

svetstrojništva

Zveza Strojnih Inženirjev Slovenije

Mechanical EngineeringWorld

Association of Mechanical Engineers of Slovenia

PREDSTAVLJAMO:

- Analiza Laplaceovega tlaka v kapljici pri prehodu med režimoma omočenja površine
- Analiza procesa katalitične metanacije s pomočjo hitrotekoče infrardeče kamere
- Termodinamska in termoe ekonomska primerjava parnega ejektorja z električnim kompresorjem v hladilnem sistemu
- Analysis of recalescence and solidification front travel in a freezing water droplet
- Razvoj merilnega preizkuševališča za ovrednotenje procesa zmrzovanja vodne kapljice s hitrotekočo kamero
- Trajnostni učinki povišanja stopnje lokalne energetske samooskrbe pri sistemu daljinskega ogrevanja stavb
- Analiza vpliva oblike, materiala in kapljevine na trenje hidravličnih batnih tesnil

ZSIS

Mednarodni uredniški odbor, International editorial board:

1. Prof. Cristina H. Amon, University of Toronto
2. Assoc. Prof. Daniel Attinger, Iowa State University
3. Assoc. Prof. Ivan Bajsić, University of Ljubljana
4. Prof. Janez Diaci, University of Ljubljana
5. Prof. Nazanin Emami, Luleå University of Technology
6. Prof. Iztok Golobič, University of Ljubljana
7. Assist. prof. Peter Gregorčič, University of Ljubljana
8. Assist. Prof. Mirko Halilović, University of Ljubljana
9. Prof. Niko Herakovič, University of Ljubljana
10. Prof. Matjaž Hriberšek, University of Maribor
11. Assoc. Prof. Matija Jezeršek, University of Ljubljana
12. Prof. Mitjan Kalin, University of Ljubljana
13. Assoc. Prof. Janez Kušar, University of Ljubljana
14. Asist. Prof. Nenad Miljkovic, University of Illinois
15. Assoc. prof. Nikolaj Mole, University of Ljubljana
16. Prof. Adian Morina, University of Leeds
17. Prof. Marko Nagode, University of Ljubljana
18. Prof. Greg F. Naterer, Memorial University of Newfoundland
19. Prof. Zoran Ren, University of Maribor
20. Prof. Khallil Sefiane, The University of Edinburgh
21. Prof. Roman Šturm, University of Ljubljana
22. Prof. Bruno Trindade, University of Coimbra

SVET STROJNISTVA

Na naslovnici: "Nikljevi delci od blizu"

Odgovorni urednik: Iztok Golobič

Urednica: Andreja Cigale

Tehnični urednik: Žiga Zadnik

Lektoriranje: Andreja Cigale

Ime in sedež založnika: ZSIS, Karlovska cesta 3, 1000 Ljubljana

Leto izida publikacije: 2023

Leto natisa ali izdelave publikacije: letnik 12, št. 01/02

Število natisnjenih izvodov: 150

Informacije so točne v času tiska.

Preverite www.zveza-zsis.si za posodobitve.

Svet strojništva (ISSN-2350-3505), revija, je vpisana v razvid medijev, ki ga vodi Ministrstvo za kulturo RS, pod zaporedno številko 872. Revija je brezplačna za člane Zveze strojnih inženirjev Slovenije, podjetja, izobraževalne ustanove in drugo zainteresirano javnost na območju Republike Slovenije.

Objavljeni avtorski prispevki v promocijskem delu revije Svet Strojništva izražajo mnenja in stališča avtorjev in ne izražajo nujno tudi mnenja uredniškega odbora ali izdajatelja. Avtorske pravice za revijo Svet strojništva so last izdajatelja. Uporabniki lahko prenašajo in razmnožujejo vsebino zgolj v informativne namene, ob pisnem soglasju izdajatelja.

Revija Svet strojništva je dosegljiva tudi na internetni strani v elektronski obliki pod www.zveza-zsis.si/svetstrojništva. Copyright © Svet strojništva.

KAZALO

ZNANOST NA DLANI

- Analiza Laplaceovega tlaka v kapljici pri prehodu med režimoma omočenja površine **4**
- Analiza procesa katalitične metanacije s pomočjo hitrotekoče infrardeče kamere **12**
- Termodinamska in termoe ekonomska primerjava parnega ejektorja z električnim kompresorjem v hladilnem sistemu **26**
- Razvoj merilnega preizkuševališča za ovrednotenje procesa zmrzovanja vodne kapljice s hitrotekočo kamero **34**
- Trajnostni učinki povišanja stopnje lokalne energetske samooskrbe pri sistemu daljinskega ogrevanja stavb **43**
- Analiza vpliva oblike, materiala in kapljevine na trenje hidravličnih batnih tesnil **50**
- Analysis of recalescence and solidification front travel in a freezing water droplet **58**

V SREDIŠČU

- Adria Mobil presegla rezultate iz predpandemskega leta 2019 **66**
- Poletna FS šola 2023 na Fakulteti za strojništvo v Mariboru **70**
- Na Fakulteti za strojništvo UL so zaključili 10. Poletno šolo strojništva **71**
- Akademija strojništva 2022 - Inženirstvo - Inovativne rešitve za trajnostni razvoj in samooskrbo **72**

INFORMATOR

- BSH Hišnim aparatom zagotovljena pomoč države in matičnega koncerna **77**
- Inavguracija novega dekana Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru **78**
- Avgustovske poplave močno prizadele družbo KLS Ljubno **79**
- Krki zlato nacionalno priznanje za inovacijo **80**

JEZIKOVNI ODENKI

- Blizui raznice **82**

NAJAVA DOGODKA

- Akademija strojništva 2023

Prelistajte Svet strojništva tudi na spletu:
www.zveza-zsis.si/svetstrojništva
Povabilo k sodelovanju:
www.zveza-zsis.si/svetstrojništva/



ANALIZA LAPLACEOVEGA TLAKA V KAPLJICI PRI PREHODU MED REŽIMOMA OMOČENJA POVRŠINE

Matevž Vodopivec, Samo Jereb, Matic Može, Matevž Zupančič*, Iztok Golobič
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Korespondenčni avtor: **Matevž Zupančič**

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenija

Tel.: +386 1 4771 309

E-mail: matevz.zupancic@fs.uni-lj.si

Short scientific paper / Kratki znanstveni prispevek

POVZETEK

Superhidrofobne površine so v zadnjih letih deležne posebne pozornosti, saj izkazujejo unikatne lastnosti kot so samočistilni učinek, zagotavljajo izboljšanje prenosa toplote pri vrenju, preprečujejo korozijo in zmrzovanje kapljev na površini ter zmanjšujejo viskozni upor. Za ohranitev teh lastnosti pa morajo biti površine primerno robustne. V delu smo analizirali robustnost superhidrofobnih površin in z uporabo optične metode določili tlake, pri katerih na superhidrofobnih površinah nastopi prehod med Cassie-Baxterjev in Wenzelovim kotom omočenja. Površine smo hidrofobizirali s tremi različnimi sredstvi: FDPA, PDMS in HTMS ter jih karakterizirali glede na njihovo omočljivost. Kapljice smo stiskali med dve enaki superhidrofobni površini in pri tem zajeli slike za analizo doseženega tlaka. Površina s PDMS nanosom je prehod dosegla pri najnižjem tlaku, površina s HTMS nanosom pa pri najvišjem. Rezultat površine PDMS je pripisan njeni večji omočljivosti v primerjavi z ostalima površinama, medtem ko ta razlaga ne drži za razliko med površinama FDPA in HTMS. Dosežen visok Laplaceov tlak kapljice, potreben za prehod med režimoma na površini s HTMS nanosom, izkazuje njeno večjo odpornost na povišan tlak in posledično večjo robustnost v primeru uporabe v določenih inženirsko pomembnih aplikacijah kot recimo za izdelavo samočistilnih površin ali pri izboljšanjem dvofaznem prenosu toplote.

Ključne besede: omočljivost; superhidrofobnost; stiskanje kapljic; režim omočljivosti; Laplaceov tlak

Article info

Article history

Received: 3rd August 2023

Received in revise from 16th August 2023

Accepted 4th September 2023

Available online 29th September 2023

ABSTRACT

Superhydrophobic surfaces have received special attention in recent years due to their unique properties, such as self-cleaning effects, they can enhance heat transfer during boiling, prevent corrosion and freezing of liquids on the surface, as well as reduce viscous resistance. However, to maintain these properties, surfaces must be appropriately robust. In this study, we analysed the robustness of superhydrophobic surfaces and used an optical method to determine the pressures at which the transition between the Cassie-Baxter and Wenzel wetting angles occurs on superhydrophobic surfaces. We hydrophobized the surfaces using three different agents: FDPA, PDMS, and HTMS, and characterized them based on their wettability. We compressed droplets between two identical superhydrophobic surfaces and captured images to analyse the achieved pressure. The surface with a PDMS coating reached the transition at the lowest pressure, while the surface with an HTMS coating reached it at the highest pressure. The result for the PDMS-coated surface can be attributed to its higher wettability compared to the other surfaces, while this explanation does not hold for the difference between the FDPA and HTMS-coated surfaces. The achieved high Laplace pressure of the droplet, necessary for the transition between regimes on the HTMS-coated surface, demonstrates its greater resistance to elevated pressure and consequently greater robustness in certain engineering applications, such as the creation of self-cleaning surfaces or improved two-phase heat transfer.

Keywords: wettability; superhydrophobicity; droplet squeezing; wetting regime; Laplace pressure

1. Uvod

Področje omočljivosti površin, ki temelji na razumevanju interakcije med kapljevimi in površinami, je aktivna tema današnjih znanstvenih raziskav, medtem ko njihovi začetki segajo že v 19. stoletje. Takrat so dela Thomasa Younga [1], Wenzela [2] ter Cassie-ja in Baxter-ja [3] postavila temelj za razumevanje fizikalnega ozadja omočljivosti površin. Glavnina raziskav se v zadnjih letih osredotoča na izjemno omočljive oz. superhidrofilne površine ter izjemno neomočljive oz. superhidrofobne površine. Predvsem so zanimive superhidrofobne površine, za katere se je izkazalo, da njihove unikatne lastnosti izboljšujejo prenos toplote pri vrenju in kondenzaciji [4–8], zavirajo korozijo in zmrzovanje kapljev na površini [9–11], zmanjšujejo viskozni upor [12,13] ter omogočajo zbiranje atmosfirske vode [14].

Omočljivost površine opisuje interakcijo površine s kapljevimi oz. opisuje razširitev kapljice po površini in je posledica različnih prostih površinskih energij materialov. Prosta površinska energija predstavlja razliko med energijo delcev na površini ter energijo delcev znotraj materiala, povzroča pa jo delovanje medmolekularnih sil. Delci znotraj materiala so z vseh strani obdani z atomi iste snovi, med katerimi delujejo privlačne kohezijske sile, medtem ko med atomi različnih snovi na površini delujejo šibkejšje adhezijske sile, saj so površinski delci na zgornji polovici obdani z atomi plina. Vezna energija delcev v notranjosti je posledično večja od energije površinskih delcev, primanjkljaj energije pa predstavlja prosta površinska energija. Merilo za omočenje površine je stopnja razširitve kapljice, ki je opredeljena s koeficientom razširitve S . Ta predstavlja razliko med Gibbsovo prosto površinsko energijo neomočene ter popolnoma omočene površine, normirane na velikost površine. Pri površinah s pozitivnim koeficientom razširitve je prosta energija neomočene površine višja v primerjavi z omočeno, kar pomeni, da se kapljica v stiku s površino zaradi minimizacije proste energije v celoti razširi in tvori tanek film. Nasprotno pri negativni vrednosti koeficienta razširitve kapljica površino omoči le deloma in na njej tvori kapljice. Omočljivost delno omočljivih površin je definirana s kotom omočenja θ , s katerim lahko delimo površine glede na njihovo omočljivost z vodo na: superhidrofilne ($\theta < 5^\circ$), hidrofilne ($5^\circ < \theta < 90^\circ$), nevtralne (90°), hidrofobne ($90^\circ < \theta < 150^\circ$) ter superhidrofobne ($\theta > 150^\circ$). Na kot omočenja in površinsko energijo vpliva tudi hrapavost površine. V sklopu omočljivosti hrapavih površin ločimo Wenzelov in Cassie-Baxterjev režim omočenja. Wenzelov režim opisuje homogeno omočenost

površine, kjer kapljica zapolni vse vrzeli in jamice površinske strukture, medtem ko Cassie-Baxterjev režim obravnava heterogeno omočenost, pri kateri se v vrzeli na površini ujame plin, ki ločuje kapljico in trdnino. Oba režima omogočata doseg visokih kotov omočenja (nad 150°), torej omogočata doseg superhidrofobnosti površin. Pomembna razlika med režimoma pa se pojavi pri velikosti kota zdrsa in histerezi kota omočenja – zaradi plinskih žepkov pri Cassie-Baxterjevem režimu je kontaktna površina med kapljico in trdnino manjša, kar privede do nižje adhezije med molekulami različnih faz in posledično do manjše histereze kota omočenja ($< 10^\circ$) ter manjšega kota zdrsa, ki ne sme presežati 5° za doseg superhidrofobnosti. Superhidrofobnost površin je torej lahko dosežena le pri Cassie-Baxterjevem režimu omočenja. Na isti površini pa se lahko hkrati pojavita oba režima, pri čemer Wenzelov režim predstavlja globalni (stabilno stanje), Cassie-Baxterjev pa lokalni minimum (meta-stabilno stanje) proste energije. Razlika med energijama predstavlja energijo, ki jo je potrebno vnesti v sistem za prehod iz Cassie-Baxterjevega v Wenzelov režim omočenja. Pri prehodu kapljica izpodrine plinske žepke iz površine in jo homogeno omoči, kar privede do izgube superhidrofobnih lastnosti.

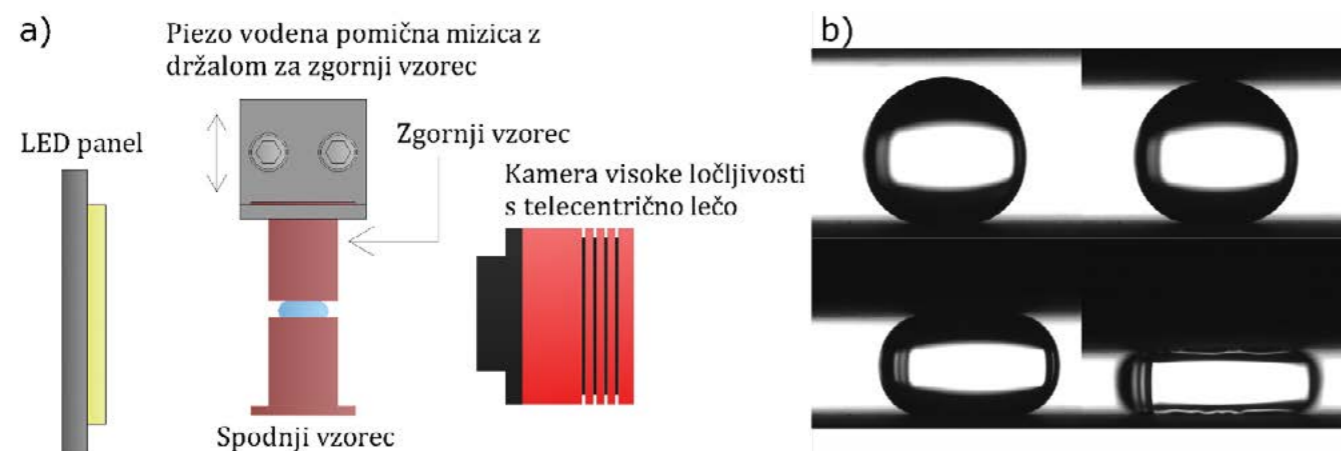
Področje prehoda med režimoma je predmet številnih eksperimentalnih raziskav. Lafuma in Quere [15] sta v svojem delu prva pokazala, da prehod med režimoma nastopi zaradi povečanja tlaka v kapljici. Različne tlake sta dosegla z različnimi velikostmi kapljic (4 – 0,9 mm polmera za doseg tlakov 50 – 150 Pa), nato pa sta kapljice še stiskala med dvema enakima površinama do tlaka 250 Pa. S povečanjem tlaka se je kot omočenja zmanjševal, dokler ta ni dosegel kota homogeno omočene površine (Wenzelov režim omočenja); do prehoda med režimoma omočenja pa je prišlo le pri povečanju Laplaceovega tlaka kapljice nad 250 Pa. Kwon et al. [16] so prav tako uporabili metodo stiskanja kapljic, vendar so primerjali površine s hierarhično strukturo na mikro- in nanometrski skali s površinami z enostopenjsko mikrostrukturo. Ugotovili so, da na površini z enostopenjsko strukturo pride do ireverzibilnega prehoda it Cassie-Baxterjevega v Wenzelov režim, medtem ko je na hierarhični strukturi nastopil reverzibilni prehod, kjer se je kapljica po razbremenitvi vrnila v prvotno stanje. Razlog za to leži v minimumih proste površinske energije, saj na hierarhični strukturi Cassie-Baxterjev režim predstavlja stabilno stanje, Wenzelov pa meta-stabilnega. Avtorji Yao et al. [17] so ugotovili, da povečanje tlaka s stiskanjem kapljice iz 100 na 300 Pa na površini z igličasto mikrostrukturo ni privedlo do

prehoda med režimi, medtem ko je do prehoda prišlo z uporabo stebričaste mikrostrukture. Li et al. [18] so analizirali vplive izboljšanja superhidrofobnih lastnosti površine na prehod med režimi glede na osnovno superhidrofobno stanje. Izboljšanje superhidrofobnih lastnosti so dosegli s stiskanjem kapljice živega srebra namesto vode, v nadaljevanju pa še s hidrofobiziranjem z nanodelci silaniziranega silicijevega dioksida namesto z oktadeciltriklorosilanom (OTS). Obe izboljšavi sta privedli do podobnih rezultatov kot v delu avtorjev Yao et al. [17], nastopil je torej reverzibilen prehod med režimoma, po razbremenitvi pa se je sistem vrnil v začetno stanje. Avtorji Fang et al. [19] ter Garcia-Gonzales et al. [20] so analizirali spremembo sile, ki jo kapljica povzroči na površino pri ireverzibilnem prehodu med režimi in pokazali skokovit padec sile v trenutku prehoda.

2. Metode

2.1 EKSPERIMENTALNA PROGA IN POTEK MERITVE

Eksperimentalna proga je sestavljena iz piezo vodene pomične mizice (ThorLabs PD1/M Piezoelectric Inertia Drive) z vpetim zgornjim vzorcem, spodnjega vzorca, kamero visoke ločljivosti (ZWO ASI174MM) s telecentrično lečo (Opto Engineering TC4M007-C) in LED panelom za osvetlitev. Pomična mizica je postavljena vertikalno in omogoča pomik zgornjega vzorca z natančnostjo 1 μm za stiskanje kapljice, nanešene na spodnji vzorec. Za doseg uniformne velikosti kapljic pri vseh meritvah smo uporabili avtomatsko pipeto z nastavljivim volumnom. Meritev smo izvedli s pomikom zgornjega vzorca, dokler kapljica ni bila stisnjena na eno četrtno njene začetne višine, nato pa smo vzorca ponovno razmaknili do



Slika 1: Shema eksperimentalne proge (a) in potek stiskanja kapljice med površinama (b)

V tej raziskavi smo želeli z uporabo optične metode določiti in primerjati tlake, pri katerih na superhidrofobnih površinah, ustvarjenih z različnimi hidrofobizirnimi sredstvi, nastopi prehod iz Cassie-Baxterjevega v Wenzelov režim omočenja. Za razliko od omenjenih raziskav je bila na naših površinah mikrostruktura narejena z laserskim strukturiranjem, kar pomeni da površina nima idealnih stebričastih struktur vendar stohastično mikrostrukturo, ki smo jo tudi analizirali s pomočjo vrstične elektronske mikroskopije. Namen opravljenih meritev stiskanja kapljic je bila analiza robustnosti superhidrofobnih površin z neidealno mikrostrukturo ter primerjava z obstoječimi rezultati v literaturi. Rezultati predstavljajo osnovo za nadaljnjo optimizacijo laserskih obdelovalnih parametrov in izbire ustreznega nanosa za zniževanje površinske energije z namenom doseganja robustnih superhidrofobnih površin.

razbremenitve kapljice. Tekom celotne meritve smo s hitrostjo 1 slike na sekundo s kamero s slikovno točko velikosti 2,3 μm zajeli sliko kapljice in dobili celotno sekvenco od začetnega stanja do maksimalnega stiska ter do ponovne razbremenitve kapljice.

V eksperimentih so bile uporabljene folije iz nerjavečega jekla debeline 25 μm . Delovni fluid je bila razplinjena destilirana voda. Za razplinjanje in vzdrževanje pogojev nasičenja (100 $^{\circ}\text{C}$ pri atmosferskem tlaku) delovnega fluida med eksperimentom sta skrbela kartušna grelca v spodnjem delu komore, temperatura fluida pa je bila merjena z dvema termoparoma. Za vzdrževanje konstante količine fluida je bil na vrh komore pritrjen še kondenzator s hladilno zanko. Hitrotekoča videokamera in IR kamera sta zajeli sinhronizirane posnetke vrenja s hitrostjo 2000 Hz. Videokamera je bila aktivirana z zunanjim sprožilcem, preko logičnega vezja pa je signal nato aktiviral še IR kamero. Temperatura delovnega

fluida ter električna grelna moč v foliji sta bili merjeni s sistemom zajema podatkov, ki smo ga aktivirali ročno.

2.2 PRIPRAVA VZORCEV

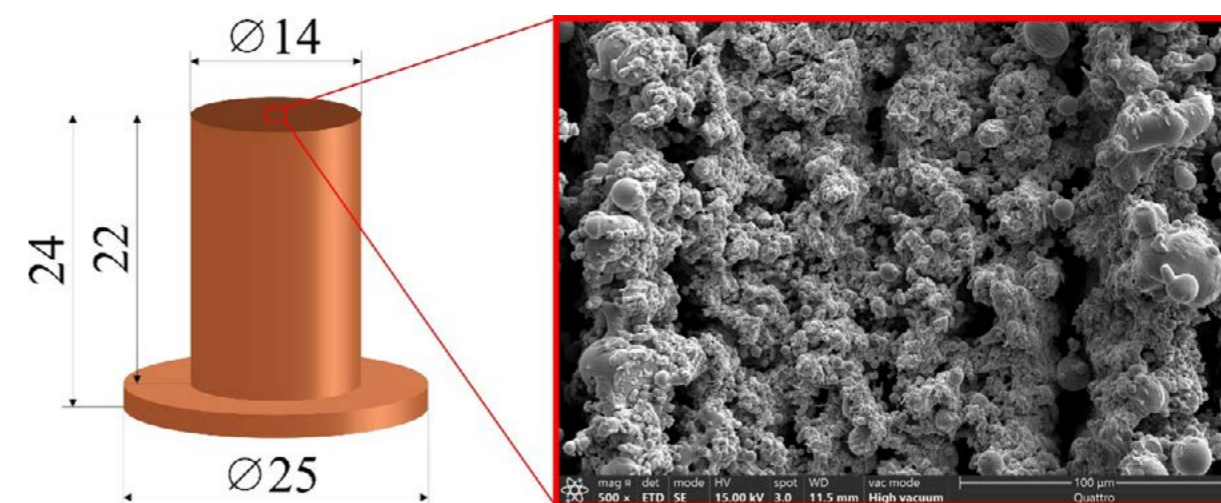
Uporabljeni vzorci so bili bakreni valjčki premera 14 mm s prirobnico za vpenjanje. Na površini zgornjih in spodnjih vzorcev so bili z laserskim strukturiranjem ustvarjeni mikrokanali z razmakom 80 μm , kar je povzročilo superhidrofilnost površin. Uporabljen je bil nanosekundni pulzni vlakenski laser (JPT Optoelectronics Co., Ltd. "M7 30 W") z obdelovalnimi parametri, prikazanimi v preglednici 1.

Drugi del obdelave je zajemal hidrofobizacijo lasersko strukturiranih površin oz znižanje površinske energije površin. Uporabili smo 3 različna sredstva za znižanje površinske energije: polidimetilsiloksan (PDMS),

in raztopino skupaj z lasersko strukturiranimi vzorci v zaprtih komorah postavili v peč pri 90 $^{\circ}\text{C}$ za 90 minut. V tem času je raztopina izhlapela, hlapi pa so se odložili na površinah vzorcev in na njih ustvarili superhidrofoben sloj. Rezultati analize kotov omočenja θ in kotov zdrsa θ_{zdrs} posameznih sredstev hidrofobizacije so prikazani v preglednici 2. Pri meritvah smo uporabili kapljice volumna 5 μL .

Preglednica 2: Rezultati analize kotov omočenja in kotov zdrsa

Nanos	θ ($^{\circ}$)	θ_{zdrs} ($^{\circ}$)
FDPA	163	< 5
HTMS	165	< 5
PDMS	157	< 5



Slika 2: Shematski prikaz vzorca in slika lasersko strukturirane površine posnete z vrstičnim elektronskim mikroskopom

Preglednica 1: Obdelovalni parametri laserskega strukturiranja površin

Hitrost gibanja laserskega snopa (mm s $^{-1}$)	110
Frekvenca pulzov (kHz)	110
Dolžina pulza pri polovici dosežene vršne moči (ns)	45
Povprečna moč (W)	30

1H, 1H, 2H, 2H-perfluoro-n-decil fosfonsko kislino (FDPA) in (heptadekafluoro-1,1,2,2-tetragidrodecil) trimetoksialne (HTMS). FDPA je bil na površino nanešen kot 3 mM raztopina v 2-propanolu. Površina se je po nanosu s kapalko 10 min sušila na zraku, nato pa še 10 minut v pečici pri 80 $^{\circ}\text{C}$. PDMS in HTMS sta bila nanešena s kemičnim napanjem. Količino 0,05 mL vsakega izmed sredstev smo raztopili v 0,95 mL toluena

2.3 DOLOČITEV LAPLACEOVEGA TLAKA V KAPLJICI

Laplaceov tlak v kapljici predstavlja tlačno razliko, ki nastopi zaradi ukrivljenosti medfazne površine med dvema tekočinama. Zaradi vpliva gravitacije oz. posledično vpliva hidrostatičnega tlaka pa se Laplaceov tlak in ukrivljenost medfazne površine z višino spreminjata. Celoten Laplaceov tlak kapljice je torej odvisen od višine opazovane točke in je enak vsoti Laplaceovega tlaka v najvišji točki medfazne površine (vrh kapljice) ter hidrostatičnega tlaka. Velikost tlaka popisuje Young-Laplaceova enačba

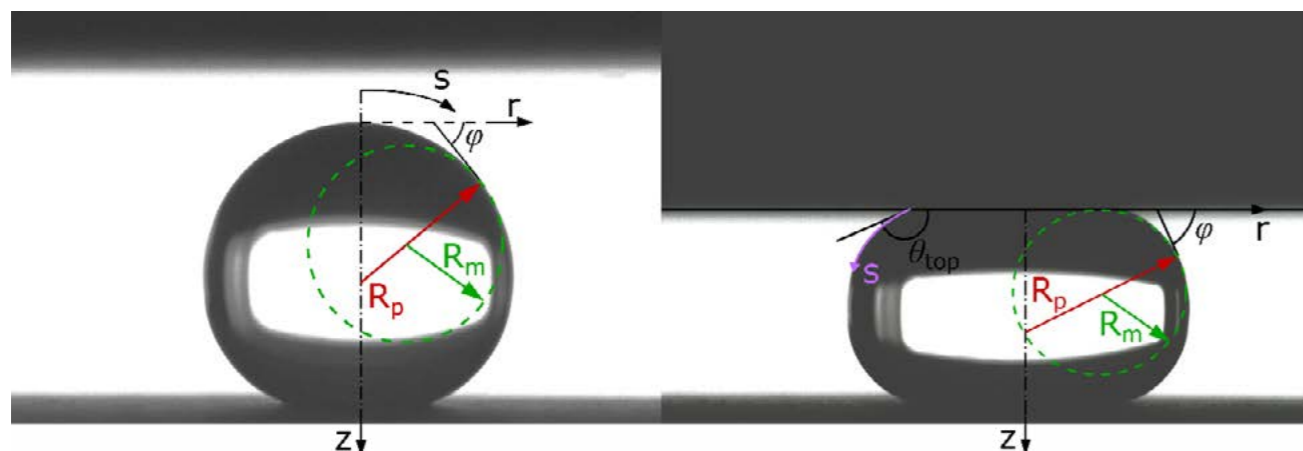
$$\Delta p(z) = \Delta p(z=0) + \rho g z = \sigma \left(\frac{1}{R_m(z)} + \frac{1}{R_p(z)} \right), \quad (1)$$

kjer R_m predstavlja radij krožnice, ki se v opazovani točki najbolj prilega krivulji kapljice, R_p pa je razdalja med opazovano točko in središčno osjo kapljice, pri čemer je ta razdalja pravokotna na krožnico v opazovani točki. Parametrizacija radijev z dolžino loka s (oz. profila medfazne površine) in kotom φ med tangento na medfazno površino v opazovani točki in radialno osjo r omogoči, da enačbo zapišemo v diferencialni obliki (enačba 2). Geometrijske relacije z upoštevanjem parametrov s in φ omogočijo zapis dveh dodatnih enačb (enačbi 3 in 4). S tem smo dobili sistem diferencialnih enačb prvega reda, ki smo ga rešili numerično v okolju MATLAB.

$$\Delta p(z=0) + \rho g z = \sigma \left(\frac{d\varphi}{ds} + \frac{\sin\varphi}{r(z)} \right), \quad (2)$$

$$dr = ds \cos\varphi \quad (3)$$

$$dz = ds \sin\varphi \quad (4)$$



Slika 53 Shematski prikaz določitve Laplaceovega tlaka v kapljici stisnjeni med dvema površinama

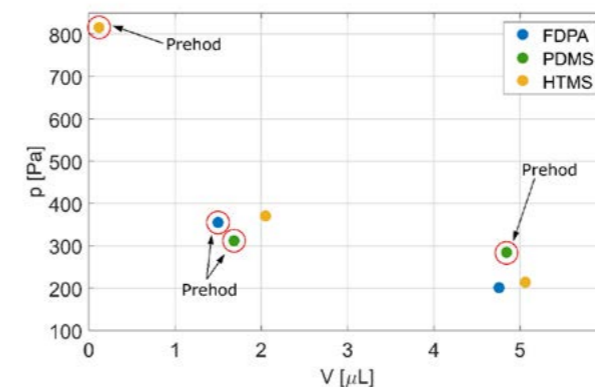
3 Rezultati in diskusija

Avtomatsko pipeto za doziranje kapljic smo nastavili na 5, 2 in 1 μL za doseg različnih velikosti kapljic pri različnih površinah. Analiza pridobljenih posnetkov kapljic je pokazala odstopanje dejanskih velikosti kapljic od

nastavitve pipete, z največjim 25% odstopanjem pri nastavitvi volumna na 2 μL (dejanski volumen je bil 1,5 μL). Vsa odstopanja so prikazana v preglednici 3.

Slika 4 prikazuje vrednosti Laplaceovega tlaka kapljice, pri katerem je prišlo do prehoda med režimoma omočenja, v odvisnosti od velikosti kapljice. Na površinah, hidrofobiziranih s PDMS, je prehod nastopil že pri največji velikosti kapljice (4,8 μL), pri doseženem tlaku 283 Pa. Pri preostalih površinah je bil pri podobni velikosti kapljice (4,8 μL za površino FDPA in 5,1 μL za površino HTMS) dosežen tlak 199 Pa (FDPA) in 213 Pa (HTMS), do prehoda pa v obeh primerih ni prišlo. Pri površini FDPA se je kapljica po razbremenitvi vrnila v začetno stanje, pri površini HTMS pa je kapljico med procesom stiskanja zaradi slabe adhezije na površino odneslo iz vzorcev. V primeru površine PDMS je bilo mogoče opaziti močno adhezijo kapljice na zgornjo površino v fazi razbremenitve, kot je vidno na sliki 5a. Pri manjši velikosti kapljice smo prehod dosegli tudi pri

1 μL in pri tem dosegla tudi izrazito adhezijo na zgornjo površino, ki je privedla do razcepa kapljice na 2 dela, kar prikazuje slika 5b. Podobno kot prej, je pri površini HTMS kapljico odneslo iz površin oz. do prehoda in adhezije na površino ni prišlo. Na tej površini smo preizkusili še kapljico volumna 1 μL , vendar tudi pri tej velikosti ni prišlo do prehoda med režimoma in je kapljico odneslo iz površin.



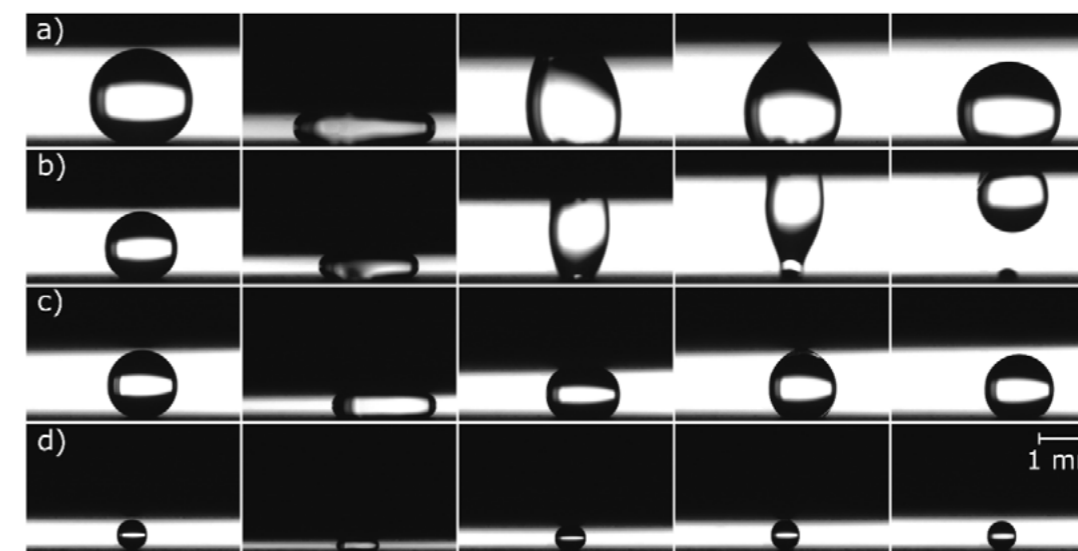
Slika 4: Laplaceov tlak kapljice v odvisnosti od velikosti kapljice pri različnih površinah

Z namenom dosega Laplaceovega tlaka prehoda med režimoma tudi na površini HTMS, smo želeli preizkusiti še manjšo kapljico in dosegli volumen 0,1 μL . Ta velikost je omogočila doseg Laplaceovega tlaka 816 Pa, ki je zadostoval, da je tudi na tej površini prišlo do prehoda režimov. Sekvence procesa so prikazane na sliki 5d.

Preglednica 4: Meritve kota omočenja pred in po razbremenitvi kapljice

Nanos in velikost kapljice	$\theta_{\text{začetni}} (^{\circ})$	$\theta_{\text{končni}} (^{\circ})$
FDPA - 2 μL	159	135
HTMS - 0,1 μL	156	139
PDMS - 5/2 μL	157/145	112 / []

Preglednica 4 prikazuje še kote omočenja na posameznih površinah pred in po nastopu prehoda med režimoma. Vse površine imajo pri velikosti kapljice, pri kateri je nastopil prehod, podoben kot omočenja. Glavna razlika je vidna v kotu omočenja po prehodu. Na površinah FDPA in HTMS smo izmerili končni kot omočenja 135° oz. 139°, hkrati pa se je izrazito povečal kot zdrsa, oz. v obeh primerih do zdrsa ni prišlo, saj se je kapljica popolnoma pripela na površini. Do večje razlike v primerjavi z začetnim stanjem je prišlo na površini PDMS. Kot omočenja po prehodu pri 5 μL kapljici je znašal 112°, do zdrsa pa prav tako ni prišlo. V primeru 2 μL kapljice pa je, kot že omenjeno, prišlo do močne adhezije na zgornjo površino in posledične razcepitve kapljice. V primeru, ko do prehoda ni prišlo, je na površini FDPA kapljica obdržala začetno obliko s kotom omočenja 162° in kotom zdrsa $< 5^{\circ}$. Na površini HTMS v primerih brez prehoda kota omočenja ni bilo mogoče izmeriti saj je kapljico v vseh takšnih primerih odneslo izmed površin, na površini PDMS pa je do prehoda prišlo pri vseh testiranih velikostih.



Slika 5: Proces stiskanja in razbremenitve kapljice v primerih prehoda med režimi pri a) površini PDMS z 5 μL kapljico, b) površini PDMS z 1,7 μL kapljico, c) površini FDPA z 1,5 μL kapljico in d) površini HTMS z 0,1 μL kapljico

Preglednica 3: Preglednica 3: Odstopanja dejanskih velikosti kapljic od nastavljenih vrednosti

Nastavitev pipete (μL)	$V_{\text{FDPA}} (\mu\text{L})$	$V_{\text{PDMS}} (\mu\text{L})$	$V_{\text{HTMS}} (\mu\text{L})$	$\Delta V_{\text{FDPA}} (\%)$	$\Delta V_{\text{PDMS}} (\%)$	$\Delta V_{\text{HTMS}} (\%)$
5	4,76	4,84	5,06	4,8	3,2	1,2
2	1,50	1,68	2,05	25	16	2,5
1	/	/	0,87	/	/	13
0,1	/	/	0,12	/	/	20

površini FDPA. V tem primeru smo dosegli Laplaceov tlak 355 Pa pri velikosti kapljice 1,5 μL . Opazna je adhezija kapljice na zgornjo površino (slika 5c), vendar je manj izrazita kot pri površini PDMS. Le-ta je tudi v tem primeru dosegla prehod pri tlaku 313 Pa in velikosti 1,7

Iz preglednice 2 je razvidno, da je kot omočenja na površini PDMS manjši kot pri površinah HTMS in FDPA. Večja omočljivost te površine je možna razlaga za doseg prehoda med režimi pri večjih volumnih kapljic in manjših Laplaceovih tlakih kapljic ter za močno adhezijo kapljice na površini in njeno posledično razcepitev. Med površinama HTMS in FDPA, glede na meritve kotov omočenja in zdrsa, ni bistvene razlike v njuni omočljivosti. Primerljiva je tudi vrednost kotov omočenja po prehodu med režimoma omočljivosti (preglednica 4). Kljub temu se izkaže, da so SHFO površine izdelane z HTMS bistveno bolj odporne na povišan Laplaceov tlak v kapljici in posledično bolj robustne.

4. Zaključki

V delu smo z optično metodo določili tlake, pri katerih na superhidrofobnih površinah nastopi prehod iz Cassie-Baxterjevega v Wenzelov režim omočenja. Superhidrofobnost smo dosegli s pomočjo laserske obdelave ter naknadnega nanosa treh različnih sredstev hidrofobizacije: FDPA, HTMS in PDMS. Površine smo karakterizirali glede na njihovo omočljivost z meritvami kotov omočenja in kotov zdrsa. Kapljice različnih velikost (5/2/1 μL) smo nato stisnili med dve enaki površini in jih razbremenili, med tem pa zajeli slike procesa stiskanja in razbremenjevanja. Z optično metodo smo zajete slike analizirali in določili tlake, dosežene pri procesu.

Površine so prehod med režimoma dosegle pri različnih velikostih kapljic in različnih Laplaceovih tlakih v kapljicah. Površina PDMS je prehod dosegla pri največji velikosti kapljice 5 μL in tlaku 283 Pa. Na površini FDPA je prehod nastopil pri velikosti 1,5 μL in tlaku 355 Pa. Površina HTMS pri željenih velikostih kapljice prehoda ni dosegla, saj je kapljico v vseh primerih zaradi slabe adhezije odneslo iz površine. Dodatna meritev z velikostjo kapljice 0,1 μL je privedla do prehoda tudi na HTMS površini, pri tlaku 816 Pa. Predpostavljamo, da je na površini z nanosom PDMS razlog za prehod med režimoma pri nizkem tlaku njena večja omočljivost v primerjavi s površinama z nanosi HTMS in FDPA. Ta razlaga ne velja za razliko v doseženem Laplaceovem tlaku, potrebnem za prehod med režimoma, na primerljivo omočljivih površinah HTMS in FDPA. Kljub temu pa izkazujejo površine HTMS večjo odpornost na povišan Laplaceov tlak in s tem večjo robustnost.

