



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Petar Filipović

**PRIMJENA NUMERIČKIH I
EKSPERIMENTALNIH METODA U
RAZVOJU POLIMERNOG SOLARNOG
KOLEKTORA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Petar Filipović

**PRIMJENA NUMERIČKIH I
EKSPERIMENTALNIH METODA U
RAZVOJU POLIMERNOG SOLARNOG
KOLEKTORA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
prof.dr.sc. Damir Dović, dipl.ing.

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

Faculty of mechanical engineering and naval architecture

Petar Filipović

APPLICATION OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS IN THE DEVELOPMENT OF A POLYMER SOLAR COLLECTOR

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
prof.dr.sc. Damir Dović, dipl.ing.

Zagreb, 2025.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Damiru Doviću, na stručnom vodstvu, korisnim sugestijama i vremenu uloženom u ovaj rad. Njegova podrška i smjernice bili su ključni za uspješnu provedbu istraživanja.

Posebno se zahvaljujem i djelatnicima Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje na tehničkoj podršci tijekom eksperimentalnog dijela istraživanja. Posebno zahvaljujem dr. sc. Ivanu Horvatu na korisnim savjetima i pruženoj pomoći koju sam dobio tijekom izrade rada, te laborantima Željku Badžeku i Leopoldu Jušinskom na pomoći pri provedbi mjerenja.

Zahvaljujem i članovima povjerenstva, prof. dr. sc. Željku Tukoviću, prof. dr. sc. Ivanki Boras i prof. dr. sc. Kristianu Leniću, koji će svojim komentarima i sugestijama dodatno doprinijeti kvaliteti ovog rada.

Posebno zahvaljujem tvrtki ITRS d.o.o. iz Zagreba, na čelu s mr. sc. Krešimirom Škeljom, te zaposlenicima Borjanu Raniloviću i Anti Gujiću, koji su omogućili realizaciju projekta u sklopu kojega je provedeno ovo istraživanje.

Također, zahvaljujem svima koji nisu izravno spomenuti, a čiji su komentari, sugestije i podrška pridonijeli izradi ovog rada.

Na kraju, zahvaljujem svojoj supruzi Corrini, roditeljima i bratu na podršci i razumijevanju tijekom trajanja istraživanja.

Petar Filipović

SAŽETAK

Direktno iskorištavanje solarne energije u zgradarstvu ostvaruje se kroz fotonaponske i solarne toplinske sustave. Unatoč visokoj učinkovitosti, solarni toplinski sustavi i dalje nisu u velikoj mjeri zastupljeni na tržištu. Dugogodišnji poticaji i snažna politička potpora učinili su fotonaponske sustave vodećom tehnologijom za direktno iskorištavanje solarne energije. To je dovelo do smanjenja troškova proizvodnje i rada fotonaponskih sustava, što je rezultiralo konkurentnijim cijenama električne energije. Tradicionalno korišteni materijali za solarne kolektore, poput stakla, bakra, aluminijske i mineralne vune, značajno utječu na cijenu solarnih toplinskih sustava, kao i troškovi rada kod sklapanja kolektora koje je većinom ručno. Problemi dobave i transporta dodatno povećavaju cijenu i produljuju vrijeme isporuke. Polimerni materijali predstavljaju potencijalnu alternativu konvencionalnim materijalima u proizvodnji solarnih kolektora, a karakterizira ih mala masa, mogućnost serijske proizvodnje i oblikovljivost, što može rezultirati dodatnim smanjenjem troškova i povećanjem tržišnog udjela. Lošija toplinska, mehanička i optička svojstva predstavljaju najveću prepreku širem korištenju polimernih materijala u proizvodnji solarnih kolektora. Ovo istraživanje usmjereno je na razvoj prototipa solarnog kolektora izrađenog u potpunosti od polimernog materijala (PVC-C). U prvoj fazi istraživanja provedeni su analitički proračuni metalnog pločastog kolektora, kao i numeričke simulacije radi verifikacije modela izmjene topline. Dobiveni rezultati poslužili su za definiranje konstrukcije prototipa, koji je proizveden ekstruzijom i podvrgnut ispitivanjima prema relevantnoj normi za određivanje toplinskih i mehaničkih karakteristika. U drugoj fazi istraživanja eksperimentalni rezultati korišteni su za verifikaciju numeričkih simulacija, koje su omogućile detaljniju analizu strujanja i procesa izmjene topline, te identifikaciju kritičnih mjesta za izmjenu topline. Numeričke simulacije su korištene u svrhu provođenja parametarske analize s ciljem daljnje optimizacije konstrukcije. Na temelju dobivenih rezultata u ovom radu definirane su smjernice za daljnji razvoj komercijalnog prototipa koji će moći zadovoljiti sve zahtjeve propisane relevantnom normom.

