

# Solarno grijanje primjenom termoelektričnog efekta i prinudne konvekcije kao dio rješenja implementacije Pariskog sporazuma

Milan B. Pupčević<sup>1</sup>, Goran Trbić<sup>2</sup>, Petar Gvero<sup>1</sup>, Milovan Kotur<sup>1</sup>, Danijela Kardaš Ančić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

<sup>2</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

[milan.pupcevic@mf.unibl.org](mailto:milan.pupcevic@mf.unibl.org), [goran.trbic@pmf.unibl.org](mailto:goran.trbic@pmf.unibl.org), [petar.gvero@mf.unibl.org](mailto:petar.gvero@mf.unibl.org), [milovan.kotur@mf.unibl.org](mailto:milovan.kotur@mf.unibl.org), [danijela.kardas@mf.unibl.org](mailto:danijela.kardas@mf.unibl.org)

**Sažetak** - Svjetska privreda se trenutno suočava sa mnogobrojnim izazovima, ali svakako jedan od vodećih je rješavanje problema klimatskih promjena i zagađenja životne sredine. Dosadašnja neracionalna upotreba neobnovljivih resursa, oštećenje ozonskog omotača kao i zagađenje životne sredine, zahtijeva nova rješenja na primjeni obnovljivih izvora energije. Mnogobrojna naučna istraživanja dokazuju da obnovljivi izvori energije pružaju perspektivu smanjenja ekološke ugroženosti i predstavljaju jednu od ključnih komponenti koncepta održivog razvoja. Trenutno na planeti Zemlji živi više od 7 milijardi ljudi, a očekivanja su da će se taj broj do kraja vijeka udvostručiti. Eksplozivnim rastom stanovništva nastaju zahtjevi za ubrzanim razvojem industrije i za eksplozivnim rastom materijalnih dobara i proizvodnih sirovina. Conference of the Parties – COP se održava u cilju rješavanja navedenih problema i očekuje se donošenje konkretnih odluka o klimatskim promjenama. Jedan od usvojenih ciljeva Pariskog sporazuma COP21 je razvoj i napredak tehnologija u svrhu smanjenja štetnih emisija. Sistem solarnog grijanja objekata primjenom termoelektričnog efekta, koji radi bez freona i bez sagorijevanja fosilnih goriva, može biti mali korak u rješavanju problema zagađenja životne sredine. U ranijem radu je analitički i eksperimentalno dokazano da se navedeni sistem može koristiti, ali sa malim vrijednostima koeficijenta performansi COP (Coefficient of Performance). U ovom radu će biti analitički prikazano poboljšanje sistema grijanja sa prirodnom konvekcijom primjenom prinudne konvekcije na izmjenjivaču toplote. Sa ovim poboljšanjem KGH sistema dolazi do značajnog povećanja koeficijenta grijanja COP, u nadi da ovaj sistem može biti dio rješenja koja se postavljaju pred predstojeći Conference of the Parties – COP30.

**Ključne riječi** - *Coefficient of Performance; Conference of the Parties; Izmjenjivač toplote; Termoelektrični efekat*

## I. UVOD

Na Zemlji je početkom XX vijeka emisija CO<sub>2</sub> iznosila oko 1,3 gigatona godišnje, odnosno 0,65 tona po osobi, dok je početkom ovoga vijeka emisija CO<sub>2</sub> godišnje bila veća od 6300 Gt [1]. Ukoliko se želi postići nezavisnost od fosilnih goriva potrebno je ulagati u tehnologije koje su trenutno u fazi istraživanja ili prototipa.

Iako je Prva deklaracija konferencije Ujedinjenih nacija o životnoj sredini usvojena u Stokholmu 1972. godine [2], a zatim 1985. godine i 1988. u Torontu sastanak više od 300

naučnika, političara i privrednika [3], do 1992. godine nije bilo ozbiljnijeg djelovanja po pitanju štetnih emisija. Porast temperature na Zemlji je bio inicijativa da se 1992. godine u Rio de Žaneiro održi konferencija Ujedinjenih nacija poznata i kao „Earth Summit”, pri čemu je 155 država potpisalo UN-ovu Okvirnu konvenciju o promjeni klime, kojom je 2000. godina označena kao rok za smanjenje emisija na nivo iz 1990. godine [3]. Sve države su postale ugovorene strane (engl. Party to the Convention), a skupovi u budućnosti koje su zemlje potpisnice održavale nazvani su Conference of the Parties (COP).