Seznam literature

- [1] T. Young: III. *An essay on the cohesion of fluids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95 (1805) str. 65–87.
- [2] R.N. Wenzel: *Resistance of solid surfaces to wetting by water*. Industrial and Engineering Chemistry 28 (1936) str. 988–994.
- [3] A.B.D. Cassie, S. Baxter: *Wettability of porous surfaces*. Transactions of the Faraday Society 40y (1944) str. 546–551.
- [4] M. Može, M. Zupančič, I. Golobič: *Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer*. International Journal of Heat and Mass Transfer 161 (2020).
- [5] M. Zupančič, M. Steinbücher, P. Gregorčič, I. Golobič: *Enhanced pool-boiling heat transfer on laser-made hydrophobic/superhydrophilic polydimethylsiloxane-silica patterned surfaces*. Applied Thermal Engineering 91 (2015) str. 288–297.
- [6] M. Zupančič, M. Može, P. Gregorčič, I. Golobič: *Nanosecond laser texturing of uniformly and non-uniformly wettable micro structured metal surfaces for enhanced boiling heat transfer*. Applied Surface Science 399 (2017) str. 480–490.
- [7] N. Miljkovic, R. Enright, E.N. Wang: *Effect of droplet morphology on growth dynamics and heat transfer during condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces*. ACS Nano 6 (2012) str. 1776–1785.
- [8] N. Miljkovic, R. Xiao, D.J. Preston, R. Enright, I. McKay, E.N. Wang: *Condensation on hydrophilic, hydrophobic, nanostructured superhydrophobic and oil-infused surfaces*. Journal of Heat Transfer 135 (2013) str. 1.
- [9] L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko: *Anti-icing potential of superhydrophobic coatings*. Mendeleev Communications 23 (2013) str. 3–10.
- [10] Y. Xiu, Y. Liu, D.W. Hess, C.P. Wong: *Mechanically robust superhydrophobicity on hierarchically structured Si surfaces*. Nanotechnology 21 (2010).
- [11] Z. Wang, Q. Li, Z. She, F. Chen, L. Li, X. Zhang, P. Zhang: *Facile and fast fabrication of superhydrophobic surface on magnesium alloy*. Applied Surface Science 271 (2013) str. 182–192.
- [12] D. Byun, J. Kim, H.S. Ko, H.C. Park: *Direct measurement of slip flows in superhydrophobic microchannels with transverse grooves*. Physics of Fluids 20 (2008) str. 0–9.
- [13] J. Zhang, H. Tian, Z. Yao, P. Hao, N. Jiang: *Evolutions of hairpin vortexes over a superhydrophobic surface in turbulent boundary layer flow*. Physics of Fluids 28 (2016).
- [14] W. Shi, M.J. Anderson, J.B. Tulkoff, B.S. Kennedy, J.B. Boreyko: *Fog Harvesting with Harps*. ACS Applied Materials and Interfaces 10 (2018) str. 11979–11986.
- [15] A. Lafuma, D. Quéré: *Superhydrophobic states*. Nature Materials 2 (2003) str. 457–460.
- [16] Y. Kwon, N. Patankar, J. Choi, J. Lee: *Design of surface hierarchy for extreme hydrophobicity*. Langmuir 25 (2009) str. 6129–6136.
- [17] X. Yao, Q. Chen, L. Xu, Q. Li, Y. Song, X. Gao, D. Quéré, L. Jiang: *Bioinspired ribbed nanoneedles with robust superhydrophobicity*. Advanced Functional Materials 20 (2010) str. 656–662.
- [18] Y. Li, D. Quéré, C. Lv, Q. Zheng: *Monostable superrepellent materials*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 114 (2017) str. 3387–3392.
- [19] W. Fang, H.Y. Guo, B. Li, Q. Li, X.Q. Feng: *Revisiting the Critical Condition for the Cassie-Wenzel Transition on Micropillar-Structured Surfaces*. Langmuir 34 (2018) str. 3838–3844.
- [20] D. Garcia-Gonzalez, T.P. Corrales, M. Dacunzi, M. Kappel: *Squeezing Drops: Force Measurements of the Cassie-to-Wenzel Transition*. Langmuir 38 (2022) str. 14666–14672.

ANALIZA PROCESA KATALITIČNE METANACIJE S POMOČJO HITROTEKOČE INFRARDEČE KAMERE

Jasmina Tabaković¹, Leon Gorše¹, Matevž Zupančič¹, Henrik Gjerkeš², Iztok Golobič^{1*}

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

² Poslovno-tehniška fakulteta, Univerza v Novi Gorici, Vipavska 13, 5000 Nova gorica

*Korespondenčni avtor: **Iztok Golobič**

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenija

Tel.: +386 1 4771 420

E-mail: iztok.golobic@fs.uni-lj.si

Kratki znanstveni prispevek / Short scientific paper

POVZETEK

Katalitična metanacija je kemična reakcija, kjer se iz vodika in ogljikovega dioksida (ali monoksida) proizvede metan oz. sintetični zemeljski plin. Proces predstavlja eno izmed obetavnih rešitev dolgoročnega shranjevanja obnovljivih virov energije in zmanjševanja CO₂ emisij, njegovo implementacijo v obstoječe energetske sisteme pa še vedno preprečuje nizka učinkovitost. V tem prispevku smo obravnavali delovanje štirih različnih katalizatorjev (nikljevi mikrodelci, nikljev(II) oksid, nikljev(III) oksid na podpori iz alumine ter CuZnGa mikrodelci) v odvisnosti od procesnih temperatur reaktorja in molskih razmerij reakcijskih plinov. Na podlagi meritev z infrardečo kamero in plinskim kromatografom je bilo ugotovljeno, da se s povečevanjem deleža metana v plinski mešanici produktov povečujejo tudi temperaturni gradienti v metanacijski celici. Poleg tega smo ugotovili, da so optimalne temperature za najboljšo aktivnost

katalizatorja nikljevega(II) oksida v območju od 300 °C do 350 °C in so nekoliko nižje od tistih pri konkurenčnih katalizatorjih, ki pa segajo preko 370 °C. V splošnem sta se pri vseh obratovalnih pogojih reaktorja katalizatorja iz CuZnGa in nikljevih mikrodelcev izkazala za relativno neaktivna. Rezultati kažejo, da je uporaba IR termografije primerna za ne-invazivno vrednotenje temperaturne porazdelitve in s tem za posredno ugotavljanje učinkovitosti procesa metanacije. Uporaba le-te za razvoj katalitičnih reaktorjev in raziskovanju katalitičnih materialov, bi tako lahko pospešila same postopke in s pridobljenimi podatki tudi omogočila primerjavo z numeričnimi napovedmi.

Ključne besede: katalitična metanacija; vodik; ogljikov dioksid; nikljev katalizator; CuZnGa katalizator; IR termografija.

ABSTRACT

Catalytic methanation is a chemical reaction where methane, also known as synthetic natural gas, is produced from hydrogen and carbon dioxide (or monoxide). This process represents one of the most promising solutions for long-term energy storage and CO₂ emission reduction, but its implementation in existing energy systems is still affected by low efficiency. In this article, we have examined the performance of four different catalysts (nickel nanoparticles, nickel(II) oxide, nickel(III) oxide on alumina support, and CuZnGa nanoparticles) depending on the process temperatures of the reactor and the molar ratios of the reaction gases. Based on measurements with an infrared camera and a gas chromatograph, it was found that as the methane content in the gas mixture increases, temperature gradients in the methanation cell also increase. Furthermore, we have found that the optimal temperatures for the best activity of the nickel(II) oxide catalyst are in the range of 300°C to 350°C, which are slightly lower than those for competing

catalysts, which extend beyond 370°C. Generally, under all operating conditions of the reactor, the CuZnGa and nickel nanoparticles catalysts have proven to be relatively inactive. The results indicate that the use of IR thermography is suitable for non-invasive assessment of the temperature distribution and, thus, indirectly evaluating the efficiency of the methanation process. Its application in the development of catalytic reactors and the exploration of catalytic materials could accelerate the processes themselves and enable comparisons with numerical predictions based on the acquired data.

Key words: catalytic methanation; hydrogen; carbon dioxide; nickel catalyst; CuZnGa catalyst; IR thermography.

1 Uvod

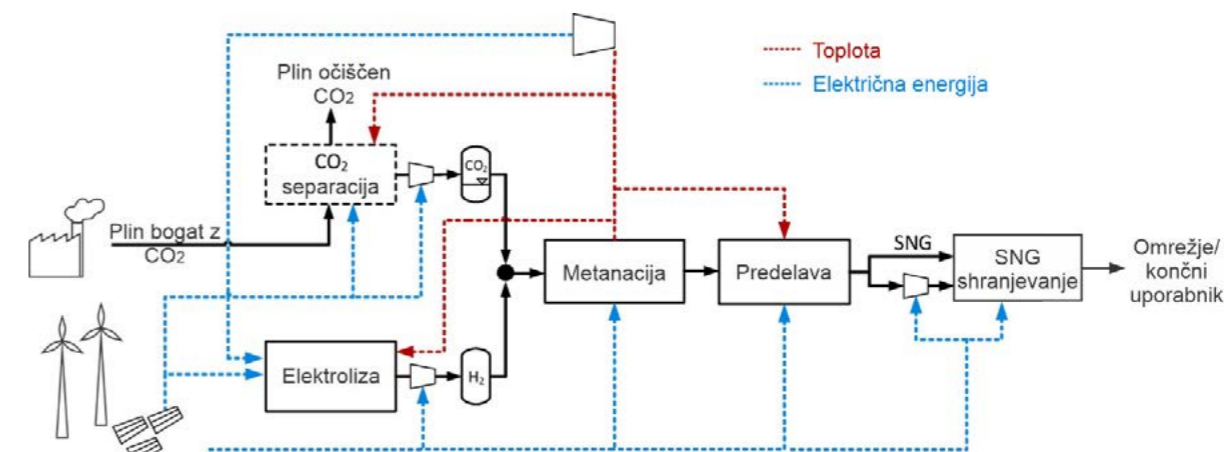
Podnebne spremembe so eden izmed osrednjih izzivov današnjega časa. Naravne nesreče so postale del vsakdana, ki ne le povzročajo veliko materialno škodo, temveč terjajo številna človeška življenja in umiranje nekaterih naravnih habitatov. Vse večji problem postaja tudi oskrba s pitno vodo in pridelava hrane. Našteto je posledica segrevanja Zemljine atmosfere zaradi prevelikih količin toplogrednih plinov, ki absorbirajo del infrardečega sevanja in tako preprečijo oddajanje toplote v vesolje. Od leta 1880 do danes se je ozračje segrelo že za približno 1.01°C in pričakovati je, da bo trend še naraščal [1].

Za reševanje podnebne krize je med drugim potrebna tranzicija pridobivanja električne energije iz fosilnih goriv na obnovljive vire energije. Obnovljivi viri energije (OVE) lokalno zmanjšujejo odvisnost od uvoženih virov energije in povečujejo energetske varnost, poleg tega pa v primerjavi s fosilnimi gorivi pri rabi energije iz OVE nastajajo manjše emisije toplogrednih plinov. Med drugim imajo tudi potencial zmanjšati stroške energije

v dolgoročnem obdobju, saj so viri proizvodnje energije, kot sta sonce in veter, brezplačni v nasprotju z nafto in zemeljskim plinom [2,3]. Največji problem rabe obnovljivih virov energije predstavlja njihova variabilna narava. Sončne celice lahko izkoriščamo le podnevi, pa tudi takrat je izkoristek zelo odvisen od oblačnosti in lege, hidroelektrarne ponoči proizvajajo viške, vetrne elektrarne lahko doživijo dolga obdobja brezvetrja.

V ta namen se trenutno razvijajo tehnologije dolgoročnega shranjevanja energije, kot na primer baterije, vodikove gorivne celice in pretvorba energije v plin (ang. Power-to-Gas - PtG). Koncept PtG trenutno predstavlja najobetavnejšo rešitev, ki medsebojno povezuje energetske in plinske omrežje in tako omogoča fleksibilnost energetske oskrbe. Princip delovanja temelji na uporabi viškov električne energije za proizvodnjo vodika z elektrolizo vode. Ker je vodik za povprečne uporabnike težaven za neposredno uporabo (eksplozivnost, visoka temperatura plamena) in zahteven za transport ter shrambo (nizka gostota, povzročanje vodikove krhkosti), se intenzivno razvijajo tudi tehnologije pretvorbe vodika v metan preko katalitične ali biološke metanacije.

Biološka metanacija je proces, kjer metanogeni mikroorganizmi, ki delujejo kot bio-katalizatorji procesa, v anaerobnem okolju pretvorijo organski material v bioplino [4,5]. V procesu katalitične metanacije pa vodik in ogljikov dioksid (v nekaterih primerih lahko tudi ogljikov monoksid) hidrogenirata v metan ob prisotnosti kemičnega katalizatorja. Pridobljeni metan, poznan tudi kot sintetični zemeljski plin (ang. synthetic natural gas - SNG), je po odstranitvi vodne pare in preostalega vodika pripravljen za injiciranje v plinsko omrežje in končno uporabo, kot je prikazano na sliki 1. Tehnologija tako iz vidika potrebnih modifikacij



Slika 1: Proces pretvorbe električne energije v sintetični metan [6].

plinskega omrežja ne zahteva visokih investicijskih stroškov, saj lahko uporablja že obstoječo infrastrukturo shranjevanja, distribucije in uporabe SNG. Poleg tega predstavlja tak plin ogljično nevtralen vir energije, če se v procesu uporablja ogljikov dioksid iz obnovljivih virov (zajem iz zraka, iz biomase ali iz procesov anaerobne razgradnje organskih snovi).

1.1 KATALITIČNA METANACIJA

Katalitična metanacija je proces, pri katerem poteče reakcija med vodikom in ogljikovim monoksidom ali dioksidom ob prisotnosti kemičnega katalizatorja, nastala produkta pa sta metan in vodna para. Proces je poznan že od leta 1902, ko sta kemika Sabatier in Senderens odkrila sposobnost niklja, da katalizira reakcijo sinteze metana. Odkritju so sledile številne raziskave, katere so do danes pokazale, da lahko za katalizatorje uporabimo tudi druge kovine, predvsem iz 8.-10. skupine periodnega sistema elementov [7]. Katalitični reaktor tipično operira pri temperaturah med 200 °C in 550 °C in tlakih med 1 in 100 bar [8].

Katalitična metanacija se glede na deležne reakcijske elemente deli na CO in CO₂ metanacijo. CO metanacija je proces hidrogenacije ogljikovega monoksida v metan in vodno paro pri enačbi (1) [9], med tem ko se pri CO₂ metanaciji, imenovani tudi Sabatier-ova reakcija, hidrogenira ogljikov dioksid, prikazano v enačbi (2). Čeprav so bile raziskave CO₂ metanacije sprva le stransko delo raziskav CO metanacije, je ta dandanes v središču raziskav pridobivanja metana [10].



Oba procesa sta eksotermna; pri stehiometrični metanaciji ogljikovega monoksida se sprosti 206 kJ/mol toplote (enačba 1), pri konverziji ogljikovega dioksida pa 164 kJ/mol toplote (enačba 2). Torej za sintezo 1 m³ metana na uro se v prvem primeru sprosti 2.3 kW toplote, v drugem pa 1.8 kW. Poleg tega je ena izmed značilnih karakteristik metanacijskega procesa občutno zmanjšanje volumna reakcijskih plinov. Kontrakcija volumna je občutnejša pri CO metanaciji, in sicer znaša 50 %, medtem ko pri CO₂ metanaciji ta znaša 40 % [11].

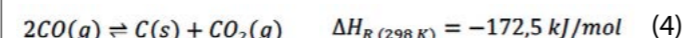
Ovisno od razmer v reaktorju in izbire katalizatorja lahko CO in CO₂ hidrogenacijo spremljata reakciji povratne vodne plinske konverzije (ang. Reverse Water

Gas Shift – RWGS) (enačba 3) in Boundardova reakcija prikazana v enačbi (4).



CO je načeloma nezaželen produkt reakcije, saj če njegova koncentracija preseže določen prag, je konverzija CO₂ zavirana. Po drugi strani pa obstaja pozitivna možnost, da je tudi ta hidrogeniran v metan, kot lahko sklepamo po enačbi (1) [12–14].

Boundardova reakcija pride do izraza, ko je razmerje H₂/CO relativno nizko. Nastali karbidi (C(s)) so lahko po eni strani potreben vmesni produkt procesa, po drugi strani pa lahko deaktivirajo katalizator, če ogljikovi atomi niso dovolj hitro hidrogenirani in tako tvorijo polimerne ali grafitne ogljikove obloge [15].



1.2 UČINKOVITOST METANACIJE TER MOŽNOSTI POVEČANJA EFEKTIVNOSTI

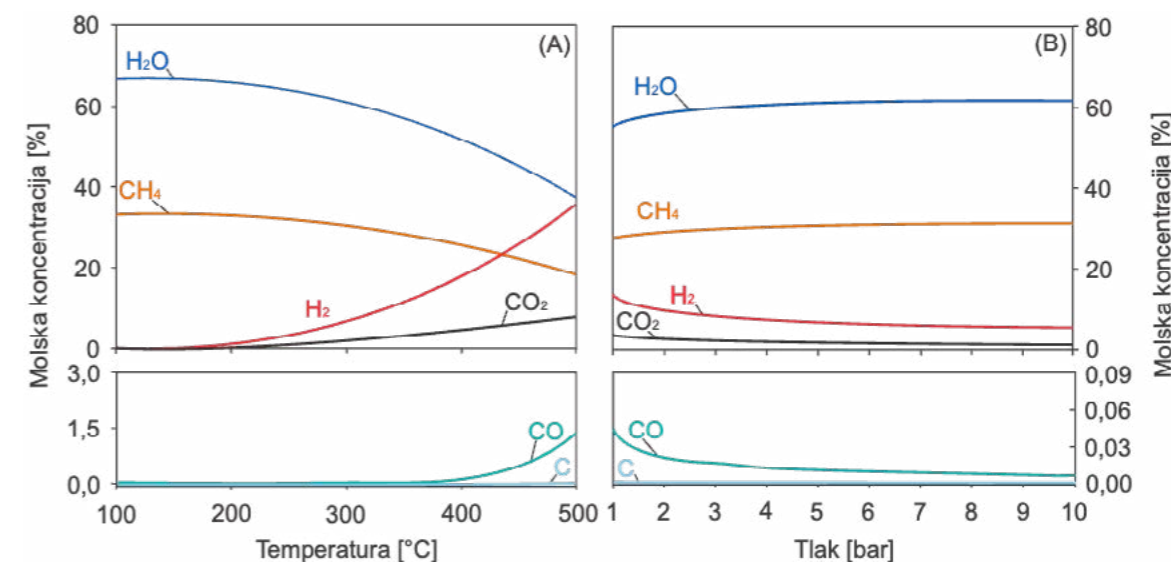
V teoriji je moč najti nekaj analiz, ki so posvečene raziskovanju in razumevanju vpliva sestave reaktantov oz. natančneje vpliva razmerja reaktantov - razmerje H₂/CO₂ na CO₂ metanacijo. Uspešnost pretvorbe v metan se spreminja z različnimi razmerji H₂/CO₂ [16,17]. Ko se razmerje iz 1 poveča na 4 pri enaki temperaturi in enakem tlaku, se delež oz. donos CH₄ poveča, saj je ta pogoj selektiven za reakcijo in ima nanjo močan vpliv. Posledično je najbolj uporabljeno razmerje, ki se uporablja v praksi, stehiometrično razmerje H₂:CO₂=4. Še dodatno omenimo, da se formacija koks izredno zmanjša pri razmerju 4:1 zaradi značilnosti reakcije (3). Nekateri trdijo, da je to posledica dejstva formacije vode pri procesu metanacije, ki nato zatre odlaganje ogljika [18].

Bistven vpliv na potek procesa metanacije imata temperatura in tlak v reaktorju. Slika 2 prikazuje termodinamsko ravnovesje plinov v CO₂ metanaciji z razmerjem reaktantov H₂/CO₂=4.

Leva polovica slike prikazuje vpliv temperature v območju 100 °C do 500 °C na molsko koncentracijo sodelujočih plinov pri tlaku 1 bar. Da je ravnotežje na strani produktov oz. so molske koncentracije CH₄ relativno visoke, je smotrno izvajati metanacijo v območju do 400 °C.

Desna polovica slike prikazuje vpliv tlaka v območju 1 do 10 bar na molsko koncentracijo plinov pri procesni

temperaturi 360 °C. Dognati je, da višanje tlaka rezultira v večanju deleža proizvedenega CH₄. Visoki tlaki tako povečajo konverzijo CO₂ hkrati s selektivnostjo CH₄ [19].



Slika 2: Vpliv tlaka in temperature na ravnotežne molske koncentracije plinov v procesu metanacije [14].

Proces katalitične metanacije je termodinamično ugoden, saj gre za reakcijo eksotermne narave ($\Delta G_{298K} = -130,8 \text{ kJ/mol}$). Ker popolna redukcija ogljikovega dioksida v metan predstavlja visoko kinetično oviro, se v procesu metanacije uporablja katalizator [20]. Odkar so leta 1902 odkrili sposobnost niklja, da katalizira reakcijo CO metanacije, so raziskave pokazale, da je mnogo kovin, predvsem v VIII.-X. skupini periodnega sistema elementov, sposobno katalizirati to reakcijo. Alex Mills in Fred W. Steffgen sta v svojem delu [21] razvrstila kovine, primerne za katalizacijo metanacije, glede na njihovo aktivnost in selektivnost v padajočem vrstnem redu:

aktivnost: Ru > Fe > Ni > Co > Mo,

selektivnost: Ni > Co > Fe > Ru.

Pomembno vlogo pri katalitični metanaciji imajo tudi nosilci oz. podporni elementi, ki povečujejo selektivnost in aktivnost katalizatorja z disperzijo aktivne kovine oz. povečanjem aktivne površine. Pogosto uporabljene podpore katalizatorjev so kovinski oksidi z veliko površino, kot so alumina (Al₂O₃), silicijev dioksid (SiO₂) in titanijev dioksid (TiO₂) [22]. Najpogosteje uporabljena je alumina.

1.3 INFRARDEČA (IR) TERMOGRAFIJA

Tehnologija infrardeče (IR) termografije se je intenzivno razvijala vse od njene prve aplikacije v 20. stoletju. Danes je IR termografija vsestranska metoda, ki

omogoča brezkontaktno merjenje temperature z visoko prostorsko resolucijo in hitrim zajemanjem podatkov (frekvenca zajemanja preko 600 Hz). To so glavne prednosti IR termografije, zaradi katerih ta predstavlja učinkovitejšo metodo merjenja kot uporaba termočlenov, ki neposredno interferirajo z eksperimentom. Glavna omejitev IR termografije je limitirano prodiranje sevanja v reakcijskih medijih, zaradi česar je njena uporaba omejena na merjenje temperature površine objekta, kar pomeni, da se v primeru merjenja notranje temperature bitja ali pa temperature notranjosti reaktorja, te tehnike ne moremo poslužiti [23].

Princip operiranja bazira na detekciji IR sevanja, ki ga oddaja vsak predmet s temperaturo nad 0 K, to pa je neposredno povezano s temperaturo telesa. Brezkontaktno merjenje temperature je tako uporabno pri raziskovanju katalitičnih reakcij, npr. za simultano spremljanje aktivnosti različnih katalizatorjev [24–31].

Čeprav omenjene študije pričajo o vsestranskosti uporabe IR termografije za raziskovanje procesa metanacije, je ta v trenutni literaturi redka, saj zahteva prilagojeno zasnovo reaktorja.

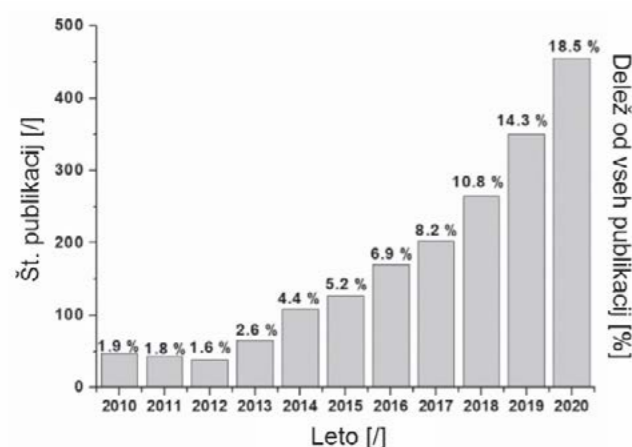
1.4 AKTUALNOST OBRAVNAVANE TEMATIKE

Metan predstavlja večinski delež zemeljskega plina, ki je plinasto fosilno gorivo z najmanjšo emisijo CO₂ pri zgorevanju v primerjavi z ostalimi ogljikovodiki. Je

najpreprostejši ogljikovodik, ki ga je mogoče hitro in enostavno dobiti z naravnimi biološkimi procesi, med katere spada tudi metanacija, s katero smo se ukvarjali v sklopu raziskav. Ob prisotnosti različnih katalizatorjev v celici smo poizkušali pri kemijski reakciji, katere reaktanta sta CO_2 in H_2 , v produktih pridobiti čim več metana, ki bi se nadalje uporabljal za različne aplikacije. Ob tem bi po drugi strani porabljali tudi CO_2 , ki je toplogredni plin, s katerim imamo v sodobnem svetu čedalje občutnejše težave.

Efektivnost in učinkovitost že obstoječih tovarn oz. obratov za pretvorbo energije v plin sloni na procesu CO_2 metanacije, zaradi česar se je raziskovanje na tem področju v zadnjih 15-ih letih izjemno poglobilo. Ugotovitve in dognanja vsebujejo že veliko informacij o katalizatorjih, ki so lahko aktivni, pasivni, selektivni in imajo znaten učinek na proces metanacije oz. na produkte kemijske reakcije [32–34]. Prav zato se je v zadnjih letih nabralo kar nekaj študij in recenzij [35–39], katerih bistvo sloni na procesu metanacije ravno zaradi pomembnosti vključevanja v okoljevarstveno tematiko.

Reakcija kot taka bo v prihodnosti skoraj zagotovo predstavljala ključno tehnologijo v človeških vesoljskih odpravah z zajemom izdihanega CO_2 ter uporabo odvečnega H_2 pri elektrolizi vode [40–42].



Slika 3: Porast zanimanja na temo metanacije glede na povezane objavljene prispevke [43].

Na podlagi pregleda literature lahko zaključimo, da se predlagani pogoji za najoptimalnejši potek reakcije gibljejo v širokem spektru procesnih parametrov ter so dodatno odvisni od pretočnih razmer v samem katalizatorju. Prav tako ni mogoče popolnoma deterministično določiti katalizatorjev, ki bi imeli

največjo učinkovitost pretvorbe reaktantov, točne informacije o elementih uporabljenih v trenutno obratujočih katalizatorjih na večjih proizvodnih nivojih pa je relativno težko dobiti. Ta odprta vprašanja deloma naslavlja v obstoječi raziskavi, kjer smo s pomočjo IR termografije in plinske kromatografije raziskovali učinkovitost procesa metanacije ob uporabi štirih drugačnih katalizatorjev ter pri različnih procesnih temperaturah. Dobljeni rezultati in zasnovana eksperimentalna proga bodo v prihodnje služili kot osnova za nadaljnje raziskave v smeri optimizacije procesnih parametrov in izbire najprimernejšega katalizatorja v procesu metanacije.

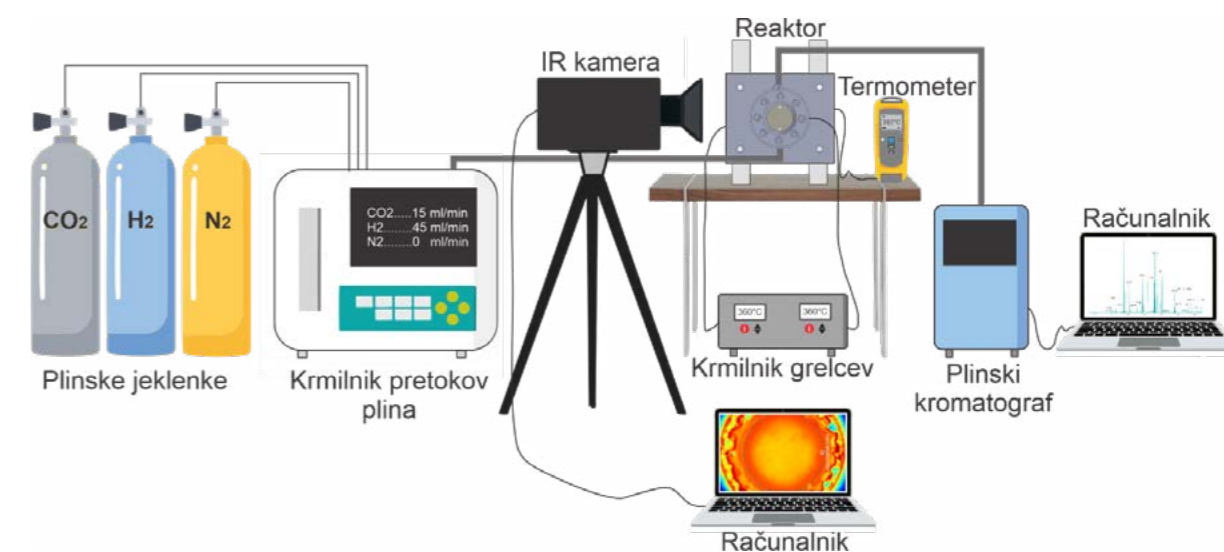
2. Metodologija raziskave

2.1 EKSPERIMENTALNA PROGA

Poskusi so bili izvedeni v katalitskem reaktorju iz nerjavečega jekla z oknom iz cinkovega selenida (ZnSe), ki omogoča ustrezno transmisijo IR svetlobe pri danih eksperimentalnih pogojih. Ogrevanje reaktorja sta zagotavljala cevni grelec, nameščen po obodu reaktorja, in patronski grelec, nameščen v aluminijasti plošči pod reaktorsko celico. Za nastavljanje ogrevanja je bil uporabljen krmilnik Pixsys ATR 243, ki je na podlagi signalov iz termoparov v cevnem grelcu in v celici, grelcem ustrezno dovajal električno moč za doseg nastavljenih temperature.

Za zajem toplotnega sevanja je bila uporabljena hitro tekoča IR kamera FLIR A655sc. Zajeti podatki so bili nato pretvorjeni v temperaturne profile z uporabo kalibracijske krivulje v programu ResearcherIR. Pri kalibraciji je bila upoštevana navidezna emisivnost sistema v vrednosti 0.7. Slednja predstavlja količino IR sevanja, ki ga odda uporabljen NiO katalizator in ga okno ne absorbira.

Dovod plinov v poljubnih razmerjih so omogočali krmilniki pretokov Brooks na nadzorni enoti, izhodni plini pa so bili po odvodni cevi napeljeni do plinskega kromatografa INFICON Micro GC Fusion Gas Analyzer. Slednji je analiziral sestavo dovedenega plina in tako omogočal vpogled v samo uspešnost konverzije v metan. Pred vsakim poskusom se je preverjalo uhajanje plinov z detektorjem vnetljivih plinov Refco Startek-C, za zagotavljanje dodatne varnosti pa je bila celotna eksperimentalna proga postavljena v digestoriju.



Slika 4: Shema eksperimentalne proge.

2.2 POTEK EKSPERIMENTOV

Najprej smo reaktor natančno očistili z izopropanolom, da bi odstranili potencialne delce predhodno uporabljenih katalizatorjev. Nato smo v izvrtine za dovod in odvod plinov vstavili inertno kvarčno volno za preprečevanje izstopa delcev katalizatorja iz reakcijske celice. Napolnili smo reaktorsko celico z izbranim katalizatorjem in postopno pričvrstili steklo na celico. Celico z ogrodjem smo zatem postavili iz vodoravne v navpično lego, da toplota ne bi sevala direktno v IR kamero, kar bi potencialno vplivalo na meritve in poškodovalo kamero.

IR kamero smo postavili na zadostno razdaljo za preprečitev zameglitve leče ter prilagodili kader, da je bila notranost celice približno na sredini. Sledila je nastavitve parametrov zajema v programu ResearcherIR, in sicer frekvenca zajema na 12.5 Hz, resolucija na 640 x 480 ter kalibracija za temperaturno območje 100 – 650 °C.

Po pripravi celice smo začeli dovajati dušik (N_2) s pretokom 60 ml/min za vzpostavitev inertne atmosfere v celici, hkrati smo prižgali oba grelca in nastavili temperaturo 100 °C. Ko se je želena temperatura ustalila, smo to povečali na 400 °C. Zatem ko se je tudi ta stabilizirala, smo odprli dovod vodika (H_2) s pretokom 20 ml/min in začeli z redukcijo katalizatorja, da bi odstranili oksidno plast, ki se je nabrala na katalizatorju. Odstranitev bi lahko zmanjšala vezavo plinov na molekule katalizatorja. Po preteku 30 min je bil katalizator reduciran, reaktor pa pripravljen na izvajanje eksperimentov.

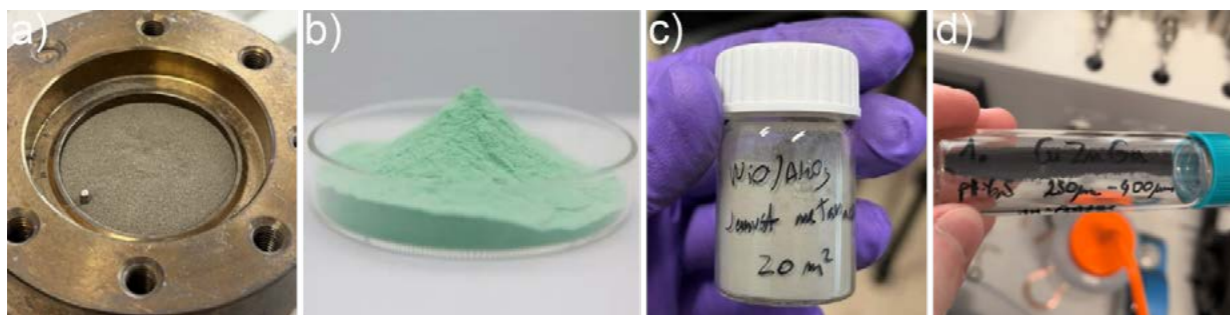
V okviru raziskave smo testirali aktivnost različnih

katalizatorjev, na vsakem smo izvedli dva seta eksperimentov; prvi set je bil namenjen raziskovanju vpliva procesne temperature na uspešnost poteka metanacije. Prvo meritev smo izvajali pri temperaturi 300 °C, nato pa nadaljevali s koraki po 10 °C. Meritve smo izvajali vse do procesne temperature, pri kateri smo izmerili upad v proizvedenem deležu metana. Vse reakcije so potekale ob dovajanju reakcijskih plinov v razmerju $\text{H}_2:\text{CO}_2=3:1$, zajem z IR kamero pa je trajal 90 s od začetka dovajanja. Ko je bilo doseženo stacionarno stanje (približno po 5 min vpihovanja reakcijske mešanice), smo analizirali produktne pline s plinskim kromatografom. Zatem smo celico ponovno preprihovali s pretokom vodika 20 ml/min ter dušika 60 ml/min. Tako smo zagotovili enake začetne razmere za vsako novo meritev. Pri vsaki reakciji smo zabeležili začetno in maksimalno temperaturo termopara v reaktorski celici, da bi lahko kasneje ustrezno kalibrirali izmerjene podatke. Poleg tega smo iz teh podatkov dobili prvi vpogled v uspešnost same reakcije.

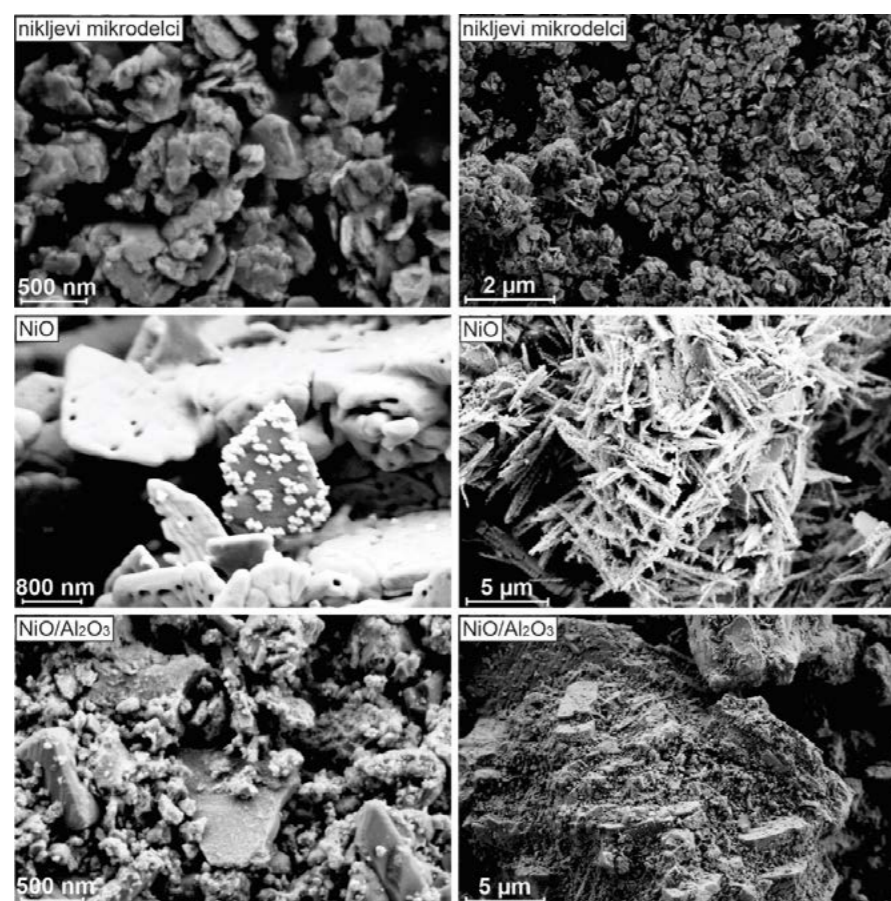
V drugem setu eksperimentov smo raziskovali vpliv dovajanja reaktantov v različnih molskih razmerjih ($\text{H}_2:\text{CO}_2=1:1, 2:1, 3:1$ in 4:1) na delovanje katalizatorja pri konstantni procesni temperaturi. Za procesno temperaturo smo izbrali tisto, ki se je v prejšnjem koraku izkazala za najučinkovitejšo. Zajem podatkov je trajal 120 s od začetka dovajanja ustrezne mešanice plinov. Enako, kot pri prvem setu meritev, smo zabeležili začetno in maksimalno temperaturo termopara ter izvedli analizo produktov plinov v ustaljenem stanju. Ponovno smo celico nekaj časa preprihovali z vodikom in dušikom z namenom vzpostavitve konstantnih reakcijskih pogojev.

KATALIZATORJI

Raziskali smo štiri katalizatorje, od tega tri uvrščamo med nikljeve katalizatorje, enega pa med Cu/ZnO katalizatorje. Slednji so poznani predvsem po dobri aktivnosti med parnim reformingom metanola, med tem ko so nikljevi katalizatorji eni izmed najbolj uporabljenih v komercialnih aplikacijah zaradi njihove relativno visoke aktivnosti, dobre selektivnosti in nizke cene.



Slika 5: Uporabljeni katalizatorji: a) nikljevi mikrodelci, b) NiO, c) NiO/Al₂O₃, d) CuZnGa.



Slika 6: Mikrostruktura vseh nikljevih katalizatorjev je zajeta z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM – ang. Scanning Electron Microscope) v različnih povečavah.

Prvi del eksperimentov smo izvajali s katalizatorjem iz nikljevih mikrodelcev proizvajalca Goodfellow, prikazanem na sliki 5 a). Maksimalna velikost delcev znaša 250 µm, čistoča pa 99.5 %. Poleg niklja se lahko v prahu pojavijo še sledi kobalta, ogljika, železa, žvepla in bakra [44].

Kot naslednjega smo testirali nikljev(II) oksid (NiO) v prašni obliki na sliki 5 b). Gre za droben, sipek prah, brez vonja, zelo močne in vpadljive zelene barve. V praksi predstavlja glavni oksid niklja [45].

V tretjem sklopu eksperimentov smo raziskovali aktivnost NiO katalizatorja na osnovi alumine (NiO/Al₂O₃), katerega prvotna oblika pelet oz. valjev je bila zdrobljena v prah. V prašni obliki je viden na sliki 5 c). Alumina zagotavlja ustrezno poroznost in s tem visoko efektivno površino, nikelj pa deluje kot katalizator. Vsebnost niklja v celotni masi pelet oz. prahu je zgolj nekaj masnih odstotkov. Le-ta se nahaja v obliki 100 nm kristalov v samih porah Al₂O₃.