Ključne riječi: polimerni solarni kolektor, numeričke simulacije, PVC-C, toplinske i mehaničke karakteristike, smjernice za razvoj

SUMMARY

The direct utilization of solar energy in buildings is achieved through photovoltaic and solar thermal systems. Despite their high efficiency, solar thermal systems are still not widely represented in the market. Long-term incentives and strong political support have made photovoltaic systems the leading technology for direct utilization of solar energy. Reduced production and operational costs associated with photovoltaic systems have resulted in competitive electricity prices. Traditional materials used for solar collectors, such as glass, copper, aluminum, and mineral wool, significantly impact the cost of solar thermal systems, as do labor costs associated with the mostly manual assembly of collectors. Supply and transport issues further increase costs and prolong delivery times. Polymeric materials represent a potential alternative to conventional materials in solar collector production. They are characterized by low mass, the possibility of serial production, and moldability, which can lead to additional cost reductions and increased market share. However, inferior thermal, mechanical, and optical properties remain the biggest challenge to the broader use of polymeric materials in solar collector production. This research focuses on developing a solar collector prototype made entirely of polymeric material (PVC-C). In the first phase of the research, analytical calculations of a metal flat plate collector were conducted, as well as numerical simulations to validate the heat transfer models. The results were used to define the design of the prototype, which was produced by extrusion and subjected to testing under relevant standards to determine thermal and mechanical characteristics. In the second phase of the research, experimental results were used to validate numerical simulations, which provided a more detailed analysis of flow and heat transfer processes, as well as the identification of critical areas for heat transfer. Numerical simulations were also used to conduct parametric analysis aimed at further optimizing the design. Based on the results obtained, guidelines for the further development of a commercial prototype were defined to meet all requirements specified by relevant standards.

Keywords: polymeric solar collector, numerical simulations, PVC-C, thermal and mechanical characteristics, development guidelines

EXTENDED ABSTRACT

This doctoral dissertation describes the application of experimental and numerical methods in the development process of a polymeric solar collector. The dissertation is divided into four major chapters, as follows.

Chapter 1 Introduction provides an overview of the reasons and motivation behind this research, focusing on the growing importance of renewable energy in addressing global energy challenges. It offers a comprehensive review of existing technologies for utilizing solar energy, including state-of-the-art designs of flat plate solar collectors made from conventional materials such as metals. The chapter also examines the current market conditions and the role of solar energy within the broader context of renewable energy utilization. A detailed analysis of the literature is presented, emphasizing the potential application of polymeric materials in solar technology. Key challenges, such as thermal and mechanical performance limitations of polymers compared to traditional materials are explored. The chapter outlines the specific problems addressed in this research, highlighting the need for innovation to enhance the competitiveness of solar thermal systems. Finally, the chapter establishes the research objectives and hypotheses while defining the expected scientific contribution and relevance of the work.

The hypothesis of this research is as follows

"Through design solutions and material selection, it is possible to achieve thermal and mechanical characteristics of a polymeric solar collector that meets all requirements specified by European standards."

This research makes the following contributions to the field of technical sciences:

1. Experimentally validated results of numerical modeling for heat transfer within a polymeric solar collector.
2. Guidelines for development of a commercial polymeric solar collector prototype that complies with all relevant EN and ISO standards.

Chapter 2 Materials and methods outlines the materials and methodologies used in the development and evaluation of the polymeric solar collector prototype.

Chapter 2.1 provides an overview and classification of polymeric materials, with a focus on those suitable for application in solar technology. It highlights that polymeric materials from the categories of standard and engineering thermoplastics are particularly well-suited for this purpose. Thermoplastics soften when heated and return to their solid state upon cooling, retaining their original properties. The maximum operating temperature of thermoplastics with an amorphous structure is lower than the glass transition temperature of the given material. The group of thermoplastics with an amorphous structure includes PVC, PS, PC, and PMMA, which were considered as potential candidates to produce a polymeric solar collector prototype. Chapter 2.2 builds on this foundation by providing a more detailed analysis of the properties of the selected candidates. Following the material selection process, PVC-C was chosen as the material to produce the polymeric solar collector prototype. PVC-C offers improved properties compared to PVC due to its higher chlorine content and exhibits advantages over PC and PMMA, such as better chemical resistance and thermal stability.

Chapter 2.3 provides a detailed insight into the heat transfer process within the solar collector. An analytical method is also presented, which enables calculation of thermal efficiency and temperatures of individual collector components. This information is used to evaluate the suitability of polymeric materials for the manufacturing of the collector. The conducted calculations were utilized to validate the numerical heat transfer models, which will be applied to analyze the preliminary design of the polymeric solar collector.

Chapter 2.4 investigates the optical properties of materials used in solar technology in greater detail. A comprehensive review of available data from the literature is presented, along with challenges associated with the experimental determination of all necessary optical properties. Knowledge of optical properties is crucial for calculating absorbed solar radiation, which represents one of the key input parameters for numerical simulations. An analytical-experimental method is described, which enables the determination of the required optical properties in cases where they are not available in the literature or from manufacturers.

Chapter 2.5 describes the produced prototypes of polymeric solar collectors, while the detailed thermal efficiency testing is presented in Chapter 2.6. The measurement setup and the procedure for determining thermal efficiency according to the EN ISO 9806:2017 standard is explained. Additionally, the requirements of the standard that the collectors must meet to fulfill part of the conditions for obtaining the Solar Keymark certification are described.

Chapter 2.7 provides a detailed description of the numerical simulations used to analyze heat transfer in the polymeric solar collector. A review of the literature on the application of numerical models for radiation heat transfer in the analysis of thermal characteristics of solar collectors is presented. Additionally, all computational domains used in the simulations are described, including key parameters and boundary conditions.

