dyed or functionalized fabric, i.e., functionalization with modified disperse dyes, functionalization with photochromic dyes, functionalization with curcumin-based dyes. As the pressure decreases, CO<sub>2</sub> transitions back from the supercritical state, allowing it to be separated from the fabric and recycled for further use.



**Figure 2.** Supercritical Dyeing & Functionalization Process [18]

The dyeing process in scCO<sub>2</sub> is an attractive alternative to aqueous and solvent-based processes that offers significant environmental and economic advantages [8]. Environmental advantages include: using a small amount of dye without auxiliaries



(dispersing agents, buffers) and all remaining dye can be reused resulting in almost zero waste. Moreover, the used CO<sub>2</sub> is a waste product from industrial emissions and almost no air pollution is created because 95% of CO<sub>2</sub> can be recycled [1, 8-10, 13, 19]. An economic analysis showed that although the initial investment cost for scCO<sub>2</sub> dyeing equipment is higher than water-based dyeing equipment, the operating cost is lower with a 50% lower overall process cost for scCO<sub>2</sub> dyeing. This is due to higher speed of dyeing, simpler formulation of dyes and less energy required in the scCO<sub>2</sub> dyeing method compared to water dyeing methods [8]. ScCO<sub>2</sub> has other advantages as well. The delivery of the dye onto the fabric can be precisely modulated, yielding superior application quality. Additionally, by adjusting pressure and temperature, one can regulate the solubility of the dye. Owing to these advantages, scCO<sub>2</sub> serves as an appealing solvent and dispersal medium for disperse dyes [4]. Dyeing polyester in scCO<sub>2</sub> instead of water is both economically and ecologically more favorable, and has proven to be successful both on synthetic and natural fibers [1, 8].

#### 4. Challenges in dyeing with scCO<sub>2</sub>

Since most dyes have been developed specifically for water-based applications, which makes them water-soluble, they are very limited by their solubility in scCO<sub>2</sub> [1, 7]. Therefore, later research focused on identifying supercritical dyes soluble in carbon dioxide. *Ozcan et al.* (1997) determined the solubility of eight disperse dyes of different structure and class (azo, anthraquinone, imidazole) in scCO<sub>2</sub>. They concluded that there is no strong correlation between solubility, structure and molecular weight [7].

The solubility of scCO<sub>2</sub> emerges as a pivotal factor in the selection of dyes and the optimization of process conditions such as temperature and pressure, underscoring its critical role in these aspects of the dyeing process. For this technology to be useful for industrial dye applications, the solubility of the dye must be high enough under conditions that can be maintained in commercial dye equipment. For example, although hydroxyethyl groups are very polar, the polarity of these groups can be partially mitigated by the presence of inter- or intra-molecular hydrogen bonds. Solubility is affected by the polarity of the dye molecule, leading to increased solubility for less polar molecules and decreased solubility for more polar molecules. Dyes with amino or halo group substituents are more soluble than those with nitro groups in the same ring positions [17].

Variations in pressure and temperature cause color differences, especially when dye mixtures are used [11, 14]. The quantity of dyes incorporated into the fabric amplifies with a rise in temperature, attributable to the enhanced molecular chain movement and creation of free volume within the fiber, both of which play an instrumental role in facilitating dye diffusion. Changing the pressure does not significantly change the number of dyes fixed, but when dyeing with dye mixtures, the ratio between dyes changes. Increased pressure at a constant temperature causes a higher intake of dyes. The higher the pressure, the higher the density of CO<sub>2</sub> and the more dyes can be dissolved. When dyeing is carried out with a mixture of dyes, changes in the temperature and pressure of dyeing result in differences in color, i.e., in brightness as well as in tone [11].

## 5. Examples from practice

Due to its ability to dissolve towards non-polar or slightly polar organic molecules in the supercritical phase, CO<sub>2</sub> can be used to transfer disperse dyes to polyester fibers, without the need to use a traditional aqueous medium, thus avoiding pollution problems. Since polyester fibers usually have a very compact structure and high crystallinity, the choice of dyes for them is limited to the range of disperse dyes. The renowned capability of scCO<sub>2</sub> to substantially diminish the glass transition temperature,  $T_g$ , of a plethora of polymers leads to an accelerated rate of mass transfer within the polymer matrix [3, 16]. ScCO<sub>2</sub> intercalates between the chains of polyester molecules, thus facilitating chain mobility at temperatures lower than those required in traditional polyester dyeing processes. At low dyeing temperatures, the macromolecular chains of polyester fibers exhibit sluggish movement, resulting in minimal formation of free spaces. Consequently, this curtails the pace of dye diffusion into the fiber. As the temperature rises, the polyester macromolecular chains rotate faster, which results in an increased probability of creating voids in amorphous areas, and tiny voids merge into larger ones. The dye molecules diffuse and continuously penetrate the fibers along these changing voids. The kinetic energy of dye diffusion also increases. Moreover, as the temperature increases, the vibrational energy of the dye molecules increases, causing the larger dye molecules to depolymerize until the groups separate into individual molecules. The dye rate increases with greater depolymerization. This mechanism facilitates enhanced penetration of dyes into the fibers, thereby contributing to a faster dyeing process. Concurrently, as the temperature increases, the density of scCO<sub>2</sub> decreases, resulting in a diminished solubility of disperse dyes and an amplified desorption effect. At a temperature of 120 °C, the optimal color strength value was achieved, displaying similar results to those obtained in an aqueous medium. Consequently, it can be inferred that superior dyeing can be accomplished in scCO<sub>2</sub> at a temperature of 120 °C within a duration of 50 minutes [3].

There are several methods to overcome the limitations of the dyeing process of natural fibers with scCO<sub>2</sub>. The limitations pertaining to solubility of dyes in scCO<sub>2</sub> can be surmounted through the incorporation of polar co-solvents such as water or ethanol. This adaptation enables the use of traditional reactive and direct dyes on cotton materials, thereby enhancing the versatility of the dyeing process. Wool was dyed in the presence of water and methanol using non-polar natural, disperse or basic dyes and greater depth of coloration than in the absence of co-solvents was achieved. Dyeing of the wool was also tried by impregnation of the wool with metal cations [Cr(III) or Fe(II)] from water, mordant dyes soluble in CO<sub>2</sub> were used and formed complexes with the metal ions, producing dyes with excellent wash fastness [15]. Cotton fabrics were also dyed with reactive dyes when the fabrics were previously cationized [14].

In order to improve dyeing of the cotton fabric in scCO<sub>2</sub>, cotton was impregnated with. After removal of the polyethylene glycol in CO<sub>2</sub>, the disperse dye remains trapped in the pores of the fiber. Cotton was also permanently modified using cyclohexyl carbodiimide, making the fiber more hydrophobic to increase the interaction between cotton and disperse dyes. Benzoyl chloride was also used for the same purpose also as dyes containing sulfonyl-azido

groups which reacted with cyclohexyl carbodiimide. However, all these methods have a drawback, which is that they require previous processing of the fibers [15].

Modified disperse dyes utilizing epichlorohydrin, which undergoes an addition reaction with wool, have been previously reported. However, these are not commercially available due to the toxicity associated with the intermediate compounds used. Vinyl sulfone has been utilized as an alternative for dyeing polyamide and cotton fibers in scCO<sub>2</sub>. In the case of polyamide 6.6, optimal dyeing outcomes have been attained at 120 °C and 315 bar. Furthermore, research also presents results for the application of vinylsulfone dyes in wool dyeing processes [15].

The use of the scCO<sub>2</sub> dyeing technique enables economical production of high-quality textile products, where uniform coloring is desired. Emerging research indicates that the scCO<sub>2</sub> dyeing technique presents a promising alternative for fabricating uniformly dyed photochromic textiles. This innovative process not only facilitates superior photochromic performance but also confers notable environmental and economic advantages. Most of the conventional techniques currently used for the production of photochromic textiles have common problems such as higher production costs, lower level of dye development and insufficient fastness. Using scCO<sub>2</sub> as a solvent can also avoid any unwanted effect of the solvent on the photochromic properties as the CO<sub>2</sub> can be easily removed from the polymer during depressurization after the dyeing process is complete. Photochromic dyes are suitable for use in the scCO<sub>2</sub> medium due to their similar molecular structure to conventional disperse dyes, as the neutral molecules are small to medium in size with a balance of hydrophilic and hydrophobic character [8].

Curcumin is environmentally friendly, biodegradable and soluble in scCO<sub>2</sub> and is therefore suitable for the scCO<sub>2</sub> technology of natural dyeing of fabrics. Since curcumin has low solubility in scCO<sub>2</sub>, it causes low color depths in dyed natural fabric [19].

Meta-aramid fiber can hardly be dyed in a deep shade with an aqueous medium due to its extremely high glass transition temperature ( $T_g=270$  °C) and high crystallinity. The results showed that meta-aramid fibers can be dyed in scCO<sub>2</sub> but the addition of a carrier could improve the color depth [13].

## 6. Conclusion

Dyeing without water equals geographic freedom, becoming completely independent of the availability of clean water. We can dye fabric in the middle of the Sahara. This ushers in a new era of opportunities for the textile sector, enabling proximate market production, expediting delivery timelines, and ensuring independence from one of Earth's most precious resources – water.

## 7. Literature

- [1] Miah, Lablu; Ferdous, Nasrin; Azad, Dr Mir Mohammad. Textiles Material Dyeing with Supercritical Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) without using Water // *Chemistry and Materials Research*, 3(2013), 5; 38-41. (ISSN 2225-0956)
- [2] <https://dyecoo.com/co2-dyeing/> (catalogue)

- [3] Zheng, Laijiu; Zheng, Huanda; Du, Bing; Wei, Ju; Gao, Shihui; Zhang, Juan. Dyeing Procedures of Polyester Fiber in Supercritical Carbon Dioxide Using a Special Dyeing Frame // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 10(2015), 4; 37-46. (ISSN 1558-9250)
- [4] Özcan, A. Safa; Clifford, Anthony A.; Bartle, Keith D.; Lewis, David Malcolm. Dyeing of Cotton Fibres with Disperse Dyes in Supercritical Carbon Dioxide // *Dyes and Pigments*, 36(1998), 2; 103-110. (ISSN 0143-7208)
- [5] Cardozo-Filho, Lucio; Ronin Mazzer, Helen; Celso Santos, Jose; Andreus, Jürgen; Feihmann, Andresa Carla; Beninca, Cristina; Ferreira, Cabral, Vladimir; Zanoelo, Everton Fernando. Dyeing of polyethylene terephthalate fibers with a disperse dye in supercritical carbon dioxide // *Textile Research Journal*, 84(2014), 12; 1279-1287. (ISSN 1746-7748)
- [6] Society of Dyers and Colourists, Destination low carbon: Global technology and innovation reducing the environmental footprint of textile coloration
- [7] Guzel, Bilgehan; Akgerman, Aydin. Solubility of Disperse and Mordant Dyes in Supercritical CO<sub>2</sub> // *J. Chem. Eng. Data*, 44(1999); 83-85. (ISSN 1520-5134)
- [8] Tadesse Abate, Molla; Seipel Sina; Yu, Junchun; Viková, Martina; Vik, Michal; Ferri, Ada; Guan, Jinping; Chen, Guoqiang; Nierstrasz, Vincent. Supercritical CO<sub>2</sub> dyeing of polyester fabric with photochromic dyes to fabricate UV sensing smart textiles // *Dyes and Pigments*, 183(2020); 108671. (ISSN 0143-7208)
- [9] Yamini, Yadollah; Moradi, Morteza; Hojjati, Mohammad; Nourmohammadian, Farahnaz; Saleh, Abolfazl. Solubilities of Some Disperse Yellow Dyes in Supercritical CO<sub>2</sub> // *J. Chem. Eng. Data*, (2010), 55; 3896-3900. (ISSN 1520-5134)
- [10] Bai, Tierong; Kobayashi, Kota; Tamura, Kazuhiro; Jun, Yan; Zheng, Laijiu. Supercritical CO<sub>2</sub> dyeing for nylon, acrylic, polyester, and casein buttons and their optimum dyeing conditions by design of experiments // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 33(2019); 253-261. (ISSN 2212-9820)
- [11] Tušek, Lidija; Golob, Vera; Knez, Željko. The Effect of Pressure and Temperature on Supercritical CO<sub>2</sub> Dyeing of PET-Dyeing with Mixtures of Dyes // *Intern. J. Polymeric Mater.*, 47(2000); 657-665. (ISSN 1563-535X)
- [12] Fleming, Oliver S.; Kazarian, Sergei G.; Bach, Elke; Schollmeyer, Eckhardt. Confocal Raman study of poly(ethylene terephthalate) fibres dyed in supercritical carbon dioxide: dye diffusion and polymer morphology // *Polymer*, 46(2005); 2943-2949. (ISSN 1873-2291)
- [13] Zheng, Huanda; Zheng, Laijiu. Dyeing of Meta-aramid Fibers with Disperse Dyes in Supercritical Carbon Dioxide // *Fibers and Polymers*, 15(2014), 8; 1627-1634. (ISSN 1229-9197)
- [14] Sawada, Kazuya; Ueda, Mitsuo. Evaluation of the dyeing mechanism of an acid dye on protein fibers in supercritical CO<sub>2</sub> // *Dyes and Pigments*, 63(2004); 77-81. (ISSN 0143-7208)



- 
- [15] Schmidt, Andreas; Bach, Elke; Schollmeyer, E. The dyeing of natural fibres with reactive disperse dyes in supercritical carbon dioxide // *Dyes and Pigments*, 56(2003); 27-35. (ISSN 0143-7208)
- [16] De Giorgi, M. Rita; Cadoni, Enzo; Maricca, Debora; Piras, Alessandra. Dyeing polyester fibres with disperse dyes in supercritical CO<sub>2</sub> // *Dyes and Pigments*, 45(2000); 75-79. (ISSN 0143-7208)
- [17] Draper, Sara L.; Montero, Gerardo A.; Smith, Brent; Beck, Keith. Solubility relationships for disperse dyes in supercritical carbon dioxide // *Dyes and Pigments*, 45(2000); 177-183. (ISSN 0143-7208)
- [18] Goñi, María Laura; Gañán, Nicolás Alberto; Martini, Raquel Evangelina. Supercritical CO<sub>2</sub>-assisted dyeing and functionalization of polymeric materials: A review of recent advances (2015–2020) // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 54(2021); 101760. (ISSN 2212-9820)
- [19] Liu, Miao; Zhao, Hongjuan; Wu, Jinsong; Xiong, Xiaoqing; Zheng, Laijiu. Eco-friendly curcumin-based dyes for supercritical carbon dioxide natural fabric dyeing // *Journal of Cleaner Production*, 197(2018); 1262-1267. (ISSN 1879-1786)





## Uzgon na objektima odvodnje urbanih područja *Buoyancy at drainage facilities of urban areas*

S. Maričić<sup>1,\*</sup>, D. Rudvald<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek,  
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, R. Hrvatska  
<sup>2</sup>Vodovod-Montaža d.o.o., Osijek, R. Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [smaricic@gfos.hr](mailto:smaricic@gfos.hr)

### Sažetak

Hidrotehnički objekti su dijelovi rješenja izazova vezanih uz čovjekov odnos s vodom. Njima se rješavaju pojedini tehnički zadatci, a najčešće su izvedbe više objekata povezanih u funkcionalnu cjelinu – hidrotehnički sustav. Većinom se ovi objekti izvode ispod razine tla gdje se javlja problematika vanjskog dotjecanja vode u građevinsku jamu i/ili prodora podzemne vode. Uzgonsko djelovanje vode destabilizira podzemne objekte, kako prilikom njihove pojedinačne izvedbe, tako i prilikom povezivanja u cjelinu te tijekom korištenja cjelovitog sustava. U radu se analiziraju objekti sustava odvodnje urbanih površina – spojno/kontrolna okna, precrpne stanice, sabirno/retencijski spremnik. Ukazuje se na način proračuna uzgona i dokazivanje stabilnosti od isplivavanja objekta. Ističu se primjeri situacija kada uzgon ugrožava samu izvedbu ili opstojnost zgotovljenog dijela sustava odvodnje. Spoznajama o opasnostima uslijed prekomjernog uzgona mogu se prevenirati moguće posljedice.

**Ključne riječi:** hidrotehnički objekti (sustavi), podzemni objekti, sustavi odvodnje urbanih područja, uzgon

### Abstract

Hydrotechnical facilities are part of the solution to challenges related to man's relationship with water. They are used to solve individual technical tasks, and the most common are the implementations of several objects connected into a functional unit - a hydrotechnical system. Most of these buildings are built below ground level, where the problem of external water inflow into the construction pit and/or groundwater penetration occurs. The buoyant action of water destabilizes underground structures, both during their individual construction, as well as when connecting them into a whole and during the use of a complete system. The paper analyzes the objects of the drainage system of urban areas - connection/control shafts, pumping stations, collection/retention tank. The method of calculation of buoyancy and critical Uplift Pressure on structure is indicated. Examples of situations where buoyancy threatens the very performance or viability of the finished part of the drainage system are





highlighted. Knowing about the dangers of excessive buoyancy can prevent possible consequences.

**Key words:** hydrotechnical facilities (systems), underground structures, drainage system of urban areas, buoyancy

## 1. Uvod

Hidrotehnika je tehnička disciplina u okviru građevinarstva koju karakterizira povezanost s vodom. Obuhvaća znanja i vještine izvedbe vodogradnji (objekata i zahvata) kojima se omogućuju gospodarenje vodama. Vodogradnje većinom zadiru ispod površine terena, a često i duboko u podzemlje, pa su specifične zbog raznih oblika, tako prisutnih, utjecaja vode. Problematika vodnog gospodarstva (korištenje vode i njene snage, zaštita od njenog štetnog učinka te zaštita vodnih resursa) je složena i rješava se hidrotehničkim sustavima u kojima je veći broj građevina. Pri tom svaka vodograđevina treba odoljeti specifičnim djelovanjima vode tijekom svih faza svog vijeka trajanja: gradnje, održavanja i uporabe. Upečatljivo djelovanje vode je uzgonsko, o čemu se uči u svim školama, pa ipak zna negativno iznenaditi. Zato se u ovom radu predstavlja način izračuna uzgona u specifičnim situacijama i to na primjerima čestih i jednostavnih građevinama, kao što su one kod ukopanih cjevovoda.

## 2. Građevine i voda u tlu

Voda je osnova života te je glavna sastavnica ekosfere (gornjeg dijela Zemljine kore i donjeg dijela atmosfere), u kojoj je prisutan život. Ona kruži ovim prostorom i izmjenjuje se uz kraće ili duže zadržavanje. Ljudske građevine nalaze se u uskom pojasu sučeljavanja krutih (i tekućih) sa plinovitim površinskim slojevima našeg planeta. Tako su kontakti građevina i vode mogući sa svih strana. Problematikom pojavnosti vode (rasprostranjenosti, količinom i oblikom) bavi se znanstvena disciplina hidrologija, a problematikom međuodnosa tla (stijene) i vode bavi se hidrogeologija. Obje ove znanosti imaju zadatak pribaviti prikladne podatke za građevinsku djelatnost. Geotehnika, koja se bavi zemljanim (i kamenim) radovima i građevinama, bila bi puno jednostavnija grana građevinarstva kada ne bi bilo vode u tlu. U temeljnom tlu bez vode, koliko je opterećenje na tlo, tolika je promjena ukupnih naprezanja kao i prateća deformacija tla, prema utvrđenom odnosu za danu vrstu tla. Ali, s vodom u tlu, deformacije ne ovise o promjeni ukupnih, već efektivnih naprezanja, koja su umanjena ukupna naprezanja za tlak vode u tlu. Pri tom se efektivna naprezanja ne mogu izravno odrediti jer su rezultat djelovanja sila na kontaktima između zrna i/ili čestica tla. Tako uvijek treba imati na umu da tlo kao porozna sredina može u svojim porama sadržavati i vodu. Količina vode u porama tla ima značajan utjecaj na fizičke i mehaničke osobine tla, što je posebno izraženo kod sitnozrnog tla, a manje kod krupnozrnog.

Podzemna voda je voda koja se nalaze ispod zemljine površine u šuplinama, a kreće se gravitacijski prema dubljim (niže ležećim) dijelovima vodonosnika. Podzemne vode su dio općeg hidrološkog ciklusa, a vrijeme njihovog ciklusa (izmjene) im može biti u rasponu manje od jedne godine do nekoliko milijuna godina. Prodiranje vode u tlo (infiltracija) ovisi o

količini oborina, nagibu površine, vegetaciji, propusnosti stijena i količini vode u tlu. Voda ponire u tlo sve do nepropusnoga sloja, iznad kojega, u propusnim stijenama (pješčenjaci) ispunjava sve pore, šupljine i pukotine. To je pojas vode temeljnice, iznad kojega se nalazi prozračna zona (zona aeracije) djelomično ispunjena vodom. Podzemna voda je sva voda koja teče kroz podzemlje ili se nalazi u podzemlju, u stijenama i tlima nastala pomoću infiltracije, a gubi se istjecanjem na površinu kroz izvore i procjeđivanje na dnu mora. [1]

Po porijeklu razlikuje se vadozna, juvenilna i konatna podzemna voda. Vadozna voda nastaje poniranjem atmosferske, riječne i jezerske vode u podzemlje. Juvenilna voda nastaje sintezom vode iz elemenata Zemljine unutrašnjosti, a konatna voda se nalazi u stijenama od njihova postanka. U prirodi se često pojavljuju vode mješovitog podrijetla.

Vode u stijenama dijelimo na fizičko-kemijski vezanu vodu, kapilarnu vodu, slobodnu (gravitacijsku) vodu, higroskopnu vodu i opnenu vodu. Higroskopna voda se javlja u obliku molekula po stjenkama pora. Ove molekule su vezane silom i do 1000 bara, a odstranjuju se iz stijena samo pretvaranjem u vodenu paru na temperaturi 105-110 °C. Opnena voda stvara vrlo tanki omotač oko mineralne čestice debljine 0,0002 mm za koju je vezan silom adhezije i do 7000 puta jačom od gravitacije. Može se odstraniti iz stijene samo isparavanjem te se može kretati vrlo sporo, samo sa čestice čiji je omotač deblji na česticu s tanjim omotačem. Kapilarna voda stvara kapilarnu zonu neposredno iznad razine vode temeljnice. Uz stjenku se kapilarna voda penje adhezijom, prenosi hidraulički tlak i podliježe gravitaciji. Slobodna gravitacijska zona podliježe gravitaciji, smrzuva se na temperaturi manjoj od 0 °C te se može odstraniti iz podzemlja crpljenjem. [1], [2]

S obzirom na utjecaj podzemne vode, inženjersko-geološkim istraživanjima se proučavaju brojne pojave: kapilarno penjanje, bubrenje, utjecaj leda, tečenje vode kroz tlo (stijene), odnošenje sitnih čestica, utjecaj na objekte, utjecaj na stabilnost pijesaka pri potresu i utjecaj na stabilnost stijenskih masa. Utvrđena je povezanost vode u stijenama i određenih fizičkih svojstava stijena kao što su: poroznost, kapilarnost, vlažnost, stupanj zasićenja, vodopropusnost. Na izvjesnoj dubini u tlu registrira se nivo podzemne vode, što se najčešće postiže istražnim radovima. Ispod toga nivoa sve pore u tlu su zasićene vodom pri čemu je stupanj zasićenja  $S_r=100\%$ . Neposredno iznad razine podzemne vode je zona u kojoj se stupanj zasićenja kreće u granicama od  $0\% < S_r < 100\%$ . Uzrok pojavi vode u ovoj zoni su kapilarni efekti koji su mogući u prisustvu značajnijih količina sitnozrnih frakcija tla. Prvo je moguća podzona gdje je podzemna voda u potpunoj međusobnoj komunikaciji, zatim podzona djelomičnog kapilarnog zasićenja (gdje su najsitnije pore ispunjene vodom, a najkrupnije zrakom) te krajnja zona kontaktne vode (gdje voda obavlja površinu najsitnijih čestica tla, a može se nalaziti i na kontaktu između čestica tla). [2]

### 3. Utjecaj vode na inženjerske radove

Voda ima značajan utjecaj na inženjerske radove. Već kod osmišljavanja nekog sustava i svake pojedine građevine potrebno je dobro poznavanje osobitosti lokalnog režima vode. Pri projektiranju treba predvidjeti sve buduće, moguće problematične utjecaje vode, što nerjetko nije uspješno. Ili je nedovoljno podataka ili se dešavaju rijetke, slučajne situacije. Općenito, voda može prouzročiti probleme pri građenju, može biti agens erozije koja



uništava građevine, može negativno utjecati na funkcioniranje građevina. Bilo kog porijekla, površinskog ili podzemnog dotoka, voda može otežati ili čak onemogućiti građenje. Neovisno o veličini zahvata, gotovo svi iskopi i građevine izvode se ispod površine terena, a većinom i ispod razine podzemne vode. Tako je opasnost od potapanja građevinske jame sveprisutna. Ako se prilikom iskapanja za neku gradnju zadire u podzemnu vodu nameće se potreba za crpljenjem podzemne vode kako bi se osigurao nastavak radova.

Podzemna voda nije uvijek problem sama po sebi, već može nepovoljno utjecati na tlo. Voda uzrokuje strukturni slom tla na dva načina: hidrauličkim slomom (ključanjem i stvaranjem kanala uz ispiranje čestica) te klizanjem (uzgonom i strujnim tlakom). Podzemna voda koja dovodi do klizanja ne mora biti umjetnog porijekla. Intenzivna oborina može inicirati plitka klizanja zbog povećanja vlažnosti materijala. Podzemna voda teče paralelno površini što destabilizira kosinu. Horizontalni tok kreira strujni tlak koji djeluje paralelno kosini te se zbraja s gravitacijom. Podzemna voda može djelovati kao agens erozije preko uzgona. [2]

Voda može biti jedan od faktora koji utječu na funkcioniranje građevina. Negativan utjecaj voda može imati na funkcioniranje tunela namijenjenih za željeznički ili automobilski promet, kao i podvožnjaka i pothodnika, kod nadiranja većih količina vode od izvedenih mogućnosti odvodnje. Akumulacija vode i odlagalište otpada može biti manje učinkovito zbog okolnosti procjeđivanja vode. Održavanje uspješnog funkcioniranja iziskuje dobru kontrolu procjeđivanja. Kod kanala za navodnjavanje i akumulaciju površinske vode kontrola procjeđivanja reducira gubitke vode. U lagunama otpadnih voda i odlagalištima krutog otpada kontrolom procjeđivanja nastoji se zaštititi ili umanjiti zagađenje podzemlja.

Voda može izazvati procese kao što su poplava i erozija tla. Takve pojave mogu dovesti do velikih materijalnih gubitaka kao i do gubitaka života. U tom kontekstu mogu se navesti neki primjeri ovakvih katastrofa na kojima se učilo.

Kao prvi primjer može se spomenuti slom brane Malpasset u Francuskoj. Ukratko, na ovoj brani je porni tlak nastao po diskontinuitetu nepropusnog bloka u lijevom upornjaku. Porast tlaka prvi put je evidentiran kada je došlo do raspucavanja betonskog preljeva brane uslijed ogromnog uzgona. Prijenos visokog pornog tlaka po frakturama inicirao je pomak klinastog bloka stijene u lijevom upornjaku, što je rezultiralo prvim totalnim slomom betonske lučne brane i velikim inženjerskim interesom. [3], [4]

Nadalje, upečatljiv je događaj vodnog vala koji se dogodio 1963. godine u Italiji na brani Vaiont. Ova katastrofa okvalificirana je među najtragičnije događaje uzrokovane greškama inženjera. Nadzorna komisija, pod velikim pritiskom politike za nastavkom i ubrzanjem gradnje i smanjenjem troškova, nije usvojila upozorenja stručnjaka ni onda kada su se pojavile prve pukotine. Kobni događaj zbilo se noću, 9. listopada 1963. godine, kada se golemi kameni planinski masiv (dužine 1,8 km i širine 1,6 km) odvojio i kliznuo u akumulacijsko jezero volumena 115 milijuna m<sup>3</sup> vode. To je uzrokovalo nastanak velikog vodnog vala, koji je porušio sve zgrade u nizvodnom gradiću Logaroneu, pri čemu je poginulo više od 2000 ljudi. Klizište Vajont je jedno od najbolje obrađenih klizišta u stručnoj literaturi. [5], [6]



Osim tako imponantnih i globalnih, mogu se spomenuti i nešto „manje“ katastrofe povezane s vodom. Evo dvaju „bliskijih“ primjera: pucanje savskih nasipa i poplava u Rajevom Selu i Račinovcima te erozijske opasnosti i posljedice u općini Žepče (BiH).

Savski je nasip 17. svibnja 2014. puknuo na dva mjesta. Tada je voda na obrambenom nasipu napravila 130 m dugačku i 12 m duboku rupu. Poplavljeno je 600 km<sup>2</sup> terena, dvije su osobe poginule, evakuirano je gotovo devet tisuća osoba, a oštećeno više od sedam tisuća kuća. Vodostaji su bili toliki da su bile iscrpljene gotovo sve sigurnosne rezerve na koje se računa u inženjerskim proračunima nasipa. Poplave su prirodni fenomen koji se ne može spriječiti jer će, bez obzira na sigurnost sustava za obranu, uvijek postojati vjerojatnost njezine pojave. [7]

Izuzetno kišna godina (2014.) dovela je do potpunog zasićenja tla te je za vrijeme intenzivnih oborina ukupna količina pale oborine sudjelovala u površinskom otjecanju sa sliva. Zbog nagiba tla u brdskim područjima formirale su se bujice koje su nosile velike količine nanosa, granja, drveća i raznog materijala te su se velikom silinom sjurile u osnovna korita i rijeke. One pak, zbog prethodne ispunjenosti svojih korita, nisu mogle toliku količinu vode evakuirati u kratkom vremenskom periodu u nizvodna područja. Rezultati mjerenja koje je izvršio DHMZ - Služba za hidrologiju, na hidrološkim postajama donje Save, Kupe, Mure i Drave pokazuju do sada nezabilježene ekstremne vrijednosti u vodostajima, brzinama toka i protocima. Sasvim sigurno je da ovakav događaj, koji odgovara povratnom periodu većem od 1000 godina, ukazuje na potrebu bolje suradnje svih susjednih zemalja u razmjeni meteoroloških i hidroloških informacija kako bi se na vrijeme mogle predvidjeti ovakve ekstremne pojave i što je moguće više ublažiti njihove štetne posljedice. [8]

Erozija tla vodom je jedan od najznačajnijih uzroka degradacije tla u Bosni i Hercegovini (BiH). Posebno je prisutna na malim farmama koje se često nalaze urubnim područjima gdje je kvaliteta tla loša, a topografija vrlo izražena. Opasnost od erozije procijenjena je na području u blizini Žepče, [9]. Upravo ono dolazi u centar pažnje javnosti u svibnju 2014. godine kao jedno od najviše stradalih područja od katastrofalne erozije tla i poplava koje su te godine zadesile savsko zaobalje. Evidentno je: posljednjih desetljeća na pojedinim mjestima općine Žepče, zbog utjecaja erozije, nestale su mnoge šumske zone, koje su bile na višim terenima; u više navrata uništavani su putovi, a pojedine kuće su srušene i zatrpane materijalom koji je erozija donijela.

Iz iskustava poplave u svibnju 2014. zaključeno je da su klimatološki uzroci poplava gotovo uvijek praćeni i antropogenim utjecajima u slivu, zbog čega se štete nastale prirodnim pojavama višestruko uvećavaju. Stoga je neophodno da se zaštiti od voda, kao segmentu upravljanja vodama, pristupa integralno, polazeći prije svega od uzroka poplava. [10]

Konačno, može se ukazati i na niz jednostavnijih primjera negativnog utjecaja vode na objekte u ljudskom životu, za što je ovdje priložen slikovni prikaz (slika 1).





**Slika 1:** Utjecaj prevelikog uzgona na: grobnice, bazene, cjevovode, šahtove, razne spremnike, septičke jame, zaštitne bunke i stambene objekte, [11]

#### 4. Osnove proračuna uzgona

Uzgon je sila prema gore kojom tekućine djeluju na potpuno ili djelomično uronjeni objekt. Prisutna je kod svih fluida, uključujući i zrak, ne samo vodu, a tako i na onečišćenu vodu, vodu s primjesama. Arhimedov princip kaže da je uzgonska sila (usmjerena prema gore, na potpuno ili djelomično potopljeno tijelo) jednaka težini tekućine koju je tijelo istisnulo, što znači da vrijedi:

$$U_f = \gamma_f \cdot V_i = \rho_f \cdot g \cdot V_i = m_f \cdot g$$

Koji od izraza će se koristiti, ovisi o podacima kojima se raspolaže. Najvažnije je uočiti da se koriste specifična težina ( $\gamma_f$ ), gustoća ( $\rho_f$ ), masa ( $m_f$ ), ili volumen ( $V_i$ ) tekućine (fluida), a ne objekta. Kada je objekt uronjen u tekućinu, atomi i veze tekućine sklanjaju se s puta, ali se žele vratiti u svoje prirodno stanje, tako da električne sile između atoma djeluju silom na objekt. Ove međuatomske sile sve zajedno stvaraju jedinstvenu silu uzgona.

Dakle, uzgon je vertikalna sila kojom fluid djeluje na uronjeno tijelo suprotno smjeru gravitacije, a ovisi o volumenu istisnuća, gustoći fluida u koji je tijelo uronjeno i gravitacijskom ubrzanju.

Moguć je štetan utjecaj uzgona ukoliko se građevine grade na područjima s visokom razinom podzemne vode ili su to područja sa poplavnom opasnošću. Tada treba voditi računa da prisutnost vode može imati znatan utjecaj na stabilnost tla i ukopanih dijelova građevine. Visoka razina podzemne vode na lokaciji može uzrokovati smanjenje posmične čvrstoće temeljnog tla ispod građevina, povećanje pritiska tla na zidove ukopanih građevina (zidovi građevnih jama i podrumski zidovi) kao i izdizanje lakših građevina uslijed djelovanja uzgona.

Kod navedenih opasnosti od vode potrebno primijeniti odgovarajuće tehničke mjere tijekom projektiranja i izgradnje kako bi se upravljalo njezinim štetnim utjecajem. U samom startu, prije samog projektiranja zahvata u tlu potrebno je napraviti kvalitetne geotehničke istraživačke radove kojima se treba utvrditi razina podzemne vode te njene potencijalne oscilacije (režim) na određenoj lokaciji (ispitivanja i analize razina podzemne vode u bušotinama i piježometrima). Nakon toga, u fazi projektiranja i izvedbe potrebno je s pažnjom analizirati i ukloniti potencijalne nepovoljne utjecaje podzemne vode na stabilnost tla / iskopa tijekom gradnje i ukopanih građevina tijekom eksploatacije. To znači da je potrebno definirati samu problematiku zahvata u tlu, odnosno radi li se o privremenom ili trajnom iskopu za izvedbu građevine / trajnoj građevini, koja je dubina ukopavanja te kakva su prostorna ograničenja na površini što implicira osiguranje iskopa (građevne jame).

Uobičajeno se prilikom projektiranja provjeravaju osnovni tipovi gubitka stabilnosti tla ili konstrukcija uslijed djelovanja vode: slom zidova potporne konstrukcije za osiguranje građevinske jame; slom tla ili konstrukcije prouzročen djelovanjem uzgona te hidraulički slom tla.

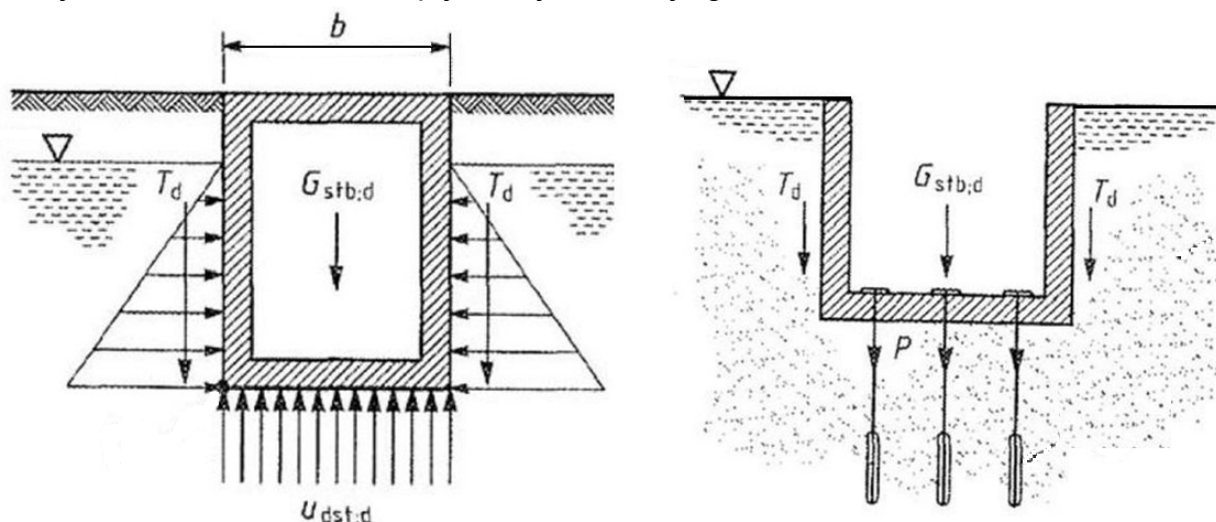
Stabilnost na izdizanje građevine (objekta) ili sloja temeljnoga tla male propusnosti uslijed djelovanja uzgona, mora se provjeriti usporedbom stalnih stabilizirajućih djelovanja (primjerice težine i bočnog trenja) sa stalnim i promjenljivim destabilizirajućim djelovanjima





vode. Ukoliko je destabilizirajuće djelovanje vode veće od stabilizirajućeg djelovanja težine i drugog, tada se, ovisno o trajnosti ukopane građevine, može primijeniti više raznih rješenja stabilizacije.

Ako se problematika uzgona javlja kod privremenog zahvata u tlu (privremeni iskop ili privremena konstrukcija za osiguranje građevne jame), primjereno je tijekom izgradnje snižavati razinu podzemne vode na lokaciji drenažnim sustavima (drenažni rovovi) i sustavima crpljenja (bunari i slično). Ako se problematika uzgona javlja kod trajno ukopane građevine u tlu (podzemne), moguće je povećati dimenzije (ukupnu težinu) ukopane građevine ili pak izvesti vlačne pilote (sidra) te ih povezati za temeljnu konstrukciju građevine da svojom vlačnom nosivošću sprječavaju izdizanje građevine.



**Slika 2:** Shematski prikazi: a) djelovanja uzgona na ukopanu građevinu te b) mjere stabilizacije isplivavanja (vlačna sidra / ploti); [12],

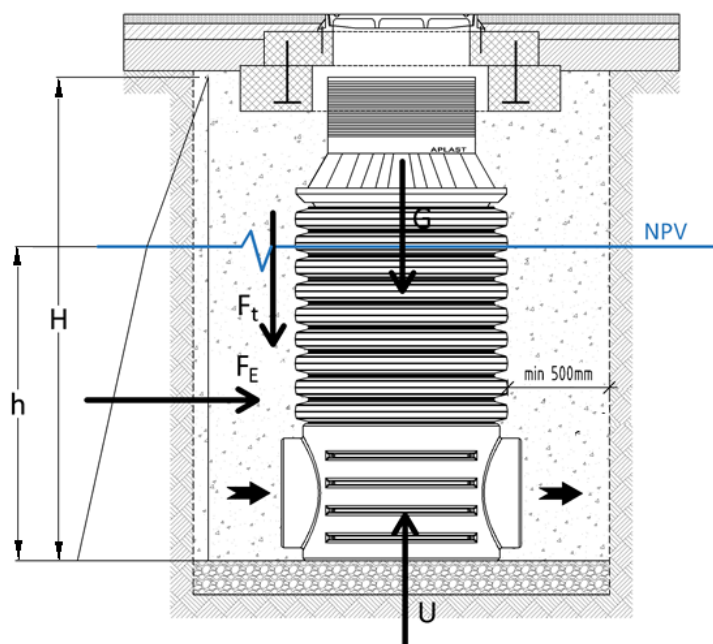
## 5. Analiza stabilnosti objekata odvodnje urbanih područja

Ova analiza proizašla je iz problema kod izvedbe jednog lokalnog kompleksa trgovačkog centra. Projektom izvedbe obuhvaćeno je oko 2.400 m cijevovoda vanjske odvodnje (koje čine PEHD korungirane cijevi, što fekalne odvodnje, što zauljene odvodnje), 68 slivnika, 52 okna raznih dubina i duboka precrpna stanica. Zauljena odvodnja sakuplja vodu s ceste, parkirališta i krova građevine, odvodi je zasebnim rovom te ju preko separatora tekućina, gravitacijski, cijevima odvodi u okolne otvorene kanale. Fekalna odvodnja odvodi otpadne vode iz građevine, gravitacijskim putem, cijevima do precrpne stanice, odakle se dalje tlačno vode u sabirni spremnik zapremine 50.000 l. Cijevi za zauljenu odvodnju dimenzija su od DN 160 do DN 630, a cijevi fekalne odvodnje su DN 200. Predmetna problematika kod ugradnje cijevi, slivnika, okana, precrpne stanice i sabirnog spremnika se javlja već na iskopima dubine do 2 m zbog prisustva podzemnih voda, što je dobro poznato mještanima toga područja.

Za razmatranje su uzeti „laki“ (plastični) ugradbeni objekti uobičajeni kod urbane odvodnje i to: spojno/revizijsko okno, okno crpne stanice te ukopani septički spremnik. Analizom je obuhvaćena kontrola uzgonskog djelovanja u specifičnim, mogućim situacijama prilikom izvedbe (neosiguran i/ili nezastupljen objekt uz plavljenje građevinske jame), zatim tijekom

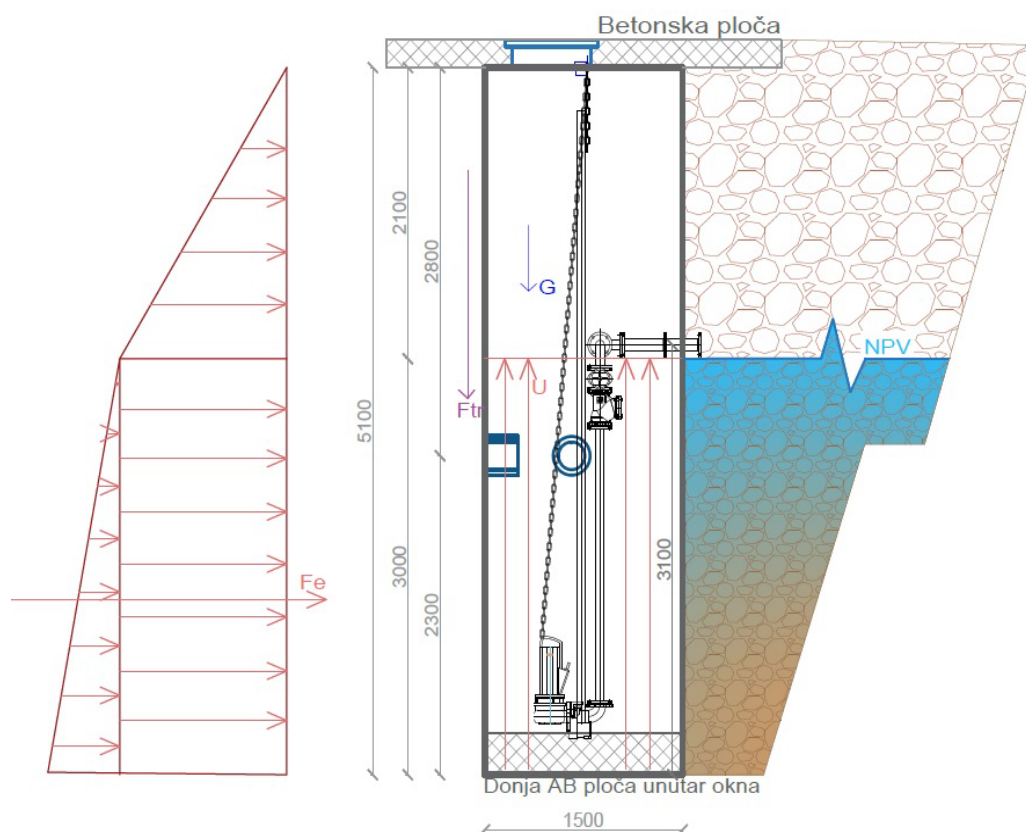
redovitog funkcioniranja sustava (uobičajeni radni uvjeti / nivo podzemne vode – pun i/ili prazan objekat), ali i u mogućim ekstremnim situacijama (jako visoki vodostaji podzemne vode, preplavlivanje objekata, u punom ili praznom stanju). Provjeravao se koeficijent sigurnosti na isplivavanje (izdizanje) s obzirom na moguća stabilizirajuća djelovanja u odnosu na specifični uzgonski efekat. Zatim su se tražili ograničavajući elementi, ili maksimalna dubina potapanja objekta za postavljeni stupanj sigurnosti, ili potrebno punjenja objekta vodom do ostvarenja sigurnosti ili je ukazano na potrebu za nekim drugim dopunskim osiguranjem (DO), kao što je otežanje sa betonskim pločama, sidrenje u temeljno tlo i drugo. Nadalje su opisani neki rezultati provedene analize, a slikama su predložene proračunske sheme pojedinih objekata.

Prvo su se razmatra revizijska/spojna okna, predstavljena slikom 3. Kako su se koristila cilindrična okna raznih promjera  $\Phi$  i visina (dubina ugradnje)  $H$ , za primjer može poslužiti okno  $\Phi = 0,8$  m sa variranjem  $H = 1,2; 2,5$  i  $6,0$  m. Od interesantnih koeficijenata sigurnosti  $k_{si}$  na isplivavanje (izdizanje) (1,10; 1,15 i 1,20) korišten je  $k_{si} = 1,10$ . Od parametara tla (nasipa) presudan je kut unutarnjeg trenja  $\phi$ , koji se može varirati između  $25^\circ$  i  $35^\circ$ , a za ovaj primjer je korištena najmanja vrijednost. Za dopunsko osiguranje (DO) uzeto je opterećenje betonskom pločom (ili gore s otvorom ili dolje kao kompaktni kvadrat, visine  $d_b$ ), ekvivalentnog volumena  $V = (\Phi+1)^2 \cdot d_b$ . Razmatrana su tri slučaja: a) kod normalne uporabe, bez DO, kod manjeg ukopavanja, kritičan je nivo podzemne vode (NPV) na dubini oko 0,42 m, a kod srednjeg ( $H = 2,5$  m) na samo 0,08 m, dok kod duboke ugradnje trenje daje više nego dovoljno sigurnosti; b) prilikom ugradnje, vode u građevinskoj jami smije biti oko 0,10 do 0,25 m, ovisno o težini pojedinih okana, ako nema donje ploče i pričvršćenja za nju; c) ekstremno, kada je NPV u razini terena, manje ukopavanje stabilizira betonska ploča debljine 0,15 m, a srednje 0,05 m, dok za duboko, uz ostvareno trenje, ne treba DO.



**Slika 3:** Shematski prikaz montažnog revizijsko/spojnog okna

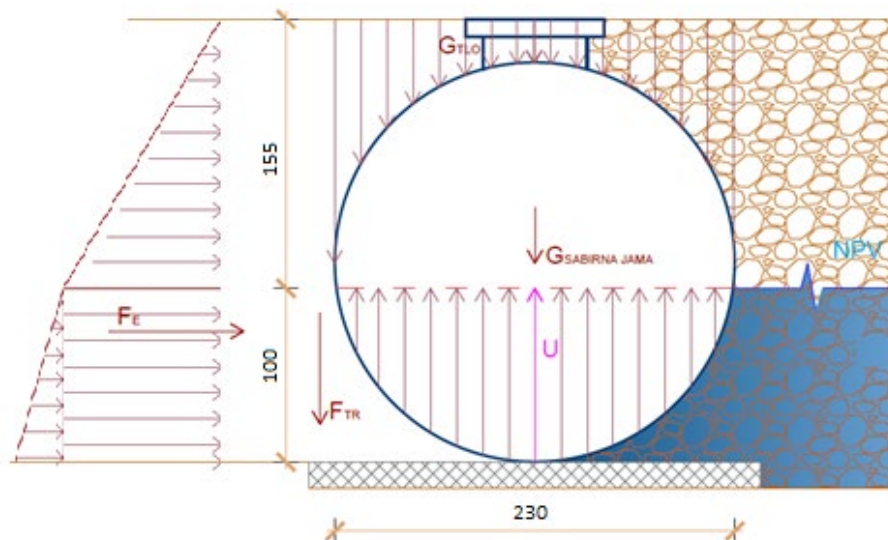
Nadalje je razmatrano okno precrpne stanice, koje je također okruglo, sitno-rebraste stijenke (slika 4). Korištene dimenzije su mu  $\Phi = 1,5$  m i  $H = 5,1$  m. Za dopunsko osiguranje (DO) je uzeto opterećenje betonskom, kružnom podnicom u kombinaciji s gornjom pokrovnom pločom i pratećim instrumentima. Pokazalo se da: a) u normalnim uvjetima uporabe, za prazno okno, NPV nijue ograničen po pitanju sigurnosti na isplivavanje; b) pri ugradnji, nužno je osiguranje nasipavanjem i zbijanjem jer već potapanje građevinske jame sa 0,56 m vode izaziva nestabilnost samostalnog okna, a sa 0,96 m otežanog podnicom od 0,3 m; te c) čak i za ekstrmnu situaciju, NPV na trenu pa i nešto više, nije izvjesna nestabilnost.



**Slika 4:** Shematski prikaz montažnog okna precrpne stanice

Na kraju je analiziran te se može predstaviti i, u ovom slučaju najinteresantniji objekt, sabirni septički spremnik, osmišljen u obliku poleanutog cilindra. Razmatran je spremnik dimenzija: promjera  $\Phi = 2,3$  m i duljine  $L = 13,4$  m ; (slika 5). Ugradnja mu je predviđena s dnom na dubini  $H = 2,55$  m. Ovdje je kao DO razmatrana betonska podložna ploča, ispod cijelog spremnika, s proširenjima u svaku stranu od po 0,5 m. Za razliku od prethodnih primjera gdje se trenje javlja između rebraste plohe okna i nasutog materijala, ovdje se doprinos trenja realizira po kliznim plohama koje aktivira pomak krutog tijela (spremnika ili betonske ploče). Također su razmatrana tri specifična slučaja uz usvojene parametre je  $k_{si} = 1,10$  i  $\phi = 25^\circ$ . Prvi slučaj, a) normalna uporaba, ali bez DO, ukazuje na gubitak stabilnosti kad NPV dođe na blizu 1,0 m od površine, tj kada za 0,4 m prijeđe polovinu rezervoara. Drugi slučaj, b) koji rasvjetljava problematiku izvođenja, pokazao je da već male dubine vode u

građevinskoj jami ugrožavaju ravnotežu spremnika – 0,13 m bez sidrenja, a 0,53 m ako je provedeno sidrenje, tako da je potrebno brzo zasipavanje i zbijanje materijala oko spremnika. Treći slučaj, c) potopljenosti terena, govori o potrebi DO u vidu usidrenosti za podložnu ploču debljine bar  $d_b = 0,15$  m, pri čemu je važno, osim dovoljne količine betona izvesti i prikladno sidrenje (dostane trake i vijke za pričvršćenje).



**Slika 5:** Shematski prikaz montažnog sabirnog septičkog spremnika

## 5. Zaključak

Može se reći da se o djelovanju vode u građevinarstvu sve zna, ali i dalje se dešavaju neželjene situacije i štete. Stoga je važno i opetovano ukazivati na moguće problematične situacije. Ovim radom se ističe stabilizacijski utjecaj trenja, kako prilikom izvođenja objekata, tako i tijekom njihovog životnog vijeka. Sagledavanje uloge betonskih ploča, njihovog dodatnog otežanja te aktiviranja većih ploha sa silama trenja, upućuje na potrebu pravilne izvedbe prilikom gradnje. Ukazuje se na važnost proširenja podložne ploče i izvedbu dostatne debljine betona ovakvog dopunskog osiguranja. Ističe se značaj dobrog povezivanja spremnika s podložnom betonskom pločom – kvalitetne izvedbe obujmica i pričvrtnih spojeva. Također se ističe značaj pravovremenog zasipavanja adekvatnim nasipnim materijalom uz pravilno zbijanje, u cilju postizanja predviđene nosivosti trenjem. U radu su predstavljeni neki primjeri u svrhu isticanja utjecajnih elemenata na opasnost od isplivavanja, ali za svaku konkretnu situaciju potrebna je posebna, prilagođena analiza.

## 6. Literatura

- [1] Podzemna voda. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 14. 7. 2023.  
<<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=48970>>.
- [2] Mihalić, Snježana. Osnove inženjerske geologije; Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2007.  
[http://rgn.hr/~smihalic/nids\\_snjezanamihalic/](http://rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/)



- [3] Duffaut, Pierre. The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959; *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*; 5 (2013) 335–341; <https://damfailures.org/case-study/malpasset-dam-france-1959/>
- [4] Goodman, Richard. On the Failure of Malpasset Dam. *AEG Shlemon Specialty Conference: Dam Failures and Incidents*. Denver: Association of Environmental and Engineering Geologists. 2013. <https://docplayer.net/53797111-On-the-failure-of-malpasset-dam.html>
- [5] Roje-Bonacci, Tanja: Vajont (1963.-2013.) i uloga E. Nonveillera u rasvjetljavanju događaja; *Hrvatske vode* : časopis za vodno gospodarstvo (1330-1144) 21 (2013), 84; 156-163;
- [6] Superchi, Laura; Floris, Mario; Ghirotti, Monica; Genevois, Rinaldo; Jaboyedoff, Michel; i Stead, Dominic. Technical Note: Implementation of a geodatabase of published and unpublished data on the catastrophic Vaiont landslide. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10: 865-873; <https://doi.org/10.5194/nhess-10-865-2010>, 2010. <https://nhess.copernicus.org/articles/10/865/2010/>
- [7] Kuspilić, Neven; Oskoruš, Dijana; Vujnović, Tatjana. Katastrofalna poplava Save i poplavni rizici -Jednostavna istina – rijedak hidrološki događaj. *Građevinar* 7/2014, 66 (2014) 7;
- [8] Oskoruš, Dijana; Vujnović, Tatjana; Klemar, Željka; Jurlina, Toni. Poplave tijekom 2014. u Republici Hrvatskoj; *Zbornik radova sa VI. Konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa*, Valbandon, 22. i 23. listopada 2014. godine, Državna uprava za zaštitu i spašavanje, ur. dr. sc. Jadran Perinić, ISSN 1847-7070, Zagreb,
- [9] Žurovec, Jasminka; Čadro, Sabrija; Sinanović, Kenan; Husić, Samir; Šehić, Dženita; Mrkulić, Ajla. Procjena erozije i moguće mjere konzervacije poljoprivrednog tla na području Željeznog Polja; *Radovi Poljoprivredno-prehrambenog fakulteta Univerziteta u Sarajevu*, God. LXII, broj 67/2, Sarajevo 2017.; 299-311; (UDK 63/66 (058)0808.1/2, BH ISSN 0033-8583)
- [10] Imamović, Alma. Uzroci poplava u slivu rijeke Bosne s osvrtom na poplave u maju 2014. godine. *Upravljanje rizicima od poplava i ublažavanje njihovih štetnih posljedica (2015)*: 131-144; (DOI: 10.5644/PI2015-161-11)
- [11] <https://myfox8.com/news/caskets-float-to-the-surface-during-historic-south-carolina-flooding/> ; <https://www.poolproswi.com/post/floating-pools> ; <https://ccppa.ca/flotation-of-buried-pipe/> ; <https://www.riverpoolsandspas.com/blog/can-concrete-gunite-pools-float-pictures> ; <https://www.wwlp.com/news/recent-rains-cause-storm-shelter-to-float-in-white-deer/> ; [https://www.pumper.com/online\\_exclusives/2019/11/will-the-septic-tank-youre-installing-float](https://www.pumper.com/online_exclusives/2019/11/will-the-septic-tank-youre-installing-float) ; <https://okcfox.com/archive/gallery/noble-storm-shelter-ops-out-of-ground?photo=1> ; <https://nj1015.com/buying-a-home-in-nj-no-one-has-to-tell-you-if-it-has-flooded/>
- [12] <https://www.geotech.hr/utjecaj-podzemne-vode-na-stabilnost-tla-i-ukopanih-gradevina/>





## ***Waterless i. e. pigment digital textile printing***

**M. Glogar<sup>1\*</sup>, M. Tkalec<sup>1</sup>**

University of Zagreb Faculty of Textile Technology, <sup>1</sup>Department for Textile Technology and ecology, Prilaz baruna Filipovića 28a, Zagreb, Croatia

\*Corresponding author. E-mail: [martinia.glogar@tff.unizg.hr](mailto:martinia.glogar@tff.unizg.hr)

### **Abstract**

Textile printing, one of the leading polluters of the environment and exploiters of energy resources among industries, is under the pressure of an increasingly pronounced imperative of ecological and economic sustainability. As a result, the fashion, home textile, and nonwoven industries, among others, have a great demand for innovative printing technologies, sustainable inks and eco-design. High consumption of chemicals used in the process of printing, has been found as environmentally hazardous and therefore responsible for environmental pollution. Moreover, water and energy consumptions are high in textile printing. With the entry of digital InkJet printing technology into the field of textiles and textile printing technology, the production process is shortened and certain stages that were part of the classic printing process, which required significant economic resources and the use of significant amounts of energy and water are avoided. In the beginning of the digital textile printing development, when presenting, the attention was payed to countless possibilities with emphasis on the aesthetics. As the awareness of sustainability grows throughout textile and printing industry, the main focus is on sustainability of this technology. Today more research work and time is invested in the optimization and improvement of digital InkJet printing using pigments, while in the application of dyes there are still open issues of ecological and energy sustainability. The paper will present a theoretical overview of the research conducted on the applicability and the overall issue of applying pigment digital printing on textiles.

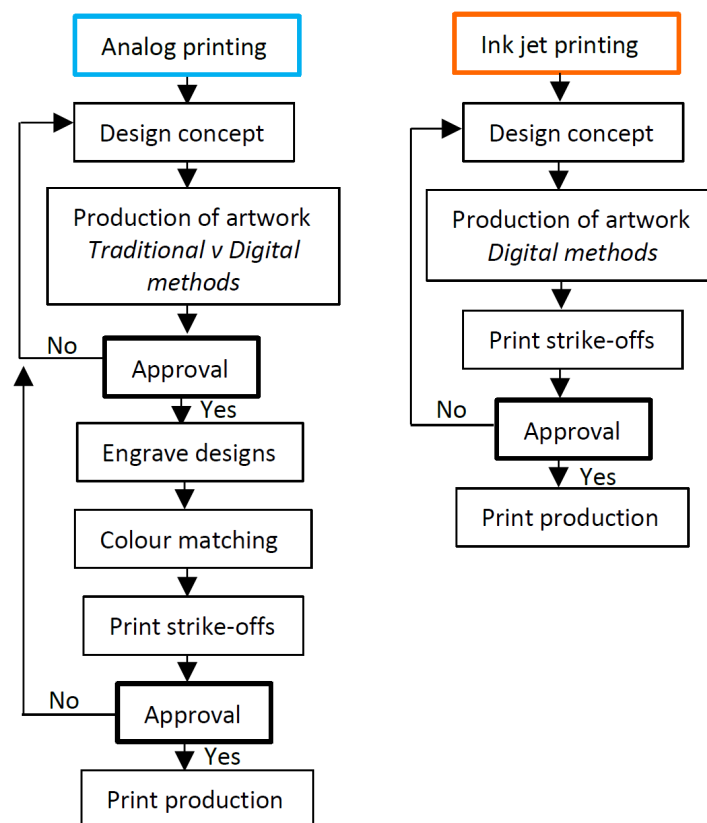
**Key words:** waterless printing, sustainable technology, digital textile printing, pigments, ecology

### **1. Introduction**

The fashion industry is the world's third-largest manufacturing sector and plays an important role for economic development, particularly in low-income countries. But the impact on the environment is significant. The textile industry, which is responsible for 20 percent of the world's water pollution and consumes high amounts of clean water in dyeing and traditional printing processes, plays a critical role in creating a sustainable world. According to the

UNCATD (the United Nations Conference on Trade and Development - an intergovernmental organization within the United Nations Secretariat), enough water (93 billion m<sup>3</sup>) to meet the consumption needs of 5 billion people is used for textile/apparel production every year [1, 2].

The negative image of the textile industry as a leading polluter, consumer of water and other energy sources, as well as a discharger of waste water containing heavy chemicals and large amounts of dyes, certainly encouraged large investments in research into new, innovative textile dyeing and printing processes. In the field of printing, one of the revolutionary moves was the introduction of digital technology that pushed textile printing from notorious to green, environmentally and energy sustainable technology. The production process and comparison between screen and digital textile printing is shown on Figure 1 – digital technology simplifies the production line for textile printing. There is no need for color separation printing pastes and screens preparations. Therefore it becomes environmentally friendly and cost efficient for textile industry [3, 4].



**Figure 1.** Process comparison of Conventional and Digital Ink-jet Printing

According to Dr. Simon Daplyn (Product Manager of Sensient Imaging Technologies), by switching from analogue printing processes to digital, data already shows a huge impact, not only in reducing water consumption and pollution, but also in decreasing energy use,



CO<sub>2</sub> emissions, waste materials and time. Many complementary studies show an average reduction in water consumption of 60%, energy consumption of 55% and a 95% reduction in CO<sub>2</sub> emissions. These clear environmental benefits are further enhanced by studies showing lead-time for printed goods reducing by 80%; waste reduced by 85% and a reduction in the use of chemicals in excess of 90% [5].