Testirali smo tudi aktivnost katalizatorja iz CuZnGa mikrodelcev. Gre za prah z velikostjo delcev 250–400 µm, ki je prikazan na sliki 5 d). Cu faza ima predvsem vlogo aktivnih mest za hidrogeniranje CO₂, medtem ko Zn faza nekoliko vpliva na geometrijsko strukturo in elektronske lastnosti Cu faze. Osnovnemu Cu/ZnO je dodan aditiv oz. promotor Ga, ki povečuje aktivnost katalizatorja. Predvsem omogoča manjšo velikost Cu faze, boljšo disperzijo in stabilnost Cu.

3. Rezultati in diskusija

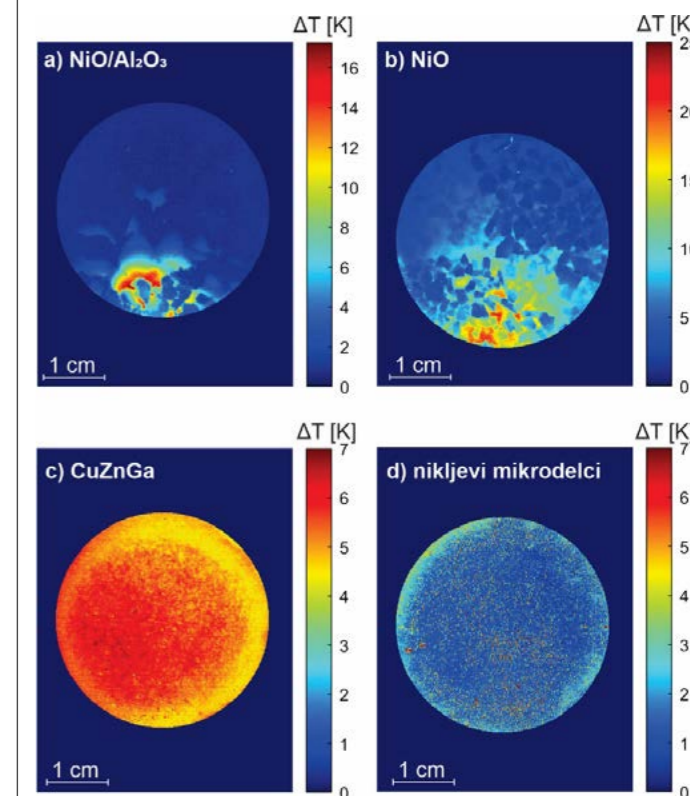
Zajeti podatki iz IR kamere so bili procesirani v programskem okolju MATLAB, ki je optimalno za delo z matrikami. Vsaka meritev, sestavljena iz seta matrik, je bila najprej korigirana s kalibracijsko krivuljo, za uskladitev temperatur zajetih z IR kamero s temperaturami, izmerjenimi s termoparom v reaktorski celici. Najprej so bili analizirani temperaturni gradienti v celici za določitev vročih točk oz. najbolj aktivnega območja v reakcijski celici. Nato so bili na tem območju analizirani temperaturni poteki skozi čas za analizo vpliva dovoda reaktantov v celico na temperaturo v reaktorju. Sledila je analiza uspešnosti pretvorbe reakcijskih plinov v metan na podlagi meritev plinskega kromatografa za določitev optimalnih obratovalnih pogojev reakcijske celice.

3.1 TEMPERATURNI GRADIENTI V NOTRANJOSTI REAKTORJA

Na Slika 7 so prikazani temperaturni gradienti v celici pri temperaturi, kjer je bila konverzija reaktantov v metan najvišja, pri vsakem testiranem katalizatorju. Ker je proces metanacije eksotermne narave, lahko na ta način identificiramo kje je prišlo do največje konverzije CO₂ v metan, kar potrjuje uporabnost IR termografije za preučevanje tega procesa. Izračun je baziran na podlagi razlike med začetnim stanjem v celici in stanjem, ko je dosežena maksimalna temperatura v njenem jedru.

Najprej lahko opazimo, da sta katalizatorja iz CuZnGa (Slika 7 c)) in nikljevih (Slika 7 d)) mikrodelcev relativno malo aktivna. Temperaturni gradienti se gibljejo v okolici 5 K, večinoma nižje. To kaže na neaktivnost samega procesa, posledično so tudi konverzije v metan

dosti nižje. Na Slika 7 a) in b), pa je mogoče opaziti večje temperaturne gradiente na območju dovoda reakcijskih plinov v celico iz česar lahko sklepamo, da je tam potekel večji del kemijske reakcije. Barvna skala potrjuje večjo aktivnost reakcije glede na prej obravnavana katalizatorja, kjer temperaturne razlike v primeru NiO/Al₂O₃ presegajo 15 K, medtem ko so temperaturne razlike v primeru katalizatorja nikljevega oksida tudi višje od 20 K.



Slika 7: Temperaturni gradient ob prisotnosti katalizatorja za a) NiO/Al₂O₃ pri temperaturi 370 °C, b) nikljevega oksida NiO pri temperaturi 300 °C, c) iz CuZnGa mikrodelcev pri temperaturi 450 °C in d) iz nikljevih mikrodelcev pri temperaturi 410 °C.

Temperaturni potek na mestu dovoda reaktantov v celico

Na Slika 8 so prikazani temperaturni poteki skozi čas pri različnih procesnih temperaturah za vsak katalizator na območju dovoda reakcijskih plinov v celico, saj se je to izkazalo za najbolj aktivno v poglavju 3.1.

Pri katalizatorjema na Slika 8 a) in b), ki spadata med bolj aktivne v tej raziskavi, je viden porast temperature ob trenutku dovoda reakcijskih plinov v celico, kar je približno ob času 30 s po začetku merjenja. Aktivnost katalizatorja NiO/Al₂O₃ (Slika 8a)) začne močno naraščati, ko je presežena temperatura okoli 370 °C.

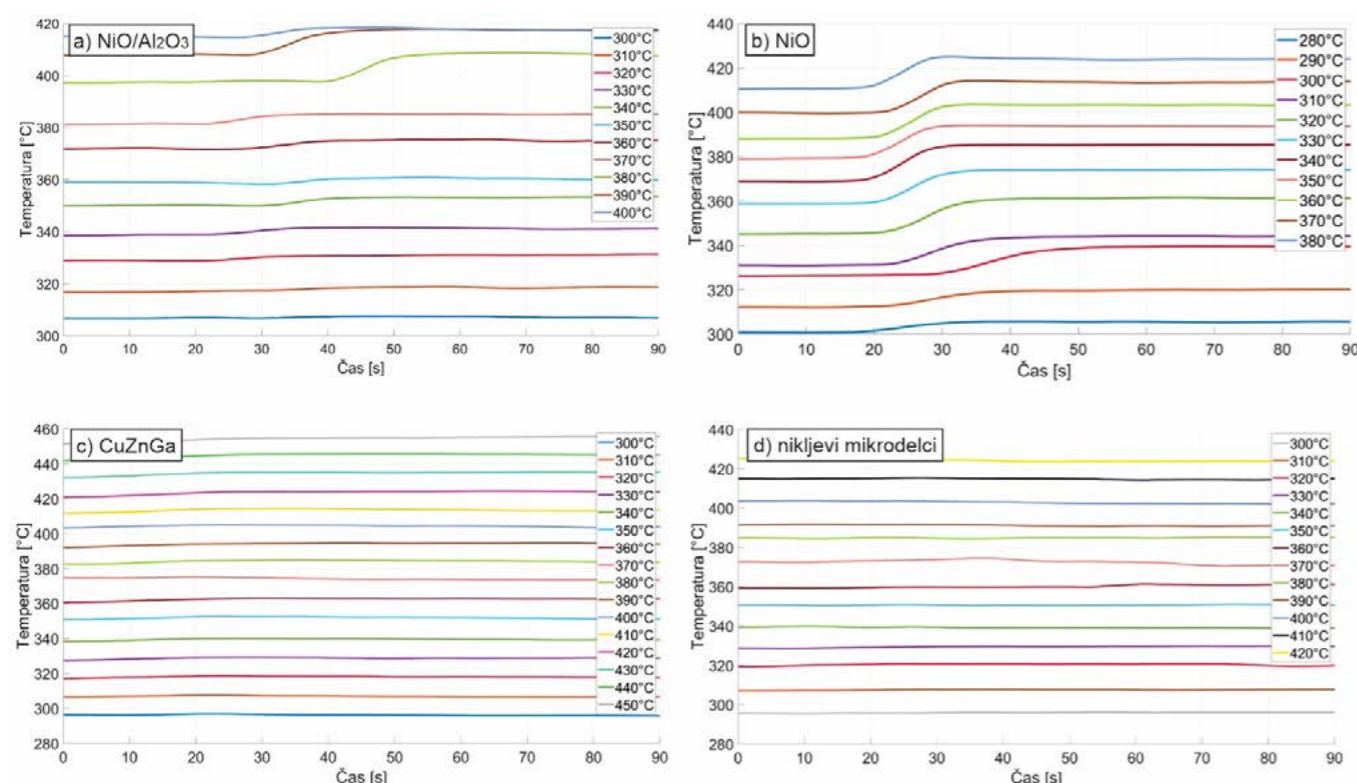
Zatem so vidni relativno visoki temperaturni porasti, najvišji znaša pri temperaturi 380 °C, 12 K. Izmed vseh testiranih katalizatorjev so najvišji temperaturni porasti vidni pri uporabi katalizatorja NiO (Slika 8 b)), ki segajo vse do 18 K pri procesni temperaturi 360 °C.

Na Slika 8 c), kjer so prikazane meritve na katalizatorju iz CuZnGa mikrodelcev, so temperaturni porasti relativno majhni, ti segajo v najboljšem primeru pri procesni temperaturi 450 °C do 4 K. Pri raziskovanju smo se morali zaradi varnostnih ukrepov in preprečitve poškodbe eksperimentalne proge zaustaviti pri procesni temperaturi 450 °C. Nizko aktivnost kaže tudi katalizator iz nikljevih mikrodelcev (Slika 8 d)), ki ne doseže temperaturnih porastov višjih od 2 K. Skladno s tem je tudi pretvorba reaktantov v metan manj učinkovita.

volumski delež metana v produktih skladen s porastom temperature v reaktorju, približno vemo kaj pričakovati na podlagi rezultatov iz poglavij 3.1 in 3.2.

KONVERZIJE VODIKA PRI RAZLIČNIH PROCESNIH TEMPERATURAH

Lotimo se učinka različnih procesnih temperatur na delež metana v produktih pri procesu metanacije. Opaziti je spremembe v optimalnih temperaturnih območjih za proces in relativno velike razlike v deležih proizvedenega metana. Temperatura, kjer proces doseže maksimalno vrednost deleža metana v produktih, za primer NiO/Al₂O₃ (Slika 9 a)) znaša 370 °C, zato je območje okoli te temperature najbolj optimalno za izvedbo preizkusov. Relativno dobre rezultate tega katalizatorja lahko pripišemo alumini,



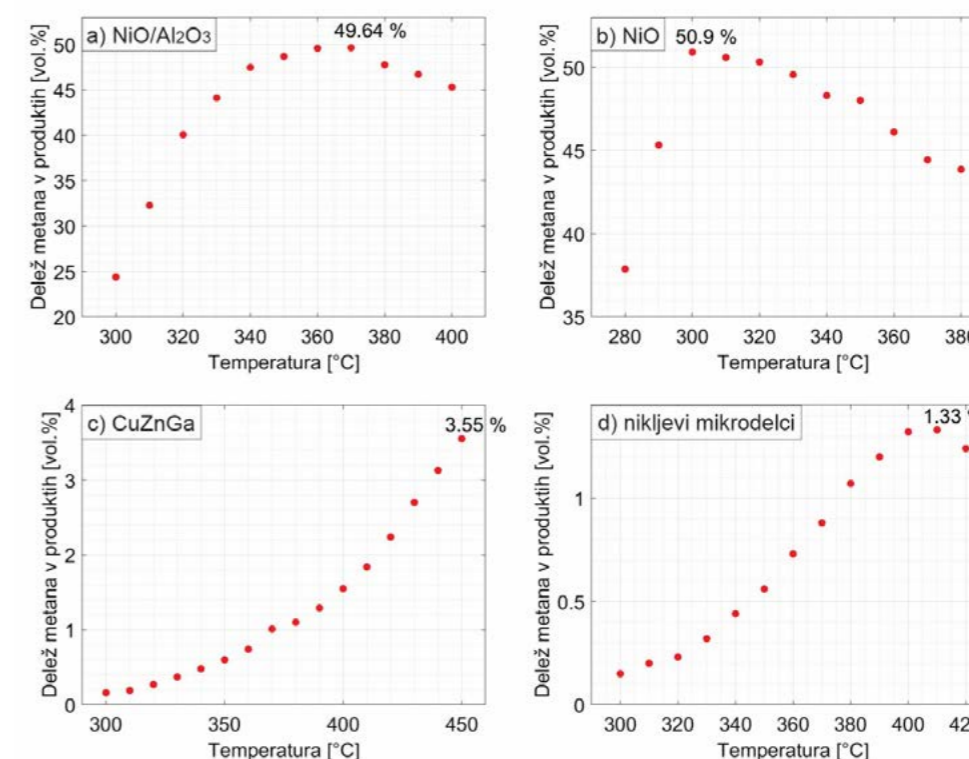
Slika 8: Temperaturni potek na položaju območja dovoda plinov v reaktorsko celico pri različnih procesnih temperaturah ob prisotnosti a) ob prisotnosti NiO/Al₂O₃, b) ob prisotnosti katalizatorja NiO, c) CuZnGa mikrodelcev in d) nikljevih mikrodelcev.

3.3 KONVERZIJA REAKTANTOV V METAN

Analizirana je bila tudi odvisnost uspešnosti reakcije v odvisnosti od temperature v reaktorju ter v odvisnosti od molskih razmerij reaktantov. Gre za procentualne vrednosti volumskega deleža metana v mešanici produktnih plinov, ki so bile pridobljene s pomočjo plinskega kromatografa, koje bilo po dovodu reakcijskih plinov vzpostavljeno stacionarno stanje v celici. Ker je

ki s svojimi značilnostmi – tako kemijskimi kot tudi fizikalnimi, omogoči povečano aktivnost niklja. Poroznost zelo pripomore h temu, ta pa je značilna tudi za katalizator iz nikljevega oksida NiO. Deleži pretvorjenega metana so relativno visoki, višji tudi od NiO/Al₂O₃. Poleg tega je temperatura, kjer je dosežen maksimalni delež metana v produktih, 300 °C, kar je med bolj zaželenimi za komercialno uporabo, saj je ekonomsko bolj ugodno, če je potrebno dovesti

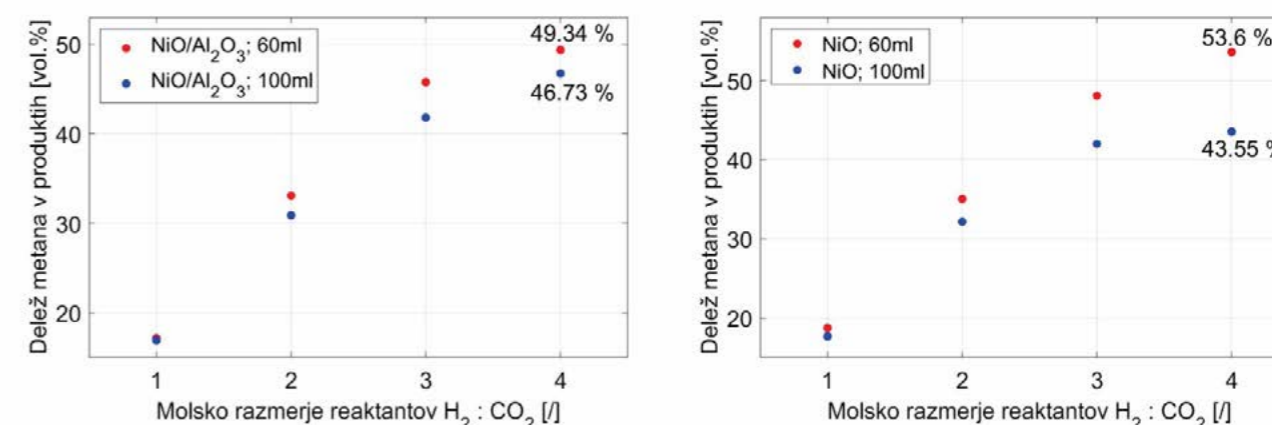
manj toplote v reaktor. Delež proizvedenega metana pri omenjeni temperaturi znaša 50.90 %, kar je občutno več od katalizatorjev iz mikrodelcev in zelo primerljivo s katalizatorjem na osnovi alumine (NiO/Al₂O₃). Osnova, prisotna v zmesi katalizatorja, zmanjša verjetnost pojava sintranja katalizatorja, posledično je skrb za deaktivacijo katalizatorja manjša. Na Slika 9 c) je prav tako prikazan vpliv procesne temperature na delež metana v produktih pri katalizatorju iz CuZnGa mikrodelcev. Delež eksponentno narašča z višanjem temperature, a zaradi varnostnih omejitev nismo mogli raziskati dogajanja pri višjih temperaturah od 450 °C. Maksimalen delež je tako dosežen pri temperaturi 450 °C in znaša 3.55 %. Še manjši je maksimalen delež pri katalizatorju iz nikljevih mikrodelcev, kjer ta znaša le 1.33 % pri temperaturi procesa 410 °C.



Slika 9: Delež metana v produktih pri različnih procesnih temperaturah ob prisotnosti katalizatorja a) NiO/Al₂O₃, b) nikljevega oksida NiO c) iz CuZnGa mikrodelcev in d) iz nikljevih mikrodelcev.

KONVERZIJE VODIKA IN OGLJIKOVEGA DIOKSIDA V METAN PRI SKUPNIH PRETOKIH IN MOLSKIH RAZMERJIH

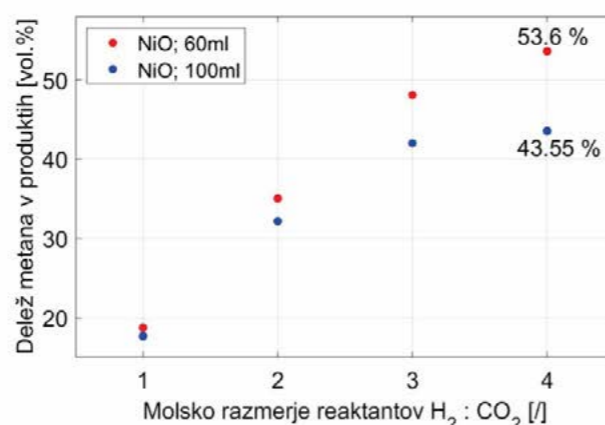
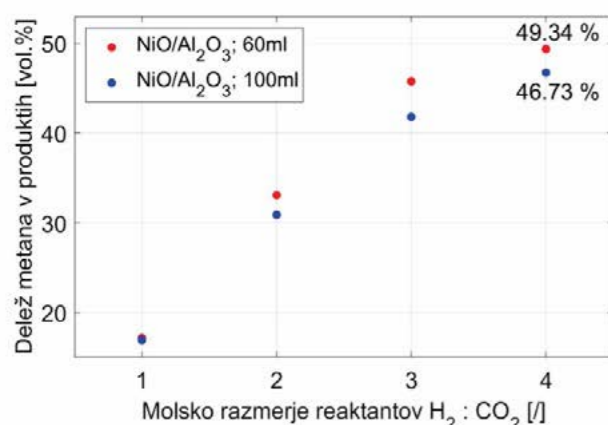
NA



Slika 10: prikazana odvisnost proizvedenega metana od molskega razmerja H₂:CO₂ za katalizatorja NiO/Al₂O₃ ter NiO. Na levem grafu je prikazana odvisnost deleža pri skupnem pretoku 60 ml/min, ter pri skupnem pretoku 100 ml/min. Enako predstavlja desni graf le da so tu predstavljeni deleži proizvedenega metana ob prisotnosti katalizatorja NiO.

Za vse katalizatorje in skupne pretoke je značilno višanje deleža metana v produktih ob višanju razmerja reaktantov $H_2:CO_2$. Povsod je volumski delež metana najnižji pri molskem razmerju 1:1, najvišji pa pri 4:1, kar je v skladu s stehiometrijo enačbe CO_2 metanacije (2).

Karakteristika, ki je sorodna vsem katalizatorjem, je višja učinkovitost procesa pri skupnem pretoku 60 ml/min kot pri 100ml/min. To je lahko posledica slabe distribucije toka, saj obstaja možnost, da vzpostavljene tokovnice plina potekajo tik ob steklu celice ali kod drugod in se konverzija zato ne zgodi. Če bi omogočili, da reaktanti v ustreznem razmerju pridejo v stik z aktivnimi deli katalizatorja, bi tudi pri 100 ml/min dosegli enako konverzijo kot pri 60 ml/min.



Slika 10: Delež metana v produktih pri skupnih pretokih 60 ml/min in 100 ml/min ter različnih molskih razmerjih ob prisotnosti katalizatorja na osnovi alumine NiO/Al_2O_3 ter nikljevega (II) oksida NiO .

4. Zaključki

Glavne tematike naših raziskav obsegajo meritve procesa metanacije pri različnih temperaturah reaktorja, različnih skupnih pretokih ter molskih razmerjih reaktantov in spremljanje lokalnih temperaturnih polj v reaktorjih ob podpori visokoločljivostne IR kamere. Na ta način smo želeli določiti najprimernejše pogoje za proces metanacije ob preizkušanju štirih različnih katalizatorjev oziroma pogoje, ob katerih so ti izkazovali največjo učinkovitost pretvorbe reaktantov. Na podlagi analize obdelanih eksperimentalnih rezultatov lahko zaključimo sledeče:

1. Položaj ali področje v reaktorju z najvišjo temperaturo nakazuje na področje z največjo aktivnostjo reakcije. Ta se je v našem primeru vedno nahajala nad dovodom reaktantov v reaktor kjer so plini prvič prišli v stik s

katalizatorjem. Nastajanje metana se je na tem položaju nadaljevalo skozi celotno obdobje trajanja eksperimentalnih testov, tudi potem, ko so bili stacionarni pogoji v reaktorju že doseženi.

2. Ugotovili smo, da so optimalne temperature za najboljšo aktivnost katalizatorja NiO nekoliko nižje od tistih pri konkurenčnih katalizatorjih. Pri NiO so bile določene optimalne obratovalne temperature v območju $300\text{ }^{\circ}C - 350\text{ }^{\circ}C$. Pri ostalih testiranih katalizatorjih (nikljevi mikrodelci, $CuZnGa$ in NiO/Al_2O_3) pa se optimalno obratovalno področje nahaja pri temperaturah preko $370\text{ }^{\circ}C$.
3. Skladno s stehiometrijskim razmerjem smo ugotovili, da neustrezno razmerje pretokov

reaktantov (npr. $H_2:CO_2=1:1$ v primerjavi z $H_2:CO_2=4:1$) rezultira v manjšem pretoku nastalega metana, kar pa je možno potrditi tudi na meritvah z IR kamero. Na podlagi primerjanja temperaturnih gradientov iz termografskih posnetkov in rezultatov plinske kromatografije smo potrdili, da je za naš laboratorijski reaktor bolj ugoden pretok reaktantov pri 60 ml/min v primerjavi s 100 ml/min. Analiza je pri primerjavi rezultatov vedno pokazala višji delež metana v produktih nižjega skupnega pretoka.

4. Pri primerjavi različnih katalizatorjev smo tudi v praksi dokazali pomembnost in dejansko učinkovitost kovinske osnove pridružene katalizatorju (NiO/Al_2O_3). Ta omogoči primerno poroznost katalizatorja, ki močno poveča njegovo aktivno površino, hkrati prepreči sintranje

(sprijemanje delcev) in ohrani možnost ponovne uporabe katalizatorja.

5. Ugotovili smo, da imata katalizatorja iz nikljevih mikrodelcev in $CuZnGa$ mikrodelcev slabe lastnosti za katalizo procesa metanacije. Deleži metana v produktih so bili minimalni in v primerjavi z ostalima dvema katalizatorjema 50-krat manjši. Ugotovili smo, da katalizatorja NiO/Al_2O_3 ter NiO zagotavljata najvišje učinkovitosti in sta najbolj primerna za nadaljnje raziskave na obravnavanem sistemu.
6. Določili smo optimalne procesne temperature za različne katalizatorje zgolj pri enem skupnem pretoku vstopnih plinov (60 ml/min). Temperatura, pri kateri je bil delež metana v produktih najvišji, je za katalizator iz nikljevih mikrodelcev znašala $410\text{ }^{\circ}C$, za katalizator iz $CuZnGa$ mikrodelcev $450\text{ }^{\circ}C$, za katalizator na osnovi alumine NiO/Al_2O_3 $370\text{ }^{\circ}C$ ter za katalizator NiO $300\text{ }^{\circ}C$.

Rezultati raziskave nakazujejo na možnost uporabe naprednih in visokoločljivostnih sistemov za neinvazivno spremljanje temperature v primeru katalitičnih procesov pretvorbe plinov. Z analizo temperaturnih polj in temperaturnih gradientov je možno posredno sklepati na učinkovitost procesov, morda v prihodnje tudi brez potrebe po kromatografski analizi produktov. To bi v mnogih primerih pospešilo postopke razvoja reaktorjev, sprotnega spremljanja procesa ter razvoja katalitičnih materialov. Pridobljeni podatki o temperaturnih poljih pa bi bili tudi uporabni za primerjavo z numeričnimi napovedmi in s tem za razvoj fizikalnih ali empiričnih modelov.

Nomenklatura

Oznaka	
T	temperatura [K]
ΔG	sprememba Gibbsove proste energije [J]
H_R	entalpija kemijske reakcije [kJ mol ⁻¹]
Okrajšava IR	Infrardeča (ang. Infrared)
PtG	Obrati, ki z električno energijo proizvajajo gorivo v plinastem stanju (ang. Power to Gas)
RWGS	Povratno vodno plinska konverzija (ang. Reverse Water Gas Shift)

SEM	Vrstični elektronski mikroskop (ang. Scanning Electron Microscope)
SNG	Sintetični naravni plin (ang. Synthetic Natural Gas)

5. Zahvala

Zahvaljujemo se prof. dr. Blažu Likozarju ter dr. Janvitu Teržanu iz Kemijskega Inštituta za možnost izvedbe eksperimentov.

6. Viri

- [1] NASA: Global Climate Change. Dostopno na: <https://climate.nasa.gov/>, ogled: 28.11.2022.
- [2] M. Debeljak "Za izdelavo enih kavbojk je potrebno toliko vode, kot je prevažna tovornjak s cisterno." Delo d.d. (2009).
- [3] Ministrstvo za infrastrukturo: Obnovljivi viri energije. Dostopno na: gov.si, ogled: 05.09.2023.
- [4] M. Iglesias G., C. de Vries, M. Claeys, G. Schaub: Chemical energy storage in gaseous hydrocarbons via iron Fischer-Tropsch synthesis from H_2/CO_2 —Kinetics, selectivity and process considerations. *Catalysis Today* 242 (2015) str. 184–192.
- [5] C. Janke, M.S. Duyar, M. Hoskins, R. Farrauto: Catalytic and adsorption studies for the hydrogenation of CO_2 to methane. *Applied Catalysis B: Environmental* 152–153 (2014) str. 184–191.
- [6] J. Gorre, F. Ortloff, C. van Leeuwen: Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage. *Applied Energy* 253 (2019) str. 113594.
- [7] S. Sahebdehfar, M. Takht Ravanchi: Carbon dioxide utilization for methane production: A thermodynamic analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 134 (2015) str. 14–22.
- [8] H. Yang, J. Jiang, W. Zhou, L. Lai, L. Xi, Y.M. Lam, Z. Shen, B. Khezri, T. Yu: Influences of graphene oxide support on the electrochemical performances of graphene oxide-MnO₂ nanocomposites. *Nanoscale Research Letters* 6 (2011) str. 1–8.
- [9] Sabatier P., Senderens J.-B.: *Comptes Rendus Des Séances De L'Académie Des Sciences, Section VI – Chimie*. Paris: Imprimerie Gauthier-Villars (1902).
- [10] D. Schmider, L. Maier, O. Deutschmann: Reaction Kinetics of CO and CO_2 Methanation over Nickel. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60 (2021)

str. 5792–5805.

[11] S. Rönsch, J. Schneider, S. Matthischke, M. Schlüter, M. Götz, J. Lefebvre, P. Prabhakaran, S. Bajohr: Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel* 166 (2016) str. 276–296.

[12] G.A. Mills, F.W. Steffgen: Catalytic Methanation. *Catalysis Reviews* 8 (1974) str. 159–210.

[13] G.D. Weatherbee, C.H. Bartholomew: Hydrogenation of CO₂ on group VIII metals: II. Kinetics and mechanism of CO₂ hydrogenation on nickel. *Journal of Catalysis* 77 (1982) str. 460–472.

[14] Jose Augusto Hernandez Lalinde: Investigation of CO₂ methanation over ordered mesoporous Ni/Al₂O₃ catalyst using a catalytic plate reactor with spatially resolved measurement capability, McGill University, 2019.

[15] C.H. Bartholomew: Carbon Deposition in Steam Reforming and Methanation. *Catalysis Reviews* 24 (1982) str. 67–112.

[16] P. Unwiset, K.C. Chanapattarapol, P. Kidkhunthod, Y. Poo-arporn, B. Ohtani: Catalytic activities of titania-supported nickel for carbon-dioxide methanation. *Chemical Engineering Science* 228 (2020) str. 115955.

[17] H. Ma, K. Ma, J. Ji, S. Tang, C. Liu, W. Jiang, H. Yue, B. Liang: Graphene intercalated Ni-SiO₂/GO-Ni-foam catalyst with enhanced reactivity and heat-transfer for CO₂ methanation. *Chemical Engineering Science* 194 (2019) str. 10–21.

[18] M. Guo, G. Lu: The effect of impregnation strategy on structural characters and CO₂ methanation properties over MgO modified Ni/SiO₂ catalysts. *Catalysis Communications* 54 (2014) str. 55–60.

[19] E. Alizad, H. Rastegar, F. Hasanzad: Dynamic planning of Power-to-Gas integrated energy hub considering demand response programs and future market conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 143 (2022) str. 108503.

[20] W. Wei, G. Jinlong: Methanation of carbon dioxide: an overview. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 5 (2011) str. 2–10.

[21] G.A. Mills, F.W. Steffgen: Catalytic Methanation. *Catalysis Reviews* 8 (1974) str. 159–210.

[22] S. Hwang, U.G. Hong, J. Lee, J.G. Seo, J.H. Baik, D.J. Koh, H. Lim, I.K. Song: Methanation of carbon dioxide over mesoporous Ni-Fe-Al₂O₃ catalysts prepared by a coprecipitation method: Effect of precipitation agent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 (2013) str. 2016–2021.

[23] R. Mutschler, E. Moioli, K. Zhao, L. Lombardo, E. Oveisi, A. Porta, L. Falbo, Carlo, G. Visconti, L. Lietti, A. Zü Ttel †: Imaging Catalysis: Operando Investigation of the CO₂ Hydrogenation Reaction Dynamics by Means of Infrared Thermography. (2019).

[24] O. Görke, P. Pfeifer, K. Schubert: Highly selective methanation by the use of a microchannel reactor. *Catalysis Today* 110 (2005) str. 132–139.

[25] K. Murdoch, L. Goldblatt, R. Carrasquillo, D. Harris: Sabatier Methanation Reactor for Space Exploration, in: 1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2005.

[26] K. Kofler, X. Huang, J. Kopyscinski: Improved Kinetic Data Acquisition Using An Optically Accessible Catalytic Plate Reactor with Spatially-Resolved Measurement Techniques. Case of Study: CO₂ Methanation. *Catalysts* 8 (2018) str. 86.

[27] J.A.H. Lalinde, J. Jiang, G. Jai, J. Kopyscinski: Preparation and characterization of Ni/Al₂O₃ catalyst coatings on FeCrAl-loy plates used in a catalytic channel reactor with in-situ spatial profiling to study CO₂ methanation. *Chemical Engineering Journal* 357 (2019) str. 435–446.

[28] J. Kopyscinski, T.J. Schildhauer, F. Vogel, S.M.A. Biollaz, A. Wokaun: Applying spatially resolved concentration and temperature measurements in a catalytic plate reactor for the kinetic study of CO methanation. *Journal of Catalysis* 271 (2010) str. 262–279.

[29] C. Schüler, M. Wolf, O. Hinrichsen: Contactless temperature measurements under static and dynamic reaction conditions in a single-pass fixed bed reactor for CO₂ methanation. *Journal of CO₂ Utilization* 25 (2018) str. 158–169.

[30] J. Jolly, B. Pavageau, J.-M. Tatibouët: Time-resolved IR thermographic detection of gaseous molecules adsorption on oxide supports. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 8 (2011) str. 129–137.

[31] M. Frey, T. Romero, A.-C. Roger, D. Edouard: An intensification of the CO₂ methanation reaction: Effect of carbon nanofiber network on the hydrodynamic, thermal and catalytic properties of reactors filled with open cell foams. *Chemical Engineering Science* 195 (2019) str. 271–280.

[32] M.A.A. Aziz, A.A. Jalil, S. Triwahyono, A. Ahmad: CO₂ methanation over heterogeneous catalysts: recent progress and future prospects. *Green Chemistry* 17 (2015) str. 2647–2663.

[33] A. V. Puga: Light-Promoted Hydrogenation of Carbon Dioxide—An Overview. *Topics in Catalysis* 59 (2016) str. 1268–1278.

[34] W. Wei, G. Jinlong: Methanation of carbon dioxide: an overview. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 5 (2011) str. 2–10.

[35] J. Xu, Q. Lin, X. Su, H. Duan, H. Geng, Y. Huang: CO₂ methanation over TiO₂–Al₂O₃ binary oxides supported Ru catalysts. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24 (2016) str. 140–145.

[36] M.A.A. Aziz, A.A. Jalil, S. Triwahyono, R.R. Mukti, Y.H. Taufiq-Yap, M.R. Sazegar: Highly active Ni-promoted mesostructured silica nanoparticles for CO₂ methanation. *Applied Catalysis B: Environmental* 147 (2014) str. 359–368.

[37] J. Ren, X. Qin, J.Z. Yang, Z.F. Qin, H.L. Guo, J.Y. Lin, Z. Li: Methanation of carbon dioxide over Ni–M/ZrO₂ (M = Fe, Co, Cu) catalysts: Effect of addition of a second metal. *Fuel Processing Technology* 137 (2015) str. 204–211.

[38] W.K. Fan, M. Tahir: Recent trends in developments of active metals and heterogenous materials for catalytic CO₂ hydrogenation to renewable methane: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2021) str. 105460.

[39] H. Ma, K. Ma, J. Ji, S. Tang, C. Liu, W. Jiang, H. Yue, B. Liang: Graphene intercalated Ni-SiO₂/GO-Ni-foam catalyst with enhanced reactivity and heat-transfer for CO₂ methanation. *Chemical Engineering Science* 194 (2019) str. 10–21.

[40] J. Xu, Q. Lin, X. Su, H. Duan, H. Geng, Y. Huang: CO₂ methanation over TiO₂–Al₂O₃ binary oxides supported Ru catalysts. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24 (2016) str. 140–145.

[41] K. Murdoch, L. Goldblatt, R. Carrasquillo, D. Harris: Sabatier Methanation Reactor for Space Exploration, in: 1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2005.

[42] O. Görke, P. Pfeifer, K. Schubert: Highly selective methanation by the use of a microchannel reactor. *Catalysis Today* 110 (2005) str. 132–139.

[43] O. Netskina, S. Mucha, J. Veselovskaya, V. Bolotov, O. Komova, A. Ishchenko, O. Bulavchenko, I. Prosvirin, A. Pochtar, V. Rogov: CO₂ Methanation: Nickel–Alumina Catalyst Prepared by Solid-State Combustion. *Materials* 14 (2021) str. 6789.

[44] Nickel Powder (NI00-PD-000110). Dostopno

na: <https://www.goodfellow.com/de/en-gb/displayitemdetails/p/ni00-pd-000110/nickelpowder>, ogled: 15. 1. 2023.

[45] M. Yamasaki, H. Habazaki, T. Yoshida, E. Akiyama, A. Kawashima, K. Asami, K. Hashimoto, M. Komori, K. Shimamura: Compositional dependence of the CO₂ methanation activity of Ni/ZrO₂ catalysts prepared from amorphous NiZr alloy precursors. *Applied Catalysis A: General* 163 (1997) str. 187–197.

TERMODINAMSKA IN TERMOEKONOMSKA PRIMERJAVA PARNEGA EJEKTORJA Z ELEKTRIČNIM KOMPRESORJEM V HLADILNEM SISTEMU

Jure Dolinar, Matjaž Perpar *

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Korespondenčni avtor: **Matjaž Perpar**

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenija

Tel.: +386 1 4771 419

E-mail: matjaz.perpar@fs.uni-lj.si

Kratki znanstveni prispevek / Short scientific paper

Povzetek

Parni ejetorji predstavljajo v hladilnih sistemih konstrukcijsko enostavno alternativo električnim kompresorjem, hkrati pa omogočajo uporabo obnovljivih virov energije in odvečne toplote. Raziskovali smo njihov potencial za umestitev v sodobne trajnostne sisteme. Parni ejetor smo obravnavali kot del osnovne izvedbe solarnega ejetorskega hladilnega sistema in električni kompresor kot del konvencionalnega hladilnega sistema, gnanega bodisi z elektriko iz omrežja bodisi z elektriko iz sončnih celic. Za oba hladilna sistema smo predpostavili 5 kW hladilne moči. Z upoštevanjem masnega razmerja tokov in eksergijske analize smo izračunali nepovračljivosti in celotni eksergijski izkoristek parnega ejetorja. Primerjali smo ga s celotnim eksergijskim izkoristkom električnega kompresorja, pri čemer smo upoštevali povprečni izkoristek generacije in transporta električne energije v Sloveniji. Termodinamski izračun smo nadgradili s termoekonomskim izračunom, na podlagi cen izstopajočih tokov parnega ejetorja in električnega kompresorja. Ugotovili smo, da so ob upoštevanju celotnega eksergijskega izkoristka parni ejetorji termodinamsko primerljivi z električnimi kompresorji. Termoekonomsko pa se izkaže, da so zaradi visokih amortizacijskih stroškov generatorja pare in relativno kratke dobe obratovanja, ko je med letom na voljo dovolj sončnega sevanja za pogon sistema, parni ejetorji več kot štirikrat dražji od kompresorjev, gnanih z elektriko iz omrežja. Izstopajoči tok kompresorja, gnanega z elektriko iz sončnih celic, je približno desetkrat cenejši od izvedbe s parnim ejetorjem.

Ključne besede: parni ejetorji; električni kompresorji; hladilni sistemi; sončna energija; eksergijski izkoristek; termoeconomika

Abstract

Steam ejectors are a structurally simple alternative to electric compressors in cooling systems, and at the same time enable the use of renewable energy sources and excess heat. We investigated their potential for placement in modern sustainable systems. We considered the steam ejector as a part of the basic solar ejector refrigeration system and the electric compressor as a part of the conventional refrigeration system driven either by electricity from the grid or electricity from solar cells. For both refrigeration systems we assumed 5 kW of cooling power. By considering the entrainment ratio and exergy analysis, we calculated the irreversibility and the total exergy efficiency of the steam ejector. We compared it with the total exergy efficiency of the electric compressor, considering the average efficiency of electricity generation and transport in Slovenia. We upgraded the thermodynamic calculation with a thermoeconomic

Article info

Article history

Received: 6th September 2023

Received in revise from 20th September 2023

Accepted 25th September 2023

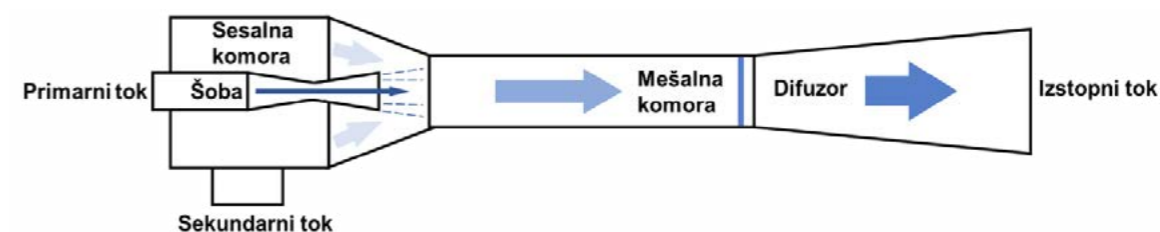
Available online 29th September 2023

calculation, based on the prices of the exiting flows of the steam ejector and the electric compressor. We found that considering the total exergy efficiency, steam ejectors are thermodynamically comparable to electric compressors. Thermoeconomically, however, it turns out that due to the high depreciation costs of the steam generator and the relatively short period of operation, when sufficient solar radiation is available during the year to drive the system, steam ejectors are more than four times more expensive than compressors driven by electricity from the grid. The exiting flow of a compressor driven by electricity from solar cells is about ten times cheaper than that of a steam ejector design.