Chapter 3 presents all results, structured into several subsections. Chapter 3.1 shows the results of determining the optical properties of the cover and absorber of the polymeric solar collector. The measured transmittance factors are compared with literature data, with deviations of less than 5%, justifying the use of this method for determining the optical properties of PVC-C. Based on the calculated optical properties, it is possible to determine the total absorbed solar radiation.

In Chapter 3.2, the results of the analytical calculation of the flat-plate solar collector are presented, which are used to verify the numerical models of heat transfer. For further simulations of the polymeric solar collector, Model 1 was selected, in which shortwave solar radiation is modeled as a heat source defined by a boundary condition within a thin absorber plate layer, while the Discrete Ordinates model was used for medium-wave and long-wave radiation heat transfer.

Chapter 3.3 builds on the previous chapter, presenting an analysis of the preliminary design of the polymeric solar collector with the aim of defining a prototype construction. Initially, it was assumed that the design of the polymeric collector would remain identical to that of the flat-plate collector. The results showed that such a design could not achieve an efficiency greater than 10%, with maximum absorber temperatures exceeding 200 °C, far beyond the

allowable range for PVC-C. The next proposed design modification involved increasing the number of pipes per segment, i.e., reducing the rib width. Although the thermal efficiency of this design was ~11,5% lower compared to the metal flat-plate collector, the maximum absorber temperatures remained too high (133,16 °C). The analysis highlighted the need for a different design compared to the pipe-based metal collector. As a result, the RD-2 preliminary design was proposed. This polymeric collector design achieved ~15% lower thermal efficiency compared to the metal collector but maintained absorber temperatures below 100 °C. It is noteworthy that the flat-plate collector without a selective coating demonstrated lower thermal efficiency than the RD-2 under certain operating conditions. The preliminary calculations demonstrate that polymeric materials can be a viable alternative in the production of solar collectors.

In Chapter 3.4, the results of thermal efficiency measurements of the polymeric solar collector prototypes are presented. The results of preliminary measurements are shown, which served to better understand the operation of the collector and to calibrate the measurement setup. Continuous records of the measured parameters and the calculated thermal efficiency are provided. The results of the final thermal efficiency measurements were used to validate numerical simulations, as described in Chapter 3.5. As part of the research, 3D and 2D numerical simulations were conducted to perform a detailed analysis of the polymeric solar collector's operation. The validation of the numerical simulations was carried out by comparing the results with experimentally obtained values for thermal efficiency and the outlet water temperature from the collector. Based on the results, a detailed heat transfer analysis within the polymeric solar collector prototype was performed, identifying critical areas for heat exchange. Furthermore, numerical simulations enabled a parametric analysis of construction and operational parameters. The results of the heat transfer analysis and parametric analysis were used to define guidelines for the development of a commercial prototype.

In Chapter 3.6, the results of compliance with the EN ISO 9806:2017 standard are presented, which is essential for testing the hypothesis proposed at the beginning of the dissertation. In the final chapter, Chapter 3.7, eight guidelines for the development of a commercial polymeric solar collector prototype are defined:

1. Apply selective coating during the production process.
2. Increase the spacing between the two covers and improve the thermal conductivity of the material.
3. Modify the geometry of the channels for the working fluid.
4. Reduce the thickness of the channel walls and covers while maintaining sufficient mechanical resistance.
5. Ensure that the maximum temperatures within the collector do not exceed the glass transition temperature of PVC-C.
6. Develop better solutions for sealing the joints between segments and connectors.
7. Consider introducing a multi-layered cover to reduce heat losses.
8. Use additives to improve UV resistance.

In Chapter 4, the conclusion of this dissertation is presented, highlighting the most significant aspects of the research and the achieved scientific contributions. Based on the presented results, it can be concluded that the hypothesis of this work, which states: *“Through design solutions and material selection, it is possible to achieve thermal and mechanical properties in a polymeric solar collector that meet all requirements specified by European standards”*, has been confirmed with the application of the guidelines provided in this research.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY	II
EXTENDED ABSTRACT.....	III
SADRŽAJ	VIII
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA.....	XIII
POPIS OZNAKA	XIV
1. UVOD	1
1.1. Solarni toplinski sustavi i kolektori.....	6
1.2. Motivacija i opis problema.....	11
1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja	14
1.4. Cilj i hipoteza istraživanja.....	18
1.5. Znanstveni doprinos	18
1.6. Podrška istraživanju i razvoju	18
2. MATERIJALI I METODE	19
2.1. Polimerni materijali.....	19
2.2. Primjena polimernih materijala u solarnoj tehnici	22
2.3. Izmjena topline u solarnom kolektoru.....	26
2.3.1. Određivanje toplinski gubitaka solarnog kolektora	29
2.3.2. Analitički pristup određivanju toplinske učinkovitosti	34
2.3.3. Izračun koeficijenta prijelaza topline sa stijenke cijevi na radni fluid	38
2.4. Analitičko-eksperimentalni postupak određivanja optičkih karakteristika polimernih materijala.....	39
2.4.1. Optička svojstva materijala u solarnoj tehnici	39
2.4.2. Analitički proračun koeficijenta apsorpcije μ i faktora propusnosti, refleksije i apsorpcije	43
2.4.3. Mjerna linija za određivanje faktora propusnosti polimernih materijala	45
2.5. Prototipovi polimernog solarnog kolektora.....	46
2.6. Mjerenje toplinskih karakteristika prototipa	52
2.6.1. Proračun toplinske učinkovitosti.....	53
2.6.2. Provedba mjerenja toplinske učinkovitosti	55
2.6.3. Zahtjevi norme EN ISO 9806:2017	59
2.7. Numeričke simulacije.....	64
2.7.1. Korišteni numerički modeli za izmjenu topline zračenjem, slobodnom konvekcijom i korišteni model turbulencije.....	64
2.7.2. Računalne domene pri provedbi inicijalnih numeričkih simulacija.....	67
2.7.3. Diskretizacija domena korištenih pri provedbi preliminarne simulacije	70
2.7.4. Diskretizacija domene prototipa polimernog solarnog kolektora	74
3. REZULTATI I ANALIZA.....	78
3.1. Određivanje optičkih svojstva pokrova i apsorbera	78
3.2. Verifikacija analitičkih i numeričkih modela izmjene topline u kolektoru.....	80
3.3. Analiza preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora	85