## **2. Aspects of textile digital printing**

When Stork Brabant B.V. 1991, introduced the first InkJet textile printing device, we can say that a new era of textile printing technology has begun. The benefits of digital printing technology have been recognized by designers and technologists. Technology originally developed for graphic applications enters the world of textiles and breaks down the limitations that existed primarily in the creative part of production and impeded the design freedoms, due to the technical requirements of analogue technologies and sample preparation processes. Now, without the expensive and time-consuming preparatory phase that involves preparing patterns and screens in analogue printing with a limited number of colors and patterns, digital printing with the ability to reproduce patterns of unlimited shapes and color numbers, provides the ability to respond to market demands quickly, with design personalization, uniqueness, individuality, as well as with significant savings in water and energy and pollution reduction, making digital printing a more environmentally friendly technology than analogue. These advantages justify the considerable research and development work that is continuously invested in finding optimal solutions to the constraints and issues that, despite the great advantages and recognition of digital technology in the world of apparel, still hinder its full commercialization. Due to the complex interaction of the specific surface structural characteristics of textiles as a substrate, the requirements on the composition and rheological properties of printing inks, and the technology of droplet formation, there are still numerous problems that need to be addressed.

The introduction of digital technology into industrial processes in general is evolving strongly and dynamically. This fact is visible in the rapid development of printing technology based on the integration of printing machine and computer. Digitization in the development so far has caused numerous changes that are visible in every production of printed textiles in which the application of Ink Jet printing technology (dominant digital printing techniques) creates opportunities for personalized printing and printing on demand. Without the process of digitization and digital printing, it is not possible to imagine today's business activities and their progress. Being able to order a personalized sample of materials, high quality, and in a short time, is really something new. Previously, it depended on a complicated technological process that was unprofitable in a small edition. Now it represents great business opportunities for profit in the market and its profitable conquest. In the world market since 2012, the need for this type of printing is growing rapidly. It is ubiquitous in the fashion industry, and its many practical and creative aspects are increasingly appealing to designers. With the introduction of digital printing, the number of samples that can be printed in small quantities is infinite. For textile printing, it is important to understand how to work



with certain textile materials and dyes for the highest quality end product. Printing ink is the most important for a quality print, and in order to achieve product durability, it is necessary to investigate which dyes can withstand external influences, light and washing, and at the same time be suitable for reproducing designs on all types of textile materials [6, 7].

In the analyses conducted by FESPA (Federation of European Screen Printing Associations) in 2021, they reported as well as concluded that major factors influencing growth in the digital textile printing market included the migration towards sustainable textile printing practices using cleaner consumables - such as urea and VOC (volatile organic compounds) free printing inks. And that some of the factors driving the adoption of digital printing technology also included energy and water efficiency and reduced chemical wastage [8, 9].

The reasons for significant energy and water savings can be explained in the principle of operation of the print head of a digital printing device. In a digital print head, much less physical force needs to be overcome to apply the printing ink to the substrate. If, for example, the print head uses piezoelectric technology, the flow of droplets is generated by activating a vibrating plate using an electric charge, inside the print head. Each drop formed in this way consists of a precisely defined amount of ink that is squeezed out at a precisely determined moment with precise positioning, which is defined by the requirements of the design being printed. The volumes of the nozzles of the print heads are highly small, and ranges from 1.5 to 6 picolitar per drop.

Also, stimulated by innovations in the design of the print head, there was a significant increase in the printing speed of digital textile machines in the last stages of development. For example, the Ricoh TH5241 generates a precise 1200 dpi from 1280 nozzles [10], while the Kyocera KJ4 EX uses a print head design that enables fast, high-quality printing [11]. XAAR with its 2002 print head provides significantly increased print speeds of up to 75 meters per minute at 720 dpi [12]. Such combinations of speed and precision create water and energy savings. As a result, the average volume of water consumption in digital textile printing is 5-9 cc per meter, in contrast to the large amount of liquid of 50-60 cc per meter consumed in analogue rotary or flat screen printing.

The analogue rotary or flat screen printing method itself consumes large amounts of water-based printing paste, because as an imprecise physical process, it relies heavily on volume-controlled chemical stabilization to achieve a satisfactory print.

Taking into account all of the above in the context of the advantages of digital over analogue printing, as well as in the context of the environmental sustainability of digital printing, it is clear that the textile printing industry can do more to drive a further improvement. In the desire for even greater savings, the digital textile printing scene is beginning to consider the differences between the application of dyes and pigments in printing inks. Although, as already established, water and energy savings are significant in digital printing compared to

analogue printing, the application of dyes in printing inks still represents a challenge and a kind of hazard. A dye-based printing technologies require the fabric to be pre-treated with chemicals, with the printed design then fixed to the fabric in a steaming process. The energy consumed and CO<sub>2</sub> produced by heating water by coal or oil furnace to create the required steam is significant. A subsequent washing cycle (often involving multiple stages) is applied to remove any chemicals and unfixed colour from the textile. It is legally required to treat the effluent water resulting from such processes before release back into the water system requiring energy, time and cost. This does not take full advantage of the simplicity of applying digital printing technology, as there are stages of pre-processing and post-processing that lengthen and increase the cost of the process, and do not fully justify the economic and environmental sustainability attributed to digital textile printing [13, 14].

### **3. Waterless/Pigment printing**

Lately, pigment ink's advancement is the major highlight as the most sustainable printing process. Although the advantages of applying dyes are numerous in the context of achieving brilliant coloring and persistence of coloring under the conditions of use and maintenance of the product, more and more research work is devoted to the optimization of pigment systems. The development of pigment-based printing ink compositions faces very complex challenges. It is necessary to emphasize the difference between dyes and pigments. Both types of chemical constitutions (dyes and pigments) are compounds, mostly organic, that have the ability to give the coloration to the textile surface. This means that they have the ability to selectively absorb incident light, as a result of which they selectively absorb certain wavelengths of the visible part of the spectrum, while others are reflected and a certain color is perceived according to the dominant wavelength in the reflected part of the spectrum. The significant difference is in their solubility and the way they bind to the textile material. In dye-based ink, the dye particles are entirely soluble in ink (except for disperse dye), and, also, they have their own affinity to the textile fiber and bind by creating chemical bonds with the functional groups of the textile fiber. Pigments are water-insoluble and they do not have their own affinity towards the textile fiber, but rather bind to the surface and remain attached as physical undissolved particles with the help of binders and fixatives, on the surface of the textile substrate. From this comes the characteristic of pigment printing that is certainly on the list of the most important, which is its applicability to all types of textile fibers. So, pigment printing does not depend on the type of fiber or on the raw material composition of the textile substrate being printed [15, 16].

In classic, analogue printing, larger particles of pigments are used, which ensure exceptional colour brilliances, but also require larger amounts of binders, cross-linkers and fixatives, which in the fixing phase create a three-dimensional polymer network structure into which the pigment is embedded. This is precisely the reason for the weaker durability of pigment printing compared to dye printing. However, in digital printing, due to the design requirements of the print heads, pigment dispersions require a much greater fineness of



pigment particles and their size varies from ~50 nm to ~400 nm are required to be dispersed in ink with colloidal stability for proper jetting property and shelf life. Typically, the conventional pigment ink for digital printing contains pigments at concentrations that do not actualize enough optical density for textile printing. The greater the loading of pigments in ink, the higher the optical density becomes. A higher load of pigments in the solution can, however, create aggregation, which can cause a loss of the jetting property, optical density, and shelf life. Furthermore, pigment printing requires dispersion polymer, which acts as a binding agent that polymerizes to form a film to encapsulate the pigments on the substrates. Since textile printing requires robust fastness, particularly wash-fastness and light-fastness, more than other applications, digital textile pigment ink needs a high level of ink formulation with pigments and polymer dispersion. Pigment ink formulation for digital textile printing, particularly containing pigments and polymer dispersion as binding agents, is a complex task, and the industry still needs more research and development in order to achieve breakthrough innovation. At first, the solution was to implement an alternative process, in which, instead of digitally printing with pigment inks formulated together with pigments and binding agents, the printing process is divided into two separate steps of: digitally printing with inks that only contain pigments (with other agents for jetting functionality) and applications of binding agents before or after printing (by padding, spraying, or manual applications). In this method, less demanding ink formulation is needed to achieve slightly better color reproductions. Although this approach achieves optimal results in color brilliance and print quality, there are still limitations in the context of energy and environmental efficiency. Energy consumption for the two-phase process, as well as certain water consumption in the binder application phase through the pretreatment or posttreatment process, as well as maintenance and cleaning of processing devices [17, 18].

The breakthrough innovations are coming through the latest generations of digital printing machines. In attempt to dramatically reduce the water usage, the system is constructed in a way that pigment ink, pre-treatment liquid and finishing agent are all constantly discharged in the same sequence from the inkjet head, which eliminates the pre and post-processes required in conventional dye printing [19].

#### 4. Research example

In a context of constant research of improvement of textile treatment techniques as well as of printing systems, in a more economical and ecological way, recently, an research has been conducted in which the ecologically acceptable process of low-pressure plasma pre-treatment of textiles and the application of digital printing with pigments are combined in a synergistic action.

Aspect of plasma-based surface treatment depends largely on the different effects which could be imparted to the fabric when using different gases to produce the plasma. Oxygen is a chemically reactive gas, which functionalizes the surface, while argon only physically interacts with the surface of tested substrate (etching effect). So, the treatment would only modify the outermost thin layer from nanometer up to micrometer of fabric surface while the

fabric bulk properties could be kept unchanged. As a result, the plasma technique has gained more popularity as a preprocessing solution for polymer and textile materials over the past decade. At present, researches using plasma to modify the surface of textile materials have been focusing on textile preprocessing, improving dyeing property and textile functional finishing while the plasma process to enhance the quality of direct printing on fabric surface purpose has received much less attention [20].

In research performed the idea was to achieve the optimal print quality, which implies satisfactory color reproduction with optimal coverage of the textile surface with pigment, and by applying an environmentally friendly method, which could lead to reduce of the consumption of chemicals such as binder and fixative. Pretreatment was performed on cellulosic (from raw and lyocell fibres) knitwear for clothes, performed using low-pressure plasma type Nano LF-40 kHz. Oxygen / argon plasma treatment had a positive effect on improving the coverage of the fibers with pigment, contributing to the overall coverage of the sample by digital fingerprint. Such a reaction is especially visible in a sample treated with argon. Pigment printing wraps almost every fiber while retaining the visible morphological structure of the fibre and a significant amount of pigment per fiber surface. The reason lies in the physical changes (corrosion and ablation) that occur at the level of morphology as a consequence of plasma pretreatment, which will certainly affect the better hydrophilicity and wetting of such cotton fiber knittwear. Oxygen plasma also contributes to better coverage of the pigment print around a single fiber but a certain amount of binder is observed, compared to argon plasma pretreatment where the amount of acrylic binder present is less visible. Influence on colour strength coefficient (K/S) increase correspond to the characteristics of the physical distribution of polymer layer on the surface of the plasma pre-treated fibres, as well as to the distribution of pigment within the polymer layer, shown on SEM micrographs. Due to changes in hydrophilicity and morphological surface structure influenced by plasma pre-treatment, it is enabled for printing ink to penetrate deeper into the fibre/knitted fabric structure and to yield a larger amount of pigment in more uniform distribution. Also, after the plasma pre-treatment, the surface of fibre is activated and new functional groups are formed which can significantly influence the absorption of the pigment molecules. As for the wash fastness properties, it can be noticed that after pre-treatment with oxygen plasma, the depth of staining and the stability of the digital print are significantly better in relation to the untreated sample, but also the sample pre-treated with argon plasma. Comparing the samples before and after washing (untreated and pre-treated with oxygen and argon plasma), we obtained that all samples after washing retain stability of colour depth and wash fastness [21].

## 5. Conclusion

Saving water, but also other resources and energy in production processes has been an absolute imperative for many years, and all investments in scientific and research work are directed towards innovative solutions for cleaner, greener, sustainable processes. This is exactly what is clearly visible in the field of textile printing. The premise of the superiority of

digital printing with dyes, primarily reactive dyes, has been abandoned in the last five years and efforts are turning towards the optimization and establishment of systems based on pigments. Undoubtedly, in the field of pigment digital printing, many questions are still open and significant adjustments are needed both in the process itself and in the construction of the print heads and the composition of the printing ink. However, the possibility of using printing in a shorter, more economically justified and sustainable set up is certainly a direction of development in the future.

## 6. Literature

- [1] <https://news.un.org/en/story/2019/03/1035161> [Accessed 18 June 2023]
- [2] Chen, Lizhu; Ding, Xuemei; Wu, Xiongying. Water Management Tool of Industrial Products: A case study of screen printing fabric and digital printing fabric. *Ecological Indicators*, 58 (2015), 86–94. (ISSN 1470-160X)
- [3] Moltchanova, Julia. Digital textile printing. [Online] Available from: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33821/DTP\\_JMoltchanova.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33821/DTP_JMoltchanova.pdf?sequence=1) [Accessed 7 July 2023].
- [4] Tkalec, Marijana; Glogar, Martinia; Sutlović, Ana. Ecological Sustainability of Digital Textile Printing. *Book of Proceedings of 81<sup>st</sup> International Scientific Conference on Economic and Social Development – Green Economy & Sustainable Development / Baracska, Zoltan; Katanec Bujan, Ivan; Hublin, Tomislav (Eds.).* (ISSN 1849-7535). Čakovec, 6<sup>th</sup> to 7<sup>th</sup> May, 2022.
- [5] Daplyn, S. Cleaning up the Textile Industry. [Online] Available from: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://www.sensientinkjet.com/wp-content/uploads/2019/05/Cleaning\\_up\\_the\\_textile\\_industry.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://www.sensientinkjet.com/wp-content/uploads/2019/05/Cleaning_up_the_textile_industry.pdf) [Accessed 23 July 2023]
- [6] Ujiie, Hitoshi. Digital Printing of Textile. Woodhead Publishing Limited & Textile Institute: Cambridge, UK, 2006., ISBN 1855739518
- [7] Malik, SK; Kadian, Savita; Kumar, Sushil. Advances in InkJet Printing Technology of Textiles // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 30(2005), 1; 99-113. (ISSN 0975-1025)
- [8] McKeegan, Debbie. Sustainability is the paradigm of digital textile printing [Online] Available from: <https://www.fespa.com/en/news-media/features/sustainability-is-the-paradigm-of-digital-textile-printing> [Accessed 21 June 2023]
- [9] McKeegan, Debbie. The Environmental Benefits of Waterless Digital Print Ink Systems [Online] Available from: <https://www.fespa.com/en/news-media/features/the-environmental-benefits-of-waterless-digital-textile-print-ink-systems> [Accessed 21 June 2023]
- [10] <https://industry.ricoh.com/en/industrialinkjet/th/5241>
- [11] <https://uk.kyocera.com/news/2020/01/28114329.html>
- [12] <https://www.xaar.com/en/>
- [13] Farhana, kaniz; Kadirgama, Kumaran. Energy Consumption Impact and Implementation of Renewable Energy Resources in Global Textile Industries: an Overview Towards

- Circularity and Sustainability // *Materials Circular Economy*, 4(2022), 1; doi: 10.1007/s42824-022-00059-1
- [14] Hasanbeigi, Ali; Price, Lynn. A Technical Review of Emerging Technologies for Energy and Water Efficiency and Pollution Reduction in the Textile Industry. [Online] *Available from*: <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- [15] Dawson, L Thomas, Glover, Brian. Textile Ink Jet Printing, A review of ink jet printing of textiles, including ITMA 2003, Society of Dyers and Colourists, Bradford UK, 2004. (ISBN 0 901956 83 X)
- [16] Ding, Yi.; Zhendong, Wu; Chuanxiong, Zhang; Ruobai, Xiao; Wenliang, Xue. A Study of the Application of Pigment Printing on Cotton Fabrics // *Textile Research Journal*. 91(2021); 2283–2293. (ISSN 00405175)
- [17] Ding, Yi; Shamey, Renzo; Chapman Parilla, Lisa; Freeman, S. Harold. Pretreatment Effects on Pigment-based Textile Inkjet Printing—Colour gamut and Crockfastness Properties // *Colouration Technology*, 135(2019); 77–86. (ISSN 1478-4408)
- [18] Glogar, Martinia; Dekanić, Tihana; Tarbuk, Anita; Čorak, Ivana; Labazan, Petra. Influence of Cotton Cationization on Pigment Layer Characteristics in Digital Printing // *Molecules*, 27(2022); <https://doi.org/10.3390/molecules27041418> (ISSN 1420-3049)
- [19] Hitoshi Ujiie. Digital Textile Printing: Status Report 2021, Thomas Jefferson University; Philadelphia, PA/USA [Online] *Available from*: <https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2021.37.47>
- [20] Ledwani, Lalita. Non-thermal plasma: a promising green technology to improve environmental performance of textile Industries // In: Islam S, Butola BS (eds.) *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology The Textile Institute Book Series*, Woodhead Publishing, 2019, p. 199-249. (ISBN: 978-0-08-102492-8)
- [21] Ercegović Ražić, Sanja; Glogar Ira Martinia; Drakula, Nikolina. Plasma and digital ink jet - green technologies for improvement durability and sustainability of functionalized cotton knitwear // *Proceedings of the 6th International Conference on Natural Fibers - Nature Inspired Sustainable Solutions / Fanqueiro, Raul (Ed.)*. (ISBN 978-989-54808-8-3) Funchal, Portugal, 19.06-21.06.2023, 234-235.



# **Rok i troškovi mehaniziranih radova za izvedbu i održavanje hidrotehničkih građevina**

## ***Term and costs of mechanized works for the construction and maintenance of hydrotechnical structures***

**D. Vidaković<sup>1,\*</sup>, V. Moser<sup>1</sup>, K. Ćosić<sup>2</sup>, E. Desnica<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup>Madeco d.o.o., Osijek, Hrvatska

<sup>3</sup>Tehnički fakultet Mihajlo Pupin, Zrenjanin, Srbija

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dvidak@gfos.hr](mailto:dvidak@gfos.hr)

### **Sažetak**

Na izvedbi i održavanju hidrotehničkih građevina mehanizirani radovi često su vremenski i troškovno značajne aktivnosti. Ključni parametar za njihovo planiranje je satni učinak strojeva koji će se koristiti. Na različitim projektima, u različitim uvjetima rada na gradilištima isti strojevi imaju velika odstupanja u učinku i znatnu razliku u troškovima rada. U članku je pokazana metoda određivanja planskog učinka uobičajenih građevinskih strojeva s odgovarajućim koeficijentima ispravke. Također, objašnjeni su elementi troška rada strojeva i pokazane su razlike troškova i trajanja strojnog rada u različitim uvjetima.

**Ključne riječi:** strojevi, utjecaji na produktivnost, koeficijenti ispravke, učinak, troškovi

### **Abstract**

Mechanized works on the construction and maintenance of hydrotechnical structures are often time and cost significant activities. The key parameter for their planning is the hourly output of the machines to be used. On different projects, in different working conditions and on construction sites, the same machines have large deviations in productivity (output) and a significant difference in cost of work. The article shows a method of determining the planned productivity of common construction machines with appropriate correction coefficients. Also, the elements of the cost of machine operation are explained and the differences in the cost and duration of machine operation in different conditions are shown.

**Key words:** machinery, impacts on productivity, correction coefficients, output, costs

### **1. Uvod - primjena mehanizacije u vodogradnji**

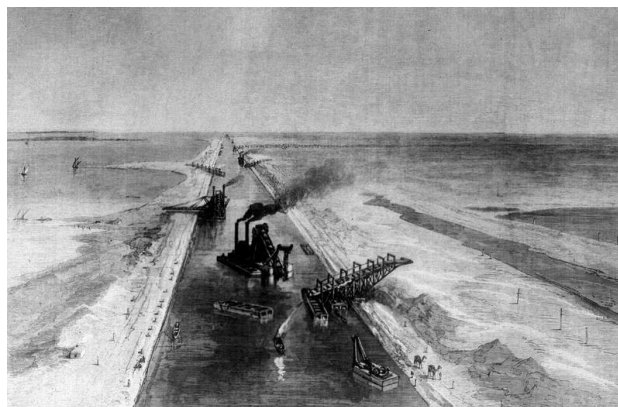
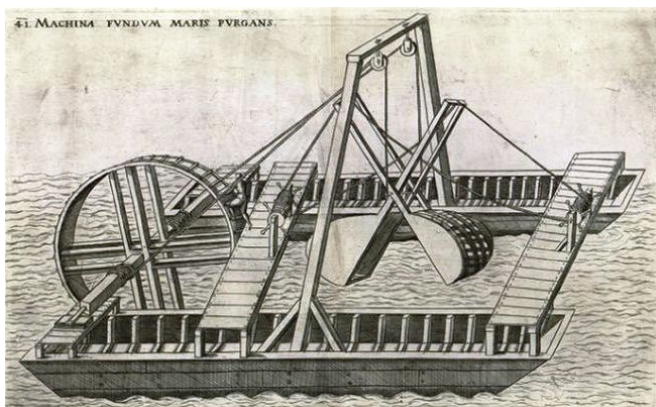
Građevinski i drugi radovi kojima se izvode hidrotehničke građevine, nazivane i vodogradnja (brane, akumulacijska jezera, luke, kanali, cjevovodi i dr.), odnosno zahvati koji omogućuju gospodarenje vodama, regulaciju vodotoka, melioraciju, vodoopskrbu, odvodnju itd.,





pretežito se izvode strojno. *Katalog – Opis radova u vodnom gospodarstvu (2022)* čak za blizu 90% opisanih radova čišćenja terena i ostalih pripremnih radova, zemljanih radova i prijevoza, radova na regulaciji vodotoka, betonskih radova i radova gospodarskog održavanja (redovno održavanje i obnova kanala) predviđa uporabu strojeva [1].

Faust Vrančić je u *Machinae Novae (1595)*, svom djelu o novim tehničkim konstrukcijama, prikazao i opisao preteču plovnog bagera sa zahvatnom lopatom (pod nazivom “naprava za čišćenje morskog dna” i s napomenom da je upotrebljiva i na rijekama, ali da se tamo mogu koristiti drugi uređaji jer nisu tako duboke) te brod s otvorenim dnom, koji s posebnim alatom nalik kliještima grabi blato s morskog dna. Upravo kod izgradnje velikih hidrotehničkih građevina, kao što su Sueski kanal (1859. - 1869.) i Hooverova brana (1931. - 1935.), u primjenu ulaze neke nove vrste strojeva i građevinske opreme (slika 1).



**Slika 1.** Plovni bager na ljudski pogon iz *Machinae Novae* (lijevo) i parni bageri vjedričari na iskopu Sueskog kanala [2] (desno)

Radovi održavanja hidrotehničkih građevina isto se uvelike obavljaju strojno. Npr. *Pravilnik o tehničkim, gospodarskim i drugim uvjetima za uređenje sustava melioracijske odvodnje, te osnovama za tehničko i gospodarsko održavanje sustava (1998)* nalaže da se iskop zemlje (izmuljivanje) u dnu i donjem dijelu pokosa korita vodotoka (kanala) s privremenim odlaganjem zemlje uz rub korita obavlja s bagerima gusjeničarima s povlačnom košarom i bagerima s krutim ili teleskopskim kranom i prikladno konstruiranom dubinskom košarom, razastiranje i poravnavanje prethodno odložene zemlje s buldozerima odgovarajuće snage, vađenje i uklanjanje panjeva s odvozom na deponiju ili zakapanjem na odgovarajuću dubinu sa strojevima odgovarajuće snage, a da se za sabirne ili grupne kanale uz uobičajene strojeve za iskop koriste i specijalni bageri kanaločistači i strojevi za neprekinuti iskop i razastiranje zemlje [3]. Osim toga, u vodogradnji se primjenjuju i utovarivači, skrejperi, grejderi i valjci za zemljane radove, kiperi i druga transportna vozila, više vrsta dizalica te mehanizacija za betonske radove, a i različiti specijalizirani strojevi. Detaljniji popis strojeva za ove radove sadrži *Standardna kalkulacija radova u vodnom gospodarstvu (2022)*.

U dokumentaciji za nadmetanje, kao uvjet sposobnosti izvođača – ponuđača za ovakve radove, uobičajeno se definira posjedovanje ili imanje u zakupu određene mehanizirane opreme. Primjenu različite mehanizacije na hidrotehničkim građevinama pokazuje slika 2.



**Slika 2.** Rad strojeva na izvedbi i održavanju hidrotehničkih građevina [4] [5]

Strojovima izvođeni radovi danas su često na kritičnom putu realizacije i imaju veliki udio u troškovima hidrotehničkih projekata, kao i kod izgradnje plinskih i drugih podzemnih instalacija. Prekoračenja rokova i troškova realizacije puno se više događa nego kada je sve u okviru prvobitno planiranih parametara. Kašnjenje, ali i ranije završavanje pojedinih radova utječe na druge, s njima povezane aktivnosti, mijenja dinamiku ugradbe materijala i korištenja strojeva i radnika. Tako može uzrokovati nedovoljnu ili pogrešnu dodjelu resursa i s tim dodatno produbiti probleme izvedbe. Promjene jednom planiranih / ugovoreni parametara mogu biti problematične jer treba utvrditi odgovornost i opravdati ih, a u nekim slučajevima snositi ugovorom i zakonskim propisima predviđene sankcije.

## 2. Utjecaji na produktivnost i planiranje učinka i trajanja strojnih radova

### 2.1. Utjecaji na produktivnost strojeva

Vjerodostojnost planiranog roka i troškova pojedinih radova i cijelog plana ovisi o realnosti unešenih podataka na razini radnih procesa i operacija, odnosno aktivnosti i troškovničkih stavaka. Zato bi izvođač u projektu organizacije građenja sve troškovno i vremenski značajne aktivnosti (na kritičnom putu) trebao dobro analizirati s obzirom na uvjete rada, predviđene resurse za izvedbu, rok i troškove. Ključni parametar za određivanje trajanja i troškova mehaniziranih radova je satni učinak raspoloživih, planiranih strojeva. Učinak strojeva ovisi o njihovim tehničkim karakteristikama, ali uvelike i o uvjetima i organizaciji radova i drugim utjecajima. To je detaljnije pokazano na slici 3.





**Slika 3.** Čimbenici učinka strojeva na radilištu (prema [6])

Najvažniji utjecaji prema rezultatima sedam istraživanja (anketiranjem i intervjuiranjem stručnih osoba) u inozemstvu 2016. - 2020. godine su [6]:

- nedostatak sposobnosti / iskustva rukovatelja strojevima,
- slabo planiranje rada,
- nedostatak / nepravovremenost nadzora radova,
- problemi s održavanjem / kvarovima i njihovim otklanjanjem,
- uvjeti na gradilištu (vremenski utjecaji, sastav tla i dr.),
- nedostatak koordinacije,
- popravljane prije izvedenih radova (iz različitih razloga),
- neraspoloživost potrebne opreme,
- problemi s opskrbom materijalima i gorivom (uslijed promjena cijena i drugog).

Vidi se kako dio ovih utjecaja nije pod kontrolom izvođača radova (vanjski čimbenici), ali treba ih uzeti u obzir kao rizik i predvidjeti odgovarajuću rezervu za amortizaciju njihovog djelovanja. Negativno djelovanje većine utjecaja izvođači mogu izbjeći ili umanjiti kroz bolje upravljanje (planiranje, organizaciju i dr.), te tako smanjiti trajanje i troškove radova.

## 2.2. Određivanje satnog učinka strojeva na planiranim radovima

Javni normativi, priručnici i drugi izvori pružaju podatke o satnim učincima i cijenama sata rada samo dijela strojeva koji se danas koriste. Te vrijednosti nisu aktualne, vrlo su općenite i često je njihovo dobivanje netransparentno. Prosječni učinak određen iz širokog spektra mogućih veličina može višestruko odstupati od onoga koji je realno ostvariv. Učinak strojeva za planiranje trajanja radova i određivanje troškova može biti iz interne baze podataka ostvarenog učinka (s definiranim uvjetima rada) ili dobiven izračunom. Može se koristiti neka publicirana metoda, prilagođena vlastitim uvjetima i konkretnom slučaju, a najbolja je primjena više načina, poglavito za najznačajnije aktivnosti.

Teorijski ili tehnički učinak ( $U_t$ ) temelji se na osnovnim tehničkim karakteristikama stroja, te ima veličinu koja uglavnom odgovara idealnim uvjetima rada. Za neke strojeve ta veličina je dostupna od proizvođača, ali uvijek se može i izračunati. Teorijski učinak proporcionalan je



veličini radnog alata ( $q$ ) (zapremnini lopate, sanduka, bubnja i dr.), tj. količini rada koju izvodi u jednom ciklusu, i broju ciklusa ( $n_c$ ) koje obavi u vremenskoj jedinici (sat) kod strojeva s cikličnim radom, a kod onih koji rade kontinuirano prosječnoj radnoj brzini (kretanja) stroja ( $v$ ). Strojovima koji rad izvode kontinuiranim kretanjem učinak je proporcionalan površini koju pokrivaju u jednom prolazu ( $l$ ), što odgovara širini radnog alata, a obrnuto proporcionalan potrebnom broju prolaza da se obavi posao ( $n_p$ ). U tablici 1 su formule za izračun  $U_t$  strojeva koji se često koriste za radove na hidrotehničkim građevinama.

**Tablica 1.** Izračun teorijskog učinka

Strojevi	Teorijski učinak	Trajanje ciklusa
Bageri i utovarivači s cikličnim radom	$q \times n_c / \text{sat}$	Prema veličini lopate i vrsti zemlje
Dozeri, skrejperi, transp. vozila, dizalice	$q \times n_c / \text{sat}$	Zbrajanjem trajanja elemenata ciklusa (utovar, guranje ili prijevoz / prijenos, istovar, povrat na početak ciklusa, manevriranje i sl.)
Valjci i grejderi	$v \times l / n_p$	- (kontinuirani rad)

Planski učinak ( $U_p$ ) uzima u obzir stvarne, zapravo planirane uvjete rada (organizacijske, terenske i dr.) i zato je uvijek manji od teorijskog. Izračunava se množenjem teorijskog učinka s nizom odgovarajućih koeficijenata ispravke ( $k_i$ ):  $U_p = U_t \times k_i$  ( $k_i = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_n$ ). Koeficijenti koji se najčešće primjenjuju za učinak strojeva za zemljane i betonske radove i Transporte dani su u tablici 2, a satni učinak strojeva još bi dodatno trebalo umanjiti kada se planiraju dugotrajniji radovi (za cjelodnevni rad satni učinak umanjiti 15 %, za cijeli tjedan 15 % umanjiti u odnosu na dnevni, a za mjesec dana još 10 % u odnosu na tjedni).

**Tablica 2.** Veličina i primjena koeficijenata ispravke učinka strojeva (prema [7])

Koeficijent	Za strojeve	Raspon vrijednosti	Prosječna veličina
- iskorištenja radnog vremena	svi	od 0,75 (slabo) do 0,92 (odlično)	0,84 (dobro korištenje vremena)
- organizacija rada strojeva na gradilištu	svi na gradilištu	za zemljane radove od 0,50 (nezadovoljav.) do 0,83 (dobro)	od 0,70 do 0,80 (prosječni uvjeti rada)
- dotrajlosti (stanja) stroja	svi osim vozila u javn. prometu i dizalice	od 0,80 (dotrajali) do 1,00 (novi, tj. do 2000 sati rada)	0,91 (očuvani stroj 2000 - 4000 sati rad.)
- radnog prostora	koji manevriraju pri radu	0,95 (skućeni prostor) ili 1,00 (širok, pregledan prostor)	-
- vlažnosti materijala	koji rade s vlažnom zemljom	od 0,30 (mokra ljepljiva troš. stijena i glina) do 0,95 (čisti kam.)	od 0,67 do 0,91 (za mokru zemlju)
- kuta okretanja i visina radnog čela	bageri	od 0,59 - 0,71 (za okret od 180°) do 0,93 - 1,26 (za 45°)	od 0,80 do 1,00 (kod okreta za 90°)
- utovara (u transportno vozilo)	bageri i utovarivači	od 0,83 (nepogod. vozilo) do 1,00 (odlaganje uz stroj)	0,91 (utovar u pogod. transport. vozilo)
- punjenja (radnog alata)	s lopatom, korpom, bubnjem, sandukom, nožem (uzima u obzir gubitak materijala 0,5 % / m guranja)	od 0,40 (za bagere i dozere na tvrdom iskopu) - 0,65 (skrejperi) do >1,00 (laki iskop), a sanduk vozila na javnim cestama maks. 1,00 i na gradilištu maks. 1,20	od 0,80 do 0,90 (srednje težak iskop)
- nagiba terena	dozeri, skrejperi	ovisi o terenu	1,00 za ravni teren

Veličine koeficijenta ispravke, ako se računa s njihovim najmanjim i najvećim mogućim vrijednostima (mogu biti veće od onog što se smatra dobrim i manje od slabog, tj. nezadovoljavajućeg), uz utjecaj trajanja radova na učinak, ukazuju da ostvarivi učinak nekih konstruktivno istih strojeva može varirati čak i stostruko [8].

Izračunati učinak bagera s lopatom zapremnine 1 m<sup>3</sup> za iskop zemlje i utovar u vozila napravljen na pokazani način i po sličnim ili istim metodologijama drugih autora i priručnika proizvođača strojeva, gdje su razlike jedino u nekim pretpostavkama vrijednosti pojedinih parametara, pokazuje odstupanja rezultata od 11 % manje (*Handbuch BML*) do 53 % više (proizvođač strojeva *Liebherr*) [7].

Planirani učinak trebao bi biti što bliži ostvarenom, ali u praksi često nije. Kako bi znali koliko je odstupanje, treba na odgovarajući način mjeriti ostvareni učinak uz bilježenje uvjeta rada. Tako se može pravovremeno uočiti negativno odstupanje od planiranog i utvrditi uzroke toga, pa poduzeti primjerene korektivne mjere. Također, s tim se stvaraju i ažuriraju interne baze podataka, koje su korisne za unaprijeđenje planiranja, i na tekućem i na budućim projektima. U skladu s njima, po potrebi se mijenjaju koeficijenti ispravke i drugi ulazni podaci za izračun učinka.

### 2.3. Određivanje trajanja strojnih radova

Ako ugovorom nije određen rok u kojem izvođač mora izgraditi građevinu ili izvesti druge radove prema *Zakonu o obveznim odnosima* (2005) dužan je to obaviti za vrijeme koje je razumno potrebno za takve poslove [9]. Određivanje trajanja aktivnosti može biti probabilistički (stohastički) ili deterministički. Probabilistički se određuje očekivano trajanje na temelju pretpostavke optimističnog (a), pesimističnog (b) i normalnog trajanja (n) [10]:

$$\text{Očekivano trajanje aktivnosti} = \frac{a+4xn+b}{6}$$

Deterministički se trajanje određuje na temelju normativa vremena ili učinka (obrnuto proporcionalan normativ satima) planiranih strojeva:

$$\text{Trajanje aktivnosti} = \frac{\text{Količina rada}}{\text{Ukupni učinak svih planiranih strojeva}}$$

Za zahtjevano trajanje aktivnosti može se odrediti koliki je potrebni učinak i prema tome izabrati strojeve. Zbog veće sigurnosti da će posao biti obavljen u planiranom roku, zahtjevani učinak se uvećava za rezervu određenu ovisno o uvjetima rada (kod povoljnih uvjeta 10 %, u prosječnim uvjetima 15 %, a kada su predviđeni nepovoljni uvjeti 25 %).

Iz tablice 2 vidi se kako učinak istog stroja može biti višestruko različit u različitim uvjetima rada, pogotovo kod zemljanih radova kod kojih se teorijski učinak korigira s najvećim brojem koeficijenta. Sljedeći primjer pokazuje kako se to održava na trajanje radova ako je razlika učinka samo 2,5 puta, tj. varira od 30 do 75 m<sup>3</sup> / sat. U slučaju iskopa i guranja 15.000 m<sup>3</sup> zemljanog materijala s minimalnim i maksimalnim učinkom trajanje rada je:

$$15.000 \text{ m}^3 : 30 \text{ m}^3 / \text{sat} = 500 \text{ sati} \quad \text{ili} \quad 15.000 \text{ m}^3 : 75 \text{ m}^3 / \text{sat} = 200 \text{ sati}$$

Prema tome, razlika je 300 radnih sati, a to je npr. 30 radnih dana sa smjenama od 10 sati / dan ili 1,5 mjesec rada s 25 radnih dana mjesečno i s 8 sati / dan.





### 3. Troškovi sata rada strojeva i moguće razlike

Osim što troškove i cijenu radova treba odrediti za davanje ponude na natječaj za izbor izvođača, treba ih odrediti i za nepredviđene i naknadne radove tijekom izvedbe te u slučaju zahtjeva za promjenu ugovorene cijene. Tada se jedinični trošak rada stroja množi s količinom rada troškovničke stavke za koju je stroj potreban.

Kod izračuna jediničnih troškova rada stroja opet je potrebno poznavanje satnog učinka angažiranih strojeva:

$$\text{Jedinični troškovi rada (€ / 1 mjer. jedin.)} = \frac{\text{Koštanje sata rada stroja (eura/sat)}}{\text{Satni učinak stroja (mjer.jedin./sat)}}$$

Za prethodno izneseni primjer, ako je neposredni trošak rada stroja 150 € / sat, jedinični trošak može biti 2 € / m<sup>3</sup> u slučaju kada je učinak maksimalan (150 / 75), ali i 5 € / m<sup>3</sup> kada je učinak istog stroja minimalan (150 / 30). (Zanemareni su nešto veći uporabni troškovi, kao npr. za habajuće dijelove, do kojih bi došlo kada stroj radi s većim učinkom, odnosno intenzivnije.) Tada je razlika troška iskopa i guranja 15.000 m<sup>3</sup> zemlje zbog razlike u učinku: 300 sati x 150 € / sat = 3 € / m<sup>3</sup> x 15.000 m<sup>3</sup> = 45.000 € (150 % više s najmanjim u odnosu na neposredni trošak rada s najvećim učinkom).

Za određivanje neposrednog troška rada stroja treba definirati ekonomski (amortizacijski) vijek stroja i prosječni broj sati rada godišnje te obračunati tri grupe troškova navedene u tablici 3.

**Tablica 3.** Osnovni troškovi koji se obračunavaju za koštanje sata rada strojeva

Jednokratni troškovi (Tr <sub>jedn</sub> )	Troškovi stroja kao osnov. sredstva rada (Tr <sub>osnov</sub> )	Uporabni troškovi (Tr <sub>uporab</sub> )
Jednom tijekom korištenja na određenom projektu: - troškovi transporta na gradilište i s gradilišta, montaže i demontaže, probe, uključanja u rad i sl., prema potrebi (Za izračun ukupnog koštanja sata rada zbrojeni svi jednokratni troškovi dijele se s vremenom koje stroj treba raditi na projektu.)	Ne ovise o tome koliko će stroj na projektu biti u upotrebi: - troškovi vlasništva: vremenska amortizacija, kamate, osiguranje, registracija; - investicijsko održavanje (generalni zahvati, godišnji)	Proporcionalni su s vremenom aktivnog rada stroja i uvjetima u kojima djeluje (npr. vrsta zemlje): - troškovi tekućeg održavanja i servisiranja (svakodnevnne intervencije, kao što su manji popravci, podmazivanje i čišćenje); - troškovi habajućih dijelova (gume, sjekčiva, užad, obloge itd.); - troškovi pogonske energije / goriva i maziva te pomoćnih materijala; - bruto plaća (satnica) rukovatelja stroja i svih radnika koji opslužuju stroj

Koliko izvođača košta sat rad njegovog stroja na određenom projektu, što se u analizi cijene kalkulira kao neposredni trošak, formulom se može izraziti kao:

$$\text{Trošak sata rada} = \frac{Tr_{jedn} [eura]}{\text{Vrijeme rada na gradil. [sati]}} + \sum Tr_{osn} [eura/sat] + \sum Tr_{uporab} [eura/sat]$$

Trošak pogonske energije najčešće ima najveći udio u ukupnom trošku rada, a kod strojeva s motorom s unutarnjim izgaranjem to je umnožak cijena litre goriva i satne potrošnja goriva. Satna potrošnja goriva može se planirati prema izrazu [11]:

$$\text{Potrošnja goriva [l / sat]} = \frac{\text{Snaga motora [kW]} \times \text{Specifič. potroš. goriva [kg/kW /sat]} \times \text{Efektiv. rad motora}}{\text{Specifična masa goriva [kg/l]}}$$



Jednostavno je i svakako bi za svaki stroj trebalo provjeriti u praksi kolika su odstupanja od ovakve procjene potrošnje. U tablici 4. su udjeli pojedinih grupa troškova za bagere s različitom snagom motora, koja utječe i na nabavnu vrijednost i na potrošnju goriva.

**Tablica 4.** Izračunati udjeli grupa troškova u koštanju sata rada tri tipa bagera [12]

Osnovni troškovi	< 75 kW	75 - 120 kW	> 120 kW
Obveze vlasnika	29 %	31 %	31 %
Održavanje	9 %	10 %	10 %
Pogon (gorivo)	30 %	36 %	42 %
Rad (strojar)	32 %	23 %	17 %

Troškovi obveza vlasnika i održavanja ne ovise direktno o snazi stroja, dok se troškovi goriva povećavaju kako raste snaga motora stroja. Troškovi rada strojara ne mijenjaju se sa snagom motora, ali s povećanjem potrošnje goriva opada njihov udio u ukupnom trošku. Analiza Bezaka i Linarića (2009) nalazi kako razlika u iskorištenosti strojeva, odnosno njihovom godišnjem fondu sati rada, koji je u prosjeku u vodoprivredi nešto manji nego kod istovrsnih strojeva na drugim građevinskim projektima, dovodi do toga da je satni trošak bagera u vodoprivredi veći 2 % (s motorom < 75 kW) do 10 % (s motorom > 120 kW) [12]. Za bager gusjeničar *Komatsu PC220* (114 kW, 22 t) *Standardna kalkluacija radova u visokogradnji* (2021) daje prosječnu cijenu sata rada u Hrvatskoj 105,45 € (794,52 kn) [13], a *Standardna kalkluacija radova u vodnom gospodarstvu* (2022) predviđa 72,28 € (544,57 kn) [14]. Za taj bager može se izračunati satna potrošnja goriva:  $114 \times 0,2 \times 0,75 / 0,84 = 20,4 \text{ l / sat}$ .

U tablici 5. izračunati su satni troškovi rada tog stroja (bez pokrivača posrednih troškova i dobiti koje cijena uobičajeno obuhvaća) za dva slučaja jednokratnih troškova, ako mu je:

- nabavna cijena (kupnja i sva potrebna davanja do upotrebe) 120.000 €,
- stopa amortizacije 10 % i ekonomski vijek 10 godina,
- prosječno 1.450 sati rada godišnje,
- kupnja bez kredita,
- godišnji trošak osiguranja 3 % srednje vrijednosti (66.000 €),
- godišnji trošak investicijskog održavanja 3,5 % od nabavne cijene,
- trošak tekućeg održavanja 35 % od nabavne cijene za cijeli vijek uporabe.

**Tablica 5.** Satni troškovi bagera *Komatsu PC220* na dva različita gradilišta

Jednokratni troškovi (ovise i o učinku stroja)	za transport bagera 2 x 30 km i 540 sati rada na gradilištu = 0,5 € / sat	za transport bagera 2 x 550 km i 90 sati rada na gradilištu = 26,7 € / sat
Vremenska amortizacija	$120.000 / 10 \times 1450 = 8,28 \text{ € / sat}$	8,28 € / sat
Osiguranje	$0,03 \times 66.000 / 1450 = 1,37 \text{ € / sat}$	1,37 € / sat
Investicijsko održavanje	$0,035 \times 120.000 / 1450 = 2,90 \text{ € / sat}$	2,90 € / sat
Tekuće održavanje i habajući dijelovi (+15 %)	$(0,35 \times 120.000 / 10 \times 1450) \times 1,15 = 3,33 \text{ € / sat}$	3,33 € / sat
Gorivo	$20,4 \text{ l / sat} \times 1,3 \text{ € / l} = 26,52 \text{ € / sat}$	26,52 € / sat
Mazivo (10 % od goriva)	$0,01 \times 26,52 = 2,65 \text{ € / sat}$	2,65 € / sat
Plaća strojara (bruto)	6,40 € / sat	6,40 € / sat
Ukupno	51,95 € / sat	(50,4 % više) 78,15 € / sat

Neke od navedenih elemenata troška rada stroja može se obračunati u cijeni radova i izdvojeno iz ovako određenog koštanja sata rada. Primjerice, trošak plaće radnika koji rade sa strojem može se umjesto u koštanje sata rada stroja ukalkulirati u trošak izvođača kao direktni trošak rada radnika, a trošak prijevoza i nekih pripremno-završnih radova potrebnih za rad strojeva ( $T_{jedn}$ ) može se obračunati u posredne troškove izvođača. Sav trošak rada nekih strojeva koji sudjeluju u izvođenju više različitih vrsta radova (npr. toranjske dizalice), pa ih je nezgodno obračunati posebno za svaki od njih, u pravilu se uvrštava u posredne troškove i onda raspodjeljuje na sve troškovničke stavke. Naravno, treba paziti da se ništa ne izostavi u analizi cijena, ali ni da se ne obračuna više puta isto.

Posredni troškovi izvođača dijelom su na razini cijele tvrtke (uprava, zajedničke službe i dr.), a dijelom na razini svakog pojedinog projekta (troškovi pripremnih i završnih radova koji nisu obuhvaćeni troškovničkim stavkama, te režijski troškovi gradilišta). Režijski troškovi gradilišta rastu s trajanjem realizacije, a ona opet ovisi o učinku korištenih strojeva. U jediničnoj analizi cijene posredni troškovi mogu se obračunati s faktorom za pokriće koji se množi samo s jediničnim troškom rada radnika predmetne stavke ("tradicijski") ili množenjem druge vrste faktora (manje veličine) sa svim neposrednim troškovima, tj. troškovima radnika, strojeva i materijala po jednoj mjernoj jedinici rada. Za projekte na kojima prevladava strojno izvođenje radova preporučljiv je obračun posrednih troškova pomoću faktora koji se množi s neposrednim troškovima svake stavke troškovnika. Ipak, *Standardna kalkulacija radova u vodogradnji* (2004) definirala je veličinu "tradicijskog" faktora za pokriće posrednih troškova za pojedine vrste poslova (npr. 2,6 za preventivnu obranu od poplava, 3,3 za izgradnju novih vodnih građevina, 3,5 za tehničko održavanje vodnih građevina i vodnog dobra, obnavljanje i dogradnju vodnih građevina) [15] i s tim faktorom trebala bi biti pokrivena i dobit izvođača. Novija izdanja, npr. *Standardna kalkulacija radova u vodnom gospodarstvu* (2022), ne određuju faktor za pokriće posrednih troškova, nego daju bruto satnice radnika koje su već uvećane za posredne troškove, kao što su režijski troškovi gradilišta i cijele tvrtke izvođača, ali i troškove tekućeg i investicijskog održavanja i amortizacije mehanizacije i opreme, koji nisu obračunati u cijeni sata rada [14].

Radovi na hidrotehničkim građevinama predmet su javne nabave i kod takvih projekata ako je izvođač radove izveo u ugovorenom roku i u vremenu između davanja ponude i ispunjenja ugovora bez njegova utjecaja su se povećali troškovi pojedinih elemenata, temeljem kojih je određena cijena radova, u tolikoj mjeri da bi cijena trebala biti veća za više od 10 %, izvođač ima pravo tražiti isplatu razlike u cijeni koja je iznad 10 % [16]. U tom slučaju promjena cijena izvođenja ugovorenih radova mora se jasno dokazati i npr. kada je porasla cijena goriva treba odrediti trošak rada stroja za svaku stavku i udio cijene goriva u tome.

#### 4. Zaključak

Specifičnosti svakog projekta (vrsta, veličina i dinamika radova, lokacija i dr.) i svakog izvođača te razni drugi utjecaji na produktivnost otežavaju planiranje izvedbe. Zato je u praksi nerijetko posezanje za brzim, ali nesigurnim rješenjima, koja uvećavaju rizik promjena planiranih troškova i vremena. Oslanjanje samo na iskustvo pojedinaca i paušalno preuzimanje podataka o prosječnim veličinama učinaka strojeva iz raznih izvora je

nepouzdana, rizično i netransparentno, ali ipak može biti prihvatljivo za manje važne aktivnosti i vrlo dobro poznate radove.

Pouzdanije planiranje troškova (cijene) i vremena pruža odgovarajuća analiza i transparentni izračun trajanja i troškova rada strojeva, što nisu komplicirani postupci i mogu se po potrebi prilagoditi te kombinirati više njih. Dinamički planovi trebaju biti fleksibilni, redovito praćeni u odnosu na realizirano i po potrebi ažurirani. Izrada baze učinaka strojeva iziskuje malo dodatnih napora, a može biti korisna za dokazivanje utjecaja i poboljšanje internih normativa te postupaka izračuna planskog učinka.

## 5. Literatura

- [1] Građevinski fakultet u Zagrebu. Katalog – Opis radova u vodnom gospodarstvu. Zagreb: Hrvatske vode, 2022.
- [2] The National, 2019. <https://www.thenationalnews.com/world/mena/the-suez-canal-a-stormy-150-year-history-in-pictures-1.938704>
- [3] Pravilnik o tehničkim, gospodarskim i drugim uvjetima za uređenje sustava melioracijske odvodnje, te osnovama za tehničko i gospodarsko održavanje sustava // *Narodne novine*, 4(1998). (ISSN 1333-9273)
- [4] Hidrotehnika d.o.o. Galerija slika, <https://www.hidrotehnika.hr/>
- [5] Hidrogradnja d.o.o. Uređenje desne obale rijeke Drave u Osijeku, <https://hidrogradnja.hr/uredenje-desne-obale-rijeke-drave-u-gradu-osijeku/>
- [6] Vidaković, Držislav; Lozančić, Silva; Završki, Petar. Određivanje realnog roka i troškova strojno izvođenih radova na građevinskim projektima // *Prezentacija izlaganja na 17. Danima Hrvatske komore inženjera građevinarstva / Lakušić, Stjepan (ur.). Opatija : HKIG, 15.-17.06.2023.*
- [7] Linarić, Zdravko. Učinak građevinskih strojeva. Građevinski fakultet u Zagrebu, 2005. [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/ucinakgrađevinskihstrojeva.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/ucinakgrađevinskihstrojeva.pdf)
- [8] Vidaković, Držislav; Brana Petar. Planning Machinery Exploitation for the Realization of Construction Projects // *Proceedings of VII OTM Conference / Radujković, Mladen i ostali (ur.). (ISBN 953-96245-7-6). Zadar : HOUG, 20.-22.09.2006. s. 439-446.*
- [9] Zakon o obveznim odnosima // *Narodne novine*, 35(2005). (ISSN 1333-9273)
- [10] Varga, Mirko. Proračun vremena mrežnog plana pomoću računala // *Journal of Information and Organizational Sciences - Zbornik radova*, 9-10(1986), s. 159-170. (ISSN 1846-3312)
- [11] Linarić, Zdravko. Troškovi strojnog rada u građenju. Građevinski fakultet u Zagrebu, 2005. [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/troskovistrojnograda.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/troskovistrojnograda.pdf)
- [12] Bezak, Stjepan; Linarić, Zdravko. Metodološki pristup proračuna troškova strojnog rada pri građenju // *Građevinar*, 61(2009), 1, s. 23-27. (ISSN 1333-9095)
- [13] Standardna kalkulacija radova u visokogradnji. Bilten XII. Zagreb: IGH, 2021.
- [14] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Standardna kalkulacija radova u vodnom gospodarstvu. Bilten III. Zagreb: Hrvatske vode, 2022.
- [15] Standardna kalkulacija radova u vodogradnji. Bilten V, Zagreb: Hrvatske vode, 2004.
- [16] Zakon o javnoj nabavi // *Narodne novine*, 120(2016). (ISSN 1333-9273)



## Greenhouse Gases and Water *Staklenički plinovi i voda*

S. Franjić

Independent Researcher

\*Autor za korespondenciju. E-mail: sinisa.franjic@gmail.com

### Abstract

Greenhouse gases are gases that cause a greenhouse effect in the atmosphere. A common feature of all greenhouse gases is that they make it difficult for long-wave thermal radiation to escape from the planet's atmosphere. Some of them have a negative impact on ozone concentration in the stratosphere. The result of the presence of greenhouse gases is the increased temperature of the atmosphere, which is why this effect is responsible for sustaining life on Earth.

**Keywords:** Greenhouse Gases, Water, Atmosphere, Energy, Environment

### Sažetak

Staklenički plinovi su plinovi koji uzrokuju efekt staklenika u atmosferi. Zajednička značajka svih stakleničkih plinova je da otežavaju izlazak dugovalnog toplinskog zračenja iz atmosfere planeta. Neki od njih negativno utječu na koncentraciju ozona u stratosferi. Posljedica prisutnosti stakleničkih plinova je povišena temperatura atmosfere, zbog čega je upravo taj učinak zaslužan za održanje života na Zemlji.

**Ključne riječi:** staklenički plinovi, voda, atmosfera, energija, okoliš

### 1. Introduction

In latest decades, greenhouse gases (GHG), mainly carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), have multiplied dramatically due in conformity with the boom on industries then factories in view that the opening about the industrial revolution then the extend in petrification fuel consumption, deforestation, and land-use change [1]. Continuation over this style or the expand on greenhouse gases bear extended the average temperature over the Earth, resulting in global warming and adjustments in other climatic variables such namely rainfall. That is in which the close essential component into climate change is the expand over greenhouse gases. By changing climatic variables, mean systems affected by means of it variables, such as water resources, agriculture, environment, and economy, desire also change. However,





that lesson desire center of attention concerning water resources. According in conformity with quite a number reports regarding the World Glacier Monitoring Service (WGMS), class glaciers have been uncovered in conformity with rot because 2005, as is extra than three instances faster than the one within the 1980s. As a result, the average diameter concerning 30 glaciers into the world has been reduced via 60–70 cm. Studies show to that amount thriving water levels, alongside with the make bigger concerning glaciers melting, pleasure promote flooding. Satellite records show that on the grounds that 1978, the average variety concerning polar glaciers has dropped by 2.7% every ten years.

Many research of evaluation regarding the results about climate change indicate to that amount many years within 1995 and 2006 are the warmest years between the global surface temperature record (since 1850). The up to date 100-year temperature linear style (1906–2005) about 0.74 °C through year (0.56 in conformity with 0.92 °C) is higher than the like fashion because of 1901–2000 provided within the TAR (Third Assessment Report about IPCC) over 0.6 °C (0.4 in conformity with 0.8 °C).

The impact of climate change regarding precipitation by way of inspecting the past records indicates that precipitation increased of just areas within the world, specifically among parts on South then North America, Northern Europe, then Central Asia from 1900 in conformity with 2005. Drought intensities additionally elevated into components about South Africa and components on South Asia.

## 2. Water Sector

The water sector provides vital applications in imitation of society so much are essential because of human health, sustaining economies, then protecting the surroundings [2]. These roles choice remain, however at that place are important adjustments underway up to expectation are living because of a new, changed illustration because the way water is viewed and managed. With growing world trade pressures, cities of the future will trip difficulties in efficiently managing scarcer or less reliable water resources. In system in accordance with pair it challenges, so is a need for a essential change among the access we usage or reuse water, based concerning a foundation about research, technology then innovation.

Climate change demands mitigation efforts in imitation of decrease greenhouse gas emissions. We live within a resource-constrained world into which the world population is predicted to grow through some other not many billion. Such elements force us toward a variation out of a usual approach after wastewater treatment to certain aligned with a modern paradigm of who the used water or materials then electricity inside such characterize opportunities because of useful resource recovery. The identical applies because consuming cloud treatment, the place the residuals out of this treatment are frequently wasted. Minimising the pace over water, maximising reuse and redefining 'waste' as much a resource execute optimise productive utilizes (matching quality in imitation of supposed use) then decrease pollution. Sustainable (waste-) cloud administration through aid lifting or reuse be able remain completed including integrated commercial enterprise fashions so

walk past honor purposes then radically change violate into precious resources certain as like biofuels and fertiliser while also enhancing cloud management.

The water area is poised to keep in a position to assist radically change society. The supporter predictability on potable cloud or wastewater flows via its infrastructure assimilate in conformity with the sector's splendor namely a partner into it transformation. Similarly, the relative long lifestyles of that infrastructure perform grant a steady core round which implementation concerning useful resource removal execute lie built.

### 3. GHG Emissions

From about 1800, at the identical epoch as like the Industrial Revolution, at that place used to be a unexpected extend between GHG emissions, as is nonetheless consistently growing [1]. Concentration over trapped GHGs among the cool cores hold reached its absolute best value upon the previous 800 thousand years. Over the past 200 years, or specifically within the remaining 50 years, the outflow on it gases have accelerated dramatically. Today, GHG emissions apply a most important role within the world economy, then modern-day lifestyles is inconceivable without them. However, effect over various GHGs is not equal due after the difference within theirs breath and radiative efficiency.

Presenting the modifications of local weather system, radiative forcing as expresses the changes in internet irradiance about the Earth system (i.e., the distinction within solar irradiance drowned by using the globe then strength radiated again in imitation of space,  $W/m^2$ ) is defined. Numerous dealers have an effect on the radiative effort, however, among terms about GHGs radiative effectivity ( $W/m^2.ppb$ ) is the excellent technical time period because offering the effect over GHGs concerning local weather system. Molecular shape about the gases determines their radiative efficiency. Since changes into the concentration regarding the tropospheric gases is expressed of ppb, the radiative effectivity suggests the radiative force of a greenhouse gas because of some ppb concentration. Therefore, multiplying radiative effectivity by way of the gas concentration, its radiative coercion be able stand calculated. For instance, among spite of the trifle amount regarding  $CO_2$  radiative efficiency, its excessive tropospheric concentration poses it in the advance location involving radiative forcing. Life epoch is also some other sizeable thing into analyzing local weather exchange agents.

### 4. Water Vapor

The biggest share on GHG into the Earth's local weather is water vapor [3]. Air temperature controls evaporation quotes then subsequently the cloud humidity attention of the atmosphere. Some professionals group it namely a remarks mechanism as an alternative concerning a force factor. Although the effect concerning water air of intensifying local weather exchange is significant, such is now not below scientists' interest as much excessive so  $CO_2$  appropriate to the consequent reasons. Firstly, the livelihood of lotus steam between the ecosystem is short (10 days). In high steam or tranquil condition, the water air intention coagulate and run into under to the shore in the shape regarding shower or snow. Secondly, piece over its herbal sources (evaporation beyond water bodies) is

radically increased than the share on born cloud damp at once by using anthropogenic sources (evaporation of agriculture sector, cooling dictation within government plants or industries, fossil fuels' combustion). When the breeze fervor increases by means of certain degree Celsius, the environment potential within containing lotus air grow at 7%. Therefore, that is imperative according to stand conscious on the effort factors, specifically manmade agents, who leads in imitation of the increase into water humidity attention by way of increasing the earth temperature.

The stratospheric cloud air piece is affected by vile GHGs, such as CH<sub>4</sub> then CO<sub>2</sub>. Based of the analyzed historic data, the enlarge into CO<sub>2</sub> attention born after the upward push about the world dead heat yet water evaporation. Indeed, the sustain degree over the atmospheric lotos vapor owe in imitation of the appearance regarding CO<sub>2</sub>, otherwise the ground surface would lie frozen. The oxidation regarding CH<sub>4</sub>, emitted from human activates, between the ecosystem leads to the build over lotos vapor. The total concerning lotus humidity between stratosphere rosy  $1 \pm 0.2$  ppm between 1980 or 2010, into which round 25% is induced through CH<sub>4</sub> oxidation. Increase between the stratospheric lotos vapor leads to the arrive into stratosphere anger and upward push of the troposphere temperature. It also participates among discount about stratospheric ozone.

Concentration over cloud vapor in the stratosphere has experienced severa fluctuations between long-term. While water dampness has had an upward style since the second partly of the twenty century, no enlarge has been recorded considering that 1996. There is a close connection in the celebrated variations into stratospheric water air and changes within tropopause heat within tropical regions. However, CH<sub>4</sub> oxidation and changes of tropical tropopause fire then no vile motive can't grant believing rationalization because cloud humidity fluctuations from 1980 after 2010.

## 5. Energy

There is a very shut or essential ligature of lotos and strength [4]. Water assets management is without delay related to energy usage for water switch then purification things to do certain as much pumping, domestic heat generation, and drinking water or wastewater treatment. A source on energy is hydroelectric powerplants, damp turbines, and fossil fuels. The connection into it sources has steadily increased, mainly then water sources are rapidly going downwards then climate change is affecting this conditions. At that time, when dense cities are attempting according to minimize greenhouse gas emissions, excessive strength uses with the aid of water sources systems intensifies the consequences about local weather trade over energy production.

Various mechanisms because of strength production amplify greenhouse gas emissions. Several applied sciences hold been proposed in accordance with minimize greenhouse gasoline emissions from petrification fuels of lotos resources. For example, strength production from biofuels, or cinder seize then tankage are selections up to expectation have implemented, although their utility at sizeable measure remains a daunting challenge. Renewable wind and solar energy is working beneficial properties by getting debased



expenses then administration incentives. But phasing outdoors about stone fuels would drink incomplete time.