Keywords: steam ejectors; electric compressors; cooling systems; solar energy; exergy efficiency; thermoeconomics.

1. Uvod

Parni ejetorji so energetske naprave, ki delujejo po principu Venturijeve cevi. Sestavljeni so brez premičnih delov, kot prikazuje slika 1, in sicer iz parne šobe, sesalne in mešalne komore ter difuzorja [1]. Primarni tok vstopi v parno šobo in v njej pospeši na nadzvočno hitrost. Skozi sesalno komoro priteče sekundarni tok, ki se s primarnim tokom turbulentno meša v mešalni komori. Na izstopu iz mešalne komore nastopi šok, ki zmes primarnega in sekundarnega toka upočasni. Skokovito ji naraste tlak, ki nadalje doseže izstopno vrednost v difuzorju [2].



Slika 1: Princip delovanja parnega ejetorja

Uporaba parnih ejetorjev sega na različna področja, od kemijske industrije do termoelektrarn [1]. Njihova glavna naloga je sesanje sekundarnega toka s primarnim tokom pare brez uporabe mehanskega dela. V hladilni tehniki predstavljajo parni ejetorji potencialno trajnostno alternativo električnim kompresorjem, saj jih lahko poganjamo s sončnim sevanjem [3] ali odvečno toploto, kar je njihova ključna prednost. Slabost teh naprav je, da so kompleksne tokovne razmere, ki v njih nastopajo, izrazito nepovračljive. Njihov lokalni eksergijski izkoristek je v primerjavi z izkoristkom električnega kompresorja slab [4].

Natančno primerjavo parnega ejetorja z električnim kompresorjem otežujejo velike konstrukcijske razlike med njima in različen način zagotavljanja njunega pogona [1, 5]. Parni ejetor je del ejetorskega hladilnega sistema, ki vključuje lastne sestavne elemente za pripravo uporabne energije [3], medtem ko v primeru kompresorskega sistema potrebujemo zunanja postrojenja za proizvodnjo in infrastrukturo za transport električne energije. V kompresorskem sistemu je možna uporaba sončnih celic.

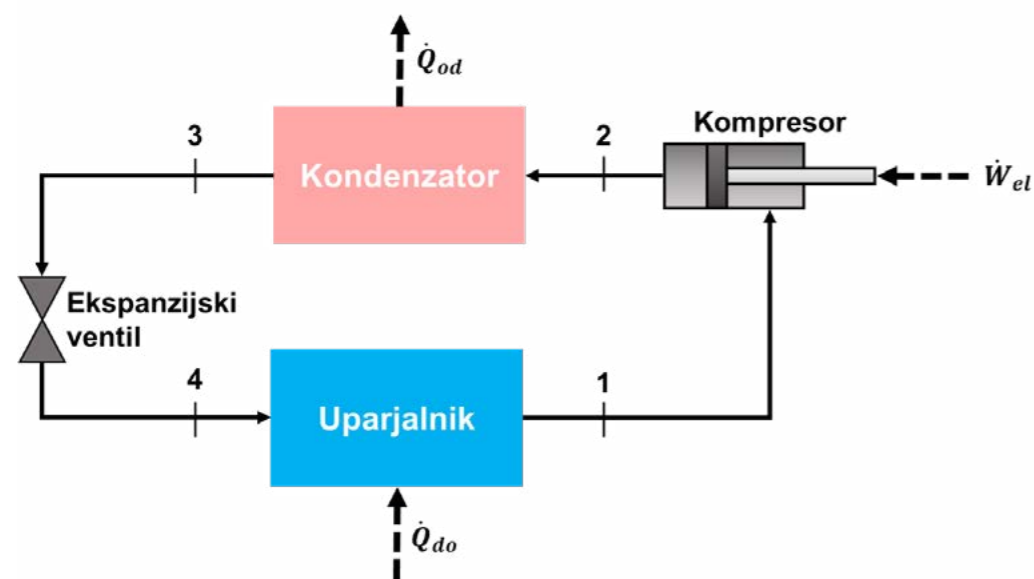
V tem članku smo termodinamsko primerjavo izvedli na ravni celotnega eksergijskega izkoristka, ki upošteva izgube pri vseh energijskih pretvorbah, od primarnega vira eksergije do končne uporabe. Dodali smo osnovno termoekonomsko analizo, s katero smo ovrednotili parni ejetor in električni kompresor z vidika cene investicije, vzdrževanja in stroškov pogonske eksergije. Upoštevali smo obratovalno dobo sistemov. Parni ejetor smo umestili v osnovno izvedbo solarnega ejetorskega sistema in električni kompresor v konvencionalni hladilni sistem. Za oba smo predpostavili 5 kW hladilne moči. Obravnavali smo batni in rotacijski kompresor, gnana bodisi z elektriko iz omrežja bodisi z elektriko iz sončnih celic. Upoštevali smo izgube pri generiranju in transportu električne energije ter v primeru parnega ejetorja izgube pri generiranju pare primarnega toka.

2. Teoretično ozadje in metode dela

2.1 OBRAVNAVANA HLADILNA SISTEMA

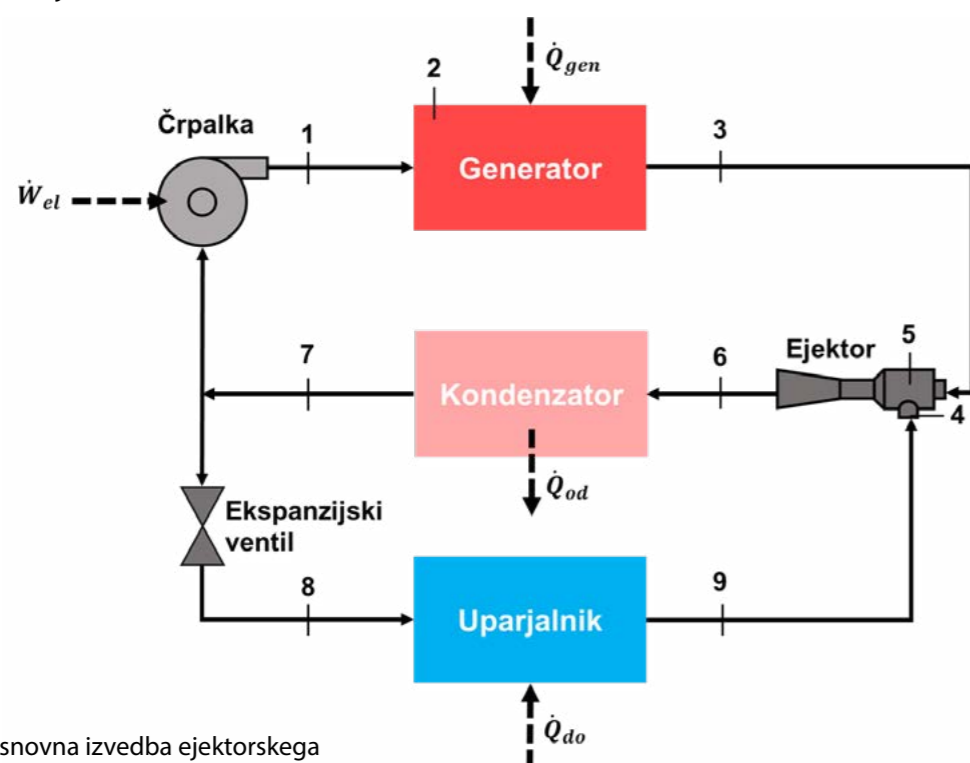
Električni kompresor smo obravnavali kot del konvencionalnega parno kompresijskega hladilnega sistema, prikazanega na sliki 2. Privzeli smo sistem, sestavljen iz štirih osnovnih komponent: električnega kompresorja, kondenzatorja, ekspanzijskega ventila in uparjalnika. Hladilno število kompresorskega sistema je za batni kompresor znašalo 2,14 in za rotacijski kompresor 2,44 [5]. Predpostavili smo delovanje hladilnega sistema poleti.

Diagram P-h krožnega procesa tovrstnega sistema prikazuje slika 4 (a).



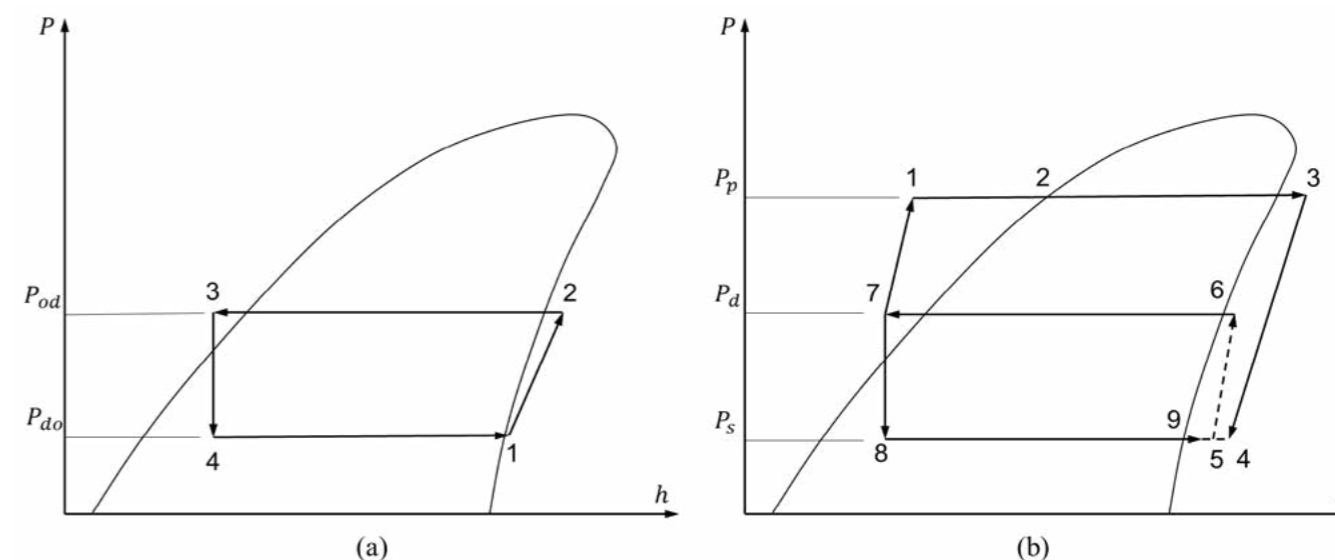
Slika 2: Konvencionalni hladilni sistem [6]

Na sliki 3 se nahaja shematski prikaz osnovne izvedbe ejektorskega hladilnega sistema. Sestavljen je iz dveh zank, po katerih potekata levi in desni krožni proces, kot je razvidno na sliki 4 (b). Levi krožni proces se izvaja s sekundarnim tokom ejektorja, ki potuje del poti skupaj s primarnim tokom, a se od njega odcepi pred ekspanzijskim ventilom. Ločeni tok vodimo v uparjalnik, kjer zagotavlja hladilni učinek in se vrača v ejektor. Desni krožni proces poganja sistem s primarnim tokom, kateremu eksergijo toplote dovajamo v generatorju pare. S kapljevitim delovnim medijem generator napaja električna črpalka, katere moč je relativno majhna v primerjavi z ostalimi eksergijskimi tokovi sistema [3]. Toploto generatorju dovajamo bodisi z uporabo sončnih kolektorjev bodisi z zajemom odvečne toplote. Dodatna možnost je dovod toplote z zgorevanjem.



Slika 3: Osnovna izvedba ejektorskega hladilnega sistema [3, 6]

Obravnavali smo solarni ejektorski hladilni sistem, ki je obratoval s hladivom R600a (izobutan). Izbrane temperature in tlaki so bili: na izstopu iz generatorja pare 90 °C in 1500 kPa, na izstopu iz uparjalnika 10 °C in 220 kPa ter na vstopu v kondenzator 37 °C in 460 kPa. Stanje okolice smo izbrali s temperaturo 30 °C in tlakom 101,3 kPa [7].



Slika 4: (a) Diagram P-h idealnega parno kompresijskega levega krožnega procesa. (b) Diagram P-h dveh idealnih krožnih procesov v osnovni izvedbi ejektorskega hladilnega sistema [3, 6]

V raziskavi smo za oba sistema predpostavili hladilno moč 5 kW. Izgube v ejektorskem hladilnem sistemu smo upoštevali s pomočjo eksergijskega izkoristka parnega ejektorja in generatorja pare.

Na slikah 2, 3 in 4 predstavljajo simboli: \dot{Q} toplotno moč, \dot{W} moč, P absolutni tlak in h masno specifično entalpijo. Indeksi pomenijo: od odveden, do doveden, el električni, gen generatorski in d, p, s – po vrsti: difuzorski (izstopni), primarni in sekundarni tok.

2.2 EKSERGIJSKA ANALIZA PARNEGA EJEKTORJA

Učinkovitost delovanja parnega ejektorja običajno predstavimo z masnim razmerjem tokov, ki je ključni parameter pri izračunu eksergijskega izkoristka parnega ejektorja. Definirano je kot kvocient med masnim tokom sekundarnega in primarnega toka [1], kot prikazuje enačba 1.

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (1)$$

$$\zeta_{eje} = -\omega \frac{e_d - e_s}{e_d - e_p} \quad (2)$$

V enačbi 1 je ω masno razmerje tokov in \dot{m} masni tok.

Masno razmerje tokov je mogoče določiti z izračunom modela parnega ejektorja ali eksperimentalno analizo [1]. V tem članku smo iz predhodnega izračuna privzeli masno razmerje tokov vrednosti 0,313, ki je bilo iterativno izračunano po termodinamskem modelu ejektorja z mešanjem pri konstantnem tlaku [7]. Upoštevan je bil realni plin v parni šobi in idealni plin v preostalih delih ejektorja.

Z znanim masnim razmerjem tokov smo izračunali eksergijski izkoristek parnega ejektorja, ki je definiran kot razmerje med eksergijo, ki se s primarnega toka prenese na sekundarni tok, in eksergijo primarnega toka [8]. Prikazan je v enačbi 2.

V enačbi 2 je ζ eksergijski izkoristek in e masno specifična eksergija. Indeks e pomeni ejektorski.

Masno specifične eksergije tokov znotraj parnega ejektorja določimo s poznavanjem ustreznih termodinamskih stanj in definicije eksergije snovi [9], ki jo prikazuje enačba 3.

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

V zgornji enačbi T predstavlja absolutno temperaturo (enota kelvin, K), s masno specifično entropijo. Indeks 0 se nanaša na stanje okolice.

Nepovračljivosti izračunamo z eksergijsko ravnotežno enačbo (4) [10], kjer imajo tranzientni člen in členi, ki se nanašajo na mehansko delo ter eksergijo toplote, vrednost nič. Eksergijo, ki preide v okolico zaradi toplotnih izgub, upoštevamo kot del nepovračljivosti.

$$\frac{dE}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \dot{W}_t + P_0 \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_v e_v - \sum \dot{m}_{iz} e_{iz} - \dot{I} \quad (4)$$

V enačbi 4 predstavljajo simboli: E eksergijo, t čas, V volumen in I nepovračljivosti. Indeksi pomenijo: t tehnično, v vstopajoči tok in iz izstopajoči tok.

Nepovračljivosti so produkt temperature okolice in generirane entropije, kar je enako izgubljenemu delu oziroma uničeni eksergiji, kot v enačbi 5 [11].

$$\dot{I} = T_0 \dot{S}_{gen} = \dot{W}_{pov} - \dot{W}_{nepov} \quad (5)$$

\dot{S} predstavlja entropijski tok, indeksi so: gen generiran, pov povračljiv in $nepov$ nepovračljiv.

2.3 CELOTNI EKSERGIJSKI IZKORISTEK

Za uspešno primerjavo različnih strojev in naprav, kot so električni kompresorji in parni ejektorji, je potrebno upoštevati nepovračljive energijske pretvorbe, ki se zgodijo, preden eksergija doseže obravnavani stroj oziroma napravo. Z enačbo 6 definiramo celotni eksergijski izkoristek kot produkt eksergijskih izkoristkov vseh energijskih pretvorb od primarnega vira do uporabne eksergije stroja oz. naprave [7].

$$\zeta_{cel} = \prod_{k=1}^k \zeta_k \quad (6)$$

Parameter k predstavlja števec vmesnih energijskih pretvorb.

Pri izračunu celotnega eksergijskega izkoristka parnega ejektorja smo upoštevali eksergijski izkoristek generatorja pare 76,74 % in eksergijski izkoristek sončnega kolektorja 14,51 % [3].

Ko smo računali celotni eksergijski izkoristek batnega in rotacijskega kompresorja, smo upoštevali povprečni eksergijski izkoristek generiranja (34,83 %) [12] in transporta (95,79 %) električne energije v Sloveniji v letu 2021 [13]. Eksergijska izkoristka kompresorjev sta znašala 50 % za batni in 61 % za rotacijski kompresor [5]. Pri izvedbi pogona kompresorja z elektriko iz sončnih celic smo privzeli njihov eksergijski izkoristek 15,5 % [14].

2.4 TERMOEKONOMSKA PRIMERJAVA

Termoekonomika združuje termodinamsko (eksergijsko) in ekonomsko analizo v enotno metodo za nadgradnjo obstoječih ali konstruiranje novih energetskih sistemov. Osnovni veličini v termoekonomiki sta cenovni tok in amortizacija [11], predstavljeni v enačbah 7 in 8.

$$\dot{C} = c\dot{E} = c(\dot{m}e) \quad (7)$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{inv} + \dot{Z}_{vzd} \quad (8)$$

\dot{C} pomeni cenovni tok, c eksergijsko specifično ceno, \dot{Z} amortizacijo in indeksa inv investicijski ter vzd vzdrževalni.

Analogno eksergijski ravnotežni enačbi pri termodinamski obravnavi, v termoekonomiki zapišemo cenovno ravnotežno enačbo (9), ki združuje cenovni tok in amortizacijo [11]. Člene v njej ustrezno krajšamo glede na namen obravnavanega stroja oz. naprave.

$$\sum c_{iz} \dot{E}_{iz} + c_W \dot{W}_t = c_Q \dot{E}_Q + \sum c_v \dot{E}_v + \dot{Z} \quad (9)$$

V enačbi 9 indeks W pomeni delo in Q toploto.

Pri izračunu cen izstopnih tokov batnega in rotacijskega kompresorja smo upoštevali ceno investicije 978,75 €, strošek vzdrževanja 101,25 € in življenjsko dobo 15 let [15]. Privzeli smo, da

hladilni sistem deluje 92 dni po 10 ur v enem letu, kar smo določili na podlagi vremenskih podatkov za Ljubljano [16].

V solarnem ejektorskem hladilnem sistemu so cene investicije znašale 1890,27 € za črpalko, 14649,60 € za sončni kolektor, 8978,76 € za generator pare in 1417,70 € za parni ejektor [17, 18]. Skupni vzdrževalni strošek je znašal 1616,18 €, kar predstavlja 6 % stroškov investicije [17]. Življenjska doba sistema je bila 20 let z obratovalnimi 92 dnevi na leto in 8 urami na dan, ko je solarni hladilni sistem deloval ob zadostni količini sončnega sevanja [16].

Kot ceno eksergije smo vzeli 0,18 € kWh⁻¹ za elektriko iz omrežja [19] in 0,05 € kWh⁻¹ za elektriko iz sončnih celic v Sloveniji [20].

3. Rezultati in diskusija

3.1 REZULTATI EKSERGIJSKE ANALIZE PARNEGA EJEKTORJA

Eksergijska analiza je pokazala, da eksergijski izkoristek parnega ejektorja hladilnega sistema, ki je deloval z medijem R600a in masnim razmerjem tokov 0,313, znaša 18,01 %. Skupna izgubljena eksergijska moč znaša 5620,09 W in se deli na 2269,89 W nepovračljivosti ter na 3350,19 W zavržene eksergijske moči (iz kondenzatorja sistema v okolico odvedena toplota). Razmerje izstopne in vstopne eksergijske moči za parni ejektor znaša 66,89 %.

3.2 REZULTATI TERMODINAMSKE PRIMERJAVE

Ugotovili smo, da ima parni ejektor sistema z delovnim medijem R600a v primerjavi s kompresorjem nižji eksergijski izkoristek, vendar je razlika med njimi manjša, ko upoštevamo celotne eksergijske izkoristke. Rezultati so predstavljeni v preglednici 1.

Velik vpliv na eksergijski izkoristek parnega ejektorja ima izbira delovnega medija. Za ejektor, ki deluje z R245fa, smo ob upoštevanju izgub pri generiranju pare izračunali celotni eksergijski izkoristek 22,41 %, ob dodanih izgubah v sončnem kolektorju pa je bil le-ta samo 3,25 % [21].

Preglednica 1: Rezultati termodinamske analize

Stroj oz. naprava	Celotni eksergijski izkoristek [%]
Batni kompresor, elektrika iz omrežja	16,68
Rotacijski kompresor, elektrika iz omrežja	20,35
Parni ejektor z upoštevanjem izgub v generatorju pare (R600a, $T_{gen}=90^\circ\text{C}$)	13,82
Batni kompresor, elektrika iz sončnih celic	7,75
Rotacijski kompresor, elektrika iz sončnih celic	9,45
Parni ejektor z upoštevanjem izgub v generatorju pare in sončnem kolektorju (R600a, $T_{gen}=90^\circ\text{C}$)	2,01

3.3 REZULTATI TERMOEKONOMSKE PRIMERJAVE

Cene izstopnih tokov ejektorja, batnega in rotacijskega kompresorja so prikazane v preglednici 2. Struktura cene izstopnega toka parnega ejektorja se je razlikovala od kompresorja v tem, da je večino stroškov električnega stroja predstavljala eksergija za pogon, medtem ko je večji delež cene pri parnem ejektorju predstavljala amortizacija.

Preglednica 2: Rezultati termoekonomske analize

Stroj oz. naprava	Cena izstopnega toka [€ h ⁻¹]
Batni kompresor, elektrika iz omrežja	0,499
Rotacijski kompresor, elektrika iz omrežja	0,447
Parni ejektor solarnega sistema, elektrika napajalne črpalke iz omrežja	1,969
Batni kompresor, elektrika iz sončnih celic	0,195
Rotacijski kompresor, elektrika iz sončnih celic	0,181
Parni ejektor solarnega sistema, elektrika napajalne črpalke iz sončnih celic	1,948

Ugotovili smo, da visoka cena investicije sončnega kolektorja in generatorja pare povzroči, da je cena izstopnega toka parnega ejektorja skoraj štirikrat višja kot pri batnem kompresorju. Cena toka iz ejektorja je bila 4,4-krat višja v primerjavi s ceno toka iz rotacijskega kompresorja. Ko smo elektriko iz omrežja nadomestili z elektriko iz sončnih celic, je bila cena izstopnega toka kompresorja najnižja – približno desetkrat nižja kot cena izstopnega toka parnega ejektorja. Cena elektrike iz sončnih celic je vplivala na znižanje cene toka iz parnega ejektorja, kjer smo v hladilnem sistemu napajanje generatorja pare zagotavljali z električno črpalko, za 0,021 €.

4 Zaključek

Termodinamska primerjava je pokazala, da je celotni eksergijski izkoristek kompresorjev izrazito nižji od eksergijskega izkoristka same naprave. Ugotovili smo, da so kompresorji enakovredni ejektorjem, če upoštevamo vse izgube, od primarnega vira eksergije dalje. Parni ejektorji so običajno termodinamsko slabši od kompresorjev, kar je odvisno od delovnega medija, obratovalnih pogojev ejektorja in od upoštevanja izgub eksergije v sončnem kolektorju. V določenih primerih je eksergijski izkoristek ejektorjev višji od eksergijskega izkoristka kompresorjev.

V sklopu termoeekonomske primerjave smo izračunali cene izstopnih tokov parnega ejektorja in dveh tipov kompresorjev. Ugotovili smo, da je cena izstopnega toka parnega ejektorja več kot štirikrat višja kot pri kompresorju. Kot alternativo sončnim kolektorjem smo vzeli sončne celice kot vir električne energije za pogon kompresorja. Ugotovili smo, da je izvedba s sočnimi celicami ekonomsko najugodnejša, je približno desetkrat cenejša od izvedbe s parnim ejektorjem.

Literatura

[1] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, Evaluation of steam jet ejectors, *Chemical Engineering and Processing* 41 (2002) 551–561.

[2] A. Metsue, R. Debroeyer, S. Poncet, Y. Bartosiewicz, An improved thermodynamic model for supersonic real-gas ejectors using the compound choking theory, *Energy* 238 (2022) 121856.

[3] W. Pridasawas, P. Lundqvist, An exergy analysis of a solar-driven ejector refrigeration system, *Solar Energy* 76 (2004) 369-379.

[4] D. Strušnik, M. Marčič, M. Golob, A. Hribernik, M. Živič, J. Avsec, Energy efficiency analysis of steam ejector and electric vacuum pump for turbine condenser air extraction system based on supervised machine learning modeling, *Applied Energy* 173 (2016) 386-405.

[5] R.C. Engel, C.J. Deschamps, Comparative analysis between the performances of reciprocating and rolling piston compressors applied to a domestic heat pump water heater, *International Journal of Refrigeration* 102 (2019) 130-141.

[6] A. Poredoš, A. Kitanovski, B. Vidrih, P. Poredoš, HEAT PUMPS for heating and cooling, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2018.

[7] J. Dolinar, M. Perpar, Termodinamska in termoeekonomska primerjava parnih ejektorjev in injektorjev s kompresorji in črpalkami, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2023.

[8] R. K. McGovern, G. Parakash Narayan, J. H. Leinhard V, Analysis of Reversible Ejectors and Definition of an Ejector Efficiency, *International Journal of Thermal Sciences* 54 (2012) 153-166.

[9] Z. Rant, Termodinamika, knjiga za uk in prakso, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2011.

[10] C. Borgnakke, R. E. Sonntag, Fundamentals of Thermodynamics, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2013.

[11] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, Thermal Design and Optimization, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

[12] SURS. Dostopno na: <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/10621>, ogled: 30. 6. 2023.

[13] SODO. Dostopno na: https://sodo.si/storage/app/media/SODO_predstavitev_2020_v04_WEB.pdf, ogled: 30. 6. 2023.

[14] M. A. Rosen, C. A. Bulucea, Using Exergy to

Understand and Improve the Efficiency of Electrical Power Technologies, *Entropy* 11 (2009) 820-835.

[15] G. Mader, Economic analysis of air-water heat pump technologies with a screening method, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

[16] ARSO. Dostopno na: https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/statistike_1950_2020/ljubljana_bezigrad/, ogled: 15. 6. 2023.

[17] V. K. Yadav, J. Sarkar, P. Ghosh, Thermodynamic, economic and environmental analyses of novel solar-powered ejector refrigeration systems, *Energy Conversion and Management* 264 (2022) 115730.

[18] B. Tashtoush, I. Songa, T. Morosuk, Exergoeconomic Analysis of a Variable Area Solar Ejector Refrigeration System under Hot Climatic Conditions, *Energies* 15 (2022) 9540.

[19] SURS. Dostopno na: <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/11152>, ogled: 30. 6. 2023.

[20] D. Lugo-Laguna, A. Arcos-Vargas, F. Nuñez-Hernandez, A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology, *Sustainability* 13 (2021) 3238.

[21] J. Chen, H. Havtun, B. Palm, Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system, *Applied Energy* 144 (2015) 139-151.

RAZVOJ MERILNEGA PREIZKUŠEVALIŠČA ZA OVREDNOTENJE PROCESA ZMRZOVANJA VODNE KAPLJICE S HITROTEKOČO KAMERO

Rok Kelher, Martin Grošelj, Matevž Zupančič, Matic Može *
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Korespondenčni avtor: **Matic Može**

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenija

Tel.: +386 1 4771 309
E-mail: matic.moze@fs.uni-lj.si

Short scientific paper / Kratki znanstveni prispevek

POVZETEK

Zmrzovanje vodnih kapljic je pogost proces v naravi, ki pa v mnogih inženirskih aplikacijah, kot so letalstvo, proizvodnja elektrike z obnovljivimi viri energije (npr. z vetrnicami) in prenos električne energije (daljnovodi), povzročajo probleme zaradi nabiranja ledenega sloja, ki poslabša ali celo onemogoči obratovanje. Za obvladovanje problemov z zmrzovanjem se uporabljajo aktivne ali pasivne metode, pri čemer slednje večinoma temeljijo na inženiringu površin za zakasnitev ali preprečitev zmrzovanja. Pri razvoju funkcionaliziranih površin je potrebno ovrednotiti proces zmrzovanja pod nadzorovanimi pogoji, vključno z nadzorovanimi parametri atmosfere in kontrolirano temperaturo površine. V tem delu predstavljamo razvoj merilnega preizkuševališča, ki omogoča ovrednotenje procesa zmrzovanja vodnih kapljic z uporabo hitrotekoče kamere, s katero posnamemo proces rekalescence in potovanje fronte zmrzovanja po kapljici. Ohlajanje vzorca je zagotovljeno s kaskadnim termoelektričnim hladilnikom, nadzor vlažnosti pa preko zaprte prozorne komore z obtočnim desikatorjem. Za vizualizacijo procesov smo uporabili hitrotekočo kamero v vidnem spektru (Photron Mini UX100) z makro objektivom in LED osvetlitvijo, s čimer smo dosegli resolucijo $\sim 3 \mu\text{m}$ na slikovno točko. Eksperimentalno ovrednotenje lastnosti preizkuševališča je pokazalo, da lahko dosegamo stabilno relativno vlažnost med 15 % in 20 % pri sobni temperaturi, ohlajanje vzorca pa je možno na temperaturo do $-45 \text{ }^\circ\text{C}$. Določili smo časovne konstante pri procesu ohlajanja vzorca, ki znašajo od 18 s do 45 s, odvisno od želene končne temperature površine. S hitrotekočo kamero smo primerjali proces rekalescence in popisali potovanje fronte zmrzovanja pri zmrzovanju vodne kapljice volumna $\sim 3 \mu\text{L}$ na neobdelani in na superhidrofobni površini pri temperaturi $-17 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokazali smo tudi uporabnost merilnega preizkuševališča za analizo zamika zmrzovanja vodne kapljice, ki ga dosežemo z uporabo funkcionaliziranih (superhidrofobnih) površin. Rezultati so pokazali, da so časi zmrzovanja na superhidrofobnih površinah znatno daljši kot na neobdelani površini. Na slednji je pri temperaturi $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ prišlo do takojšnjega zmrzovanja, na dveh različnih superhidrofobnih površinah pa smo zabeležili zakasnitev 75 s oz. 618 s.

Ključne besede: zmrzovanje; superhidrofobne površine; hitrotekoča kamera; rekalescenca; prenos toplote

ABSTRACT

The freezing of water droplets is a common process in nature, but it poses problems in many engineering applications, such as aviation, electricity generation from renewable energy sources (e.g., with wind turbines), and electrical power transmission (power lines), due to ice accumulation that obstructs or prevents operation. To mitigate problems with freezing, active or passive methods are used, with the latter mostly relying on surface engineering to delay or prevent freezing. In the development of functionalized surfaces, it is necessary to evaluate the freezing process under controlled conditions, including controlled atmospheric parameters and surface temperature. In this work, we present the development of a measurement testbed that enables the evaluation of the freezing process of water droplets using a high-speed camera, which records the recalescence process and the freezing front's travel within the droplet. Cooling of the sample is provided by a cascade thermoelectric cooler, and humidity control is achieved through a closed transparent chamber with a circulation desiccator. For process visualization, we used a high-speed camera in the visible spectrum (Photron Mini UX100), with a macro lens and LED illumination, achieving a resolution of $\sim 3 \mu\text{m}$ per pixel. Experimental evaluation of the testbed's properties showed that we can maintain stable relative humidity between 15% and 20% at room temperature, and the sample can be cooled to a temperature of $-45 \text{ }^\circ\text{C}$. We determined the time constants for the sample cooling process, ranging from 18 s to 45 s, depending on the desired final surface temperature. Using the high-speed camera, we compared the recalescence process and monitored the freezing front's travel during freezing of a $\sim 3 \mu\text{L}$ water droplet on untreated and superhydrophobic surfaces at a temperature of $-17 \text{ }^\circ\text{C}$. We also demonstrated the testbed's utility for analyzing the freezing delay of a water droplet achieved using functionalized (superhydrophobic) surfaces. The results showed that freezing times on superhydrophobic surfaces are significantly longer than on untreated surfaces. At $20 \text{ }^\circ\text{C}$, immediate freezing occurred on the latter, while on two different superhydrophobic surfaces, we recorded delays of 75 s and 618 s, respectively.

Keywords: icing; freezing; superhydrophobic surfaces; high-speed camera; recalescence; heat transfer

1. Uvod

Led in srež sta običajna pojava v naravnem okolju, njuno nabiranje na površinah pa v mnogih inženirskih aplikacijah povzročata poškodbe opreme ali celo odpoved sistemov, kar povzroča finančno škodo in je lahko nevarno za uporabnike [1–3]. Nabiranje ledu in sreža lahko prizadene opremo na vseh velikostnih skalah, od daljnovodov, vetrnic in letal do uparjalnikov toplotnih črpalk [4–7]. Na primer, kopičenje ledu pozimi vpliva na obratovanje vetrnih turbin, ki predstavljajo pomemben vir obnovljive električne energije. Led na krakih turbine poslabša njihove aerodinamične lastnosti in lahko povzroči izgube do 50 % letne proizvodnje, skupaj z vibracijami in nevarnostjo odpadanja velikih kosov ledu z znatne višine. Na daljnovodih nabiranje ledu znatno poveča njihovo težo in zračni upor, kar povzroči povešanje, s čimer se poveča tveganje za poškodbe in izpade električne energije. V letalstvu zaledenitev poslabša aerodinamične lastnosti in povzroči napake pri merjenju hitrosti ali odpoved sistemov, pogosto s smrtonosnimi posledicami. Nadaljnja tveganja so povezana s povečano težo letala zaradi nabiranja ledu, ki vpliva na težišče in zmanjša upravljivost letala ter zmanjša učinkovitost reaktivnih motorjev. Na delovanje toplotnih črpalk zrak-voda močno vpliva tudi nabiranje sreža na uparjalniku v obdobjih hladnega in vlažnega

vremena, saj plast sreža poveča toplotni upor in padec tlaka v uparjalniku, kar povzroči zmanjšano učinkovitost in višjo porabo električne energije.

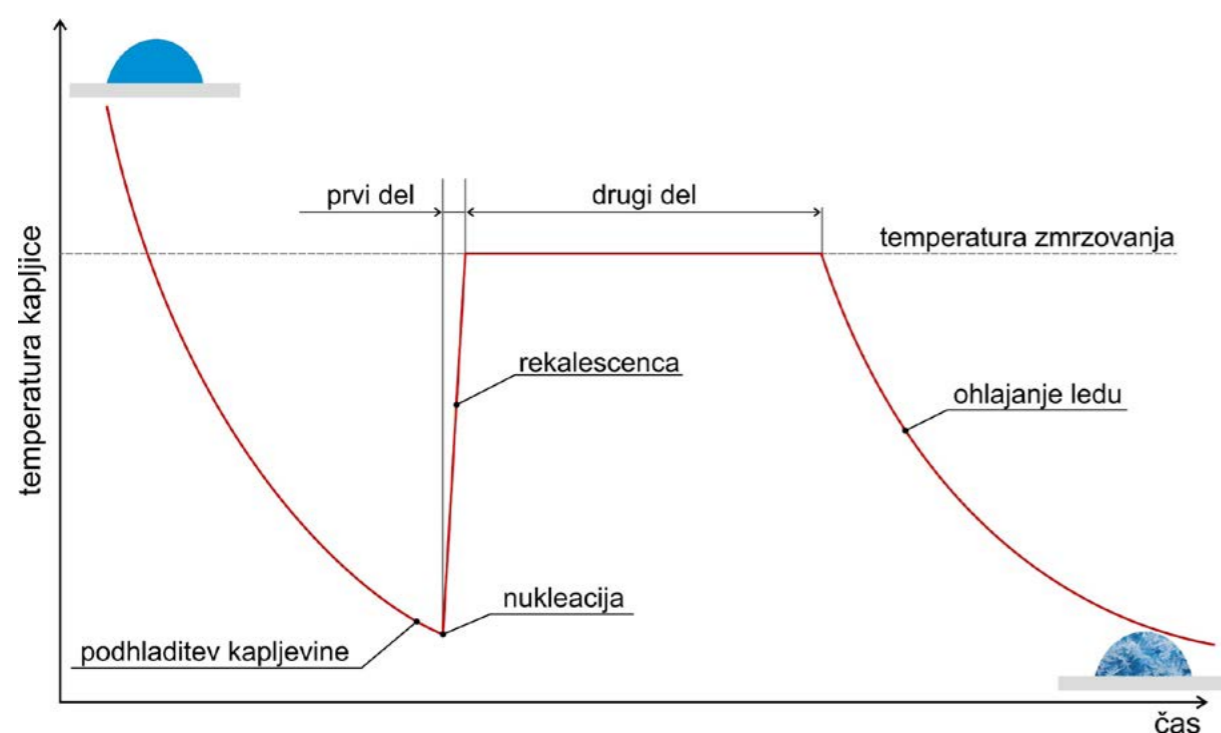
Zaradi opisanih problemov se na vseh področjih uporabljajo različni preventivni in kurativni ukrepi za nadzor nad nabiranjem ledu in sreža [8]. Tipične rešitve so aktivni pristopi, ki temeljijo na ogrevanju ključnih komponent, vibracijah, nanosu kemičnih sredstev za odstranjevanje ledu ali preprosto na izklopu sistema. Aktivni pristopi so porabniki energije in so poleg znižanja učinkovitosti nagnjeni k potencialni odpovedi, zato se v zadnjem desetletju namenja veliko pozornosti pasivnim pristopom k preprečenju nabiranja ledu in sreža, ki večinoma temeljijo na obdelavi površin, s čimer se prepreči ali vsaj zakasni nabiranje in zmrzovanje vode ali vlage oz. se olajša odstranjevanje že zmrznjene vode.

Za učinkovit razvoj funkcionaliziranih površin za obvladovanje problemov z zmrzovanjem in sreženjem je potrebno ustrezno eksperimentalno ovrednotenje obnašanja površin. Pri tem se večinoma osredotočamo na določanje temperature, pri kateri nastopi zmrzovanje na površino odložene kapljice, ali na določanje časovnega zamika med začetkom ohlajanja kapljice do začetka zmrzovanja. Zaželen rezultat pri razvoju funkcionaliziranih površin sta

znižanje temperature začetka zmrzovanja in/ali podaljšanje časovnega zamika. Da je ovrednotenje ponovljivo in primerljivo z meritvami drugih raziskovalcev, mora biti izvedeno pod nadzorovanimi pogoji. Za zagotavljanje slednjih je potrebna ustrezna merilna proga, katere razvoj predstavljamo v nadaljevanju. Najprej so predstavljene ključne teoretične osnove procesa zmrzovanja skupaj z navedbo ključnih karakteristik, ki jih mora merilna proga zagotavljati. V nadaljevanju so predstavljene posamezne rešitve skupaj z ovrednotenjem karakteristik proge z vidika zagotavljanja želenih temperatur in atmosfere. V zadnjem delu so primerjani rezultati ovrednotenja procesa zmrzovanja vodnih kapljic, ki smo jih z razvito merilno progo izvedli na neobdelani površini in dveh superhidrofobnih strukturiranih površinah.

2. Teoretične osnove

Do zmrzovanja vode lahko pride preko zmrzovanja vodne pare (tj. vlage) v zraku, kar imenujemo sreženje, ali preko zmrzovanja makroskopskih kapljic vode. Pri slednjem procesu zabeležimo značilen potek temperature kapljice, ki je shematsko prikazan na sliki 1. Pri ohlajanju kapljice se slednja običajno podhladi pod temperaturo strjevanja (ledišče oz. tališče), do začetka nastajanja ledu pa pride v podhlajeni kapljici. Po nukleaciji najprej nastopi proces hitrega zmrzovanja (t. i. rekalescenca), kjer v kapljici nastane zmes vode in ledenih kristalov, temperatura pa se dvigne do ledišča. Nato sledi počasnejši del zmrzovanja, kjer se preko kapljice pomika fronta strjevanja, nato pa se celotna kapljica ohladi na temperaturo površine oz. okolice, kjer se nahaja.