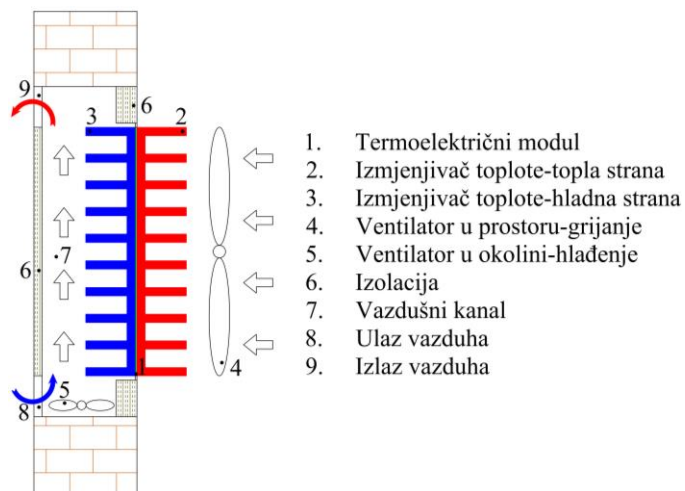
Najviše citiran je COP21, koji je održan u Parizu 2015. godine, a postavio je ozbiljne ciljeve za globalno smanjenje emisija stakleničkih gasova [3]. Da bi se ostvario razvoj i napredak tehnologija u svrhu smanjenja emisija, prema COP21, u sklopu Sporazuma su osnovani Izvršni odbor za tehnologiju (engl. Technology Executive Committee) i Centar za klimatsku tehnologiju (engl. Climate Technology Centre and Network), čija je uloga provođenje istraživanja, razvoj tehnologija i povećanje kapaciteta tehnologija u svrhu smanjenja emisija. COP26 konferencija je održana u Glazgovu 2021. godine [4], sa najvećim očekivanjima ikada. Učestvovalo je 197 stranaka Okvirne konvencije UN-a o promjeni klime (UNFCCC). Ujedinjeno Kraljevstvo, kao predsjedništvo COP-a, usvojilo je ambiciozan zadatak da zadrži povećanje zagrijavanja od 1,5 °C, a kao konačnica pregovora usvojen je Glazgovski klimatski pakt. Na konferenciji COP27, održanoj 2022. godine, usvojena su četiri glavna cilja [5]:

- **ublažavanje:** osigurati ostvarenje cilja da se globalno zagrijavanje zadrži na 1,5 °C u odnosu na predindustrijski nivo,
- **prilagodavanje:** učestvovati u poboljšanom globalnom programu djelovanja u području prilagodavanja,
- **finansiranje:** preispitati napredak u pogledu osiguravanja 100 milijardi američkih dolara godišnje do 2025. godine kako bi se zemljama u razvoju pomoglo da se suoče sa negativnim učincima klimatskih promjena i
- **saradnja:** osigurati odgovarajuću zastupljenost svih relevantnih zainteresovanih strana na konferenciji COP27, a posebno ugroženih zajednica.

U ranijem radu [6] dokazano je eksperimentalno i analitički da sistem koji radi na principu termoelektričnog efekta može biti korišten za grijanje stambenog prostora. Ukoliko sistem radi bez ventilatora, to jeste nije osigurana prinudna cirkulacija ambijentalnog vazduha preko aluminijumskog zagrijača, mora se obratiti pažnja na geometriju izmjenjivača toplote. Ukoliko izmjenjivač toplote sa pločastim rebrima nema odgovarajući razmak između rebara, cirkulacija vazduha prirodnom konvekcijom između rebara ne obezbjeđuje odgovarajući prenos toplote. U tom slučaju je koeficijent performansi sistema COP veoma mali i iznosi manje od 0,3 [6]. Optimalni razmak između rebara na izmjenjivaču toplote osigurava COP i veći od 1, ali tokom samog zagrijavanja je ta vrijednost ispod 1, što nije energetski efikasno. Korišćenje navedenog režima je opravdano isključivo ukoliko sistem radi i sa prinudnom konvekcijom i ima mogućnost regulacije i gašenja ventilatora u noćnom režimu rada kada se postavljaju zahtjevi za niskom bukom [7]. U nastavku rada će biti prikazano analitičko rješenje poboljšanja prenosa toplote primjenom prinudne konvekcije.