3.4.	Mjerenje toplinske učinkovitosti prototipa	92
3.4.1.	Ispitivanje prototipova.....	92
3.4.2.	Ispitivanje završnog prototipa	95
3.5.	Numeričke simulacije prototipa polimernog solarnog kolektora	98
3.5.1.	Test neovisnosti mreže u 3D simulacijama.....	98
3.5.2.	Verifikacija numeričkih simulacija	99
3.5.3.	Izmjena topline unutar prototipa polimernog solarnog kolektora	102
3.5.4.	Parametarska analiza konstrukcijskih i radnih parametara	111
3.5.5.	Pad tlaka	120
3.6.	Ocjena zadovoljenja zahtjeva ispitivanja prema normi EN ISO 9806:2017	121
3.7.	Smjernice za razvoj komercijalnog prototipa.....	126
4.	ZAKLJUČAK	131
5.	PRILOZI.....	133
	PRILOG A. Tablice.....	134
	PRILOG B. Proračun mjerne nesigurnosti pri određivanju toplinske učinkovitosti.....	145
	LITERATURA.....	148
	ŽIVOTOPIS	158
	BIOGRAPHY.....	159

POPIS SLIKA

Slika 1 Ukupna potrošnja energije u EU [6]	2
Slika 2 Udio obnovljivih tehnologija u proizvodnji toplinske i električne energije [8].....	3
Slika 3 Promjena instaliranih kapaciteta [9]	4
Slika 4 Ukupno instaliranih kapaciteta na 1000 stanovnika [9,10].....	5
Slika 5 Shema sustava za pripremu PTV [13].....	8
Slika 6 Pločasti i vakuumski solarni kolektor [14]	9
Slika 7 Učinkovitost različitih izvedbi kolektora, podaci proizvođača.....	10
Slika 8 Nivelirani trošak energije [25]	12
Slika 9 Podjela plastomera s obzirom na maksimalnu temperaturu i cijenu [57].....	21
Slika 10 Usporedba gustoće, toplinske provodnosti i faktora propusnosti različitih materijala [53,58,62–64]	23
Slika 11 Usporedba cijena različitih materijala, ožujak 2024. [69]	25
Slika 12 Spektralna analiza sunčevog zračenja i optičkih karakteristika stakla i premaza apsorbera [71,72].....	27
Slika 13 Shematski prikaz izmjene topline u pločastom solarnom kolektoru.....	28
Slika 14 Shematski prikaz otpora izmjeni topline u pločastom solarnom kolektoru	30
Slika 15 Kompleksni indeks loma borosilikatnog stakla u ovisnosti o valnoj duljini [77].....	41
Slika 16 Eksperimentalni postav za određivanje faktora propusnosti polimernih materijala [80]	46
Slika 17 Poprečni presjek jednog segmenta prototipa polimernog solarnog kolektora, izvedeno stanje i definirani CAD model	47
Slika 18 CAD model Prototipa 1 s prikazanim smjerovima strujanja vode u različitim režimima rada	48
Slika 19 Fotografije Prototipa 1 polimernog solarnog kolektora	49
Slika 20 Fotografija Prototipa 2, prikaz načina spajanja prototipa na mjernu liniju.....	50
Slika 21 Prikaz dimenzija prototipa polimernog solarnog kolektora (Geometrija 2 – 2D)	51
Slika 22 Shematski prikaz mjerne linije za određivanje toplinske učinkovitosti prototipa polimernog solarnog kolektora.....	52
Slika 23 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe ispitivanja, prototip postavljen između više segmenata, srpanj 2021.	56
Slika 24 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe ispitivanja, prototip postavljen samostalno s boljom izolacijom rubova, rujan 2021.	57
Slika 25 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe završnih ispitivanja srpanj 2022..	58
Slika 26 Prikaz segmenta za potrebe provedbe proračuna čvrstoće pokrova	62
Slika 27 Računalna domena 1 (RD-1-Metalni), pločasti solarni kolektor s pripadajućim dimenzijama	67
Slika 28 Računalna domena 2 (RD-2), preliminarna izvedba polimernog solarnog kolektora s pripadajućim dimenzijama	68
Slika 29 Računalna domena 3 (RD-3), preliminarna izvedba polimernog solarnog kolektora s pripadajućim dimenzijama, izvedba s višeslojnim pokrovom	69
Slika 30 Prikaz generirane mreže za računalne domene RD-1-Metalni i RD-Polimerni-1	72
Slika 31 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu RD-2.....	72
Slika 32 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu RD-3.....	73