Slika 1: Proces zmrzovanja vodne kapljice. Povzeto po [9].

Na proces zmrzovanja vodne kapljice vpliva večje število dejavnikov, ki popisujejo njene lastnosti in interakcijo z okolico, v kateri se nahaja. Večje kapljice teoretično potrebujejo daljši čas, da popolnoma zmrznejo, zaradi večje termične mase. Na kapljico med

ohlajanjem in zmrzovanjem znatno vpliva okolica, v kateri se nahaja; predvsem so pomembni tlak, relativna vlažnost in temperatura. Kombinacija omenjenih parametrov vpliva na izhlapevanje kapljice ali na pojav kondenzacije vlage na njeni površini [10]. Zelo

pomembna je interakcija kapljice s površino, na kateri se ohlaja; ključna parametra sta omočljivost površine in njena morfologija. Zakasnitev zmrzovanja se pogosto poskuša doseči z zmanjšanjem dejanskega stika kapljic s površino, tj. z uporabo superhidrofobnih površin v Cassie-Baxterjevem režimu omočenja. Poleg lastnosti površine je pomemben tudi material vzorca, predvsem s stališča difuzivnosti, efuzivnosti in termične mase. Na proces zmrzovanja lahko vplivata tudi način ohlajanja kapljice (preko hladne površine, s tokom hladnega plina okrog kapljice ipd.) in hitrost ohlajanja.

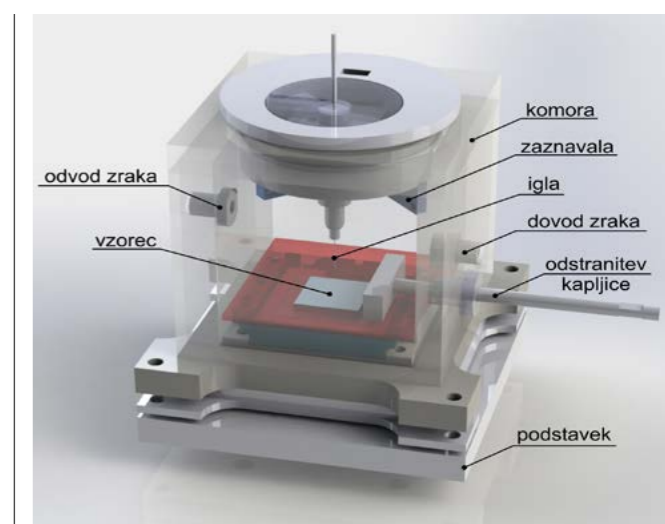
Posledično je za zanesljivo in ponovljivo izvajanje eksperimentov potrebno obvladovanje večjega števila parametrov, kar je opisano v naslednjem poglavju skupaj z rešitvami v okviru razvoja lastne merilne proge.

3. Metodologija

Pri zasnovi merilne proge smo upoštevali naslednje omejitve oz. cilje, ki izvirajo iz opazovanega procesa in opreme, ki je na voljo za spremljanje procesa zmrzovanja:

- Merilna proga mora biti umeščena v komoro z zaprto atmosfero z nadzorovano vlažnostjo.
- Komora mora biti prozorna, da je možno opazovanje pojavov v njej s hitrotekočo kamero. Dimenzije morajo biti ustrezno majhne, da je možno uporabiti objektivne z visoko povečavo, ki imajo majhno delovno razdaljo.
- Kapljica se mora hitro ohladiti na želeno temperaturo, ki mora biti stabilna. Predvideno območje za izvajanje meritev je med 0 °C in -35 °C.
- Kapljica mora biti odložena na kovinsko površino, ki jo je možno odstraniti iz sistema.
- Komora mora vsebovati sistem za generacijo vodnih kapljic na zahtevo, kapljice pa morajo imeti primerljive volumne.
- Nadzorni sistem mora omogočati spremljanje relativne vlažnosti in temperature v komori, hkrati pa mora biti beležena temperatura vzorca, na katerega se odloži kapljica.

3D model razvite komore kot osrednjega dela merilne proge je prikazan na sliki 2. Posamezne konstrukcijske rešitve so opisane v sledečih podpoglavjih.



Slika 2: 3D model komore merilne proge.

3.1 KOMORA

Komora je sestavljena iz prozornega akrilnega (PMMA) stekla debeline 10 mm z notranjimi dimenzijami 60 × 60 × 70 mm.

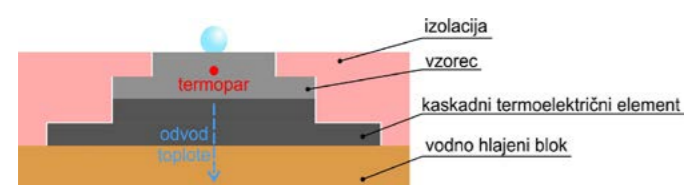
3.2 ATMOSFERA

Za zagotavljanje ustrezne atmosfere v komori je uporabljen obtočni desikator lastne konstrukcije. Desikator črpa zrak iz komore, ki nato potuje skozi nasuti sloj ~500 g silika gela in se vrača v komoro. V komori je na posebnem perforiranem nosilcu (ni prikazan na sliki 2) nameščen dodatni silika gel. S to rešitvijo je zagotovljena vlažnost med 15 % in 20 % pri temperaturi zraka v komori med 25 °C in 30 °C.

3.3 OHLAJANJE POVRŠINE IN KAPLJICE

Za ohlajanje površine in kapljice na njej je uporabljen hladilni sistem lastne zasnove, prikazan na sliki 3, ki temelji na kaskadnem (dvostopenjskem) termoelektričnem elementu AP2-162-1420-1118 (European Thermodynamics Ltd.). Zgornja (hladna) površina elementa meri 30 × 30 mm, pri temperaturni razliki 0 K je zmožen odvajati 29,3 W, pri toplotnem toku 0 W pa je zmožen vzpostaviti temperaturno razliko 95 K. Na hladni strani termoelektričnega elementa je nameščen vzorec, katerega zgornja (aktivna) površina meri 20 × 20 mm. Topla stran termoelektričnega elementa je hlajena z vodnim blokom, ki je povezan na zaprto hladilno zanko, katera prenaša toploto na okoliški zrak. Komponente so stisnjene skupaj s polimernimi kosi, ki hkrati zagotavljajo izolacijo, ustrezen termični stik pa je zagotovljen z nanosom

termalne paste med termoelektričnim elementom in ostalima komponentama, s katerima izmenjuje toploto. Za napajanje termoelektričnega elementa in krmiljenje njegovega delovanja je uporabljen namenski krmilnik Meerstetter TEC-1123-HV, ki preko PID krmiljenja uravnava napajanje termoelektričnega elementa za doseganje želene temperature vzorce. Slednja je beležena s termoparom tipa K, ki je vezan v povratno zanko s krmilnikom.



Slika 3: Shema hladilnega dela merilne proge v prerezu.

3.4 VZORCI

Vzorci so izdelani iz aluminijeve zlitine 1050A, ki vsebuje vsaj 99,5 % aluminija, ima visoko toplotno prevodnost in je pogosta uporabljena v toplotni in hladilni tehniki zaradi dobre preoblikovalnosti in korozijske odpornosti. V vsak vzorec je vlepljen termopar tipa K. Alternativno se lahko na merilni progi uporabijo tudi vzorci iz drugih materialov.

3.5 GENERACIJA VODNIH KAPLJIC

Za nanos vodnih kapljic na testno površino na zahtevo je uporabljena mikrofluidična črpalka s 5 mL stekleno brizgo. Dvakrat destilirano in naknadno filtrirano vodo črpalka v komoro dovaja skozi iglo dimenzije »34G«, na kateri se oblikujejo kapljice povprečnega volumna 3,7 μL (premer $\sim 1,9$ mm). Volumni kapljic so primerljivi z vrednostmi iz literature, ki jih uporabljajo drugi avtorji.

3.6 SPREMLJANJE PARAMETROV ATMOSFERE

Za določanje in shranjevanje parametrov, ki popisujejo stanje atmosfere v komori, sta uporabljena senzorja SparkFun Qwiic SHTC3 (merjenje relativne vlažnosti in temperature) in SparkFun Qwiic MicroPressure (merjenje tlaka). Podatki so zbrani z razvijalno ploščo SparkFun RedBoard Qwiic, sproti izpisani na LCD zaslonu in shranjeni na SD kartico.

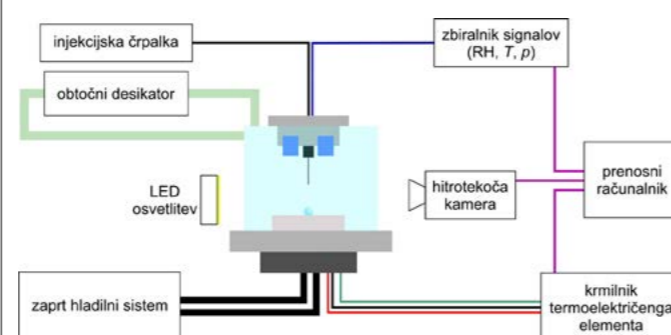
3.7 SNEMANJE PROCESA ZMRZOVANJA

Za opazovanje procesa zmrzovanja je uporabljena hitrotekoča kamera Photron Mini UX100 z makro

objektivom. Kamera omogoča opazovanje pojavov z več tisoč slikami na sekundo pri polni ločljivosti, z objektivom pa je dosežena povečava približno 3 μm na slikovno točko. Pri opazovanju procesa zmrzovanja je uporabljena LED osvetlitev bele barve, ki je postavljena za opazovano kapljico za zagotavljanje čim večjega kontrasta med kapljico in okolico.

3.8 PERIFERNA OPREMA

Na sliki 4 je prikazana shema celotne merilne proge s periferno opremo. Opazovani proces poteka v komori in je spremljan s hitrotekočo kamero z LED osvetlitvijo. Vlažnost atmosfere v komori je prilagojena z obtočnim desikatorjem, njeni parametri pa so popisani preko zbiralnika signalov. Hlajenje je zagotovljeno s termoelektričnim elementom, ki ga napaja in krmili PID krmilnik, njegova topla stran pa je hlajena z zaprtim hladilnim sistemom. Kapljico na površino nanese z injekcijsko črpalko. Za krmiljenje opreme in zbiranje signalov ter posnetkov je uporabljen prenosni računalnik.



Slika 4: Shema celotne merilne proge skupaj s periferno opremo.

3.9 MERILNI PROTOKOL

Pri izvajanju meritev smo uporabili naslednji merilni protokol. Na čisto površino vzorca smo nanegli kapljico vode in z uporabo desikatorja znižali relativno vlažnost v komori. Nato smo z uporabo krmilnika termoelektričnega elementa nastavili želeno temperaturo vzorca in začeli z ohlajanjem vzorca ter z beleženjem časa. Ko je kapljica zmrznila (ob nastopu nukleacije), smo ustavili beleženje časa in shranili posnetek hitrotekoče kamere. Meritve smo na različnih površinah in pri različnih temperaturah površine večkrat ponovili.

4. Rezultati in diskusija

4.1 OVREDNOTENJE KARAKTERISTIKE OHLAJANJA

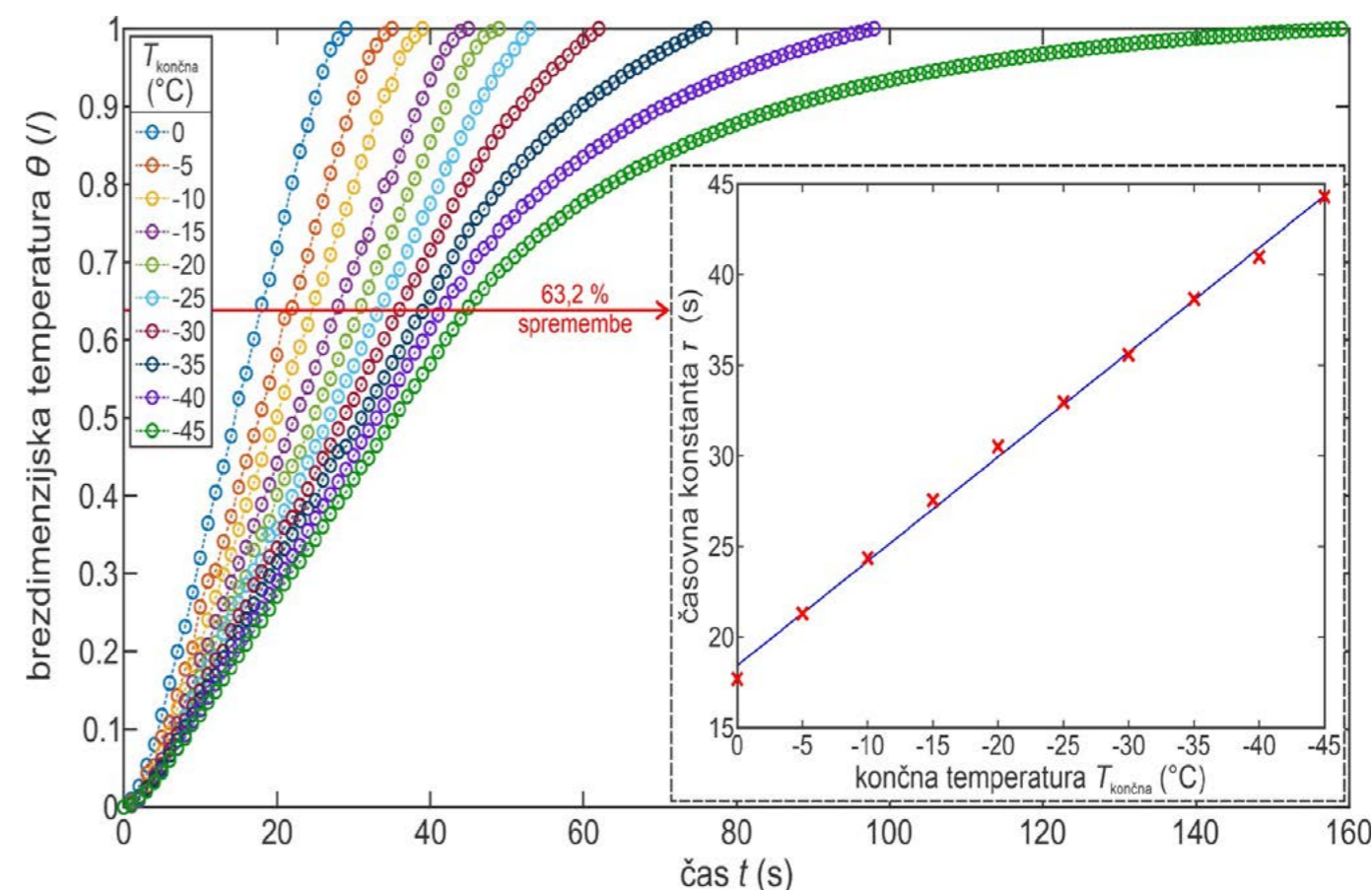
Za določitev hitrosti ohlajanja vzorca smo izvedli serijo meritev, pri kateri smo določali časovno odvisnost temperature površine pri ohlajanju in ob tem inkrementalno spreminjali končno temperaturo površine. Tako smo pridobili podatke o termični časovni konstanti spremembe temperature površine od začetne (sobne) temperature do končne temperature. Spremembe temperature med začetno temperaturo $T_{\text{začetna}}$ in končno temperaturo $T_{\text{končna}}$ v ustaljenem stanju smo v poljubnem trenutku i obravnavali brezdimenzijsko v skladu z enačbo:

$$\theta_i = \frac{T_i - T_{\text{končna}}}{T_{\text{začetna}} - T_{\text{končna}}} \quad (1)$$

Določili smo naslednjo linearno odvisnost časovne konstante v sekundah, pri kateri se zgodi 63,2 % celotne spremembe temperature $T_{\text{začetna}} - T_{\text{končna}}$ od končne temperature $T_{\text{končna}}$, ki jo želimo doseči:

$$\tau = -0,576T_{\text{končna}} + 18,4 \text{ [s]} \quad (2)$$

Slika 5 prikazuje zabeležene brezdimenzijske temperaturne spremembe pri oddaljevanju od začetnega stanja, kjer je vrednost brezdimenzijske temperature 0, proti končnemu stanju, kjer je vrednost brezdimenzijske temperature 1. Razvidno je, da z razvito eksperimentalno progo temperaturno razliko ~ 25 K glede na začetno (tj. sobno) temperaturo ustvarimo v manj kot 30 s, za doseganje visokih temperaturnih razlik pa je potreben daljši čas, ki pri končni temperaturi 45 °C (tj. ~ 70 K temperaturne razlike glede na začetno temperaturo) znaša 160 s. Za vse primere so termične časovne konstante skupaj z njihovo linearno interpolacijo prikazane na vložku slike 5.



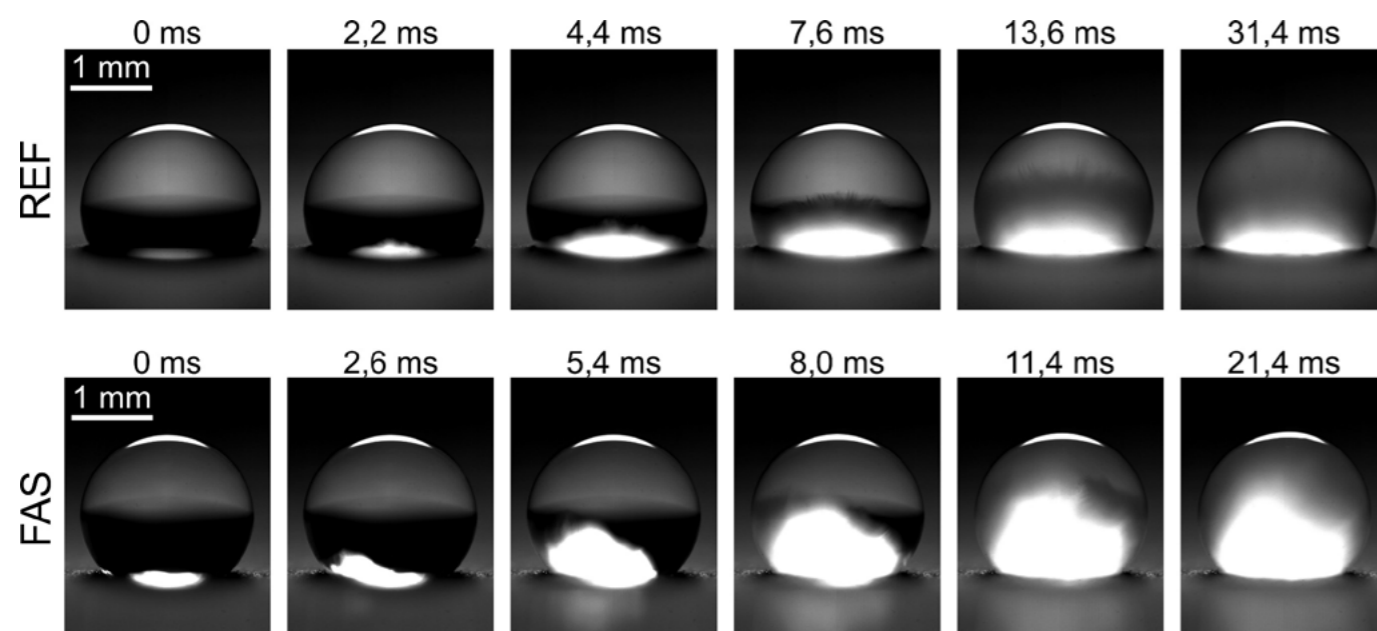
Slika 5: Spreminjanje brezdimenzijske temperature v odvisnosti od časa za različne končne temperature vzorca in pripadajoče časovne konstante.

Glede na prikazane rezultate lahko zaključimo, da bo razvita merilna proga omogočala doseganje ustreznih temperatur za izvedbo eksperimentov z zmrzovanjem vodnih kapljic. Hkrati bo zaradi zmožnosti zelo hitrega ohlajanja površine napaka pri določitvi časa zmrzovanja, ki ga tipično začnemo meriti s trenutkom začetka ohlajanja površine, majhna, saj v večini primerov pričakujemo čase zmrzovanja od nekaj minut do nekaj deset minut.

4.2 OPAZOVANJE PROCESA REKALESCENCE IN POTOVANJA FRONTE ZMRZOVANJA

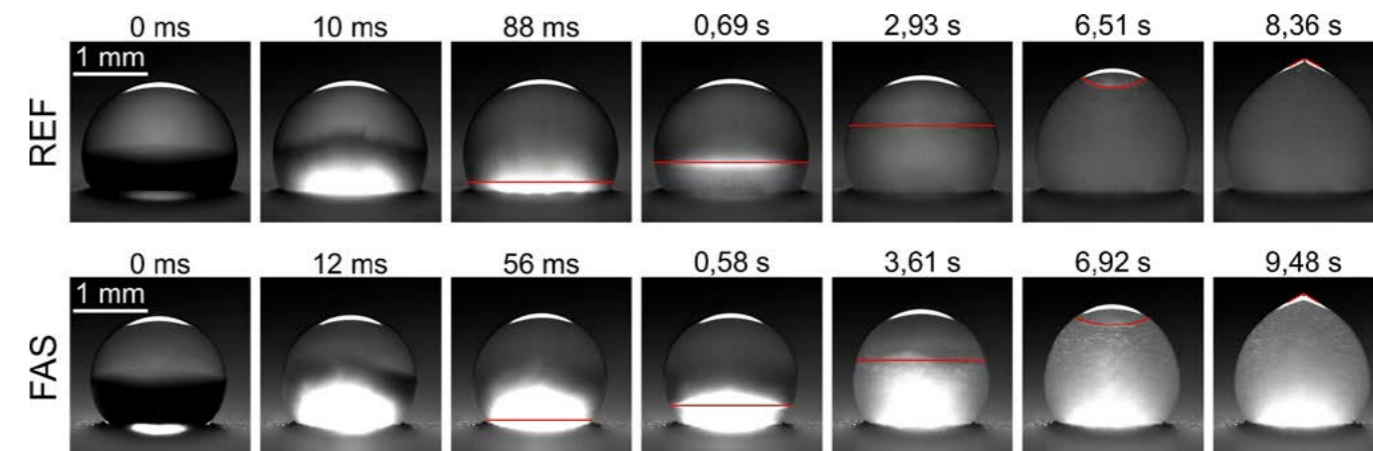
Uporabnost razvite eksperimentalne proge za opazovanje procesov med zmrzovanjem z uporabo hitrotekoče kamere smo ovrednotili na primeru procesa rekalescence in potovanja fronte zmrzovanja za dve aluminijasti površini z različnimi lastnostmi. Prva površina ni imela posebne obdelave (oznaka REF), druga pa je bila lasersko strukturirana in hidrofobizirana ter je izkazovala superhidrofobnost (oznaka FAS). Obe ovrednotenji sta bili izvedeni pri temperaturi površine $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Proces rekalescence smo posneli pri hitrosti zajema 5000 slik na sekundo, saj rekalescence tipično traja le nekaj deset milisekund. Slika 6 prikazuje sekvenci slik zajetih na referenčni površini (zgornja vrstica) in na superhidrofobni površini (spodnja vrstica). V obeh primerih je zabeleženo trajanje procesa rekalescence ustrezalo pričakovanemu, saj se je proces zaključil v 31,4 ms na referenčni površini oz. v 21,4 ms na superhidrofobni površini. Znatnih razlik med obema površinama nismo zabeležili z izjemo pojava dendritne strukture med rekalescenco na referenčni površini, ki je razvidna na slikah pri 7,6 ms in 13,6 ms.



Slika 6: Potek procesa rekalescence v odvisnosti od časa na referenčni površini (REF; zgoraj) in superhidrofobni površini (FAS; spodaj).

Za spremljanje potovanja fronte zmrzovanja smo uporabili nižjo hitrost zajema slik (500 slik na sekundo), saj je proces mnogo daljši od rekalescence (trajanje $\sim 10\text{ s}$). Na sliki 7 sta prikazani sekvenci slik zajetih na referenčni površini (zgornja vrstica) in na superhidrofobni površini (spodnja vrstica). V obeh sekvencah prva slika prikazuje potek rekalescence v prvih milisekundah po začetku zmrzovanja, na nadaljnjih slikah pa je z rdečo barvo prikazano potovanje fronte zmrzovanja. Razvidno je, da se ob zaključku zmrzovanja (tj. ko fronta zmrzovanja doseže vrh kapljice) fronta izrazito ukrivi, kar vodi v pojav ostre konice na vrhu kapljice. Slednji pojav je dobro poznan v literaturi, kot konice pa naj bi bil konstanten [11,12].

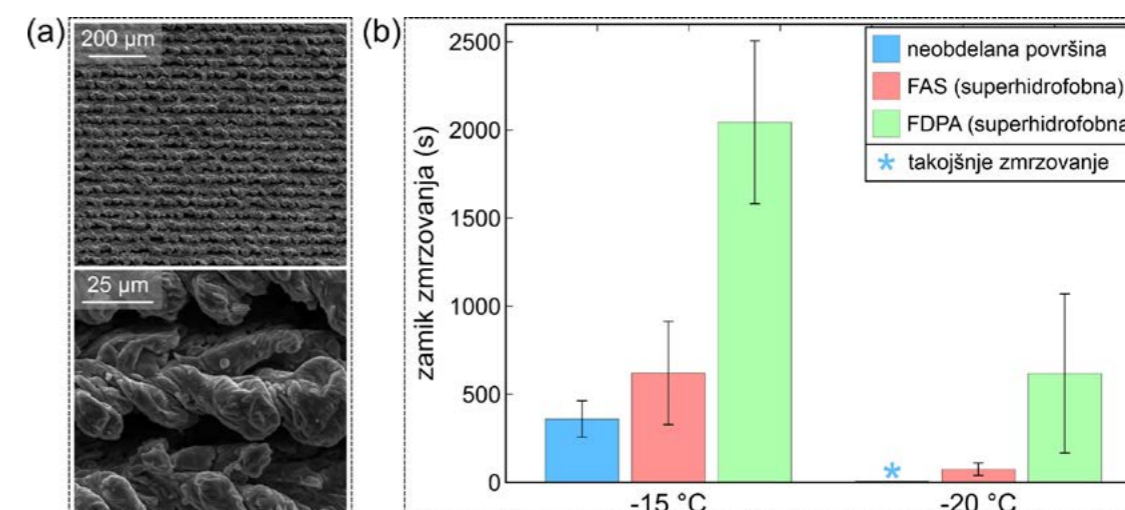


Slika 7: Potek zmrzovanja vodne kapljice v odvisnosti od časa na referenčni površini (REF; zgoraj) in superhidrofobni površini (FAS; spodaj). Z rdečo barvo je označeno potovanje fronte zmrzovanja oz. tvorba konice na zadnji sliki.

Na obeh površinah smo dosegli ustrezno vizualizacijo kapljice med rekalescenco oz. zmrzovanjem. Zajeti posnetki so uporabni tudi kot vhodni podatki za strojno obdelavo z namenom spremljanja potovanja fronte zmrzovanja v odvisnosti od časa in popisa spreminjanja oblike kapljice med zmrzovanjem zaradi spremembe volumna (oz. gostote) vode ob prehodu iz kapljevine v led.

4.3 ZAKASNITEV ZMRZOVANJA Z UPORABO HIDROFOBNIH POVRŠIN

V sklepnem delu raziskave smo določili zamik zmrzovanja vodnih kapljic na neobdelani referenčni površini in dveh različnih superhidrofobnih površinah. Referenčna površina je bila le ročno brušena z brusnim papirjem P1200 in je označena s kratico REF. Obe superhidrofobni površini sta bili najprej obdelani z nanosekundnim bliskovnim laserjem (JPT Opto-electronics Co. Ltd., M7 30 W MOPA; $\lambda = 1064\text{ nm}$), s katerim smo izdelali vzporedne mikrokanale z medsebojnim razmikom $40\text{ }\mu\text{m}$, ki so prikazane v obliki posnetka vrstičnega elektronskega mikroskopa na sliki 8(a). Pri laserski obdelavi smo uporabili hitrost skeniranja 500 mm s^{-1} , frekvenco bliskov 500 kHz , dolžino bliska 45 ns in povprečno fluenco bliskov $55,6\text{ J cm}^{-2}$. Prvo površino smo hidrofobizirali s pomakanjem v etanolno raztopino fluoroalkil silana (oznaka FAS), drugo pa z nanosom raztopine fluoroalkil fosfonske kisline v izopropanolu (oznaka FDPA). Obe obdelani površini sta izkazovali superhidrofobnost s kotom omočenja nad 160° , kotom zdrsa kapljice pod 5° in histerezo kota omočenja pod 5° .



Slika 8: SEM posnetki morfologije obdelanih površin FAS in FDPA (a) ter zamik zmrzovanja vodne kapljice na treh testiranih površinah pri dveh različnih temperaturah vzorca (b).

Rezultati na sliki 8(b) kažejo, da obe superhidrofobni površini pomembno podaljšata čas do začetka zmrzovanja vodne kapljice v primerjavi z neobdelano površino. Pri temperaturi vzorca -15 °C je površina FAS približno podvojila zamik zmrzovanja, na površini FDPA pa smo zabeležili več kot petkrat daljši zamik. Pri temperaturi -20 °C se je na vseh površinah znatno znižal zamik do začetka zmrzovanja. Pri tej temperaturi je kapljica na referenčni površini takoj zmrznila, na obeh superhidrofobnih površinah pa smo zabeležili zakasnitev. Slednja je znašala 75 s na površini FAS in kar 618 s na površini FDPA. Rezultati so torej pokazali, da je površina FDPA zmožna signifikantno daljše zakasnitve začetka zmrzovanja v primerjavi s površino FAS kljub temu, da obe površini izkazujeta superhidrofobne lastnosti, kar nakazuje, da zgolj meritve kota omočenja na posamezni površini niso dovolj za napoved njihovih lastnosti pod pogoji zmrzovanja.

5. Zaključek

V okviru raziskave smo zasnovali merilno preizkuševališče za ovrednotenje procesa zmrzovanja vodne kapljice s hitrotekočo kamero. Ustrezno atmosfero smo zagotovili z uporabo zaprte komore in obtočnega desikatorja za zmanjšanje vlažnosti, ohlajanje testne površine pa smo vršili preko dvostopenjskega kaskadnega termoelektričnega hladilnika. S perifernimi sistemi lahko spremljamo temperaturo, vlažnost in tlak v komori ter na površini nanesimo vodne kapljice ali jih iz nje odstranimo. Prozorna komora omogoča vizualizacijo procesov v komori z uporabo hitrotekoče kamere in različne smeri osvetljevanja opazovanega objekta.

Preko eksperimentalnega ovrednotenja smo pokazali, da lahko s termoelektričnim elementom vzpostavimo temperaturno razliko glede na začetno (sobno) temperaturo do 70 K, pri čemer je ohlajanje zelo hitro, saj za doseganje temperature vzorca 30 °C potrebujemo le dobro minuto. Na dveh površinah smo posneli proces zmrzovanja vodne kapljice, pri čemer smo se osredotočili tako na popis procesa rekalescence, ki smo ga posneli s 5000 slikami na sekundo, in na spremljanje potovanja fronte zmrzovanja, katere pozicijo smo opazovali s 500 slikami na sekundo. V sklepnem delu smo pokazali možno uporabo razvitega merilnega preizkuševališča za ovrednotenje zamika zmrzovanja, ki ga dosežemo s funkcionaliziranimi površinami. Na dveh superhidrofobnih površinah pripravljenih s kombinacijo laserskega strukturiranja in nanosa sredstva z nizko površinsko energijo, smo

pod enakimi pogoji zabeležili znatno daljši zamik med začetkom ohlajanja in začetkom procesa rekalescence (tj. daljši čas zmrzovanja).

Literatura

- [1] X. Zhou, Y. Sun, J. Liu: Designing Anti-Icing Surfaces by Controlling Ice Formation. *Advanced Materials Interfaces* 8 (2021).
- [2] M. Rafati Nasr, M. Fauchoux, R.W. Besant, C.J. Simonson: A review of frosting in air-to-air energy exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014) str. 538–554.
- [3] Z. Zhang, H. Zhang, S. Yue, W. Zeng: A Review of Icing and Anti-Icing Technology for Transmission Lines. *Energies* 16 (2023).
- [4] N. Dalili, A. Edrissy, R. Carriveau: A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) str. 428–438.
- [5] E. Bisengimana, J. Zhou, M. Binama, K. Zhao, S. Abbas, Y. Yuan: The frosting and soil imbalance performance issues of building heat pumps: An overview. *Energy and Buildings* 273 (2022) str. 112387.
- [6] M. Song, S. Deng, C. Dang, N. Mao, Z. Wang: Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting. *Applied Energy* 211 (2018) str. 1150–1170.
- [7] Y. Li, W. Ma, Y.S. Kwon, W. Li, S. Yao, B. Huang: Solar Deicing Nanocoatings Adaptive to Overhead Power Lines. *Advanced Functional Materials* 32 (2022) str. 1–9.
- [8] D. Badri, C. Toublanc, O. Rouaud, M. Havet: Review on frosting, defrosting and frost management techniques in industrial food freezers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021) str. 111545.
- [9] J.E. Castillo, Y. Huang, Z. Pan, J.A. Weibel: Quantifying the Pathways of Latent Heat Dissipation during Droplet Freezing on Cooled Substrates. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 164 (2021).
- [10] J. Sebilliau, E. Ablonet, P. Tordjeman, D. Legendre: Air humidity effects on water-drop icing. *Physical Review E* 104 (2021) str. 1–7.
- [11] A.G. Marín, O.R. Enríquez, P. Brunet, P. Colinet, J.H. Snoeijer: Universality of tip singularity formation in freezing water drops. *Physical Review Letters* 113 (2014).
- [12] X. Zhang, X. Wu, J. Min, X. Liu: Modelling of sessile water droplet shape evolution during freezing with consideration of supercooling effect. *Applied Thermal Engineering* 125 (2017) str. 644–651.

TRAJNOSTNI UČINKI POVIŠANJA STOPNJE LOKALNE ENERGETSKE SAMOOSKRBE PRI SISTEMU DALJINSKEGA OGREVANJA STAVB

Henrik Gjerkeš^{a,b,*}, Tomaž Jakin^c

^a Univerza v Novi Gorici, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica, Slovenija

^b Gradbeni inštitut ZRMK, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

^c Občina Ajdovščina, Cesta 5. maja 6a, 5270 Ajdovščina, Slovenija

*Korespondenčni avtor: **Henrik Gjerkeš**

Univerza v Novi Gorici

Vipavska 13

5000 Nova Gorica

Slovenija

Tel.: +386 5 6205 830

E-mail: henrik.gjerkes@ung.si

Kratki znanstveni prispevek / Short scientific paper

Povzetek

Stavbestanovanjskega kompleksa v Ajdovščini se ogrevajo s sistemom daljinskega ogrevanja s kotlom na zemeljski plin. Podajamo analizo treh ukrepov, ki z upoštevanjem značilnosti lokacije in populacije stanovalcev izpolnjujejo okoljsko, ekonomsko in družbeno-socialno dimenzijo trajnosti: zmanjšanje toplotnih izgub vročevodnega omrežja, zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami in zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami in sončno elektrarno. Rezultati analize kažejo, da ima največje pozitivne učinke zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami in sončno elektrarno na strehah stavb. Stanovanjski kompleks postane z vidika ogrevanja energetsko samozadosten, v fazi obratovanja ne rabi primarne energije, ne obremenjuje okolja z lokalnimi ali toplogrednimi emisijami in uporablja izključno obnovljive vire. Glede na aktualne cene se letni strošek za energent zniža za 87,8 %, vračilna doba investicije znaša 4 leta, neto bilanca investitorja po 20 letih znaša +1.894.999 EUR ob pogoju, da se stanovalcem račun za ogrevanje zniža za 50 %.

Ključne besede: sistem daljinskega ogrevanja; trajnostna energija; toplotne črpalke; zemeljski plin; sončne elektrarne

Article info

Article history

Received: 12th September 2023

Received in revise from 15th September 2023

Accepted 22th September 2023

Available online 29th September 2023

Abstract

The buildings of the residential complex in Ajdovščina are heated using a district heating system with a natural gas boiler. We present an analysis of three measures that fulfill the environmental, economic, and socio-social dimensions of sustainability by taking into account the characteristics of the location and the population of residents: reducing heat losses in the district heating network, replacing natural gas with heat pumps, and replacing natural gas with heat pumps and a solar power plant. The results of the analysis show that the replacement of natural gas with heat pumps and a solar power plant on the rooftops of the buildings has the greatest positive effects. The residential complex becomes energetically self-sufficient in terms of heating, requires no primary energy during operation, has no significant impact to the environment with local or greenhouse gas emissions, and utilizes only renewable sources. Given current prices, the annual fuel cost is reduced by 87.8%, the payback period for the investment is 4 years, and the net balance for the investor after 20 years is +1,894,999 EUR, provided that the residents' heating bills are reduced by 50%.

Keywords: remote heating system; sustainable energy; heat pumps; natural gas; solar power plants

1. Uvod

Sistemi daljinskega ogrevanja (SDO) so priporočljiv in potencialno trajnostni način dovoda toplote za ogrevanje stavb predvsem v strnjenih naseljih [1]. V Sloveniji je bilo v letu 2022 registriranih 109 SDO, ki s toploto oskrbujejo 108.794 odjemalcev oz. 98.906 gospodinjstev. 65 SDO se šteje med energetske učinkovite, pri čemer jih 54 vsaj 50 % toplote proizvede posredno ali neposredno iz obnovljivih virov energije (OVE) [2]. Manj kot polovica SDO izkorišča OVE, kar predstavlja velik potencial in možnosti za razogljičenje stavbnega sektorja v Sloveniji.

SDO zagotavlja zanesljivo oskrbo stavb s toploto, strokovno vzdrževanje in upravljanje, (potencialno) nižje stroške ogrevanja in ob uporabi OVE okolju prijazen način ogrevanja. Pomanjkljivosti SDO so toplotne izgube v vročevodnem omrežju, visoki stroški zaradi gradnje in vzdrževanja vročevodov. Toplotne izgube v razvodih se lahko znižajo z dodatno toplotno izolacijo in/ali nižanjem temperature ogrevne vode. Trend razvoja na področju oskrbe s trajnostno energijo gre v smer integriranih daljinskih sistemov z nadzorovanimi emisijami in dvosmerno interakcijo z uporabniki [3, 4].

Bivalni prostori stanovanjskega kompleksa v Ajdovščini, ki so predmet pričujoče analize, se ogrevajo s kotlom na zemeljski plin (ZP) in vročevodnim razvodom. SDO spada med energetske neučinkovite sisteme [2]. Zadnje posodobitev sistema daljinskega ogrevanja z zamenjavo kurilnega olja z ZP in z nižanjem temperature ogrevne vode na 65 °C so izvedli v letu 2016 [5].

Z upoštevanjem značilnosti lokacije in populacije stanovalcev smo izbrali in analizirali tri ukrepe, ki izpolnjujejo okoljsko, ekonomsko in družbeno-socialno dimenzijo trajnosti:

1. zmanjšanje toplotnih izgub vročevodnega omrežja SDO,
2. zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami,
3. zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami in sončno elektrarno.

Tudi zamenjava zemeljskega plina z lesno biomaso bi lahko zagotovila ogrevanje stavb s trajnostno energijo, vendar smo pri proučitvi lokacije ugotovili, da bi bila vgradnja kotlovnice na lesno biomaso v tako strnjenem urbanem prostoru neprimerna zaradi hrupa med obratovanjem in dostavo, problematična bi bila tudi umestitev relativno velikega zalogovnika za lesne sekance [5].

2. Metode in izhodišča

Pri analizi variant dovoda toplote stanovanjskemu kompleksu v Ajdovščini smo izvedli meritve, analizo elementov SDO, oceno ekonomskih kazalnikov in oceno vplivov na okolje v skladu z veljavno zakonodajo [6]. Predlagani ukrepi temeljijo na trajnostnih kazalnikih in oceni izvedljivosti v danih okoliščinah. Cilji za učinkovito rabo energije (URE) narekujejo uporabo tehnologij in ukrepov, ki zahtevajo manj energije za doseganje enakih ciljev ob nespremenjeni ali boljši kakovosti bivanja v stavbah in imajo pomembno vlogo pri zelenem prehodu v nizkoogljično skupnost. Okoljski in ekonomski vidiki sanacije vročevoda, zamenjava zemeljskega plina s toplotnimi črpalkami in zamenjava zemeljskega plina s kombinacijo toplotnih črpalk in sončne elektrarne so podlaga za oceno finančnih in okoljskih učinkov predlaganih ukrepov.