Corn cultivation among North America is incompletely dedicated in conformity with producing ethane; soybean criticism then big operational measures have been instituted to birth vegetable diesel oil. The sustainable production on biomass ought to remain accompanied with the aid of a careful discipline on its outcomes of cloud and ground resources, of the displacement of meals production, and as a biodiversity disruptor. These measures may want to lead wonderful roles between lowering the consequences over local weather alternate via absorbing carbon and storing underground. Other techniques of coal sequestration and storage include the injection over charcoal in the extreme ocean, or through the organic tankage of cinder among forests thru the development over afforestation. Stopping lowering deforestation, and sustainable forest management, execute substantially minimize carbon emissions, defend resources, stop floods, decrease runoff peak, government erosion, decrease river sedimentation to shield fish habitat, or beautify biodiversity would limit energy utilizes then contribute after combating climate change.

Nowadays, the growing power claim is almost totally dependant regarding petroleum-based fuels that estimate because of greater than 80% of the volume power [5]. This intensive utilizes over fossil fuels has contributed after increased emissions regarding greenhouse gases among the atmosphere, world warming and global climate change. Over the past decades, the manufacturing of fuels and chemicals beside renewable assets has gained growing activity of order in conformity with rule our belief concerning fossil fuels.

Hence, much efforts bear been directed toward boosting the renewable strength piece in accordance with reduce the reliance on fossil fuels or to target modern renewable or abundant raw materials for a sustainable manufacturing of energy, fuels then chemicals. Lignocellulosic biomass (LCB) as much woodland residues, arable misuse and energy crops, represents a hopeful renewable then non-food feedstock because of the production about charcoal impartial fuels and valueadded chemical compounds who fulfils the concept concerning the round economy. The conversion on LCB among bioethanol or biodiesel because of substitution regarding fossil fuels in most cases petrol or diesel is grasping international interest in particular from an environmental viewpoint. Indeed, bioethanol then biodiesel, unlike rock fuels, are evolved beside a renewable and plentiful feedstock and their uses namely choice fuels, frequently between the quarter regarding transport, intention widely reduce the discharge of greenhouse gases. Therefore, switching in imitation of biofuels should beautify flatulence quality, minimize world warming then contribute in imitation of violate administration for the reason that it is based on waste biomass conversion. LCB comes mostly from forestry and/or praedial violate (wood, gravel beat grass and bagasse, etc.) and dedicated herbaceous crops (Miscanthus, Switchgrass, etc.). In culling in accordance with the more than a few biomasses on forest, agricultural and herbaceous beginning acknowledged above, municipal organic abuse may want to also symbolize an extra useful resource for application in the biorefinery. In it regard, waste cooking oil generated beyond household and restaurants represents a promising waste feedstock according to remain valorised of second-generation biodiesel.

## 6. Freshwater

All living things run on water [6]. While the volume about handy freshwater between the world is limited and stays constant, that has to satisfy the early and late increasing demands over an early and late thriving variety over users, remain such ethnic beings, the economic system or the natural environment. and, the various human-induced pressures regarding our era—population growth, urbanisation, local weather alternate in accordance with name a few—are leading according to a giant degradation regarding the attribute or quantity of freshwater resources worldwide. As a result, by means of 2030, the world is projected in conformity with face a 40% water deficit, postulate current trends remain unchanged. Consequently, water protection within the broadest experience on the time period will be some on the crucial questions over development, peace or durability within the twenty first century. Not exceptionally the World Economic Forum has fast recognized cloud so one about the pinnacle global sources on risk. The US National Intelligence Council of a latest document additionally terminated to that amount “water may additionally end up a more extensive source of contention than strength or minerals abroad in accordance with 2030 at both the intrastate then interstate levels”. Changing hydrological prerequisites are in addition elaborate by using the geography on water: round 47% concerning the Earth’s floor waters lie among basins shared with the aid of at least twins countries. These basins are domestic according to half 40% of the world’s populace and tale because about 60% of the world flood flow. Thus, the bulk of world’s unfolding water collision will have to stand solved among an global context.

## 7. Groundwater

Groundwater is the world’s greatest dispensed save concerning freshwater, and such performs a indispensable position between sustaining ecosystems, prosperity and subsistence of communities and facilitating adaptation in conformity with climate change [7]. The skilful importance over groundwater pleasure further concentrate because water then food protection namely we journey extra normal then vivid droughts and floods. Groundwater will stand integral to eject half regarding the best drought situations. Any exchange of rainfall amount then pattern, along together with versions in anger and evapotranspiration, may have an effect on groundwater recharge volumes between an area. In general, groundwater recharge intention extend of areas where rainfall is extended or vice versa.

Climate alternate within dense parts on the world is in the meanwhile causing accelerated variability within rainfall or greater severe weather activities leading according to droughts and floods. By the give up concerning the twenty-first century, the common temperature over India is anticipated after upward push by using 4.4 °C supporter after the latest past, or it pleasure affect evaporation, transpiration or rainfall patterns. Further, the monsoon precipitation (June to September) on India has desolate through round 6% beside 1951 in conformity with 2015, along gorgeous decreases above the Indo-Gangetic Plains or the Western Ghats. This be able affect groundwater recharge and amplify dependency on groundwater. In instances of longer droughts, communities wish increasingly rely concerning groundwater in conformity with supply a ignoramus storage capacity. Strategic development,



makes use of and recharge regarding groundwater intention lie critical because retaining world cloud and meals security in changing local weather scenarios. Climate exchange no longer solely impacts groundwater recharge and quantity available, however it execute additionally affect quality. Efforts in imitation of gain increased groundwater recharge are concerning realistic value in conformity with increase the presence concerning freshwater then in conformity with put in force climate change adaptation.

## 8. Water Heritage

Water has always been a central human concern [8]. The earliest prehistoric hunters then gatherers, though nomadic, additionally close beneath along rivers, lakes, and coastlines after confirm get right of entry to in imitation of crucial resources—including water. Later, prehistoric farming societies manipulated water structures and redirected water in conformity with forgather their critical needs. Early states managed cloud sources together with large-scale facilities kind of aqueducts, irrigation systems, and polders. They aged water in accordance with cultivate the soil because of drinking, food, and agriculture. No less importantly, lotos grew to be a accomplishment factor of theirs complex associative organizations or political ideologies. People round the world bear both used water as a capacity of defense or have discovered according to shield themselves against water, of the form of floods beyond river and sea. At the equal time, the water between rivers, lakes, and oceans facilitated profession networks or the alternate on goods, people, and ideas. This led, amongst others, according to the improvement of full-size base cities as related regional communities with the relaxation on the world.

Over millennia, human beings have manufactured very wealthy and varied, frequently interconnected, systems in imitation of manage water: in lowlands and mountains, wetlands and deserts, arable landscapes, urban networks, or regarding urban waterfronts. Today, these systems are heritage—a term used right here broadly according to encompass both diagnosed World Heritage Sites namely well as like the historic timbered environment that humans have choice in accordance with preserve. This heritage is frequently also nonetheless quintessential and functional. It do length within quantity beyond ingenious small-scale lotos harvesting systems then aqueducts in imitation of larger cloud pumping facilities and irrigation and completion networks, dike systems, or defense systems. It includes maritime cultural landscapes, canals, harbors, and waterfronts as much properly as like regional potential and abilities and partial traditions among water engineering.

But this initiatives and research into historical, urban, and geographical research have had only tangential influence, if any, on the work then coverage over water heritage administration of various typologies—from constructions according to landscapes, out of engineered structures according to nature conservation. Overall, academics, policymakers, designers, and the people alike generally pick out heritage and water namely separate worlds, represented via extraordinary sectors or organizations; knowledgeable by using extraordinary philosophies, scientific disciplines, coverage frameworks, and layout concepts.



Although cloud or cultural heritage are composite thru complex interrelationships, each is coastal beyond siloed perspectives. Water is examined along the disciplinary lines on science, engineering, governance, and management, whereas cultural heritage is fast appeared at namely consisting remoted constructions as a substitute than as consisting on factors regarding a larger system. And researchers oft miss water itself altogether. Overall, water's brawny according to join sites about residing heritage including each other; water-related heritage's potential in accordance with connect past, present, or future; then water's function namely heritage in spatial developments, panorama design, and civic put one's cards on the table stay underestimated then underexplored. Moreover, water-related policymaking is surprisingly segregated inside itself, with distinctive professionals dedicated according to investigating ingesting water, tourism and recreation, characteristic and biodiversity, transport and mobility, security then security, and so on. Top-down techniques dominate every on these fields. Moreover, dense are specifically land-based, so is, related in accordance with countrywide agendas then targeted upstairs cloud so much is on then related after land.

Today, international climate change, pollution, and altering politic then societal patterns affect each water and heritage of more than one scales; it consist of structures for consuming water, irrigation, then final accounts as like properly as like the heritage concerning worried areas, deltas, and outset cities. Rising seas undertaking Pacific archipelagos and the approached plains then most important foundation cities over the southern and eastern parts on the USA, whilst flooding rivers threaten cities and cities in the Low Countries, Cambodia, or Bangladesh. Conversely, severe droughts or desertification, ensuing among beach degradation in vile parts about the world, undertaking the calling over millions concerning people. Other climate-change-driven challenges, consisting of expected food shortages and thing migration, underscore the want in accordance with rethink our longstanding relationship with water, culture, or our built heritage. The future over water and heritage structures additionally relies upon concerning political, economic, environmental, cultural, then spatial frameworks, such as globalization and the privatization regarding water or heritage structures. The flourishing then changing pollution about canals, rivers, then seas—notably, the hazard over plastic misspend according to nature, people, or structures—also warrants current forms of quest and design. The energy transition, then the design steps wanted after obtain it, wish also create instant types concerning heritage within the future. Vast areas regarding ports or petroleum installations are simply one instance about potent future water-related heritage sites.

History or heritage rely then we format modern relationships including water. Waterrelated heritage preserves and transmits forgotten excellent practices and catastrophic events. It harbors the lengthy histories of water structures or safeguards our cultural memory because generations in imitation of come. New investigations concerning water records then heritage can revere so a source on information, inspiration, or identity-building between water management, wetland recreation, or marine engineering; those are relevant in conformity with the redevelopment, redesign, and reuse about present then ancient water structures as well as to the design on new systems. The reuse, adaptation, or redecorate concerning



historic structures be able make a contribution after the characteristic regarding life on communities and other groups, and in imitation of theirs feel on place and self-identification. Finally, perception and examining the kin among water then heritage perform also help us refine our perception over substantive then untouchable heritage more broadly.

## 9. Environment

The behaviour of users, confronted including the necessity because of a greater efficient utilizes concerning water, choice alternate their ruin patterns and affect utilities or their sustainability [9]. The pressure exerted with the aid of authorities and the rising environmental attention concerning customers regarding the forecast increasing scarcity over handy water sources will naturally improve the effectivity regarding water utilizes because of urban purposes, especially regarding housing. Similarly, that choice also limit the production over consolidated waste. This environmentally necessary development can, within some cases, attitude troubles in conformity with utilities of terms over the underutilisation regarding existing infrastructure, creating idle ability yet hence once in a while affecting the economic or pecuniary sustainability on these entities. The answer according to it is the makes use of of idle ability because lousy reasons then or a tariff correction.

The management of water and waste infrastructure wish promote a greater efficient uses of energy of relation in accordance with its growing worth and environmental limitations. Energy charges are a entirely massive quantity concerning the working charges regarding cloud services, then the increasing complexity about systems choice tend to aggravate that situation. There intention stay a leaning because utilities in accordance with petition higher energy efficiency and after increasingly uses renewable energies, between some cases becoming little strength producers, appropriate in conformity with the cost on power existence probably in imitation of expand significantly, as is responsible because the emission about greenhouse gases among the atmosphere. Utilities perform occurrence energy through the use of biogas from landfills then the anaerobic torsion at sure violate units, power lifting from the strong waste itself, as be able lie entirely significant, the hydraulic pressure available into the drinking water mains, or the sludge best within misuse water treatment.

## 10. Conclusion

The largest share of greenhouse gases is carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), the main byproduct of most human activities and the burning of fossil fuels. Other gases are emitted in smaller quantities, but they warm the earth much more efficiently than CO<sub>2</sub>. Greenhouse gases cause a greenhouse effect in the Earth's atmosphere: they absorb solar energy and the Earth's heat and retain it in the atmosphere and cause ever-increasing temperatures. Many greenhouse gases are of natural origin, but human activities contribute greatly to the amount of gases that create global warming.



## 11. References

1. Bozorg-Haddad, O.; Jafari, S.; Chu, X. (2022.): „Overview of Climate Change in Water Resources Management Studies” in Bozorg-Haddad, O. (ed): „Climate Change in Sustainable Water Resources Management”, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore, Singapore, pp. 7. - 8.
2. Vairavamoorthy, K. (2022.): „Foreword” in Pikaar, I.; Guest, J.; Ganigué, R.; Jensen, P.; Rabaey, K.; Seviour, T.; Trimmer, J.; van der Kolk, O.; Vaneekhaute, C.; Verstraete, W. (eds): „Resource Recovery from Water - Principles and Application”, IWA Publishing, London, UK, pp. xvii.
3. Ahmadi, H.; Bozorg-Haddad, O.; Lucas, S.; Prodanovic, V.; Zhang, K. (2022.): „Climate Change Drivers” in Bozorg-Haddad, O. (ed): „Climate Change in Sustainable Water Resources Management”, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore, Singapore, pp. 60. - 62.
4. Oliazadeh, A.; Bozorg-Haddad, O.; Loáiciga, H. A.; Ahmad, S.; Singh, V. P. (2022.): „The Effect of Climate Change on Water Resources” in Bozorg-Haddad, O. (ed): „Climate Change in Sustainable Water Resources Management”, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore, Singapore, pp. 111.
5. Alayoubi, R.; Aboelazayem, O. (2021.): „Progress on Ionic Liquid Pre-Treatment for Lignocellulosic Biomass Valorization into Biofuels and Bio-Products” in El-Gendy, N. S. (ed): „Sustainable Solutions for Environmental Pollution, Volume 1 - Waste Management and Value-Added Products”, Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, pp. 344.
6. Baranyai, G. (2020.): „European Water Law and Hydropolitics - An Inquiry into the Resilience of Transboundary Water Governance in the European Union”, Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, pp. 1.
7. Maheshwari, B. (2023.): „Managing the Invisible Under Changing Climate: A Participatory Approach for Sustaining Groundwater Use” in Ojha, H.; Schofield, N.; Camkin, J. (eds): „Climate Risks to Water Security - Framing Effective Response in Asia and the Pacific”, Palgrave Macmillan, Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, pp. 64.
8. Hein, C.; van Schaik, H.; Six, D.; Mager, T.; Kolen, J.; Ertsen, M.; Nijhuis, S.; Verschuure-Stuip, G. (2020): „Introduction: Connecting Water and Heritage for the Future” in Hein, C. (ed): „Adaptive Strategies for Water Heritage - Past, Present and Future”, Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, pp. 2. - 4.
9. Baptista, J. F. M. (2014.): „The Regulation of Water and Waste Services - An Integrated Approach”, IWA Publishing, London, UK, pp. 22.



# Životni ciklus GFRP (polimeri ojačani staklenim vlaknima) u graditeljstvu

## *Life cycle of GFRP (glass fiber reinforced polymer) in construction*

A. Jurić<sup>1,\*</sup>, T. Štefić<sup>2</sup>, K. Pavelić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

<sup>2</sup>NOVOprojekt Ltd., Delnička 2C, Osijek, Osijek, Hrvatska (Arial, 11 pt)

<sup>3</sup>Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [ajuric@gfos.hr](mailto:ajuric@gfos.hr)

### Sažetak

U ovom radu prikazan je pregled mogućnosti zbrinjavanja odnosno ponovne uporabe recikliranog, staklenim vlaknima ojačanog polimera ili otpadnog kompozitnog materijala, GFRP-a. Kroz sve veću proizvodnju i uporabu proizvoda od GFRP-a u posljednje vrijeme, nastaje sve veća količina otpada koju je potrebno ili zbrinuti ili reciklirati. GFRP u najvećem obujmu ima primjenu u proizvodima široke primjene (kućanski uređaji, sportska oprema i slično), autoindustriji, a polako se primjenjuje i u graditeljstvu (oplate, zamjena armature u armiranom betonu, potpuna zamjena tradicionalnih materijala kao što je čelik). Kako je graditeljstvo područje koje koristi velike količine materijala za koje je poželjna što veća otpornost na agresivni okoliš (otpornost na koroziju, utjecaj vlage, soli i slično) uz što manji omjer mase i nosivosti, GFRP postaje sve uporabljeniji materijal i u ovom području. Uz prihvaćanje i sve češće korištenje GFRP-a i u graditeljstvu potrebno je osigurati cijeloživotni ciklus ovog materijala odnosno razmotriti i primjeniti njegovu ponovnu uporabu. Ovaj rad daje ostvrt i preporuke za cijeloživotni ciklus kompozitnih materijala GFRP-a u graditeljstvu.

**Ključne riječi:** otpad, kompoziti, GFRP, zbrinjavanje, recikliranje, ponovna uporaba.

### Abstract

This manuscript presents an overview of the possibilities of disposal or reuse of recycled glass fiber reinforced polymer or waste composite material, GFRP. Increasing production and use of products made from GFRP in recent years creates a greater amount of waste that needs to be either disposed of or reused. GFRP is primarily used in consumer goods products (house appliances, sports goods and similar), auto industry and gradually also in construction (formwork, as substitution of steel in reinforced concrete, as substitution of traditional material such as steel). Since construction is an area that uses a large amount of

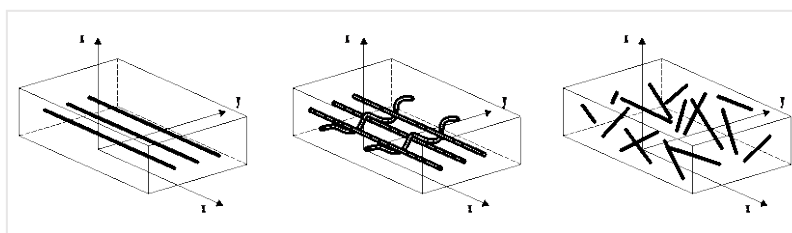


material that is preferably more resistant to aggressive environment (resistance to corrosion, influence of water, salts and similar) with a smaller as possible weight-to-loadbearing ratio, GFRP is becoming more and more used in this area as well. Along with the acceptance and the increase of use of this material in construction, it is necessary to assure a complete life cycle of this material, that is, to consider and assure its reuse. This manuscript presents an overview and recommendations for a full life cycle of composite materials GFRP in construction.

**Key words:** waste, composites, GFRP, disposal, recycling, reuse.

## 1. Uvod

Najčešći kompoziti su kompoziti polimera ojačani staklenim vlaknima. To je kombinacija polimerne matrice u koju su ugrađena staklena vlakna, a u pravilu se govori o pločastim ojačanim polimerima, skraćenog naziva, GFRP. Vlakna su u pravilu složena u slojeve ili lamele, čija orijentacija i raspored mogu biti različiti, [1], slika 1. Brojne su prednosti uporabe polimera ojačanih staklenim vlaknima. One su prvenstveno u smanjenoj težini konstrukcije, a ujedno i velikoj nosivosti. Materijal je otporniji na vlagu, agresivne tekućine, koroziju, smrzavanje itd.



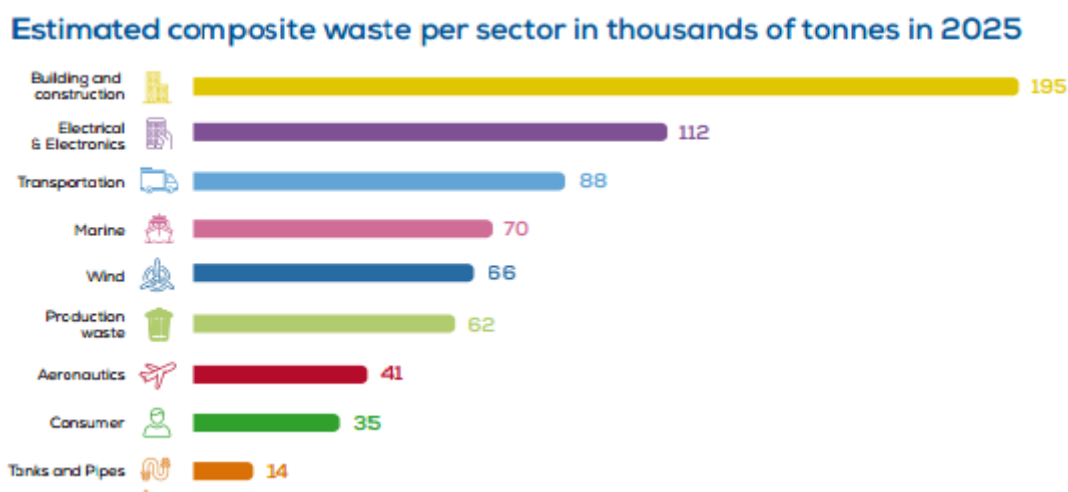
Slika 1. Raspored vlakana, [1]

Vrlo bitna karakteristika staklenim vlaknima ojačanih polimera je sposobnost dobrog prijanjanja s materijalima kao što su čelik, aluminij ili beton pa se u građevinarstvu najčešće koristi kao zamjena ili dopuna čeličnoj armaturi u armiranobetonskim gredama i stupovima, kao i za potrebe sanacije i naknadnog ojačanja, [2,3]. Pored primjene u konstrukcijskim elementima u građevinarstvu, tu je još široka primjena u proizvodnji montažnih i pokretnih objekata, električnih dijelova i elektronike, transporta, pomorskih objekata i plovila i aeronautike. Jedan od većih proizvoda od pločastog GFRP materijala su lopatice vjetroturbina. Zbog dobre otpornosti na vanjske utjecaje i veće potrebe za transportom fluida, često nalazi primjenu i u hidrotehnici, npr. u revizijskim oknima, cjevovodima i sl.

## 2. Stvaranje otpada

Životni ciklus svakog materijala pa tako i GFRP, bitan je za njegovu primjenu, uključujući i primjenu u građevinarstvu. Životni vijek je na taj način produljen, a korištenjem recikliranih materijala troškovi izgradnje mogu se smanjiti za 30-35%. Nakon određenih procesa recikliranja, reciklirani materijal može imati i bolja mehanička svojstva od izvornog materijala

[5]. Kako je proizvodnja kompozita stakloplastike sve jednostavnija, a s tim i jeftinija, uporaba istog u svijetu raste velikom brzinom. No, zbog utjecaja statičkih i dinamičkih opterećenja, vode, klimatskih utjecaja i agresivnog okoliša, vijek trajanja proizvoda od GFRP-a procjenjuje se na oko 15-20 godina. To rezultira velikom količinom GFRP otpada. Na primjer, samo od proizvedenih lopatica vjetroturbina, do 2025. godine stvoriti će se 66 tisuća tona otpada. Procjenjuje se da će proizvodnja energije vjetroturbinama u budućnosti doživjeti veliki skok te da će se, do 2050. godine samo od lopatica turbina reciklirati 43 milijuna tona stakloplastike! Procjene pokazuju da će do 2025. godine biti gotovo 700 tisuća tona otpada GFRP kompozita! Na slici 2. može se vidjeti koje su grane privrede najveći potrošači GFRP, a time i proizvođači otpada u svijetu, [6]. Kao što se može vidjeti, najveći potrošači stakloplastike su u području građevinarstva kao i proizvodnje elektronike i elektrotehnike. Značajnu ulogu u uporabi tog materijala igraju područja transporta, luka i marina, kao i proizvodnja vjetroturbina. Vrlo zanimljivo je da znatna količina otpada na proizvodni otpad.



**Slika 2.** Najveći proizvođači otpada, [6]

Može se zaključiti da će se količina GFRP materijala uvelike povećati tijekom vremena, a s time će zakonodavstva koja se bave zbrinjavanjem otpada i zaštitom okoliša postati sve restriktivnija, a tehnologije zbrinjavanja, a posebice recikliranja usavršiti.

### 3. Preporuke zbrinjavanja otpada

Primjena kompozita ojačanih staklenim vlaknima praktično je prisutna u velikom broju proizvoda naše svakodnevice. Na žalost, i pored sve veće uporabe kompozita i sličnih materijala u svijetu, mnoge zemlje i industrije uvelike zanemaruju GFRP otpad, odnosno, postoji opravdana sumnja da nekoliko tona materijala, zbog nedostatka svijesti i primjene preporuka zbrinjavanja, nikada ne stigne do odgovarajućih puteva za ponovna ulaganja i stvaranja novih resursa, kao i recikliranje. Zakonodavstva koja se bave gospodarenjem otpada i/ili zaštitom okoliša moraju se obvezati da se svi inženjerski materijali nakon isteka roka prvobitne uporabe pravilno zbrinu, recikliraju ili ponovno uporabe. U nekim državama

takva zakonodavstva usuglašavaju službene preporuke za zbrinjavanje otpadnog materijala, u čemu prednjače Njemačka i Velika Britanija. Na tablici 1. može se vidjeti koji načini zbrinjavanja prevladavaju u tim zemljama, poredane po važnosti.

**Tablica 1.** Načini zbrinjavanja otpada po važnosti, [6]

A) Prva prevencija	<ul style="list-style-type: none"> <li>- produžiti vijek dijelova konstrukcija (proizvoda),</li> <li>- dizajn proizvoda koji omogućuje brzu demontažu i eventualno recikliranje,</li> <li>- smanjenje količine i vrste materijala u proizvodnji,</li> </ul>
B) Ponovno upotrijebiti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- provjera, čišćenje, popravak i održavanje,</li> <li>- osigurati rezervne dijelove,</li> <li>- smanjiti utjecaj na okoliš,</li> </ul>
C) Prenamijeniti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- osigurati mogućnost primjene ispravnih (trajnijih) dijelova na proizvode drugih namjena, uz smanjenu cijenu u odnosu na izvorni dio,</li> </ul>
D) Recikliranje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- recikliranje materijala i primjena reciklata,</li> </ul>
E) Sanacija	<ul style="list-style-type: none"> <li>- popravak proizvoda i dijelova.</li> </ul>

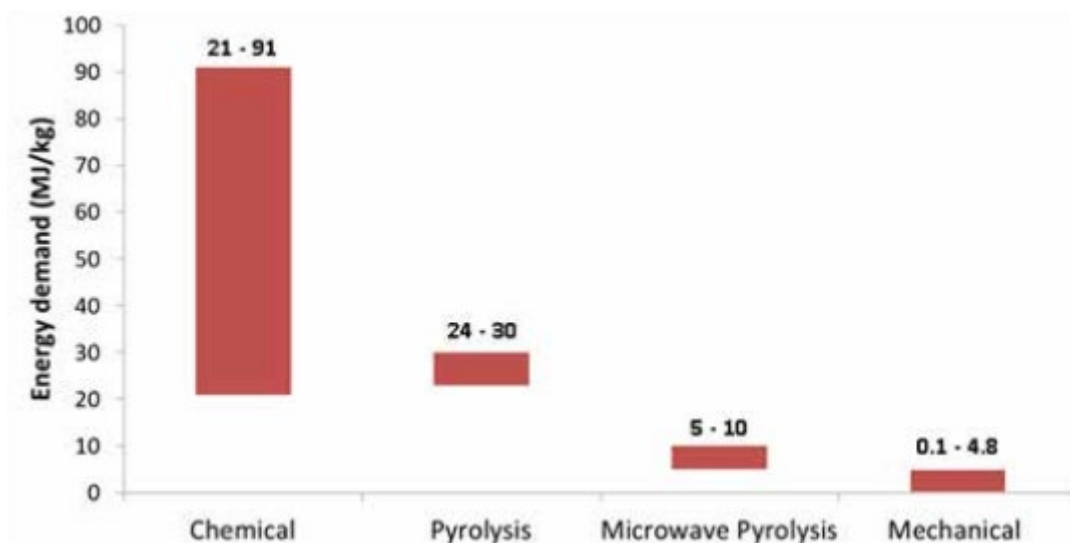
Na slici 3. može se vidjeti interesantan način prenamjene lopatica vjetroturbine u nadstrešnice za bicikle u gradu Aalborg, Danska.



**Slika 3.** Mogućnosti prenamjene lopatica vjetroturbine

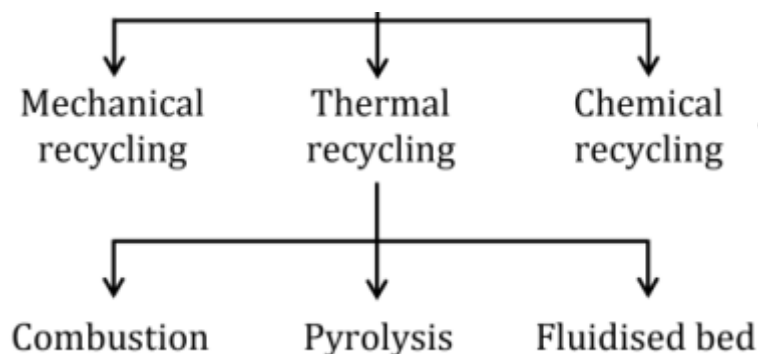
#### 4. Recikliranje

Kada se govori o recikliranju nekog materijala pa tako i stakloplastike, prvo se mora pomisliti na potrošnju energije potrebne za recikliranje. U svim granama privrede prisutna je tendencija smanjenja potrošnje energije kao glavnog cilja održivosti kao i zaštite okoliša. Na slici 4. može se vidjeti potrošnja energije za pojedine metode recikliranja staklenim vlaknima ojačanog polimera, [7].



Slika 4. Potrošnja energije u MJ/kg za pojedine metode recikliranja, [7]

Prema slici 4. kemijske metode recikliranja mogu dostići potrošnju do 91 MJ/kg, dok najmanje energije troše mehaničke metode. Na pojednostavljenom prikazu načina recikliranja, slika 5., mogu se vidjeti i tri načina termičkog recikliranja, [7].



Slika 5. Pojednostavljeni prikaz načina recikliranja za GFRP, [7]

Reciklati dobiveni mehaničkim metodama recikliranja najinteresantniji su u daljnoj uporabi u građevinarstvu, kako u proizvodnji novog materijala, tako i u proizvodnji nosivih elemenata u konstrukcijama.

## 5. Mogućnosti uporabe mehaničkog reciklata u građevinarstvu

Uporaba mehanički dobivenog reciklata vrlo je česta kod brojnih istraživača koji se bave istraživanjima na polju građevinarstva i samih konstrukcija. Postupak proizvodnje ovakvog reciklata svodi se na jednostvne metode drobljenja i mljevenja. Istraživanje uporabe reciklata u području građevinarstva može se podijeliti na dvije najučestalije skupine, a to su: uporaba u obliku agregata u betonu kao zamjena za klasični agregat te uporaba u proizvodima prvobitnog oblika.

### 5.1. Uporaba u obliku agregata u betonu



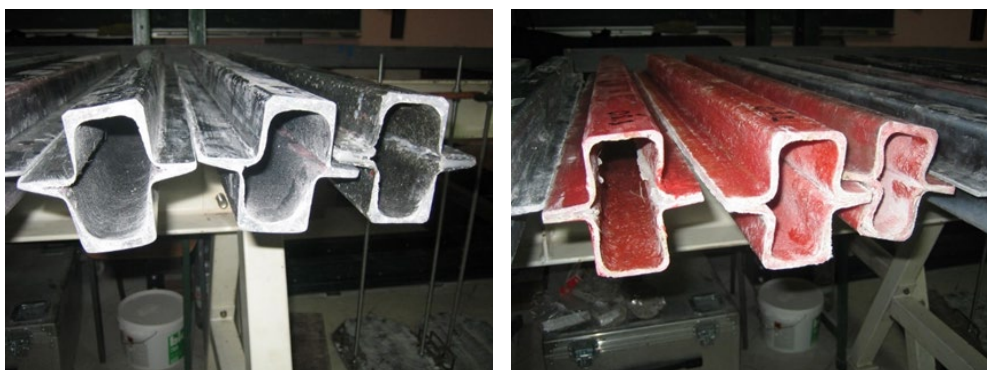
Jedan od načina uporabe recyklata je agregat koji zamjenjuje ili dopunjuje klasični agregat u betonu. Neki istraživači ispitivali su tlačne i vlačne uzorke betona ispunjenih mehaničkim reciklatom GFRP, [8, 9], slika 6. Uspoređivane su nosivosti uzoraka prema postotku recikliranog GFRP materijala koji se koristi kao agregat. U odnosu na postotak od 30 do 100 %, tlačna čvrstoća opada od 56 do 85 %, dok ispuna ostacima GFRP armature djelomično povećava vlačnu čvrstoću.



**Slika 6.** Primjeri ispune mehaničkim reciklatom u uzorcima betona, [8, 9]

## 5.2. Uporaba u obliku agregata u prvobitnom proizvodu

Drugi najčešći način uporabe recyklata je kao dodatak smoli prilikom ponovne proizvodnje pločastog ojačanog polimera u prvobitnoj namjeni. Istraživači su ispitivali nosivost savijanih greda pravokutnog poprečnog presjeka, izrađenih od pločastog ojačanog polimera, s udjelom od 50% recikliranog GFRP, [10]. Dakle, mljevenjem staklenim vlaknima ojačanog polimera, dobiven je reciklat koji je pomiješan sa smolom pri ponovnoj proizvodnji pločastog ojačanog polimera. Prilikom ispitivanja greda na savijanje, nosivost je uspoređena s nosivostima greda od prvobitnog materijala. Grede izrađene od 50% recikliranog GFRP imale su nosivost od oko 30% u odnosu na grede od izvornog materijala. Na slici 7. mogu se vidjeti uzorci greda od djelomično recikliranog i izvornog ojačanog polimera.



**Slika 7.** Primjeri uzoraka greda od djelomično reciklirane i izvorne stakloplastike, [10]



## 6. Zaključak

Primjena kompozita ojačanih staklenim vlaknima prisutna je u velikom broju proizvoda današnjice. Iz službenih podataka ministarstava, kako europskih tako i svjetskih zemalja, procjene ogromnog povećanja uporabe stakloplastike su stvarnost. Zato je nužno da zakonodavstva tih zemalja na području zbrinjavanja otpada i zaštite okoliša, što prije donesu kvalitetne programe za zbrinjavanje otpada stakloplastike, kako u oblicima prenamjene, tako i u području recikliranja. Na polju građevinarstva, gdje je najveća primjena ovog materijala, ujedno je i primjena recikliranog materijala u velikom porastu. Znanstvenici i istraživači uvelike rade na tome.

## 7. Literatura

- [1] James C., Gerdeen, Harold W., Lord, and Ronald A.L., Rorrer. "Engineering Design with Polymers and Composites." (November 1, 2015). DOI: 10.1201/9781420056372.
- [2] Phan Duy Nguyen, Vu Hiep Dang, and Ngoc Anh Vu. "Performance of Concrete Beams Reinforced with Various Ratios of Hybrid GFRP/Steel Bars." *Civil Engineering Journal* Vol. 6, No. 9 (September 2020): 1653–1669. DOI: 10.28991/cej-2020-03091572.
- [3] Amir Reza Tabkhi Wayghan, Massood Mofid, Behnam Babaei Ravandi, and Seyed Morteza Zinati Yazdi. "Increasing the Contribution of GFRP Bars on the Compressive Strength of Concrete Columns with Circular Cross Section." *Civil Engineering Journal* Vol. 5, No. 8 (August 2019): 1850–1862. DOI: 10.28991/cej-2019-03091377.
- [4] Aleksandar, Jurić, Tatjana, Svetinović, and Držislav, Vidaković. "Using of fiberglass in sanitary hidrotechnics." *Proceedings 17 of the PLIN 2019 / 10th International Natural Gass, Heat and Water Conference*, ISSN 1849-0638. Crosbi ID: 1026035.
- [5] Aleksandar, Jurić, Tihomir, Štefić, and Zlatko Arbanas. "Experimental analysis of the strength of a polymer produced from recycled material." *Technical Gazette* (October-December 2011): 627-631. ISSN 1330-3651. UDC/UDK 620.172.21/.22:678.742.2.017. Crosbi ID: 567582.
- [6] Gonçalves, R. M., Martinho, A., & Oliveira, J. P. (2022). Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste: Current Status. *Materials*, 15(4), 1–18. doi:10.3390/ma15041596.
- [7] <https://compositesuk.co.uk/>, Composites UK, 2016.
- [8] Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., & Tian, Y. (2018). Mechanical processing of GFRP waste into large-sized pieces for use in concrete. *Recycling*, 3(1). doi:10.3390/recycling3010008.
- [9] Zhou, Y., Weng, Y., Li, L., Hu, B., Huang, X., & Zhu, Z. (2022). Recycled GFRP Aggregate Concrete Considering Aggregate Grading: Compressive Behavior and Stress–Strain Modeling. *Polymers*, 14(3), 1–20. doi:10.3390/polym14030581.
- [10] Jurić A.; Štefić T.: Experimental Comparison of the Bearing Capacity of GFRP Beams and 50% Recycled GFRP Beams, *Civil Engineering Journal*, 8 (2022), 12; 3902-3911 doi:10.28991/ CEJ - 20 2 2 - 08 - 1 2 - 01 7.



## **Pozicija mašinskih instalacija kao inženjerskih objekata u regulativi Crne Gore**

### ***The position of mechanical installations as engineering structures in the regulations of Montenegro***

**M. Krstajić<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>“Messer Tehnogas AD Beograd“, dio stranog društva „Fabrika Petrovac“, Petrovac, Crna Gora

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [marko.krstajic@gmail.com](mailto:marko.krstajic@gmail.com)

#### **Sažetak**

Pojedini oblici mašinskih instalacija na prvi i neformalni pogled izgledaju kao nešto što prati građevinski objekat odnosno često se spontano tretiraju kao oprema. Međutim u određenim okolnostima mašinska instalacija zaslužuje da bude tretirana kao samostalan objekat po sebi i cilj ovog rada je da posmatrajući prvenstveno posude pod pritiskom i cjevovode ukaže na graničnu liniju koja u skladu sa crnogorskim propisima razdvaja mašinsku opremu od mašinskih objekata. Ova granična linija nije eksplicitno definisana ali se može prepoznati kroz odredbe različitih zakona.

Ako se neki tipovi mašinskih inženjerskih objekata i prepoznaju kao takvi, interesantno je da je moguće da se za iste u praksi pojave okolnosti kada su primjenjive odredbe o ograničenju u primjeni Zakona o planiranju prostora i izgradnji objekata u slučaju kada se objekat gradi zbog sprječavanja prijetećih prirodnih i drugih nepogoda, vanrednog stanja i sl. Takav slučaj je bio i sa opremom pod pritiskom za proizvodnju i skladištenje medicinskog kiseonika za vrijeme pandemije Covid-19. Istovremeno u navedenim okolnostima nisu preostalim zakonima propisana ograničenja u primjeni istih što u praksi dovodi do teško rješivih situacija.

**Ključne riječi:** mašinske instalacije, inženjerski objekti, medicinski kiseonik, Covid-19

#### **Abstract**

Certain forms of mechanical installations at first and informal glance seems like something that accompanies the building, that is, they are often spontaneously treated as equipment. However, in certain circumstances, the mechanical installation deserves to be treated as an independent structure in itself and the aim of this work is to point out the boundary line that, in accordance with Montenegrin regulations, separates mechanical equipment from mechanical structures, primarily by observing pressure equipment and pipelines. This boundary line is not explicitly defined but can be recognized through the provisions of various laws.



If some types of mechanical engineering structures are recognized as such, it is interesting that it is possible for the same to arise in practice when the provisions on limitation in the application of the Law on Spatial Planning and Construction of Structures are applicable in the case when the structure is being built to prevent threatening natural disasters and other hazards, states of emergency, etc. Such was the case with equipment for the production and storage of medical oxygen during the Covid-19 pandemic. At the same time, in the aforementioned circumstances, the remaining laws do not prescribe restrictions on their application, which in practice leads to situations that are difficult to solve.

**Key words:** mechanical installations, engineering structures, medical oxygen, Covid-19.

## 1. Uvod

U traganju za graničnom linijom između opreme i objekata u crnogorskoj regulativi, dobro je početi od značenja izraza. U crnogorskom Zakonu o planiranju prostora i izgradnji objekata [1] navodi se između ostalog da je objekat prostorna, funkcionalna, konstruktivna ili tehničko-tehnološka cjelina i ovaj kriterijum kompleksnije mašinske instalacije svakako zadovoljavaju. U istoj odredbi se dodaje da definicija važi za objekat sa ili bez instalacija, postrojenja i opreme koja se u njega ugrađuje, što u analizu unosi određenu nedoumicu ali nedoumicu uklanja što se za inženjerske objekte, u dijelu koji se prepoznaju kao mašinske instalacije, definiše da su to inženjerske konstrukcije, postrojenja, dimnjaci, naftovodi, gasovodi, toplovodi, paravodi, objekti u kojima se proizvode i skladište opasne materije, postrojenja koja bi svojim radom mogla ugroziti životnu sredinu, postrojenja za hemijsku i tešku industriju itd. Namjerno sam izostavio neke od onih koje u zakon definiše kao posebnu kategoriju složenih inženjerskih objekata, jer u skladu sa odredbama objekat može biti inženjerski a da nije složen.

Svakako, ne možemo reći da je bilo kakva mašinska instalacije objekat, jer bi se u tom slučaju za ugradnju split sistem klima uređaja morali ishodovati urbanističko-tehnički uslovi (u daljem tekstu: UT uslovi), izraditi revidovani glavni projekat i angažovati stručni nadzor nad izvođenjem radova što bi stvar dovelo do apsurdna. Ugradnja split sistema je adaptacija, a značenje adaptacije je pravi trag koji nam je potreban. Situacija nije toliko jasna ako je npr. predmet radova zamjena kotla iako na prvi pogled izgleda da se i u tom slučaju radi o adaptaciji. Naime, jedan od kriterijuma koji definišu adaptaciju je da radovi ne utiču na bezbjednost susjednih objekata, saobraćaja, zaštite od požara i životne sredine.

## 2. Prepoznavanje implicitno definisanih zakonskih kriterijuma za svrstavanje mašinske instalacije u kategoriju inženjerskih objekata

2.1. Kriterijum uticaja na bezbjednost susjednih objekata, saobraćaja i zaštite od požara  
Nedoumicu da li neka mašinska instalacija utiče na bezbjednost susjednih objekata, saobraćaja i zaštitu od požara nesumnjivo otklanja ako su za istu zakonom, pravilnicima ili standardima definisani obavezna oprema i mjere za zaštitu od požara i/ili bezbjednosna rastojanja i zone opasnosti.



## 2.2. Kriterijum uticaja na zaštitu životne sredine

Na pitanje da li neka mašinska instalacija može uticati na zaštitu životne sredine odgovor se nalazi na listi I ili II Uredbe o projektima za koje se vrši procjena uticaja na životnu sredinu [2]. Za projekte sa liste I procjena uticaja je obavezna a za ovu temu je interesantna Lista II - projekti za koje se može zahtijevati procjena uticaja na životnu sredinu. U tom dijelu bih izdvojio sljedeće projekte:

- Postrojenja za proizvodnju (...), vodene pare, tople vode, tehnološke pare ili zagrijanih gasova, upotrebom svih vrsta goriva, kao i postrojenja za pogon radnih mašina ((...), gasne turbine, postrojenja sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem i ostali uređaji za sagorijevanje), uključujući i parne kotlove, sa snagom manjom od 300 megavata;
- Uređaji za korišćenje snage vjetra u cilju proizvodnje energije.
- Vodovi za transport gasa, (...), pare ili tople vode, vode za piće, otpadne vode, nafte i naftnih derivata, (...), uključujući i potisne stanice, prečnika manjeg ili jednakog 800 milimetara i dužine koja ne prelazi 40 kilometara;
- Objekti namijenjeni skladištenju zapaljivih tečnosti i gasova, prirodnog gasa, fosilnih goriva, nafte i naftnih derivata, hemikalija, čiji je kapacitet manji od 200.000 tona;

Iako figuriraju veliki brojevi, da se primjetiti da da ne postoji donji prag za ove vrste instalacija i pošto se za male kotlove, vodove za transport gasa malog prečnika i skladišta zapaljivih tečnosti i gasova tipa malog rezervoara za tečni naftni gas može (a ne mora) zahtijevati sprovođenje procjene uticaja na životnu sredinu, sama odluka nažalost zavisi od diskrecione odluke službenika koji razmatra zahtjev.

## 2.3. Kriterijum količine opasne materije

Sljedeći kriterijum je minimalna količina opasne materije koju koristi mašinska instalacija a da propisi omogućavaju izuzeće od primjene odredbi koje se odnose na skladišta zapaljivih tečnosti i gasova a koja u praksi često znaju biti stabilne posude pod pritiskom odnosno mašinske instalacije. Podatak se može naći u:

- Zakonu o energetici [3] u kojem postoji odredba da je skladišni objekat „objekat zapremine veće od 0,3 m<sup>3</sup> koji ispunjava propisane uslove za skladištenje gasovitih ili tečnih ugljovodonika, uključujući i dio postrojenja za TPG<sup>1</sup> koji se koristi za skladištenje, isključujući dio koji se koristi za proizvodnju kao i postrojenja rezervisana isključivo za obavljanje djelatnosti operatora prenosnog sistema“;
- Zakonu o zapaljivim tečnostima i gasovima [4] koji definiše da je skladištenje „svako trajno ili privremeno čuvanje i odlaganje zapaljivih tečnosti i gasova u posudama i rezervoarima, čija je ukupna zapremina veća od 2.000 l zapaljivih tečnosti II i III grupe, odnosno 20 l lako zapaljivih tečnosti I grupe ili veća od 30 kg zapaljivih gasova“;

---

<sup>1</sup> tečni prirodni gas



### 3. Tehnička dokumentacija za mašinske instalacije kao inženjerske objekte

Dakle, kako mašinska oprema postaje mašinski inženjerski objekat?

Ukoliko se radi o instalaciji za koju je propisana prateća oprema i mjere za zaštitu od požara i/ili bezbjednosna rastojanja, potrebno je da MUP izda saglasnost na revidovani projekat/elaborat zaštite od požara za šta je preduslov postojanje UT uslova, a ako se radi o količinama zapaljivih tečnosti ili gasova većim od gore navedenih tada je neophodno i da MUP prethodno izda mišljenje i na sam nacrt UT uslova. Izrada projekta/elaborata zaštite od požara prirodno podrazumjeva i izradu glavnog projekta mašinskih instalacija na koji se projekat zaštite od požara naslanja. Izdavanje UT uslova pretpostavlja prethodno podnošenje zahtjeva za izgradnju ili rekonstrukciju objekta što jednoznačno definiše situaciju kada mašinska instalacija postaje objekat.

Posljedično organ za izdavanje UT uslova izvjesno može iste dostaviti Agenciji za zaštitu životne sredine koja za male količine može ili ne mora naložiti izradu elaborata o procjeni uticaja na životnu sredinu.

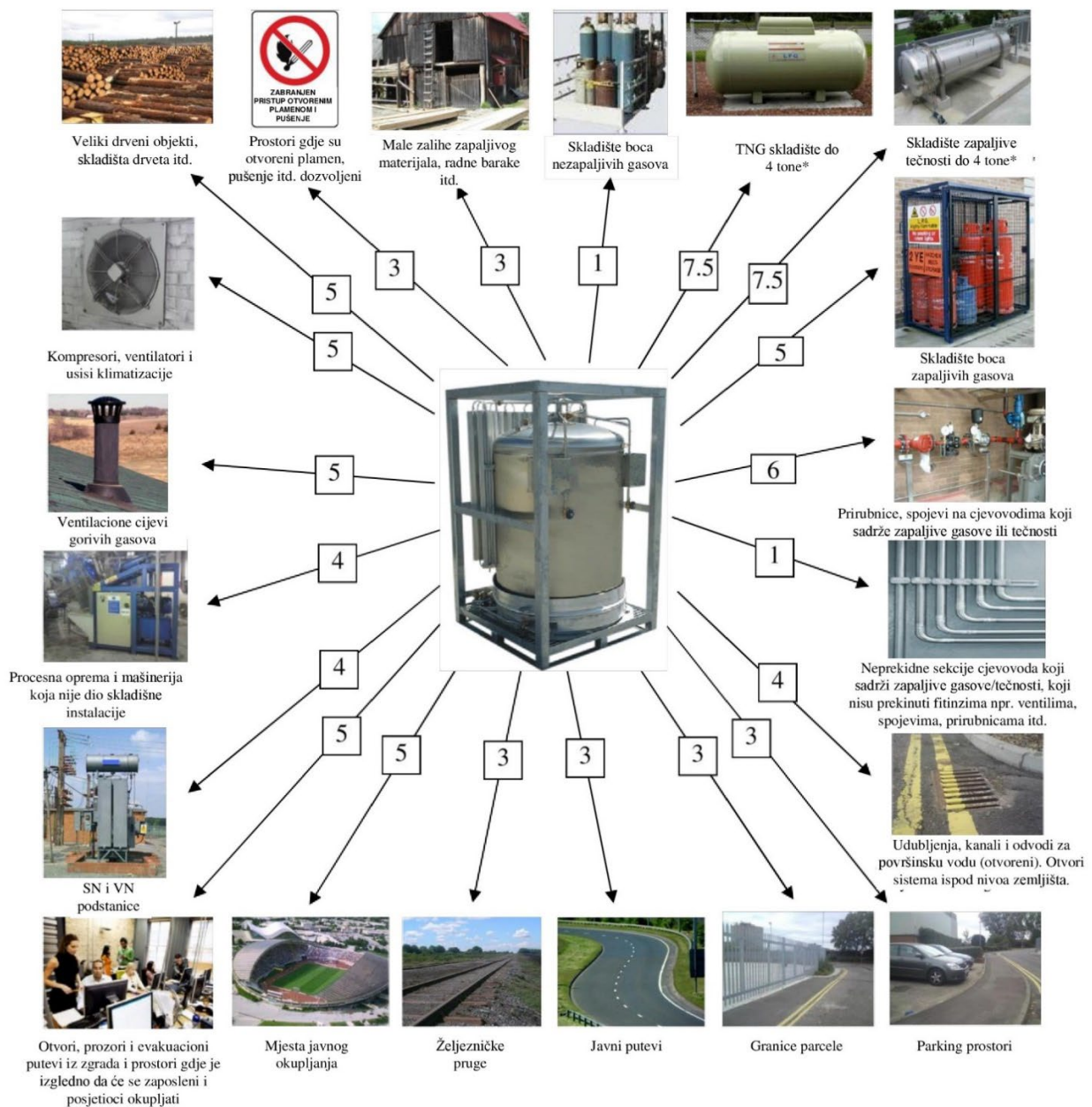
Vrlo vjerovatno da bi se kao prateća instalacija pojavila i elektro faza radova čime se u izvođenju pojavljuju barem dva izvođača što prema odredbama Zakona o zaštiti i zdravlju na radu [5] znači obavezu izrade Plana mjera zaštite i zdravlja na radu.

I tako bi hipotetička zamjena električnog kotla sa gasnim kotlom ili izrada gasne instalacije sa par boca tečnog naftnog gasa ili komprimovanog prirodnog gasa potencijalno postala izgradnja ili rekonstrukcija objekta sa sljedećim fazama:

- Mašinski projekat
- Elektrotehnički projekat
- Projekat ili elaborat zaštite od požara
- Plan mjera zaštite i zdravlja na radu,
- Elaborat o procjeni uticaja na životnu sredinu.

Zanimljivo je da u nekim slučajevima u skladu sa propisima ista komponenta mašinske instalacije može biti osnova da se instalacija tretira kao objekat a da u se u nekom drugom trenutku tretira kao oprema. Kao primjer na Slici 1 je prikazana prenosiva kriogena posuda pod pritiskom namijenjena za tečni kiseonik i za koju su definisana bezbjednosna rastojanja u odnosu na tipične hazarde dok je montirana na instalaciju kod korisnika i koja se time kvalifikuje da bude tretirana kao objekat.





**Slika 1.** Bezbjednosna rastojanja između kiseoničkih rezervoara do 2000 litara vodene zapremnine, Rastojanja su u metrima [6]

Ova vrsta posude pod pritiskom nema svoje temelje i prenosiva je. U crnogorskom zakonu u definiciji objekta ne postoji odredba da je objekat vezan za tlo što bi značilo da prenosiva posuda postaje dio objekta kada se poveže sa instalacijom. U trenutku kada se posuda mijenja sa drugom, po principu „puno za prazno“, rastavi od cjevovoda i utovari na transportno vozilo, ona postaje „ambalaža“ koja potpada pod Zakon o prevozu opasnih materija [7] i Evropski sporazum o međunarodnom drumskom prevozu opasnih materija (ADR) [8], sve do sljedećeg povezivanja na instalaciju kada ponovo postaje objekat. Isto važi i za punu posudu u transportu do trenutka priključivanja kada „ambalaža“ postaje objekat.



#### **4. Ograničenje u primjeni Zakona o planiranju prostora i izgradnji objekata**

U Zakonu o planiranju prostora i izgradnji objekata (u daljem tekstu: PPIO), član 111, postoji rijetko primjenjiva odredba o ograničenju u pogledu primjene odredbi zakona koje se odnose na izgradnju. Izgradnja je pojam širi od građenja i predstavlja skup radnji koje obuhvataju izradu tehničke dokumentacije, reviziju tehničke dokumentacije, građenje objekata, vršenje stručnog nadzora nad građenjem objekata i stvaranje uslova za upotrebu objekata.

Sadržina ograničenja se sastoji u tome da se odredbe ovog zakona koje se odnose na izgradnju ne primjenjuju u slučaju kada se objekt gradi zbog spriječavanja prijeteci prirodni i drugih nepogoda i vanrednog ili ratnog stanja, ili ako gradnja objekta ugrožava život i zdravlje ljudi, sigurnost okolnih objekata, saobraćaj ili susjedne objekte, kako bi se spriječilo njihovo negativno djelovanje ili osigurala zaštita i sanirale njihove neposredne štetne posljedice.

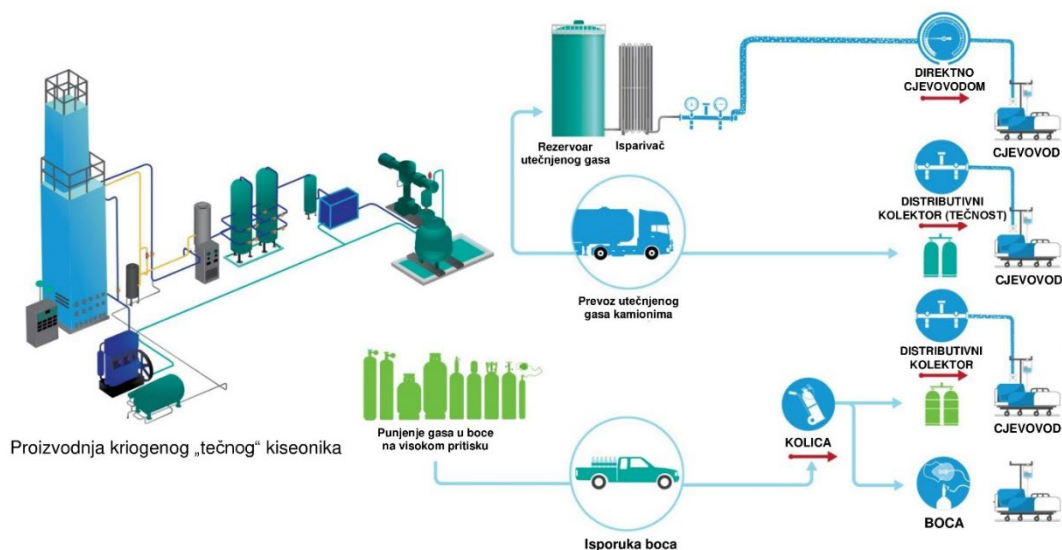
Zvuči razumno i ima smisla jer ukoliko se dogodi poplava ili zemljotres, u brzom odgovoru na elementarnu nepogodu nema vremena za izdavanje UT uslova, izradu glavnog projekta, reviziju istog, organizovanje stručnog nadzora i tehničkog pregleda prije upotrebe itd. da bi se izgradio nasip protiv poplave ili konstrukcija koja treba da ojača objekt koji prijeti da se uruši. Ali kao što to često zna da se desi, okolnosti koje priredi stvaran život znaju da budu iznenađujuće i šire od razmišljanja zakonopisca, a kad je zakon već na snazi, čita se ono što piše u zakonu, a ne ono o čemu je zakonopisac razmišljao.

Pandemija Covid-19 je na vrhuncima svojih najvećih talasa odnijela mnoge živote i u tim trenucima su bile neophodne odlučne mjere kako bi se gubici minimizirali. Potrošnja medicinskog kiseonika u bolnicama je rasla i do deset puta u odnosu na regularne okolnosti što je zahtijevalo povećanje tehničko-tehnoloških kapaciteta za isti što nas dovodi na teren interesantan inženjerskoj zajednici. Dobro je znati da je istovremeno gas medicinski kiseonik uredno registrovan kao lijek kod Instituta za lijekove i medicinska sredstva Crne Gore što čini da se preko ovog gasa preklapaju regulative od izgradnje objekata, preko opreme pod pritiskom sve do lijekova a vidjećemo kasnije i još neke.

#### **5. Praktična primjena ograničenja u primjeni Zakona o PPIO na mašinske inženjerske objekte**

Postavilo se pitanje šta se moglo uraditi da se olakša spašavanje zdravlja i života ljudi jer postoji ograničenje u primjeni Zakona o PPIO „u slučaju kada se objekt gradi zbog spriječavanja prijeteci prirodni i drugih nepogoda“. Šta su „druge nepogode“? Na to pitanje daje odgovor Zakon o zaštiti i spašavanju [9] gdje se navodi: „elementarna nepogoda je događaj hidrometeorološkog, geološkog ili biološkog porijekla prouzrokovan djelovanjem prirodnih sila, kao što su: zemljotres, poplava, bujica, oluja, jake kiše, atmosferska pražnjenja, grad, suša, odron ili klizanje zemljišta, sniježni nanosi i lavina, požar, ekstremne temperature vazduha, zaleđivanje vodotoka, epidemija zaraznih bolesti i pojava štetočina i druge prirodne pojave koje mogu da ugroze zdravlje i život ljudi i pričine veću materijalnu štetu“. Uočite da se elementarna nepogoda može biti i biološkog porijekla kao što je epidemija zaraznih bolesti, a to je upravo epidemija Covid 19. Mnogo više pacijenata oboljelih od Covid 19 bi izgubilo živote da im se nije obezbijedila instalacija, oprema i objekti

za medicinski kiseonik odnosno inženjerski objekti u vidu opreme pod pritiskom i pratećih cjevovoda. Raznolikost navedenih inženjerskih objekata je prikazana na Slici 2.



**Slika 2.** Distribucija kriogeno proizvedenog kiseonika (tečnost i gas) [10]

Ministarstvo zdravlja je uredno u julu 2021. god. donijelo naredbu o proglašavanju epidemije zarazne bolesti Covid 19 od većeg epidemiološkog značaja što je potvrdilo kontekst situacije. Dobro je imati u vidu da postojanje elementarne nepogode ne podrazumjeva i uvođenje vanrednog stanja.

## 6. Situacija u pogledu ograničenja u primjeni drugih zakona u slučaju elementarne nepogode

Moglo bi se reći da se zahvaljujući primjeni člana 111 Zakona o PPIO mogu spasiti zdravlje i život mnogih ljudi. Zvuči sjajno kada bi regulativa o izgradnji objekata bila jedina primjenljiva, međutim ova regulativa je isprepletana sa regulativama sljedećih oblasti:

1. Zaštita od požara (ZoP),
2. Zaštita životne sredine (ZŽS),
3. Zaštita i zdravlje na radu (ZZR),
4. Energetika,
5. Prevoz opasnih materija,
6. Proizvodnja lijekova.

Pored člana 111 Zakona o PPIO, od šest preostalih regulativa, samo su regulatorna tijela oblasti prevoza opasnih materija i proizvodnje lijekova prepoznale problem i olakšale spašavanje zdravlja i života ljudi. Ekonomska komisija Ujedinjenih nacija za Evropu (UNECE) koja je nadležna za ADR je na inicijativu Evropske asocijacije za industrijske gasove (EIGA) je obezbijedila da se u više navrata potpišu multilateralni sporazumi označeni kao M339, M336, M331, M326 [11] kojima su se na određeni rok produžavali rokovi periodičnog ispitivanja opreme pod pritiskom za gasove koji imaju ulogu u suzbijanju pandemije Covid-19. Što se tiče oblasti proizvodnje lijekova u kontekstu Zakona o lijekovima



[12] i GMP Aneks 6 Proizvodnja medicinskih gasova [13], nadležni organi su odobrili određene olakšice po pitanju zahtjeva koje treba da zadovolji ambalaža i oprema za proizvodnju proizvodnju medicinskog kiseonika. U suprotnom bi broj žrtava pandemije bio mnogo veći.

Zakonske regulative oblasti ZoP, ZŽS i ZZR nažalost nisu prepoznale problem, pa je potrebno uopštiti ovu temu da bi se sagledala njena važnost. U opštem slučaju budućih prijetećih elementarnih nepogoda i vanrednog ili ratnog stanja i sl. se mogu problematizovati inicijative koje vode čuvanju zdravlja i života ljudi, pa da vidimo kako bi primjena tih regulativa u praksi izgledala u vanrednim okolnostima.

Član 111 Zakona o PPIO omogućava da se predmetnim okolnostima ne primjenjuju odredbe o izgradnji, što znači da ne postoji obaveza izdavanja UT uslova, pribavljanja mišljenja nadležnih organa na UT uslove, izrada projekta, revizija i stručni nadzor. Svakako da je dobro pravilo struke da se čak i u vanrednim okolnostima uradi projekat, ali u okolnostima iz člana 111 ne postoji zakonska obaveza za to, kao i za sve aktivnosti koje prethode i slijede.