Slika 33 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu Geometrije 1, broj kontrolnih volumena $N = 2\,006\,080$	75
Slika 34 Prikaz računalne domene Geometrije 2 korištena pri provedbi 2D simulacija za potrebe parametarske analize, $B = 10\text{ mm}$	77
Slika 35 Izračunate vrijednosti faktora propusnosti za PC, PMMA, PVC u području valnih duljina $\lambda = 0,4 - 2,80\text{ }\mu\text{m}$ [60, 72, 73]	79
Slika 36 Krivulje učinkovitosti pločastog solarnog kolektora određene analitičkim proračunom i numeričkim simulacijama (RD- 1-Metalni), usporedba s mjerenim podacima	81
Slika 37 Odstupanja analitičkog proračuna i numeričkih simulacija (RD-1-Metalni), usporedba s mjerenim podacima (Slika 36)	82
Slika 38 Temperaturna raspodjela unutar solarnog kolektora za $T_{\text{red}} = 0,065\text{ m}^2\text{K/W}$ [94]	84
Slika 39 Temperaturna raspodjela polimernog kolektora s konstrukcijom pločastog kolektora, RD-1-Polimerni	86
Slika 40 Krivulje toplinske učinkovitosti pločastog i polimernog kolektora dobivene numeričkim simulacijama	89
Slika 41 Krivulje toplinske učinkovitosti polimernog kolektora određene numeričkim simulacijama na RD-2 i RD-3 [95]	90
Slika 42 Prikaz raspodjele temperaturnih polja RD-2 i RD-3 za $T_{\text{red}} = 0,056\text{ m}^2\text{K/W}$ [95]	91
Slika 43 Kontinuirani zapis izmjerenih veličina i toplinska učinkovitost za stacionarne periode	94
Slika 44 Kontinuirani zapis temperatura i sunčevog zračenja tijekom mjerenja	96
Slika 45 Funkcijska ovisnost toplinske učinkovitosti i reducirane temperature razlike prototipa polimernog solarnog kolektora	97
Slika 46 Usporedba toplinske učinkovitosti dobivene mjerenjima i numeričkim simulacijama	99
Slika 47 Temperaturni profil po visini na središnjem dijelu kolektora, usporedba profila određenih 2D i 3D simulacijama na različitoj udaljenosti z od ulaza	102
Slika 48 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 82,31$; $D_h = 21,5\text{ mm}$; $\vartheta_{f,avg} = 55,86\text{ }^\circ\text{C}$	103
Slika 49 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 104,65$; $D_h = 21,5\text{ mm}$; $\vartheta_{f,avg} = 72,42\text{ }^\circ\text{C}$	104
Slika 50 Prikaz formiranja temperaturnog graničnog sloja u vertikalnoj ravnini kolektora na sredini kanala na različitim duljinama kanala, $T_{\text{red}} = 0,0192\text{ m}^2\text{K/W}$	105
Slika 51 Prikaz formiranja hidrodinamičkog graničnog sloja u vertikalnoj ravnini kolektora na sredini kanala na različitim duljinama kanala, $T_{\text{red}} = 0,0192\text{ m}^2\text{K/W}$	105
Slika 52 Raspodjela izmijenjenog specifičnog toplinskog toka na ulazu u kolektor, $T_{\text{red}} = 0,0192\text{ m}^2\text{K/W}$	107
Slika 53 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 79,21$; $D_h = 19\text{ mm}$; $\vartheta_f = 55,86\text{ }^\circ\text{C}$	108
Slika 54 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 100,76$; $D_h = 19\text{ mm}$; $\vartheta_f = 72,42\text{ }^\circ\text{C}$	109
Slika 55 Prikaz raspodjele temperature na domeni Geometrije 2 na udaljenosti $z = 1,5\text{ m}$ od ulaza.....	109
Slika 56 Raspodjela temperature površine pokrova (Geometrija 2), $T_{\text{red}} = 0,0192\text{ m}^2\text{K/W}$..	110
Slika 57 Raspodjela temperature površine apsorbera (Geometrija 2), $T_{\text{red}} = 0,0192\text{ m}^2\text{K/W}$	111

Slika 58 Izračunata toplinska učinkovitost polimernog kolektora, 2D simulacija Geometrije 2 uz korekciju rubnih uvjeta, usporedba s pločastim kolektorom (izmjerene vrijednosti) [80]	112
Slika 59 Krivulje učinkovitosti određene parametarskom analizom za pojedini slučaj [80].	114
Slika 60 Raspodjela temperature kolektora za odabrane slučajeve iz provedene parametarske analize pri vrijednosti reducirane temperaturne razlike $T_{red} = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ [80]	116
Slika 61 Utjecaj povećanja koeficijenta prijelaza topline na toplinsku učinkovitost [80]	117
Slika 62 Prikaz razmatranih pozicija premaza apsorbera na jednom kanalu segmenta [80] .	118
Slika 63 Raspodjela temeprature kolektora ovisno o poziciji premaza pri vrijednosti reducirane temperaturne razlike $T_{red} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ [80]	119
Slika 64 Utjecaj pozicije premaza na toplinsku učinkovitost [80]	119
Slika 65 Pad tlaka određen numeričkim simulacijama za dvije radne točke, usporedba s analitičkim izrazima	120
Slika 66 Maksimalno naprezanje pokrova pri različitim vrijednostima opterećenja	124
Slika 67 Maksimalni progib pokrova pri različitim vrijednostima opterećenja	124