2.1 STANOVANJSKI KOMPLEKS IN SISTEM DALJINSKEGA OGREVANJA

Analiziran stanovanjski kompleks, prikazan na sliki 1, se nahaja v Ajdovščini. Izvira iz začetka 80. let in je sestavljen iz 354 bivalnih enot v 15 objektih. Objekti v stanovanjski soseski so priklopljeni na lokalni sistem daljinskega ogrevanja (SDO), ki je sestavljen iz treh krogotokov. Krogotoka s toplotnima postajama za ogrevanje objekta 1-2 in objekta 3-4 se nahajata v toplotni postaji, ki prilagaja temperaturo ogrevne vode glede na zunanjo temperaturo. Objekti na teh dveh vročevodih (1-4) porabijo povprečno 35 % končne energije. Ogrevanje objektov 5-16 je izvedeno z vročevodom s konstantno temperaturo vtoka. Razvod povezuje toplotni razdelilnik s toplotnimi podpostajami v posameznih objektih. Vročevod v skupni dolžini 380 m ogreva 18.240,7 m² površine v stavbah.

Pretok ogrevne vode zagotavlja frekvenčno regulirana obtočna črpalka Grundfos, tip TPE(D), serija 2000, moči 2,2 kWh. Cevovod je zunanjskega premera 219 mm, debelina stene cevi je 6,3 mm in masa 33 kg/m. Vročevod je izoliran s stekleno volno Tervol-S debeline 50 mm, ki je zaščitena z aluminijastim ovojem, in vgrajen v betonsko kineto s pokrovom v globini 1 m.



Slika 1: Stanovanjski kompleks

Centralna kotlovnica se nahaja v pritličnem delu objekta 1. in obsega 65 m². Nizkotemperaturni kotel proizvajalca Viessmann Vitocrossal 300 moči 1.120 kW je namenjen za obratovanje s plinskim, oljnim ali kombiniranim gorilnikom. Najvišja dopustna temperatura pretoka znaša 110 °C, najvišji dopustni obratovalni tlak je 6 bar. Nameščena je mehčalna naprava Mak CMC Minom 4V za zmanjševanje nabiranja kalcijevega karbonata na površinah sistema. Toplotne podpostaje za ogrevanje objektov 5-16 so regulirane s pomočjo štiripotnih ventilov, črpalke sekundarnega tokokroga in vremensko vodene regulacijske avtomatike Seltron Promatic WDC. Krivulja ogrevanja podaja odvisnost temperature vtoka ogrevne vode od temperature okolice in je izkustveno določena glede na mikrolokacijo objekta, toplotni ovoj stavbe in bivalne navade stanovalcev [5].

2.2 MERITVE IN IZRAČUNI

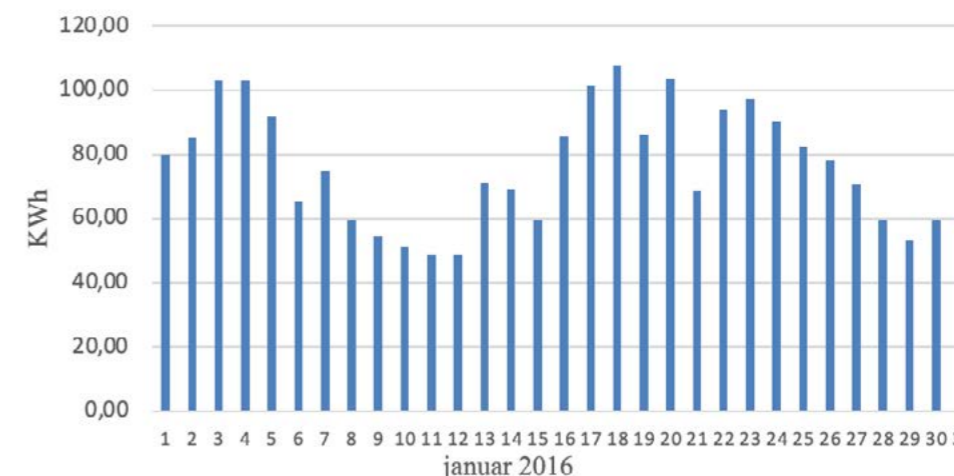
Meritve rabe toplotne energije so bile izvedene z glavnim kalorimetrom v kotlovnici in s kalorimetri Enerkon CF EHO II v toplotnih postajah objektov 1-16. Zaradi primerljivosti smo izmerjene podatke normirali na povprečne vremenske pogoje s pomočjo temperaturnega primanjkljaja [7].

Pri oceni zmanjšanja toplotnih izgub v vročevodu smo uporabili enačbo (1), s katero izračunamo zmanjšanje radialnega toplotnega toka v okrogli cevi debeline r₁ s Q_A na Q_B, če se debelina toplotne izolacije poveča z r_{2A} na r_{2B}:

$$\frac{Q_A}{Q_B} = \frac{(T_2 - T_{1B}) \cdot \ln\left(\frac{r_{2A}}{r_1}\right)}{(T_2 - T_{1A}) \cdot \ln\left(\frac{r_{2B}}{r_1}\right)} 100\% \quad (1)$$

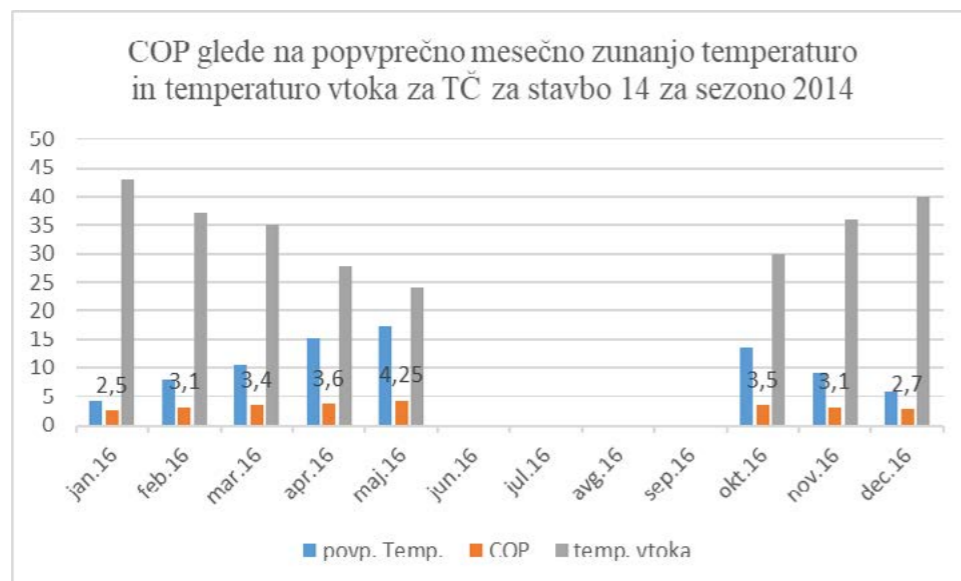
Učinke zamenjave ZP s toplotnimi črpalkami (TČ) smo ocenili na podlagi določitve potrebnih karakteristik TČ v vsaki stavbi. Izračun ne upošteva toplotnih izgub v vročevodu, ker je predviden priklop TČ neposredno na toplotno postajo vsakega objekta. Pri tem ukrepu predlagamo ohranitev vročevoda in plinskega kotla kot hladno varnostno rezervo.

Na sliki 2 je kot primer prikazana dnevna potrebna električna energija (EE) za ogrevanje objekta 14. Za dimenzioniranje moči TČ uporabimo podatke visokotemperaturne TČ Daikin Altherma 3 H HT [8]. Na osnovi meritev zunanje temperature in odvisnosti grelnega števila (COP) od zunanje temperature in temperature v kondenzatorju, ki definira temperaturo vtoka ogrevne vode, smo določili normirano urno in dnevno rabo EE za delovanje TČ v januarju 2016 za objekt 14.



Slika 2: Dnevna potrebna električna energija za delovanje toplotne črpalke za ogrevanje stavbe 14, določena na osnovi normiranih meritev v januarju 2016

Z normiranjem in integracijo dnevni vrednosti smo za stavbo 14 lahko določili povprečne mesečne vrednosti, slika 3.



Slika 3: Povprečne normirane mesečne vrednosti grelnega števila COP, zunanje temperature (modri stolpec) in temperature vtoka ogrevne vode (sivi stolpec) za stavbo 14

Na enak način smo določili potrebno velikost TČ in rabo EE tudi za ostale objekte.

Stanovanjski kompleks ima 6 objektov z južno oz. vzhodno orientacijo strehe in 5 objektov z jugozahodno orientacijo. Skupna uporabna površina strehe znaša 2.000 m² [5]. Upoštevali smo standardne monokristalne solarne module moči 290 W. Za 1 kWp instalirane moči je potrebno 3,4 modula. Z upoštevanjem izpostavljenosti občasni burji, ki vpliva na velikost in pritrditev solarnih modulov ocenimo, da je za 1 kWp instalirane moči potrebno 7 m² strehe. Glede na razpoložljivo primerno površino je mogoče na streho namestiti sončno elektrarno moči SE 285 kWp. Za strehe z naklonom 15° lahko pričakujemo povprečno letno proizvodnjo 1.100 kWh/kWp EE [9]. Zaradi ovir v okolici modulov (dimniki, rob strehe, ipd.) smo v nadaljevanju upoštevali nižjo pričakovano proizvodnjo EE 1.000 kWh/kWp, kar da 285.000 kWh EE na leto. Predvidena proizvodnja EE iz SE zadošča za ogrevanje bivalnih prostorov, saj znaša ocena normirane letne EE za pogon TČ 268.542 kWh, tabela 1.

3. Rezultati in diskusija

Ukrepi morajo enakomerno izpolnjevati okoljsko, ekonomsko in družbeno-socialno dimenzijo, da jih

lahko označimo kot trajnostne. Vplivi ukrepov se med seboj prepletajo, zato je težko izolirano oceniti npr. ekonomski vidik, ne da pri tem omenimo npr. družbeno-socialno dimenzijo vsaj v kontekstu narodnogospodarskih in strateških učinkov.

Vplivi na okolje ogrevanja stanovanjskega kompleksa smo izrazili z rabo končne in primarne energije, v deležu obnovljivih virov energije (OVE) in v (standardni) emisiji CO₂ v fazi delovanja sistema.

Izhodiščno stanje za oceno učinkov predlaganih ukrepov so normirane meritve iz leta 2016 [5]. Izmerjena in normirana letna raba končne energije za ogrevanje bivalnih prostorov znaša 959.846 kWh. Energent je zemeljski plin (ZP), raba primarne energije znaša 1.055.831 kWh, emisija CO₂ pa 191.969 kg na leto. Normirani letni strošek za energent je 100.663 EUR, kar v 20 letih obratovanja SDO znese 2.013.253 EUR. Te vrednosti so vnesene v prvi stolpec tabele 1 in predstavljajo osnovo za kvantificiranje okoljskih in finančnih učinkov predlaganih ukrepov s ceno energentov iz drugega četrtletja leta 2023 [10].

Preglednica 1: Okoljski in finančni učinki predlaganih ukrepov glede na (normirano) referenčno stanje leta 2016

Normirane vrednosti	Referenčno stanje 2016 (ZP)	Zmanjšanje toplotnih izgub (ZP)	ZP -> TČ	ZP -> TČ + SE
Okoljski učinki				
Končna energija (kWh)	959.846	897.227 (-6,5 %)	268.542 (-66,7 %)	0 (-100 %)
Delež OVE (%)	0	0	78	100
Primarna energija (kWh)	1.055.831	986.950 (-6,5 %)	671.354 (-36,4 %)	0 (-100 %)
Emisije CO ₂ (kg)	191.969	179.445 (-6,5 %)	142.327 (-25,9 %)	0 (-100 %)
Finančni učinki (upoštevane so 5 % obrestna mera in stalne cene iz l. 2023)				
Višina investicije (€)	/	45.820	174.366	510.666
Strošek za energent (€/leto)	100.663	94.096 (-6,5 %)	67.968 (-32,5 %)	12.263 (-87,8 %)
Interna stopnja donosa (%)	/	9,06	16,04	27,70
Neto sedanja vrednost (€)	/	16.987	199.311	1.226.525
Povrnitev investicije v letih	/	10	7	4
Bilanca investitorja po 20 letih (€)	-2.013.253	-1.958.277	+333.915	+1.894.999

Za povečanje energetske učinkovitosti SDO smo pri ukrepu za zmanjšanje toplotnih izgub v vročevodu upoštevali tehnično izvedljivo povečanje debeline toplotne izolacije s 50 mm (r_{2A}) na 150 mm (r_{2B}). S pomočjo enačbe (1) izračunamo, da v tem primeru pri enaki toplotni prevodnosti izolacije radialni toplotni tok QB znaša 44 % referenčnega toplotnega toka QA. Toplotne izgube vročevoda se znižajo za 56 %, kar pomeni, da bi se ob izvedbi tega ukrepa toplotne izgube z 11,6 % znižale na 5,5 % dovedene končne energije. Raba ZP se zmanjša za 6,5 %, enako linearno tudi raba primarne energije in emisija CO₂, saj pri ukrepu ne gre za zamenjavo energenta. Delež OVE ostane 0 %.

Investicija na letni ravni zmanjša stroške za energent za 6.567 EUR, vendar se zaradi relativno majhnega učinka stroški oskrbe za energijo v 20 letih bistveno ne spremenijo. Ukrep je priporočljiv v primeru, ko drugi posegi v SDO iz različnih razlogov niso izvedljivi, saj zmanjšuje negativen vpliv na okolje. Finančni kazalniki se lahko izboljšajo s pričakovano rastjo cene fosilnih energentov v prihodnosti, na kar v Sloveniji nimamo

vpliva. Pozitivni trajnostni vpliv zmanjšanja toplotnih izgub vročevoda je majhen, še posebej zato, ker ne vključuje zvišanja deleža OVE pri oskrbi stavb z energijo in ker ne omogoča lokalne energetske samooskrbe.

Situacija je drugačna pri prehodu na drugi vir ogrevanja, v konkretnem primeru predlagana zamenjava ZP s TČ. TČ uporabljajo visok delež OVE pri svojem delovanju, ki bi se v primeru ogrevanja analiziranega kompleksa dvignil z 0 na okoli 80 % [3]. TČ za pogon uporabljajo električno energijo (EE), ki spada v socialno kategorijo energentov. Slovenija ima tako z vidika dobave (z lastno proizvodnjo EE pokrivamo približno 65 % potreb) kot z vidika oblikovanja cene za končnega uporabnika večji vpliv, kot pri ZP.

Pri tem ukrepu smo predvideli dograditev TČ k toplotnim postajam v vseh objektih. Raba končne energije se zmanjša za 66,7 %, raba primarne energije za 36,4 %, emisija CO₂ pa za 25,9 %. V tabeli 1 lahko vidimo, da so poleg okoljskih spodbudni tudi finančni učinki. Letni strošek za energent se zniža za 32,5 % v

primerjavi z ZP, vračilna doba investicije je 7 let, neto bilanca investitorja po 20 letih pa znaša 333.915 EUR.

Pri tretjem predlaganem ukrepu, kjer so TČ dopolnjene s sončno elektrarno (SE), so finančni kazalniki investicije še boljši, pozitivni učinki na okolje v fazi delovanja pa neprekosljivi. Z ukrepom zamenjave ZP s TČ + SE postane analizirani stanovanjski kompleks z vidika ogrevanja energetske samozadosten, uporablja izključno OVE, ne rabi primarne energije in ne obremenjuje okolja z emisijami.

Strošek za energent se zmanjša na strošek omrežnine - za 87,8 %. Vračilna doba primerljivo sicer visoke investicije 510.666 EUR se skrči na 4 leta, neto bilanca investitorja po 20 letih je +1.894.999 EUR. Denarni tok je izračunan konzervativno, s stalnimi cenami iz druge četrtine leta 2023. Nedavni dogodki in nihanje cen na evropskem trgu ZP in EE so pokazali, da so lahko finančni kazalniki še bistveno boljši in predvsem stabilnejši. Zaradi zanesljivosti oskrbe s toploto v stavbah kompleksa Ajdovščina bi tudi pri tem ukrepu SDO z vročevodom ostal za hladno rezervo, medtem ko zanesljivost oskrbe z EE iz SE zagotavlja njena priključenost na javno elektroenergetsko omrežje. Nobeden od predlaganih ukrepov, ki vključuje TČ, ne povečuje lokalnega onesnaževanja z ljudem ali naravi škodljivimi snovmi, je pa potrebno zvočnemu onesnaževanju zaradi goste naseljenega območja nameniti posebno pozornost pri projektne načrtovanju.

Medtem ko lahko ekonomske in okoljske učinke relativno dobro ocenimo, ocena družbeno-socialnih učinkov ni tako jasna, saj jih je težko ločiti od ekonomskih in/ali okoljskih. Trajnostni razvoj implicira rabo OVE, kar posledično zagotavlja zdravo okolje. Noben od predlaganih ukrepov ne poslabšuje bivalnih razmer v prostorih ali zmanjšuje udobja pri oskrbi z energijo. Nižji stroški za energijo zagotavljajo socialno varnost, preprečujejo energetske revščino, še posebej upoštevajoč potrebe in finančne zmožnosti starejših in deprivilegiranih skupin, ki v pomembnem delu predstavljajo populacijo stanovanjskega kompleksa v Ajdovščini. Dva predlagana ukrepa stanovalcem znižujeta finančno breme za energijo, drugi (TČ) za 43 % in tretji (TČ+SE) za 50 %. Družbeno-socialne koristi stanovalcev se manifestirajo v zvišanju socialne varnosti stanovalcev in v zvišanju kakovosti življenja, hkrati pa podpirajo strateške usmeritve trajnostnega razvoja v Sloveniji.

4. Zaključki

Z analizo izvedljivih ukrepov v obstoječi ogrevalni sistem stanovanjskega kompleksa v Ajdovščini smo pokazali možnosti za bolj trajnostno oskrbo z energijo. Zamenjava fosilnega energenta s toplotnimi črpalkami izboljša trajnostne kazalnike v vseh treh dimenzijah, medtem ko ukrep zamenjave ZP s TČ in SE že v danih pogojih izpolnjuje kriterij za trajnostno oskrbo stavb z energijo. Investicija prinaša 18,6 % povprečni neto dobiček na leto na vložena sredstva v obdobju 20 let, kar je tudi zgolj s finančnega vidika zanimiva naložba tako za zasebnega investitorja, kot za lokalno skupnost. Z upoštevanjem 50 % znižanja računa ogrevanja smo predvideli socialne koristi tudi za stanovalce, pa tudi za motivacijski moment pri iskanju soglasja za ukrep.

Ukrep je skladen s konceptom tako krožnega gospodarstva kot merili za skoraj ničenergijske stavbe, saj implicira učinkovito rabo energije in v najvišji možni meri izkorišča energijo iz OVE, ki je na razpolago na/ blizu območja stavbe. Ne nazadnje je uporaba lokalnih OVE strateškega pomena za državo, saj povečuje energetske neodvisnost, zagotavlja zanesljivost oskrbe z energijo in podpira prehod v nizkoogljično družbo.

Seznam virov in literature

- [1] District heating and cooling in the European Union - Overview of markets and regulatory frameworks under the revised Renewable Energy Directive, Directorate-General for Energy of the European Commission, (2022).
- [2] Energetske učinkoviti distribucijski sistemi toplote in hladu v letu 2022, Agencija za energijo RS, (2023).
- [3] H. Gjerkeš, M. Šijanec-Zavrl, Monetisation of the ecological footprint in energy supply of buildings, Svet strojništva 3/6 (2021) 82-83.
- [4] M. Šijanec-Zavrl, G. Stegnar, A. Rakušček, H. Gjerkeš, A bottom-up building stock model for tracking regional energy targets : a case study of Kočevje, Sustainability 10 (2016) 1-16.
- [5] T. Jakin, Nadgradnja sistema daljinskega ogrevanja s trajnostno energijo, magistrsko delo, Univerza v Novi Gorici, Poslovno tehniška fakulteta, (2021).
- [6] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Uradni list RS, št. 70/22 in 161/22, (2022).
- [7] Temperaturni primanjkljaj, presežek in kurilna sezona, Agencija RS za okolje, (2019).
- [8] Airabela, pridobljena ponudba in specifikacije, <https://www.airabela.si/toplotne-crpalkke/toplotna-crpalka-visokotemperaturna-daikin-altherma-3-h-ht>, (2020).
- [9] Letno povprečno trajanje sončnega obsevanja za obdobje 1981-2010, Agencija RS za okolje, (2016).
- [10] Cene energentov, Portal energetika Ministrstva za okolje, podnebje in energijo RS, <https://www.energetika-portal.si/statistika/>, (2023).

ANALIZA VPLIVA OBLIKE, MATERIALA IN KAPLJEVINE NA TRENJE HIDRAVLIČNIH BATNIH TESNIL

Franc Majdič^{a*}, Ana Trajkovski^a

^a Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Korespondenčni avtor: **Franc Majdič**

University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Engineering
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenia

Tel.: +386 1 4771 411

E-mail: franc.majdic@fs.uni-lj.si

Kratki znanstveni prispevek / Short scientific paper

Povzetek

Hidravlika je zaradi zmožnosti opravljanja dela z velikimi silami nepogrešljiva v vsakdanjem življenju. Pomembna hidravlična komponenta so hidravlični valji, v katerih se nahajajo različne vrste tesnil. Glavna naloga tesnil v hidravličnih valjih je zagotoviti dovolj veliko tesnilno silo. Na mestu tesnil je zato prisotno trenje, puščanje in obraba. Raziskali smo vpliv različnih oblik in materialov batnih tesnil hidravličnega valja na silo trenja. Na posebej za to pripravljenih preskuševališčih smo izmerili silo trenja v hidravličnem mineralnem olju in v vodi, pri šestih različnih hitrostih izvlečenja batnice. Ugotovili smo, da je sila trenja v vodi od 15 % do 40 % višja od sile trenja, ki ga ustvari isti sklop batnega tesnila v mineralnem olju.

Ključne besede: hidravlična batna tesnila; hidravlični valj; trenje; mineralno olje; voda

1. Uvod

Zaradi zmožnosti opravljanja dela z velikimi silami pri majhnih gabaritnih merah so hidravlični sistemi nepogrešljivi v industriji, mobilni tehniki (kmetijstvo, gozdarstvo) ter v letalstvu. Ostale prednosti hidravlike so: preprosta in enostavna sprememba smeri gibanja elementov, možnost avtomatizacije delovnih gibov, enostavno varovanje proti preobremenitvi, enostaven nadzor parametrov (predvsem tlaka), velika prožnost glede lokacije postavitve agregata in drugih izvršilnih sestavin, dobra dinamična odzivnost sestavin zaradi majhnih mas in brezstopenjsko spreminjanje prestavnih razmerij. Hidravlika ima tudi nekaj slabosti kot so: slab izkoristek glede na mehanske pogone, visoki proizvodnji stroški sestavin zaradi zahtev po točnosti ter nevarnost onesnaževanja okolja (če je kot hidravlična kapljevina uporabljeno olje).

Article info

Article history

Received: 29th August 2023

Received in revise from 7th September 2023

Accepted 21st September 2023

Available online 29th September 2023

Abstract

Because of its ability to perform work with great forces, hydraulics is irreplaceable in everyday life. An important component of hydraulic systems is hydraulic cylinders, in which there are various types of seals. The main task of seals in hydraulic cylinders is to ensure a sufficiently large sealing force. Therefore friction, leakage and wear occur at the sealing point. We have investigated the influence of different shapes and materials of hydraulic cylinder piston seals on the frictional force. We measured the frictional force in hydraulic mineral oil and in water at six different piston rod extension speeds on a specially prepared test bench. We found that the frictional force in water is 15 to 40 % higher than the frictional force generated by the same piston seal unit in mineral oil.

Keywords: hydraulic piston seals; hydraulic cylinder; friction; mineral oil; water

Eden izmed glavnih izvršilnih hidravličnih komponent so hidravlični valji (HV), ki zagotavljajo premočrtno gibanje. Pomembna hidravlična sestavina HV so tesnila, njihov namen pa je preprečevanje pretakanja kapljev in med komorama ter preprečevanje vdora trdih delcev v hidravlični valj. Čeprav so tesnila v primerjavi z drugimi hidravličnimi komponentami cenejša, igrajo pomembno vlogo v hidravličnih sistemih. Prekomerno puščanje vodi do izgube moči hidravličnega sistema ter posledično zmanjšanje učinkovitosti, pa tudi izgube olja (ali druge uporabljene kapljevine). Dandanes se za tesnila zahteva, da so sposobna prenesti čim višje tlake, z majhnim trenjem in skoraj ničelnim puščanjem, da imajo čim daljšo uporabno dobo ter konkurenčno ceno [1].

Tesnila se razlikujejo po obliki, materialu, načinu vgradnje, temperaturnem območju, uporabljeni hidravlični kapljevini, tlaku ter hitrost gibanja. Posamezno tesnilo mora biti ustrezno izbrano za posamezno vgradno aplikacijo. Znotraj HV tesnila delimo na posnemala (oz. posnemalne obroče), tesnila batnice, batna tesnila ter vodilne obroče.

Batna tesnila so nameščena na batu v za-to namensko izdelanem utoru, kjer tesnijo režo med batom in cevjo HV. Spadajo med dinamična tesnila in morajo zagotavljati tesnost med komorama v HV. Če imamo sistem brez zunanje obremenitve in če batnica potuje s konstantno hitrostjo, potem lahko silo trenja izračunamo iz razlike komornih tlakov v HV [2]. Posamezen batni tesnilni sklop je lahko iz enega ali več materialov. Največkrat uporabljeni materiali batnih tesnil so: termoplastični poliuretan – TPU (elastičen material, odporen proti obrabi in staranju), nitril guma –NBR, politetrafluoroetilen – PTFE (visoke drsne hitrosti, majhno trenje tesnila, visoka odpornost proti obrabi in povišanim temperaturam) in termoplastični poliestrski elastomer TPE-E (visoka odpornost proti obrabi in staranju)[3–5].

V raziskavah so pokazali, da HV s tesnilnim materialom iz HNBR generirajo višjo silo trenja kot tisti iz FKM in NBR [6]. Poleg tega so dokazali, da sila trenja kaže značilni Stribeckov učinek, ki ima pozitiven predznak za izvlečenje ter negativen predznak za uvlačenje bata v hidravlični aktuator [6]. V raziskavah [7,8] je bila opravljena analiza elastomernih tesnil batnic pravokotnega prereza. Razpon delovnih tlakov olja se giblje med 3.4 in 34.5 MPa, razpon temperature pa med -54 do +135 °C. Ugotovili so, da je sila trenja za 27 % do 53 % višja pri izvlečenju kot pri uvlačenju batnice v cev HV, ugotovitve veljajo tudi za U-tesnila batnic.

Prav tako so ugotovili, da nižji tlaki in nižje hitrosti privedejo k minimalnemu puščanju ter večjemu trenju. Pan in sodelavci [9] so eksperimentalno raziskovali silo trenja v odvisnosti od hitrosti, zunanje obremenitve, premera ter oblike tesnila. Bilo je dokazano, da se pri enakem materialu in obliki tesnila, sila trenja povečuje z večanjem premera tesnila. Primerjava je pokazala, da tesnilo tipa KGD doseže najvišjo silo trenja, ter je najmanj občutljivo na spreminjanje zunanje obremenitve oz. tlaka v primerjavi z drugima dvema tipoma batnih tesnil (YB in KD). Na osnovi dinamičnega preizkusa je bilo dokazano, da je sila trenja pri pospeševanju večja kot pri zaviranju pri izvlečenju in uvlačenju batnice v cev HV. V delu [10] je bil analiziran vpliv tlaka na naraščanje sile trenja U-tesnil, do razmeroma visokih tlakov (do 200 bar).

V delu [1,11, 12, 13] je prvič eksperimentalno analizirano in primerjano speljevanje batnice HV v vodi in mineralnem hidravličnem olju. Predpisi o zaščiti naravnega okolja postajajo vedno strožji, zaloge naftnih derivatov se manjšajo, cene pa zvišujejo. Z uporabo vode namesto mineralnega hidravličnega olja se lahko tem težavam izognemo. Na področju hidravlike sta tako prisotni dve alternativni za mineralno hidravlično olje. Voda je najbolj naravna kapljevina na zemeljski površini, saj prekriva kar 70 % njene površine. Poleg tega nobena snov v naravi nima take čistoče kot jo ima čista voda.

Cilj raziskave je analizirati vpliv različnih oblik in materialov batnih tesnil v HV na silo trenja. Trenje bomo testirali v dveh hidravličnih kapljevinah, tj. voda in mineralno olje, pri različnih hitrostih izvlečenja batnice.

2. Materiali in metode

2.1 MATERIALI

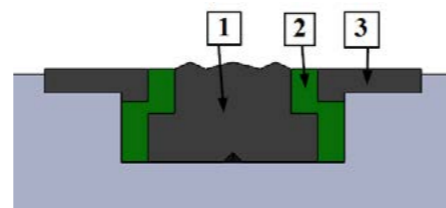
V raziskavi so uporabljeni štiri različni sklopi batnih tesnil: prvi sklop KGD 50 34 z vodilnim obročem, drugi KDA 50 35 9 z vodilnim obročem, tretji YB 50 39 4,2 in zadnji KPD 50 39 4,2. Zaradi različnih vgradnih mer tesnil, je bilo potrebno izdelati različne bate HV.

Bat za tip tesnila YB 50 39 4,2 je izdelan iz sive litine. Vsi ostali bati pa so izdelani iz istega, avtomatnega jekla. Utori za tesnila in vodilne obroče so izdelani v skladu s standardom.

Lastnosti posameznih batnih sklopov so iz kataloga proizvajalca in so predstavljeni v preglednicah od 1 do 4.

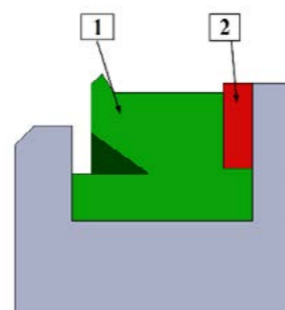
Preglednica 1: Material in dovoljene obremenitve za sklop 1 [3]

Tesnilo KGD 50 34	
Material	NBR (1), TPE-E (2), POM (3)
Tlak	400 bar
Temperatura	-30 °C do +110 °C
Hitrost	0.5 m/s
Vodilni obroč GPL 45 50 9,7	
Material	Texlite (poliesterska vlakna)
Temperatura	-40 °C do +130 °C
Hitrost	1 m/s



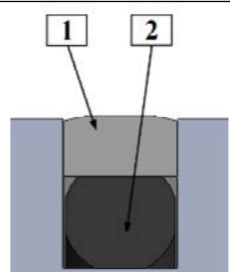
Preglednica 2: Material in dovoljene obremenitve za sklop 2 [3]

Tesnilo KDA 50 39 9	
Material	TPU (1), POM (2)
Tlak	500 bar
Temperatura	-40 °C do +100 °C
Hitrost	0.5 m/s
Vodilni obroč GPL 45 50 9,7	
Material	Texlite (poliesterska vlakna)
Temperatura	-40 °C do +130 °C
Hitrost	1 m/s



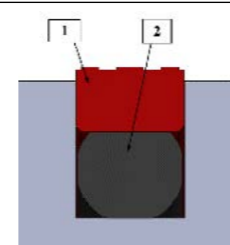
Preglednica 3: Material in dovoljene obremenitve za sklop 3 [3]

Tesnilo YB 50 39 4,2	
Material	PTFE + bron (1), NBR (2)
Tlak	600 bar
Temperatura	-30 °C do +100 °C
Hitrost	15 m/s



Preglednica 4: Material in dovoljene obremenitve za sklop 4 [3]

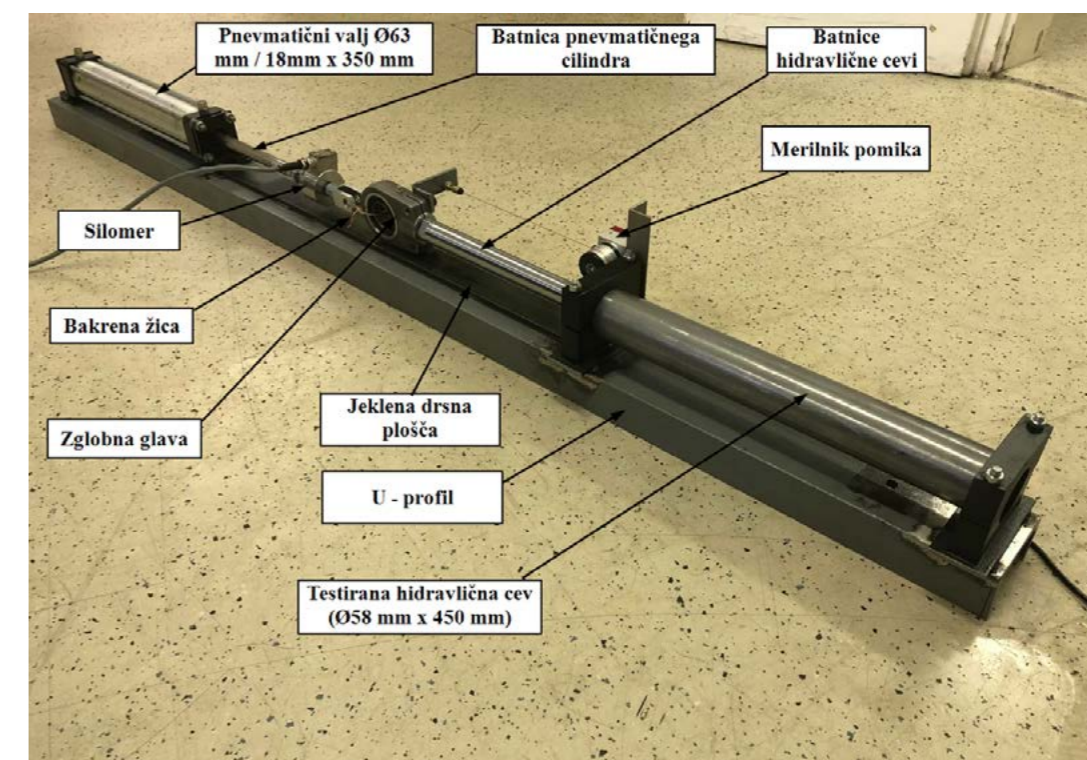
KPD 50 39 4,2	
Material	TPU (1), NBR (2)
Tlak	400 bar
Temperatura	-30 °C do +100 °C
Hitrost	0.5 m/s



2.2 PREIZKUŠEVALIŠČE

Izdelali smo enostavno preskuševališče za merjenje sile trenja posameznega sklopa batnega tesnjenja. Osnovo preskuševališča predstavlja U-profil 100 (dolžine 1730 mm), na katerem se nahajajo ostali elementi: pnevmatični valj (Ø 63 /18 x 350), hidravlična cev z batnico in na njej nameščena zglobna glava, sklop batnega tesnjenja na batnici, bakrena žica, merilnik pomika, dve dušilki, bistabilni elektromagnetno krmiljen 5/2 potni pnevmatični ventil in enota za pripravo zraka.

Pnevmatični valj služi za vlečenje batnice, na kateri se nahaja sklop batnega tesnjenja, po odprti hidravlični cevi. Hidravlična cev je bila enaka za vse batno tesnilne sklope, saj smo s tem zanemarili vpliv različnih hrapavosti in toleranc izdelave cevi. Batnica hidravlične cevi, na koncu katere se nahaja zglobna glava in pnevmatični valj sta povezana z bakreno žico preko fiksno vpetega silomera, ki služi za merjenje sile trenja. Merilnik pomika je bil uporabljen za merjenje prepotovane razdalje batnice. Pnevmatični valj in testirana hidravlična cev sta privijačena na U-profil z dvema nepomičnima podporama v isti osi. Za zagotovitev pravilnega izvlečenja batnice iz testirane cevi smo dodali jekleno podlago, s čimer smo ustvarili dodatno vodenje batnice. Po tej gladki podlagi, ki smo jo predhodno namazali s hidravličnim oljem, drsi zglobna glava med izvedbo preskusa. Slika 1 prikazuje preskuševališče za raziskavo sile trenja posameznega sklopa batnega tesnjenja v mineralnem olju in vodi. Podatke iz silomera (U2A do 5000 N) in merilnika pomika (omogoča merjenje razdalje v razponu od 0 do 400 mm) smo zajemali in shranjevali s programsko opremo LabVIEW.



Slika 1: Prvo preskuševališče – meritve sile trenja batnih tesnil (120 mm x 150 mm x 1730 mm)

2.3 POSTOPEK MERITVE

Opravili smo dva sklopa meritev za vsak sklop batnega tesnjenja. Najprej smo merili silo trenja sklopa batnega tesnjenja brez batnega tesnila, torej le z vodilnimi obroči. Potem pa smo merili še celoten sklop batnega tesnjenja z vsemi elementi (batna tesnila in vodilni

obroči). Silo trenja posameznega sklopa batnega tesnjenja smo merili pri 6 različnih hitrostih: 40, 70, 100, 125, 175 ter 270 mm/s v mineralnem olju in v vodi. Pri vsaki hitrosti smo naredili tri ponovitve, rezultati predstavljajo srednjo izmerjeno vrednost sile trenja in preračunati standardni odklon.

V primeru menjave hidravlične kapljevine v testirani hidravlični cevi, je bilo potrebno cev temeljito očistiti ter jo s stisnjanim zrakom izpihati. Nato smo notranjo površino cevi razmastili z etanolom. Enak postopek čiščenja velja za sklop batnega tesnjenja. Še posebno pozorni smo morali biti, če je bila predhodno uporabljena voda. V tem primeru na nobeni jekleni površini ne sme ostati voda, drugače se že v kratkem času pojavi korozija.

Sklop batnega tesnjenja smo s pomočjo samovarovalne matice privili na batnico hidravlične cevi. Če smo testirali sklope batnega tesnjenja v olju smo celoten sklop potopili v mineralno olje z oznako VG46. Tudi testirano hidravlično cev smo premazali z oljem. V primeru testiranja v vodi pa smo sklop batnega tesnjenja ter testirano hidravlično cev potopili v navadno vodo iz pipe brez dodatkov.

Pred samim začetkom meritve smo z batnico pnevmatičnega valja naredili nekaj gibov, tako da so se tesnila v sklopu batnega tesnjenja lepo usedla. S pomočjo dušilke smo nastavili željeno hitrost gibanja batnice pnevmatičnega valja. Meritev se je začela, ko je bila batnica pnevmatičnega valja do konca uvlečena, batnica hidravlične cevi pa izvlečena.

Nato smo zagnali program LabVIEW za zapis izmerkov ter s pritiskom na gumb preklpili bistabilni elektromagnetni 5/2 potni ventil in s tem spremenili smer gibanja batnice pnevmatičnega valja. Meritev sile trenja in prepotovane razdalje smo zajemali od začetka uvlačanja batnice pnevmatičnega valja v pnevmatično cev do konca giba.