## II. SOLARNO GRIJANJE PRIMJENOM TERMoeLEKTRIČNOG EFEKTA SA PRIRODNOM I PRINUDNOM KONVEKCIJOM

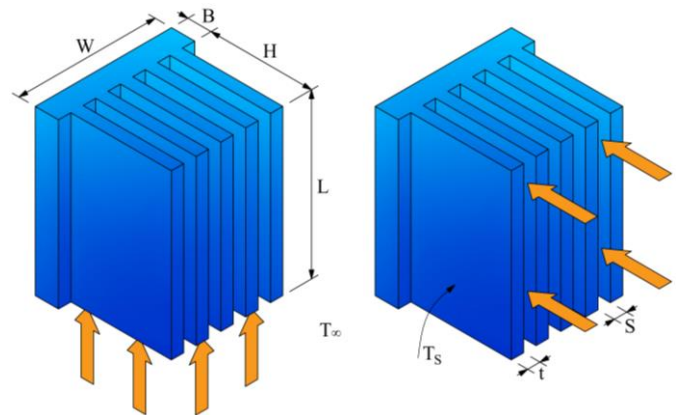
Cilj ovog rada je napraviti detaljan matematički model prenosa toplote prinudnom konvekcijom, za sistem prikazan na Sl. 1, a zatim izvršiti uporednu analizu sa ranije analitički i eksperimentalno dobijenim rezultatima primjenom prirodne konvekcije.



Sl. 1. Sistem grijanja sa TEM pozicioniranim u zidu

Prenos toplote se analizira za izmjenjivače toplote sa uskim rebrima i malim razmakom između rebara. Svi parametri su usvojeni identični kao prilikom analize prirodne konvekcije, temperatura površine  $T_s = 90$ , a temperatura vazduha u prostoru  $T_\infty = 20$  °C. Karakteristične dimenzije prvog analiziranog izmjenjivača toplote u radu [6] su dužina rebara tj. visina  $L = 40$  mm, širina izmjenjivača  $W = 40$  mm i visina rebara od baze  $H = 25,1$  mm. Razmak između rebara iznosi  $S = 1,5$  a debljina rebara  $t = 1,2$  mm, Sl. 2. Površina izmjenjivača  $A_s$  definiše se preko broja rebara  $n = 15$ .

Na Sl. 2. prikazana su dva tipa nastujavanja fluida preko izmjenjivača toplote, kao i karakteristične dimenzije.



Sl. 2. Prinudna konvekcija na orebrenom izmjenjivaču toplote (cirkulacija vazduha odozdo - slika lijevo i cirkulacija vazduha bočno - slika desno)

U radu [7] je izvršena optimizacija izmjenjivača toplote sa paralelnim rebrima, za sistem grijanja prostora sa Peltierovim termoelektričnim modulima kao generatorima toplote. Urađen je detaljan matematički model prenosa toplote sa prirodnom konvekcijom za postojeći komercijalni izmjenjivač toplote (model slika 3.a), a zatim urađena optimizacija izmjenjivača toplote to jeste definisan optimalni razmak između rebara ili širina kanala (model slika 3.b). Za komercijalni izmjenjivač toplote je nažalost zbog uskih razmaka između rebara i nemogućnosti idealnog strujanja vazduha između dva rebra ostvarena mala vrijednost koeficijenta prelaza toplote  $h$ , što implicira i malu količinu toplotnog toka, definisanog jednačinom (1):

$$Q_{con} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = h \cdot (n \cdot 2 \cdot L \cdot H) \cdot (T_s - T_\infty). \quad (1)$$

Optimalni razmak između rebara definisan je pomoću jednačine (2):

$$S_{opt} = 2,714 \cdot \left( \frac{S^3 \cdot L}{Ra_s} \right)^{0,25} = 2,714 \cdot \frac{L}{Ra_L^{0,25}}, \quad (2)$$

na osnovu hipoteze da Nuseltov broj za  $S = S_{opt}$  mora biti konstantna vrijednost:

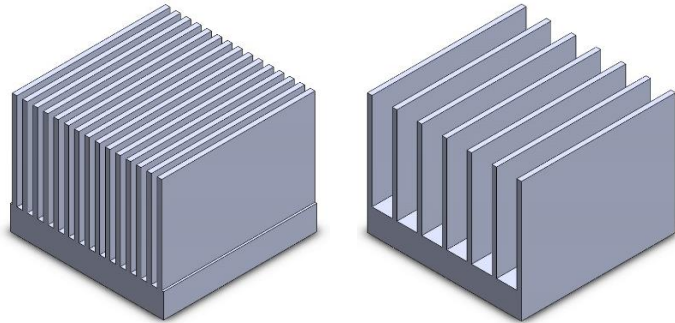
$$Nu = \frac{h \cdot S_{opt}}{\lambda} = 1,307. \quad (3)$$

Matematički model prenosa toplote obuhvata i zračenje, koje ostaje nepromijenjeno u oba razmatrana slučaja konvekcije. Zračenje koje se dobija sa izmjenjivača konstante temperature  $T_s$  može se podijeliti na zračenje izloženih površina i zračenje u kanalima [8]-[10], prema jednačini (4):

$$Q_{rad} = (n-1) \cdot Q_{r, ch} + [2 \cdot L \cdot H + n \cdot t \cdot (L + 2 \cdot H) + 2 \cdot B \cdot (L + W)] \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4), \quad (4)$$

pri čemu su:  $Q_{r, ch}$  zračenje kanala,  $\varepsilon$  emisivnost površine,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> Štefan-Bolcmanova (Stefan-Boltzmann) konstanta.

Optimalni razmak između rebara dovodi do povećanja prenosa toplote prirodnom konvekcijom sa  $Q_{con} = 1,026$  W, na  $Q_{con,opt} = 9,477$  W. Toplotni tok koji se dobije u vidu zračenja ima približne vrijednosti i iznosi 1,664 W za izmjenjivač toplote sa prinudnom konvekcijom, kada je zagrijan do temperature 90 °C. Optimizacijom izmjenjivača toplote sa prirodnom konvekcijom povećao se ukupni toplotni tok na 11,1 W.



a - postojeći komercijalni

b - optimalni

Sl. 3. Modelovani izmjenjivači toplote za sistem grijanja prostora

### III. MATEMATIČKI MODEL PRENOSA TOPLOTE PRINUDNOM KONVEKCIJOM

Karakteristike fluida su definisane kao i kod prirodne konvekcije za srednju temperaturu prema jednačini (5):

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (5)$$

Za izmjenjivače toplote sa paralelnim rebrima Reynoldsov broj se definiše prema širini kanala  $S$  [11], prikazanoj na Sl. 2. Uzevši u obzir brzinu strujanja  $w$  i kinematsku viskoznost  $\nu$ , Reynoldsov broj definiše se prema jednačini (6) kao:

$$Re_s = \frac{w \cdot S}{\nu} \quad (6)$$

Za kanal sa paralelnim pločama, ukoliko se razmatra slučaj prinudne cirkulacije vazduha dužinom izmjenjivača  $L$  odozdo na gore prema Sl. 2, Nusseltov broj  $Nu_s$  u kanalu širine  $S$  je zavistan od idealne vrijednosti Nusseltovog broja  $Nu_i$ . Ukoliko bi stepen efikasnosti rebra imao maksimalnu vrijednost, tada bi realni Nusseltov broj za kanal bio jednak idealnoj vrijednosti Nusseltovog broja:

$$\eta = \frac{Nu_s}{Nu_i} \quad (7)$$

Idealna vrijednost Nusseltovog broja definiše se prema jednačini (8):

$$Nu_i = \left[ \left( \frac{Re_s^* \cdot Pr}{2} \right)^{-3} + \left( 0,664 \cdot \sqrt{Re_s^*} \cdot Pr^{1/3} \cdot \sqrt{1 + \frac{3,65}{\sqrt{Re_s^*}}} \right)^{-3} \right]^{-1/3} \quad (8)$$