POPIS TABLICA

Tablica 1 Pregled kolektora s obzirom na korištene materijale, svojstva premaza i konstrukciju [13,15–22]	10
Tablica 2 Pregled polimernih materijala i njihova karakteristična primjena	20
Tablica 3 Temperatura staklastog prijelaza pojedinih plastomera	21
Tablica 4 Dimenzije dijelova prototipa polimernog kolektora definiranog CAD modela i stvarno izvedenog prototipa, sve prikazane veličine su u [mm]	51
Tablica 5 Pregled korištenih parametara i podrelaksacijskih faktora u provedenim numeričkim simulacijama.....	66
Tablica 6 Dimenzije pojedinih dijelova numeričkih domena RD-1 do RD-3.....	70
Tablica 7 Statistički podaci generiranih mreža korištenih u provedbi preliminarnih simulacija	71
Tablica 8 Statistički podaci generiranih mreža za Geometrije 1 i 2 (3D simulacije).....	76
Tablica 9 Statistički podaci generiranih mreža korištenih u parametarskoj analizi (2D simulacije)	77
Tablica 10 Optička svojstva polimernih materijala pri upadnom kutu od 0°, usporedba s podacima iz literature [72, 73]	78
Tablica 11 Apsorpcija sunčevog zračenja u pojedinim dijelovima prototipa za različite računalne domene korištene pri provedbi numeričkih simulacija.....	80
Tablica 12 Prosječne i maksimalne temperature pokrova i apsorbera	84
Tablica 13 Detaljni rezultati analitičkog proračuna klasičnog i polimernog solarnog kolektora s konstrukcijskim izmjenama	87
Tablica 14 Prosječne i maksimalne temperature pokrova i apsorbera u pločastom i polimernom solarnom kolektoru pri $T_{red} = 0,065 \text{ m}^2\text{K/W}$, rezultati numeričkih simulacija.....	88
Tablica 15 Rezultati provedbe testa neovisnosti mreže Geometrije 1 za dvije radne točke	98
Tablica 16 Prikaz rezultata i međusobnih odstupanja vrijednosti izlazne temperature fluida i toplinske učinkovitosti, usporedba rezultata simulacije s eksperimentalnim podacima uz podatke o reduciranoj temperaturnoj razlici	100
Tablica 17 Rezultati toplinske učinkovitosti dobiveni 2D simulacijama korištenjem koeficijenta prijelaza topline izračunatog na temelju 3D simulacija i Jed. 2.31 .	101
Tablica 18 Prikaz rezultata i međusobnih odstupanja toplinske učinkovitosti na temelju provedene parametarske analize, usporedba s rezultatima 2D simulacija [80]...	113
Tablica 19 Određena standardna temperatura stagnacije prototipa	121

POPIS OZNAKA

LATINIČNE OZNAKE

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina
a_1	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent gubitka prvog reda
a_2	$W/(m^2 \cdot K^2)$	Koeficijent gubitka drugog reda
B	m	Udaljenost između pokrova i apsorbera
C_b	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost zavora
c_p	$kJ/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet
D_h	m	Hidraulički promjer
$d_{v,u}$	m	Vanjski i unutarnji promjer cijevi
e	-	Vidni faktor
F	-	Faktor učinkovitosti rebra
F_R	-	Faktor odvođenja topline
F'	-	Faktor učinkovitosti kolektora
f	-	Darcyjev faktor trenja
G_{sun}	W/m^2	Sunčevo zračenje
h	m	Karakteristična duljina
I	W/m^2	Zračenje
k	-	Koeficijent prigušenja
L	m	duljina kolektora
l_0	m	Karakteristična duljina, omjer površine i opsega promatrane plohe
M	kg	masa fluida
$\dot{m}_{kol}$	kg/s	Maseni protok radnog medija kroz kolektor
n	-	Indeks loma
$\dot{Q}$	W	Toplinski tok
q	W/m^2	Gustoća toplinskog toka
q	Pa	Opterećenje
r	$m^2 \cdot K/W$	Otpor izmjeni topline
s	m	Debljina
T_{red}	$m^2 \cdot K/W$	Reducirana temperaturna razlika
T	K	Termodinamička (apsolutna) temperatura
T_{neba}	K	Efektivna temperatura neba
t	s	Vrijeme
U_b	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prolaza topline preko stražnje površine kolektora

U_e	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prolaza topline preko bočnih površina kolektora
U_t	$W/(m^2 \cdot K)$	Ukupni koeficijent prolaza topline od apsorbera na okolinu preko vrha kolektora
W	m	Širina segmenta rebra
W_{zrak}	m	Širina kanala u kojem se nalazi zrak
w_f	m/s	Brzina strujanja radnog medija kroz cijev
w_{vjetar}	m/s	Brzina vjetra
y	m	Udaljenost
y_{max}	m	Maksimalni progib