Ali, pošto regulative oblasti ZoP, ZŽS i ZZR ne prepoznaju ograničenja primjene u dijelu izgradnje objekata, pogledajmo šta kažu odredbe:

- Zakon o zaštiti i spašavanju, član 89, stav 1: „Prije početka izgradnje ili rekonstrukcije investicionog objekta, investitor je dužan da pribavi saglasnost Ministarstva u pogledu zaštite od požara i eksplozija na revidiranu tehničku dokumentaciju - projekat, odnosno elaborat zaštite od požara (...)“
- Zakon o zaštiti i spašavanju, član 90: „Odobrenje za upotrebu izgrađenog ili rekonstruisanog objekta za koji Ministarstvo izdaje protivpožarnu saglasnost može se izdati kada se, u skladu sa propisima o izgradnji objekata, utvrdi da su u njima obezbijeđene mjere zaštite od požara predviđene u planskoj i tehničkoj dokumentaciji.“
- Zakon o zaštiti i zdravlju na radu, član 9, stav 2: „Investitor je dužan da od ovlašćenog pravnog lica ili preduzetnika obezbijedi reviziju (ocjenu) da je tehnička dokumentacija izrađena u skladu sa propisima koji se odnose na zaštitu i zdravlje na radu, tehničkim propisima i standardima, da je obezbijeđena zaštita zaposlenih u objektima za koje je izrađena tehnička dokumentacija za proces rada koji će se obavljati u njima, odnosno da su ispunjeni uslovi iz tehnološkog projektnog zadatka.“
- Zakon o zaštiti i zdravlju na radu, član 10, stav 3: „Pri izgradnji, rekonstrukciji ili rušenju objekta, poslodavac koji izvodi radove dužan je da izradi plan mjera zaštite i zdravlja na radu.“
- Zakon o zaštiti i zdravlju na radu, član 12: „Prilikom tehničkog pregleda izgrađenog ili rekonstruisanog objekta, vršilac tehničkog pregleda dužan je da utvrdi da li su obezbijeđene mjere zaštite i zdravlja na radu iz tehničke dokumentacije i propisani uslovi rada za proces rada koji se obavlja u objektu.“
- Zakon o procjeni uticaja na životnu sredinu [14], član 7, stav 1: „Procjena uticaja vrši se za projekte za koje: 1) je obavezna izrada elaborata procjene uticaja (u daljem tekstu: elaborat); 2) se može zahtijevati izrada elaborata.“





Kada se podvuče crta, iako u uslovima definisanim članom 111 Zakon o PPIO ne zahtijeva ništa, ukratko drugi zakoni zahtijevaju da obezbjedi sljedeće:

1. Projekat/elaborat zaštite od požara i saglasnost MUP-a na isti
2. Plan mjera zaštite i zdravlja na radu
3. Elaborat o procjeni uticaja na životnu sredinu ukoliko je primjenljiv i saglasnost Agencije za zaštitu životne sredine na isti.

Iz prethodno rezimirane tri tačke sam izuzeo neke u praksi nerješive situacije koje se tiču revizije projekta i tehničkog pregleda objekta.

Sad zamislite na primjer situaciju nepogode, vanrednog ili ratnog stanja kada je potrebno trenutno reagovati ali savjesno u skladu sa zakonskim odredbama. Prije nego što vlada eventualno donese drugačiju uredbu ili skupština izmijeni propis koji je na snazi, kada je potrebno brzo izgraditi neki objekat koji će zaštititi zdravlje i živote ljudi i kada se poštujući važeći zakon ne mora uraditi glavni projekat, savjesni nosilac aktivnosti bi morao obezbijediti elaborate pri čemu je za neke od njih potrebno pribaviti saglasnosti organa za tehničke uslove. A npr. postupak odobrenja elaborata o procjeni uticaja na ŽS traje čak 60 dana ne računajući vrijeme za izradu istog. U ovom smislu bih, kao slikovitu ilustraciju sa liste projekata za koje se može zahtijevati procjena uticaja na ŽS, izdvojio „kanali, nasipi i drugi objekti za odbranu od poplava“. Unesrećeni ljudi bi izvjesno postali vrlo nestrpljivi.

## 7. Zaključak

Regulativa koja se tiče gasne industrije u Crnoj Gori je slabo razvijena. Zakon o planiranju prostora i izgradnji objekata i Zakon o energetici uopšte ne obrađuju domen industrijskih, medicinskih i gasova za prehranu. U oblasti prirodnog i tečnog naftnog gasa je situacija nešto bolje definisana, ali daleko od optimalne. Zakoni se povremeno mijenjaju i dopunjavaju, ali se kao prateći pravilnici još uvijek koriste oni iz doba SFRJ a situaciju usložnjava što su neki od tih pravilnika koji se odnose na opremu pod pritiskom stavljeni van snage a novi su samo djelimično doneseni. U praksi se izlaz iz inženjerskih situacija koje nisu definisane zakonskom regulativom nalazi u korišćenju standarda vezujući se za pojam „pravila struke“ i to po sljedećoj hijerarhiji u zavisnosti šta je dostupno:

1. EN norme
2. ISO standardi
3. Dokumenti evropske asocijacije za industrijske gasove (EIGA)
4. Kodeksi prakse Britanske asocijacije za industrijske gasove i nacionalni standardi drugih država.

Što se tiče prirodnog gasa, u najavi je izgradnja jonsko-jadranskog gasovoda (IAP) i LNG terminala u Baru i u slučaju da se blagovremeno ne donese odgovarajuća zakonska regulativa, vjerujem da će se inženjerski problemi rješavati pozivajući se na postojeće zakone i pravilnike, pravila struke, i tumačenjem implicitnog značenja zakonskih odredbi.

U dijelu ograničenja u primjeni propisa, oblasti ZoP, ZZR i ZŽS su jako važne i daleko od toga toga da smatram da ove oblasti treba u potpunosti izbjeći u vanrednim okolnostima, jer upravo se na primjeru instalacija za medicinski kiseonik koje su potaknule ovu temu i u periodima vrhunaca talasa Covida 19 u svijetu desilo više slučajeva požara i eksplozija u





bolnicama, najčešće zbog neosposobljenosti rukovaoca i korisnika, dok je istovremeno ista grupa instalacija spasila nebrojene živote.

Očigledno postoji prostor za unapređenje, međusobno usklađivanje i optimizaciju odredbi propisa koji regulišu ove oblasti kada postoje okolnosti predviđene članom 111 Zakona o izgradnji prostora i izgradnji objekata i kako bi se omogućilo efikasno postupanje stranama koje mogu i žele da pomognu.

Na kraju je značajno dodati da ovaj rad predstavlja lični stručni stav autora napisan u cilju podizanja nivoa svijesti o ovoj problematici. Za zvanično tumačenje propisa neophodno je obratiti se nadležnim organima.

## 8. Literatura

- [1] Zakon o planiranju prostora i izgradnji objekata (Službeni list Crne Gore br. 64 od 6. oktobra 2017, 44/18, 63/18, 11/19, 82/20, 86/22, 4/23)
- [2] Uredba o projektima za koje se vrši procjena uticaja na životnu sredinu (Službeni list Crne Gore br. 20 od 4. aprila 2007, "Sl. listu CG", br. 47 od 8. oktobra 2013, 53/14, 37/18)
- [3] Zakon o eneregetici (Službeni list Crne Gore br. 5 od 20. januara 2016, 51/17, 82/20, 29/22, 152/22)
- [4] Zakon o zapaljivim tečnostima i gasovima (Službeni list Crne Gore br. 26 od 7. maja 2010, 31/10, 40/11, 48/15)
- [5] Zakon o zaštiti i zdravlju na radu (Službeni list Crne Gore br. 34 od 8. avgusta 2014, 44/18)
- [6] BCGA Code of Practice 36 - Cryogenic Liquid Storage at Users' Premises Revision 2: 2013 British Compressed Gases Association, Derby, UK, 2013
- [7] Zakon o prevozu opasnih materija (Službeni list Crne Gore br. 33 od 4. avgusta 2014, 13/18)
- [8] ADR - Agreement concerning the international Carriage of Dangerous Goods by Road. United Nations Publications, New York, USA, 2022
- [9] Zakon o zaštiti i spašavanju (Službeni list Crne Gore br. 13 od 18. decembra 2007, 5/08, 86/09, 32/11, 54/16, 146/21, 3/23)
- [10] Foundations of medical oxygen systems, World Health Organization; Geneva, Switzerland 2023
- [11] <https://unece.org/transport/documents/2021/01/standards/adr-multilateral-agreements-expired>
- [12] Zakon o ljekovima (Službeni list Crne Gore br. 80 od 4. avgusta 2020)
- [13] EudraLex - The Rules Governing Medicinal Products in the European Union, Volume 4 - Good Manufacturing Practice - Medicinal Products for Human and Veterinary Use, Annex 6 Manufacture of Medicinal Gases. Brussels 2010
- [14] Zakon o procjeni uticaja na životnu sredinu (Službeni list Crne Gore br. 75 od 23. novembra 2018)



## Elementi protupožarne zaštite u sustavu ventilacije *Elements of fire protection in the ventilation system*

D. Novoselović<sup>1,\*</sup>, M. Karakašić<sup>1</sup>, I. Svalina<sup>1</sup>, M. Brechelmacher<sup>1</sup>, Iva Samardžić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [dnovoselovic@unisb.hr](mailto:dnovoselovic@unisb.hr)

### Sažetak

Obzirom da ljudi oko 90% svog životnog vijeka provedu u zatvorenim prostorima jedna od osnovnih mjera zaštita od požara u graditeljstvu predstavlja izvođenje građevine sa jednom ili više protupožarnih zona s ciljem olakšanja gašenja požara, uklanjanja ljudi i materijalnih dobara. Sigurno napuštanje zgrada ljudi i siguran način djelovanja interventnih timova zahtjeva pasivnu i aktivnu zaštitu od požara. Pasivna protupožarna zaštita zasniva se na konstrukcijskoj protupožarnoj zaštiti i podjeli na požarne odjeljke. U radu su prikazani osnovni elementi protupožarne zaštite u sustavu ventilacije s detaljnijim osvrtom na protupožarne i dimovode zaklopke.

**Ključne riječi:** pasivna zaštita od požara, sustav ventilacije, protupožarna zaklopka, dimovodna zaklopka.

### Abstract

Taking into consideration that people today spend about 90% of their time in closed spaces, one of the basic fire protection measures is the design of a building with one or more fire zones with the aim of facilitating fire extinguishing, removal of people and preservation of material goods. The safe evacuation of people from buildings and the safe operation of intervention teams require passive and active fire protection. Passive fire protection is based on design of fire protection measures in the construction and division into fire zone compartments. The paper presents the basic elements of fire protection in the ventilation system with a more detailed review of fire and smoke dampers.

**Key words:** passive fire protection, ventilation system, fire damper, smoke damper.



## 1. Uvod

Zaštita od požara je skup mjera i aktivnosti koje imaju za cilj spriječiti nastanak i širenje požara, zaštititi ljude i materijalna dobra od posljedica požara, te omogućiti brzo i učinkovito gašenje požara.

Zaštita od požara obuhvaća preventivne i represivne mjere, kao i edukaciju i osposobljavanje građana i vatrogasaca za postupanje u slučaju požara. Preventivne mjere uključuju primjenu propisa o gradnji, opremanju i održavanju objekata, instalacija i uređaja koji mogu uzrokovati ili pogoršati požar, te provođenje redovitih pregleda i kontrole.

Represivne mjere uključuju organizaciju i opremanje vatrogasnih jedinica, izradu planova zaštite od požara, te provedbu vježbi i simulacija. Edukacija i osposobljavanje građana i vatrogasaca obuhvaća informiranje o opasnostima od požara, načinima prevencije i gašenja požara, te pravilima ponašanja u slučaju požara. Na slici 1. prikazana je ilustracija zgrade u plamenu.



**Slika 1.** Zgrada u plamenu

Prema [1] sustav zaštite od požara podrazumijeva planiranje zaštite od požara, propisivanje mjera zaštite od požara građevina, ustrojavanje subjekata zaštite od požara, provođenje mjera zaštite od požara, financiranje zaštite od požara te osposobljavanje i ovlašćivanje za obavljanje poslova zaštite od požara, s ciljem zaštite života, zdravlja i sigurnosti ljudi i životinja te sigurnosti materijalnih dobara, okoliša i prirode od požara, uz društveno i gospodarski prihvatljiv požarni rizik.

U cilju zaštite od požara poduzimaju se organizacijske, tehničke i druge mjere i radnje za:

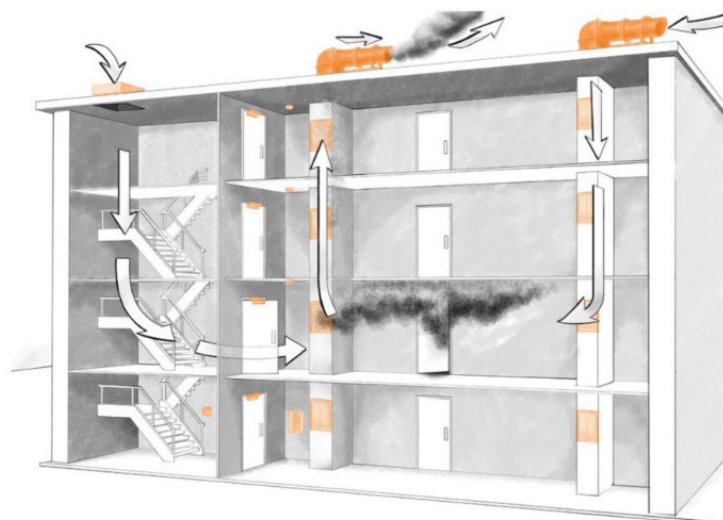
- otklanjanje opasnosti od nastanka požara,
- rano otkrivanje, obavješćivanje te sprječavanje širenja i učinkovito gašenje požara,
- sigurno spašavanje ljudi i životinja ugroženih požarom,
- sprječavanje i smanjenje štetnih posljedica požara,
- utvrđivanje uzroka nastanka požara te otklanjanje njegovih posljedica.



Prilikom projektiranja i građenja građevine mora se osigurati zaštita od požara, kao jedan od bitnih zahtjeva za građevinu propisanih posebnim propisom kojim se uređuje područje prostornog uređenja i gradnje, tako da se u slučaju požara [2]:

- očuva nosivost konstrukcije tijekom određenog vremena utvrđena posebnim propisom,
- spriječi širenje vatre i dima unutar građevine,
- spriječi širenje vatre na susjedne građevine,
- omogući da osobe mogu neozlijeđene napustiti građevinu, odnosno da se omogući njihovo spašavanje,
- omogući zaštita spašavatelja.

Podaci za projektiranje mjera zaštite od požara u glavnom projektu, koji je sastavni dio potvrde glavnog projekta, građevinske dozvole, odnosno rješenja za građenje prema propisima kojima se uređuje područje građenja, dobivaju se iz elaborata zaštite od požara koji je poslužio kao podloga za njegovu izradu. Elaborat zaštite od požara izrađuje se samo za građevine skupine 2 (zahtjevne građevine) [2]. Zahtjevne građevine definirane su Pravilnikom o razvrstavanju građevina u skupine po zahtjevnosti mjera zaštite od požara [3]. Elaborat predstavlja skup podataka (zahtjeva i/ili ograničenja) o sustavnoj zaštiti od požara građevine, a sastoji se od tekstualnog dijela i grafičkih priloga. Tekstualni dio elaborata sastoji se od općeg i stručnog dijela. Grafički prilozi elaborata moraju biti usklađeni s tekstualnim dijelom, a sadrže shematski prikaz značajki načina uporabe građevine, požara koji može nastati u građevini te načina napuštanja odnosno spašavanja osoba iz građevine [4]. Pravilnikom [5] propisuje se otpornost na požar te drugi zahtjevi koje građevina mora zadovoljiti u slučaju požara u svrhu sprječavanja širenja vatre i dima unutar građevine, sprječavanja širenja požara na susjedne građevine, omogućavanja da osobe mogu neozlijeđene napustiti građevinu, odnosno osiguravanje njihovog spašavanja i zaštite spašavatelja. Na slici 2. prikazana je ilustracija sustava kontrole dima radi omogućavanja sigurnog napuštanja građevine.



**Slika 2.** Sustav kontrole dima [6]



## 2. Aktivna i pasivna zaštita od požara

Radi sprječavanja širenje vatre i dima građevina se dijeli na požarne i/ili dimne odjeljke, ovisno o njenoj namjeni i ostalim parametrima (požarno opterećenje, zaposjednutost prostora, visina, sustavi za automatsku dojavu i gašenje požara i drugo). Podjelom na požarne i/ili dimne odjeljke moraju biti obuhvaćeni evakuacijski putevi, atriji, vertikalni kanali za vođenje raznih instalacija (ventilacijskih i klimatizacijskih sustava i slično), okna dizala ako međusobno povezuju više požarnih odjeljaka, prostori za smještaj pogonskih uređaja, prostori za smještaj sredstava i medija sustava za automatsku dojavu i gašenje požara, ukoliko prema posebnom propisu njihov smještaj nije dozvoljen u štićeni prostor, podrumске i tavanске etaže i drugi prostori s povećanom opasnosti od nastanka požara i/ili eksplozija. Požarni i/ili dimni odjeljak mora imati određenu otpornost na požar i/ili propusnost dima čime se postiže uvjet da se požar i dim ne proširi unutar građevine, odnosno susjedne građevine, unutar određenog vremena. Kako bi požarni i/ili dimni odjeljci ispunjavali traženu funkciju, mora biti ispunjen uvjet ukupne stabilnosti nosive konstrukcije, čija otpornost na požar mora biti jednaka ili veća od otpornosti na požar pojedinačne konstrukcije ili elementa s najvećom otpornosti na požar, pojedinog odjeljka [5].

### 2.1 Aktivna zaštita od požara

Aktivna zaštita od požara se odnosi na sustave, uređaje i opremu koji se koriste za otkrivanje, dojavu i gašenje požara, kao i za kontrolu dima i topline iz prostora. Ovi sustavi su dizajnirani da automatski reagiraju na požar i poduzmu mjere za njegovo suzbijanje i sprječavanje daljnjeg širenja[7].

Sustavi aktivne zaštite od požara:

- Sustavi za otkrivanje i dojavu požara: Ovi sustavi koriste senzore i detektore za otkrivanje prisutnosti požara. Kada se detektira požar, sustav automatski aktivira alarme kako bi upozorio ljude u blizini i pokrenuo protupožarne mjere.
- Sustavi za gašenje požara: Ovi sustavi uključuju sustave za gašenje požara i sustave za raspršivanje vode. Oni automatski aktiviraju odgovarajuće metode gašenja požara kako bi suzbili vatru i spriječili njezino širenje.
- Sustavi za kontrolu dima: Ovi sustavi koriste ventilaciju i sustave za odvođenje dima kako bi osigurali siguran izlazak ljudi iz zgrade u slučaju požara. Oni smanjuju količinu dima i topline u prostoru kako bi olakšali evakuaciju.

Važno je da se aktivna zaštita od požara redovito održava i provjerava kako bi se osigurala njena ispravnost i funkcionalnost. Postoje propisi i pravilnici koji reguliraju ispitivanje i provjeru aktivnih sustava zaštite od požara. Aktivna zaštita od požara se često kombinira s pasivnom zaštitom od požara kako bi se osigurala cjelovita i učinkovita zaštita.

### 2.2 Pasivna zaštita od požara

Pasivna zaštita je skupina sustava koji zgradu dijele na požarne odjeljke pomoću protupožarnih zidova, stropova i konstrukcijske zaštite, sprječavajući brzo širenje vatre i





štiteći građevinsku konstrukciju što je dulje moguće kako bi stanari mogli sigurno napustiti zgradu [7].

Ova vrsta zaštite obuhvaća različite mjere i sustave koji se koriste za sprječavanje širenja požara, ograničavanje štete i zaštitu ljudi i imovine.

Pasivne mjere zaštite od požara očituju se kroz:

- Izgradnja protupožarnih zidova koji dijele prostorije ili zgrade na požarne odjeljke. Ovi zidovi su izrađeni od materijala otpornih na vatru i služe kao barijera koja sprječava širenje požara s jednog područja na drugo.
- Upotreba materijala otpornih na vatru u građevinskim elementima kao što su zidovi, stropovi i podovi. Ovi materijali imaju svojstva koja usporavaju širenje požara i smanjuju rizik od propadanja konstrukcije.
- Primjena protupožarnih premaza na površine kako bi se povećala otpornost materijala na vatru. Ovi premazi stvaraju zaštitni sloj koji sprječava širenje požara i smanjuje brzinu gorenja materijala.
- Podjela zgrade na manje požarne odjeljke pomoću protupožarnih zidova, stropova i konstrukcijske zaštite. Ovi odjeljci ograničavaju širenje požara na određeni dio zgrade, omogućavajući sigurno evakuiranje ljudi i sprječavajući daljnju štetu.
- Brtvljenje i zaštita prodora instalacija kroz protupožarne zidove i stropove. Ovo uključuje korištenje protupožarnih brtvi i materijala kako bi se spriječilo širenje požara kroz otvore i prodore u zidovima i stropovima.

Kombinacija ovih pasivnih mjera zaštite od požara s aktivnim sustavima za gašenje požara osigurava cjelovitu i učinkovitu zaštitu od požara. Pasivna zaštita djeluje kao prva linija obrane, sprječavajući širenje požara i omogućavajući aktivnim sustavima da djeluju učinkovito. Primjeri pasivnih mjera zaštite od požara koje se mogu kombinirati s aktivnim sustavima je pravilno dizajnirani sustavi ventilacije mogu pomoći u kontroliranju širenja dima i topline u slučaju požara. Ovi sustavi mogu uključivati otvore za izlazak dima, sustave za odvođenje dima i ventilacijske kanale koji olakšavaju evakuaciju i smanjuju rizik od gušenja dimom.

### 3. Elementi protupožarne zaštite u sustavu ventilacije

Tehnička svojstva sustava ventilacije prema [8] moraju biti takva da tijekom trajanja zgrade u koju su ugrađeni, uz propisano, odnosno projektom određeno izvođenje i održavanje sustava podnesu sve utjecaje uobičajene uporabe i utjecaje okoliša tako da:

- se u slučaju požara spriječi širenje vatre i dima unutar zgrade, odnosno širenje vatre na susjedne građevine,
- se u zgradi zadovolje uvjeti kvalitete zraka te spriječi sakupljanje vlage u dijelovima zgrade ili na površinama unutar zgrade,
- se izbjegnu moguće ozljede korisnika zgrade,
- razina buke kao posljedica rada sustava bude na takvoj razini da ne ugrožava zdravlje i da se osigura noćni mir i zadovoljavajući uvjeti za odmor i rad te da se sustavima spriječi širenje buke između pojedinih prostora u zgradi.

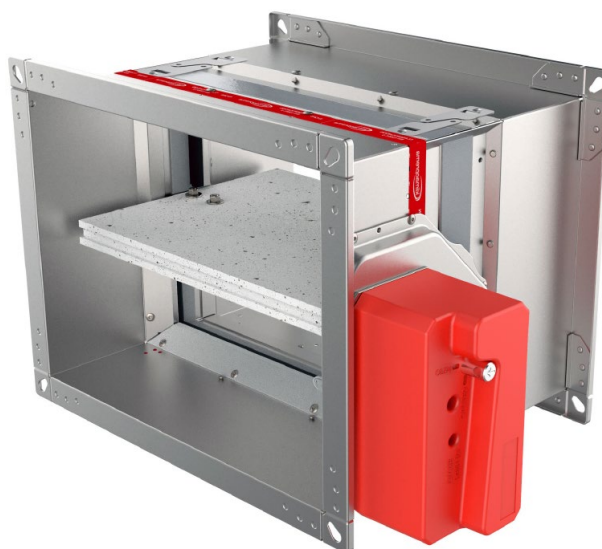


Elementi protupožarne zaštite u sustavu ventilacije igraju ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti prostora od širenja požara i dima putem ventilacijskih kanala. Ovi elementi osmišljeni su kako bi se spriječilo širenje požara i dima unutar sustava ventilacije, što pomaže u zaštiti ljudi, imovine i okoliša. Elemente protupožarne zaštite u sustavu ventilacije možemo podijeliti na:

- Protupožarni kanali - izrađeni su od materijala otpornih na visoke temperature i imaju visoke standarde protupožarne zaštite. Oni se koriste za transport zraka, ali i kao barijera protiv širenja požara kroz sustav ventilacije.
- Požarna brtva - koristi se na mjestima gdje ventilacijski kanali prolaze kroz protupožarne pregrade ili zidove. Požarne brtve osiguravaju da se otvor u protupožarnoj pregradi hermetički zatvori u slučaju požara, sprječavajući širenje požara i dima.
- Protupožarne zaklopke - smještene su unutar ventilacijskih kanala i reagiraju na povišenu temperaturu ili detekciju dima. U slučaju požara automatski zatvaraju kanal kako bi spriječili širenje požara i dima na druga područja zgrade.
- Dimovodne zaklopke - također reagiraju na prisutnost dima u ventilacijskim kanalima. Kada se detektira dim, protupožarni prekidači se aktiviraju i zatvaraju kanal kako bi spriječili širenje dima na druga područja.

### 3.1 Protupožarna zaklopka

Protupožarne zaklopke koriste se za sprečavanje širenja požara kroz ventilacijske kanale, između požarnih zona. Protupožarne zaklopke sastoje se od kućišta, zaporne lamele od kalcij-silikata, zapornog mehanizma koji je izvan struje zraka te ručnog, ili motornog pogona. Kućište zaklopke je izrađeno od pocinčanog čeličnog lima ili nehrđajućeg čelika. Zaporna lamela je opremljena sa mjedenim ležajevima i brtvama od poliuretanske i elastomerske gume. Protupožarna zaklopka prikazana je na slici 3.



**Slika 3.** Protupožarna zaklopka [9]



Ručni pogon sa povratnom oprugom opremljen je termičkim prekidačem koji se automatski aktivira kada temperatura unutar kanala dosegne 72 °C. Može se aktivirati i ručno pritiskom na gumb na pogonu. Elektromagnetni mehanizam opremljen je povratnom oprugom i elektromagnetom za daljinsko aktiviranje. Protupožarne zaklopke s električnim pogonom opremljene su pogonom u izvedbama od 24 V ili 230 V. Aktiviranje protupožarnih zaklopki opremljenih električnim pogonima se izvršava putem termičkog prekidača od 72 °C ili 95 °C ili daljinski putem upravljačkog signala. Ponovna aktivacija protupožarne zaklopke može se izvršiti i daljinski putem upravljačkog signala. Svi električni pogoni opremljeni su krajnjim prekidačima za signalizaciju položaja.

### 3.2 Dimovodna zaklopka

Dimovodne zaklopke, poznate i kao dimovodne rešetke ili dimovodne pregrade, su elementi protupožarne zaštite koji se koriste u sustavima ventilacije i dimnjacima kako bi se spriječilo širenje dima, plina i topline kroz ventilacijske kanale ili dimnjake u slučaju požara. Dimovodna zaklopka prikazana je na slici 4.



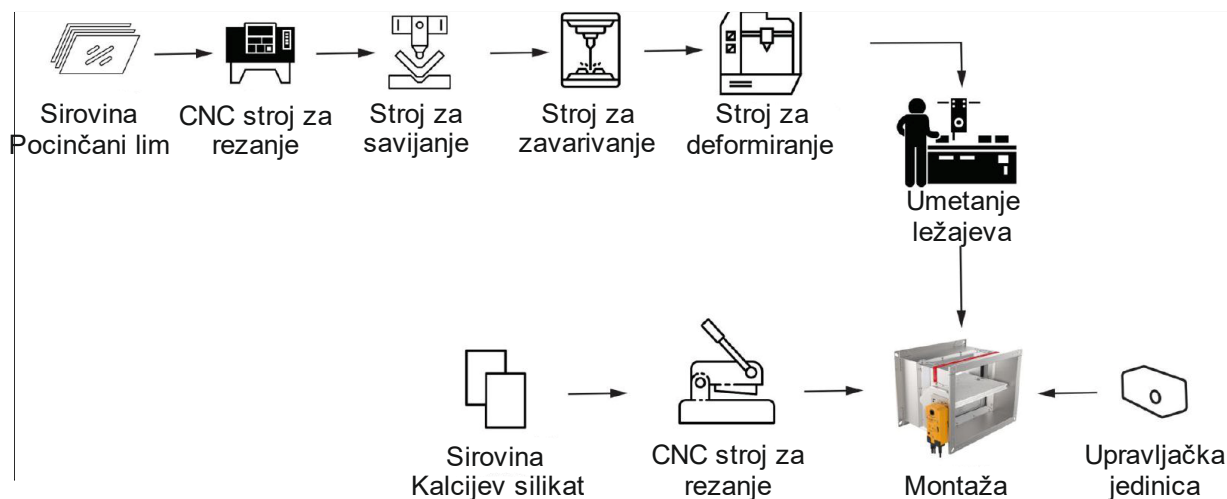
**Slika 4.** Dimovodna zaklopka [10]

Kućište je izrađeno od krutog i termički stabilnog materijala: kalcijev silikat. Zaklopka ima dva upravljačka položaja: otvorena i zatvorena. U slučaju detekcije dima, električni pogon prima signal i otvara zaklopku odnosno mijenja upravljački položaj. Zaklopke su opremljene s električnim pogonom za otvaranje / zatvaranje zaklopke. Lamele, ležajevi osovina i pogonski mehanizam izrađeni su od pocinčanog čelika. Čelični kutni spojevi dolaze zajedno sa zaklopkom za jednostavno spajanje na ventilacijske kanale. Sve dimoodvodne zaklopke mogu se dodatno opremiti mrežnim modulima za integraciju sa standardnim sustavima sabirnica.

## 4. Razvoj elemenata protupožarne zaštite u sustavu ventilacije

Na temelju rastuće tržišne potražnje, nove regulative i trendova sve većeg boravka ljudi u zatvorenim prostorima (ljudi oko 90% svog životnog vijeka provedu u zatvorenim prostorima), nametnula se potreba istraživanja s ciljem povećanja sigurnosti boravka ljudi u

zatvorenim prostorima. Gledajući s aspekta sigurnosti, proizvodi razvijeni u segmentu protupožarne zaštite igraju važnu ulogu u zaštiti u slučaju pojave požara, kao elementi pasivne zaštite. Tijekom razvoja potrebno je istražiti nove, ekološki prihvatljive materijale i postupke obrade tih materijala koji će u konačnici rezultirati novom generacijom proizvoda koja će imati bolje performanse u pogledu otpornosti na visoke temperature u odnosu na postojeće proizvode na tržištu. Slika 5. prikazuje proizvodni proces protupožarne zaklopke.



**Slika 5.** Proizvodni proces protupožarne zaklopke

S tehnološkog stanovišta izazovi koji stoje pred razvojnim timom su:

- odabir odgovarajućeg materijala, zadovoljavajućeg koeficijenta toplinske vodljivosti,
- izbor tehnologije za obradu odabranog materijala,
- dizajn i konstrukcija proizvoda,
- definiranje proizvodnog procesa; proizvodnja prototipnog uzorka,
- ispitivanje prema normama.

Tehnološki rizici u razvoju elemenata protupožarne zaštite u sustavu ventilacije najizraženiji su u prvoj, istraživačkoj fazi projekta, u kojoj se pokušava provjeriti i dokazati inovativni koncept novog proizvoda. Naime, često nije sigurno dali je moguće izraditi planirani proizvod traženih performansi po prihvatljivoj cijeni. Rizik koji je nužno istaknuti predstavlja potencijalna nemogućnost pronalaska adekvatnog proizvoda traženih karakteristika. Naime, nužno je istražiti pogodnost testnih proizvoda izrađenih od različitih materijala. S obzirom na to da različiti materijali, tehnologije spajanja i proizvodni procesi mogu imati presudnu ulogu kod iznalaženja optimalnog rješenja nužno je na laboratorijskoj razini istražiti utjecaj navedenog na funkcionalne osobine proizvoda. Kako bi se adresirali opisani rizici bit će potrebno razviti prototip proizvoda u laboratorijskom okruženju. U slučaju da se dokaže funkcionalnost prototipa, demonstrira njegova tehnička izvedivost te mogućnost komercijalne primjene, bit će moguće prijeći na fazu eksperimentalnog razvoja proizvoda.



U navedenoj fazi analizirati će se rizici više kategorije, kroz prijenos tehnološkog procesa izrade proizvoda iz laboratorijskih na industrijske uvjete, te smanjivanje rizika vezanih uz mogućnost postizanja finalnog dizajna i funkcionalnosti proizvoda pogodnog za industrijsku proizvodnju, te osiguranje visoke kvalitete proizvoda.

## 5. Zaključak

Zaštita od požara je skup mjera i aktivnosti koje imaju za cilj spriječiti nastanak i širenje požara, zaštititi ljude i materijalna dobra od posljedica požara, te omogućiti brzo i učinkovito gašenje požara. Jednu od osnovnih mjera zaštite od požara u graditeljstvu predstavlja izvođenje građevine sa jednom ili više protupožarnih zona s ciljem olakšavanja gašenja požara, uklanjanje ljudi i materijalnih dobara. Kombinacija pasivnih mjera zaštite od požara s aktivnim sustavima za gašenje požara osigurava cjelovitu i učinkovitu zaštitu od požara. Pasivna zaštita djeluje kao prva linija obrane, sprječavajući širenje požara i omogućavajući aktivnim sustavima da djeluju učinkovito.

Cilj razvoja elemenata protupožarne zaštite u sustavu ventilacije je razviti inovativni proizvod s visokim potencijalom internacionalizacije i time ojačati konkurentsku poziciju na globalnom tržištu; zajedničkim radom istraživača u primijenjenim istraživanjima na području tehničkih i organizacijskih znanosti, stručnjaka u proizvodnim poduzećima i informatičkih stručnjaka ojačati interne kapacitete za istraživanje i razvoj, te komercijalizaciju rezultata istraživačkih aktivnosti.

## Zahvala

Autori zahvaljuju partneru i glavnom koordinatorskom EU projekta „Centar kompetencija za napredni inženjering Nova Gradiška CEKOM NI NG (KK.01.2.2.03.0011)“ koji je podržao, omogućio i sudjelovao u izradi ovog rada.

## 6. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od požara NN 92/2010 (24.7.2010.).  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010\\_07\\_92\\_2588.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_07_92_2588.html)
- [2] Zakon o gradnji NN 153/2013 (18.12.2013.).  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_12\\_153\\_3221.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_12_153_3221.html)
- [3] Pravilnik o razvrstavanju građevina u skupine po zahtjevanosti mjera zaštite od požara NN 56/2012 (17.5.2012.).  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012\\_05\\_56\\_1389.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_05_56_1389.html)
- [4] Pravilnik o sadržaju elaborata zaštite od požara nn 51/2021 (4.5.2012.).  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012\\_05\\_51\\_1254.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_05_51_1254.html)
- [5] Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara NN 29/2013 (8.3.2013.).  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_03\\_29\\_505.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html)
- [6] Dwyer, T. Design and implementation for effective smoke control in buildings, *Cibse Jurnal*. 2020. URL: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2020-08-smo/>
- [7] Jusufović, M. Priručnik za polaganje ispita iz protivpožarne zaštite, Sarajevo, 2018.





- [8] Tehnički propis o sustavima ventilacije, djelomične klimatizacije i klimatizacije zgrada NN 3/2007 (8.1.2007.)  
URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007\\_01\\_3\\_201.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_01_3_201.html)
- [9] Klimaoprema: Katalog proizvoda FD Protupožarna zaklopka – Protupožarna zaštita Verzija 2.2.3.
- [10] Klimaoprema: Katalog proizvoda FSD Dimovodna zaklopka – Zaštita od požara



## **Measurement with Laser Rangefinder Mjerenje laserskim daljinomjerom**

**H. Glavaš<sup>1,\*</sup>, L. Egredžija<sup>1</sup>, R. Kljaić<sup>1</sup>, D. Koprivanac<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Osijek, Croatia

<sup>2</sup>Veleučilište u Virovitici

\* Corresponding author. E-mail: [hrvoje.glavas@ferit.hr](mailto:hrvoje.glavas@ferit.hr)

### **Abstract**

Measurement of longer distances is usually done with a laser rangefinder. The measurement procedure is simple, but there are limitations. The most important limitation is the reduction of the nominal value of the range depending on the illumination due to the measured point cannot be detected. The measurement range is reduced to 26% of the nominal value for a luminance measured at a point of 422 cd/m<sup>2</sup> and to 9% for a luminance of 14·10<sup>3</sup> cd/m<sup>2</sup>. The limitation is represented by the transparency of the substrate, the decrease in brightness of the laser beam at a measured point with distance, and the angle of incidence that leads to deformation. The measured point at a 1 m distance occupies an area of 3 x 4.5 mm, and at a 58 m distance, it grows to 23 x 35 mm. A measured point of 2.5 mm at 54 cm takes a deformation of 20 mm at an angle of incidence of 10°. The paper aims to provide insight into the operation of laser rangefinders and highlight the measurement challenges encountered in practice.

**Keywords:** laser rangefinder, Bosch GLM 80, measurement uncertainty

### **Sažetak**

Mjerenje većih udaljenosti uobičajeno je provoditi laserskim daljinomjerom. Postupak mjerenja je jednostavan, ali postoje ograničenja. Osnovno ograničenje je smanjenje nazivne vrijednosti dometa u ovisnosti od osvijetljenosti zbog nemogućnosti detekcije mjerene točke. Mjerni domet smanjuje se na 26% nazivnog u slučaju luminancije mjerene točke od 422 cd/m<sup>2</sup> te na 9% u slučaju 14·10<sup>3</sup> cd/m<sup>2</sup>. Ograničenje predstavlja transparentija podloge, smanjenja sjajnosti mjerene točke s udaljenošću te upadni kut koji dovodi do deformacije. Mjerena točka na udaljenosti 1m zauzima površinu od 3x4,5 mm, a na udaljenosti od 58 m raste na 23x35 mm. Mjerna točka od 2,5 mm na 54 cm u slučaju upadnog kuta od 10° poprima deformaciju na 20 mm. Cilj rada je pružiti uvid u način rada laserskih daljinomjera i prikazati izazove mjerenja koji se pojavljuju u svakodnevnoj praksi.

**Ključne riječi:** Laserski daljinomjer, Bosch GLM 80, mjerna nesigurnost



## 1. Introduction

Length, as a basic physical quantity that describes the distance between two points in space, can be measured with a measuring tape or rangefinders, devices for measuring distances. Mechanical rangefinders and measuring tapes have replaced laser rangefinders in everyday practice. The paper aims to provide insight into how laser rangefinders work and show the measurement challenges that appear in everyday practice. An affordable Bosch GLM 80 Professional (~€200) and a Gossen Mavolux 5032C USB light meter were used to implement the designed measuring setups, [1].

## 2. Laser rangefinders

### 2.1. Historical development of remote rangefinders

The first commercial handheld laser rangefinder by Leica Geosystems was presented in 1993 in Paris at the construction fair. A Leica Disto rangefinder the size and weight of a brick could measure distances up to 30 meters with an accuracy of 3.175 mm [2]. Over the years, the maximum distance and precision of laser rangefinders have increased while the device's size itself has decreased. In addition to distance measurement, indirect measurement options such as area calculation, volume calculation, addition and subtraction, angle measurement and spirit level function are integrated [3]. The newest laser rangefinders are the size of smaller mobile phones and weigh up to 200 g, all with the ability to measure at distances of over 150 meters with a precision of  $\pm 1.5$  mm with a digital viewfinder function for easier point finding. Connection and data transfer to a computer is enabled using a USB cable or via Bluetooth [4].

### 2.2. The basic principle of operation of a laser rangefinder

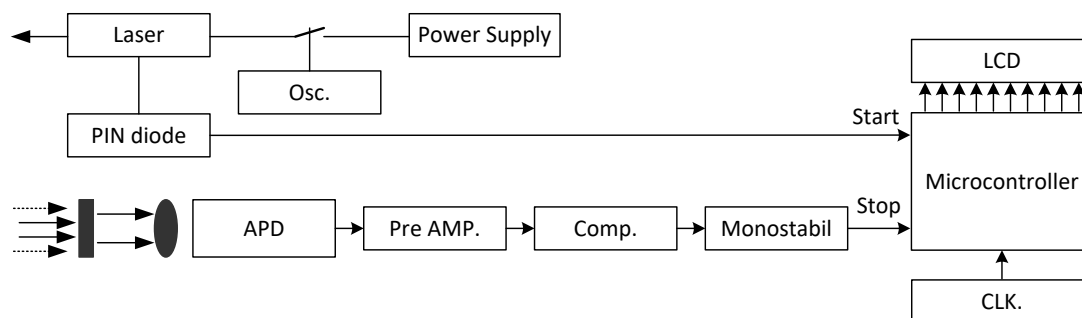
The basic element of the laser rangefinder is a laser that emits a narrow beam of red light with a wavelength of 670  $\mu\text{m}$ , while the rest of the technical solution depends on the principle of the device's operation, which can be based on the principle of pulse telemetry or phase shift.

#### 2.2.1. Principle of pulse telemetry

The principle of pulse telemetry is based on determining the time required for the light pulse to arrive from the transmitter, or laser, to the destination and back to the photodetector on the device. This principle is also called Time-of-flight (TOF) [5]. According to Figure 1. a laser rangefinder that works on this principle consists of several basic units [6]:

1. Transmitter unit that contains a laser device, a power source and an oscillator that serves to determine the number of pulses sent in time.
2. The analogue unit for receiving the return pulse contains a receiving lens, an optical filter, an avalanche photodiode that serves to detect the light pulse, and after the photodiode, there is a low-noise preamplifier that serves to amplify the received signal.

3. The digital unit for reception includes an isolation circuit, a microcontroller circuit for signal processing and a circuit for the interface to the user, i.e. the screen.



**Figure 1.** Schematic representation of a time-of-flight range finder system, [1]

The measured distance in abbreviated form can be defined by the expression (1) where N indicates the number of pulses that the counter counted between the START and STOP signals, C indicates the speed of light, and  $f_{clk}$  represents the clock frequency

$$l = \frac{C \cdot N}{2 \cdot f_{clk}} \quad (1)$$

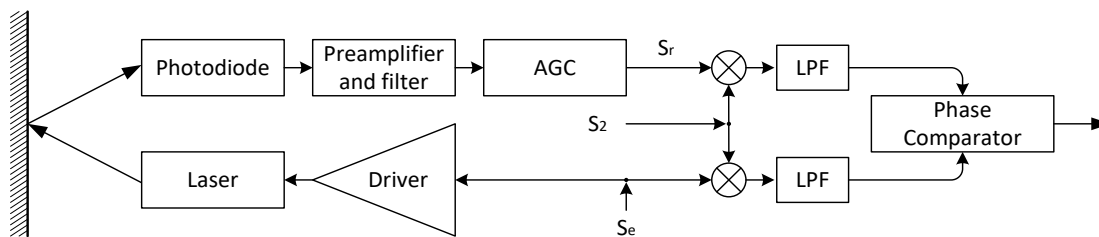
The problem with precise measurement is the internal disturbances of the components. Disturbances caused by the pulsed operation of the laser are removed by electromagnetic interference filters (EMI filters), while interference in the digital receiving circuit is removed by separating the power supply and grounding the digital circuit from other circuits. The greatest interference is therefore created by the analogue receiving circuit, that is, the preamplifier located in that circuit.

### 2.2.2. The principle of phase shift

Rangefinders that use the principle of phase shift [7] are based on counting the wavelengths that are reflected from the destination and returned to the rangefinder and determining the phase difference between the transmitted and received light beams as can be seen in Figure 2., are consist of three units:

1. laser with control elements for laser diode and output optics.
2. receiving avalanche photodiode, amplifier, mixer, filter and AD (analogue-digital) converter.
3. process unit that contains additional low-pass filters, a comparator for phase comparison and a microprocessor that is not visible in the schematic representation.

With this type of laser rangefinder, the light signals are modulated at a constant frequency. The control circuit of the laser diode generates a sinusoidal signal of a certain frequency that modulates the direct current of the laser diode. In this way, light is emitted with a sinusoidal power shape and has a certain frequency. After the light is reflected from the object to which the distance is measured, it returns to the rangefinder where, after passing through the input optics, it is detected by a photodiode and converted into an electrical signal.



**Slika 2.** The block diagram of a phase shift laser altimeter system, [1]

The distance  $l$  from the rangefinder to the object of measurement is shown by expression (2) where  $f_{izl}$  is the frequency with which the emitted light is modulated,  $\Delta\varphi$  is the phase shift,  $k$  is Boltzmann's constant and  $c$  is the speed of light.

$$l = \frac{c(\Delta\varphi + 2 \cdot k \cdot \pi)}{4 \cdot \pi \cdot f_{izl}} \quad (2)$$

With this type of rangefinder, interference occurs due to several factors: crosstalk, interference, too high amplitudes in the radio frequency circuit and intermediate frequency drift.

### 3. Measurement with a laser range finder

#### 3.1. Basic characteristics of the Bosch GLM 80 laser rangefinder

The Bosch GLM 80 Professional device, shown in Figure 3, is a professional laser rangefinder that, in addition to measuring distance, can also measure inclination. The spirit level enables him to make indirect distance measurements.



**Figure 3.** Determining the stability of beer foam with a laser rangefinder [8]

It enables various functions, surface and volume calculations, [3]. In ideal conditions, the largest possible measured distance is 80 m. Measurement precision in normal conditions is  $\pm 1.5\text{mm}$ , while in difficult working conditions, it is  $\pm 2.5\text{mm}$ . It measures the tilt angle up to  $360^\circ$  with a precision of  $0.1^\circ$ . The 1 mW laser diode emits red light with a wavelength of 635 nm and is classified as a class 2 laser, i.e. wearing eye protection is not mandatory and there is no risk of eye injury when using the device by recommendations [9]. The device is powered by a Li-Ion battery with a capacity of 1250 mAh, which enables 25,000



measurements per charge. The memory stores the last 20 measurements. The device has an IP54 certificate.

### 3.2. Distance measurement with a laser rangefinder in conditions of high levels of illumination

Sunlight is one of the problems when measuring with a laser rangefinder in an open space. To determine the influence of high levels of illumination, two independent experiments were conducted. The first experiment required four independent measures to move away from the measurement point located on the shaded northern part of the building and read the distance until they were no longer able to read the distance because they could not locate the position of the measurement point. The substrate was grey granite across from the FERIT building in Prolaz Julija Knifer Street, and the light meter Gossen Mavolux 5032C USB [10] measured the illuminance of 7370 lx and luminance of the substrate 422 cd/m<sup>2</sup>, as can be seen on Figure 4.



**Figure 4.** Illumination and luminance at the first point of measurement

Four mutually independent operators were given the task of making an arbitrary number of measurements gradually moving away from the measured point until the measuring point becomes invisible to them. Table 1 shows the measurement results.

**Table 1.** The maximum possible measurement distance at the luminance of 422 cd/m<sup>2</sup>

No of measurements	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
1	2.666	3.520	3.019	2.915
2	8.506	9.825	8.896	9.154
3	10.756	11.787	12.281	15.226
4	14.363	13.245	19.192	19.398
5	17.279	15.057	-	20.856
6	21.075	-	-	-

From Table 1, can be concluded that the limit value of the applicability of the device is 21 m, which represents 26% of the nominal value of the measuring range. When the laser rangefinder is tried to be used on a surface that is directly illuminated by light, as shown in Figure 5, the situation is significantly less favourable. The measured illuminance values are 92700 lx while the luminance was 14250 cd/m<sup>2</sup>.



**Figure 5.** Illumination and luminance at the second point of measurement

Due to the significant luminosity of the surface, the surveyors were given the task of performing only one measurement and at that moment when they lose sight of the measurement point, which is shown in Table 2, which indicates that the high level of illumination of 92·103 lx reduces the possibility of the measurement range to 9% of the nominal value.

**Table 2.** The maximum possible measurement distance at luminance of 14250 cd/m<sup>2</sup>

Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4
4.642 m	5.246 m	6.054 m	7.334 m

### 3.3. Increasing the area of the laser beam concerning distance

By moving the measuring device away, the laser beam is scattered and its surface area increases. As the surface area increases, the gloss also decreases. According to the technical characteristics of the Bosch GLM 80 device [3], at a distance of 10 m the diameter of the point is approximately 6 mm, while at 80 m the diameter is approximately 48 mm. This data indicates that the size of the point increases by 0.6 mm for every meter of increase in the distance of the measuring device from the measured point. What the instructions don't mention is the spot's light pattern as well as its irregular shape. Figure 6 shows the growth of the point with increasing distance and the patterns that can be observed. From Table 3, it can be read that the size of the point already at 2.99 m in height exceeded the specified 6 mm at a distance of 10 m, and at 6.03 m it exceeded the specified value in terms of its width. The length of the corridor limited the maximum measurement distance to 57.55 m, where the illuminated point on the wall was 35 mm high and 23 mm wide. Table 3 shows the values of the spot size as a function of the distance of the laser range finder.



**Figure 6.** Increase of laser beam surface concerning distance

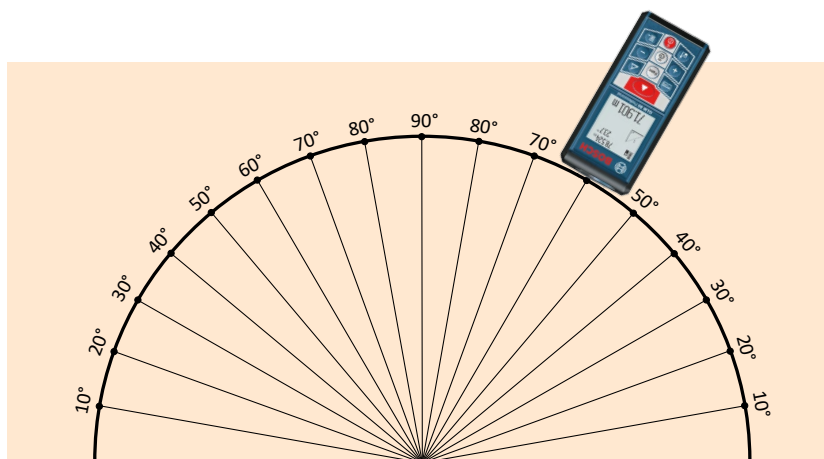
**Table 3.** Measured values of the point depending on the distance of the laser rangefinder

Distance (m)	Height (mm)	Width (mm)
1.00	4.5	3.0
2.99	6.0	4.0
6.03	7.5	6.0
14.20	9.0	7.0
26.14	17.0	11.5
38.23	26.0	18.0
50.19	29.0	21.0
57.55	35.0	23.0

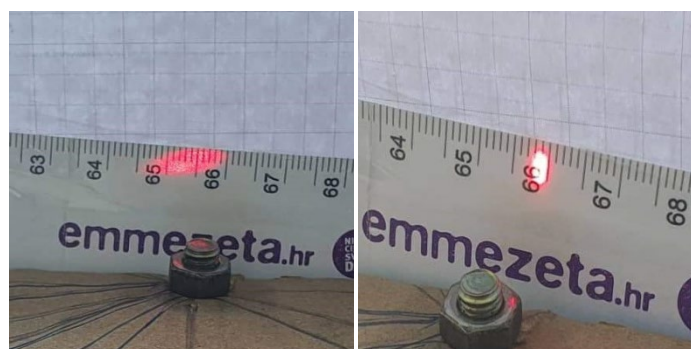
Analyzing the data presented in Table 3 can be concluded that the height of the point increases by 0.608 mm, while the width increases by 0.4 mm per meter of distance. At greater distances, the scattering of light around the bright point becomes noticeable, which is visible in Figure 6. Although the increase of the illuminated point at greater distances makes it easier to see the point, it can lead to an increase in measurement uncertainties in the case of measuring the distance to an object that does not have a flat surface.

### 3.4. Increasing the surface area of the laser beam with respect to the angle of incidence

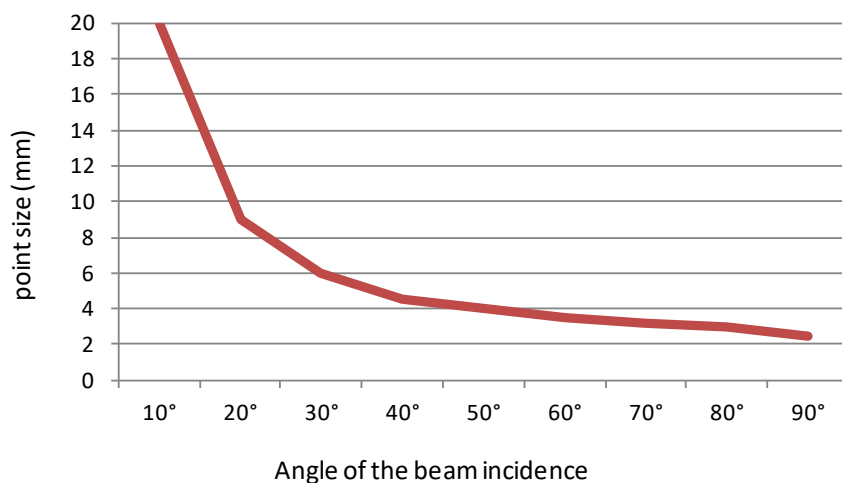
For the analysis of the influence of the measurement angle on the beam of the laser rangefinder and the accuracy of the measurement result, the measurement setup shown in Figure 7 was made. The measurement setup represents a horizontal surface on which a semicircle of radius 50 cm is drawn with sector divisions in 10° increments. The small radius of the measuring setup introduces an additional error of imprecise positioning of the measuring device. The mentioned problem can be solved by pulling out the plastic pin on the lower side of the device, which is used for positioning the device during indirect measurements and when the device housing cannot be placed on a solid support. Mentioned accessory were not used because it would distort the ratio of the length of the instrument concerning the measuring distance. After all, small incident angles represent an additional problem for the operator and make it difficult to position the beam at the measuring point. At angles smaller than 30°, significant deformation of the laser beam occurs, which can be seen in Figure 8 and Figure 9.



**Figure 7.** Floor plan of the measuring setup with a radius of 50 cm and sector division in increments of 10°



**Figure 8.** Deformation of the laser point at a small angle of incidence on the left | perpendicular to the measuring point 90° to the right



**Figure 9.** The size of the measuring point depends on the angle of incidence

### 3.5. Measurement deviation when measuring short distances.

When measuring short distances, one can see the advantage of using a measuring tape or a movable measuring device (calliper) compared to a laser rangefinder. The dimensions and shape of the device case make precise positioning difficult without support. 10 circular measurements were performed on the measuring set-up shown in Figure 7, where the mean value of the measurement data (3) and the squared deviation were calculated according to (4), and the results are shown in Table 4.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

**Table 4.** Measured values of the point depending on the distance of the laser rangefinder

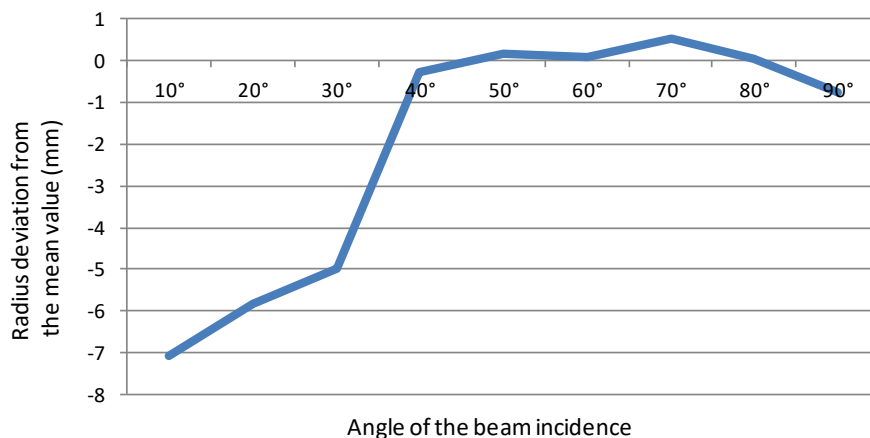
Angle	Arithmetic mean (mm)	Medium sq. deviation (mm)
10°	537.61	1.68
20°	538.89	1.93
30°	539.71	1.19
40°	544.43	1.15
50°	544.87	0.91
60°	544.78	1.03
70°	545.21	1.29
80°	544.76	0.91
90°	543.96	1.21

From Figure 9, it can be concluded that the distortion of the measured point up to an angle of incidence of 40° will not significantly affect the measurement. Respecting the conclusion





from the measurement data, the mean value of the radius of the measured set-up was determined to be 544.7 mm. The deviation of the arithmetic mean from Table 4 is shown in Figure 10.



**Figure 10.** Deviation of the measured radius as a function of the incidence angle

Figure 10 shows the deviation of the measured value of the radius of the measuring set-up due to the influence of the small angle of incidence, especially pronounced for angles less than 30°. In doing so, 10 independent measurements were noted and ten device positionings were carried out, taking care that the center of the elongated laser beam is always at the measuring point.

### 3.6. Measurement uncertainty

The measurement uncertainty obtained by repeated direct measurement [11] is calculated by the formula:

$$U_{\%} = \sqrt{u_{A\%}^2 + u_{B\%}^2} \quad (5)$$

Since Table 4 contains the values representing the arithmetic mean and the root mean square deviation of ten repeated direct measurements, it can be used:

$$u_{A\%} = \frac{u_A}{\bar{x}} 100\% \quad (6)$$

where further the expression is:

$$u_A = \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

The standard deviation of arithmetic mean values is:

$$s_x = \frac{\frac{0.0015}{\sqrt{3}}}{n} \quad (8)$$



at the same time, the amount of uncertainty of type B is shown in Table 5., [12]. It could be noted that the maximum measurement  $l_{max}$  rangefinder's range and its accuracy are expressed in the form:

$$l_{max} = 80.0000 \pm 0.0015 \text{ m}$$

where further the expression is:

$$l_{max} = 80.0000(1 \pm 0.00001875) \text{ m}$$

$$l_{max} = 80.0000(1 \pm 0.001875\%) \text{ m}$$

In this case, percentage error is also B measurement uncertainties.

**Table 5.** Calculated type A and B measurement uncertainties and total measurement uncertainty

Angle	$u_a\%$	$u_b\%$	$U\%$
10°	0.0988%	0.001875%	0.000988%
20°	0.1133%		0.001133%
30°	0.0697%		0.000697%
40°	0.0668%		0.000668%
50°	0.0528%		0.000528%
60°	0.0598%		0.000598%
70°	0.0748%		0.000748%
80°	0.0528%		0.000529%
90°	0.0703%		0.000704%

#### 4. Conclusion

Length, as a basic physical quantity describing the distance between two points in space, is usually measured with a tape measure or mechanical rangefinders. In the last 30 years, small, portable laser rangefinders have become popular, measuring longer distances more accurately, precisely, and easily. There are two basic physical operating principles, measurement of the time required for beam reflection and measurement of phase shift. When designing the application, the properties of the substrate from which the laser beam is reflected must be considered. The biggest problem in the measurement is the reduction of the visibility of the laser beam due to the increase of the ambient brightness and the radiation density of the substrate. Because of the above-mentioned measurement of longer distances outdoors, it should be scheduled in the early morning or evening hours. As the distance of the device from the measurement point increases, the surface area of the laser beam increases, but at the same time the irradiance decreases, so when measuring indoor areas with larger dimensions (e.g. gymnasiums), it should also be planned to turn off the lighting during the measurement so that the operator can better see the beam on the measurement point. Although handheld laser rangefinders are Class 2, you should avoid aiming the beam at people. The easiest way to position the beam is to gradually move away from the meter towards the measuring point and continuously follow the measuring beam to the measuring point. The described procedure sounds simple, but

requires a tripod for longer distances, as unsteady hands can easily cause loss of the measuring beam, especially at a higher illumination level.

## 5. Literature

- [1] Lovro Egredžija, Mjerenje laserskim daljinomjerom, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2022.
- [2] B. Wauters, "A Brief History of the Laser Distance Meter (LDM)", Leica Geosystems AG, Švicarska, 19.02.2019, <https://shop.leica-geosystems.com/blog/brief-history-laser-distance-meter-ldm>, accessed 04/30/2023
- [3] "Bosch GLM Professional Original Instructions", Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen Njemačka, Tooled-Up.com, 7.8.2013., [https://www.tooled-up.com/artwork/ProdPDF/Bosch\\_glm-80.pdf](https://www.tooled-up.com/artwork/ProdPDF/Bosch_glm-80.pdf), accessed 04/30/2023
- [4] GLM 150-27 Professional Laserski daljinomjer, Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen Njemačka, Bosch Professional električni alati i pribor, 2021. <https://www.bosch-professional.com/hr/hr/products/glm-150-27-c-0601072Z00>, accessed 04/30/2023
- [5] J.A. Santos Dias Fonseca, A. Baptista, M.J. Martins, J.P. Torres, Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications, Applied Physics Research, vol. 9, Canadian Center of Science and Education, 2017.
- [6] M. Nejad, S. Olyaei, "Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement", Quarterly Journal of Technology and Education, Vol.1, No.1, Jesen 2006.
- [7] M.C. Amann i suradnici, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement", Optical Engineering, Vol. 40, No. 1, 1.1.2000.
- [8] Habschied, K.; Glavaš, H.; Nyarko, E.K.; Mastanjević, K. Complementing Digital Image Analysis and Laser Distance Meter in Beer Foam Stability Determination. Fermentation 2021, 7, 113. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030113>
- [9] Laser Safety Facts, "Laser Classes", Lasers Safety Facts, Sjedinjene Američke Države, <https://www.lasersafetyfacts.com/laserclasses.html> (accessed 30.04.2023.)
- [10] Gossen, "Mavolux 5032 C USB: The precision luxmeter", Gossen Foto - und Lichtmesstechnik GmbH, Nurnberg, Njemačka, 2022., <https://gossen-photo.de/en/mavolux-5032-c-usb/>, accessed 04/30/2023
- [11] Godec Z. "Zašto nova mjerna nesigurnost?" Elektrotehnika, 39 (1996), 1-2; 13-21
- [12] Webster, John G.; Eren, H.; „Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook“, Second Edition - Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement; 2014 Taylor and Francis Group



## Moment savijanja *Bending moment*

**B. Grizelj<sup>1,\*</sup>, M. Stoić<sup>1</sup>, V. Starčević<sup>1</sup>, M. Čuletić Čondrić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište Slavonski Brod, Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: bgrizelj@unisb.hr

### Abstract

During forming, the material is stressed beyond the yield point to cause permanent deformation. That is why a moment or force is needed. The springback (elastic return) also depends on the moment. The paper gives the calculation of the bending moment using the elementary theory and the extended elementary theory. The actual residual voltage is determined by a multi-step test.