Ukoliko je prema [11] stepen efikasnosti rebra definisan kao:

$$\eta = \frac{\tanh \sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left( \frac{t}{L} + 1 \right)}}{\sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left( \frac{t}{L} + 1 \right)}}, \quad (9)$$

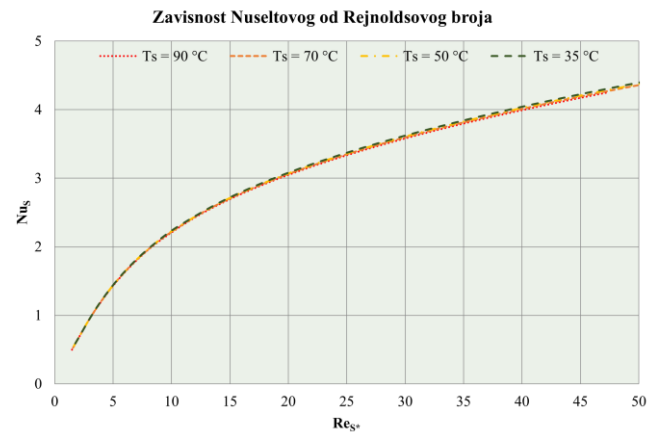
slijedi da je realna vrijednost Nusseltovog broja:

$$Nu_s = \frac{\tanh \sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left( \frac{t}{L} + 1 \right)}}{\sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left( \frac{t}{L} + 1 \right)}} \cdot Nu_i \quad (10)$$

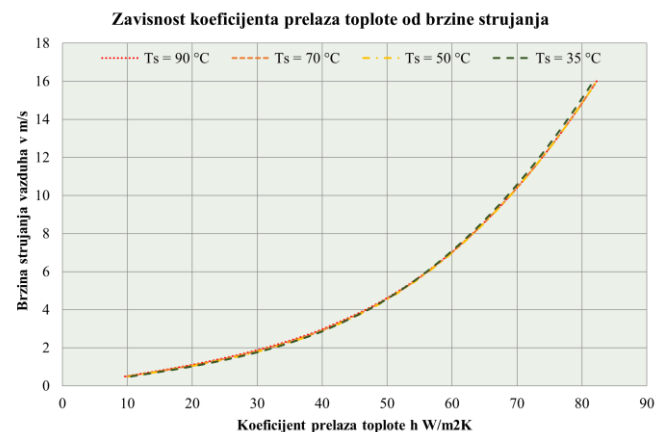
Na osnovu izloženog, dijagramom prikazanom na Sl. 4, definisana je zavisnost Nusseltovog broja u kanalu  $Nu_s$  od korigovanog Reynoldsovog broja u kanalu između dvije ploče  $Re_s^*$ , prema jednačini (11):

$$Re_s^* = Re_s \cdot \frac{S}{L} \quad (11)$$

Uočava se da su promjene Nusseltovog broja u zavisnosti od temperaturnog režima na grijaču, to jeste razmatranom izmjenjivaču toplote, minimalne, a može se reći i zanemarive.



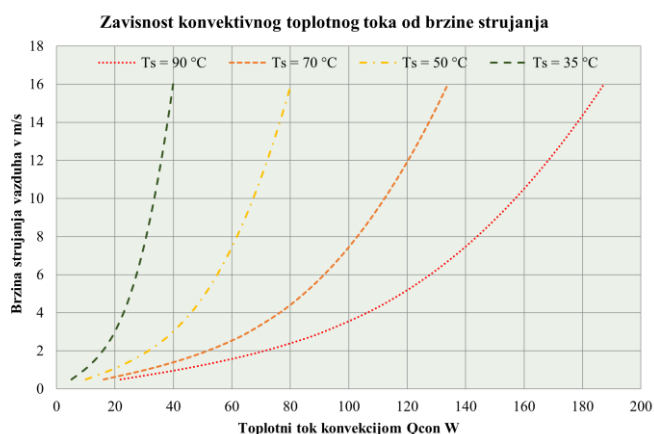
Sl. 4. Zavisnost Nusseltovog od Reynoldsovog broja