GRČKE OZNAKE

Oznaka	Jedinica	Opis
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline
α	-	Faktor apsorpcije
β	1/K	Volumetrički koeficijent ekspanzije
γ	°	Kut nagiba solarnog kolektora u odnosu na horizontalu
Δp	Pa	Pad tlaka
ε	-	Emisijski faktor
ε_r	-	Dielektrična konstanta
$\varepsilon', \varepsilon''$	-	Realni i imaginarni dio kompleksne dielektrične funkcije
ζ	-	Koeficijent trenja
η	-	Toplinska učinkovitost
η_0	-	Maksimalna toplinska učinkovitost, $T_{red} = 0$ m ² K/W
ϑ	°C	Temperatura
ϑ_{as}	°C	Standardna temperatura okoliša
ϑ_b	°C	temperatura spoja između apsorbera i cijevi
ϑ_f	°C	Temperatura tečenja
ϑ_g	°C	Temperatura staklastog prijelaza
ϑ_m	°C	Temperatura tališta
ϑ_{stg}	°C	Standardna temperatura stagnacije
λ	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost
λ	μm	Valna duljina
ν	m ² /s	Kinematička viskoznost
μ	Pa·s	Dinamička viskoznost
μ	1/m	Koeficijent apsorpcije
ρ	g/cm ³	Gustoća
ρ	-	Faktor refleksije

ρ_d	-	Faktor refleksije difuzne komponente zračenja pokrovnog materijala
σ	W/(m ² ·K ⁴)	Stean-Boltzmannova konstanta
$\sigma_{\max}$	MPa	Maksimalno naprezanje
τ	-	Faktor propusnosti
τ_a	-	Faktor propusnosti koji uzima u obzir samo gubitke uslijed apsorpcije

INDEKSI

Oznaka	Opis
aps	Apsorber
f	Radni medij
iz	Izlaz radnog medija
izo	Izolacija
kol	Kolektor
kond	provođenje
konv,aps-st	konvekcija, apsorber – staklo
konv,st-ok	konvekcija, staklo – okoliš
ok	Okoliš
p	Pokrov
sl.konv	Slobodna konvekcija
st	Staklo
sun	Sunce
ul	Ulaz radnog medija
zr,aps-st	zračenje, apsorber – staklo
zr,st-ok	zračenje, staklo – okoliš

BEZDIMENZIJSKE ZNAČAJKE

Oznaka	Opis
$Gz = \frac{Re \cdot Pr \cdot d_u}{z}$	Graetzova značajka
$Nu = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$	Nusseltova značajka

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad \text{Prandtlova značajka}$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (\vartheta_{\text{aps}} - \vartheta_{\text{st}}) \cdot h^3}{\nu \cdot \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}} \quad \text{Rayleighova značajka}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot d_u \cdot w_f}{\mu} \quad \text{Reynoldsova značajka}$$

POPIS KRATICA

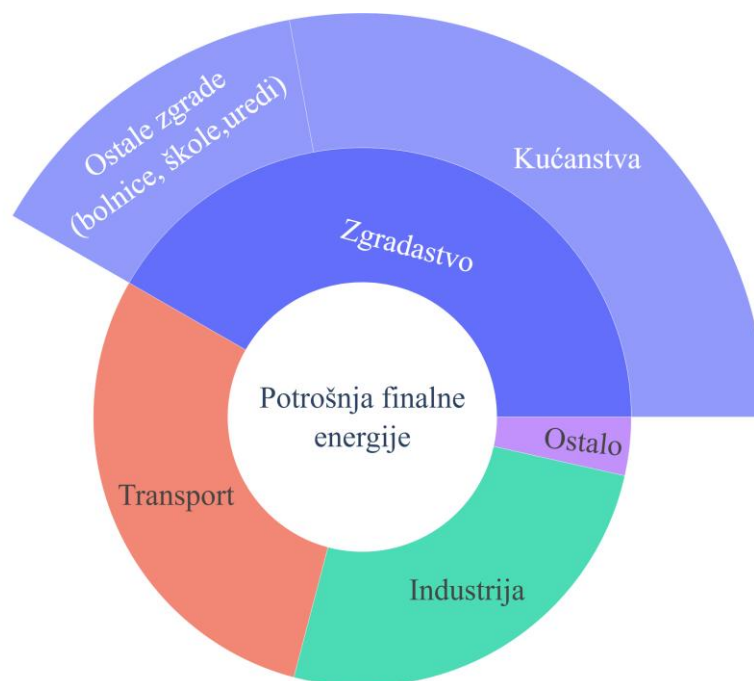
Oznaka	Opis
FN	Fotonaponski sustav
MIR	Srednjevalno infracrveno zračenje
NIR	Kratkovalno infracrveno zračenje
nZEB	Zgrada gotovo nulte energije
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PVC	Poli(vinil-klorid)
PVC-C	Klorirani poli(vinil-klorid)
REELS	Refleksijska spektrometrija gubitkom energije elektrona
STS	Solarni toplinski sustavi
VIS	Vidljivi dio spektra
UV	Ultraljubičasto zračenje
st	Staklo
sun	Sunce
ul	Ulaz radnog medija
zr,st-ok	Otpor izmjeni topline zračenjem između pokrovnog stakla i okoline