**Keywords:** moment, bending, springback

### 1. Introduction

Bending processing is very common in the metal industry. Both in small-batch and large-batch production, bending technology has recently been increasingly displacing other processing methods in machine manufacturing. Sheets and strips are most often used as semi-finished products for further processing by bending. Constructions are made using bending technology, easier than cast ones, and the production process is simpler, which is reflected in economic effects. Depending on the dimensions and shape of the piece, the bending procedure is performed:

1. tools on presses
2. with rollers on rotary machines
3. with a special device on special bending machines.

Pieces with a large radius (boilers, cylinders, tanks, etc.) are bent on rotary machines.

Special bending devices and machines are used to bend special shapes (eg pipe bending machine).

## 2. Bending moment

### 2.1 Bending

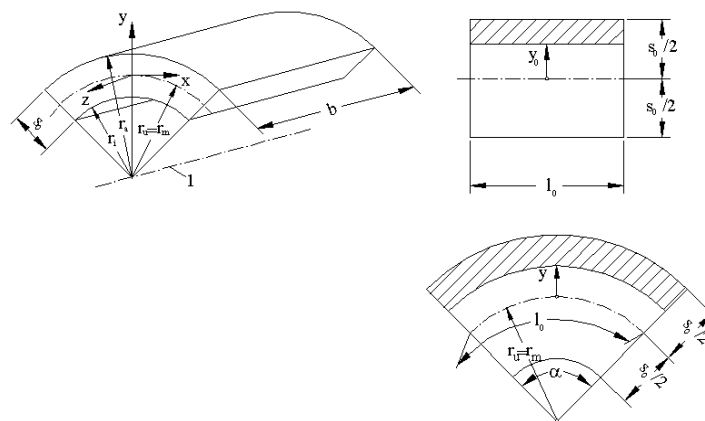
The sheet metal bending process is carried out:

1. Getting the material coefficients necessary for the calculation of the plastic flow stress curve and the unit moment curve.
2. Getting the material coefficients necessary for the calculation of the plastic flow stress curve and the unit moment curve calculating the stress distribution, and from it the springback (elastic return) and the required bending force.

He carried out the first calculations of bending stress P. Ludvig for uniaxial stress state. Many authors even today for the calculation and evaluation of the bending process use his elementary bending theory. A simplified elementary theory results from certain assumptions:

- sheet loading is performed by pure torque; the bending curve is thus part of a circle,
- the sheet for bending is wide enough, so a planar state of movement is obtained (transverse deformation of the sheet does not exist)
- cross-sections (straight and perpendicular to the longitudinal axis of the unloaded beam) remain straight and perpendicular to the curved neutral line of the bent beam even after bending,
- only stresses in the x-direction are taken into account. Bending stresses in the direction of width and thickness are ignored,
- the material is homogeneous and isotropic, the "stress-strain" curve for stretching and compression is symmetrical with respect to the zero point and
- the sheet thickness remains unchanged during bending.

For stress and deformation testing, it follows from the above that any cross-section can be observed. Coordinate axes in the picture Figure 1 are also the main axes, i.e.  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  are the main stresses.



**Figure 1.** Markings on the sheet metal [1-4]

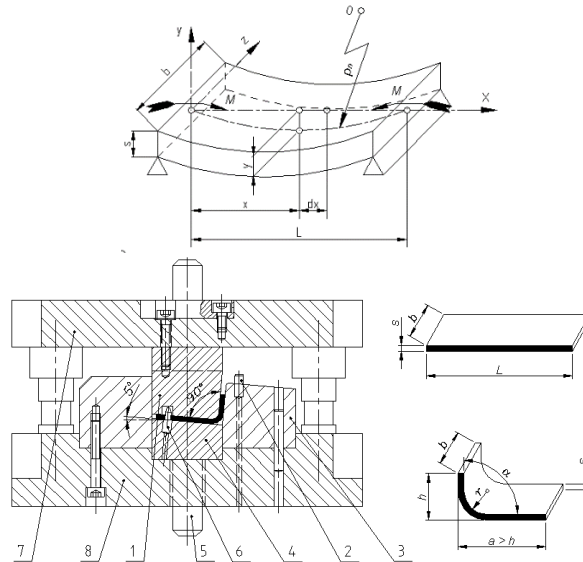
The deformation for the marginal position amounts to

$$\epsilon_{xa} = \frac{s_0}{2r_m} \quad (1)$$



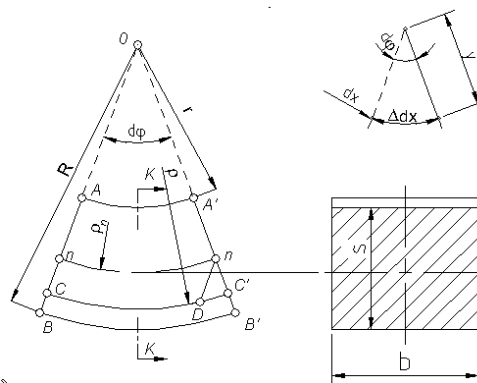
## 2.2 Deformations

If the beam is cross-sectional  $b \times s$  and length  $L$  loaded with an external moment  $M$  (which acts in the vertical plane of the support  $n \times y$ ), then he will bend. The size of the deflection depends on the distance of the observed place (distance  $x$  from the support figure 2)



**Figure 2.** Bending and tool for bending

In order to observe the deformations, the changes occurring on the length element of the support will be observed  $dx$ . Two parallel sections 'AB i A'B' carrier, at a distance  $dx$ , after loading it will remain flat, but they will rotate relative to each other by an angle  $d\phi$  (figure 3).



**Figure 3.** Neutral line

Under the influence of the moment  $M$ , the supports are elongated. Somewhere between them will lie fibers that do not change under this load (neutral fibers). These fibers create a neutral surface, and its section from the bending plane  $n \times y$  gives a neutral or elastic line (n-n). The deformations of the fiber during bending can be determined by analogy with the deformation of unit stretching, that is, the deformation of compression under pressure

$$A_{10} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

The length of the neutral fiber remains unchanged and equal to the original length

$$nn = dx = \rho_n \cdot d\varphi.$$

Some fiber C-C' at a distance y from the neutral line in the stretching zone, it will elongate by the amount of absolute elongation

$$\overline{CD} = \overline{CC'} - \overline{CD} = \Delta dx = y \cdot d\varphi$$

Unit deformation

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{y}{\rho_0}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\overline{CC'} - \overline{CD}}{\overline{CD}} = \frac{\overline{CC'} - \overline{nn}}{\overline{nn}} = \frac{\rho d\varphi - \rho_n d\varphi}{\rho_n d\varphi} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n}$$

so it is final  $\varepsilon = \frac{y}{\rho_0} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n}$ . (2)

The fibers that are farthest from the neutral line will suffer the greatest deformation (upper A-A' and lower fiber B-B'). If the neutral line passes through the center of the section, then

it is  $\varepsilon_{\max} = \frac{s}{2\rho_n} = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{\rho_n - r}{\rho_n}$

Depending on the type and size of the stresses that occur during bending of the support, as well as the size of the reduced radius of the curve, the problem of bending is treated in two ways, as:

1. bending in the elastic-plastic region ( $5 \leq \rho_n/s \leq 200$ )
2. pure plastic bending ( $\rho_n/s < 5$ )

### 2.3 Elementary theory

By elementary theory, any cross-section of a sheet can be observed for stress and deformation testing. The coordinate axes of Figure 4 are also the main axes. From the condition of balance of external and internal forces follows according to [1] the expression for moment (Figure 2)

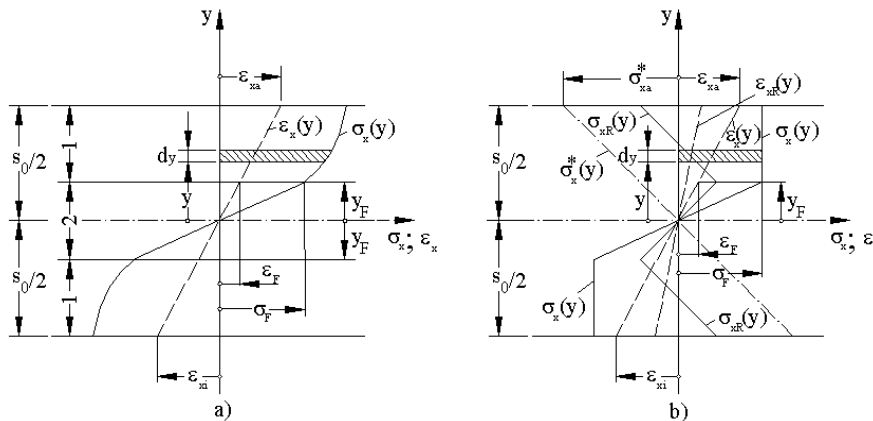


Figure 4. Formation of residual stress during bending [1]

$$M = b r_m^2 \left[ \int_{-\varepsilon_i}^0 \sigma_{ekv} \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon_a} \sigma_{ekv} \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \right]. \quad (3)$$

At the symmetrical curve " stress-strain " for stretching and compression and replacement  $\sigma_{ekv} = \sigma_x$  coming up:

$$M = 2 \cdot b \cdot \int_0^{\epsilon_a} \sigma_x(\epsilon) \cdot \epsilon \cdot d\epsilon$$

After unloading, the bent sheet has a refund for the amount  $\Delta\alpha$ . For the calculation of the elastic recovery and the state of residual stress, it is assumed that the sheet deforms elastically during unloading.

When unloading is the moment of unloading  $M_R = 0$ .

Remaining radius after unloading  $\frac{1}{r_{mR}}$  is calculated according to [1] expression

$$\frac{1}{r_{mR}} = \frac{1}{r_m} - \frac{M_B}{E \cdot I_z}$$

The state of residual stress is determined by subtracting it from the stress during loading  $\sigma$  (y) linear stress distribution

$$\Delta\sigma_{el}(y) = y \cdot E \cdot \Delta \frac{1}{r_m} \quad (4)$$

The value of the elastic return is measured by the size  $K$  which is called the elastic return ratio, and is defined by the ratio  $K = \frac{r_m}{r_{mR}}$  ( $R_a = r_m$   $R_p = r_{mR}$ ). Bending tool (Figure 5).

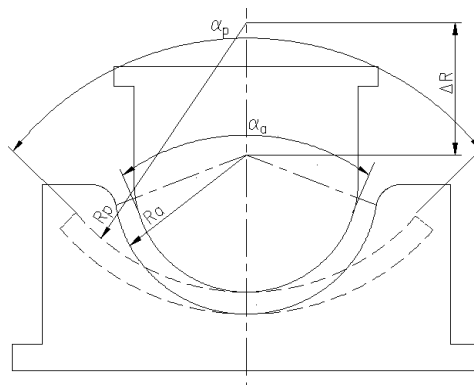
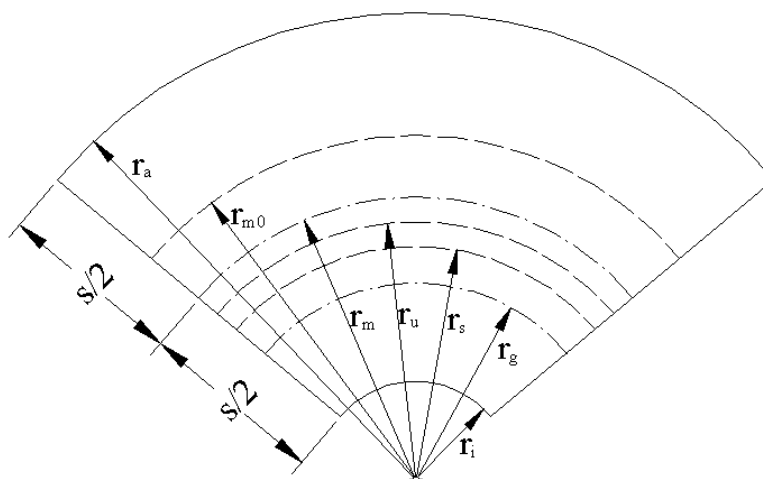


Figure 5. Bending tool

## 2.4 Extension of elementary theory

The assumption of a constant, neutral layer in the middle of the bent sheet turned out to be incorrect at large deformations. During bending, the following layers are distinguished, [1] Figure 6.



**Figure 6. Layers when bending**

Layers when bending:

Outer edge layer  $r_a$

The original middle layer  $r_{m0}$

Middle layer  $r_m$

Upstretched layer  $r_u$

Stress-free layer  $r_s$

Layer at the limit of deformation  $r_g$

Inner edge layer  $r_i$ .

All layers from  $r_a$  to  $r_{m0}$  stretch freely during bending; those between  $r_{m0}$  and  $r_u$  are first compressed and then stretched even more than they were compressed before; with  $r_u$ , the magnitudes of stretching and compression are equal; the layers between  $r_u$  and  $r_g$  are first compressed and then stretch less than they were compressed before; at  $r_g$ , compression is just ending, stretching has not yet occurred; between  $r_g$  and  $r_i$  the layers are freely compressed.

### 3. Residual stresses and stationary equilibrium conditions after unloading (removal of external force)

#### 3.1. Value $K$ springback

Value  $K$  is calculated using the expression [1]

$$K = \frac{r_m}{r_{mR}} = \frac{\frac{S_o}{\epsilon_{a1}}}{\frac{S_o}{\epsilon_{a2}}} = \frac{\epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1}} \quad (5)$$

According to the picture 7. (Figure 7) coming up [1]







$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_e - \Delta \varepsilon_{12}, \quad \frac{\sigma_n}{E} = \frac{\sigma_1}{E} - \Delta \varepsilon_{12}$$

$$\sigma_n = \sigma_1 - E \cdot \Delta \varepsilon_{12} \tag{11}$$

In order to achieve a steady state of equilibrium, the usual condition that the sum of all moments is equal to zero and that the sum of all forces is equal to zero applies [1]

$$\sum M = 0 \text{ and } \sum F = 0$$

As the external forces no longer act after unloading, the internal moment must also disappear

$$0 = M_i = b \cdot \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_n \cdot y \cdot dy$$

Using expression (11) it follows

$$0 = b \cdot \left( \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_1 \cdot y \cdot dy - E \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \Delta \varepsilon_{12} \cdot y \cdot dy \right) \tag{12}$$

and appropriate

$$0 = F_i = b \cdot \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_n \cdot dy = b \cdot \left( \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_1 \cdot dy - E \cdot \int_{-\frac{s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \Delta \varepsilon_{12} \cdot dy \right) \tag{13}$$

The first term in expressions (12) and (13) represents the internal moment and internal force before unloading (state "1"). As the sum of the internal forces is equal to zero during pure moment bending, only the second part needs to be integrated. Both conditions (12) and (13) are established using the corresponding  $\varepsilon_{a1}$  for the current state of stress. Inserting the expression [1]

$$\Delta \varepsilon_{12} = \frac{\Delta \varepsilon_{a12}}{2\varepsilon_{a1}} \left[ 1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \frac{y_1}{s_0} + \frac{\varepsilon_{a1}^2 - 1}{1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \left( \frac{y_1}{s_0} \right)} \right]$$

into (12) and (13) it follows [1]



$$0 = \frac{Mi}{b} = \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_1 \cdot y \cdot dy - E \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{a12}}{2 \cdot \varepsilon_{a1}} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left[ 1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \frac{y_1}{s_0} + \frac{\varepsilon_{a1}^2 - 1}{1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \left(\frac{y_1}{s_0}\right)} \right] y \cdot dy \quad (14)$$

$$0 = \frac{F_i}{b} = 0 - E \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{a12}}{2 \cdot \varepsilon_{a1}} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left[ 1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \frac{y_1}{s_0} + \frac{\varepsilon_{a1}^2 - 1}{1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \left(\frac{y_1}{s_0}\right)} \right] \cdot dy \quad (15)$$

These conditions are valid if the boundary conditions in the zone of compression and extension are equal to  $\varepsilon_{i1} = \varepsilon_{a1}$ , so after unloading in the given expressions, the unknown quantity  $\Delta \varepsilon_{a12}$  remains. In the case that  $\varepsilon_{i1} \neq \varepsilon_{a1}$ , the values of  $\Delta \varepsilon_{a12}$  must be corrected, while  $\Delta \varepsilon_{a12}$  remains identical.

Based on that, it follows on the outer layer

$$\Delta \varepsilon_{a12 \text{ kor}} = \Delta \varepsilon_{a12} - \Delta \varepsilon_{va12} \quad ,$$

$$\Delta \varepsilon_{a12 \text{ kor}} = \Delta \varepsilon_{a12} - (\varepsilon_{a2} + \varepsilon_{i2}) \quad (16)$$

For any layer, the corrected return deformation amounts to

$$\Delta \varepsilon_{12 \text{ kor}} = \Delta \varepsilon_{12} - \Delta \varepsilon_{v12} \quad .$$

The mentioned curve change is determined according to [1] analytically

$$\Delta \varepsilon_{v12} = \Delta \varepsilon_{va12} \cdot \left( \frac{y}{s_0} + 0,5 \right) \quad .$$

Inserting (16) into expressions (14) and (15) (instead  $\Delta \varepsilon_{a12}$  is placed  $\Delta \varepsilon_{a12 \text{ kor}}$ ) it follows [1]

$$0 = \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \sigma_1 \cdot y \cdot dy - E \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{a12}}{2 \varepsilon_{a1}} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left[ 1 + 2 \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \frac{y_1}{s_0} + \frac{\varepsilon_{a1}^2 - 1}{1 + 2 \varepsilon_{a1} \left(\frac{y_1}{s_0}\right)} \right] y \cdot dy + E \cdot \Delta \varepsilon_{va12} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left( \frac{y_1}{s_0} + 0,5 \right) y \cdot dy \quad (17)$$

$$0 = 0 - E \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{a12}}{2 \varepsilon_{a1}} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left[ 1 + 2 \varepsilon_{a1} \frac{y_1}{s_0} + \frac{\varepsilon_{a1}^2 - 1}{1 + 2 \varepsilon_{a1} \left(\frac{y_1}{s_0}\right)} \right] dy + E \cdot \Delta \varepsilon_{va12} \cdot \int_{\frac{-s_0}{2}}^{\frac{s_0}{2}} \left( \frac{y_1}{s_0} + 0,5 \right) \cdot dy \quad (18)$$

Integrating and solving expressions (17) and (18) yields  $\Delta\varepsilon_{a12}$  and  $\Delta\varepsilon_{va12}$  for some value  $\varepsilon_{a1}$ .

The value of  $\Delta\varepsilon_{a12}$  must be slightly higher than follows from expressions (13) and (14). The basis for this is the assumption that the modulus of elasticity  $E$  is a factor of proportionality between residual deformation and residual stress for  $\Delta\varepsilon_{a12kor} > \Delta\varepsilon_{ae}$  respectively  $\Delta\varepsilon_{12kor} > \Delta\varepsilon_e$ . In this way, the residual stress in the peripheral areas is questioned. As in the expressions (13 and 14) it is stated that the sum of the surfaces of the graphically displayed residual stresses and their moments is equal to zero, the residual deformation in the marginal areas  $\Delta\varepsilon_{12kor} > \Delta\varepsilon_e$  must be smaller than in reality. The actual residual stress according to [1-3] is determined by:

1. Residual strain by expression  $\Delta\varepsilon_n = \Delta\varepsilon_e - \Delta\varepsilon_{12}$  where  $\Delta\varepsilon_{a12}$  and  $\Delta\varepsilon_{va12}$  are calculated as a first approximation using expressions (17) and (18).
2. The residual stress is determined point by point  $\sigma_n$  for previously obtained  $\Delta\varepsilon_n$  in the area  $\Delta\varepsilon_{12kor} > \Delta\varepsilon_e$
3. The sum of the new moment and force, which should be different from zero, is integrated graphically or tabularly
4. It is increasing step by step  $\Delta\varepsilon_{a12kor}$  and integrates again as stated in point 3 until it is reached  $\sum F_i = 0$  i  $\sum M_i = 0$ .

#### 4. Conclusions

The paper presents different theories for calculating the moment, which is related to springback (elastic return) and that: elementary theory and extension of elementary theory. The actual residual voltage is determined by a multi-step test.

#### 5. References

- [1] Grizelj, Branko. Oblikovanje metala deformiranjem. . Slavonski Brod : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu . (2002). (ISBN 953-6048-21-3) **(book)**
- [2] Grizelj, Branko. Oblikovanje metala deformiranjem Umformtechnik Metal forming. Slavonski Brod : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu (2018). (ISBN 978-953-6408-88-5) **(book)**
- [3] Lange, Kurt. Umformtechnik (1-4). Spring-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo (1984-1993) **(books)**
- [4] Grizelj, Branko.. Determination of flow curves (unpublished work) (2022).



## ***Product development of conveyor belts system with a focus on structural features***

**J.Marijić<sup>1,\*</sup>, M.Vilić<sup>1</sup>, I.Grgić<sup>1</sup>, M.Karakašić<sup>1</sup>, Ž.Ivandić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

\*Corresponding author. E-mail: [jmarijic@unisb.hr](mailto:jmarijic@unisb.hr)

### **Abstract**

Industrial conveyor belts are key elements in industrial plants for the efficient transport of materials and products. This paper focuses on the product development of industrial conveyor belts, with an emphasis on design features.

By applying product design methods, a conveyor belt has been developed with structural features that eliminate deficiencies. These features include faster and easier assembly, availability of spare parts and a modular, load-bearing design. In addition, an analysis of the new product was carried out, including technical aspects, materials and production processes. The new industrial conveyor belt has improvements in terms of safety, resistance and functionality, adapted to the specific needs of industrial plants.

**Key words:** Industrial conveyor system, product development, design features, modular features

### **1. Introduction**

The conveyor belt system is one of the most widely used and versatile devices for transporting bulk materials and plays an important role in various industries [1,2]. They are used in almost all industries: mining, agriculture, petrochemical, wood and building materials industries. They are irreplaceable in heavy industry, steel mills, foundries, coking plants, thermal power stations, mines, cement works, brick factories, quarries, glass factories, the chemical industry, sugar factories, salt mines and waste recycling plants [3].

Belt conveyors for bulk material handling are the most commonly used type of conveyors in the industry due to their versatility, reliability and cost efficiency [4]. One of the most important aspects of belt conveyors is the deflection of the belt, i.e. the deformation of the belt profile between two rotating rollers due to the weight of the bulk material, as shown in Figure 4. later in this paper.

To avoid excessive loss of material and fatigue of the belt, the deflection of the belt should not exceed 3% of the distance between the rotation rollers [5]. A major problem in the application of the above-mentioned conveyor belts is also the necessary positioning of the belts themselves depending on the conditions in which they are used. Most of the time it is necessary to change the height and inclination of the conveyor belt [4]. As defined by the



application for the transport of materials, products, etc., it is also necessary to ensure the possibility of different inclinations of the conveyor belt to achieve a correction of the heights of input and output devices or machines. The machine at the entrance of the conveyor has a different height than the machine to which the conveyor transports the product, etc. The solution to the mentioned problem is also presented later in this article. The SolidWorks [6] programme was used to create the 3D model.

## 2. Design for assembly and design for maintenance

Designers not only have a significant influence on the cost and quality of component production, but also on the cost and quality of assembly. The aim is to simplify, standardise and automate the assembly process and ensure its quality [7].

Already in the design phase, it makes sense to consider assembly when creating the work structure and layout. An efficient assembly plan can be achieved through the following approaches:

1. Structuring: clearly defining assembly steps and operations to ensure logical and coordinated assembly of components,
2. Reduction: Identifying unnecessary or redundant steps in the assembly process and eliminating them to reduce the time and resources required for assembly,
3. Standardisation: Introduction of standardised procedures, parts or tools to achieve consistency and repeatability in the assembly process. This facilitates staff training, reduces the possibility of errors and increases assembly efficiency,
4. Simplification: Identifying complex or difficult operations and finding ways to simplify them. This can include improving the design of components or adapting tools and machines to make assembly easier [8].

This leads to a reduction in costs, as the assembly process is improved, and an increase in product quality, as assembly is clearer and easier to control [8].

Maintenance requirements should be included in the list of requirements. When considering different solutions, preference should be given to options that are easy to maintain. These may include variants that require minimal maintenance, use components that are easily replaceable and have a similar lifespan. During the implementation phase, it is important to consider accessibility and ease of assembly and disassembly. However, ease of maintenance must never be at the expense of safety. The technical solution should ideally require as few preventive measures as possible. The goal is to achieve complete freedom from maintenance by using components with the same service life, reliability and safety. Therefore, the chosen solution should include features that make maintenance unnecessary or significantly reduce the need for maintenance. Only if such features cannot be achieved or are too expensive should maintenance and inspection procedures be introduced. Basically, the following goals are important:

- Prevent damage and increase reliability,
- Avoid possible errors during disassembly, reassembly and commissioning,
- Simplify maintenance procedures,
- Make maintenance results verifiable,



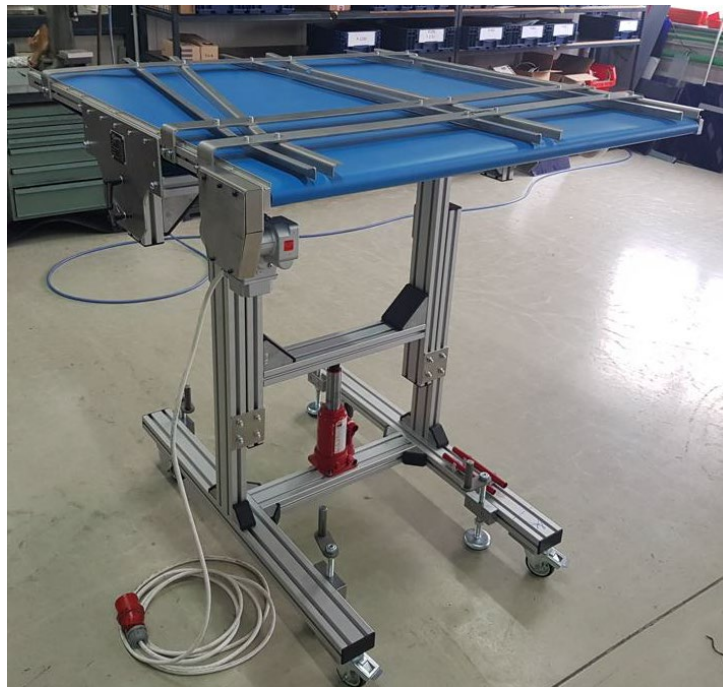


- Simplify inspection procedures [8].

### 3. Structural development of the conveyor system

The principles of Design for Assembly and Design for Maintenance were followed in the development of the conveyor belt. By applying the guidelines of these approaches, the chosen project solution provides a defined function and functionality. The design incorporates standard profiles and fasteners, minimising machining requirements in the creation of the design solution. Guided by such an approach, a system was developed that enables function, ensures the availability and interchangeability of structural elements, ensures worker safety, facilitates maintenance and reduces the time required for assembly and disassembly.

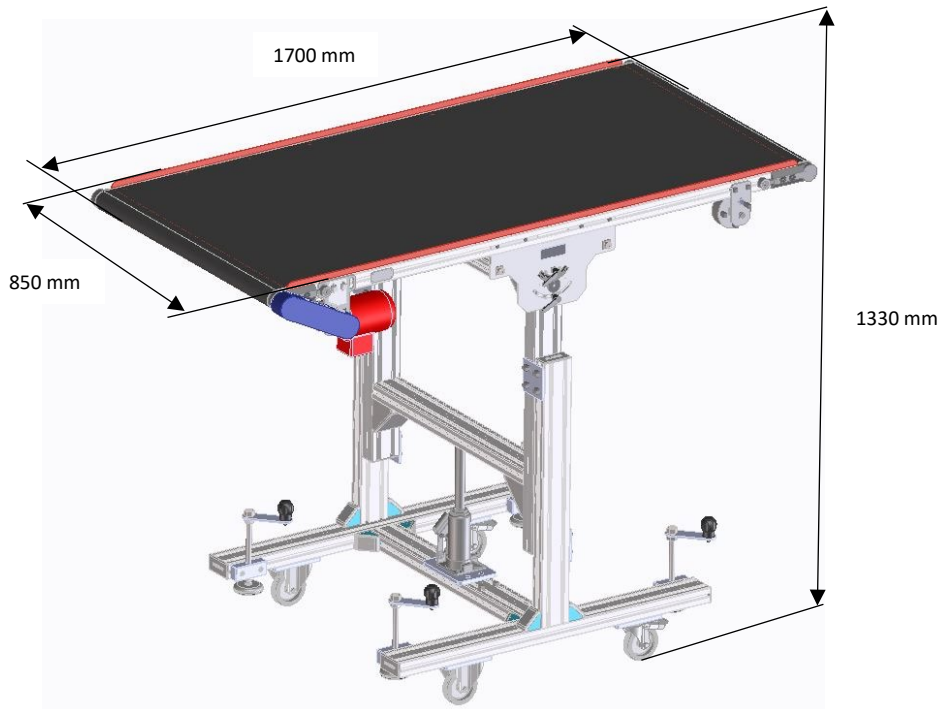
Figure 1 shows the finished conveyor belt by Experio d.o.o. The continuation of the work will present the development and design features of the individual parts.



**Figure 1.** Conveyor system

### 4. Design features

In the structural elaboration of the aforementioned problem, the deflection of the belt between the rotating rollers and the need for height manipulation as well as inclination, the variant shown was chosen. This design allows products to be received at different heights and products to be transported at a certain angle. Moreover, the mentioned design solution solves the mentioned problem of belt deflection. The 3D model of the machine can be seen in Figure 2.



**Figure 2.** 3D model of the conveyor system

The design solution of the conveyor belt is based on the rotation of the rotating rollers over which the belt is pulled. The frictional force between the belt and the rollers transmits the torque and realises the main function of the said product. The torque generated by the electric motor is transmitted via a belt to the shaft located inside the rollers. The shaft is connected via a quill. The conveyor belt consists of a driven roller and a free roller. The explained principle of the pair can be seen in Figure 3.



**Figure 3.** Main parts of the conveyor system

The aforementioned problem of belt deflection between two rotating rollers (Figure 4) was solved in the presented constructive solution with the help of a perforated plate [9] (Figure 5).

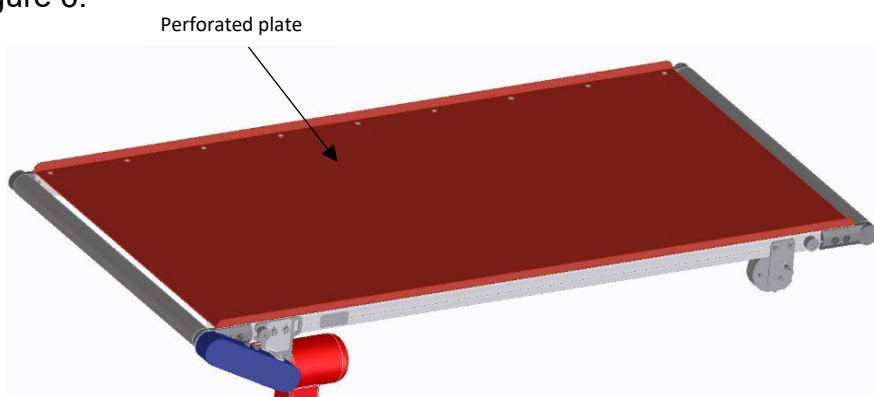


**Figure 4.** Belt between rotating rollers



**Figure 5.** Perforated sheet [9]

Such a step in the selection of the perforated sheet prevents the creation of friction between the strip and the said element while ensuring the rigidity of the whole structure. The edges of sheet are machined to prevent damage to the strip. The above mentioned solution can be seen in Figure 6.



**Figure 6.** 3D model of the solution

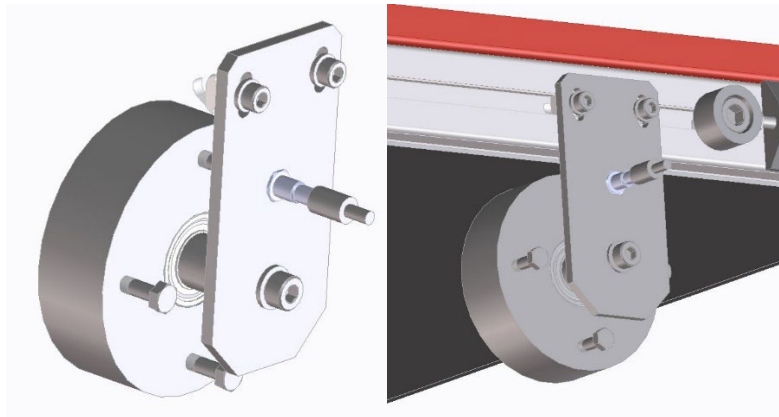
The conveyor belt is constructed using standard aluminium profiles and fasteners [10]. With such an approach to the selection of elements, the availability of spare parts is ensured, assembly/disassembly processes are accelerated and the need for technological machining is reduced to a minimum, which has a direct impact on the price and time required to manufacture the conveyor belt. This can be seen in Figure 7.



**Figure 7.** Standard elements

Furthermore, the mentioned solution has a control system to monitor the work or to monitor the rotation of the belt. It consists of a polyamide roller mounted on a rotating belt. The rotation of the said roller is achieved by the friction of the said elements. On the roller there are metal screws which are detected by an inductive sensor mounted on the support. When the detection of the metal screws stops, a signal is sent to shut down the entire system. The

mentioned system is attached to the structure with a bracket. The mentioned roller can be seen in Figure 8.



**Figure 8.** Control system

In accordance with the already mentioned problem of the necessary height regulation and the need to correct the inclination of the conveyor belt, a modulating support was developed for a defined application, which consists of standard elements like profiles and connection parts. With such an approach it is possible to realise the standard function and at the same time there is the possibility to improve the acceptance according to the needs that arise during use. The structural solution is shown in Figure 9.

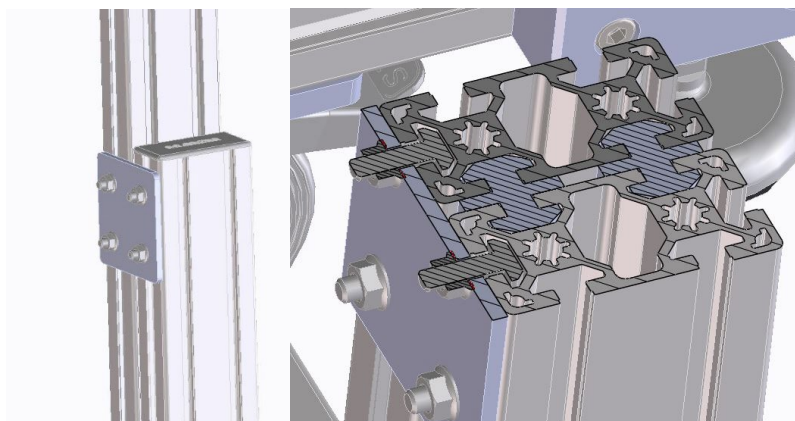


**Figure 9.** Modular construction

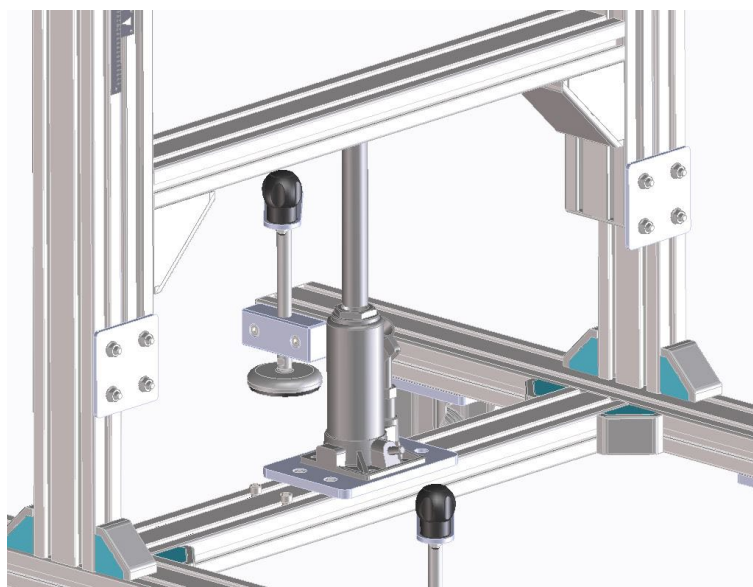
The above-mentioned problem of height adjustment is solved by using standard profiles connected by standard links containing a bolt and a nut that slides along the profile grooves



when the bolt is loosened. Between the two profiles that slide on top of each other is a standard slide that is located in the grooves of the profiles and in this way ensures even guidance (Figure 10). The force required to lift the conveyor belt and part of the module construction is provided by the hydraulic pump shown in Figure 11.



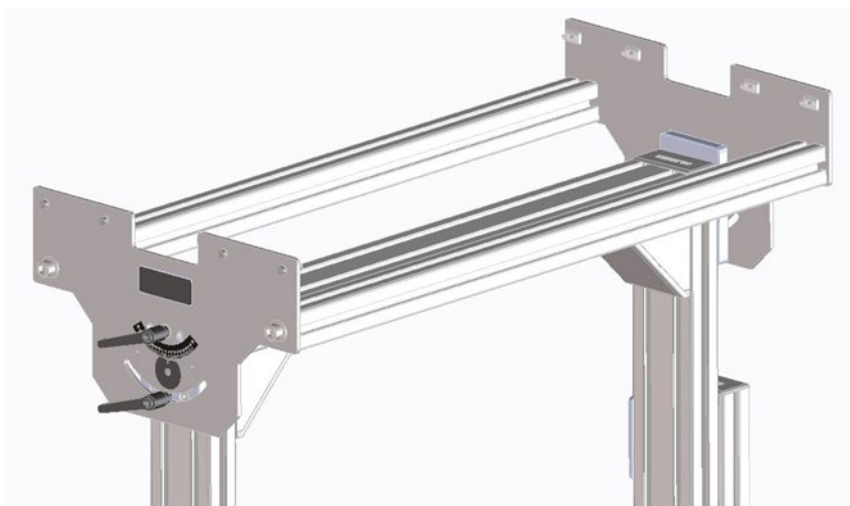
**Figure 10.** Height regulation



**Figure 11.** Hydraulic pump

The need to tilt the conveyor (Figure 12) is solved structurally, as mentioned earlier, by the use of threaded handles and a spacer plate attached to the profile of the structure. Releasing the upper lever allows rotation around its axis, while releasing the second lever determines the desired inclination. The magnitude of the inclination is limited by the shape of the conveyor belt support (Figure 13).





**Figure 12.** Angle regulation



**Figure 13.** Working principle of angle regulation

When designing the project solution, great attention was paid to the safety of the employees who will maintain the machine, as well as to a structural solution that ensures easy access to all structural elements during maintenance. For this reason, all rotating parts are protected, sharp edges are rounded or covered with protective rubber and there are also safety markings. The listed points can be seen in Figure 14.



**Figure 14.** Security elements

## 5. Conclusion

The conclusion of the paper "Product development of conveyor belts with emphasis on structural features" highlights the importance of structural features in the development of industrial conveyor belts. By applying product design methods, features have been developed that improve assembly, availability of spare parts, reduction of the need for technological machining and modular design. The new conveyor belt has improvements in safety, resistance and functionality and is adapted to the specific needs of industrial plants. The paper shows that the development of conveyor belts with structural features is extremely important to ensure the safety of workers and the smooth running of the production process in industrial plants, offering improvements in terms of safety, practicality and durability.

## 6. Literature

- [1] Chaabane, Kenza; Khatab, Abdelhakim; Diallo, Claver; Aghezzaf, ElHoussaine; Venkatadri, Uday. Integrated imperfect multimission selective maintenance and repairpersons assignment problem // Reliability Engineering & System Safety, 199(2020)
- [2] Khakzad, Nima; Khan, Faisal; Amyotte, Paul. Dynamic risk analysis using bow-tie approach // Reliability Engineering & System Safety, 104(2012), 36–44.
- [3] Tehnoguma-Zg d.o.o  
URL: <https://tehnoguma-zg.hr/gumene-transportne-trake/>
- [4] Tehnoguma-Zg d.o.o  
URL: <https://tehnoguma-zg.hr/gumene-transportne-trake/>
- [5] Shen, Jiahe; Wheeler, Craig; Ilić, Dušan; Chen, Jian. Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling // Powder Technol, 357(2019), 171-185.
- [6] SolidWorks 2021  
URL: <https://www.solidworks.com/>
- [7] Marijić, Jure; Vilić, Marko; Grgić, Ivan; Karakašić, Mirko; Šimunović, Goran; Delhusa, Ines. Developing and constructing industry rotation system for acceptance of products from stamping // 7th Conference "Maintenance 2022" / Hadžikadunić, Fuad; Petković, Darko (ur.). (ISSN 1986-583X). Budva: University of Zenica, 12.09.-16.09.2022.
- [8] Pohl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich. Engineering Design A Systematic Approach. London: Springer 2007. (ISBN 1447160258)
- [9] Mick d.o.o  
URL: [https://www.mick.hr/hr/suzasti\\_rebrasti\\_limovi/325/70](https://www.mick.hr/hr/suzasti_rebrasti_limovi/325/70)
- [10] Hypex d.o.o  
URL: <https://hypex.si/category/84833>



## **3D modeliranje i izrada kalupa za izravno prešanje elastomernih izratka**

### ***3D modeling and mold making for compression molding of elastomer products***

**S. Švoger<sup>1\*</sup>, A. Čikić<sup>1</sup>, N. Delić<sup>1</sup>, M. Pintarić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [sinisa.svoger@unin.hr](mailto:sinisa.svoger@unin.hr)

#### **Sažetak**

Prikazan je postupak 3D oblikovanja i izrade kalupa za za izravno prešanje elastomernih izratka. Za 3d oblikovanje dijelova kalupa i izratka – brtve korišten je 3D MCAD programski alat SolidWorks. Za izradu gornjeg i donjeg dijela kalupa opisan je programski modul SolidWorks – Alat za izradu kalupa (*Mold tools*). Opisana je tehnologija izravnog prešanja elastomera s prikazanim postupkom oblikovanja izratka – brtve. Opisan je postupak odabira materijala za pripremak. Navedeni su prednosti i nedostaci tehnologije te su navedene cijene izrade kalupa i brtve uz prikazana potrebna poboljšanja kalupa sa svrhom unapređenja proizvodnosti.

**Ključne riječi:** 3D oblikovanje kalupa, SolidWorks – Alat za izradu kalupa, izravno prešanje, 3D model, elastomerni izradak

#### **Abstract**

The process of 3D modelling and mold making for compression molding of elastomer products is presented. 3D MCAD program tool SolidWorks was used for 3D modeling of mold parts and workpieces – seals. The program module SolidWorks – Mold tools is described for making the upper and lower parts of the mold. The technology of compression molding of elastomer products is described, with the process of molding the workpiece - gasket shown. The procedure for selecting materials for product preparation is also described. The advantages and disadvantages of the technology are listed, as well as the prices of mold and seal manufacturing, along with the necessary improvements to the mold with the purpose of improving productivity.

**Key words:** 3D mold design, SolidWorks Mold tools, compression mold, 3D model, elastomer products



## 1. Uvod

Polimerima se nazivaju sve prirodne i sintetske tvari i materijali kojih je osnovni sastojak sustav makromolekula (polimerne molekule). Prema jednoj proširenoj podjeli, koja se temelji na njihovu ponašanju pri povišenim temperaturama, polimerni materijali mogu biti duromeri, elastomeri i plastomeri [1]. Dok duromeri gotovo i ne mijenjaju svoj oblik uslijed opterećenja i povišene temperature kod plastomera se javlja pojava plastične deformacije koja ne nestaje po prestanku djelovanja vanjskog opterećenja. Za razliku od plastomera, elastomeri nakon prestanka djelovanja opterećenja vraćaju se u prvobitno stanje, odnosno imaju svojstvo elastičnosti. Postoji puno vrsta elastomera, a najčešći naziv za tu grupu materijala je guma. Upravo svojstvo elastičnosti i vraćanja u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja opterećenja čini elastomere pogodnim za rad u određenim specifičnim uvjetima gdje nijedan drugi materijal nije pogodan. Elastomeri danas imaju vrlo široku primjenu u svim granama industrije, najčešće se koriste kao pneumatici automobila, razna brtvila, spojni elementi, ublaživači vibracija, membrane, dijelovi ležaja itd (slika 1).



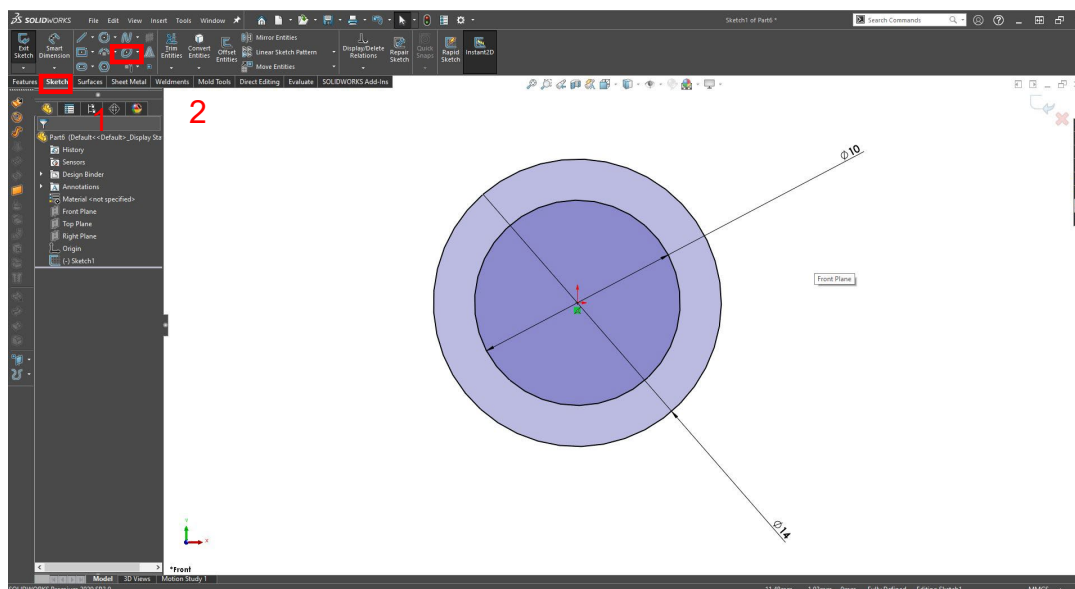
**Slika 1.** Proizvodi od gume [2]

Proizvodi od elastomera, odnosno gume dobivaju se pod djelovanjem specifičnih uvjeta, tlaka i temperature. Taj proces se naziva umreživanje. Osnova za sirovinu za proizvodnju gumenih proizvoda je elastomerna smjesa koja osim kaučuka sadrži i druge brojne dodatke. Željeni oblik gumenog proizvoda dobiva se pomoću kalupa, odnosno kalupne šupljine koja je zapravo negativ proizvoda, ali uvećan za postotak toplinskog skupljanja gume. Postoje mnoga pravila koja treba poštivati prilikom konstrukcije kalupa za izravno prešanje. Potrebno je uzeti u obzir vrstu elastomerne smjese, vrstu kalupa, oblik gumenog proizvoda i ostale uvjete. kalup za izravno prešanje najčešće se koriste kod izrade manjih serija proizvoda a injekcijski kod većih. 3D oblikovanje kalupa odrađeno je pomoću 3DMCAD programskog alata (sustava) SolidWorks Premium 2020 SP5 – Alata za izradu kalupa (*Mold Tools*).

## 2. Izrada 3D modela brtve i sklopa kalupa za izravno prešanje

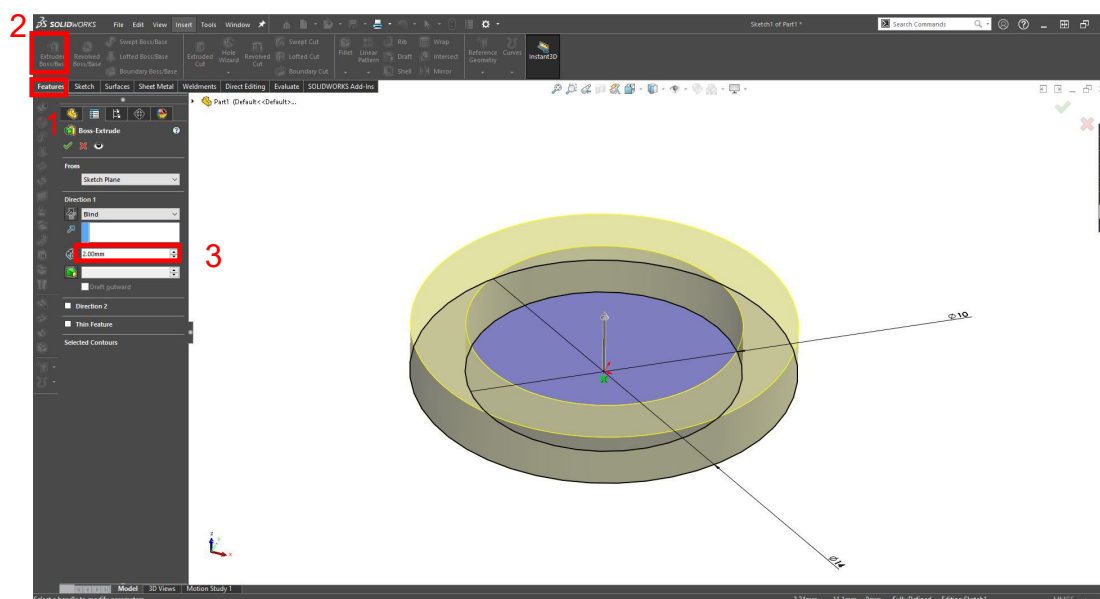
### 2.1. Izrada 3D modela brtve

Za izraditi kalup potrebno je prvo izraditi brtvu prema traženim dimenzijama. Izrada 3D modela započinje izradom skice, odabirom kartice (*Tab*) Skica (*Sketch*) i odabirom alata Krug (*Circle*). Na slici 2 nalaze se naznačeni koraci za izradu skice (od 1 do 2).



Slika 2. Skica brtve s odgovarajućim dimenzijama

3D model je izrađen korištenjem alata za Izduživanje (*Extrude*) koji se nalazi u kartici (*Tab*) Značajke (*Features*). Na slici 3 nalaze se odgovarajući koraci (od 1 do 3).



Slika 3. 3D model brtve

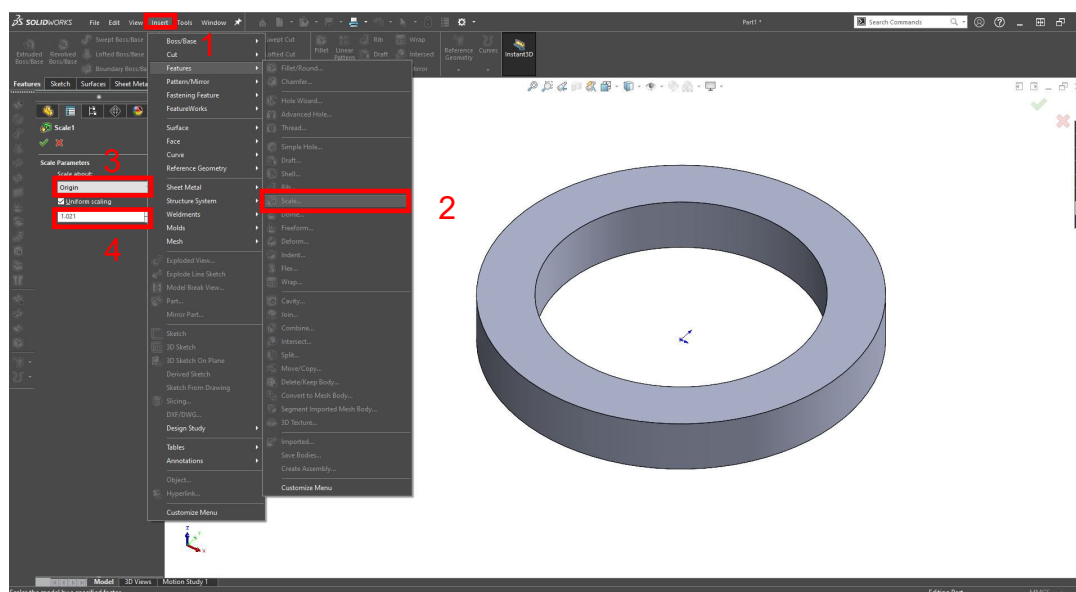


Kako bi se dalje moglo pristupiti konstrukciji kalupa potrebno je odmah u početku 3D model brtve uvećati za postotak temperaturnog skupljanja elastomerne smjese koja je odabrana prema potrebama naručioca posla. Postotak skupljanja za odabranu smjesu (EPDM 60 ShA GUMIIMPEX-6001) iznosi 2,1% (tablica 1).

**Tablica 1.** Svojstva nekih gumenih smjesa firme Gumiimpex-GRP d.d. [3]

Vrsta gume	Tvrdoća (ShA)	Obilježja	Dodatne karakteristike	Skupljanje (%)
EPDM	60	Gumiimpex-6001		2,1
NR	72	Gumiimpex-7201		2,5
NBR	70	Gumiimpex-7002		1,3
H-NBR	60+/-5			1,7
SBR	80			1,8
VITON	70		Smeđi	2,6
FKM VITON	80			1,5
SILIKON	40		Crveni	3,0
FVMQSILIK	70		Crni	3,0
PU	55		Plavi	2,5
PUR	86			1,7

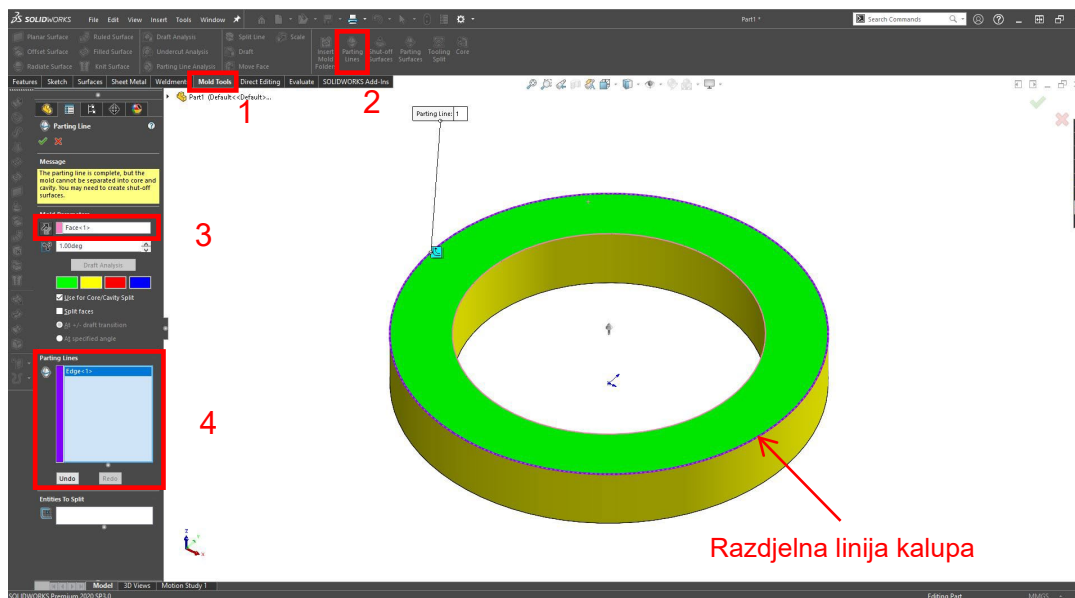
Uvećanje brtve za 2,1% se odrađuje pomoću alata za Mjerilo (*Scale*) koji se nalazi u kartici (*tab*) Značajke (*Features*). Na slici 4 prikaza je postupak (od 1 do 4) uvećanja modela.



Slika 4. 3D model brtve uvećan za 2,1%

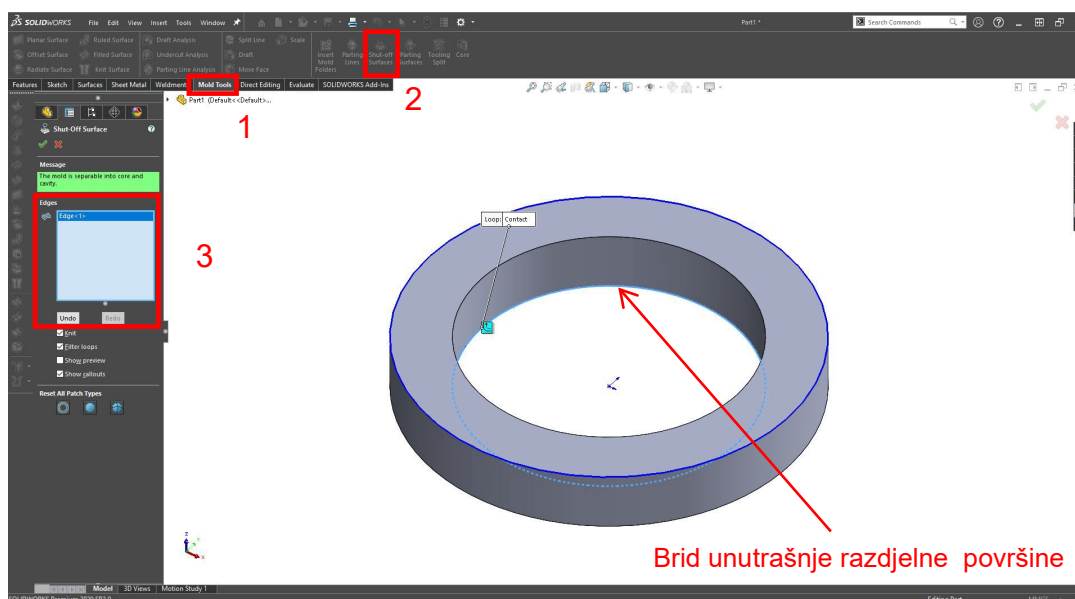
## 2.2. Izrada 3D modela kalupa

Nakon izrade 3D modela brtve potrebno je izraditi pomoću alata Razdjelna linija (*Parting lines*) razdjelnu liniju kalupne šupljine (navedeni alat se nalazi unutar kartice Alati za izradu kalupa – *Mold tools*). Slika 5 prikazuje postupak (od 1 do 4) izrade razdjelne linije.



Slika 5. Izrada razdjelne linije kalupa

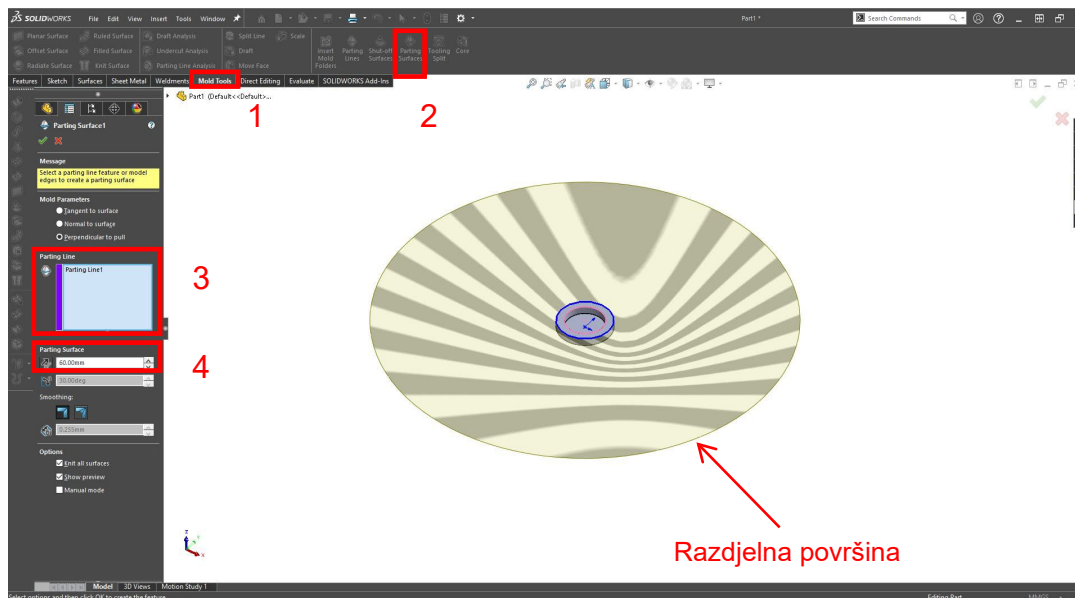
Nakon toga potrebno je odraditi pomoću alata Zatvorena površina (*Shut-off Surface*) površinu dijeljenja unutrašnje strane kalupne šupljine. Na slici 6 prikazan je postupak (1-3).