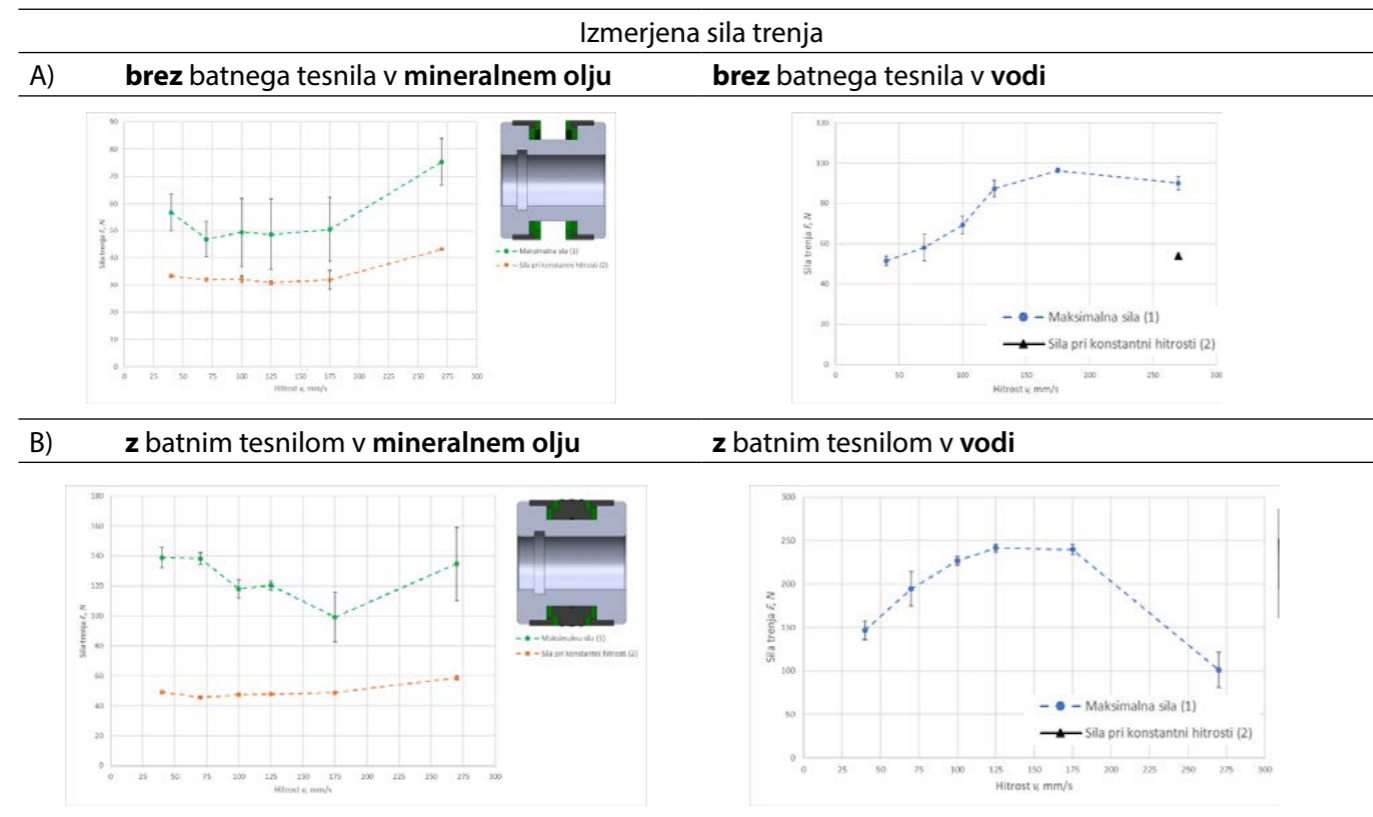
3. Rezultati in diskusija

Rezultati so predstavljeni za vsaki posamezen sklop batnega tesnila v mineralnem olju in vodi, enkrat brez batnega tesnila, torej le z vodilnimi obroči, drugič z vsebovanjem batnega tesnila.

Pri uporabi vode kot hidravlične kapljevine hitrost ne doseže konstantne vrednosti, zato tudi sila trenja ne doseže konstantne vrednosti. V tem primeru so na grafu podane le maksimalne vrednosti sile trenja pri posamezni hitrosti.

3.1 SKLOP 1.

Preglednica 5: Izmerjena sile trenja 1. sklopa

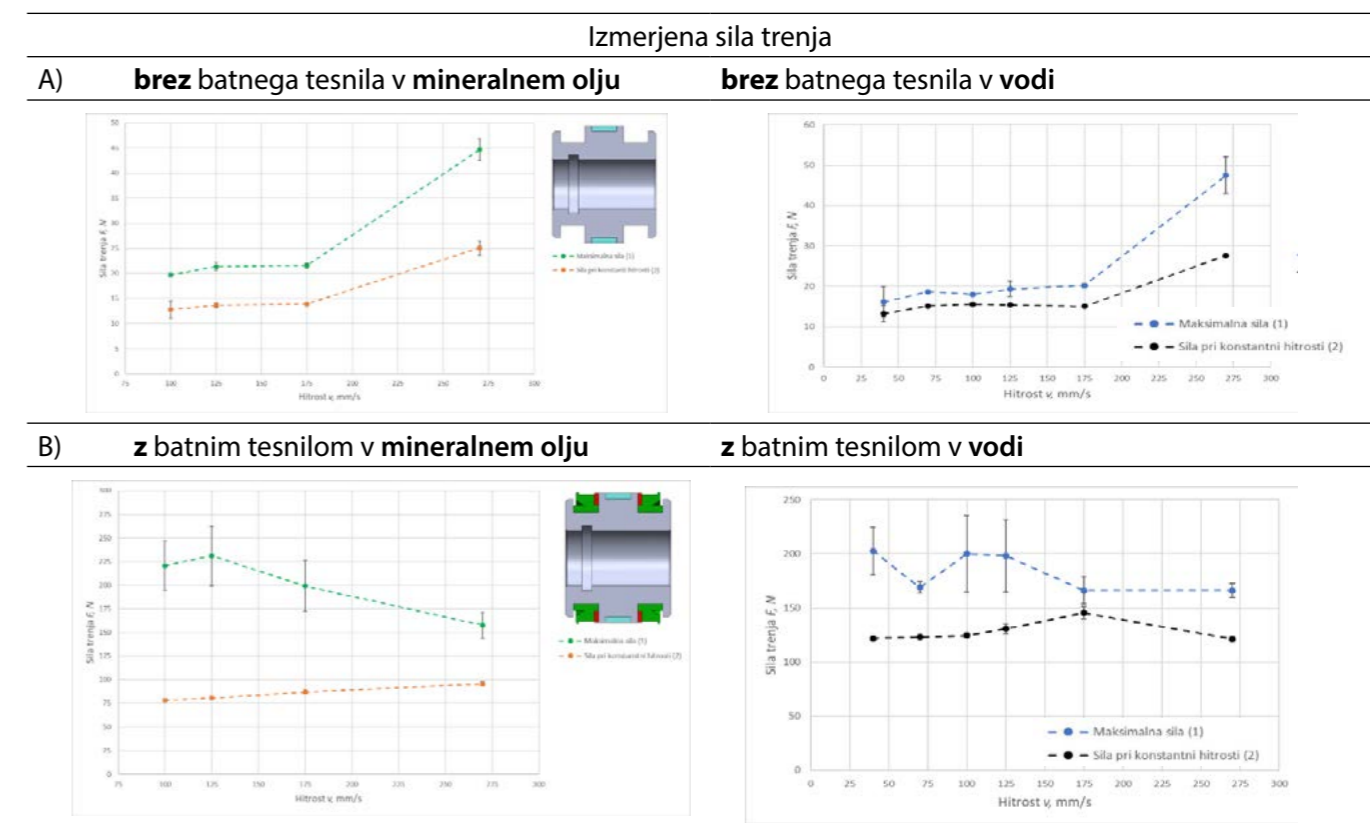


Ko primerjamo rezultate v mineralnem olju (Preglednica 5.A in B) sklop brez batnega tesnila predstavlja kar 70 % sile trenja pri konstantni hitrosti, ki ga ustvari sklop z vsebovanjem batnega tesnila.

Vidimo, da v povprečju maksimalna sila trenja doseže višjo vrednost v vodi kot pa v mineralnem olju, pri meritvah z in brez batnih tesnil. Sila pri konstantni hitrosti (v točki 270 mm/s) prav tako doseže višjo vrednost v vodi kot v mineralnem olju.

3.2 SKLOP 2.

Preglednica 6: Izmerjena sile trenja 2. sklopa



Ko primerjamo rezultate v mineralnem olju (Preglednica 5.A in B), sklop ki vsebuje vodilni obroč predstavlja okoli 20 % sile trenja pri konstantni hitrosti, ki ga ustvari celoten sklop z

batnim tesnilom.

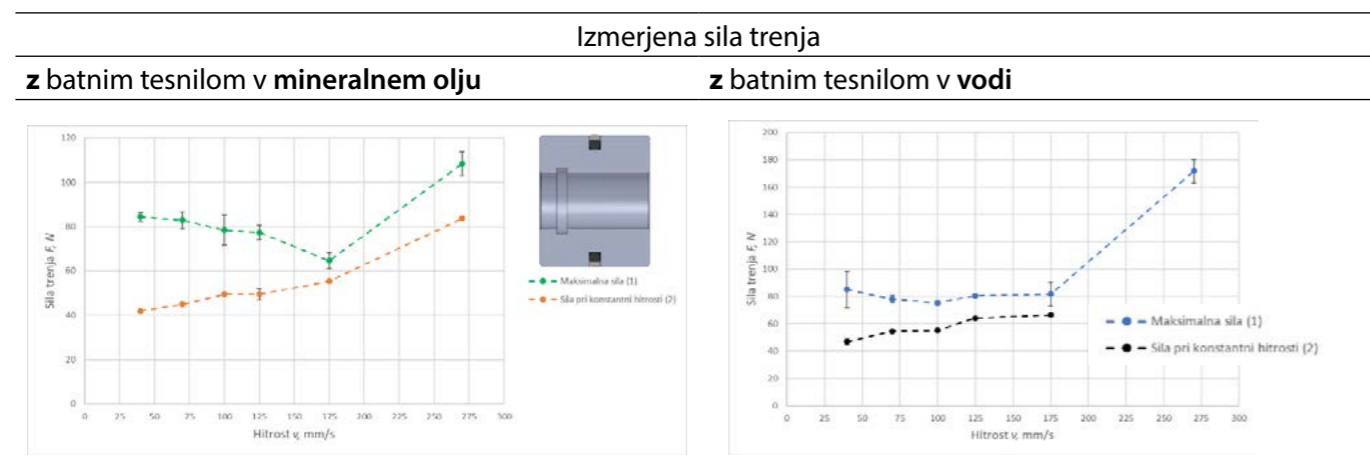
Maksimalna sila je pri nižjih hitrostih višja v mineralnem olju kot v vodi. Pri tesnilnem sklopu z vsebovanjem batnega tesnila v vodi je tudi razlika med silo lepenja in silo pri konstantni hitrosti manjša, saj je v vodi prisotnega več dušenja in tako lepenje ne doseže tako visoke vrednosti pri speljevanju oziroma se zaradi povečanega trenja pojavi višja sila pri konstantni hitrosti, zato razlika ni tako izrazita. Sklop brez vsebovanja batnega tesnila predstavlja le okoli 15 % sile trenja, ki jo ustvari sklop z batnim tesnilom.

3.3 SKLOP 3.

Sklop batnega tesnjenja YB 50 39 4,2 ne vsebuje vodilnih obročev, zato smo izvedli meritve sile trenja le z batnim tesnilom.

Sila trenja v mineralnem olju pri konstantni hitrosti predstavlja okoli 80 % trenja, ki ga ustvari isti sklop batnega tesnjenja v vodi. Sili v mineralnem olju dosežata podobne rednosti, razlika je le pri najvišjih hitrostih 175 mm/s in 270 mm/s.

Preglednica 7: Izmerjena sile trenja 3. sklopa

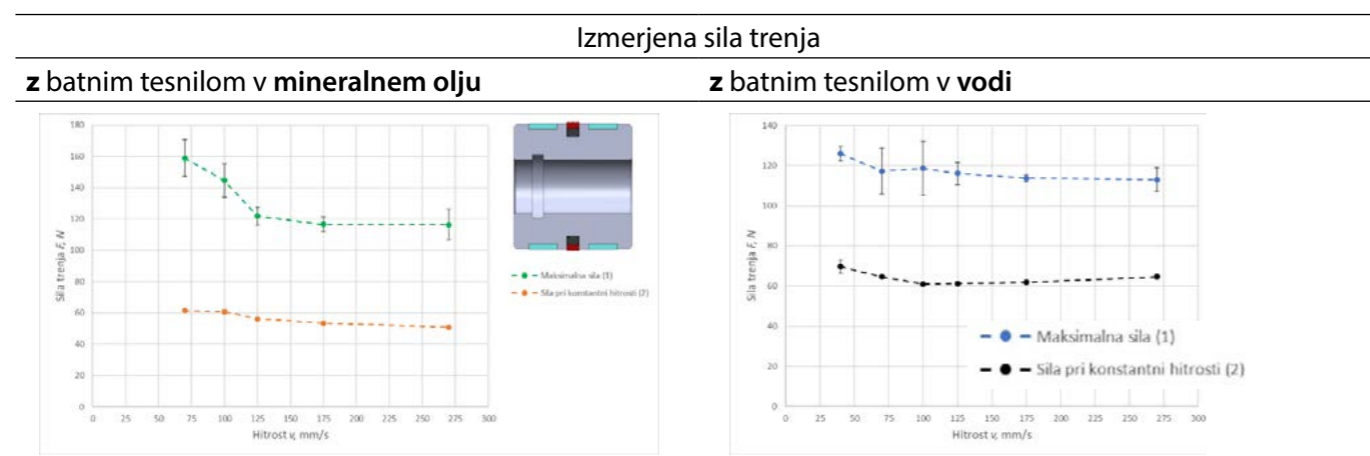


3.4 SKLOP 4.

Prva meritev je bila izvedena pri hitrosti 40 mm/s, vendar sklop batnega tesnjenja ne doseže konstantne hitrosti zaradi prisotnega lepenja. Tako smo meritve opravljali od hitrosti 70 mm/s naprej. Vidimo, da sila pri konstantni hitrosti pada z naraščanjem hitrosti in doseže minimum pri najvišji hitrosti.

Izmerjena sila je za sklop batnega tesnjenja 4, pri nižjih hitrostih večja v olju kot v vodi, nato pa se s povečevanjem hitrosti sili izenačita. Sila pri konstantni hitrosti v mineralnem olju predstavlja v povprečju 85 % sile, ki jo ustvari isti tesnilni sklop v vodi.

Preglednica 8: Izmerjena sile trenja 4. sklopa



4. Zaključki

Z merjenjem trenja tesnil smo želeli raziskati vpliv različnih oblik in materialov batnih tesnil v dveh hidravličnih kapljevinah, tj. mineralno olje in voda. Ugotovili smo, da se sila trenja posameznega sklopa batnega tesnjenja

spreminja s hitrostjo izvlečenja batnice iz testirane cevi HV. Z eksperimenti smo dokazali, da je sila trenja sklopa batnega tesnjenja pri konstantni hitrosti večja v vodi kot v mineralnem olju. Pri tesnilu tipa KDA 50 35 9 predstavlja sila trenja v mineralnem olju 60 % sile, ki jo ustvari isti tip tesnila v vodi. Tesnilo tipa YB 50 39 4,2 ustvari v mineralnem olju 80 % sile, ki jo ustvari isti tip tesnila v vodi. Pri tesnilu tipa KPD 50 39 4,2 predstavlja sila trenja v mineralnem olju 85 % sile, ki jo ustvari isti tip tesnila v vodi.

Glede na vrednost sile lepenja in sile pri konstantni hitrosti v mineralnem olju največjo silo doseže tesnilo tipa KDA 50 35 9, sledi mu tesnilo tipa KPD 50 39 4,2, nato sledi tesnilo tipa KGD 50 34 in na zadnjem mestu je tesnilo YB 50 39 4,2 z najmanjšo silo trenja.

Za uporabo v vodni in oljni hidravliki bi tako predlagali tesnilo tipa KPD 50 39 4,2 in tesnilo tipa YB 50 39 4,2, saj se vrednosti sile trenja v vodi in mineralnem olju razlikujeta od 15 % do 20 %. Tesnilo YB 50 39 4,2 bi uporabili v aplikaciji z velikimi drsnimi hitrostmi, saj lahko prenaša hitrosti do 15 m/s. Prav tako je uporaben za tlake do 600 bar. Tesnilo KPD 50 39 4,2 pa bi uporabili v aplikaciji z majhnimi drsnimi hitrostmi (do 0,5 m/s) in tlaki do 400 bar.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Slovenski raziskovalni agenciji (ARRS), ki je finančno podprla raziskovalno skupino (P2 -0231).

Reference

[1] F. Majdič, M. Kalin, Vpliv tesnil na obnašanje vodno-hidravličnega valja, in: Vižintin J., Sedalček M. (Eds.), International Conference on Tribology: Conference on Tribology, Cooling Fluids and Technical Diagnostics, Slovenian Society for Tribology, Ljubljana, 2012.

[2] L. Márton, S. Fodor, N. Sepeshri, A practical method for friction identification in hydraulic actuators, *Mechatronics*. 21 (2011) 350–356. <https://doi.org/10.1016/J.MECHATRONICS.2010.08.010>.

[3] <https://astonseals.com/en/products/piston-seals/>, Aston Piston Seals, <https://Astonseals.Com/En/Products/Piston-Seals/>. (2023).

[4] <https://www.skf.com/group/products/industrial-seals/hydraulic-seals/guide-rings-and-guide-strips>, SKF: Guide rings and guide strips, <https://www.skf.com/group/products/industrial-seals/hydraulic-seals/guide-rings-and-guide-strips>. (2023).

[5] <https://mac-hyd.com/blog/hydraulic-cylinder-seals/>, MAC Hydraulics: Hydraulic Cylinder Seals, <https://Mac-Hyd.Com/Blog/Hydraulic-Cylinder-Seals/>. (2023).

[6] X.B. Tran, N. Hafizah, H. Yanada, Modeling of dynamic friction behaviors of hydraulic cylinders, *Mechatronics*. 22 (2012) 65–75. <https://doi.org/10.1016/J.MECHATRONICS.2011.11.009>.

[7] G.K. Nikas, R. V. Almond, G. Burrige, Experimental Study of Leakage and Friction of Rectangular, Elastomeric Hydraulic Seals for Reciprocating Motion from –54 to +135°C and Pressures from 3.4 to 34.5 MPa, *Tribology Transactions*. 57 (2014) 846–865. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.916373>.

[8] G.K. Nikas, Fast performance-analysis of rectangular-rounded hydraulic reciprocating seals: Mathematical model and experimental validation at temperatures between –54 and +135 °C, *Tribol Int*. 128 (2018) 34–51. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.07.006>.

[9] Q. Pan, Y. Zeng, Y. Li, X. Jiang, M. Huang, Experimental investigation of friction behaviors for double-acting hydraulic actuators with different reciprocating seals, *Tribol Int*. 153 (2021) 106506. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2020.106506>.

[10] C. Cristescu, C. Dumitrescu, R. Radoi, L. Dumitrescu, Tribology in Industry Experimental Research for Measuring Friction Forces from Piston Sealing at the Hydraulic Cylinders, 36 (2014) 465–474. www.tribology.fkn.rs (accessed September 26, 2023).

[11] F. Majdič, J. Pezdarnik, M. Kalin, Kdaj in koliko je prihodnosti v vodni hidravliki?, in: Vižintin J., Velkavrh I., Podgornik B. (Eds.), Mednarodna konferenca o Tribologiji: Posvetovanje o Tribologiji, Mazivih in Alternativnih Gorivih, Slovensko društvo za tribologijo, Ljubljana, 2010.

[12] B. Laznik, Primerjava trenja batnih tesnil v vodni in oljni hidravliki, diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija, Fakultata za strojništvo Univerze v Ljubljani, 2023.

[13] D. Lovrec, V. Tič, The importance of the electrical properties of hydraulic fluids. *Industrial Lubrication and Tribology*. March 2022, vol. 74, iss. 3

ANALYSIS OF RECALESCENCE AND SOLIDIFICATION FRONT TRAVEL IN A FREEZING WATER DROPLET

Tim Pečnik, Samo Jereb, Matevž Zupančič, Matic Može *

University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

*Corresponding author: **Matic Može**

University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Engineering
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
Slovenia

Tel.: +386 1 4771 309

E-mail: matic.moze@fs.uni-lj.si

Short scientific paper / Kratki znanstveni prispevek

Abstract

This study investigates the freezing behavior of water droplets deposited on cold surfaces, focusing on recalescence, dimensional changes during freezing and tracking of the solidification front travel. Our experiments track the sequence of subcooling, nucleation, recalescence, and freezing. An untreated aluminum surface and its superhydrophobic variant are used for the freezing experiments at a surface temperature of $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ to freeze $3\text{ }\mu\text{L}$ water droplets. Using high-speed camera recordings and MATLAB image processing, we tracked the shape of the droplets during freezing and analyzed the solidification front's progression inside the droplet. Significant growth of droplets in the vertical direction was observed, while their horizontal dimensions remained stable. Surface wettability was found to affect the freezing rates. Notable freezing time disparity between droplets on the reference and on the superhydrophobic surfaces was recorded.

Keywords: freezing, recalescence, solidification front, image processing

1. Introduction

Understanding the freezing behavior of water droplets on cold surfaces is critical for various applications, from preventing ice accretion to enhancing heat transfer [1]. Freezing, a fundamental phase transition of water, occurs when the temperature of water droplets on cold surfaces decreases to a point where they transform from a liquid

Article info

Article history

Received: 8th August 2023

Received in revise from 29th August 2023

Accepted 12th September 2023

Available online 29th September 2023

Povzetek

V študiji predstavljamo zmrzovanje vodnih kapljic deponiranih na hladno površino, pri čemer se osredotočamo na recalescenco, dimenzijske spremembe med zmrzovanjem in opazovanje potovanja fronte strjevanja. Eksperimenti sledijo zaporedju podhladitve, nukleacije, recalescence in zmrzovanja. Zmrzovanje $3\text{ }\mu\text{L}$ vodnih kapljic smo opazovali na neobdelani aluminijasti površini in na njeni superhidrofobni različici pri temperaturi površine $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$. S pomočjo posnetkov hitrotekoče kamere in obdelave slik v programskem okolju MATLAB smo spremljali obliko kapljic med zmrzovanjem in analizirali napredovanje fronte strjevanja v notranjosti kapljice. Zaznali smo opazno rast kapljic v vertikalni smeri, medtem ko je njihova horizontalna dimenzija ostala stabilna. Ugotovili smo, da omočljivost površine vpliva na hitrost zmrzovanja kapljic.

Ključne besede: zmrzovanje, recalescenca, fronta strjevanja, obdelava slik

to a solid state (i.e., ice) [2]. This process is influenced by various factors making it a complex phenomenon to study and predict accurately. Understanding this complexity is essential to develop effective strategies for mitigating ice formation, improving energy efficiency, and advancing technologies reliant on heat exchange mechanisms.

The typical temporal progression of droplet temperature during the freezing sequence is depicted in Figure 1. The process commences with liquid subcooling (point 1), where the droplet's temperature decreases below the freezing temperature. This is followed by nucleation (point 2), when the first stage of the freezing process starts. Immediately following nucleation is recalescence (point 3), a phase of rapid temperature increase to the freezing point, while the subcooled liquid turns into a liquid-solid mixture ("slush"). After reaching the freezing point, the temperature stagnated during the second stage of the freezing process as the latent heat of solidification is slowly released into the substrate (point 4). Afterwards, the now-solidified droplet starts cooling again. The focus of this study lies on processes of recalescence and freezing, i.e., parts 3 and 4 shown in Figure 1.

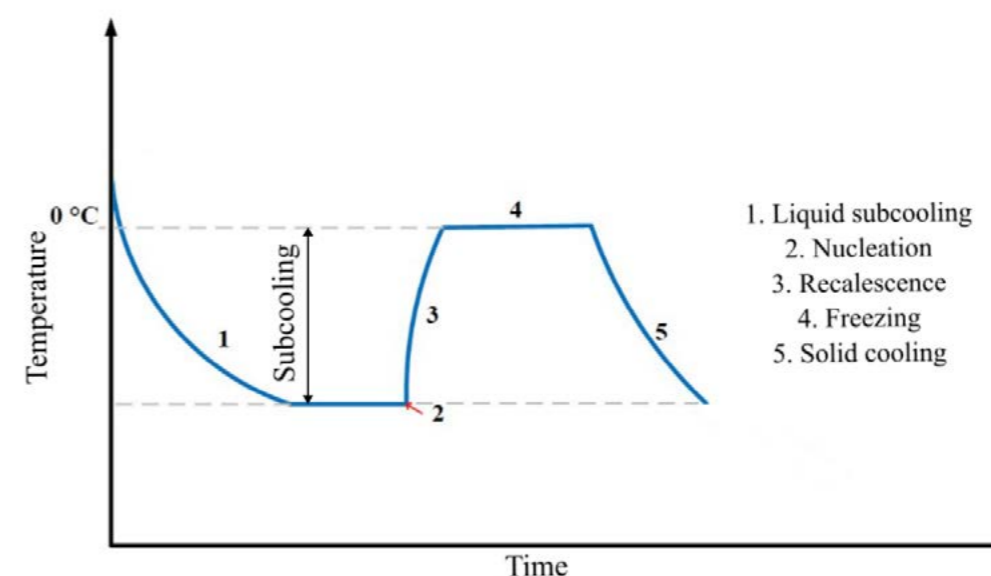


Figure 1: Temporal progression of droplet temperature during the freezing sequence.

In prior research, researchers primarily investigated the freezing of sessile water droplets, examining the influence of surface wettability [3]. Chaudhary & Li [4] looked into surface wettability and droplet temperature's impact on freezing. Wang & Zhao [5] concentrated on the effects of laser-textured surfaces on droplet cooling and freezing, highlighting the microstructure's contribution. This exploration was further extended by Yao et al. [6], who delved into the freezing process and impact of water droplets on cold solid substrates, emphasizing the crucial role of temperature in shaping freezing dynamics. In the realm of modeling and simulation, Zhang et al. [7] introduced a numerical model to replicate droplet freezing, considering supercooling and volume expansion effects. Concurrently, Zhu et al. [3] conducted a comparative analysis, scrutinizing the

freezing characteristics of both deposited and sessile droplets, offering insights into distinct behaviors based on surface properties. In this continuum of research, Zhang et al. [8] presented a comprehensive model for simulating sessile water droplet freezing, demonstrating a good correlation between calculated and measured freezing times. Additionally, addressing the lack of a comprehensive model for water droplet freezing on solid substrates, Tembely & Dolatabadi [9] introduced general governing equations by considering physical properties of each phase and incorporating multiple factors. These equations provide a more realistic representation of frozen droplet shapes without relying on prior assumptions. The latter study stands out as a pioneering effort to capture experimentally observed features during water droplet freezing, significantly enhancing our

understanding of this intricate phenomenon.

Our study bridges this gap by exclusively examining deposited water droplets during freezing. We use advanced technology, including high-speed cameras and image processing, to closely track the solidification front and monitor dimensional changes. By doing so, we aim to develop a robust image processing program while also obtaining valuable insights into the freezing process.

2. Goals

The core objective of this article is to conduct a comprehensive analysis of the dynamic behavior of droplets undergoing freezing. This article is guided by two primary goals.

Firstly, the precise tracking of the solidification front travel within the freezing droplet is pursued. This process involves experimental observations of the freezing process using high-speed cameras, followed by image analysis by our own image processing program in MathWorks MATLAB environment.

The second goal includes monitoring dimensional changes of the freezing droplet. This objective entails the continuous observation and quantification of

changes in the dimensions of the freezing droplet over time. These changes are assessed in both the horizontal (x) and vertical (y) direction to provide a comprehensive understanding of the droplet's temporal shape evolution.

3. Methodology

3.1 EXPERIMENTAL SETUP

Experiments were conducted with a custom experimental setup, shown schematically in Figure 2. Water droplets, formed using a syringe pump, were deposited on-demand onto a surface inside the chamber. We utilized two surfaces: a standard reference surface and a laser-textured surface treated with fluorinated alkyl silane (FAS) to achieve superhydrophobicity. The volume of water deposited was held constant at ~3 μL . Cooling of the sample to -17 $^{\circ}\text{C}$ was realized with a two-stage thermoelectric cooler (TEC), connected to a PID controller. Controlled conditions inside the experimental chamber were established by using a circulating desiccator with silica gel. Observation of the freezing droplets was performed with a high-speed camera (Photron MINI UX100, resolution of approx. 3 μm per pixel) at 500 and 5000 fps, while a strong LED light was used for illumination.

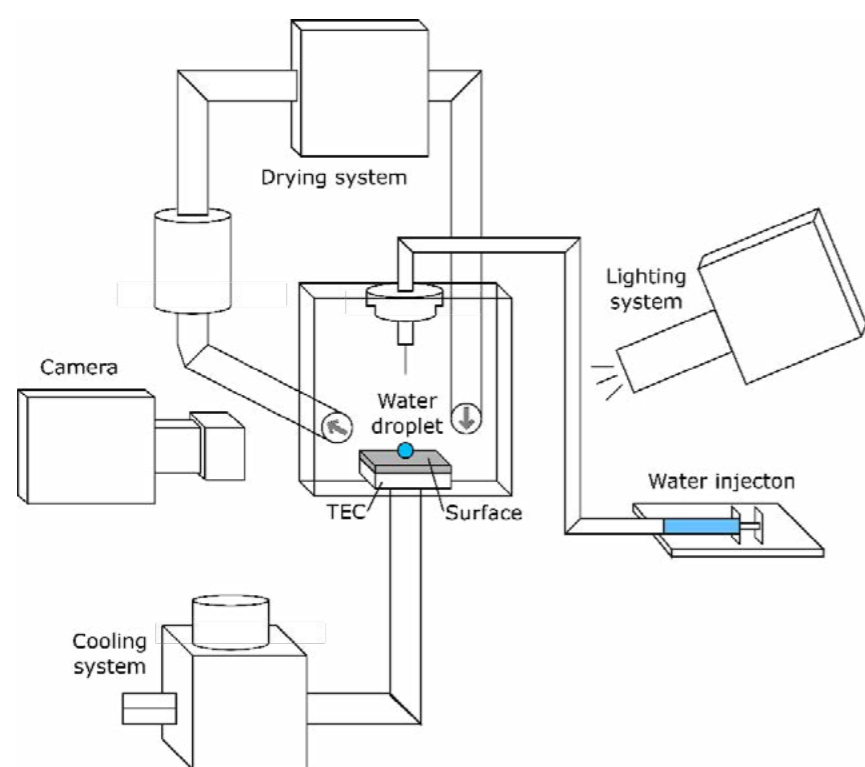


Figure 2: Schematic of the experimental setup.

3.2 MATLAB IMAGE PROCESSING

The video data collected in our experiments was processed in MathWorks MATLAB environment. A set of custom codes was written, which iterated through collected data and implemented desired image processing operations. For each frame, the maximum vertical and horizontal diameter of the droplet was measured. Additionally, the central vertical line was detected on each droplet. Tracking of the solidification front travel was performed by analyzing the spatiotemporal grayscale intensity alongside the central vertical line. By using its first and second derivatives, an accurate location of the solidification front was detected. The process flowchart is displayed in Figure 3.

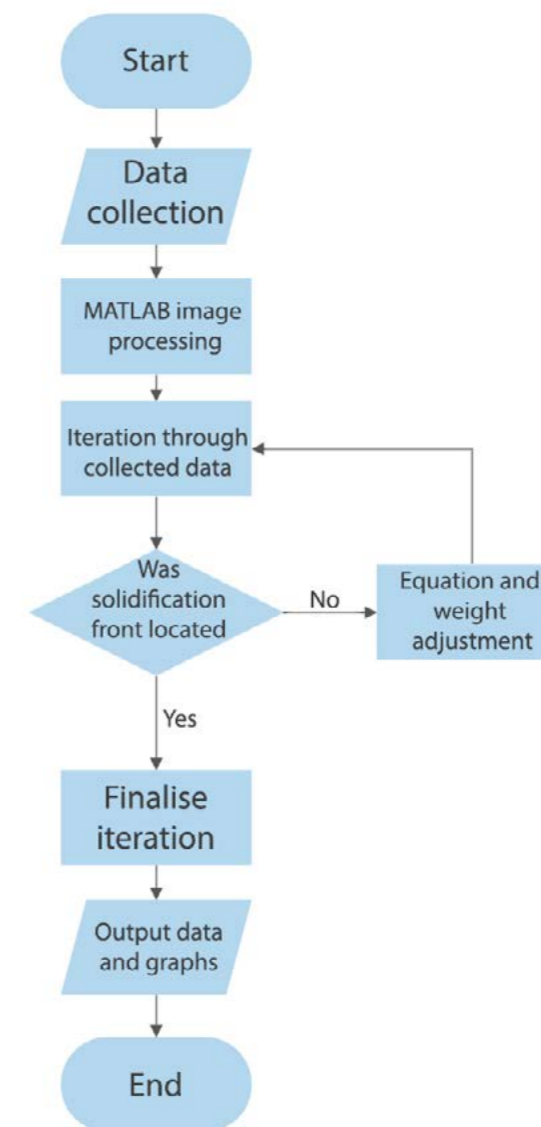


Figure 3: Flowchart of MATLAB image processing.

4. Results

4.1 RECALESCENCE

The temporal evolution of the recalescence process on the reference surface is shown in Figure 4. Timestamps of the frames are shown in the top right corner. It can be observed that the transparency of the droplet itself changes through the process as the liquid-ice slush forms. The droplet starts becoming opaque from the bottom (where the process starts) towards the top, while the entire process lasts approx. 24 ms in the shown case.

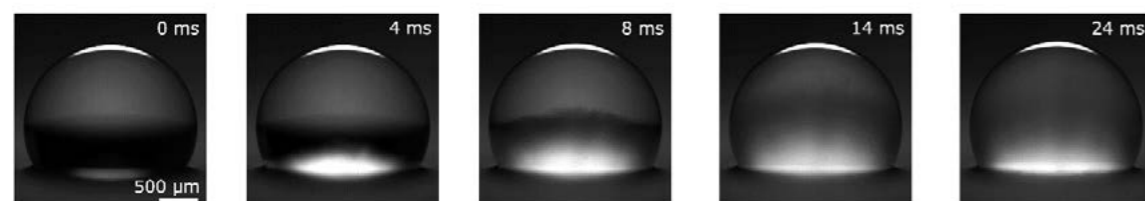


Figure 4: Temporal evolution of the recalescence process.

To additionally characterize the process of recalescence, we determined its point of origin during five separate experiments as shown in Figure 5. Two surfaces: a) the reference surface, and b) the FAS-treated surface. The origin of the recalescence process is pinpointed with a red circle on each image. It can be seen that the recalescence origin locations are consistent for each surface during the five performed experiments. In all cases, heterogeneous nucleation was observed since nucleation and freezing originated from the droplet/surface interface.

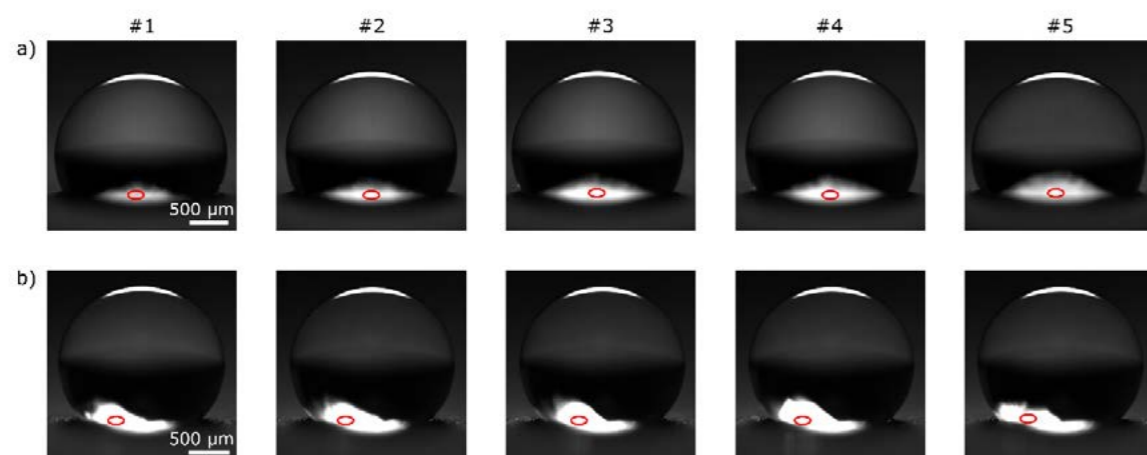


Figure 5: Origin of the recalescence process on a) the reference surface and b) the superhydrophobic surface.

4.2 FRONT TRAVEL OF THE SOLIDIFICATION

In Figure 6, the progression of the solidification process as a function of time is shown. Row a) represents the reference surface and row b) the superhydrophobic surface. The solidification front progresses from the droplet's lower region to its uppermost point, as depicted in the figure's left-to-right sequence. In the initial frame, the front is situated at the droplet's base, and its movement towards the top is delineated by a dotted pink line. Furthermore, it is apparent that the shape of the freezing droplet changes over time on both surfaces, which is caused by changes of droplet volume due to different densities of ice and liquid water. This is investigated in detail later.

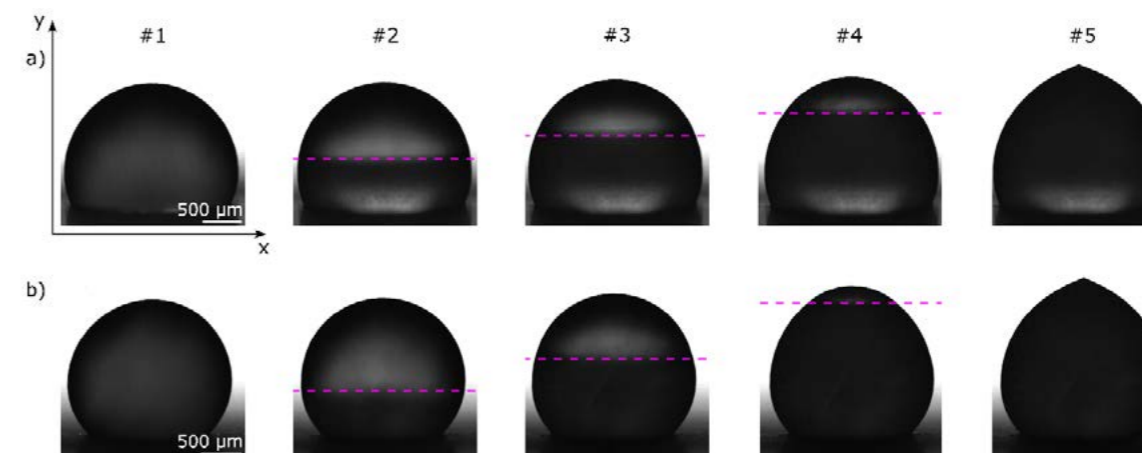


Figure 6: Solidification front travel on a) the reference surface and b) the superhydrophobic surface.

By using image processing, we tracked the progression of solidification over time and depicted it in Figure 7. The blue dots in the figure correspond to the Y coordinates of the observed solidification fronts as a function of time, shown in Figure 7. Processing was done on both surfaces, with a) representing the reference surface and b) the superhydrophobic one. Employing linear best fit interpolation, indicated by the red line, we discerned a relatively consistent advancement of the solidification front.

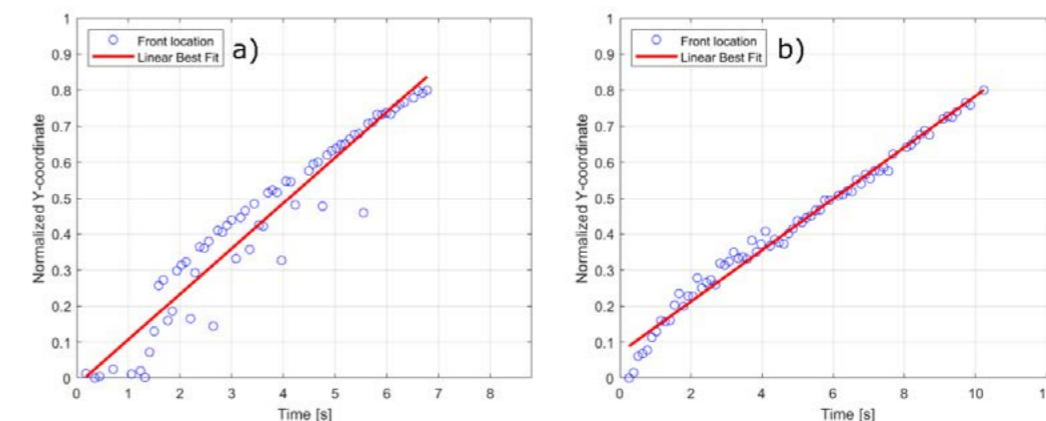


Figure 7: Solidification front's position as a function of time on a) the reference surface and b) the superhydrophobic surface.

While our standard analysis employed 100 frames to track the solidification front's motion on each surface, this study utilized only the first 80 frames. This reduction was necessary due to the low contrast between the solidification front and the rest of the droplet when the top of the droplet is reached. The y axis was adjusted to its maximum value, calculated based on the highest y axis diameter observed at the end of the process.

4.3 EVOLUTION OF DROPLET'S DIMENSIONS

Tracking of the maximum diameter of the droplet in x and y axis over time revealed temporal changes to both dimensions. The observations are presented in Figure 8 and were done on both surfaces, with a) representing the reference surface and b) the superhydrophobic one.