Sl. 5. Zavisnost koeficijenta prelaza toplote od brzine strujanja

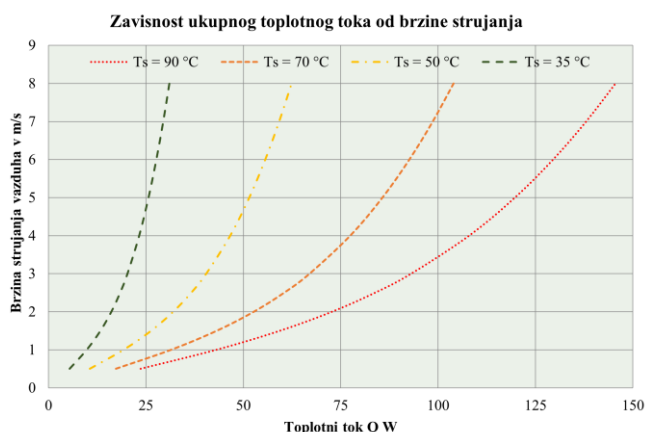
Koeficijenti prelaza toplote na izmjenjivaču toplote sa paralelnim pločastim rebrima, prikazani na Sl. 5, takođe imaju mala odstupanja u zavisnosti od temperature površine  $T_s$ . Temperature površine izmjenjivača razmatrane tokom analize, 90, 70, 50 i 35 °C, usvojene su prema pravilima projektovanja u KGH tehnici.

Zavisnost konvektivnog toplotnog toka  $Q_{con}$  od brzine strujanja vazduha  $w$  preko izmjenjivača toplote prikazan je na Sl. 6. Uočava se da su promjene mnogo veće pri malim brzinama, a upravo te brzine do 8 m/s je opravdano razmatrati. Na sistemima ventilator konvektora brzine nisu veće od 6 m/s, jer bi uzrokovala preveliki napor za ventilatore, veliku buku u prostoru, kao i eventualno odnošenje kapljica kondenza sa izmjenjivača u procesu hlađenja.



Sl. 6. Zavisnost konvektivnog toplotnog toka od brzine strujanja

Prema izloženom, na Sl. 7. su prikazane vrijednosti ukupnog toplotnog toka, koji pored konvekcije uzima u obzir i zračenje sa zagrijača definisano jednačinom (4), u zavisnosti od brzine strujanja vazduha do 8 m/s.



Sl. 7. Zavisnost ukupnog toplotnog toka od brzine strujanja

Uočava se da su odstupanja vrijednosti ukupnog toplotnog toka velika u zavisnosti od temperaturnog režima na koji je zagrijan grijač, kao i od brzine strujanja vazduha preko izmjenjivača toplote, to jeste grijača u prostoru.

Ukoliko se analizira brzina strujanja vazduha od 4-5 m/s, očitava se toplotni tok od 25 W srednje vrijednosti za grijač temperature 35 °C, dok isti taj grijač zagrijan na 90 °C isporučuje toplotni tok veći od 110 W.

Treba naglasiti da je veoma mala površina izmjenjivača toplote koji je korišten kao model tokom eksperimentalne analize. Realne dimenzije zagrijača vazduha bi osigurale i odgovarajuće vrijednosti toplotnog toka, u zavisnosti od potreba u prostoru. Regulacija sistema je moguća na nekoliko načina, željena količina toplote se može obezbijediti različitim dimenzijom izmjenjivača toplote, različitom temperaturom na koju je grijač zagrijan, kao i različitim brzinom strujanja vazduha preko izmjenjivača toplote koja se koriguje promjenom broja obrtaja lopatica na ventilatoru.

#### IV. ZAKLJUČAK

Ranijim istraživanjem se došlo do zaključka da je na termoelektričnom modulu sa izmjenjivačem toplote moguće dostići temperaturu u iznosu od 90 °C, pri ulaznoj električnoj snazi od 9,03 W. S obzirom da je sistem prvobitno u prostor isporučivao 2,7 W toplotnog toka, došlo se do zaključka da je stepen korisnosti COP 0,3. Optimalni izmjenjivač toplote za prirodnu cirkulaciju vazduha je obezbijedio toplotni tok u prostor u iznosu od 11,1 W, što za istu količinu ulazne električne energije kao u prvom slučaju definiše COP veći od 1. Sistem sa ovim vrijednostima COP nije konkurentan toplotnim pumpama, ali su svakako jedna od opcija za zamjenu freonskih sistema. Upravo to je i bio razlog analize opravdanosti primjene sistema sa prinudnom cirkulacijom vazduha u ovom radu.