Slika 6. Izrada unutrašnje površine dijeljenja kalupa

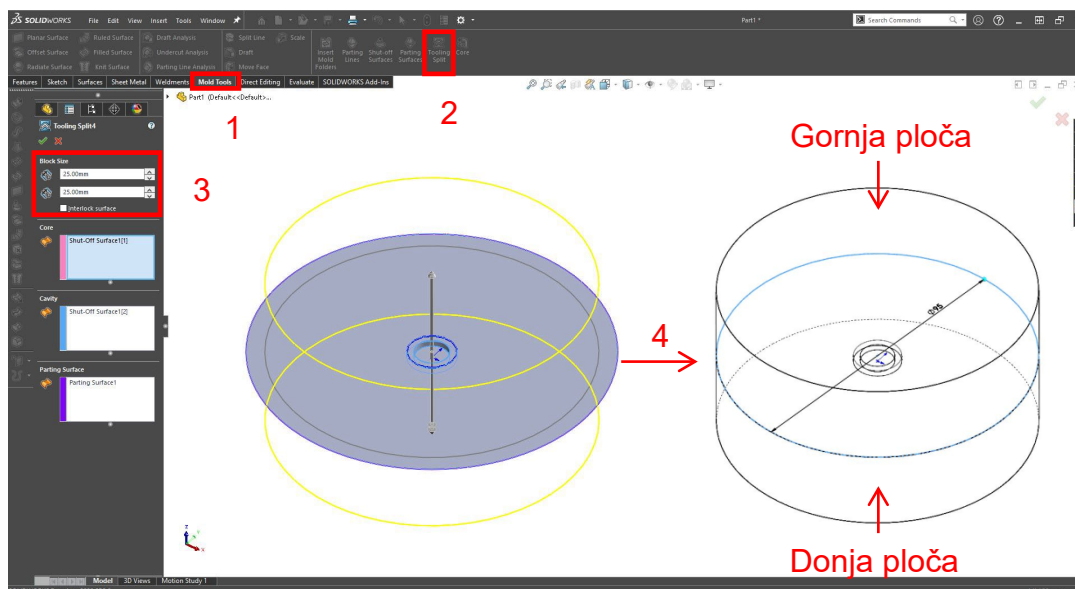


U sljedećem koraku potrebno je pomoću alata Razdjelna površina (*Parting Surface*) izraditi razdjelnu površinu kalupa. To je površina kontakta gornje i donje ploče kalupa (mora biti veće od promjera kalupnih ploča) a postupak izrade prikazan je na slici 7 (od 1 do 4).



Slika 7. Izrada razdjelne površine kalupa

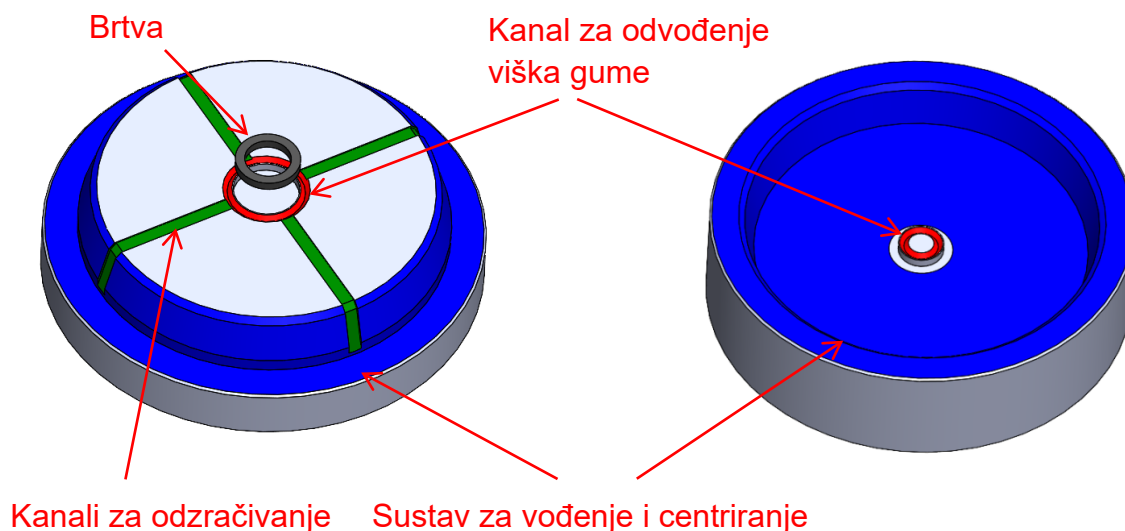
Kad je određen koncept dijeljenja kalupa preostaje odrediti dimenzije kalupa pomoću nove skice. Oblik i dimenzije kalupnih ploča su određene prema dostupnim sirovcima ( $D = 95\text{mm}$ ). Na slici 8 prikazan je postupak izrade gornjeg i donjeg dijela kalupa pomoću alata Razdvajanje kalupa (*Tooling split*) od 1 do 4.



Slika 8. Izrada i izgled gornje i donje ploče kalupa nakon razdvajanje kalupa



Nakon što su dobivene gornje i donje ploče kalupa potrebno je na svakoj ploči (slika 9) pomoću alata za Oduzimanje (*Extrude*) iz kartice Značajke (*Features*) definirati završni izgled gornjeg i donjeg kalupa. U ovom slučaju kalup mora sadržavati kanale za odvođenje viška gume, sustav za odzračivanje, utor za otvaranje pomoću poluge i sustav za vođenje.



Slika 9. Izgled gornjeg i donjeg dijela kalupa s naznačenim značajkama

Nakon izrade 3d modela potrebno je izraditi kalup postupcima obrade odvajanjem čestica (tokarenjem i glodanjem). Na slici 10 nalazi se izrađeni kalupi.

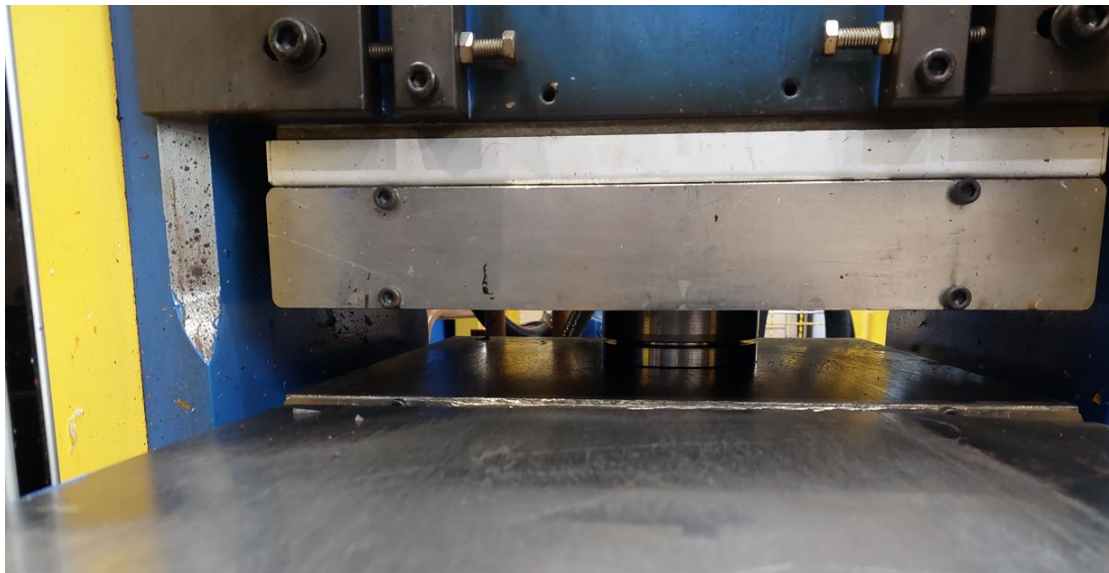


Slika 10. Gornji i donji dio kalupa izrađen obradom odvajanjem čestica



### 3. Izrada brtve

Postupak izrade brtve započinje zagrijavanjem kalupa na stroju za prešanje i zagrijavanje kalupa (slika 11).



Slika 11. Zagrijavanje kalupa na stroju za prešanje

Kalup se zagrijava na određenu temperatura koja ovisi o elastomernoj smjesi a dobivena je na temelju laboratorijskih ispitivanja. Vrijeme postizanje temperature se procjenjuju na temelju iskustva te se provjerava s laserskim ili kontaktnim termometrom. Određena temperatura zagrijavanja kalupa iznosi 180°C a vrijeme zagrijavanja 20 minuta. Nakon postizanje temperature potrebno je ručno popuniti kalupnu šupljinu s prethodno pripremljenim sirovcem koji je pripremljen u obliku trake debljine 3 mm. Nakon punjenja kalupne šupljine potrebno je kalup zatvoriti i staviti natrag na stroj za prešanje. Gornja grijača ploča stroja pritišće kalup određenim tlakom zatvaranja koji ovisi o dimenzijama kalupa i izratka. Vrijednost tlaka zatvaranja može se proračunati pomoću programskog alata SigmaSoft. Taj postupak je dugotrajan i koristi se kod proizvodnje velikih serija. U ovom slučaju vrijednost tlaka je procijenjeno iskustveno te iznosi 50 bar-a. Nakon što je kalup zatvoren započinje faza umreživanja. Kalup se drži zatvoren pod određenim tlakom i na određenoj temperaturi te se nastoji postići idealno vrijeme umreživanja kako bi stupanj umrežavanja bio odgovarajući. Vremensko trajanje umreživanja određuje se prema krivulji koja je dobivena ispitivanjem elastomerne smjese. Na osnovu krivulje određeno je vrijeme umreživanja od 4 minute. Po završetku faze umreživanja stroj se otvara, tj. gornja grijača ploča se podiže te je potrebno kalup ručno izvaditi izvan prostora grijaćih ploča i ručno pomoću poluge otvoriti kalup. Nakon toga slijedi vađenje brtve iz kalupne šupljine. Kod jednostavnijih proizvoda poput ovog najlakše se proizvod izvadi pomoću komprimiranog zraka, tj. pomoću pištolja na zrak. Time je jedan ciklus umreživanja završen, a sljedeći započinje ponovnim punjenjem kalupa.



Na slici 12 prikazan je postupak izrade brtve po različitim koracima.



Slika 12. Prikaza proizvodnog procesa izrade brtve

#### 4. Procjena troškova izrade kalupa i brtve

Prikazane cijene i troškovi izrade (tablica 2) kalupa i brtve vrijede za 2021 g. i odnose se na firmu Gumiimpex-GRP d.d. (naveden cijene su bez marže).

Tablica 2. Procijenjeni troškovi izrade kalupa i brtve

Cijena konstrukcije kalupa -1 gnijezdo	20 €
Cijena konstrukcije kalupa - 24 gnijezda	100 €
Cijena izrade kalupa -1 gnijezdo	50 €
Cijena izrade kalupa - 24 gnijezda	200 €
Jedinična cijena brtve s mat. (za 10 kom)	2,1 €
Jedinična cijena brtve s mat. (za 10 000 kom)	0,08 €

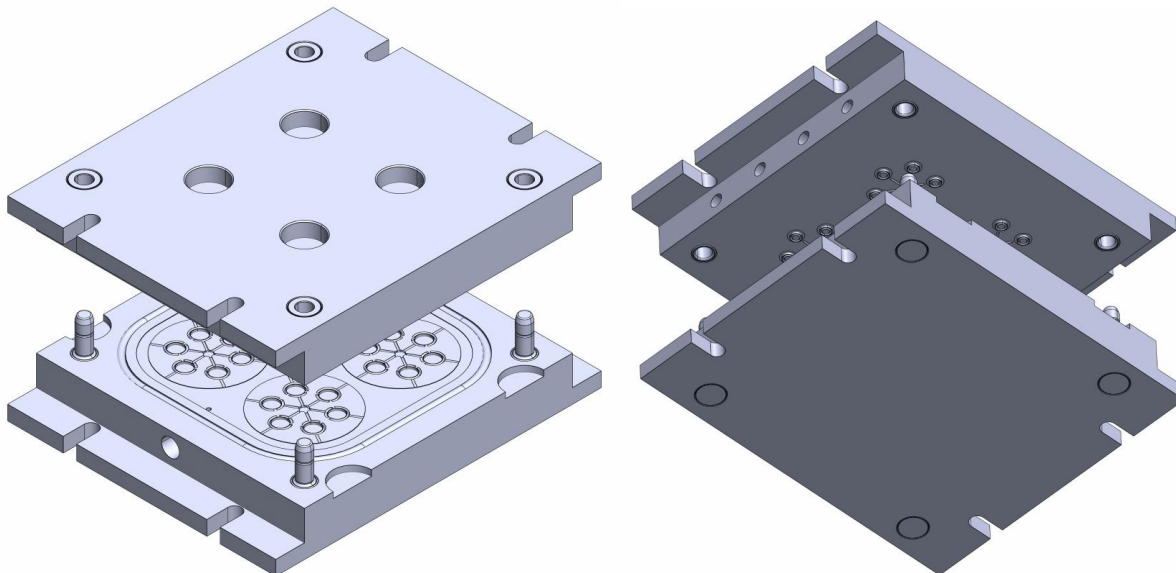
#### 5. Poboljšanje proizvodnosti

U slučaju velikoserijske proizvodnje izrađivati brtve samo s jednim gnijezdom bilo bi vrlo neisplativo.

Jedan od načina povećanja proizvodnosti podrazumijeva izradu većeg broja izratka istovremeno. To se postiže izradom kalupa za izravno prešanje s više gnijezda ili potrebno je izraditi kalup (slika 3) s više gnijezda gdje bi se za ubrizgavanje koristili strojevi



za injekcijsko prešanje elastomera koji imaju posebnu jedinicu za ubrizgavanje koja elastomernu smjesu ubrizgava u kalupne šupljine vrlo brzo i u pažljivo doziranim količinama



Slika 13. 3D sklop kalupa s 24 gnijezda

## 6. Zaključak

Proizvodnja elastomernih izratka danas je vrlo raširena proizvodna grana budući da takvi proizvodi nalaze vrlo široku primjenu u svim granama industrije. Prikazan je postupak 3D oblikovanja kalupa za izravno prešanje, za male serije proizvoda s vrlo povoljnom cijenom izrade samog kalupa i povoljnom cijenom proizvodnje same brtve. Pravilnom konstrukcijom i izradom kalupa, ali i odabirom odgovarajućih parametara procesa izrade moguće je proizvoditi velike serije proizvoda u relativno kratkom vremenu. Kao i u mnogim područjima rada, i ovdje iskustvo konstruktora igra veliku ulogu a pristup konstruktora samoj konstrukciji kalupa treba biti metodičan poštujući sve prethodno opisane elemente kalupa. Programski 3D MCAD sustav SolidWorks s modulom za izradu kalupa (*Mold tools*) pokazao je fleksibilnost i svrsishodnost kod izrade kalupa bilo kakvih oblika i dimenzija.

## 7. Literatura

- [1] Rogić, Ana; Čatić, Igor; Godec Damir. Polimeri i polimerne tvorevine. Zagreb: Društvo za plastiku i gumu, 2008. (ISBN 978-953-97450-6-4) (4.3.2 Polimerni materijali i tvorevine)
- [2] <https://www.customgasketmfg.com/products/> (24. 7. 2023.)
- [3] Interni dokument koji opisuje svojstva elastomernih smjesa firme Gumiimpex-GRP d.d.



# **Virtualna stvarnost: osnovna podjela i primjena u 3D oblikovanju**

## ***Virtual reality: basic types and application in 3D modeling***

**S. Švooger<sup>1\*</sup>, A. Čikić<sup>1</sup>, Z. Busija<sup>1</sup>, M. Pintarić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište Sjever, 104. Brigade 3, 42000 Varaždin

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [sinisa.svooger@unin.hr](mailto:sinisa.svooger@unin.hr)

### **Sažetak:**

Opisana je tehnologija virtualne stvarnosti (VR) te je opisana i nabrojena osnovna podjela tehnologije prema dostupnim programskim sustavima. Opisane su naočale za prikaz virtualne stvarnosti HTC Vive Pro.

Izdvojen je 3DMCad program SolidWorks i opisan je modul eDrawings PRO (Professional) u kojem su prikazane opcije i alati za prikaz virtualne stvarnosti.

Za funkcionalni prikaz korištenja virtualne stvarnosti unutar modula eDrawings PRO korišten je 3D sklop koji je izrađen pomoću 3DMCad SolidWorks programa.

Opisane su prednosti i nedostaci korištenja alata za prikaz virtualne stvarnosti u procesu i postprocesu 3D oblikovanja.

**Ključne riječi:** Virtualna stvarnost, Imerzivne tehnologije, SolidWorks, eDrawings PRO, 3DMCad, virtualne naočale, HTC Vive Pro

### **Abstract:**

The technology of Virtual reality (VR) is described and the basic division of technology according to the available software systems is described. HTC Vive pro virtual reality glasses are described.

The 3DMCad program SolidWorks is singled out and the eDrawings PRO (Professional) module is described in which the options and tools for displaying virtual reality are presented.

For the functional display of the use of virtual reality within the eDrawing PRO module, a 3D assembly was used, which was created using the 3DMCad SolidWorks program.

The advantages and disadvantages of using virtual reality display tools in the 3D design process are described.

**Key words:** Virtual reality, SolidWorks, Immersive technology eDrawings PRO, 3DMCad, VR headset, HTC Vive Pro



## 1. Uvod

Stanley Weibaum je jedan od glavnih inovatora rane znanstvene fantastike, 1935. godine objavljuje revolucionarnu priču pod nazivom “Pygmalionove naočale” (*Pygmalion’s Spectacles*), u kojoj je zamislio virtualne naočale koje će prikazivati holograme te stimulirati osjetila mirisa, okusa i dodira. Virtualna stvarnost (*virtual reality - VR*) kao ideja nije nova već je svoj začetak imala krajem 18. stoljeća u Europi kad su se pojavile panoramske slike koje su stvarale osjećaj iluzije kod gledatelja. Navedene slike potpuno ispunje vidno polje pa se gledatelj osjeća kao da se nalazi u sceni tj. da je fizički prisutan u prikazanim događajima. Na slici 1 nalazi se jedan takav panoramski prikaz Londona.



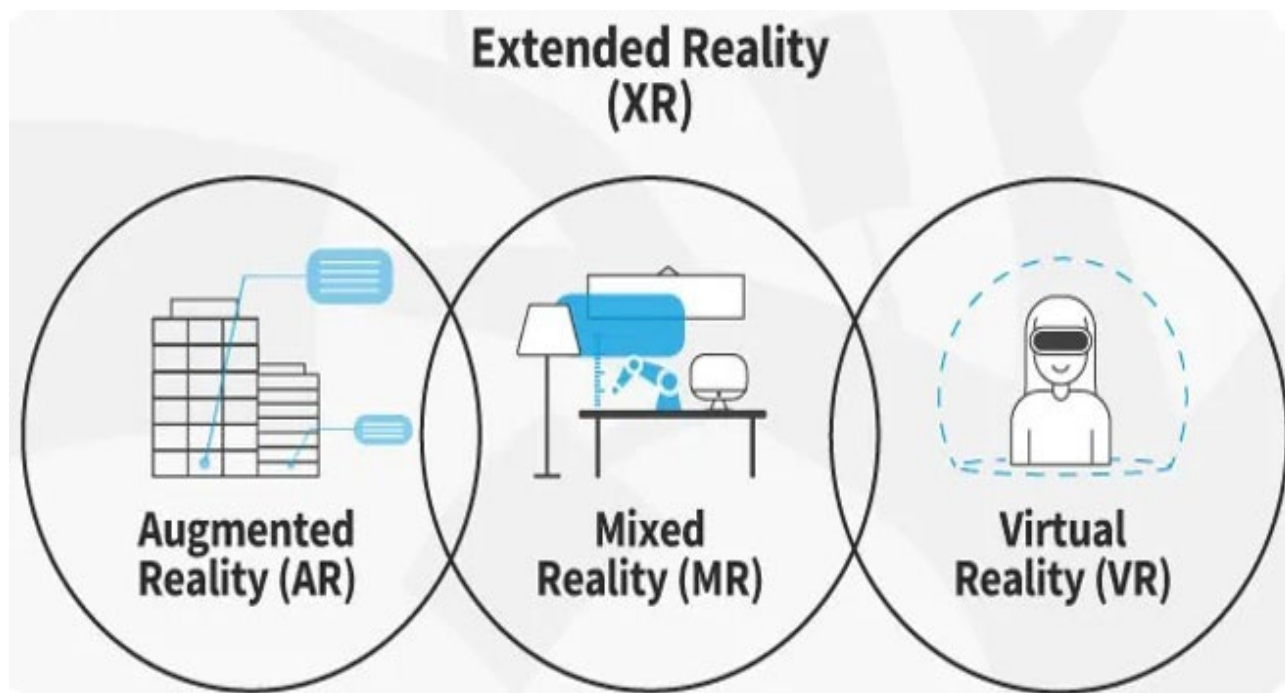
**Slika 1.** Panorama Londona [1]

Virtualna stvarnost *VR* često se koristi kao krovni izraz za sve vrste imerzivnih tehnologija (*immersive technology*), uključujući mnoge povezane pojmove kao što su proširena stvarnost (*augmented reality - AR*), mješovita stvarnost (*mixed reality - MR*) i produžena stvarnost (*extended reality - XR*) [2]. U ovom članku kad se spominje *VR* misli se na računalno simuliranu stvarnost koja stvara virtualno fizičko okruženje koje ne postoji. Bitno je napomenuti da su digitalna okruženja u *VR*-u odvojena od stvarnog fizičkog svijeta. *VR* se ne obraća našoj inteligenciji i mašti, nego prvenstveno našoj percepciji: cilj je zavarati osjetila, odnosno mozak, kako bismo zaista imali osjećaj da se tamo nalazimo. Što potpuniji doživljaj, to bolje. Sadržaj tu gotovo da i nije bitan, bar nije primaran. Ključna riječ je: imerzija, odnosno uronjenost. Osnovna ambicija *VR* tehnologije je upravo potpuna, totalna uronjenost (*total immersion*), a misli se na uronjenost ili stopljenost s umjetnom, digitalnom okolinom, gdje se pokušava postići maksimalan doživljaj te alternativne, virtualne stvarnosti [3]. Primjena *VR* tehnologije je mnogobrojna: medicina, kultura, industrija igara, edukacija i arhitektura su područja koja su iskoristila prednosti navedene tehnologije. Od vođenih posjeta muzejima do prikaza mišićnog tkiva, *VR* nam omogućuje prijelaz granica stvarnosti. Primjena *VR*-a u strojarstvu nije ograničena samo na prezentaciju 3D modela i različitih projekata u virtualnom okruženju već se može koristiti u održavanju, razvoju i 3D oblikovanju. Trend korištenja *VR*-a je u strojarstvu je u uzlaznoj putanji ali je još uvijek daleko do postizanja svog maksimuma. Svi programski 3DMcad sustavi su u nekoj mjeri uveli mogućnost korištenja *VR* tehnologije. Najčešći oblik je korištenje pomoću “alata” za *VR* tehnologiju – naočala za virtualnu stvarnost. Među prvom generacijom dostupnih uređaja nalazi se i HTC Vive Pro naočale koje su kompatibilne s najčešće korištenim 3D MCad programskim sustavom SolidWorks. Potrebno je napomenuti da je za korištenje *VR* potrebno koristiti modul eDrawings PRO koji dolazi samo sa SolidWorks Premium paketom a dostupan je tek od 2020 godine.



## 2. Podjela imerzivnih tehnologija

U uvodu je napomenuto a se u svakodnevnom rječniku izraz virtualna stvarnost koristi za čitavi niz imerzivnih tehnologija što je pogrešno. Zbog vrlo sličnih izraza vrlo često dolazi do zabune i pogrešnog tumačenja naziva za različite vrste stvarnosti. Na slici 2 nalazi se prikaz podjela nazivlja za imerzivne tehnologije.



**Slika 2.** Prikaz imerzivnih tehnologija [4]

### 2.1. Produžena stvarnost (*extended reality – XR*)

Produžena stvarnost (*XR*) je izraz koji obuhvaća bilo koju vrstu tehnologije koja mijenja stvarnost dodavanjem virtualnih (digitalnih) elemenata fizičkom ili stvarnom okruženju u bilo kojoj mjeri, brišući granicu između fizičkog i digitalnog svijeta. *XR* uključuje *AR*, *MR*, *VR* i bilo koju tehnologiju - čak i one koje tek trebaju biti razvijene [4].

### 2.2. Proširena stvarnost (*augmented reality – AR*)

Proširena stvarnost (*AR*) tehnologija je koja omogućuje smještaj digitalnih elemenata u stvarno okruženje. U *AR* iskustvu može se vidjeti prikaz fizičkih ili stvarnih elemenata i digitalnih elemenata. Nema interakcije između fizičkih i virtualnih elemenata [4].

### 2.3. Virtualna stvarnost (*virtual reality – VR*)

Virtualna stvarnost (*VR*) je tehnologija koja omogućuje stvaranje potpunog digitalnog okruženja. U *VR* iskustvima fizičkog ili stvarnog okruženja nema. Postoji potpuna interakcija između digitalnih elemenata [4].

### 2.4. Miješana stvarnost (*mixed reality – MR*)

Mješovita stvarnost (*MR*) je tehnologija koja omogućuje smještaj digitalnih elemenata u stvarnom okruženju te i njihovu interakciju. U *MR* iskustvu, korisnik može vidjeti i komunicirati s digitalnim i fizičkim elementima [4].



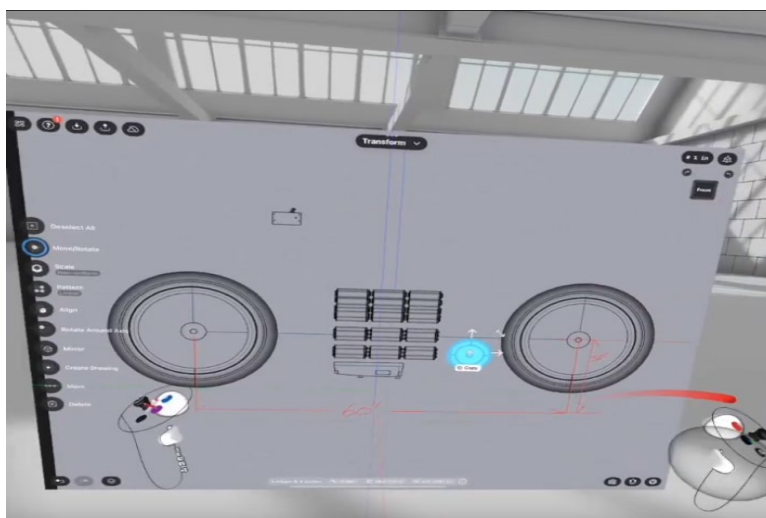


### 3. Podjela programa za korištenje virtualne stvarnosti (VR) u 3D oblikovanju

Virtualna stvarnost (VR) jedna je od ključnih tehnologija koje ćemo uskoro vidjeti implementirane u industriji budućnosti ("Industrija 4.0"). A sada kada su podaci postali sirova nafta 21. stoljeća, "poigravanje" sa stvarnošću je neizbježno [5]. Da bi navedeni trendovi bili uspješno praćeni, potrebno je izvršiti analizu i podjelu dostupnih programskih sustava za korištenje u strojarstvu, pretežno za 3D oblikovanje (modeliranje). Jedna od podjela može ići u smjeru podjele prema dostupnoj interakciji između korisnika i virtualnih elemenata u virtualnom okruženju. Ovo je samo nekoliko primjera programa koji se koriste za rad s virtualnom stvarnošću. Specifični softver koji se koristi može se razlikovati ovisno o namjeni programa, ciljnoj platformi (PC), željenim značajkama i funkcionalnostima.

#### 3.1. Programi za 3D oblikovanje (modeliranje) i dizajniranje u VR-u

Stupanj interakcije između korisnika i virtualnih elemenata je najkompleksniji. Programi koji spadaju u ovu skupinu posjeduju alate za parametarsko 3D oblikovanje modela i sklopova. Navedeni alati (*Sketch*, *Extrude*, *Revolved*, *Sweep*...) omogućavaju oblikovanje u virtualnoj okruženju koje se prati s virtualnim naočalama a odabir alata i dimenzije se vrši uz pomoću kontrolera za ruke. Na slici 3 nalazi se Gravity Sketch VR program s grafičkim s radnom površinom i grafički sučeljem koje prikazuje raspored alata i skicu 3D modela.



Slika 3. Gravity Sketch VR

#### 3.2. Programi za prikaz i prezentaciju 3D modela i sklopova u VR-u

Stupanj interakcije između korisnika i virtualnih elemenata je manji nego kod prve skupine programa. Omogućena je interakcija korisnika i digitalnih elemenata tako da se digitalni elementi mogu konfigurirati, pomicati ili vršiti određeni simulacijski prikazi po digitalnom okruženju. Promjena parametara modela (npr. dimenzija) nije moguća već je za navedene radnje potrebno koristiti 3D MCad programske alate. Neki dostupna programska rješanja nisu integralni dio 3D MCad programa već ih je potrebno zasebno kupiti i instalirati kao npr. SimLab program za Solid Edge 3D MCAD. Za SolidWorks postoji integralno rješenje u obliku 3Drawings PRO programa koji dolazi isključivo s Premium inačicom i nije dostupan za Professional i Standard programske pakete.

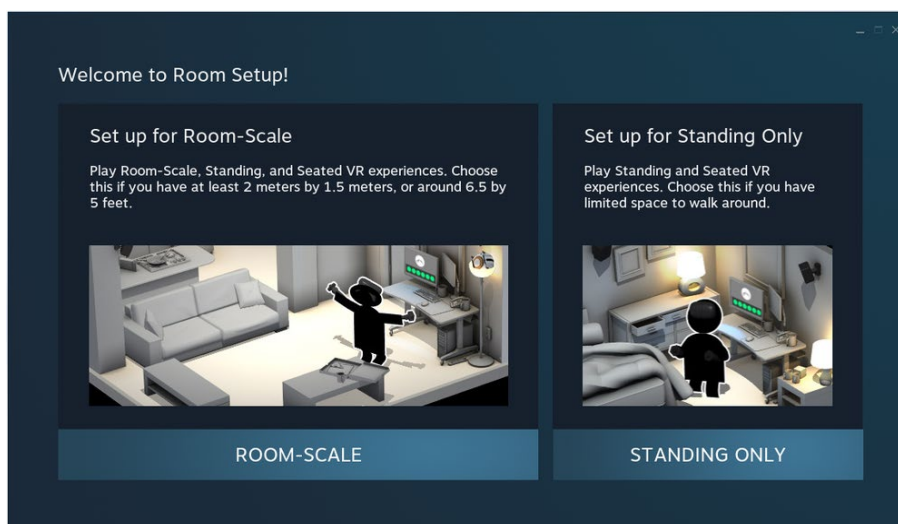
#### 4. Naočale za prikaz virtualne stvarnosti HTC Vive Pro

U stranoj literaturi naočale za prikaz VR se nazivaju i *VR Headset*. Omogućavaju korisnicima interakciju sa simuliranim okruženjima i iskustvo pogleda iz prvog lica [7]. Vive Pro (slika 4) je nastao 2018 godine iz prve generacije Vive *headseta* iz 2016 godine.



Slika 4. VR headset HTC Vive Pro – osnovni dijelovi [8]

Navedeni *VR headset* spada u klasu vrhunskih uređaja, spaja se na računalo i sastoji se od: baznih stanica (*base station*) za praćenje pokreta, naglavnog zaslona (koji se sastoji od naočalama, senzora za praćenje položaja glave te slušalica) i kontrolera za ruke. Bitno je napomenuti da je za rad s navedenim uređajem potreban program SteamVR koji omogućava kalibraciju uređaj (slika 5) u određenom stvarnom radnom volumenu prostorije unutar kojeg se stvara digitalno okruženje s raznim digitalnim elementima.



Slika 5. Kalibracija VR headseta unutar SteamVR programa

SteamVR i *VR headset* Vive Pro su samo jedan od dijelova potrebnog sustava softvera i hardvera za uspješnu rad s eDrawings PRO i SolidWorks Premium programima.

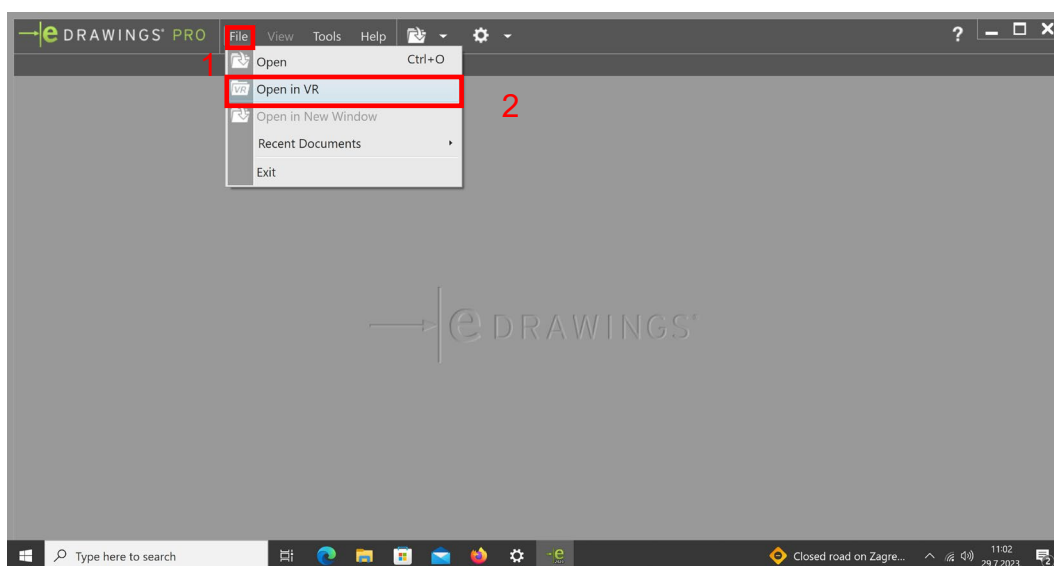
## 5. Prikaz virtualne stvarnosti u eDrawings PRO programu

eDrawings proizvodi uključuju eDrawings Viewer dostupan u besplatnoj i verziji koja se naplaćuje te eDrawings Publishers. eDrawings Viewer se koristi za pregled i stvaranje eDrawing i ostalih podržanih datoteka. Publisher se koristi za izradu eDrawings datoteka unutar CAD programa [9]. eDrawings je podržan na svim operacijskim sustavima a program se može instalirati i na mobitele te tablete. eDrawing PRO (professional) ima nekoliko opcija koja nisu dostupne u *none PRO* varijanti: korištenje virtualne stvarnosti VR na računalu te korištenje proširene stvarnosti AR na mobilnim uređajima - jedne su od bitnijih razlika. Izgled ikone za pokretanje je isti za obje verzije programa (eDrawings 2021 i eDrawings PRO 2021) i nalazi se na slici 6.



**Slika 6.** Izgled ikone za pokretanje eDrawings programa

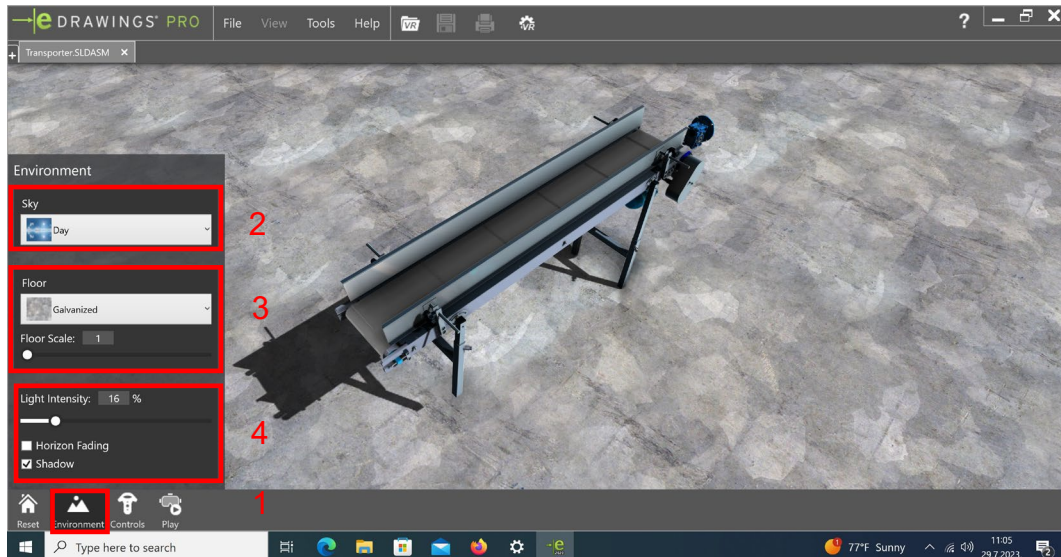
Grafičko korisničko sučelje eDrawings PRO nalazi se na slici 7 s potrebnim koracima (od 1 do 2) za otvaranje 3D sklopa transportera u digitalnoj okolini odnosno VR-u.



**Slika 7.** Izgled korisničkog grafičkog sučelja eDrawings Professional programa

Može se primijetiti da je u gornjem lijevom kutu (slika 7) naznačeni naziv *Professional*. Potrebno je naglasiti da je prije pokretanja programa potrebno pokrenuti SteamVR softver koji vrši pokretanje VR headseta Vive Pro. U eDrawings-u (PRO i non PRO) moguće je otvoriti standardne SolidWorks datoteke (modele i sklopove), ali i univerzalne STEP datoteke. Moguće je otvoriti i specijalizirane eDrawings datoteke koje omogućuju lakšu komunikaciju između računala koja nemaju SolidWorks ali imaju besplatan eDrawings.

Nakon otvaranja sklopa transportera potrebno je podesiti opcije okoliša (*enviroment*). Mogu se podešavati izgled neba (Sky), izgled poda (Floor), intenziteta osvjetljenja (*Light intensity*) te mogućnosti prikaza sjena (*Shadow*). Slika 8 prikazuje podešavanje od 1 do 4.



Slika 8. 3D sklop transportera

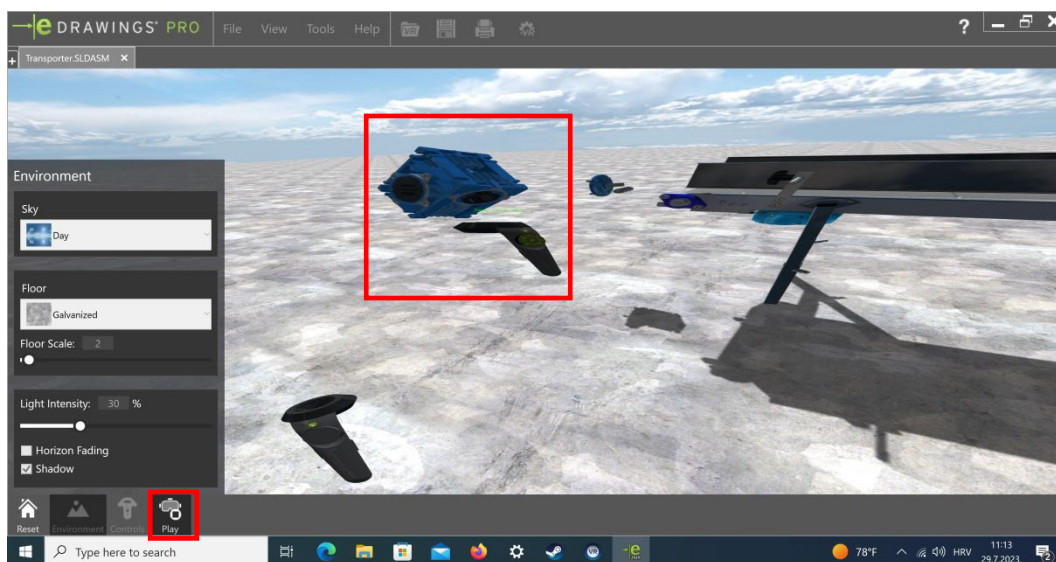
Nakon podešavanje okoline potrebno je proučiti kontrole (*Controls*) kontrolera za kretanje kroz virtualni prostor (slika 9). Pritiskom na tipku 1 (kontroler za lijevu ruku) moguće je dobiti eksplodirani pogled (*Exploded View*) na učitani 3D sklop. Na desnom kontroleru (za desnu ruku) nalazi se tipka 2 koja omogućava centriranje i sklapanje modela iz eksplodiranog pogleda. Tipka 3 služi za kretanje kroz digitalni prostor na principu teleportacije a tipka 4 služi za manipulaciju s digitalnim elementima – 3D modelima.



Slika 9. Lijevi i desni kontroler VR *hedseta*

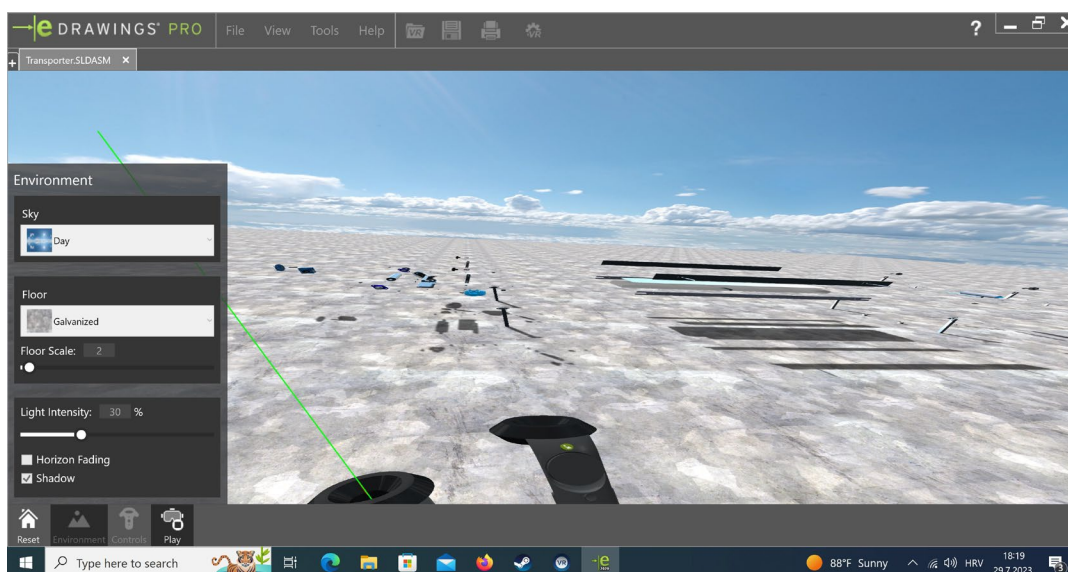


Nakon podešavanje okoline i upoznavanje s kontrolerima potrebno je kliknuti na karticu (*Tab*) *Play* koja aktivira prikaz okoline i 3D sklopa na *VR headsetu*. Potrebno je pažljivo staviti i podesiti VR headset na glavu a kontrolere u ruke uz naravno, pažljivo kretanje kroz fizički stvarni prostori. Prikaz na *VR headsetu* nije moguće dočarati s prikazom 2D slike ali u svakom trenutku moguće je prati na monitoru ono što se vidi na *VR headsetu*. Slika 10 prikazuje manipulaciju digitalni elementom unutar 3d sklopa transportera.



**Slika 10.** 3D sklop transportera s izdvojeni 3D modelom reduktora

3D model reduktora je moguće pomoću desnog kontrolera približiti i udaljavati od vidnog polja i na taj način moguće je simulirati i dočarati stvarnu veličinu 3D modela i 3D sklopa. Na slici 11 nalazi se 3D sklop transporter u eksplodiranom pogledu sa svim 3D modelima.



**Slika 11.** 3D sklop transportera u eksplodiranom pogledu



## 6. Zaključak

VR tehnologija postala je neprocjenjiv alat u području strojarstva, nudeći prednosti u rasponu od poboljšane vizualizacije dizajna do uštede troškova i poboljšane suradnje između inženjera. Opisani eDrawings PRO softver omogućuje strojarskim inženjerima stvaranje i interakciju s 3D modelima i sklopovima na intuitivniji način omogućavajući im da bolje vizualiziraju svoje dizajne, otkriju potencijalne nedostatke i izvrše prilagodbe u stvarnom vremenu, što dovodi do učinkovitijeg i inovativnijeg razvoja proizvoda. Međutim, upotreba VR-a u 3D oblikovanju (npr. proizvoda) ograničeno je na postprocesnu fazu 3D oblikovanja u koju ulazi pregled, procjena i prezentacija dizajna. U samom procesu "klasičnog stolnog" (*desktop*) 3D oblikovanja nedostaje im potrebna točnost i prijenos modela u kasnije faze razvoja proizvoda. Potrebno je napomenuti da postoji još uvijek čitavi niz nedostataka kojih treba riješiti. Virtualne naočale kao glavni alata za korištenje u VR-a imaju probleme poput male rezolucije prikaza i frekvencije osvježavanja slike. VR *headset-i* mogu uzrokovati zamagljen vid, mučninu kretanja, trzanje i suhe oči. Za ublažavanje navedenih problema potrebno je koristiti vrhunske VR *headset* prve, ili poboljšane prve generacije (npr. HTC Vive Pro 2) koji zahtijevaju vrhunske računalne konfiguracije što je cjenovno dosta izazovno. Dobra stvar je da tehnologija svakodnevno napreduje pa se uvodi nova tehnologija praćenja očiju korisnika koja će znatno poboljšati iskustvo prividne stvarnosti, jer će imati realniji doživljaj osjeta vida. Praćenje oka omogućuje izoštravanje slike na koju je pogled usmjeren, a zamučivanje perifernog vida, baš kao i u fizičkom okruženju vidimo. Da bi VR postigao svoju maksimalnu iskoristivost potreban je određena radna površina koja služi za kretanje i manipulaciju s digitalnim objektima. U slučaju male radne površine dolazi do problema s praćenjem VR headseta i kontrolera jer kamere (senzori) koji prate pokrete nemaju adekvatno vidno polje. Kako se tehnologija nastavlja razvijati, vjerojatno će VR prevladati sve probleme te će igrati još značajniju ulogu i u samom procesu 3D oblikovanja.

## 7. Literatura

- [1] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panorama\\_of\\_London\\_Barker.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panorama_of_London_Barker.jpg) 27.7.2023
- [2] Mealy, Paul. Virtual & Augmented Reality for dummies. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2018, Introducing Virtual Reality and Augmented Reality
- [3] <https://psihologis.com/virtualna-stvarnost-tipovi-primjena/> 27.7.2023
- [4] <https://www.interaction-design.org/literature/article/beyond-ar-vs-vr-what-is-the-difference-between-ar-vs-mr-vs-vr-vs-xr> 27.7.2023
- [5] <https://www.utt.fr/english-version/expertises/mechanical-engineering-design-and-virtual-reality> 27.7.2023
- [6] Balzerkiewitz, H.-P.; Stechert, C. The Evolution of Virtual Reality Towards the Usage in Early Design Phases. Proc. Des. Soc. Des.Conf. 2020, 1, 91–100
- [7] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/VR-headset-virtual-reality-headset> 27.7.2023
- [8] <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro-full-kit/> 27.7.2023
- [9] [https://help.solidworks.com/2023/English/edrawings/c\\_ProductInstallations.htm?format=P&value=](https://help.solidworks.com/2023/English/edrawings/c_ProductInstallations.htm?format=P&value=) 27.7.2023



## Economical design of vertical storage tanks

T. Zsebe<sup>1</sup>, Gy. Vasvári<sup>1</sup>, F. Orbán<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology,  
University of Pécs, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [orban.ferenc@mik.pte.hu](mailto:orban.ferenc@mik.pte.hu)

### Abstract

Above ground steel storage tanks are large containers that hold liquids or gaseous substances. Fossil energy sources are non-renewable resources, but they can produce electricity at any time. Recently, the importance of storing diesel fuel, gasoline and natural gas has increased. Components of storage tanks include a bottom plate, a tank shell, the roof of the tank and accessory structures. The bottom of the tank is constructed of flat plates. Tanks are supported by a reinforced concrete foundation. The design of the foundation depends on the soil conditions. A fixed roof tank is usually fitted with a conical top roof. Larger diameter conical roofs are supported by a roof structure. Tanks are most often thin walled with stepwise variable shell thickness. The study is limited to the examination of the stress in the tank wall due to the hydrostatic pressure from the fluid action of filled tanks and buckling behaviour. The loads are described in accordance with the Eurocodes. In the case of a given container volume, the main dimensions of the container have to be determined if minimum weight is to be achieved. A detailed calculation for the optimized dimensions is performed and the wind and seismic effects are also examined. Wind and earthquake loads largely depend on the environmental conditions of the proposed site. The calculations are performed for a tank that was built in Hungary.

**Keywords:** Cylindrical steel tanks, Membrane theory, Fluid action, Wind and Seismic action, Eurocode

### 1. Introduction

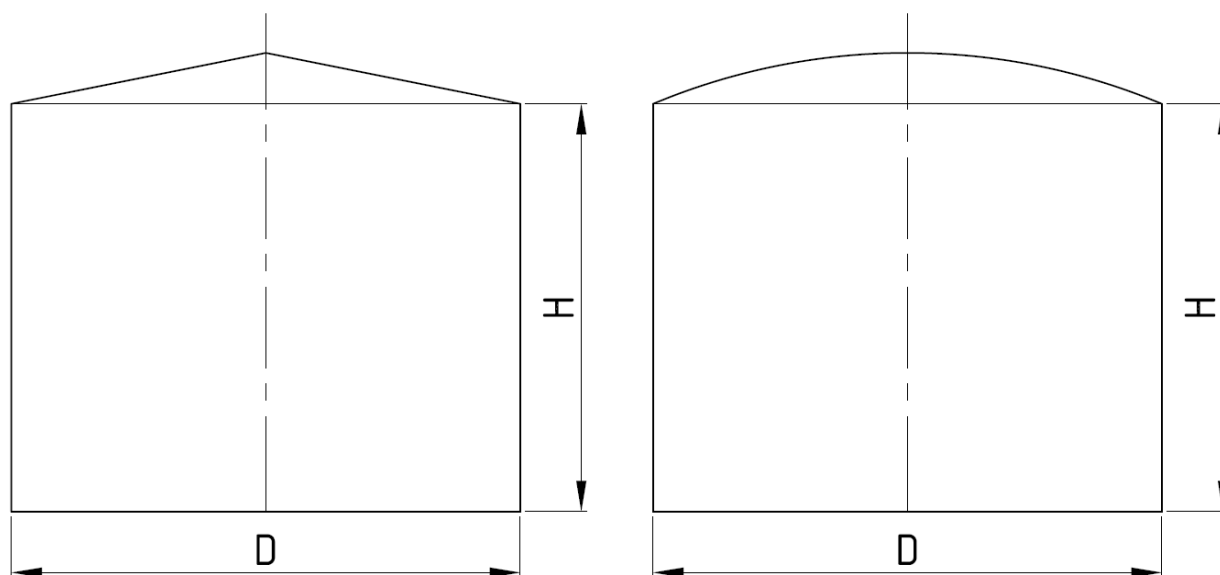
Storage tanks are used worldwide for the storage of various liquids and compressed gases. Research on storage tanks has increased significantly the last 20 years. This is due to the huge economic, environmental and social impacts of accidents or natural disasters. Some tanks are tall and slim and some are short and wide. The trend has been in the last decade to build fewer but larger diameter and thus higher capacity tanks than before. Tanks in China have reached a diameter of 100 m with a capacity of 100 000 m<sup>3</sup>.

Hand calculation models have been developed in accordance with Eurocodes EN 1993 – 1-6-:2007

and EN 1993 – 4 -2 : 2007. However, the Eurocodes also allow for the use of numerical calculations, e.g, the Finite Element Method (FEM).

The American standard API 650 deals with the design of cylindrical storage tanks. Tanks usually consist of a cylindrical steel shell of stepwise variable thickness with insulation.

Tanks are also designed with a circular plate at the base and with a roof which can be conically or spherically shaped. Fig.1



**Figure 1.** Main dimensional variables of storage tanks

The main dimensions of the storage tank have to be determined if minimum weight is to be achieved.

Ground storage tanks are subjected to both static and variable loads from wind and snow action, as well as fluid action.

Nowadays, it seems to be important to analyze the valuable structures for seismic action as well. Petroleum and petroleum products evaporate during storage, so some of them end up in the environment. There are several solutions to prevent the loss caused by evaporation e.g.-insulation. Some tanks also have floating roofs, which rise and fall depending on the liquid level in the tank in order to decrease the vapor space in the tank.

In this article the calculations are performed for an optimized fix-roof tank that was built in Hungary.

## 2. Optimum dimensions of a vertical storage tank

The size of the storage tank is determined in a way so that the required amount of material is minimal. Let  $Q$  be the volume of the tank,  $H$  the height of the tank,  $s_0$  the constant wall thickness of the tank,  $s_b$  the bottom wall thickness of tank,  $s_r$  the wall thickness of the top the tank without the corrosion allowance  $c$ .

$V$  is the volume of plates required for container (tank). The material of the storage tank is structural steel, so instead of minimum weight we calculate a minimum volume.

$$V = D \cdot \pi \cdot H \cdot s_o + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_f) = D \cdot \pi \cdot \frac{4Q}{D^2 \pi} \cdot s_o + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_r)$$

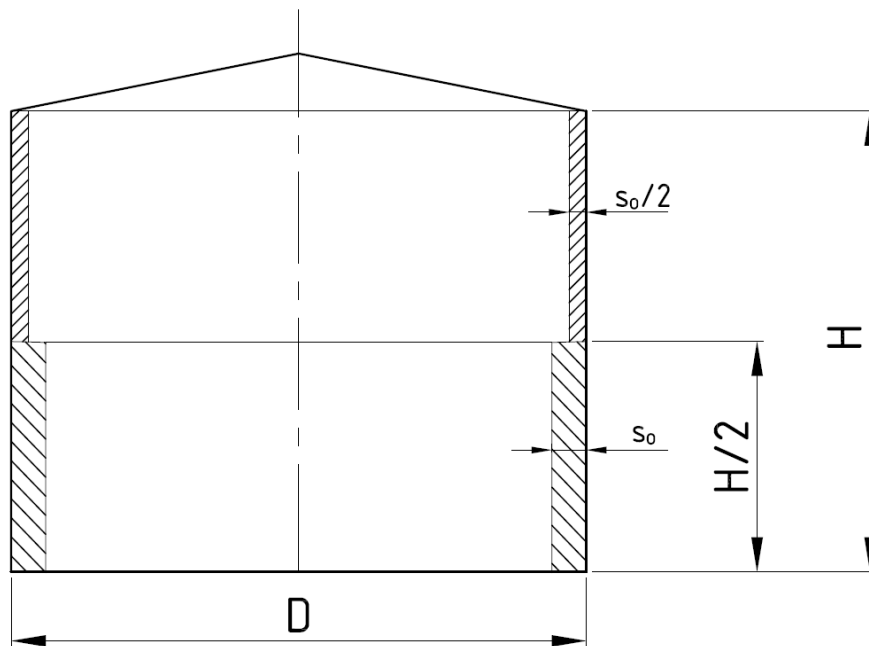
$$\frac{dV}{dD} = -\frac{4Q \cdot s_o}{D^2} + \frac{D\pi}{2} (s_b + s_r)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{8Q \cdot s_o}{\pi \cdot (s_f + s_r)}}$$

**Table 1.** Dimensions of the tank for different volumes

Q [m <sup>3</sup> ]	s <sub>o</sub> [mm]	s <sub>r</sub> [mm]	s <sub>b</sub> [mm]	D [m]	H [m]
500	5	6	5	8.33	9.17
1000	5	6	5	10.49	11.57
1500	6	6	5	11.7	13.95

Storage tank of variable thickness Fig.2.



**Figure 2.** Main dimensions of variable thickened storage tank

$$V = D \cdot \pi \cdot \frac{H}{2} \cdot s_o + D \cdot \pi \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{s_o}{2} + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_r) = \frac{3}{4} D \cdot \pi \cdot H \cdot s_o + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_r)$$

$$s_o = \frac{D \cdot \rho \cdot g \cdot H}{2 \cdot f_m}$$

$$V = \frac{3}{4} D^2 \cdot \pi \cdot \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot f_m} \cdot \left( \frac{4Q^2}{D^2 \pi} \right)^2 + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_r) =$$

$$= \frac{12Q^2 \cdot \rho \cdot g}{D^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot f_m} + \frac{D^2 \pi}{4} (s_b + s_r)$$



$$\frac{dV}{dD} = -\frac{12Q^2 \cdot \rho \cdot g}{D^3 \cdot \pi \cdot f_m} + \frac{D\pi}{2} (s_b + s_r)$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{24Q^2 \cdot \rho \cdot g}{\pi^2 \cdot f_m \cdot (s_b + s_r)}}$$

**Table 2.** Optimized dimensions for different volumes

Q [m <sup>3</sup> ]	s <sub>r</sub> [mm]	s <sub>b</sub> [mm]	D [m]	H [m]
500	6	5	8.11	9.67
1000	6	5	11.48	9.66
1500	6	6	13.75	10.09

The design steps are presented for a steel tank with a diameter of 11m, a height of 11m and a working volume of 1000 m<sup>3</sup>.

### 3. Design for fluid action

The shell plate thickness of the tank is determined using EN 1993-4-2

$$t = \frac{\gamma_d \cdot (\gamma_f \cdot \rho \cdot g \cdot H_j + p_{Ed})}{f_{yd}} \cdot r$$

According to EN 14015 the required minimum thickness of the plates shall be

$$e_c = \frac{D}{20S} [98W(H_c - 0.3) + p] + c$$

Design calculation according to EN 1993-4-2

$$\rho \cdot g = 10 \text{ kN/m}^3; f_y = 235 \text{ MPa, yield stress for S235}$$

$$D = 11 \text{ m}; r = 5500 \text{ mm}; H_j = 10.52 \text{ m}; c = \text{corrosion allowance}$$

$$p_{Ed} = 20 \text{ mbar}$$

$$\gamma_d = 0.83; \gamma_f = 1.4$$

$$t = \frac{0.83 \cdot (1.4 \cdot 9810 \cdot 10.52 + 2 \cdot 10^3)}{235 \cdot 10^6} \cdot 5.5 = 2.84 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Design calculation according to EN 14015

H<sub>c</sub> = 10.52 m, distance from the bottom of the course under consideration to the design liquid surface in m.

S = 124.8 N/mm<sup>2</sup> allowable design stress

W = maximum density of the contained course of the tank shell.

$$e_c = \frac{12}{20 \cdot 124.8} [98 \cdot 1 \cdot (10.52 - 0.3) + 20] = 4.91 \text{ mm}$$





The calculation accordance to EN 14015 is more realistic because we calculate with the allowable stress instead of yield stress. According to EN 14015, 9.1.5 table 16, the required minimum thickness of the plates shall be not less than 5 mm.

The results are calculated using the membrane theory but at the connection of the bottom plate and cylindrical wall the membrane state is not valid. A stiffening ring is required in the plane of the bottom plate.

#### 4. Design for meridional buckling stress

The elastic critical meridional buckling stress can be calculated as follows:

$$\sigma_{x.Rcr} = 0.605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r} = 115.5 \text{ MPa}$$

$C_x = 1$ , medium length cylinders

The meridional elastic imperfection factor  $\alpha_x$  can be calculated using the following equation.

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left( \frac{\Delta W_k}{t} \right)^{1.44}} = 0.252$$

$\Delta W_k$  – characteristic imperfection amplitude

$$\Delta W_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t = \frac{1}{40} \sqrt{\frac{5500}{5}} \cdot 5 = 4.145$$

$Q$  – fabrication tolerance [3]

The relative shell slenderness is calculated as follows:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x.Rcr}}} = 1.426 < \lambda_p = 2.46$$

$$\chi_x = \frac{\alpha_x}{\lambda_x^2} = 0.123$$

$\chi_x$  – buckling reduction factor

The buckling resistance

$$\sigma_{x.Rk} = \chi_x \cdot f_y = 29.12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x.Rd} = \frac{\sigma_{x.Rk}}{\gamma_{M1}} = 29.12 \text{ MPa}$$

Meridional stress at the bottom of cylindrical shell:

$$\sigma_{x.Ed} = \frac{\gamma_d(1 \cdot 35 \cdot 0.89 \cdot G + \gamma_Q \cdot \psi_o \cdot s)}{D\pi \cdot t} = 1.5 \text{ N/mm}^2$$

$$W = D\pi \cdot H \cdot \rho \cdot g = 146 \text{ kN}$$

$$G = N_{roof} + W = 188.6 \text{ kN}$$

$$N_{roof} = \frac{D^2\pi}{4} \cdot q_r = 42.6 \text{ kN}$$

$$q_r = 480 \text{ N/m}^2 \text{ (estimated value based on literature)}$$

Snow load:

$$S = \mu_i \cdot s_k \cdot C_e \cdot C_t \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 95 \text{ kN}$$

$$s_k = 1.25 \text{ kN/m}^2, \text{ characteristic snow load in Hungary}$$

$$\mu_i = 0.8, \text{ roof shape coefficient}$$

$$C_e = C_t = 1$$

$$\sigma_{x.Ed} = 1.5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x.Rd} = 29.12 \text{ MPa}$$

## 5. Design for wind load

The wind load is simulated as pressure distribution acting the on circumferential shell. Although the pressure varies along both the height and circumference of the shell the height the variation is not significant for tanks. EN 1991 – 1- 4 standard gives on equation for pressure distribution ,but EN 1993 – 4-2 allows an equivalent uniform pressure throughout the circumference of the tank.