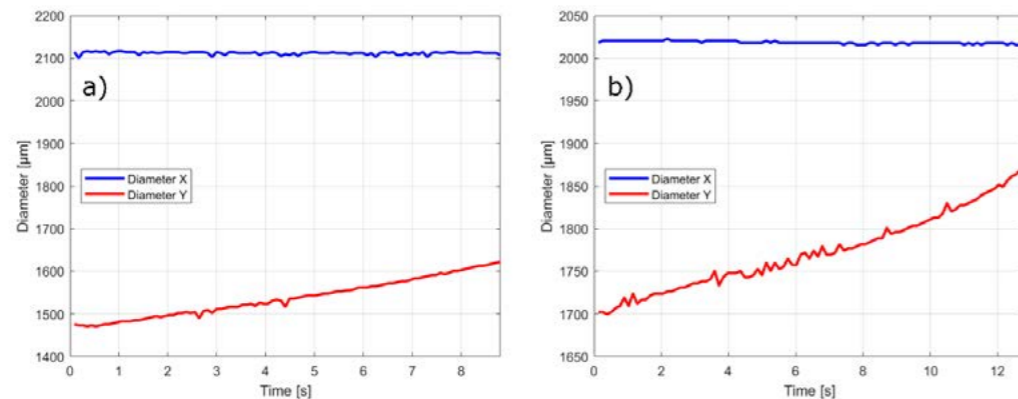


Figure 8: Evolution of diameters of a freezing droplet on the reference surface.

The blue line represents the diameter in x axis through the time we observed. The changes were minimal and mostly subject to noise in image processing. On the other hand, significant changes were observed for droplets on both types of surfaces in terms of their diameter in the y direction as shown by the red line. Expansion in the vertical direction is especially influenced by the formation of the pointy tip of the droplet at the end of the freezing.

4.4 EVOLUTION OF DROPLET'S SHAPE

To provide a more visually accessible representation of the changes to droplet's shape, we generated Figure 9 which includes reference surface under a) and treated superhydrophobic surface under b). In the upper right corner of both parts, timestamps are provided regarding the outline color of the droplet. From both figures it's clear that there is noticeable expansion of the droplet in the vertical direction, while minimal changes to the horizontal diameter were observed.

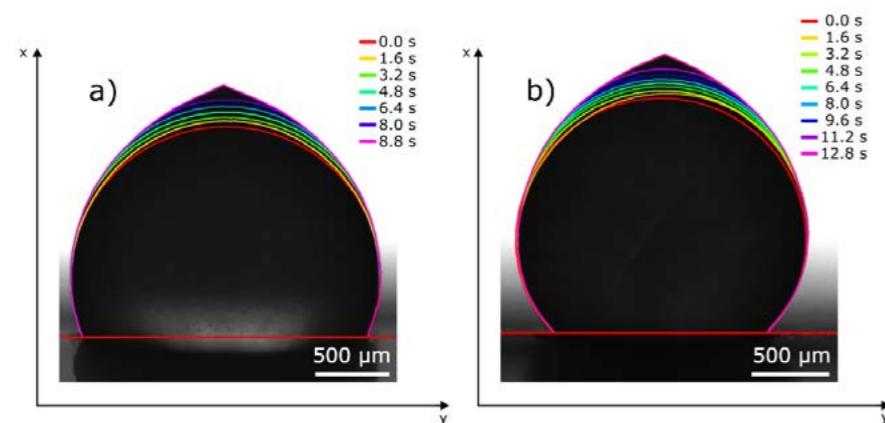


Figure 9: Change in the shape of the droplet on a) the reference surface and b) superhydrophobic surface.

Comparing time stamps between the surfaces shown in Figure 9 a notable distinction is visible. The section a) has a freezing duration of 8.8 s, while the section b) has a freezing time of 12.8 s. The discrepancy in time count can be attributed to the different freezing rates exhibited by these surfaces.

The 4-second discrepancy in freezing times between the reference and superhydrophobic surfaces aligns with prior research, as explained by Petrenko & Whitworth [2], emphasizing the critical role of surface wettability in freezing. Hydrophobic surfaces, as highlighted by Chaudhary & Li [4], expedite

freezing by minimizing droplet-surface contact, facilitating efficient nucleation and crystal growth, thus corroborating our observed freezing time difference. Integrating these insights enhances our understanding of freezing dynamics at the interface of surface properties.

5. Conclusion

In this study, we analyzed the freezing behavior of water droplets deposited on cold surfaces, focusing on recalescence, dimensional changes during freezing and tracking of the solidification front travel. Through experiments and image processing, we obtained the following conclusions. Recalescence was detected as transition from transparency to opacity of the droplet. We identified the origin of recalescence on different surfaces. The progression of the solidification front was tracked with the help of a custom-developed image processing program, showing nearly linear travel over time. Droplet dimensions saw significant growth in the vertical (y) axis, while remaining rather stable horizontally (x). We established a notable 4-second freezing time disparity between the reference and superhydrophobic surfaces. This finding is consistent with existing research, underscoring the influential role of surface wettability. In summary, the developed image processing program and our findings serve as a fundamental basis for further studies on the freezing process, aiding in the development of applications and more.

6. Literature

[1] A. Dhyani, W. Choi, K. Golovin, A. Tuteja, "Surface design strategies for mitigating ice and snow accretion," *Matter*, vol. 5, no. 5, pp. 1423-1454, 2022.
 [2] V.F. Petrenko, R.W. Whitworth, *Physics of Ice*, Oxford: Science, 1999.
 [3] Z. Zhu, X. Zhang, Y. Zhao, X. Huang, C. Yang, "Freezing characteristics of deposited water droplets on hydrophilic and hydrophobic cold surfaces," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 171, 2022.
 [4] G. Chaudhary, R. Li, "Freezing of water droplets on solid surfaces: An experimental and numerical study," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 57, pp. 86-93, 2014.
 [5] Y. Wang, P. Zhao, "Temperature-based analysis of

droplet cooling and freezing on femtosecond laser textured surfaces," *Applied Thermal Engineering*, vol. 206, 2022.

[6] Y. Yao, C. Li, Z. Tao, R. Yang, H. Zhang, "Experimental and numerical study on the impact and freezing process of a water droplet on a cold surface," *Applied Thermal Engineering*, vol. 137, pp. 83-92, 2018.

[7] X. Zhang, X. Liu, X. Wu, J. Min, "Simulation and experiment on supercooled sessile water droplet freezing with special attention to supercooling and volume expansion effects," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 975-985, 2018.

[8] X. Zhang, X. Liu, J. Min, X. Wu, "Shape variation and unique tip formation of a sessile water droplet during freezing," *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 927-934, 2019.

[9] M. Tembely, A. Dolatabadi, "A comprehensive model for predicting droplet freezing features on a cold substrate," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 859, pp. 566 - 585, 2018.

ADRIA MOBIL PRESEGLA REZULTATE IZ PREDPANDEMSKEGA LETA 2019

Rezultati poslovanja

Kljub motnjam v dobavni verigi in rahlemu upadu povpraševanja na evropskem trgu počitniških vozil je Adria Mobil v poslovnem letu 2021/2022, ki je sledilo vrhuncu popandemskega razcveta, ponovno realizirala dobre poslovne rezultate in dosegla drugo najboljšo leto v zgodovini družbe ter preseгла rezultat iz predpandemskega leta 2019.

Skupina Adria Mobil je prodala več kot 17.400 enot (počitniških vozil in mobilnih hiš), promet pa je znašal 590 milijonov evrov, kar odraža kumulativno 11-odstotno letno rast od leta 2015 do leta 2022. Skupina Adria Mobil je zaposlovala več kot 2.100 delavcev. Njene blagovne znamke so prisotne v 30 državah in na 500 prodajnih mestih po Evropi in širše.

V Adrii Mobil, d. o. o. so obseg prodaje zaznamovale

predvsem motnje v dobavni verigi, zlasti na področju baznih vozil, in rahla umiritev povpraševanja v primerjavi z vrhuncem po pandemiji v letih 20-21. S skoraj 16.000 prodanimi enotami (2021:18.211) je bila prodaja za 13 % manjša, pri čemer se je evropski tržni delež nekoliko zmanjšal, in sicer na skupno 6,1-odstotka za avtodome, počitniške prikolice in vane.

Med najpomembnejše dosežke na področju produktnega razvoja v letu 2022/23 sodi, kot navajajo v Adrii Mobil, uspešna predstavitev nove serije integriranih avtodomov Mercedes-Benz (Adria Supersonic), ki je prejela prestižni nagradi German Design Award (marec 2023) in Red Dot (junij 2023). Tudi najbolj prodajani avtodomi serij Coral in Matrix so sedaj v ponudbi na baznih vozilih Mercedes-Benz. Predstavljeni sta bili nova generacija avtodoma Coral XL in nova generacija prikolice Altea, ki sta prav tako našli veliko novih kupcev.



"Leto 2022 je bilo zahtevno, a kljub temu uspešno, Adria Mobil pa je dobro pripravljena za obvladovanje številnih izzivov, povezanih z motnjami v dobavni verigi, z jasnim poudarkom na čimprejšnji dobavi izdelkov našim strankam. Zmanjšanje povpraševanja na trgu po pandemiji in visoka inflacija sta povezana, vendar pričakujemo, da bo povpraševanje po počitniških vozilih še naprej veliko. Imamo močni blagovni znamki in distribucijo ter se nenehno osredotočamo na oblikovanje, inovacije in razvoj izdelkov. Z novimi naložbami v proizvodne zmogljivosti, operativno učinkovitost in trajnost smo dobro pripravljene na prihodnje izzive. Prišlo je tudi do sprememb v naši vodstveni ekipi, ki bodo prinesle nove kompetence za nadaljnji razvoj naše preverjene formule uspeha, z enakim poudarkom na naših blagovnih znamkah, izdelkih in distribuciji, z agilnim in odzivnim pristopom glede na nastale razmere. Tudi na področju portfelja izdelkov smo optimizirali število izdelkov, ki jih ponujamo, na trg pa prihaja nekaj zanimivih novih vozil in tlorisnih različic – nova prikolica

Aviva Lite in nov minivan Mode," je povedala **Sonja Gole** - generalna direktorica družbe Adria Mobil.

Dušan Mikuž, novi izvršni direktor za prodajo in trženje družbe Adria Mobil, pa je napovedal: "Adria Mobil se bo v prihodnjem obdobju osredotočila na stabilizacijo dobavne verige ter boljše usklajevanje povpraševanja in ponudbe po vrhuncu, ki je sledil pandemiji. Imamo dve privlačni blagovni znamki, Adria in Sun Living, in naročila ostajajo na visokem nivoju. Z visoko konkurenčno ponudbo v vseh kategorijah vozil in letošnjimi novostmi gremo samozavestno naprej."

Nova tovarna in reorganizacija obratov

Družba Adria Mobil ima sicer, kot je znano, dve tovarni počitniških vozil, ki izdelujeta vozila Adria in Sun Living, ter eno tovarno mobilnih hiš v Črnomlju (Adria Home). Glavna tovarna v Prečni v Novem mestu je s 43.000 kvadratnimi metri največja tovarna za proizvodnjo počitniških vozil v Evropi, marca 2022 pa so v bližini



reorganizacijo glavne proizvodne lokacije v Novem mestu v letu 2022 z dvema novima namenskima proizvodnima linijama - eno za integrirane avtodome (Supersonic, Sonic) in eno za luksuzne prikolice (Astella, Alpina), ki dopolnjujeta obstoječe linije za avtodome in prikolice na tej lokaciji.

20. obletnica družbe Adria Dom

Leta 2023 družba Adria Dom praznuje dvajsetletnico delovanja kot vodilni evropski proizvajalec mobilnih in modularnih hiš ter glamping šotorov.

Z več kot 300 zaposlenimi je Adria

(Bič pri Trebnjem) odprli nov obrat za proizvodnjo vanov na površini 8.500 kvadratnih metrov z novimi proizvodnimi linijami za minivane in vane (Adria Twin in Adria Twin Sports ter vani Sun Living Serija V).

Adria Mobil je tako vložila več kot 6 milijonov evrov v prenavo, tehnološke izboljšave in druge naložbe, ki bodo, kot napovedujejo, podjetju omogočile še večjo odzivnost ter agilnost glede na trende povpraševanja po počitniških vozilih.

Nova lokacija je omogočila tudi



Dom tudi eden največjih proizvajalcev mobilnih hiš, ki svojim strankam zagotavlja celovito storitev - od ideje, razvoja do proizvodnje in prodaje mobilnih hiš.

Vir: https://dolenjskilist.svet24.si/2023/08/28/278912/novice/dolenjska/Adria_Mobil_na_sejmu_karavaninga_v_D_sseldorfu/

<https://sl.adria-mobil.com/sredisce-za->

LE SEDMINA PODJETIJ PRI NAS SPADA V SAM VRH

Glede na standardno klasifikacijo dejavnosti prihaja največ podjetij, ki dosegajo bonitetno odličnost, iz panoge G: Trgovina, vzdrževanje in popravila motornih vozil (20,8 odstotka vseh podjetij). Sledijo M: Strokovne, znanstvene in tehnične dejavnosti (17,3 odstotka) in C: Predelovalne dejavnosti (16,8 odstotka). Znotraj posamezne panoge pa je največji delež »odličnjakov« v E: Oskrba z vodo, ravnanje z odpadki in odpadki, saniranje okolja (32,6 odstotka vseh podjetij v panogi).

Glede na standardno klasifikacijo dejavnosti prihaja največ podjetij, ki dosegajo bonitetno odličnost, iz panoge G: Trgovina, vzdrževanje in popravila motornih vozil (20,8 odstotka vseh podjetij). Sledijo M: Strokovne, znanstvene in tehnične dejavnosti (17,3 odstotka) in C: Predelovalne dejavnosti (16,8 odstotka). Znotraj posamezne panoge pa je največji delež »odličnjakov« v E: Oskrba z vodo, ravnanje z odpadki in odpadki, saniranje okolja (32,6 odstotka vseh podjetij v panogi). (Simbolna fotografija; arhiv DL)

Nekaj nad 14 odstotkov podjetij v Sloveniji dosega najvišje standarde poslovanja, kar je približno toliko kot lani, izhaja iz najnovejše analize družbe Dun & Bradstreet. Podjetja, ki so si prislužila certifikat bonitetne odličnosti, še naprej poslujejo bistveno bolje od povprečja celotnega gospodarstva, izstopajo tudi po učinkovitosti sredstev.

V Sloveniji je najvišje standarde poslovanja doseglo 27.933 podjetij od 196.931 registriranih. Med njimi se v najvišje razrede, ki dosegajo standarde bonitetne odličnosti tri leta zapored, uvršča 8,4 odstotka podjetij, so v sporočilu za javnost navedli v družbi Dun & Bradstreet.

Po številu bonitetno odličnih podjetij izstopajo mikroenote, skoraj 20.000 mikro podjetij spada med certificirance, večina pa jih dosega srebrno bonitetno odličnost. Nekaj več kot tretjina bonitetno odličnih podjetij prihaja iz Osrednjeslovenske regije, po deležu znotraj posamezne regije pa je največ odličnih v Gorenjski regiji, in sicer 15,7 odstotka vseh podjetij v regiji.

Tik za tem sta Jugovzhodna Slovenija, kjer je »odličnih«

15,1 odstotka izmed vseh podjetij v regiji, in Goriška s 14,9 odstotka. Tudi druge regije se lahko pohvalijo s podobnim deležem »odličnih« znotraj regije (Primorska – 14,4 odstotka, Koroška – 14,1 odstotka, Savinjska – 13,6 odstotka, Podravska – 13,5 odstotka, Posavska – 12,9 odstotka, Zasavska in Pomurska – 12,4 odstotka, Obalno-kraška – 12,1 odstotka).

Podjetja, ki so si prislužila certifikat bonitetne odličnosti, poslujejo bolje od povprečja, poudarjajo v bonitetni družbi. Na dan 20. junija je bila povprečna donosnost sredstev certificirancev osem odstotkov, medtem ko je ta v gospodarstvu 4,7 odstotka.

Podatki družbe obenem kažejo, da ustvarjeni dobički certificirancev manj nihajo in so manj podvrženi raznoraznim zunanjim gospodarskim dejavnikom, kot to velja za gospodarstvo. "Glede na stabilnost poslovanja so certificiranci državno povprečje presegli za 10 odstotkov," so pojasnili.

Podjetja s certifikatom več svoje dejavnosti financirajo z lastnimi viri (58,6 odstotka) in manj z zadolževanjem, kot to velja za gospodarstvo (48,9 odstotka).

Družbe s certifikatom po navedbah družbe izstopajo tudi po učinkovitosti sredstev, saj z enim evrom sredstev ustvarijo 1,26 evra prihodkov, v celotnem gospodarstvu pa je ta številka pri 1,15 evra. Certificirana podjetja so v povprečju manj zadolžena, njihova dodana vrednost na zaposlenega pa je za približno 6000 evrov višja kot v celotnem gospodarstvu, pri 54.334 evrov, so navedli.

Višji od državnega povprečja so pri certificiranih prav tako prihodki na zaposlenega (16.369 evrov v primerjavi z 11.363 evrov). Certificirana podjetja odlikuje tudi izredna plačilna disciplina, so še pojasnili v družbi Dun & Bradstreet, ki podeljuje certifikat bonitetne odličnosti.

Vir: https://dolenjskilist.svet24.si/2023/07/24/277908/novice/dolenjska/Le_sedmina_podjetij_pri_nas_spada_v_sam_vrh_koliko_odlicnjakov_ima_Dolenjska/



POLETNA FS ŠOLA 2023 NA FAKULTETI ZA STROJNIŠTVO V MARIBORU



Na Fakulteti za strojništvo UM so organizirali Poletno FS šolo za osnovnošolce in srednješolce, ki je potekala od 21. do 28. avgusta 2023.

Na delavnicah so mladim ponudili stik z aktualnimi vsebinami tehniških področij. Izvedli so številne delavnice: Konstruiraj, izdelaj, preskusi model letala, dve matematični delavnici s pickom do ploščine in Arhimedska telesa, Merilni izzivi s pametnim telefonom, Spoznaj digitalno proizvodnjo, Spoznaj 3D tisk in si natisni svoj izdelek, Ogled testiranja formule GPE23.

Delavnice so vodili profesorji in asistenti, vključili so se tudi študenti. Z aktivnim sodelovanjem so udeleženci poletne šole nadgradili svoja znanja ter morda dobili navdih za izbiro svoje strokovne poti.

Osnovnošolci in srednješolci so dobili vpogled v pogoje dela, pridobili so tudi dodatne informacije o različnih dejavnostih fakultete, o študiju, raziskovalnem delu, občudjskih dejavnostih in študentskem življenju.

Vir: Facebook stran Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru



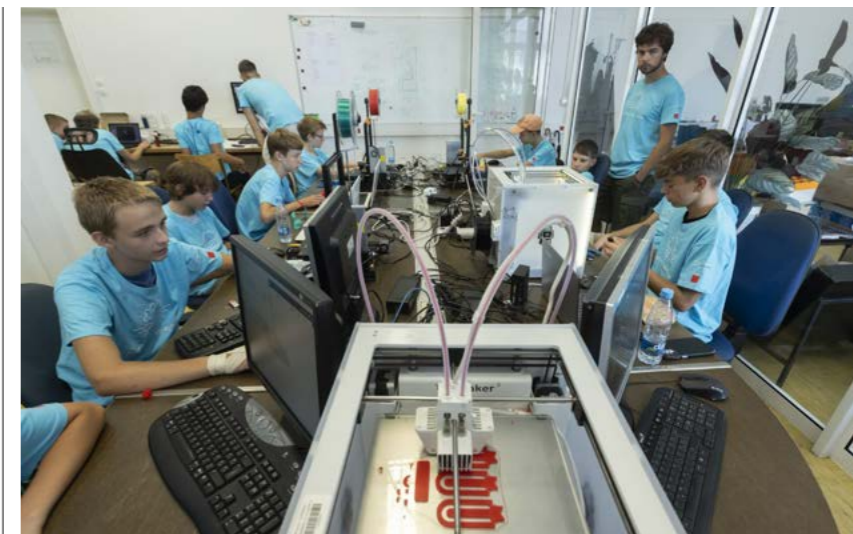
NA FAKULTETI ZA STROJNIŠTVO UL SO ZAKLJUČILI 10. POLETNO ŠOLO STROJNIŠTVA

Letošnje 10. Poletne šole strojništva se je udeležilo 82 udeležencev, ki so konec počitnic preživel na 10 delavnicah: 3D tiskanje izdelkov, Gradnja enostavnega jadralnega letala – od zasnove do izdelka, Hidravlični mehki robot, HPC – High Performance Computing, Izdelaj mini vetrno elektrarno, Izdelava 3D pečatnika s svojim podpisom, Izdelava toplotnega pogonskega stroja, Mobilni robot, Pametna solarna rožica ter Stirlingov motor – izziv za trajnostni razvoj.

Udeleženci so izdelke najprej zasnovali, nato izdelali in na koncu tudi preizkusili. Udeleženci delavnice Izdelava enostavnega toplotnega pogonskega stroja so obiskali tudi Toplarno Ljubljana.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani skušajo mladim približati svet strojništva in jih navdušiti za močno deficitaren poklic na različne načine. Poleg ustaljene promocije in sodelovanja s srednjimi šolami so v letošnjem letu že organizirali ločen poletni raziskovalni tabor »Raziskuj in poganjaj prihodnost« za dijake, nadaljevali pa s Poletno šolo strojništva, na katero se učenci radi vračajo – vsakokrat na drugo delavnico. Številni so se Poletni šoli strojništva pridružili, ker jih zanima tehnika in razmišljajo, da bi nekoč strojništvo tudi študirali.

Vir: <https://www.fs.uni-lj.si/sporocila-za-javnost/zakljucili-smo-z-jubilejno-poletno-solo-strojnistva/>



INŽENIRSTVO



NOVATIVNE REŠITVE ZA TRAJNOSTNI RAZVOJ IN SAMOOSKRBO



AKADEMIJA STROJNIŠTVA 2022

INŽENIRSTVO – INOVATIVNE REŠITVE ZA
TRAJNOSTNI RAZVOJ IN SAMOOSKRBO

Ljubljana, 23. november 2022: Akademija strojništva je povezala inženirje strojništva ter se s podelitvijo nagrad poklonila izstopajočim posameznikom na področju inženirstva. Nagrado za globalno prodornost slovenskega inženirstva sta prejela Boštjan Gorjup, direktor družbe BSH Hišni aparati ter Bogomir Mirko Strašek - ustanovitelj, direktor in lastnik družbe KLS Ljubno. Ivu Boscarolu, podjetniku in ustanovitelju podjetja Pipistrel je bila podeljena nagrada za življenjsko delo. V drugem delu dogodka je potekala okrogla miza, na kateri so uspešni inženirji delili svoje dragocene izkušnje.

Akademija strojništva, v organizaciji Zveze strojnih inženirjev Slovenije, v sodelovanju z Gospodarsko zbornico, Združenjem kovinske industrije ter s Fakulteto za strojništvo v Ljubljani, svojo tradicijo ohranja že več kot desetletje ter tako vzpodbuja povezovanje inženirjev in opozarja na pomembnost inženirskega poklica.

V uvodu je najprej vse pozdravil **prof. dr. Iztok Golobič**, predsednik Zveze strojnih inženirjev Slovenije, nadaljeval je minister za izobraževanje, znanost in šport, prof. dr. Igor Papič ter dr. Mark Pleško, predsednik Inženirske akademije Slovenije.



GLOBALNO PREBOJNI DOSEŽKI TER NAGRADA ZA ŽIVLJENJSKO DELO

Prave odločitve v pravem trenutku so lastnosti posameznikov z globalno prodornimi dosežki. 125-članska komisija je izbrala najbolj izstopajoče: gospoda Boštjana Gorjupa ter gospoda Bogomirja Mirka Straška.

Boštjan Gorjup, **direktor družbe BSH Hišni aparati**, je menedžer, ki v ospredje postavlja cilj biti prvi po odličnosti in ne po velikosti, ter že vrsto let prispeva k razvoju v Savinjski regiji in k pozicioniranju Slovenije



kot odličnega okolja za raziskave in razvoj. V podjetju je uvedel organizacijsko kulturo, ki temelji na zaupanju, odprtem komuniciranju, sodelovanju in poštenosti. Zaposleni pri njem najbolj cenijo ustvarjalnost, obvladovanje dela in usmerjanje ter izkazovanje podpore.

Bogomir Mirko Strašek je ustanovitelj, direktor in lastnik družbe KLS Ljubno, ki izdeluje zobate obroče za avtomobilsko industrijo in v letu 2022 praznuje 50-letnico delovanja. Gospod Strašek je v podjetju od vsega začetka in je v njegovo rast in razvoj vložil tako rekoč vse življenje. Je človek z izjemnim občutkom za sodelavce, vedno na voljo za potrebe lokalne skupnosti, za ljudi. Podjetje se je pod njegovim vodstvom razvilo v podjetje z visoko stopnjo družbene odgovornosti in navdihujočo notranjo pripadnostjo.

neposredni okolici ter razvija rešitve in produkte, ki so trajnostno naravnani, še zlasti do naše atmosfere.

Podeljena so bila tudi priznanja

Podeljeno je bilo tudi posebno priznanje za uspešen prenos znanj in izkušenj - Iz roda v rod si inženirstvo utira pot – prejelo ga je podjetje **Kronoterm**, prevzela sta ga ustanovitelj podjetja Rudi Kronovšek ter njegov naslednik Bogdan Kronovšek.

V okviru Akademije strojništva so raziskovalci iz akademskega in industrijskega okolja prikazali inženirska spoznanja v obliki prispevkov, ki so objavljeni v posebni številki revije Svet strojništva. Najboljši so bili tudi nagrajeni.



Podeljena je bila tudi najvišja nagrada - **nagrado za življenjsko delo je prejel Ivo Boscarol**. Je eden najuspešnejših slovenskih podjetnikov in ustanovitelj ter dolgoletni direktor podjetja Pipistrel, ki proizvaja ultra lahka letala. Aprila 2022 je večinski delež podjetja Pipistrel prodal ameriškemu podjetju, sam je ohranil manjši poslovni delež, v podjetju pa je ostal kot svetovalec in zaslužni predsednik podjetja. Prodaja mu je prinesla več kot 200 milijonov evrov, zato pravi, da ima zdaj prvič v življenju priložnost, da lahko izdatno pomaga in vlaga v dobre poslovne ideje. Udejstvuje se v družbeno odgovornih dejanjih v



INŽENIRSTVO – INOVATIVNE REŠITVE ZA TRAJNOSTNI RAZVOJ IN SAMOOSKRBO

Na dogodku je potekala tudi okrogla miza, v kateri so svoj pogled na trenutne razmere ter svoje izkušnje delili:

1. Ivo Boscarol, ustanovitelj podjetja Pipistrel
2. Boštjan Gorjup, direktor, BSH Hišni aparati Nazarje
3. dr. Jure Knez, soustanovitelj in lastnik podjetja Dewesoft
4. prof. dr. Igor Papič, minister za izobraževanje, znanost in šport
5. prof. dr. Mihael Sekavčnik, dekan Fakultete za strojništvo, UNI LJ
6. dr. Boštjan Pečnik, izvršni podpredsednik podjetja Gorenje
7. mag. Marko Gorjup, direktor TPV Group
8. dr. Hubert Kosler, direktor podjetja Yaskawa
9. dr. Marjan Pogačnik, direktor podjetja Iskra Mehanizmi
10. Radovan Bolko, član nadzornega sveta Kolektor



Dogodek je vodila gospa **Anja Križnik Tomažin**, nastopili so **De Iiri**, plesna šola **Kazina** ter **Vlado Kreslin**.

Po uradnem delu dogodka je sledil še družabni del, kje je potekala tudi razstava kar 63 posterjev, ki so jih pripravili raziskovalci iz univerzitetne in gospodarske sfere. Na dan dogodka je izšla tudi revija Svet strojništva, v kateri so objavljeni vsi intervjuji nagrajencev ter tudi vsi prispevki.



Nova strokovna Zbirka predpisov Plin

NE ZAMUDITE NAROČILA TRETJE
ZBIRKE PLIN 2023 + POSEBNO DARILO.

Zbirka vključuje **tiskano** verzijo v mehki vezavi in **elektronsko verzijo** na spominski kartici.

Za vsa naročila
do 10. oktobra 2023 na info@siplin.si
vam nudimo ceno
195,00 EUR + DDV ter **DARILO**,
usnjen rokovnik SIPLIN z zamenljivim
vložkom, za vsak naročen komplet.



INFORMATOR: BSH-JU POMOČ

BSH HIŠNIM APARATOM ZAGOTOVLJENA POMOČ DRŽAVE IN MATIČNEGA KONCERNA



Vodna ujma je močno prizadela tudi tovarno BSH Hišni aparati v Nazarjah. Proizvodnja in celotno poslovanje je do nadaljnjega prekinjeno. V podjetju imajo formiran krizni štab, z angažiranjem zaposlenih in gasilcev poteka čiščenje prostorov in opreme, cilj pa je v roku nekaj tednov postopno obnoviti delovanje tovarne.

Posledice poplave si je v Nazarjah ogledal tudi član uprave BSH iz Nemčije Rudolf Klötscher in zagotovil polno podporo ter pomoč s strani koncerna pri čimprejšnjem ponovnem zagonu. Prav tako sta

si nastalo škodo v tovarni ogledala minister za gospodarstvo, turizem in šport Matjaž Han in minister za finance Klemen Boštjančič, ki sta zagotovila, da bo država sprejela potrebne ukrepe za prizadeta podjetja.

Vir: Savinjske novice

Foto: Arhiv podjetja

INAVGURACIJA NOVEGA DEKANA FAKULTETE ZA STROJNIŠTVO UNIVERZE V MARIBORU

AVGUSTOVSKE POPLAVE MOČNO PRIZADELE DRUŽBO KLS LJUBNO



odru so se zbrali rektor, nekdanji dekan in novi dekan Fakultete za strojništvo.

Na ta način je na podlagi izvedenih volitev dekana Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter podanim predlogom Senata Fakultete za strojništvo rektor Univerze v Mariboru na podlagi odločbe imenoval za dekana Fakultete za strojništvo prof. dr. Mateja Vesenjaka in sicer za mandatno dobo štirih let od 1. junija 2023 do vključno 31. maja 2027. Novi dekan je nagovoril vse prisotne, se zahvalil nekdanjemu dekanu za vodenje fakultete in mu predal priložnostno darilo.

V četrtek, 29. 6. 2023, je na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru potekala inavguracija novega dekana prof. dr. Mateja Vesenjaka. Le-ta je nasledil prof. dr. Bojana Dolšaka, ki je Fakulteto za strojništvo uspešno vodil zadnjih 8 let.

Slovesnosti se je dogodka udeležil rektor Univerze v Mariboru prof. dr. Zdravko Kačič ter dekani fakultet, prodekani in tajniki slovenskih in tujih fakultet, prorektorji, nekdanji rektorji, nekdanji dekani Fakultete za strojništvo, ravnateljji srednjih šol, predstavniki vodstev partnerjev Fakultete za strojništvo ter zaposleni in študenti Fakultete za strojništvo. Najprej je zbrane nagovoril rektor Univerze v Mariboru prof. dr. Zdravko Kačič, nato pa nekdanji dekan Fakultete za strojništvo prof. dr. Bojan Dolšak.

Sledil je osrednji akt inavguracije, in sicer predaja dekanskih oblačil in insignije novemu dekanu. Na

Celoten slavnostni dogodek je popestril kulturni program v izvedbi vokalne zasedbe Melosanika ter kantavtorice, pevke in skladateljice Ditke, ki se je zaključil s prijetnim druženjem pred dvorano Boruta Pečenka.

Vir: Facebook stran Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru



Med podjetji, ki so jo v poplavah odnesla najslabše, je družba KLS Ljubno. Ustanovitelj, direktor in lastnik družbe, Bogomir Mirko Strašek, lanskoletni nagrajenec za globalno prodornost slovenskega inženirstva, je povedal, da je celotna proizvodnja uničena, zato bodo morali tovarno zgraditi tako rekoč na novo.

Višina škode na strojih in opremi je po njegovih ocenah med 30 in 50 milijonov evrov, poslovna škoda pa znaša nekajkrat več. Brez državne pomoči več kot 100 milijonov evrov škode po vodni ujmi ne bodo mogli sami sanirati, od zavarovalnice pa bodo prejeli komaj dva odstotka odškodnine.

Direktor je opozoril tudi na posledice prekinitve njihove

proizvodnje za celotno avtomobilsko industrijo, saj imajo med dobavitelji istovrstnih izdelkov 17-odstotni delež. KLS Ljubno je velik dobavitelj zobatih obročev, s svojimi izdelki pa oskrbuje več kot 80 odstotkov avtomobilskega trga v Evropi.

V družbi se trudijo čim prej vzpostaviti proizvodnjo, vendar za to potrebujejo še nekaj mesecev. Strašek se nada, da bi lahko del proizvodnje vzpostavili oktobra, vendar vseh kupcev še vedno ne bodo mogli oskrbovati s svojimi izdelki.

(Foto: ŠS)

KRKI ZLATO NACIONALNO PRIZNANJE ZA INOVACIJO



Ljubljana/Novo mesto - V okviru Dneva inovativnosti je Gospodarska zbornica Slovenije (GZS) v petek, 21. 9. 2023 že enaindvajsetič podelila nacionalna priznanja najbolj inovativnim podjetjem in inovatorjem v podjetjih in drugih organizacijah. Rdeča nit letošnje podelitve je bila »Inovacija = ideja x energija2«. Nacionalno priznanje GZS za najboljše inovacije predstavlja najvišje priznanje inovativnim dosežkom slovenskih podjetij in s tem promocijo inovativnosti v Sloveniji. Podeljenih je bilo 10 zlatih, 22 srebrnih, 11 bronastih priznanj, 2 posebni priznanji za inovacijski izziv ter 1 priznanje za prebojno invencijo.

Zlato priznanje Krki

Zlato priznanje je prejela tudi novomeška Krka, in sicer za svoji novi zdravili za sladkorno bolezen tipa 2, ki bistveno izboljšujeta dostopnost najsodobnejših tovrstnih zdravil. Kot so na zbornici zapisali v

obrazložitvi nagrade, je njuna prednost patentno neodvisna oblika učinkovine, formulacija in izboljšana embalaža, ki skupaj zagotavljajo superiorno stabilnost izdelka, trajnostno naravnani tehnološki postopki pa omogočajo neprekinjeno razpoložljivost obeh izdelkov na trgu, stroškovno učinkovitost in minimalen vpliv na okolje.

V regijo tudi srebrna priznanja

Srebrna priznanja pa so šla tudi v roke podjetjem TPV Automotive, Iskra Pio in znanstveno-tehnološko središče Rudolfovo v Novem mestu, Adria Dom, Mint sports, Gen energija ter Krka.

Foto: Krka d.d.

Vir: <https://dolenjskilist.svet24.si/2023/09/19/>

RAZVITO V SLOVENIJI

WWW.RAZVITOVSLÖVENIJI.SI



PRIKAZ SLOVENSKE USTVARJALNOSTI!

VZPODBUJANJE USTVARJALNOSTI SLOVENSKEGA GOSPODARSTVA.

**INOVATIVNO
USTVARJALNO DELO!**
SPODBUDIMO MLADE ZA NARAVOSLOVNE
IN TEHNIČNE ZNANOSTI.

BLIZUIZRANICE

Nekatere besede so si med seboj zelo podobne, razlikujejo se le v eni ali največ dveh črkah, a je pomen takšnih besed pogosto povsem drugačen. Strokovno jih imenujemo tudi blizuizraznice.

Katere so te besede?

Enakozvočnice so besede, ki imajo enako pisno in glasovno podobo, med njihovimi pomeni pa ni mogoče videti metonimične ali metaforične povezanosti, niti si v danem trenutku ne moremo misliti, da je taka zveza kdaj obstajala. Praviloma so tudi različnega izvora, npr. **vila** »mitološko bitje« – **vila** »razkošna hiša«.

Enakopisnice so besede, ki se pišejo enako, izgovarjajo pa različno. **peška**¹ "ženska, ki hodi peš" in **peškà**² "manjše seme v nekaterih sadežih"

Enakoglasnice so besede, ki se pišejo različno, izgovarjajo pa enako. **bél**¹ fiz. "enota za merjenje jakosti zvoka ali glasnosti" in **bèv** "posnema odsekan pasji glas"

Blizuizraznice so besede, ki imajo podobno pisno in glasovno podobo, zato se v rabi pogosto zamenjujejo. V nadaljevanju pogledajmo nekaj primerov.

Samostalniki

Trenerka je imela oblečeno novo trenirko.
Trenerka = ženska, ki se (poklicno) ukvarja s treniranjem.
Trenirka = športno oblačilo iz hlač in jope.

Častnik vsako jutro prebere dnevni časnik.
Časnik = dnevno ali tedensko glasilo za obveščanje javnosti.
Častnik = član poveljniškega vojaškega osebja.

S sklenitvijo avtomobilskega zavarovanja ste postali zavarovalec in naš zavarovanec.
Zavarovanec = oseba, katere premoženjska ali kakšna druga korist je zavarovana.
Zavarovalec = kdor z zavarovalnico sklene zavarovalno pogodbo.
Tvorjenke, ki jih imenujemo **sestavljenske**, nastanejo s sestavljanjem predpone in besedotvorne podstave.
Sestavljenka = vrsta tvorjenke, beseda, nastala z dodajanjem predpone.
Sestavljanka = igrača, pri kateri se sestavljajo elementi, deli.

Pridevniki

Jure dela tudi ob dneh, ki niso delovni
– res je **delaven** človek.
Deloven = nanašajoč se na delo.
Delaven = tak, ki rad dela.

Pridevnika **tehničen** in **tehniški** sta nastala iz istega samostalnika – **tehnika** –, zato nista pravi blizuizraznici, pač pa besedotvorni dvojnici. Uporabljamo ju glede na samostalnik, ki se pojavi ob njiju.

Na **tehniški šoli** smo se naučili **tehničnega** risanja.
Tehnični = nanaša se na delovanje (tehnični izdelek, tehnična dokumentacija, tehnično risanje).
Tehniški = veže se s samostalniki, ki poimenujejo ustanove, slovarje, izobraževalne programe (tehniški program, tehniški slovar).

Pri **fizikalni** spremembi se snov kemijsko ne spremeni.
Tek je **fizično** naporen.
Fizičen = nanašajoč se na človeški organizem, telesen.
Fizikalen = nanašajoč se na fiziko.

Glagoli

V skupini glagolskih blizuizraznic je veliko takšnih, ki jih lahko tvorimo s spremembo glagolskega vida ali naklona: **vzame** (povedni in pogojni glagolski naklon), **vzemi** (velelni glagolski naklon).
Morala bi se ukvarjati s športom, a se zaradi poškodbe ne **morem**.
Moči = izraža sposobnost oseba, da dejanje uresniči (morem).
Morati = izraža nujnost, da oseba dejanje izvede (moram).

Ko je **Dončić** zadel zadnji koš, je nasprotnikom **zadal**



bolečino.
Zadati = narediti, povzročiti kaj, navadno neprijetnega, slabega.
Zadeti = premikajoč se priti v sunkovit dotik s čim.

Da je **stremela** k višjim ciljem, smo vedeli **takoj**, ko je po razgovoru **strmela** skozi okno.
Stremeti = prizadevati si doseči, uresničiti kaj.
Strmeti = gledati, navadno nepremično.

Ker je **usvojila** tudi težje gibe, je **osvojila** prvo mesto.
Osvojiti = z bojem spraviti tuje ozemlje pod svojo oblast, publ. doseči, dobiti.
Usvojiti = prejeti kaj tujega in narediti za svoje, naučiti se.

Posebnosti

Poseben primer dvojnic so besedotvorne dvojnice: besede, ki imajo isto besedotvorno in/ali skladenjsko podstavo. Tako sta besedi **katolik** in **katoličan** v jezikovnih priročnikih označeni kot sopomenki, pri čemer Pravopis kot prednostno dvojnico obravnava izraz **katolik/katolikinja**. Zelo zanimivi sta tudi pridevniški dvojnici **gasilni** in **gasilski**. **Gasilni** (aparati) se nanaša na gašenje, **gasilski** (avto) pa na gasilce.

Če boste v dvomih, katera blizuizraznica je ustrezna, njen pomen preverite v Slovarju slovenskega knjižnega jezika. Pri izbiri (besedotvornih) dvojnic bodite pozorni na kvalifikatorje v jezikovnih priročnikih. Kvalifikator **in** v SSKJ označuje **enakovredno**, v Pravopisu pa **manj navadno** dvojnico. Kvalifikator **ali** v SSKJ povezuje na zunaj različne, a pomensko enake in zamenljive besede, v Pravopisu pa **enakovredne** dvojnice. Kvalifikator **tudi** v SSKJ stoji pred **manj navadno** dvojnico, v Pravopisu pa pred **še dopustno** dvojnico.

Vir: Rtv slo.si/jezikovni spletovalec

AKADEMIJA STROJNIŠTVA 2023



AKADEMIJA STROJNIŠTVA

AKADEMIJA STROJNIŠTVA 2023

INŽENIRSTVO – POVEZOVANJE ZA TRAJNOSTNI PREBOJ

sreda, 22. november 2023, ob 18. uri
v Cankarjevem domu v Ljubljani ter prek spleta