Povećanja vrijednosti koeficijenta prelaza toplote i ukupnog toplotnog toka sa izmjenjivača sa paralelnim rebrima, primjenom prinudne umjesto prirodne konvekcije, daju obećavajuće rezultate. Koeficijent prelaza toplote prilikom grijanja sa izmjenjivačem optimalnog razmaka između rebra i prirodnom konvekcijom iznosi 8,7 W/m<sup>2</sup>K. U ovom radu se došlo do zaključka da koeficijent prelaza toplote prilikom prinudne cirkulacije, pri brzinama vazduha od 3 do 6 m/s, ima mnogo veće vrijednosti, koje se kreću između 40 i 56 W/m<sup>2</sup>K.

Prema navedenim koeficijentima prelaza toplote, vrijednosti ukupnog toplotnog toka se povećavaju sa skromnih 11 W na vrijednosti od 93 do 130 W, za brzine strujanja od 3 do 6 m/s. Treba naglasiti da povećanje toplotnog toka ne utiče srazmjerno na povećanje koeficijenta grijanja COP jer će sistem prilikom korištenja prinudne cirkulacije zahtijevati i trošiti više električne energije. Bez eksperimentalnih mjerenja je teško reći da li bi potrošnja električne energije bila veća od dobijene toplotne energije. Na osnovu dosadašnjih istraživanja koeficijent grijanja COP za ove sistema ima vrijednosti između 0,5 i 3 [12].

Dalja istraživanja imaju za cilj analizu sistema za hlađenje vazduha u prostoru sa optimizacijom broja modula po površini izmjenjivača, to jeste raspored manjeg broja modula na veću površinu izmjenjivača, a samim tim i povećanje COP.

U radu je prezentovano da sistem grijanja prostora primjenom termoelektričnog efekta može biti jedno od rješenja Pariskog sporazuma i očekivanih dugoročnih ciljeva.

## LITERATURA

- [1] Republička strategija zaštite vazduha sa akcionim planom upravljanja kvalitetom vazduha, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju, Vlada Republike Srpske, Banja Luka, (2007)
- [2] Jokšić, I., *et al.*, Međunarodni i nacionalni okviri zaštite životne sredine, *Vojno delo*, 7 (2019)
- [3] Sabo, S., *Klimatski ciljevi konferencije COP26*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Završni rad, Zagreb, Hrvatska, (2023)
- [4] Medović, V., *et al.*, *Primena evropskih vrednosti u politikama Republike Srbije*, Univerzitet Privredna akademija u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2023, ISBN: 978-86-86121-69-1
- [5] Gu, X., *et al.*, Natural resources extraction and green finance: Dutch disease and COP27 targets for OECD countries, *Resources Policy*, 81 (2023)
- [6] Pupčević, M., *et al.*, Experimental analysis of the justification of using a space heating system using a Peltier thermoelectric generator, *IEEP Industrial Energy and Environmental Protection in the Countries of Southeast Europe*, 8 (2022)
- [7] Pupčević, M., *et al.*, Optimizacija izmjenjivača toplote sa prirodnom konvekcijom za sistem grijanja prostora primjenom Peltierovog termoelektričnog generatora, *Energetska efikasnost - ENEF*, 5 (2023)
- [8] Yong, K.K., *et al.*, On the role of radiation view factor in thermal performance of straight-fin heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010), 8, pp. 1087-1095, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.012>
- [9] Shabany, Y., Radiation heat transfer from plate-fin heat sinks, *IEEE SEMI-THERM Symposium*, 24 (2008), pp. 132-136
- [10] Rea, S.N., West, S.E., Thermal radiation from finned heat sinks, *IEEE Transactions on parts, hybrids, and packaging*, 12 (1976), 2, pp. 115-117
- [11] Teertstra, P., *et al.*, Analytical Forced Convection Modeling of Plate Fin Heat Sinks, *Journal of Electronics Manufacturing*, 10 (2000), 4, pp. 253-261
- [12] Moria, H., *et al.*, Experimental Study of Solar Based Refrigerator Using Thermoelectric Effect, *Energy Procedia*, 158 (2019), pp. 198-203