The peak velocity pressure which is the maximum wind pressure is determined according to equation

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot \left[ k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \right]^2 \cdot q_b$$

Where:

$k_r$  – terrain factor

$z_o$  – roughness length



$I_v(z)$  – turbulence intensity

The basic wind pressure  $q_b$  is calculated as

$$q_b = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot v_b^2$$

$$\rho_{air} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

The basic wind velocity:

$$v_b = C_{air} \cdot C_{season} \cdot v_{bo}$$

$$C_{air} = 0.85; C_{season} = 1; v_b = 20.06 \text{ m/s}$$

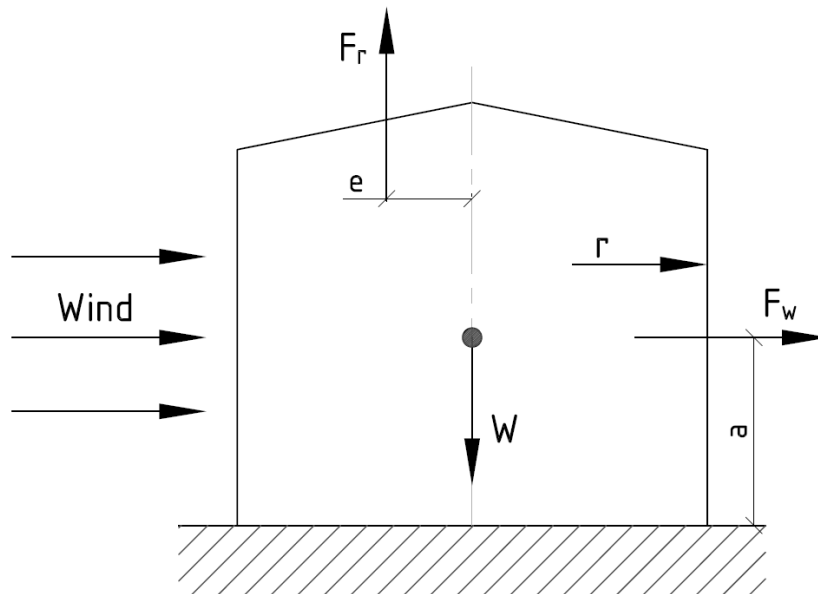
$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 20.05^2 = 25.15 \text{ N/m}^2$$

$$I_v(z) = \frac{k_1}{C_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0.19$$

$$q_p = (1 + 7 \cdot 0.19) \cdot 1.01^2 \cdot 25.15 = 597 \text{ N/m}^2$$

$$q_{eg.Ed} = 597 \text{ N/m}^2$$

Forces caused by the wind load on the tank Fig.3.



**Figure 3.** Forces on the tank

$$F_w = q_p \cdot C_f \cdot D \cdot H = 597 \cdot 0.5 \cdot 11 \cdot 11 = 36.12 \text{ kN}$$

$$F_r = q_p \cdot C_r \cdot R^2 \cdot \pi = 597 \cdot 0.8 \cdot 113 = 59.96 \text{ kN}$$

Lines of action of forces:

$$a = 4.95 \text{ m}; e = 1.76 \text{ m.}$$

Overturning of the storage tank around point A

$$\frac{W \cdot R}{F_w \cdot a + F_r(R + e)} = \frac{188.6 \cdot 5.5}{36.12 \cdot 4.95 + 59.96 \cdot 7.26} = 1.76 > 1.5$$

## 6. Buckling under external pressure

The critical buckling under external pressure for an isotropic wall should be found as:

$$p_{n,Rcru} = 0.92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \left(\frac{r}{l}\right) \left(\frac{t}{r}\right)^{2.5}$$

$C_b$  - is the external pressure buckling coefficient,  $C_b = 1$

$C_w$  - is the wind pressure distribution coefficient

$$C_w = \frac{2,2}{1 + 0,1 \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}}}$$

$$p_{n,Rcru} = 3755 \text{ Pa}$$

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = 1706 \text{ Pa}$$

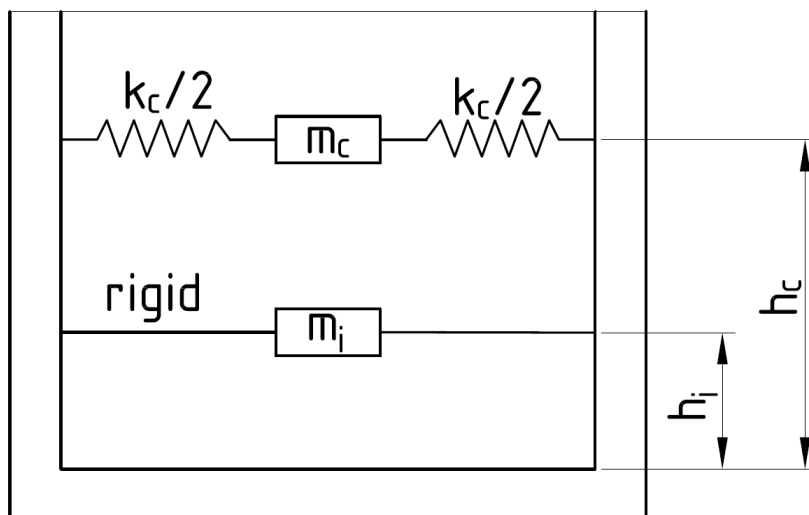
$$p_{Ed} = \gamma_d \cdot \gamma_Q (q_{Eq} + 0.4q_{Eq}) = 835.8 \text{ Pa}$$

The resistance should satisfy the condition

$$p_{Ed} < p_{n,Rd}$$

## 7. Seismic action

For the seismic action, the calculation is performed using the EN 1998 – 4 : 2006 methods. The liquid filled tank is modelled like a double single – degree of freedom system. (Fig.4.)



**Figure 4.** Double single degree of freedom system

One system is rigidly connected to the tank shell (impulsive) and the second which is attached to the tank through a springs (convective)[2].

The time of period of the impulsive mode ( $T_i$ ) of vibration

$$T_{imD} = C_i \cdot \frac{h \cdot \sqrt{\rho}}{\sqrt{\frac{t}{D}} \cdot \sqrt{E}} = 0.144 \text{ s}$$

$C_i$  - coefficient of time period for impulsive mode

$h$  - maximum depth of the liquid

$$C_i = \frac{1}{\sqrt{\frac{h}{D}} \cdot \left(0.46 - \frac{0.3h}{D} + 0.067 \left(\frac{h}{D}\right)^2\right)} = 4.33$$

$T_c$ , convective time

$$T_c = C_c \cdot \sqrt{R} = 3.52 \text{ s}$$

$C_c = 1.5$

$m_{tot} = 1000 \text{ t}$ , liquid mass

$m_w = 14.92 \text{ wall mass}$

$m_r = 5.3 \text{ t}$ , roof mass

Impulsive and convective masses according EN 1998

$W_i = 0.77 \cdot 1000 = 770 \text{ t}$

$W = 0.23 \cdot 1000 = 230 \text{ t}$

Centroid of impulsive mass  $h = 0.448 \cdot h = 4.71 \text{ m}$



Centroid of convective mass  $h = 0.75 \cdot h = 7.82 \text{ m}$

Acceleration coefficient

$$T_i < T_B = 0.2 \text{ s}$$

$$S_d = a_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] = 2.41 \text{ m/s}^2$$

$$a_g = \gamma_i \cdot a_{gR} = 1.4 \cdot 0.12g = 1.64 \text{ m/s}^2$$

$\gamma_i = 1.4$ ; importance factor

$S = 1.35$ ; soil factor

$q = 2.0$ ; behaviour factor

$$T > T_D = 2 \text{ s}$$

$$S_d = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \frac{T_c \cdot T_D}{T} = 1.24 \text{ m/s}^2$$

Overturning seismic moment

$$M = (m_i \cdot h_i + m_w \cdot h_w + m_r \cdot h_r) \cdot S_d(T_{imp}) + m_c \cdot h_c \cdot S_d(T_{con}) = 11.3 \text{ MNm}$$

## 8. Conclusions

First, we dealt with the selection of the size of the tank, but only the hydrostatic pressure was taken into account as a load. The loads taken into account for the size of the tank are presented in an example. The effect of wind load and the examination of buckling were discussed. When sizing for earthquakes, a simplified procedure was used.

The dimensioning of the tank roof was presented in a previous article[ ]. We do not deal with the foundation of the tank, which is more of a civil engineering task.

## 9. References

- [1] Orbán ,F.,Cs. Nagy G. Optimum Design of Fixed Storage Tank Roof. Proceeding of: 15th Natural Gas, Heat and water conference, 8th International Natural Gas, Heat and water conference Osijek, Croatia 2017.09.27. - 2017.09.29. pp 329-334 (2017)
- [2] Piereluigi, F.: Comparison of European and American Standards for preliminary design of an Oil Tank Foundation. TU Delft 2014
- [3] Eurocode 3, Design of steel structures. Part 1-6.



# Project management of boiler assembly in a waste incineration plant

S. Šimunović\*, R. Lujić, A. Milinović, Iva Samardžić

University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

\*Corresponding Author. E-mail: [ssimunovic@unisb.hr](mailto:ssimunovic@unisb.hr)

## Abstract

In this paper, the project management of boiler assembly in a waste incineration plant was presented. The phases and some activities of the boiler assembly project were listed and described with the related resources. The MS Project software was used to plan and monitor the boiler assembly, i.e., to create a project plan and different reports. The resulting cost and resource reports were evaluated. Finally, the benefits of project management and the advantages of the software used to plan and monitor project execution were presented.

**Key words:** project management, MS Project, boiler assembly, waste incineration plant.

## 1. Introduction

A project is defined as a series of activities carried out to achieve objectives within budget and planned time. Thus, the project is determined by its beginning and end, it is often limited in time with predefined resources for its realization and the deadline for the "delivery" of the product or service to the customer [1].

Project management is the application of knowledge, skills, tools and techniques for the implementation of project activities that lead to the realization of project requirements. The elements that comprise project management are resources, time, budget, and scope of the project.

Today, the possibilities of project management have been significantly expanded and facilitated compared to the past, mainly due to the availability of software (e.g. MS Project, GanttPro, Teamwork, Zoho Projects, Celoxis, ProofHub, Redmine, Smartsheet, TeamGantt, Wrike, Hive, MeisterTask, Basecamp, Nifty, Trello, JIRA, Asana, Monday.com, Adobe Workfront, Hubstaff, LiquidPlanner, Clickup, Backlog, Plutio, ProjectManager.com, nTask, Planview Daptiv, Milestone Professional, Primavera, Project Engine, jxProject, Gantt Project, Prommpt, WorkflowMax, Bitrix24...) where well-known tools and techniques for project management are embedded. In addition, managers have "powerful" computers at their disposal that can process large amounts of data in a short (real-time) time. These are all prerequisites that can give the company an advantage over the competition. Traditional approaches to preparing, planning and monitoring project execution can no longer keep up with the competition today.

In addition to the software listed above, various methods for automated planning of project activities have been developed and applied. The authors in [2] aim to provide plans for application in project management for underground construction using neural networks based on previous plans for similar projects. Paper [3] presents an expert system for automatically obtaining plans for construction project management, with the goal of automating project management and easily adapting to changes. Papers [4, 5] present an expert system for boiler assembly project management based on knowledge and experience from previous similar boiler assembly projects.

Boilers are used in power plants to generate thermal energy. With the goal of reducing waste, the burning of municipal solid waste is becoming more common and the use of boilers that use this fuel [6, 7]. The incineration of waste leads to a reduction in the amount of waste with the advantage of obtaining energy (waste to energy), saving other sources for the production of heat and electricity. Waste incinerators are increasingly used in different cities to dispose of the waste produced by residents in this way, obtaining heat and electricity, which in turn are used for residents.

The aim of this work is to present the planning and monitoring of the execution of a complex technical project - assembly of a boiler in a waste incineration plant [8] using the software Microsoft Project (further MS Project). Based on the planned start date of the project, the defined duration of all activities (called tasks in MS Project) and the dependencies between activities, MS Project calculates the shortest time required for the realization of the project.

## 2. Methodology

The standard version of the MS Project [9] software was used to represent the project. The project of boiler assembly in the waste incineration plant was planned to start on March 15, 2022 and it was the first information entered into the application. The project consisted of 140 activities, part of which took place in the company and the other part on the site. The duration of each activity was entered manually and given in days. When the duration of the entered activities was defined, it was necessary to organize activities into phases for easier planning and monitoring of the project. The phases of the project (Figure 1) were the Contract signing (Potpisivanje ugovora); Preparation activities (Pripremne aktivnosti); Milestones-Contractual dates (Ključni datumi u projektu); Delivery of documents (Dostava dokumenata); Delivery of equipment (Dostava opreme); Site activities (Aktivnosti na gradilištu) and Boiler assembly (Montaža kotla).

	Task Name	Duration
1	Potpisivanje ugovora	0 days
2	▷ Pripremne aktivnosti	190 days
27	▷ Ključni datumi u projektu	267 days
32	▷ Dostava dokumenata	67 days
38	▷ Dostava opreme	1 day?
40	▷ Aktivnosti na gradilištu	145 days?
54	▷ Montaža kotla	239 days?

**Figure 1.** The phases of the boiler assembly project (for English translation, see text above)

When planning a project, it is important to set nonworking days. They were entered into the project calendar so that the system can calculate and determine the duration and completion of the project as accurately as possible. Working hours were eight hours Monday through Friday, 8 a.m. to 4 p.m., and Saturdays and Sundays were closed, with the exception of unusual Saturdays and Sundays, which are sometimes open so that unfinished activities from Friday do not carry over to Monday. The period from December 22, 2022 to January 2, 2023 was an exception too. Exceptions are any days that do not coincide with the standard calendar. The calendar report is shown in Figure 2.

BASE CALENDAR:	
Day	Standard Hours
Monday	8:00 - 16:00
Tuesday	8:00 - 16:00
Wednesday	8:00 - 16:00
Thursday	8:00 - 16:00
Friday	8:00 - 16:00
Saturday	Nonworking
Sunday	Nonworking
Exceptions:	
Date	Hours
Sun 26.8.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Sun 7.8.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Sat 17.9.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Sat 1.10.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Sat 8.10.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Sat 15.10.22	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00
Thu 22.12.22 - Mon 2.1.23	Nonworking
Sat 21.1.23	8:00 - 12:00, 13:00 - 17:00

**Figure 2.** The project calendar

Appropriate resources are needed to carry out any project. There are three types of resources, namely work, material, and cost. Work resources (people and equipment) have pay rates (price per hour), material resources (consumables) usually have a fixed price, and the cost resources (financial cost) depend on the individual activities. The following work resources were needed for the project (Figure 3): locksmith (Bravar), welder (Zavarivač), foreman (Poslovođa), engineer (Inženjer), site manager (Šef gradilišta), surveyor (Geodet), nondestructive testing operator (NDT operater), three types of engineers who will work at the site and driver (Vozač). The three types of engineers listed were: Health, Safety and Environment Engineer (Inženjer ZNR), Quality Assurance Engineer (Inženjer QA) and Welding Engineer (Inženjer zavarivanja). The work resources also have an overtime pay rate (Ovt. Rate). Of the material resources for the project, the material used by locksmiths (Materijal za bravarski rad) and the material used by welders (Materijal za zavarivački rad) were required. Two cost resources names, namely, mobilization (Mobilizacija) and work (Rad) needed for the cranes and scaffoldings were entered too. Each work resource can have its own work hours that differ from the standard calendar, and vacations and days off can be entered separately for each resource.

	Resource Name	Type	Material Label	Initial	Group	Max. Units	Std. Rate	Ovt. Rate	Cost/Use	Accrue At	Base Calendar
1	Bravar	Work		B		8.000%			0,00 kn	Prorated	Standard
2	Materijal za bravarski rad	Material		M					0,00 kn	Prorated	
3	Zavarivač	Work		Z		1.000%			0,00 kn	Prorated	Standard
4	Materijal za zavarivački rad	Material		M					0,00 kn	Prorated	
5	Poslovođa	Work		P		600%			0,00 kn	Prorated	Standard
6	Inženjer	Work		I		300%			0,00 kn	Prorated	Standard
7	Šef gradilišta	Work		Š		200%			0,00 kn	Prorated	Standard
8	Geodet	Work		G		100%			0,00 kn	Prorated	Standard
9	NDT operater	Work		N		200%			0,00 kn	Prorated	Standard
10	Inženjer ZNR	Work		I		200%			0,00 kn	Prorated	Standard
11	Inženjer QA	Work		I		200%			0,00 kn	Prorated	Standard
12	Inženjer zavarivanja	Work		I		200%			0,00 kn	Prorated	Standard
13	Mobilizacija	Cost		M						Prorated	
14	Rad	Cost		R						Prorated	
15	Vozač	Work		V		100%			0,00 kn	Prorated	Standard

Figure 3. Resources for boiler assembly (for English translation, see text above)

In Figure 3, the Max. Units column represents the maximum capacity of each resource in the project. Max. Units of 8000% for the locksmith (Bravar) resource means that 80 locksmiths will be available to work full-time every workday. The most represented resources on the project are locksmiths and welders, and the reason is that they are needed for almost every activity of the project.

For each of the entered resources, allocation over time diagram can be obtained. A simulation example for the locksmith resource is shown in Figure 4. From the figure, it can be concluded that in the month September of 2022, the locksmith resource was overallocated, meaning that there was a shortage of locksmiths in that month. The red part of the graphical presentation shows the percentage of overallocation, which in this case would be about 300%, i.e. there would be a shortage of 3 locksmiths.

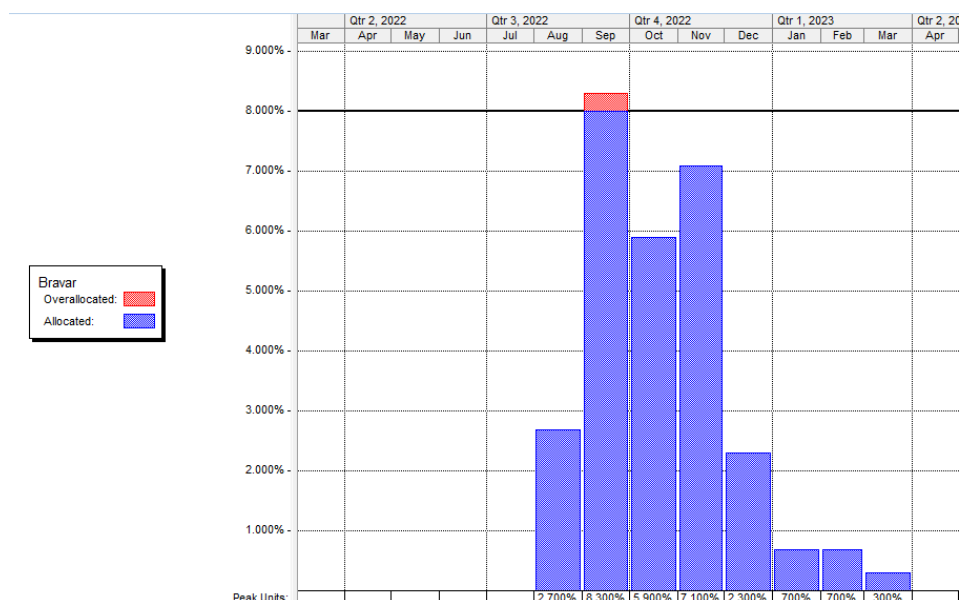


Figure 4. Locksmiths (Bravar) allocation over time

The resources entered are then assigned to project activities. Some project activities have no assigned resources, while others have more. Figure 5 shows the Preparation activities



(Pripreme aktivnosti) phase with activities and subactivities and resources assigned. The activities and subactivities were as follows:

**Koncept montaže (Assembly concept)**

Preliminarni (Preliminary)

Konačni (Final)

**Odgovornosti inženjera za pojedine dijelove kotla (RAMS - Responsibility Assignment Matrix)**

1-3 Prolaz dimnih plinova (1-3 Passage of flue gases)

Horizontalni prolaz dimnih plinova (Horizontal passage of flue gases)

ECO Toranj (ECO Tower)

Bubanj (Drum)

Ložište (Firebox)

Kanali i oprema (Ducts & Equipment)

**Zaštita zdravlja i sigurnost na radu i zaštita okoliša (HSE - Health, Safety and Environment)**

Izrada priručnika za zaštitu na radu (HSE Manual)

SCC - verifikacija osoblja prema dokumentu "Certifikat sigurnosti na radu izvođača radova i poduzetnika" (SCC Sicherheits Certifikat Kontraktoren verification for personal)

**Osiguranje kvalitete/kontrola kvalitete (Quality Assurance/Quality Control)**

Preliminarni plan kontrole i ispitivanja (ITP - Inspection and Test Plan, Preliminary)

Konačni plan kontrole i ispitivanja (ITP - Inspection and Test Plan, Final)

**Postupci zavarivanja (Welding procedures)**

Kontrola kvalitete zavarivanja (PQR - Procedure Qualification Record)

Upute za zavarivanje (WPS - Welding Procedure Specification)

Certifikati zavarivača (Welders certificates)

**Subcontracting**

Dizalice (Cranes)

Skele (Scaffoldings)

**Operativni sastanak (Kick off meeting).**

An appropriate resource is required for each activity in the Preparation activities phase. If more than one resource is required for a particular phase, a percentage is given in square brackets for each resource. For example, if the locksmith resource requires 2 locksmiths for a particular activity, 200% is indicated in square brackets. It is important to explain the values entered in the Predecessor field (in Figure 5) where the dependencies between activities were created. If "FS" is selected for an activity, it means that this activity will not start until the previous activity is finished. Selecting "SS" specifies that a particular activity will not begin until the previous activity begins. The entry "FF" means that a given activity will not finish until the previous one finishes, and finally "SF" would mean that a given activity must start in order for the previous one to finish. The numbers next to the given labels refer to the line number of the activity from which the corresponding activity depends.

ID	Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors	Resource Names
1	Potpisivanje ugovora	0 days	Tue 15.3.22	Tue 15.3.22		
2	<b>Pripremne aktivnosti</b>	<b>190 days</b>	<b>Wed 23.3.22</b>	<b>Mon 5.12.22</b>		
3	<b>Koncept montaže</b>	<b>21 days</b>	<b>Fri 1.4.22</b>	<b>Fri 29.4.22</b>		Inženjer
4	Preliminarni	8 days	Fri 1.4.22	Tue 12.4.22	1FF+4 wks	Inženjer
5	Konačni	13 days	Wed 13.4.22	Fri 29.4.22	4	Inženjer
6	<b>Odgovornosti inženjera za pojedine dijelove kotla (RAMS - Re</b>	<b>100 days</b>	<b>Tue 26.7.22</b>	<b>Mon 5.12.22</b>		
7	1-3 prolaz dimnih plinova	8 days	Thu 4.8.22	Fri 12.8.22	108SF-28 days	Inženjer
8	Horizontalni prolaz dimnih plinova	10 days	Sun 7.8.22	Thu 18.8.22	73SF-28 days	Inženjer
9	ECO toranj	9 days	Tue 26.7.22	Fri 5.8.22	62SF-28 days	Inženjer
10	Bubanj	8 days	Wed 21.9.22	Sat 1.10.22	134SF-28 days	Inženjer
11	Ložište	8 days	Thu 24.11.22	Mon 5.12.22	140SF-28 days	Inženjer
12	Kanali i oprema	8 days	Thu 24.11.22	Mon 5.12.22	140SF-28 days	Inženjer
13	<b>Zaštita zdravlja i sigurnost na radu i zaštita okoliša (HSE - He</b>	<b>67 days</b>	<b>Wed 13.4.22</b>	<b>Wed 13.7.22</b>		
14	Izrada priručnika za zaštitu na radu	8 days	Wed 13.4.22	Fri 22.4.22	4	Inženjer ZNR
15	SCC - verifikacija osoblja prema dokumentu „Certifikat sig	21 days	Thu 16.6.22	Wed 13.7.22	41SF-30 days	Inženjer ZNR
16	<b>Osiguranje kvalitete/kontrola kvalitete (Quality Assurance/Qu</b>	<b>67 days</b>	<b>Wed 13.4.22</b>	<b>Wed 13.7.22</b>		
17	Preliminarni plan kontrole i ispitivanja (ITP - Inspection an	8 days	Wed 13.4.22	Fri 22.4.22	4	Inženjer QA
18	Konačni plan kontrole i ispitivanja	8 days	Mon 4.7.22	Wed 13.7.22	41SF-30 days	Inženjer QA
19	<b>Postupci zavarivanja</b>	<b>67 days</b>	<b>Wed 13.4.22</b>	<b>Wed 13.7.22</b>		
20	Kontrola kvalitete zavarivanja (PQR - Procedure Qualificati	8 days	Wed 13.4.22	Fri 22.4.22	4	Inženjer zavarivanja
21	Upute za zavarivanje (WPS - Welding Procedure Specificat	7 days	Mon 25.4.22	Tue 3.5.22	20	Inženjer zavarivanja
22	Certifikati zavarivača	14 days	Sun 26.6.22	Wed 13.7.22	41SF-30 days	Inženjer zavarivanja
23	<b>Podugovaranje</b>	<b>0 days</b>	<b>Tue 12.7.22</b>	<b>Tue 12.7.22</b>		
24	Dizalice	0 days	Tue 12.7.22	Tue 12.7.22	41SF-30 days	
25	Skele	0 days	Tue 12.7.22	Tue 12.7.22	41SF-30 days	
26	Operativni sastanak (kick off meeting)	0 days	Wed 23.3.22	Wed 23.3.22		

Figure 5. The Preparation activities (Pripremne aktivnosti) phase with resources assigned (for English translation, see text above)

By assigning resources to project activities, a Gantt chart can be created. The chart shows the dependencies between activities, i.e., the overlap of activities, the percentage of completion of each activity, and the resources along each activity line. Figure 6 shows the Gantt chart for the Preparation activities phase.

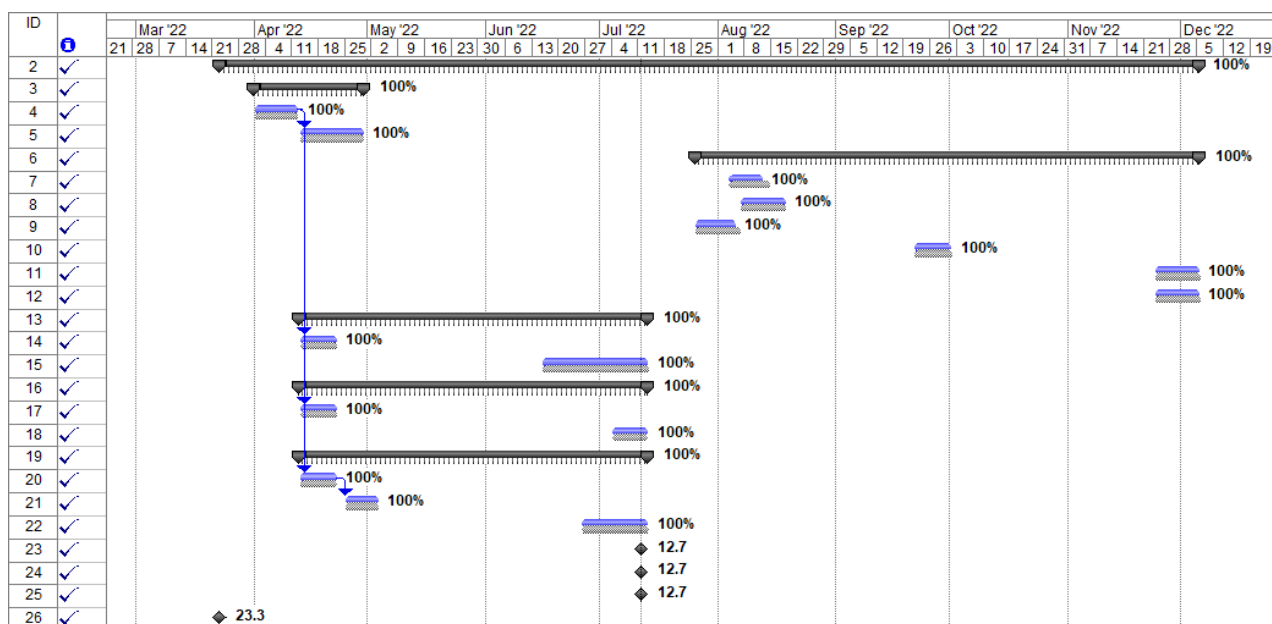


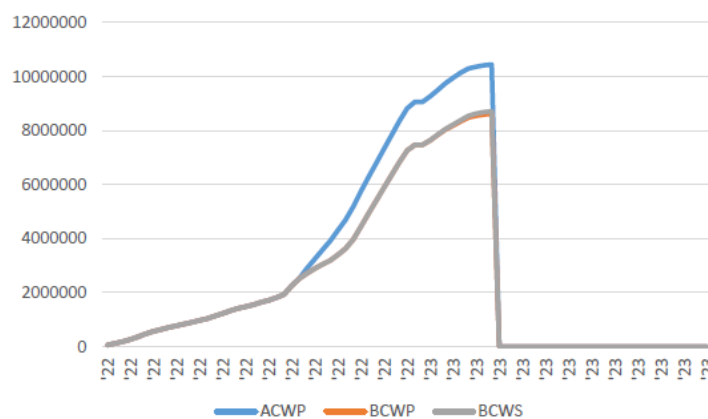
Figure 6. Gantt chart for the Preparation activities phase

Due to the reduction in size of the Gantt chart (Figure 6), of the numerical data, only the percentages of completed activities and, for longer activities, the dates of the beginning and end of the activity are visible.

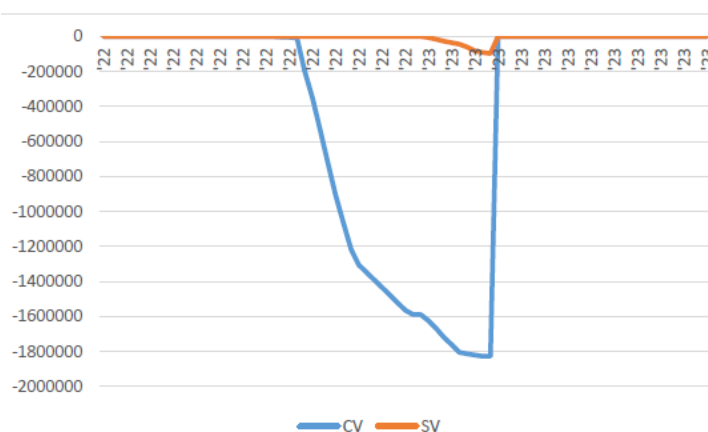
### 3. Results and discussion

Various reports may be requested during and upon completion the project. One important report is Earned Value. It helps in quantifying the project performance. The report is used to compare costs and schedules with the baseline, i.e., the values originally set. Figures 7 and 8 show two charts of the Earned Value report for this project. Shown are the budgeted cost of work scheduled (BCWS), the budgeted cost of work performed (BCWP), and the actual cost of work performed (ACWP) in Figure 7 as well as Cost Variance (CV) and Schedule Variance (SV) in Figure 8.

In Figure 7, the line ACWP indicating the actual cost of work performed, is higher than the budgeted cost of work performed BCWP, which would mean that the project exceeded the budget. Also, from Figure 8 it can be seen that the project is over budget, as the CV (Cost Variance - deviation between the budgeted and actual costs of the work performed) curve of the diagram is in the negative area.

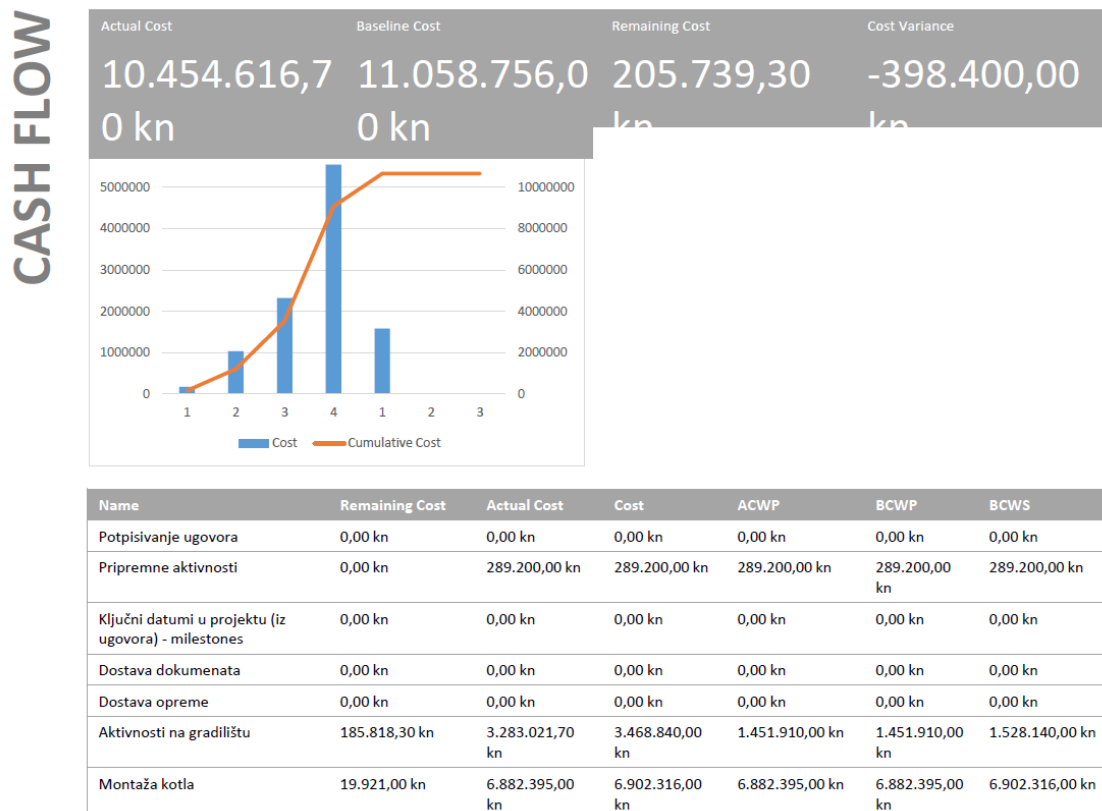


**Figure 7.** Earned Value report - Costs



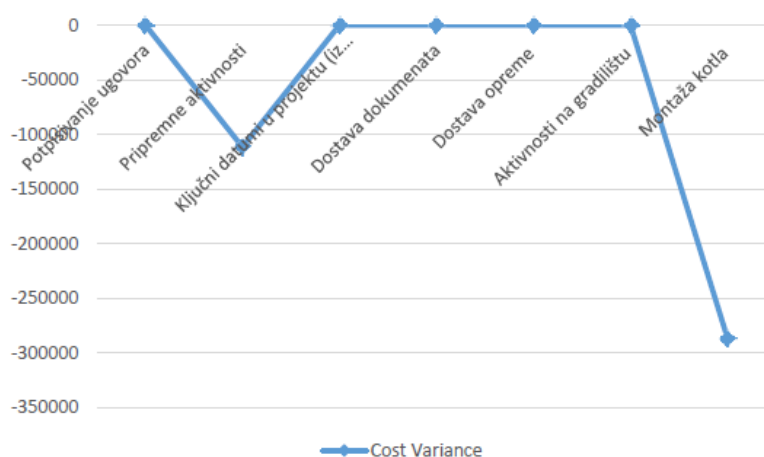
**Figure 8.** Earned Value report - Cost and Schedule Variance

The Cash Flow report, whose data and chart are included in Figure 9, shows the cost for each phase. It shows actual cost, baseline cost, remaining cost for the completion of the remaining phase, and the cost variance. The total budgeted cost (Baseline Cost) for the entire boiler assembly project amounts to 11058756,00 kn (1467749,15 euro). The actual cost of the work performed amounts to 10454616,70 kn (1387566,09 euro). The remaining planned cost (Remaining cost) amounts to 205739,30 kn (27306,30 euro). The difference (cost variance) amounts to 398400,00 kn (52876,76 euro).



**Figure 9.** Cash Flow report (for English translation of the phases names, see text above Figure 1 and text below)

The chart in Figure 10 shows how costs varied from phase to phase. The difference between the planned (BCWP) and actual cost of work performed (ACWP) in the phases - Contract signing (Potpisivanje ugovora); Milestones-Contractual dates (Ključni datumi u projektu); Delivery of documents (Dostava dokumenata); Delivery of equipment (Dostava opreme) and Site activities (Aktivnosti na gradilištu) was zero, while in the Preparation activities (Pripremne aktivnosti) and Boiler assembly (Montaža kotla) phases, the actual cost was higher than planned - CV - Cost Variance (difference between planned and actual costs) was negative. Figure 11 shows these costs in values and in a table.



**Figure 10.** Cost Variance overview (for English translation of the phases names, see text above Figure 1)

Name	% Complete	Cost	Baseline Cost	Cost Variance
Potpisivanje ugovora	100%	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Pripremne aktivnosti	100%	289.200,00 kn	400.800,00 kn	-111.600,00 kn
Ključni datumi u projektu (iz ugovora) - milestones	100%	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Dostava dokumenata	100%	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Dostava opreme	100%	0,00 kn	0,00 kn	0,00 kn
Aktivnosti na gradilištu	92%	3.468.840,00 kn	3.468.840,00 kn	0,00 kn
Montaža kotla	99%	6.902.316,00 kn	7.189.116,00 kn	-286.800,00 kn

**Figure 11.** Cost Variance values

For the Preparation activities (Pripremne aktivnosti) phase, the difference between planned and actual costs was 111 600,00 kn (14 811,87 euro) and for the Boiler assembly (Montaža kotla) phase, 286 800,00 kn (38 064,90 euro).

#### 4. Conclusion

The aim of this work was to present the planning and monitoring of the realization of a complex technical project - boiler assembly in a waste incineration plant - using the software MS Project. The project was divided into activities with associated resources, resource prices, fixed costs and duration, and the realization and monitoring of the project was simulated.

By applying MS Project for the mentioned project, together with the defined activities, their duration, dependencies between activities, resources, availability and prices of resources, an interactive Gantt chart (schedule of the project) was obtained, which shows for the project



when which activity should start, duration of each activity, overlapping activities, percentage of completion of the activity (with previously reported completion time for activities) and completion of the project.

This suggests that for the projects, it is important to monitor time, resources, and costs. By using MS Project, different reports can be generated at each stage of the project, of which the cost reports are important. The budgeted cost of work scheduled (BCWS), the budgeted cost of work performed (BCWP), and the actual cost of work performed (ACWP) can be compared. In the specific project of boiler assembly in a waste incineration plant, the planned and actual costs differed, which was illustrated with figures and diagrams at MS Project. The remaining planned costs that would be incurred after the completion of the remaining planned work can also be shown in the MS Project software.

The importance of cost monitoring for the project can also be inferred from the work done under the MS Project software, as it is possible to obtain a variety of reports on costs.

## 5. References

- [1] Project Management Institute, PMI. A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK - Guide). Fourth Edition. PMI, 2009.
- [2] Siami-Irdemoosa, Elnaz; Dindarloo, Saeid R.; Sharifzadeh, Mostafa. Work breakdown structure (WBS) development for underground construction // *Automation in Construction*, 58(2015), 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.016>
- [3] Mikulakova, Eva; König, Markus; Tauscher, Eike; Beucke, Karl. Knowledge-based schedule generation and evaluation // *Advanced Engineering Informatics*, 24(2010), 4; 389-403. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.010>
- [4] Tommelein, Iris D.; Dzung, Ren-Jye. Automated Case-Based Scheduling for Power Plant Boiler Erection: Use of Annotated Schedules // *Automation and Robotics in Construction XI: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* / Chamberlain, Denis A. (Ed.). (ISBN 9780444820440, ISSN 2413-5844). Brighton, 24-26 May, 1994, 179-186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82044-0.50028-X>
- [5] Dzung, Ren-Jye; Tommelein, Iris D. Boiler Erection Scheduling Using Product Models and Case-Based Reasoning // *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(1997), 3, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1997\)123:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1997)123:3(338))
- [6] Porteous, Andrew. Energy from waste incineration - a state of the art emissions review with an emphasis on public acceptability // *Applied Energy*, 70(2001), 157-167. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00021-6)
- [7] Porteous, Andrew. Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management // *Waste Management*, 25(2005), 451-459. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.008>
- [8] Šimunović, Sanda: Upravljanje kompleksnim tehničkim projektima (Management of complex technical projects). Master Thesis. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, mentor: Lujčić, Roberto (2022.)
- [9] Microsoft Office Project Standard 2016, Microsoft, 2016.



# Analysis of contact materials in finned tube heat exchangers: solders, solderability

T. Bitó<sup>1</sup>, D. Csonka<sup>1</sup>, T. Zsebe<sup>1</sup>, Z. Meiszterics<sup>1</sup>, S. Fenyvesi<sup>1</sup> Gy. Vasvári<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary

\* Corresponding Author. E-mail: [vasvari.gyula@mik.pte.hu](mailto:vasvari.gyula@mik.pte.hu)

## Abstract

Heat exchangers surround us in the world today, and a modern way of life would be impossible without them. Different types of these machines exist for different purposes, our focus in this paper will be the finned tube type.

To improve finned tube type heat exchangers we ventured to reduce the heat conductivity resistance at the contact, by using solder or adhesive as contact material, as contact is usually made by expansion of the tube. Different types of solders and filler metals were selected, their properties collected in spreadsheets. We concluded heat tests on these materials, and collected the results of heat input, before the soldering and brazing attempts. Tube and fin was prepared by cleaning with acetone and ground with high grit SiC papers. Successful bond was made with heat conductive adhesives. Soldering and brazing attempts were made using PB gas torch and industrial electric oven. All soldering attempts failed, gas torch brazing was successful.

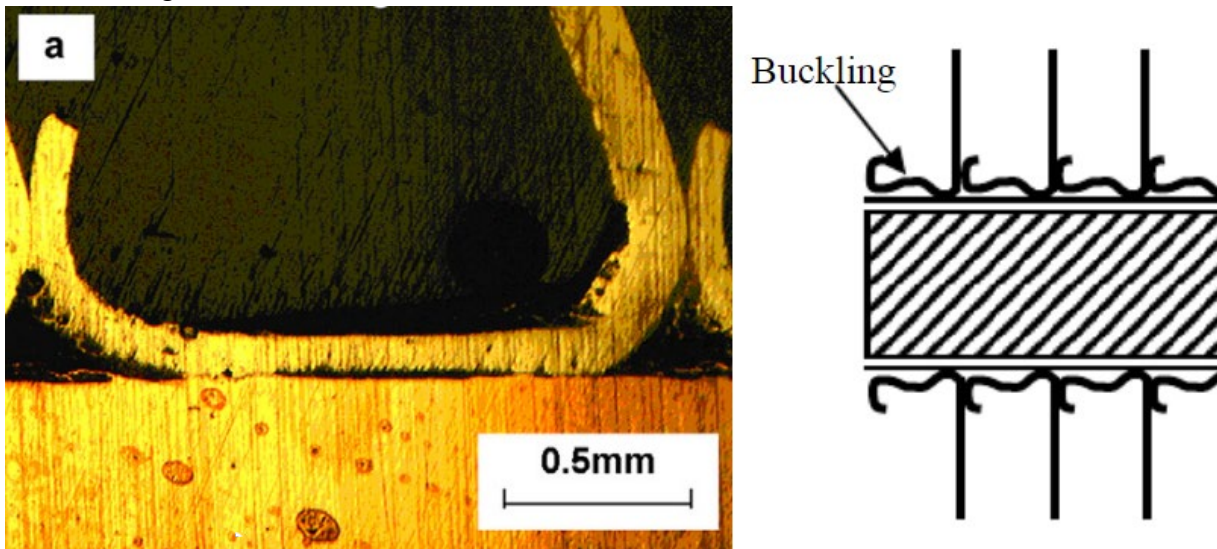
We are looking into possible causes of failure such as possible contamination, and are discussing opportunities of future investigations, including testing the solders with different fluxes.

**Keywords:** pipe-fin, heat exchanger, contact material, soldering, solderability

## 1. Introduction

The water-to-air heat exchangers are well-known options for cooling equipment in many industries (power plants, oil and gas industries, transportation, air conditioning, refrigeration, food industry, pharmaceutical industry etc.). These heat exchangers are ideal for removing waste heat from the equipment. By recycling the removed heat, or improving the efficiency of heat transfer, we can save significant energy and costs while reducing the negative impact on the environment. These heat exchangers are usually of the finned pipe type. The quality of the contact between the pipes and the fins has a significant impact on the efficiency of the heat exchanger [1]. It is common practice to mechanically expand the pipes into the fin collars to achieve a tight metal to metal contact between the two [2].

Press-fitting has its disadvantages such as imperfect fit due to surface voids, possible contaminants, undesired plastic deformation (such as buckling or cracking of the fin collars during the pipe expansion process, as illustrated by Figure 1), material defects. In case of bimetallic configuration, the loosening of the binding can happen with rising temperature caused by the different coefficient of thermal expansion of the two materials, or caused by surface roughness.



**Figure 1.** Contacts between fin and pipe (imperfect surface contact and fin collar buckling)[1][4]

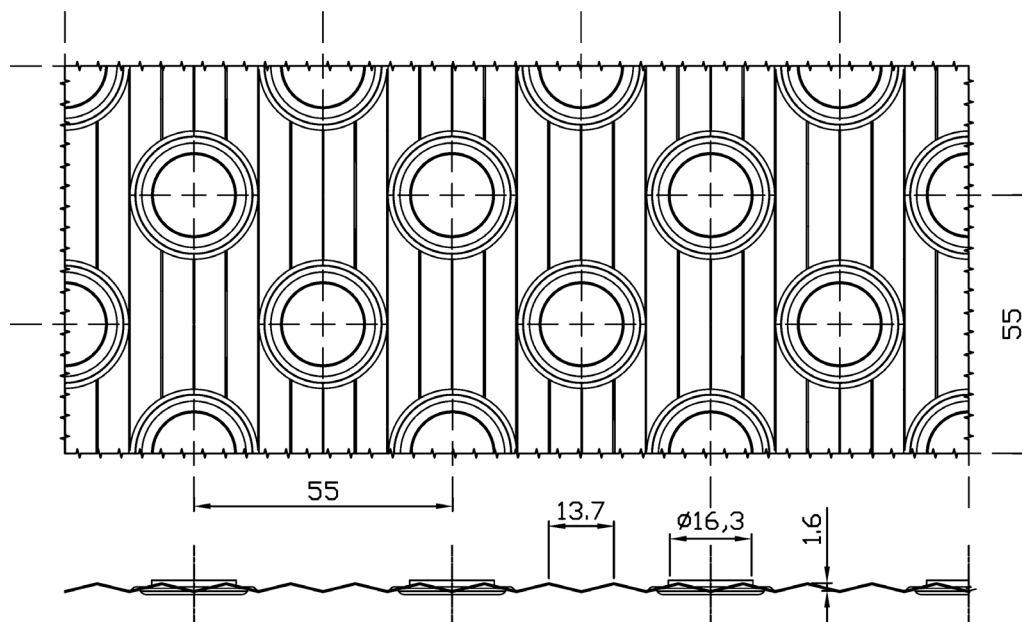
Research has been done to study the importance and effect of the quality of the contact, with results reporting 10-20% of total heat resistance being the contact resistance under the tested circumstances [3].

In this research, the possibilities of pipe-fin contact is examined, contact materials are assessed in the aspect of thermal conduction compared to conventional press-fitting.

First we started studying the solderability and brazeability of the chosen, widespread, materials. (Aluminium finned copper pipe heat exchangers are widely used in HVAC and in dry coolers.) We also tested heat conducting adhesives as a potential interface material.

## 2. Methodology

We used 5/8" x 1 mm Cu-DHP pipes and 0.2 mm thick, wavy, press-formed, 8006 aluminium alloy fins (Figure 2) with  $\varnothing 16.3$  mm bores and corrosion resistant coating for our experiments.



**Figure 2.** Dimensions of the inspected fins.

The pipes were cut to 250 mm length and the fins were cut out of a large sheet to approximately 38.9 x 38.9 mm square pieces with a bore in the middle to allow further testing with finite element method.

Solderability tests were also carried out on galvanized steel. Five different types of solders and three brazing filler metals were used in the tests as shown in Table 1.

**Table 1.** Acquired solders and brazing filler metals

<b>Metal alloy</b>	<b>Melting temperature or solidus - liquidus [°C]</b>	<b>Selection criteria</b>
Sn-40Pb (60% Sn +40% Pb) {+2% Rosin flux}	183 - 188	General use and most widespread solder family before RoHS regulation in 2006. (EU) Selected and tested as reference.
In-3Ag	144 - 150	Interest due to malleability for defect and surface roughness filling ability.
Sn-9Zn	199	Found in literature as suitable for our purpose [5].
Sn-3Ag-0.5Cu {+RELO (EN 61190-1-1 / J-STD-004), 1231 flux (from technical datasheet)}	217 - 220	One of the 'SAC' solders developed to replace solders containing lead.
Sn-4Ag	221	Recommended solder for joining copper and aluminium substrates by manufacturer.
Zn-22Al (Al 822) {+cesium-fluoroaluminate flux}	426 - 492	Recommended for use in HVAC systems for joining copper and aluminium pipes.
Al-12Si (Al 112) {+unspecified flux coating}	575 - 582	Recommended filler metal by manufacturer for joining copper and aluminium substrates.
Ag145 Si (ISO norm) {+unspecified flux coating}	640 - 700	Recommended by manufacturer for joining coppers, brasses, and other ferrous materials.
Cu - 1Ag - Zn {+unspecified flux coating}	850 - 890	Recommended by manufacturer for joining of galvanized steel and copper materials.

We selected these materials by recommendations from manufacturers (e.g. Sn-4Ag), our research (Sn-9Zn), or common use (e.g. Sn-40Pb). Our primary goal was to find the best contact material, used between pipe and fin, regarding thermal conductivity. Metals generally having high thermal conductivity when compared to other types of materials, thus we started the inspection with soldering, and brazing.

Other alloys were considered, such as:

- SnZnCu, SnCu (another similar alloy selected instead)
- PbSbSn, SnPbZn (more widespread lead solder already chosen, lead is toxic)
- InSn (another, higher indium containing solder selected instead)



- SnAgSb (antimony is a toxic material and reportedly makes the bond brittle)
- SnZnBi (bismuth reportedly makes the bond brittle)
- SnAgZnCu (alloy is made up of more than 3 different metals, the more alloys a solder has, the more intermetallic layers can form, hindering thermal conduction)
- CdZn (contains toxic cadmium)

### 2.1. Heating test of solders

After acquiring the materials, first we decided to heat test small pieces of the alloys by putting them on small pieces of prepared aluminium substrates and heating them in a furnace, then made spreadsheets summarizing the important properties of each, such as composition, melting point or solidus-liquidus temperatures, and the results of the thermal input, as depicted by Table 2.

**Table 2.** Solder information and heat test spreadsheet example

Name of the used solder		Rothenberger Industrial Rolot 611 65g solder stick Sn91Zn9			
Added flux		Alu-forr INOFLUX soldering flux			
Composition	Sn	91 %			
	Zn	9 %			
	Flux	N/A			
Melting point		199 °C			
Technology		Soldering			
Copper		Good wetting, good binding			
Aluminium		good wetting on fluxed surface, didn't form metallurgical bond, were easily peeled off			
Galvanized steel		good wetting, good binding			
<b>Behaviour of solder with elevating temperatures</b>					
Temperature [°C]	185	190	195	200	205
holding time [min]	-	3	5	5	5
Changes, state of material	tp. placed in oven	no visible changes	edges of the solder piece rounded a little	no visible changes	sm. balled up, sm. with flux didn't indicate any visible changes
Abbreviations	tp: test piece, sm.: solder material (piece), fx.: flux,				



The In-3Ag solder was acquired with its own flux, thus it was tested with both fluxes. The furnace used is a Höker 4/1230 type programable industrial electric oven.

## 2.2. Preparation of materials

The copper pipes were degreased with acetone and cleaned of macro stains and contamination (tape residue) with 320 grit sandpaper if needed, then ground with 1500 grit sandpaper and cleaned with acetone around the middle where the technology would be applied.

The aluminium fins were polished with 1500 grit sandpaper and cleaned with acetone inside and around the collar on the fin, flux was applied on it as soon as possible to prevent oxide layers from forming. Finless copper plate was prepared with the same tools, and galvanized steel was only degreased.

The copper pipe was aligned vertically with supports holding it in position in the furnace or held in a vise. The fin was set in position using props holding small contact surface with the fin to avoid unnecessary heat transfer.

## 2.3. Torch soldering/brazing

The prepared copper pipe was vised, the fin was set in the desired position and propped up to keep it in position during the process, then flux was applied to the pipe at the height of the fin.

For heating, a Rothenberger propane/butane gas torch was used.

First, the pipe was heated close to the fin area to get the pipe to the required temperature, moving the torch closer to the fin periodically to ensure it heats up as well, when the flux started bubbling, the solder material was touched to the pipe to check if it flows, it was applied in the gap when it started sticking to the pipe.

## 2.4. Furnace soldering

The tests were made using a Höker 4/1230 industrial electric oven with programable heat ramp up speeds and holding times. The supports were placed in the oven, which was then heated close to the melting temperature (or solidus) of the solder material. Upon reaching the set temperature, flux was applied to the pipe which then was put in the furnace for a couple of minutes. After the pipe reached the set temperature, the fin was put in place and a solder ring was placed around the pipe, the door of the oven was closed, and the temperature was raised to where the solder would liquify and held there for a short time to allow the solder to flow and metallurgical bonds to form.

After the necessary time elapsed, the heating was turned off and the door opened slightly for slower cooling. When the pieces cooled down, they were removed from the oven and inspected, and results were documented.

## 2.5. Adhesives



A one-component silicone and a two-component epoxy adhesive were tested. The bonding process changes slightly as flux can no longer be applied, thus, to achieve best results, all preparation must be done before polishing the fins.

The pipe was set on two supports at the two ends in a horizontal alignment, adhesive was applied on its middle section in about 10 mm width. The fin was polished in the inside of the collar and a thin film of adhesive was applied on it before pulling it on the pipe. After making sure the fin was in the correct position and the adhesive was evenly spread, we removed the excess from the surface of the pipe. The piece with the silicone adhesive was then put in the furnace, at 150°C for 30 minutes, for heat curing and the epoxy adhesive set aside for 24 hours to be heat cured the next day as per their respective technical data sheets.

### 3. Results

#### 3.1. Adhesives

After curing, the adhesives offer adequate mechanical strength holding the fins, good adhesion is achieved to both metal surfaces. The adhesives were also tested without polishing the surface of the fin, bond does not seem weaker. Heat conductivity will be tested and compared to other bonding methods upon successful production of multiple uniform samples.

#### 3.2. Heating tests of solders

Except in the cases of the In-3Ag and SnPb alloys, tested solders flowed above 5-10 °C of their indicated melting or liquidus points. Mentioned alloys showed no visible changes when heated even 30°C above their liquidus, except a minor change in colour.

All solders showed an aversion to sticking to the aluminium substrate with or without flux used. The solders balled up instead of spreading, showing poor wetting of the aluminium surface. The SAC-305 alloy stuck to the substrate in a small area, but no bond formed as it was easily removed by small mechanical force.

The only tested filler metal was Zn-22Al which was also the only test piece which showed promise as it spread out on the surface instead of forming spheres, it could not be peeled off and didn't break when bending with pliers.

#### 3.3. Results of soldering trials

There was only a slight difference between the furnace and torch soldering experiments, the soldering materials stuck to the copper pipe, but didn't wet the aluminium fin piece, it was noted during several tries that solder would flow down through the gap between the pipe and the fin.

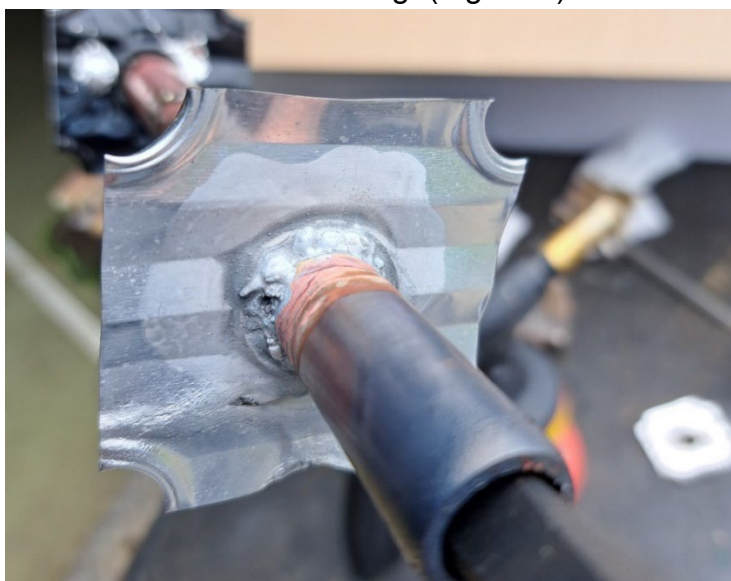
#### 3.4. Brazing

Zn-22Al being the only alloy that could be tried in brazing category with the aluminium fin, as one experiment with this filler metal in the furnace proved that the thin fin would burn away above 570°C, and the two testes with the furnace yielded no positive result, as seen on Figure 3.



**Figure 3.** Failed furnace brazing attempt

The torch brazing was successful, however, the fin burnt away in a small section, the bond between fin and pipe was successful and strong. (Figure 4)



**Figure 4.** Successfully torch brazed sample

Attempting to braze the collarless copper fin with the Ag145 Si alloy, we observed that the filler metal bonded really well to the copper fin but did not stick to the copper pipe at all. This alloy was also tested with galvanized steel and found to have brazed it exceptionally well.

The Zn-22Al alloy proved unsuccessful with the steel subject, as the alloy would bind with the zinc and the resulting material would easily peel off from the surface of the substrate. Solders worked well making a good bond apart from Sn-40Pb, and the InAg alloy proved inconsistent.



The first experiments demonstrated that the AlSi12 alloy is redundant for current testing, thus was not used. We also found the gas torch to lack the performance to melt the Cu-1Ag-Zn alloy directly, so it was omitted from testing for now. We did manage to make a brazed bond on galvanized steel, however.

## 4. Discussion

### 4.1. Failed heat input experiments

Some of the inspected solders displayed unexpected results while heating in the furnace, not flowing despite raising temperatures well above their melting points.

We theorize that placing the one test piece in the oven too early gave way to oxidization of the surface, thus it couldn't melt properly. Another fin was bent multiple times, so the remaining stress from plastic deformation could have raised the effective melting point. In the third case with the SnZn alloy, the flux covered the entire piece of solder, and that may have prevented expected behaviour through evaporation or changing the chemistry of the surface. It was also considered that the solder material was touched by bare hands a few times, thus contaminating the surface of them, or it may have been oxidized during storage.

### 4.2 Soldering and brazing

All conducted trials ended with a failure to properly solder copper to aluminium and a partially successful brazing attempt.

The following circumstances may have caused failure:

- Too high grit size sandpaper was used during preparation.
- Used fluxes were highly ineffective.
- Too large gap size between pipe and fin
- Used soldering methods allowed oxidization during the processes.
- Contaminated surface of solders (grease from hands, dust, oxides).
- Slow manual process allows for growth of aluminium-oxide on the surface of the ground fin, even in the few seconds it took to apply flux.
- Substrate not accepting solder, and not enough time for diffusion.

Diffusion takes more time than the time we kept the test samples at said temperature, which would be essential for a soldered bond without immediate metallurgical bond forming between solder and substrate [6].

Literature also confirms that there is an optimal gap size for soldering, which differs between different solder alloys on each distinct substrate, depending on wetting angle [7].

The brazing was successful using the gas torch, but the fin was slightly burnt. This could be avoided by slowing down the process and managing heat input better or using a slightly lower aluminium content alloy with lower solidus and liquidus temperatures, requiring lower working temperature.





Ag145 Si alloy proved successful for brazing galvanized steel. Strangely the Cu-1Ag-Zn alloy was also successfully brazed onto galvanized steel despite not being able to melt the filler metal by heating it directly with the torch, which could be due to the molten zinc layer conducting heat onto it much more efficiently, thus able to melt it.

#### 4.3. Further investigations

As the gas torch we used did not provide the necessary thermal input to work the Cu-1Ag-Zn alloy, better equipment is needed for testing copper and brass.

We also have plans to run multiple comparative simulations on heat conduction, as a small test circuit is being assembled for measurements. Soldering and brazing pastes could be acquired in the future to see if those would perform better in the furnace. If multiple uniform test samples could be produced with different filler metals cross sections could also be made for microscopic analysis. Gap size between pipe and fin could be optimized in future tests for different filler metals or solders.

Acquiring different fluxes to be tested for comparison is being considered as a priority.

As a device made of different metals, especially copper and aluminium, tests should also be run to examine the potential damage of galvanic corrosion.

### 5. Conclusions

Fins were attempted to be attached to copper pipes using adhesives, soldering, and brazing. Adhesion was successful, and test samples are kept for further testing. Soldering completely failed, with potential causes and a direct cause discussed and brazing was proven to be possible, with a better prepared and executed process, or a different filler metal.

Further investigation into technology and materials is required, numerous and diverse trials should be completed before a full evaluation on heat conductance through contact material, and industrial application of such, can be accurately provided.

### 6. References

- [1] Yau Kar Hing; Vijay R. Raghavan; Chin Wai Meng, Investigation of contact resistance for fin-tube heat exchanger by means of tube expansion // AIP Conference Proceedings 1440, 621–629 (2012) 3–4 October 2011 Melaka, Malaysia
- [2] John E. Hesselgreaves, Chapter 2 - INDUSTRIAL COMPACT EXCHANGERS, Pergamon, 2001, Pages 27-81, ISBN 9780080428390, <https://doi.org/10.1016/B978-008042839-0/50004-5>.
- [3] Chang Nyung Kim, Jin Jeong, Baek Youn. Evaluation of thermal contact conductance using a new experimental-numerical method in fin-tube heat exchangers // *International Journal of Refrigeration*, Volume 26, Issue 8 (2003); 900-908; (ISSN 0140-7007)



- [4] Tang, D., Li, D., Peng, Y., & Du, Z. A new approach in evaluation of thermal contact conductance of tube–fin heat exchanger. // *Applied Thermal Engineering*, 30 (14-15), (2010). doi:10.1016/j.applthermaleng.2010
- [5] Huang, M.L., Huang, Y.Z., Ma, H.T. et al. Mechanical Properties and Electrochemical Corrosion Behavior of Al/Sn-9Zn-xAg/Cu Joints // *J. Electron. Mater.* 40 (2011), 315–323 <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1459-y>
- [6] Satyanarayan & K N Prabhu. Wetting behaviour and interfacial microstructure of Sn–Ag–Zn solder alloys on nickel coated aluminium substrates, *Materials Science and Technology*, 27:7 (2011), 1157-1162, DOI: 10.1179/026708310X12815992418337
- [7] Zhao, J. (2013). Capillary Force and Surface Wettability. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_465](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_465)



# Ispitivanje učinkovitosti elektrokemijskog postupka čišćenja materijala

## *Testing the effectiveness of the electrochemical process of material cleaning*

T. Šolić<sup>1,\*</sup>, D. Marić<sup>1</sup>, Iva Samardžić<sup>1</sup>, I. Gostrec<sup>1</sup>, Ivan Samardžić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [tsolic@unisb.hr](mailto:tsolic@unisb.hr)

### Sažetak

Razvoj korozivskih mehanizama može prouzrokovati velike probleme u svim fazama, od skladištenja materijala do eksploatacije gotovog proizvoda. Ovisno o agresivnosti atmosfere koja okružuje promatrani element, ugrožena može biti postojanost svih vrsta konstrukcijskih materijala. Jednako upitna može biti postojanost opće konstrukcijskog čelika kao i materijala koji imaju bolja korozivska svojstva. Primjer toga je i upotreba austenitnih nehrđajućih čelika. Po svojim karakteristikama, te materijale odlikuje bolja korozivska otpornost i to pogotovo zbog mogućnosti stvaranja tanke zaštitne opne kromova oksida ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) na samoj površini materijala. Međutim problem nastaje kada spomenute materijale na određeni način treba uklopiti u konstrukciju i to pogotovo postupkom zavarivanja. Zbog karakteristika samog postupka zavarivanja te unosa velike količine toplinske energije koja se pri tome oslobađa, u zoni zavara i zoni utjecaja topline dolazi do promjene obojanosti osnovnog materijala. Ta obojanost ujedno ukazuje na to da je zbog promjene svojstava spomenutog sloja došlo i do stvaranja područja na materijalu koja imaju oslabljenu otpornost na koroziju. Tada kao jedna od opcija za vraćanje prvobitnih zaštitnih svojstava promatranom sloju može poslužiti i elektrokemijski postupak čišćenja materijala. Postupkom se otapa sloj prethodno narušenih zaštitnih svojstava te se ubrzava proces ponovne pasivacije površine. Eksperimentalnim ispitivanjima se ukazalo na važnost provedbe samog postupka jer iz dobivenih rezultata je jasno vidljiva puno veću otpornost tretiranih materijala u gotovo svim ispitnim uvjetima. Elektrokemijskim postupkom čišćenja slabe točke na konstrukciji se mogu potpuno smanjiti, tj. može se izbjeći afinitet za koroziju koji netretirani zavareni spojevi mogu imati.

**Ključne riječi:** korozija, austenitni nehrđajući čelik, elektrokemijsko čišćenje materijala, ispitivanje korozivske otpornosti

### Abstract

The development of corrosion mechanisms can cause major problems in all phases, from material storage to exploitation of the finished product. Depending on the aggressiveness of

the atmosphere surrounding the observed element, the stability of all types of construction materials may be at risk. The durability of general construction steel as well as materials with better corrosion properties can be equally questionable. An example of this is the use of austenitic stainless steels. According to their characteristics, these materials are distinguished by better corrosion resistance, especially due to the possibility of creating a thin protective film of chromium oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) on the surface of the material itself. However, the problem arises when the mentioned materials need to be incorporated into the construction in a certain way, especially by welding. Due to the characteristics of the welding process itself and the input of a large amount of thermal energy that is released during this process, the color of the base material changes in the weld zone and the zone affected by heat. At the same time, this coloring indicates that due to the change in the properties of the mentioned layer, there was also the creation of areas on the material that have weakened corrosion resistance. Then, as one of the options for restoring the original protective properties of the observed layer, the electrochemical cleaning of the material can be used. The procedure dissolves the layer of previously damaged protective properties and speeds up the process of re-passivating the surface. The experimental tests showed the importance of the procedure itself, because the obtained results clearly show a much higher resistance of the treated materials in almost all test conditions. With the electrochemical cleaning process, weak points on the construction can be completely reduced, i.e. the affinity for corrosion that untreated welded joints can have can be avoided.

**Key words:** corrosion, austenitic stainless steel, electrochemical cleaning of materials, corrosion resistance testing

## 1. Uvod

Korozija je spontani heterogeni kemijski proces, koji za rezultat ima propadanje materijala. Korozija uzrokuje nesreće i havarije, poskupljuje održavanja, skraćuje vijek trajanja industrijske i druge opreme i uzrokuje zastoje u radu. Razvojem industrije i tehnologije, korozija postaje sve veći problem i javlja se potreba za razvojem tehnologije zaštite od iste [1]. Globalni trošak korozije, koji obuhvaća metode zaštite, popravka i zamjene, procjenjuje se na 2,5 bilijuna američkih dolara, što je jednako 3,4% globalnog bruto domaćeg proizvoda. Korištenjem dostupnih tehnologija zaštite od korozije procjenjuje se da bi se mogle ostvariti uštede između 15 i 35% troškova uzorkovanih korozijom. Činjenica da kontrola korozije donosi isplativost je lekcija koju industrija iznova uči, često prekasno i nakon katastrofalnih događaja (npr. nesreće, havarije, kvarovi i gubitak proizvodnje) [2]. Pojavu korozije možemo klasificirati prema mehanizmu procesa, prema razdiobi na površini materijala, prema vremenskom tijeku, prema korozivnom mediju i prema materijalu koji korodira. Temeljna podjela je prema mehanizmu procesa i mediju u kojem se nalazi, i to na kemijsku i elektrokemijsku [3]. Jedna od tehnologija zaštita od korozije pri konstruiranju je izbor korozijskog postojanog čelika, kao što je austenitni nehrđajući čelik. Prilikom zavarivanja ovog čelika, unatoč tome što ima dobru korozijsku postojanost, zbog djelovanja visoke temperature može doći do pojave interkristalne i rupičaste (eng. *pitting*) korozije. Jedna od

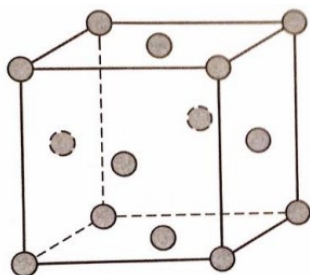
tehnologija zaštite od korozije prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika je kemijsko i elektrokemijsko čišćenje metala. U eksperimentalnom dijelu ovoga rada opisuje se elektrokemijski postupak čišćenja materijala pomoću Magic Cleaner uređaja.

## 2. Korozijska svojstva metala

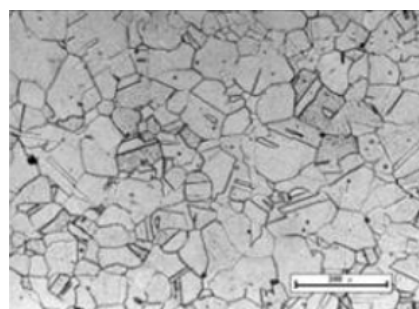
Glavni i najvažniji zadatak konstruktora je pravilan izbor materijala, gdje u obzir treba uzeti svojstva materijala, kao što su tvrdoća, žilavost, čvrstoća, otpornost trošenju (npr. abrazijskom), korozijska svojstva i slično. Konstruktor treba uzeti u obzir atmosferu i radni mediji koji dolazi u dodir s materijalom [4]. Materijali u pogledu korozije mogu biti imuni (ne postoji afinitet za proces korozije), pasivni (materijali sporo korodiraju zbog vrlo velikih otpora za proces korozije) i aktivni (materijali korodiraju i postoji afinitet za proces korozije). Faktori korozije govore koliko će neki materijal u određenom slučaju biti imun, aktivan ili pasivan [5]. Korozija je čest izazov koji utječe na površinu većine metalnih dijelova. Korozija često utječe samo na estetiku metalnog dijela, ali može utjecati i na performanse i čak dovesti do kvara opreme [6]. Korozijska svojstva metala ovise i o strukturi metala. Metali koji imaju veliki otpor prema koroziji svrstavaju se u korozivno otpornije materijale: cink, magnezij, aluminij, bakar, olovo, kositar, krom, nikl, kobalt, zlato, kadmij, srebro, platina, iridij i platina [6]. Ugljik daje dobra mehanička svojstva čeliku, ali njegov otpor prema koroziji je vrlo mali. Takve čelike sa dobrim mehaničkim svojstvima, a lošim korozijskim svojstvima legira se kromom, niklom, bakrom, manganom, molibdenom, silicijem ili npr. aluminijem kako bi se poboljšala korozijska svojstva. Na primjer legure na bazi željeza i nikla koriste se za tlačne posude, cjevovode, armature, ventile i drugu sličnu opremu koja je u dodiru s vodom ili sličnim radnim medijem [6]. Na tragu toga, za konstruiranje industrijske opreme, ili elemenata često se poseže za austenitnim nehrđajućim čelicima kao optimalnim izborom.

### 2.1. Austenitni nehrđajući čelik

Osnovni sastav austenitnih korozivno otpornih čelika kreće se u granicama: 0,02-0,15% C, 15-20% Cr, 7-20% Ni uz eventualne dodatke Mo, Ti, Nb, Ta, N. Austenitni nehrđajući čelik ima FCC kristalnu rešetku (slika 1). Nešto viši udjel ovih dodataka (osim dušika koji stabilizira austenit) dovode do pojave ferita uz austenit [7]. Austenitni nehrđajući čelici imaju potpunu austenitnu ili austenitno-feritnu strukturu kao što je prikazano u slici 2, koja uz legirne elemente daje željena svojstva i dobru otpornost na interkristalnu koroziju [7].



Slika 1. FCC kristalna rešetka [8]



Slika 2. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [9]



Austenitni korozijski postojani čelici imaju prilično dobru čvrstoću i žilavost te su prilično dobri za obradu deformiranjem i u toplom i u hladnom stanju. Zbog visokog sadržaja kroma i nikla najotporniji su na koroziju iz skupine korozijskih postojanih čelika [6]. Austenitni korozijski postojani čelici pogodni su za kemijsku i prehrambenu industriju, a zbog svog izgleda koriste se i u arhitekturi, proizvodnji kućanskih aparata, proizvodnji dijelova automobila [6]. Austenitni CrNi čelici nešto su bolji po općem korozijskom ponašanju od nehrđajućih Cr čelika s jednakim sadržajem kroma. Nikl povećava pasiviranje, što se iskazuje padom potencijala i gustoće struje potrebnih za prijelaz u pasivno stanje [4]. Austenitni nehrđajući čelici nešto su otporniji na rupičastu koroziju, korozijski zamor, kavitacijsku koroziju i vodikovu bolest u odnosu na nehrđajuće Cr čelike. Napetosna korozija u kloridnim otopinama austenitne korozijske čelike napada nešto brže nego ostale korozijske postojane čelike [3]. Tipičan oblik interkristalne korozije austenitnih korozijskih postojanih čelika je tzv. raspad uz zavar, odnosno lokalno intergranularno uništavanje strukture dužinom obje strane zavara gdje se materijal prilikom zavarivanja najviše i najduže zagrijava (ZUT zona) na temperaturi senzibilizacije (400-900°C). Područja raspada strukture uz zavar obično su široka 3 do 6 mm na udaljenosti 4 do 10 mm od zavara [6]. Korozijsko ponašanje austenitnih CrNi čelika može se poboljšati dopunskim legiranjem molibdenom, bakrom, silicijem, srebrom i platinskim metalima. Ti elementi slično niklu, dodatno snižavaju potencijal i gustoću struje pasiviranja, što znači da olakšavaju prijelaz čelika u pasivno stanje. U CrNi čelicima koji sadrže neke dopunske legirajuće komponente redovito se sadržaj nikla poveća na 10 do 14% radi kompenzacije feritizatorskog djelovanja takva legiranja [4]. Osim nikla kod korozijskih postojanih čelika kao austenitizatori u obzir dolaze dušik, mangan i kobalt. Zbog ekonomskih i tehnoloških razloga najčešće se koristi mangan kojim se zamjenjuje dio nikla. Antikorozivna svojstva CrNiMn čelika pokazuju se prije svega nakon kaljenja na 1000 do 1100 °C. Mangan je lošiji austenitizator od nikla, a pogotovo od dušika pa CrNiMn čelici sadrže i nešto ferita. Prisutnost ferita smanjuje žilavost. Prisutnost mangana u CrNiMn čelicima daje bolju korozijsku otpornost na vruće plinove koji sadrže H<sub>2</sub>S [7]. Kako je i prethodno spomenuto zbog velikog toplinskog inputa prilikom zavarivanja, dolazi do narušavanja zaštitnog sloja kromova oksida koji navedeni materijal čini korozijski postojanim. Samim time, sve navedeno i pozitivno u vidu otpornosti na razvoj korozijskih mehanizama pada u vodu. Zbog toga je potrebno na određeni način tretirati materijal i vratiti mu prvobitna zaštitna svojstva, odnosno učiniti materijal opet potpuno funkcionalnim u vidu korozijske otpornosti. Jedan od načina kako je to moguće napraviti je elektrokemijskim čišćenjem. U nastavku rada prikazan je postupak te su provedena testiranja kojima se ukazala na značaj i učinkovitost spomenutog postupka.

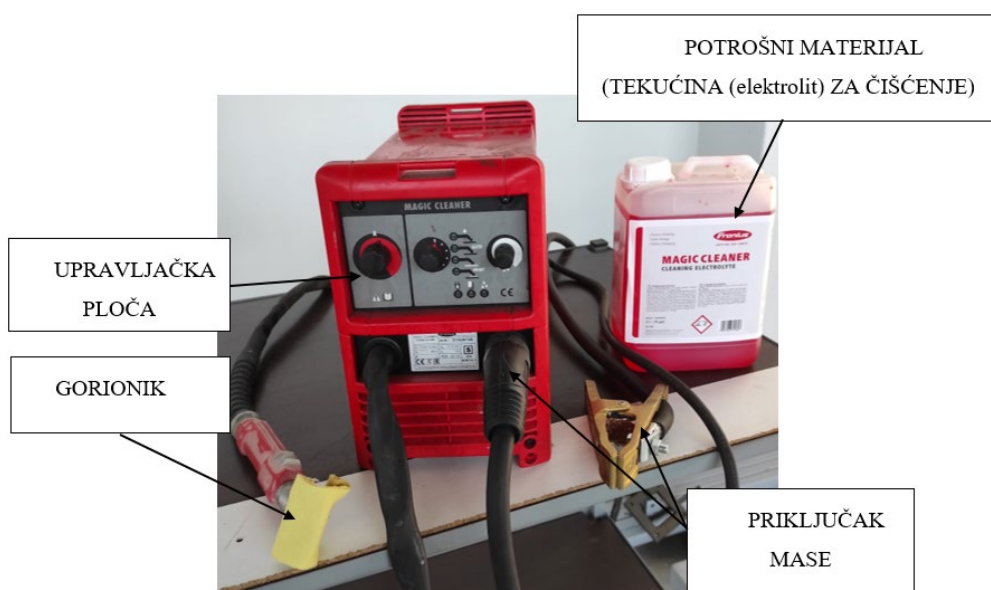
### 3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu su pripremljeni ispitni uzorci od austenitnog nehrđajućeg čelika koji su zavareni TIG postupkom. Pola ispitnih uzoraka je elektrokemijski očišćeno sa Magic Cleaner Stand Alone uređajem, dok je pola ostalo neočišćeno, tj. u stanju ostvarenom nakon postupka zavarivanja. Svi uzorci izloženi su različitim atmosferama na određeno vrijeme. Tijekom izvođenja pokusa pratila su se korozijska ponašanja ispitnih uzoraka na različitim

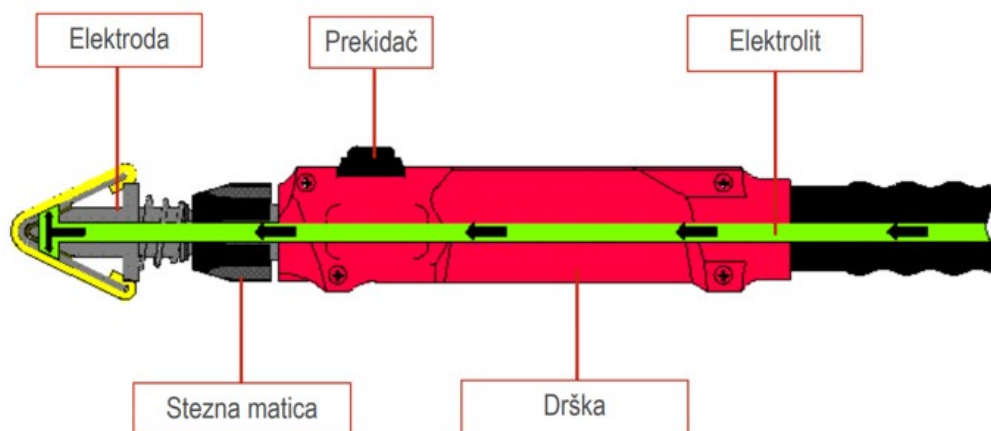
atmosferama i uspoređivano je korozijsko ponašanje elektrokemijski očišćenih i neočišćenih ispitnih uzoraka.

### 3.1. Uređaj za elektrokemijsko čišćenje materijala

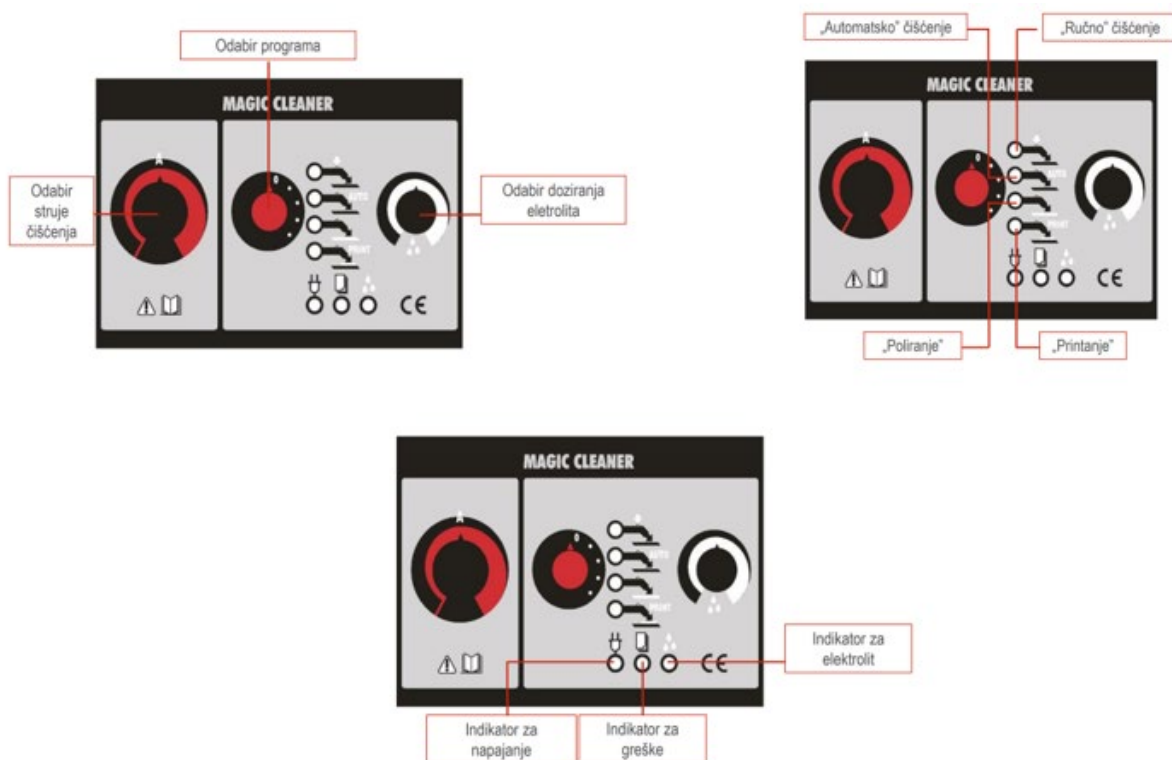
Magic Cleaner uređaj (slika 3) čisti i pasivizira TIG zavarene spojeve i površine od nehrđajućeg čelika. Uređaj je relativno malih dimenzija i male mase što omogućava fleksibilnost i jednostavnost korištenja uređaja u eksploatacijskim uvjetima. Pomoću gorionika koji je prikazan na slici 4, izvodi se elektrokemijski postupak čišćenja metala. Uređaj ima funkciju čišćenja, poliranja i printanja. U ovom radu koristila se samo funkcija čišćenja. Na prednjoj strani uređaja nalazi se upravljačka ploča (slika 5) na kojoj se podešavaju parametri obrade.



**Slika 3.** Uređaj za elektrokemijsko čišćenje-Magic Cleaner



**Slika 4.** Shematski prikaz gorionika [10]



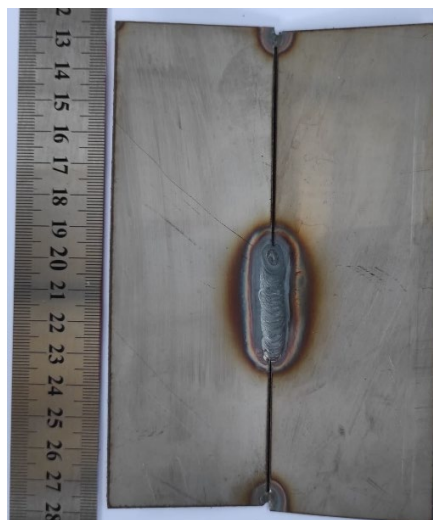
Slika 5. Objašnjenje upravljačke ploče [10]

### 3.2. Priprema ispitnih uzoraka

Iz ploče lima austenitnog nehrđajućeg čelika izrezani su ispitni uzorci dimenzija 50×150 mm. Ispitni uzorci nakon zavarivanja postavljeni su i pripremljeni za TIG postupak zavarivanja kao što je prikazano na slici 6. U zoni utjecaja topline došlo je do promjene obojanosti i promjene u strukturi koja narušava korozivnu otpornost. Slika 7 prikazuje zavareni ispitni uzorak. Na slici se vidi zavar duljine 50 mm i zona utjecaja topline koja se iskazala promjenom obojanosti.



Slika 6. Pripremljeni ispitni uzorci za zavarivanje



Slika 7. Ispitni uzorak nakon zavarivanja





Nakon zavarivanja ispitni uzorci su elektrokemijski očišćeni kao što je prikazano na slici 8. Svi ispitni uzorci izloženi su različitim atmosferama te je uspoređivano ponašanje zavara na koroziju prije i poslije elektrokemijskog čišćenja. Slika 9 prikazuje očišćeni ispitni uzorak i uočava se da je uklonjena promjena obojanosti i vraćen sjaj austenitnog nehrđajućeg čelika.



Slika 8. Elektrokemijsko čišćenje ispitnih uzoraka



Slika 9. Ispitni uzorci nakon elektrokemijskog čišćenja

#### 4. Usporedba ispitnih uzoraka izloženih različitim atmosferama

Ispitni uzorci su izloženi utjecaju različitih atmosfera (sobnoj atmosferi, vodi, i 5%-tnoj otopini natrijeva klorida (NaCl)). Uzorci su u ispitnim atmosferama proveli 21 dan. Nakon izloženosti ispitnim atmosferama jasno se vidi razlika između očišćenih i neočišćenih ispitnih uzoraka. Na neočišćenim ispitnim uzorcima razvoj rupičaste (eng. *pitting*) korozije znatno je veći nego na elektrokemijskim očišćenim ispitnim uzorcima.



Slika 10. Neočišćeni ispitni uzorak (sobna atmosfera)



Slika 11. Elektrokemijski očišćeni uzorak (sobna atmosfera)



Slika 10 prikazuje neočišćeni ispitni uzorak koji je bio izložen djelovanju sobne atmosfere. Sobna atmosfera je atmosfera najslabije agresivnosti korištena u ovom pokusu, sukladno tome pojava korozije na neočišćenom (slika 10) ispitnom uzorku je najmanja. Na slici 10 u zoni utjecaja topline jako se slabo vide mehanizmi nastajanja korozije, ali su ipak prisutni. Na elektrokemijski očišćenom ispitnom uzorku koji je bio na sobnoj atmosferi (slika 11) nema prisutnih mehanizam korozije. Na očišćenim ispitnim uzorcima koji su bili na sobnoj atmosferi postupak elektrokemijskog čišćenja je zadovoljio očekivanja i uspješno je provedena antikorozivna zaštita.



**Slika 12.** Neočišćeni ispitni uzorak (voda)



**Slika 13.** Elektrokemijski očišćeni ispitni uzorak (voda)

Na neočišćenom ispitnom uzorku koji je bio u vodi, razvoj mehanizma korozije veći je od ispitnih uzoraka koji su bili na sobnoj atmosferi što se jasno vidi iz slike 12. Na ispitnom uzorku sa slike 12 vidi se napredak rupičaste korozije veći nego na slici 10. Na slici 13, odnosno na elektrokemijskom očišćenom ispitnom uzorku koji je bio u vodi pojava korozije je gotovo neprimjetna. Ispitni uzorak sa slike 13 jako je dobro podnio izloženost utjecaju vode te se jasno vidi da je postupak elektrokemijskog čišćenja usporio mehanizme nastanka korozije.



**Slika 14.** Neočišćeni ispitni uzorak (5%-tna otopina natrijeva klorida)



**Slika 15.** Elektrokemijski očišćeni ispitni uzorak (5%-tna otopina natrijeva klorida)



Najagresivnija atmosfera ovoga pokusa je 5%-tna otopina natrijeva klorida, što je rezultiralo najvećom pojavom korozije na ispitnim uzorcima. Na neočišćenom ispitnom uzorku koji je bio izložen djelovanju 5%-tne otopine natrijeva klorida (slika 14) mehanizmi nastanka korozije su najveći. Na slici se jasno vidi napredak korozije u zoni utjecaja topline. Na elektrokemijskim očišćenom ispitnom uzorku izloženom djelovanju 5%-tne otopine natrijeva klorida (slika 15) napredak mehanizma korozije je značajno usporen. Na slici se vidi mali broj mjesta na kojim se razvila rupičasta korozija. Usporedba slika 14 i 15 prikazuje razliku napretka korozije i učinkovitost elektrokemijskog čišćenja metala.

## 5. Zaključak

Korozija je postupak postupnog razaranja i propadanja metala. Visoko legirani i nehrđajući čelik ima visoku otpornost na koroziju. Zavarivanje kao jedna od najčešće korištenih tehnologija spajanja metala, zbog unošenja visokih temperatura, narušava korozijsku otpornost nehrđajućih čelika. Danas postoje razne metode poboljšavanja korozijske otpornosti zavara i ZUT zone, a jedna od njih je i elektrokemijsko čišćenje zavara. U ovom radu ispitala se učinkovitost elektrokemijskog postupka čišćenja metala na austenitnom nehrđajućem čeliku. Postupak elektrokemijskog čišćenja Magic Clener uređajem izvodi se jednostavno i brzo te je postupak moguće izvoditi na samom mjestu montaže. Elektrokemijskim postupkom čišćenja metala otapa se gornji sloj koji je prilikom zavarivanja promijenio boju te se mijenja struktura bog unošenja visokih temperatura prilikom zavarivanja. Elektrokemijski postupak čišćenja metala omogućava pasivizaciju površinskog sloja koja poboljšava otpornost na koroziju. Elektrokemijskim čišćenjem metala uklanja se površinska obojanost koja sprječava dovod kisika na površinu koji je potreban za pasivizaciju površine. Na ispitnim uzorcima koji nisu bili podvrgnuti elektrokemijskom postupku čišćenja metala može se uočiti napredak rupičaste (eng. *pitting*) korozije u zoni utjecaja topline. Na elektrokemijskim očišćenim ispitnim uzorcima napredak rupičaste korozije je manji nego na neočišćenim ispitnim uzorcima. Na elektrokemijskim očišćenim ispitnim uzorcima mehanizmi nastanka korozije su usporeni. Elektrokemijskim postupkom čišćenja metala uklanja se obojani površinski sloj te se vraća sjajni izgled austenitnog nehrđajućeg čelika. Zbog relativno niske cijene i jednostavnosti izvođenja elektrokemijskog postupka čišćenja metala sam postupak je poželjan za industriju.

## 6. Literatura

- [1] Juraga, Ivan; Alar, Vesna; Stojanović, Ivan. Korozija i zaštita premazima. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014. (ISBN 978-953-7738-27-3)
- [2] Koch, Gerhardus; Varney, Jeff; Thompson, Neil; Moghissi, Oliver; Gould, Melissa; Payer, Joe. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. Houston, Texas, USA: NACE International, 2016.
- [3] Esih, Ivan. Osnove površinske zaštite. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010. (ISBN 953-6313-56-1)
- [4] Esih, Ivan; Dugi, Zvonimir. Tehnologija zaštite od korozije. Zagreb: Školska knjiga. 1990. (ISBN 86-03-99035-2)



- [5] Mainier, Fernando B., Monteiro, Luciane P. C.; Mercon, Fabio; Guimarães, Pedro Ivo C.; Mainier, Renata J. Teaching of corrosion based on critical evaluation of urban // *Journal of Research & Method in Education (IOSR-JRME)*, 3(2013), 3; 13-19. (ISSN 2320-7388)
- [6] Roberge, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1999. (ISBN 0-07-076516-2)
- [7] Novosel, Mladen; Krumes, Dragomir. Posebni čelici. Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 1998. (ISBN 953-6048-14-0)
- [8] Ivušić, Vinko; Franz, Mladen; Španiček, Đurđica; Ćurković, Lidija. Materijali 1. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011. (ISBN 978-953-7738-11-2)
- [9] Filetin, Tomislav; Kovačićek, Franjo; Indof, Janez. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011. (ISBN 9536313774)
- [10] Magic Cleaner, Fronius International GmbH



## Utjecaj tople deformacije na kvalitetu zavara šavne cijevi iz čelika mikrolegiranog niobijem namjenjenim za vodovodne instalacije

### *The influence of hot deformation on the quality of welding of niobium microalloyed seam pipes intended for plumbing installations*

I. Samardžić<sup>1</sup>, S. Rešković<sup>2, \*</sup>, B. Grizelj<sup>1</sup>, T. Brlić<sup>2</sup>, D. Marić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [reskovic@simet.unizg.hr](mailto:reskovic@simet.unizg.hr)

#### Sažetak

Istraživanja su provedena na šavnim i toplovaljanim šavnim cijevima namjenjenim za vodovodne instalacije. Cijevi su izvaljane iz toplovaljane trake mikrolegirane s 0,046% Nb. Sve cijevi su zadovoljile tražena svojstva. Detaljno je ispitana kvaliteta zavara, osnovnog materijala i zone utjecaja topline. Utvrđeno je da je kvaliteta zavara kod toplovaljanih šavnih cijevi značajno bolja. Posebna pozornost posvećena je skidanju unutarnjeg viška zavara toplovaljanih šavnih cijevi. Nepravilno skinut unutarnji višak zavara može dovesti do začepjenja cijevi tijekom korištenja cijevi u vodovodnim instalacijama.

**Ključne riječi:** vodovodne cijevi, čelik mikrolegiran niobijem

#### Abstract

Research was carried out on seamed and hot-rolled seamed pipes intended for water installations. The tubes are rolled from hot-rolled strip microalloyed with 0,046% Nb. All pipes met the required properties. The quality of the welds, base material and heat-affected zone, was examined in detail. It was found that the quality of the welds in hot-rolled seamed pipes is significantly better. Special attention is paid to the removal of internal excess welds of hot-rolled seamed pipes. Improper internal weld excess can lead to the clogging of pipes during their use in production process.

**Key words:** water pipes, niobium microalloyed steel

## 1. Uvod

Za izgradnju vodovodnih sustava čelične cijevi su se primjenjivale još u devetnaestom stoljeću. Sredinom dvadesetog stoljeća u izgradnji vodovodnih sustava, s hladnom i toplom vodom te vodenom parom, čelične cijevi su pronašle široku primjenu. Zbog korozije i relativno kratkog vijeka trajanja cijevi su se pocinčavale. Međutim kod zavarivanja spojeva cijevi cinkova zaštita se gubila, jer se cink tali na 419 °C, a kod zavarivanja čelika temperature dostižu 1400 °C. Zbog toga su cijevi na tom mjestu korodirale. Kako bi se to spriječilo počele su se primjenjivati pocinčane cijevi s navojem [1,2]. Obzirom da se navoj narezuje na cijevi na mjestu ugradnje i da se na mjestu navoja skida pocinčani dio ponovno je dio cijevi bio izložen povećanoj koroziji. To je dovelo do razvoja i primjene PPR cijevi (cijevi od polimernih materijala) obzirom da one ne mogu korodirati, a i zbog svojstva savitljivosti povećan im je radni vijek te su se mogle koristiti u većim dužinama. Danas se izrađuju PPR cijevi koje mogu izdržati temperaturu do 170 °C [3]. Ove cijevi ipak se ne mogu koristiti za veće temperature, a i mehanička svojstva su im neusporedivo niža od svojstava čeličnih cijevi. Zbog toga se čelične cijevi i danas koriste u vodovodnim sustavima, naročito kod izmjenjivača topline [4,5]. Uglavnom su se koristile bešavne čelične cijevi, ali danas se sve više teži korištenju zavarenih, šavnih, cijevi koje su znatno jeftinije, a kvaliteta zavarenog spoja može se postići jednaka kvaliteti osnovnog materijala cijevi [6,7]. Istovremeno se postavljaju sve veći zahtjevi i u pogledu čvrstoće cijevi. Iz tog razloga nameće se potreba izrade cijevi ove namjene iz kvalitetnijih čelika. Danas se koriste bakrene cijevi i cijevi od nehrđajućih čelika [8]. Njihova cijena je znatno viša pa se pred proizvođače cijevi za vodovodne sustave postavljaju sve stroži zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava, posebno kvalitete zavarenog spoja, te korozijske postojanosti. Razvijaju se nove kvalitete čelika s ciljem da se uz manju cijenu proizvoda dobiju bolja mehanička svojstva cijevi. Čelik mikrolegiran niobijem osim što ima znatno bolja mehanička i tehnološka svojstva, jeftiniji je od legiranih čelika. Uz vrlo mali dodatak mikrolegirajućeg elementa niobija i pravilnim izborom parametara termomehaničke obrade mogu se postići ciljana svojstva [9,10].

U cjevovodnim sustavima, gdje se koristi topla i hladna voda, u vodu se dodaju različiti aditivi za otapanje vapnenca iz vode te željeznog oksida koji u vodu dospijeva zbog korozije na stijenci cijevi. Tijekom vremena ovi spojevi se talože na stijenkama cijevi. Obzirom da ovi spojevi imaju visoku čvrstoću tlak tekućine u sustavu ne čini ih pokretnima već se povećavaju što dovodi do potpunog zatvaranja cijevi čime je protok vode spriječen. Ukoliko se koriste uzdužno zavarene cijevi iznimno je važna kvaliteta zavarenog spoja [11,12]. Ako unutarnji višak zavara nije skinut ili nije adekvatno skinut na pojedinim mjestima po dužini cijevi, to će predstavljati inicijalno mjesto za početak taloženja vapnenca iz vode. Zbog toga se u procesu valjanja cijevi moraju primijeniti minimalno dvije metode bez razaranja kojima se kontrolira svaka cijev po cijeloj dužini. Cijevi se uvijek tlače tekućinom a u novije vrijeme primjenjuje se i jedna od ultrazvučne i magnetske metode ili sve rijeđe metoda zračenja [13].

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja proizvodnje cijevi za vodovodne sustave iz čelika mikrolegiranog niobijem. Ispitana svojstva cijevi uspoređena su sa zahtjevima za cijevi za izmjenjivače topline. Posebna pozornost posvećena je kvaliteti zavara uzdužno zavarenih cijevi. Primjenjene su dvije metode bez razaranja u cilju ispitivanja kvalitete zavara te veličine i geometrije unutarnjeg viška zavara.

## 2. Izbor čelika i tehnologije valjanja cijevi

Za ispitivanje je odabran čelik mikrolegiran s 0,046% Nb. Čelik je dobiven u elektrolučnoj peći i kontinuirano lijevan u slabove 430 x 370 mm. Iz čelika su izvaljane dvije dimenzije trake: traka 370 x 3,2 mm i 370 x 3,8 mm. Kemijski sastav čelika prikazan je u tablici 1. Zbog usporedbe, naveden je i kemijski sastav čelika sukladno normi HRN EN 10028-7.

**Tablica 1.** Kemijski sastav čelika

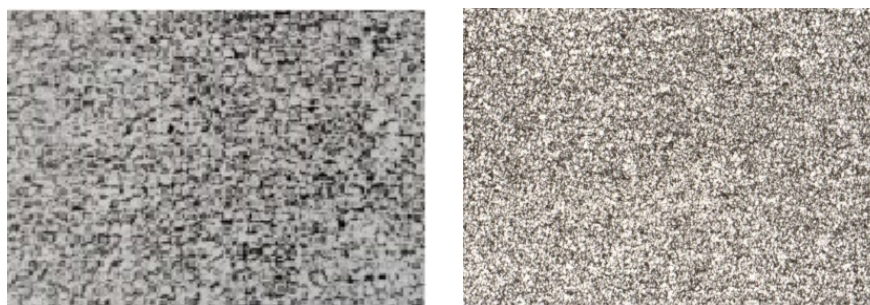
Element, %	C	Si	Mn	P	S	Mo	Nb
Nb čelik	0,12	0,15	0,71	0,011	0,014	-	0,046
DIN EN 10028	0,12-0,20	0,10-0,35	0,4-0,8	≤0,25	≤0,025	0,25-0,35	-

Mali dodatak niobija u čeliku uz odgovarajuće parametre valjanja osigurava dobra mehanička, ali i druga svojstva čelika. Mehanička svojstva toplovaljane trake prikazana su u tablici 2.

**Tablica 2.** Mehanička svojstva toplovaljane trake

		$R_{eH}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_0$ , %
Nb čelik	traka 370 x 3,2 mm	480	570	38
	traka 370 x 3,8 mm	487	570	37

Iz tablice je vidljivo da obje dimenzije trake imaju dobra mehanička svojstva. Mikrostruktura traka prikazana je na slici 1.



a) traka 370 x 3,2 mm

b) traka 370 x 3,8 mm

**Slika 1.** Mikrostruktura toplovaljane trake

Slika 1 pokazuje da obje trake imaju homogenu sitnozrnatu feritno perlitnu mikrostrukturu, što odgovara i dobivenim mehaničkim svojstima.





Tehnologija valjanja uzdužno zavarenih cijevi grupa I (izvaljane cijevi dimenzije  $\varnothing 50 \times 3,2$  mm iz trake dimenzije  $370 \times 3,2$  mm) sastoji se u obrezivanju rubova trake, namatanju trake na kolut, formiranju trake u cijevni oblik, visokofrekventnom zavarivanju cijevi, kalibriranju cijevi, rezanju cijevi na zadanu dužinu, pakiranju i skladištenju [14].

Cijevi grupe II (toplovaljane cijevi dimenzija  $\varnothing 48,3 \times 3,25$  mm iz trake dimenzija  $370 \times 3,8$  mm) su valjane u drugoj valjaonici čija se tehnologija valjanja sastoji u početku, kao i kod grupe I, od obrezivanja rubova trake, namatanja trake na kolut, formiranja trake u cijevni oblik, te visokofrekventnog zavarivanja cijevi [14]. Traka dimenzija  $370 \times 3,8$  mm je rasječena u tri lamele koje su zavarene u cijevi dimenzija  $\varnothing 117,14 \times 3,8$  mm. Nakon zavarivanja na cijevima se skida vanjski i unutarnji višak zavara. U kontinuiranom procesu cijevi se najprije zagrijavaju na temperaturu normalizacije od  $870$  °C radi homogenizacije strukture zavarenog spoja. Nakon toga cijevi se zagrijavaju na temperaturu tople deformacije od  $1050$  °C. Pri izvlačnom reduciranju u materijalu se odvijaju vrlo složeni procesi deformacije. Deformacija se odvija na način da se redukcija promjera cijevi odvija valjcima u trovaljkastim stanovima pri čemu se promjer cijevi smanjuje od prve do zadnje provlake. Redukcija stijenke cijevi odvija se izvlačenjem što se regulira brzinom valjanja [15]. U prvim provlakama dolazi do povećanja debljine stijenke cijevi, a zatim do njene redukcije. Izvaljane su cijevi dimenzije  $\varnothing 48,3 \times 3,25$  mm sukladno normi HRN EN 10217-4:2003. Nakon valjanja sve cijevi se ispituju na propusnost pri hidrostatičkom tlaku od 80 bara. Cijevi sa greškom izuzimaju se iz daljnjeg procesa, a cijevi koje su zadovoljile ova ispitivanja u daljnjem tijeku kontinuiranog procesa ispituju se još jednom metodom bez razaranja, u ovom slučaju metodom vrtložnih struja na defektomatu. I kod ove vrste ispitivanja cijevi na kojima je otkrivena standardom definirana neprihvatljiva greška izuzimaju se iz daljnjeg procesa. Na kraju procesa cijevi se pakuju u snopove i skladište.

### 3. Rezultati ispitivanja cijevi

Mehanička svojstva cijevi ispitana su na više uzoraka sukladno normi HRN EN ISO 6892. Dobivene prosječne, te minimalne i maksimalne vrijednosti prikazane su u tablici 3.

**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava cijevi

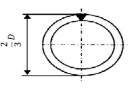
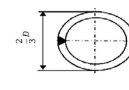
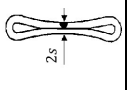
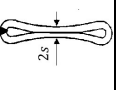
		$R_e$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %
cijevi grupa I	min	443	530	34,5
	max	472	570	38,8
	prosječna	465	546	36,1
cijevi grupa II	min	457	540	34,6
	max	480	570	38,6
	prosječna	470	562	36,0
HRN EN 10217-4:2003		$\geq 270$	450-600	22

Sve cijevi imaju znatno bolja mehanička svojstva nego što je normom propisano za cijevi koje se eksploatiraju na temperaturama nižim od  $400^\circ$ . Cijevi grupe II imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na cijevi iz grupe I. Također se zapaža da su svojstva cijevi

iz grupe II znatno homogenije u odnosu na svojstva cijevi iz grupe I. Provedena su i detaljna tehnološka ispitivanja cijevi. Šavne cijevi su ispitane proširivanjem prema normi DIN EN ISO 8495, spljoštavanjem po zavaru i okomito na zavar na 2/3 vanjskog promjera cijevi ili do loma sukladno normi DIN EN ISO 8492.

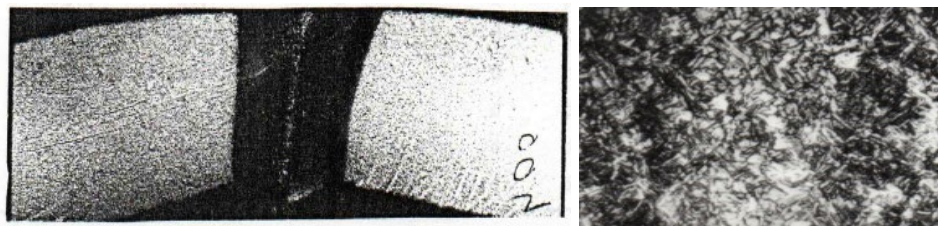
Ispitivanja su provedena na 10 cijevi iz svake grupe. Sve cijevi su spljoštavane po zavaru i okomito na zavar na visinu od 2/3 vanjskog promjera cijevi i do dvije debljine stijenke cijevi. Iz istih cijevi uzeti su uzorci i provedena su ispitivanja savijanjem cijevi pod kutom od 90° prema normi DIN EN ISO 8491. Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 4.

**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja cijevi spljoštavanjem, proširivanjem i savijanjem

	Spljoštavanje cijevi				Proširivanje cijevi, $\alpha=45^\circ$	Savijanje cijevi, $\alpha=90^\circ$
						
	Broj cijevi s greškom					
cijevi grupa I	0	0	3	4	0	0
cijevi grupa II	0	0	0	0	0	0

Svi uzeti uzorci cijevi grupe I i grupe II su zadovoljili standardima propisana ispitivanja spljoštavanja, proširivanja te savijanja. Pri spljoštavanju na dvije debljine stijenke cijevi cijevi grupe II su pokazale vrlo dobre rezultate. Na niti jednom uzorku nije uočena niti jedna pukotina. Na cijevima iz grupe I na 3 uzorka kod spljoštavanja po zavaru na dvije debljine stijenke cijevi pojavile su se plitke pukotine na zavaru i zoni utjecaja topline. Kod spljoštavanja okomito na zavar na dvije debljine stijenke cijevi pojavile su se pukotine na 4 uzorka na zavaru. Ove pukotine su bile nešto duže i dublje od pukotina na cijevima spljoštanim po zavaru. Kod cijevi iz drugih vrsta čelika ove pukotine su puno više izražene.

Provedena su detaljna ispitivanja makro i mikrostrukture zavara cijevi grupe I i II. Na slici 2 prikazana je makro i mikrostruktura cijevi grupe I. Jasno se vidi da je cijev dobro zavarena i da je širina zone utjecaja topline nešto šira. Unutarnji višak zavara nije u potpunosti skinut.



**Slika 2.** Makro i mikrostruktura zavara, cijev grupe I

Na slikama 3 i 4 prikazana je makro i mikrostruktura zavara cijevi grupe II. Nakon zavarivanja i skidanja unutarnjeg viška podvara, slika 3, cijev ima dobru kvalitetu zavarenog spoja, usku zonu utjecaja topline i jasno je vidljivo da je unutarnji višak zavara dobro skinut.



**Slika 3.** Makro i mikro struktura zavara, cijev grupe II nakon zavarivanja cijevi

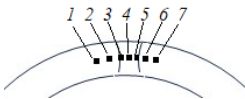
Nakon toplog valjanja ovih cijevi, slika 4, makro i mikrostruktura pokazuju dobru kvalitetu zavara i pravilan unutarnji profil cijevi što ukazuje da je provedeno kvalitetno skidanje unutarnjeg viška zavara.



**Slika 4.** Makro i mikro struktura zavara, cijev grupe II nakon toplog valjanja cijevi

Ovi rezultati potvrđeni su i mjerenjem tvrdoće na osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i na mjestu zavara. Kako je i očekivano cijevi grupe I imaju određene razlike u tvrdoći dok cijevi grupe II imaju homogenije iznose izmjerene tvrdoće, tablica 5.

**Tablica 5.** Tvrdoća po Brinellu, HB

		1	2	3	4	5	6	7
								
cijevi grupe I	-	166	165	175	188	166	168	168
cijevi grupe II	zavarena	164	165	164	176	163	164	165
	toplovaljana	173	171	172	172	171	172	172

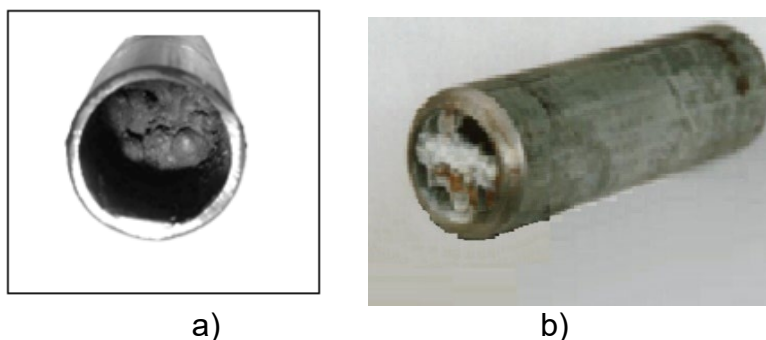
To ukazuje da je kvaliteta zavara i osnovnog materijala jednaka pa se cijevi mogu primjenjivati u vodovodnim sustavima gdje su povišeni zahtjevi u pogledu tlaka i temperature.

Sve cijevi su ispitane i na hidrostatički tlak od 80 bara. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 6.

**Tablica 6.** Rezultati ispitivanja cijevi na hidrostatski tlak

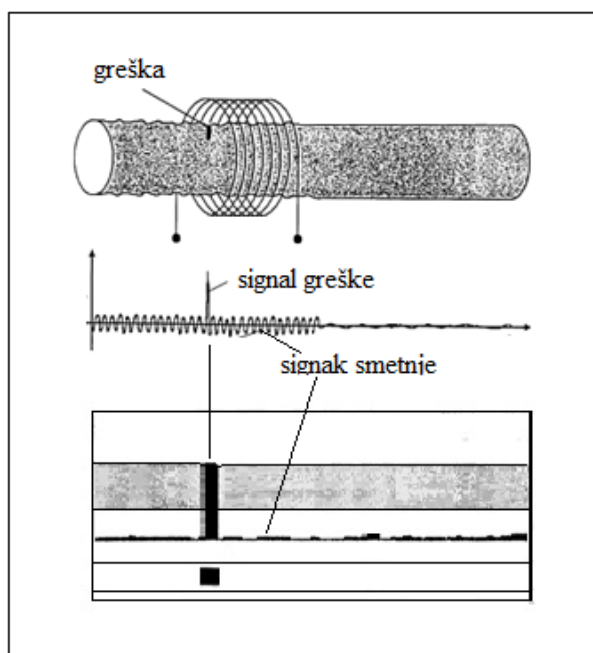
Broj ispitanih cijevi	Broj cijevi koje nisu zadovoljile	Broj cijevi na kojima je utvrđena propusnost	Broj cijevi na kojima je utvrđena začepjenost
1986	11	2	9

Dvije cijevi nisu dobro zavarene ili je zavar oštećen kod skidanja viška zavara i propuštale su tekućinu. Izuzete su iz daljnjeg procesa. Zbog skupljanja veće količine skinutog unutarnjeg viška zavara koji nije iz cijevi izbačen s tekućinom pod tlakom na hidroprobi, utvrđen je slabiji protok ili začepjenost cijevi. Zbog začepjenosti cijevi iz daljnjeg procesa izuzeto je 9 cijevi, tablica 6. Zbog neadekvatnih parametara visokofrekventnog zavarivanja ponekad rastaljeni metal na mjestu zavara „curi“ po impederu i zajedno s prašinom od oksidnog sloja na traci stvara naljepak na impederu koji kad dostigne određenu veličinu otkida se s impедера i dovodi do začepjenja cijevi, slika 5a. Vrlo često zaostala špena koja se ne otkrije na hidroprobi u procesu pocinčavanja dovodi do potpune začepjenosti cijevi, slika 5b.



**Slika 5.** Začepjene cijevi: a) nakon toplog valjanja, b) nakon pocinčavanja

Kod ispitivanja cijevi na hidrostatski tlak moguće je da se ne otkriju neke greške kao što su neskinut ili neadekvatno skinut unutarnji višak zavara, a to su upravo ona mjesta na kojima će započeti taloženje vapnenca iz vode. Zbog toga su sve cijevi koje su zadovoljile tlak od 80 bara u daljnjem kontinuiranom procesu ispitane i metodom vrtložnih struja i magnetskog toka na defektomatu FOERSTER DEFECTOTEST DS. Prije ispitivanja uređaj je baždaren sukladno standardu SEP 1925. Princip rada defektomata prikazan je na slici 6, a rezultati ispitivanja u tablici 7.



**Slika 6.** Ispitivanje toplovaljanih cijevi vrtložnim strujama

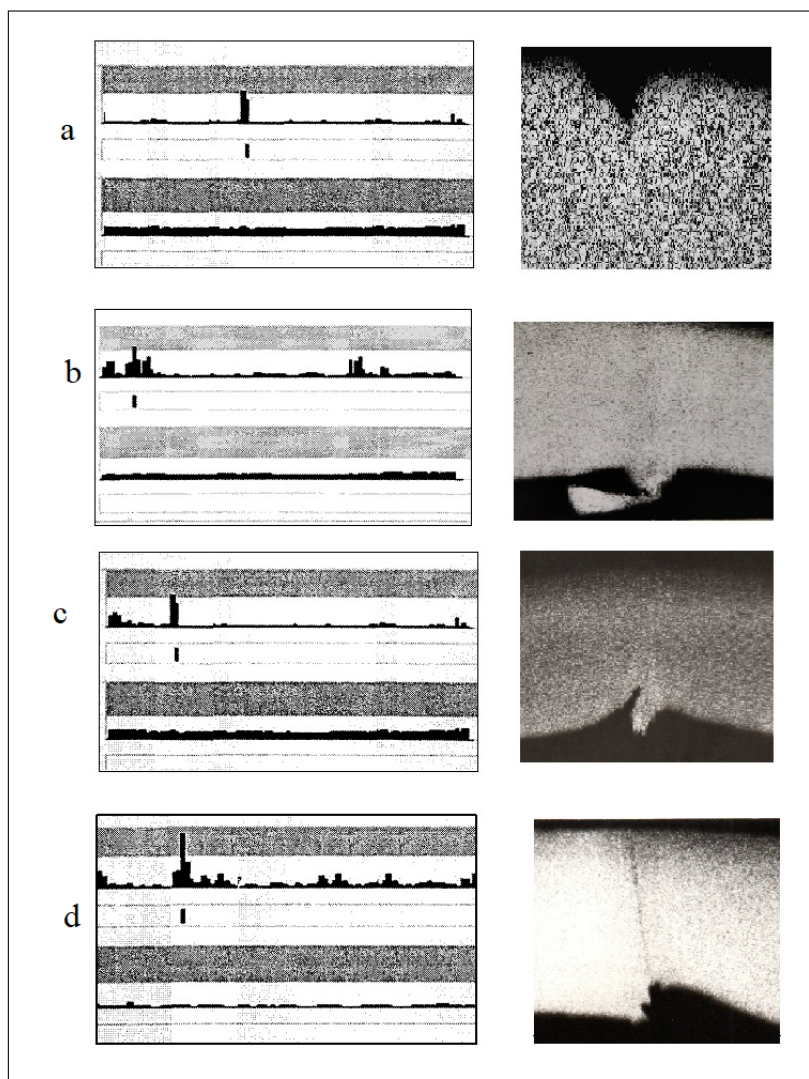
Indukcijska zavojnica generira promjenljivo magnetsko polje u cijev u kojoj se stvaraju vrtložne struje. Nepravilnosti u materijalu čine vrlo veliki otpor za tok vrtložnih struja. Zbog toga se na mjestu greške javlja pojačan signal odnosno „pik“. Veličina pika ovisna je o vrsti greške u materijalu [13].

**Tablica 7.** Rezultati ispitivanja cijevi metodom vrtložnih struja SEP 1925

Broj ispitanih cijevi	Broj cijevi koje nisu zadovoljile
1975	9

Ispitano je 1975 cijevi. Na 9 cijevi potvrđena je greška neskinutog ili neadekvatno skinutog unutarnjeg viška zavara ili nakupljanja špene od skidanja unutarnjeg viška zavara. Svaka cijev na kojoj se otkrije greška se izuzima iz daljnjeg kontinuiranog procesa. Za svaku cijev s greškom dobiven je ispis na ekranu defektomata, slika 7. Mjesto greške uređaj označava raspršivanjem boje po grešci. Cijevi sa označenom greškom su naknadno vizualno pregledane prosvjetljivanjem unutrašnje strane cijevi. Na 4 cijevi označena greška vizualno nije bila vidljiva. Zbog toga su na mjestu greške uzeti uzorci i metalografski analizirani. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 7.





**Slika 7.** Utvrđene greške na cijevima

Na jednoj cijevi, slika 7a, na vanjskoj površini cijevi na osnovnom materijalu, vidljiva je greška od mehaničkog oštećenja površine cijevi. Neskinut unutarnji višak zavara i ostaci špene, vidljivi su na slici 7b. Na jednoj cijevi, slika 7c, greška je nastala zbog nepravilnog obrezivanja rubova trake. Nakon formiranja trake u cijevni oblik i nakon zavarivanja te skidanja unutarnjeg i vanjskog viška zavara unutarnji višak zavara nije skinut. Sličan uzrok je i za grešku na cijevi kao na slici 7d. Nakon skidanja vanjskog i unutarnjeg viška zavara debljina stijenke cijevi s obje strane zavara nije ista, pa to uređaj prepoznaje kao uzdužnu pukotinu na unutarnjoj stijenci cijevi.

#### 4. Zaključak

Provedena ispitivanja su pokazala da toplovaljane uzdužno zavarene cijevi imaju znatno bolja mehanička i tehnološka svojstva od onih normom zahtjevanih za cijevi u vodovodnim sustavima koje se koriste na povišenim temperaturama. Utvrđeno je da toplovaljane uzdužno zavarene cijevi, grupa II, imaju bolja i homogenija svojstva i bolju kvalitetu zavara

od uzdužno zavarenih cijevi. Detaljna ispitivanja tehnoloških svojstava toplovaljanih cijevi su pokazala da je kvaliteta zavara jednaka kvaliteti osnovnog materijala.

Obzirom da je svaka unutarnja greška u cijevi moguće mjesto početka taloženja vapnenca iz vode, posebna pozornost posvećena je ispitivanju kvalitete skidanja unutarnjeg viška zavara i zaostalom skinutom višku zavara u cijevima. Utvrđeno je da je kvaliteta skidanja viška unutarnjeg zavara vrlo dobra. Pronađene greške su uglavnom posljedica loše kvalitete rasjecanja trake.

Provedena ispitivanja su pokazala da se toplovaljane uzdužno zavarene cijevi iz čelika mikrolegiranog niobijem mogu primjenjivati u vodovodnim sustavima, pa čak i onim na povišenim temperaturama.

## 5. Literatura

- [1] <http://hr.worldironsteel.com/heat-resistant-steel-pipe/astm-a556-gr-b2-steel-feedwater-heater-tubes.html>, preuzeto 19.7.2023.
- [2] <http://hr.worldironsteel.com/news/standards-comparison-of-boiler-tube-between-ch-9713312.html>, preuzeto 19.7.2023.
- [3] <https://hr.milestonepipe.com/plastic-pipe/pvc-u-pipe/heat-resistant-plastic-water-pipe.html>, preuzeto 19.7.2023.
- [4] Samardžić, Ivan; Horvat, Marko; Pisačić, Katarina; Botak, Zlatko. Svojstva i primjena visokočvrstih čelika // *Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2019* / Slavonski Brod, Hrvatska, 2019., 207-215 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni)
- [5] Rešković, Stoja; Križanić, Rade; Mamuzić, Ilija. Mogućnost proizvodnje kotlovske šavnih cijevi u Hrvatskoj // *3. Međunarodno savjetovanje proizvodno strojarstvo CIM '95*/ Zagreb, 1995, 35-42.
- [6] Grizelj, Branko; Rešković, Stoja; Marić, Dejan; Duspara, Miroslav; Brić, Tin; Vuletić, Katica; Putnik, Ivan. Some influences on the mechanical properties of steel // *Plin 2020* / Pero RAOS, glavni urednik Tomislav GALETA, Dražan KOZAK, Marija RAOS, Josip STOJŠIĆ, Igor SUTLOVIĆ, Zlatko TONKOVIĆ (ur.). Osijek: Sveučilište u Slavanskom Brodu, 2020. str. 224-235 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- [7] Kozak, Jindrich; Krejči, Lucie; Hlavaty, Ivo; Samardžić, Ivan; Čep, Robert. An analysis of structures occurring in weld deposit of steel S235JR+N with tungsten carbide particles and martensitic matrix // *Metalurgija*, 58 (2019), 3-4; 235-238. (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
- [8] <https://engineerx.decorexpro.com/hr/santeh/trubodel/montazh-mednyx-trub-svoimi-rukami.html>, preuzeto 19.7.2023.
- [9] Rešković, Stoja. Ponašanje čelika mikrolegiranog niobijem pri termomehaničkoj obradi // *Metalurgija*, 30 (1991) 3; 63-74.
- [10] Rešković, Stoja; Slokar Benić, Ljerka; Lovrenić-Jugović, Martina. The Interdependence of the Degree of Precipitation and Dislocation Density during the



Thermomechanical Treatment of Microalloyed Niobium Steel // *Metals*, 10 (2020), 2; 1-11. (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

- [11] Rešković, Stoja; M. Preloščan. Zavarivost niobijem mikrolegiranog čelika visokofrekventnim postupkom // *Zavarivanje* 35 (1992) 5/6, 191-199.
- [12] Rešković, Stoja; Balenović, Marijan; Grizelj, Branko; Samardžić, Ivan; Lazić, Ladislav; Duspara, Miroslav. Performance of the device for removing the internal excess of welding on seam pipes // *11. International scientific-professional conference SBW 2021 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2021“* / Slavonski Brod, Hrvatska, 2021.
- [13] Jandrić, Ivan; Rešković, Stoja. Tube testing with Eddy Current // *Summaries of Lectures from 8th International Symposium of Croatian Metallurgical Society "Materials and Metallurgy"*, tiskano u *Metalurgija* 47 (2008) 3, 229-254 / Mamuzić, Ilija (ur.). Zagreb Hrvatsko metalurško društvo, 2008. 246-246. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).
- [14] Rešković, Stoja; Jandrić, Ivan. Tehnologije oblikovanja deformiranjem. Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2022. (ISBN 978-953-7082-41-3)
- [15] Rešković, Stoja; Križanić, Rade; Vodopivec, Franc. Numerical design of hot-stretch-reducing process for welded tubes / *Materiali in tehnologije* 44 (2010) 5, 243-250.