1. UVOD

Sunce je temelj života i glavni pokretač svih procesa na Zemlji od zagrijavanja Zemlje i rasta biljaka putem procesa fotosinteze do strujanja vjetrova i kretanja morskih struja. Samim time, ono predstavlja i izvor gotovo sve raspoložive obnovljive energije na Zemlji, bilo da se radi o toplinskoj energiji, biomasi, energiji vjetra ili valova. Značajan potencijal solarne energije može odigrati ključnu ulogu u borbi s klimatskim promjenama, te iz tog razloga predstavlja jedan od važnijih izvora energije u budućnosti.

Povećanje emisije stakleničkih plinova, većim dijelom uzrokovano izgaranjem fosilnih goriva dovelo je do porasta temperature na Zemlji za barem 1,1 °C od 1880. godine. Najveći dio zagrijavanja dogodio se nakon 1975. godine, brzinom od 0,15-0,20 °C po desetljeću [1]. U cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova i ograničavanja porasta temperature na 1,5 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, 2015. godine usvojen je Pariški sporazum. Europska unija (EU) sporazum je ratificirala 2016. godine [2]. Republika Hrvatska (RH) kao članica EU je također preuzela obvezu smanjenje emisije CO₂ i povećanje udjela obnovljivih izvora energije (OIE). Krajem 2019. godine Europska komisija predstavila je Europski zeleni plan kojim će EU postati moderno i konkurentno gospodarstvo [3]. Europski zeleni plan je paket inicijativa kojim se želi osigurati zelena tranzicija EU, pri čemu je krajnji cilj postići klimatsku neutralnost do 2050. Nadalje, direktiva o energiji iz obnovljivih izvora (RED) postavila je cilj od najmanje 32 % OIE u potrošnji energije do 2030. godine, dok je u ožujku 2023. donesena revizija direktive i postavljanje novog cilja od najmanje 42,5 % s ciljem ubrzavanja energetske tranzicije [4]. Uz to u sklopu paketa „Spremni za 55 %“ postavljen je i cilj za smanjene emisije CO₂ za 55 % do 2030. u odnosu na razine iz 1990 [5].

U 2021. ukupna potrošnja finalne energije u EU iznosila je 10 931 TWh, dok je sektorska podjela prikazana na Slika 1. Vidljivo je da je najveća potrošnja finalne energije u sektoru zgradarstva, ukupno 41,7 % od čega 27,9 % otpada na sektor kućanstva a 13,8 % na bolnice, škole, urede i trgovine. Potrošnja finalne energije u transportu i industriji je 29,2 % odnosno 25,6 %.

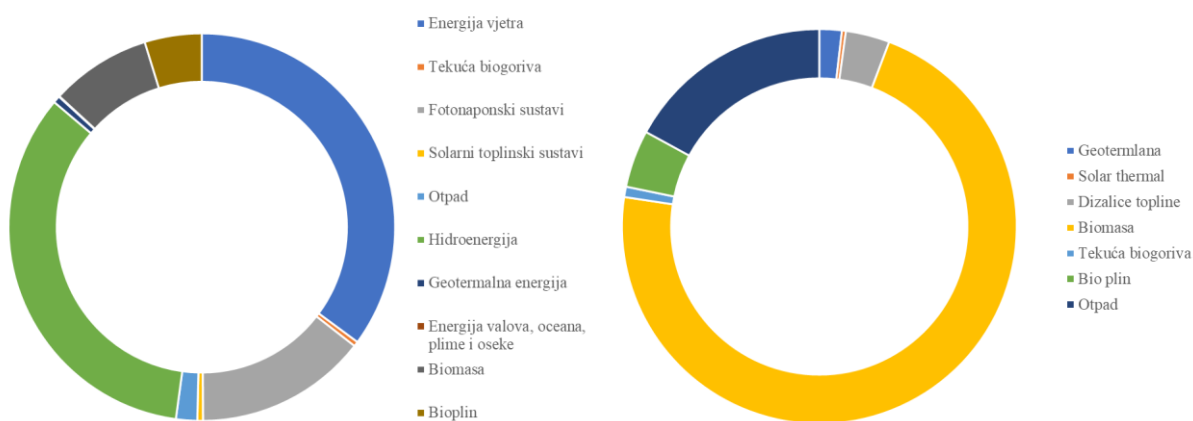


Slika 1 Ukupna potrošnja energije u EU [6]

Zahvaljujući velikom broju mjera sustavnog poticanja korištenja OIE, udio OIE u EU je rastao tijekom godina da bi u 2021. iznosio 21,8 %. dok je, najveći porast zabilježen je u sektoru proizvodnje električne energije (udio od 37,6 %), dok se iza njega nalazi sektor grijanja i hlađenja s udjelom od 22,9 % [7]. U proizvodnji električne energije iz OIE najveći doprinos imaju energija vjetra i hidroenergija, 35,1 % odnosno 34,0 %, dok je 14,4 % obnovljive energije proizvedeno putem fotonaponskih (FN) sustava (Slika 2). Biogoriva (kruta, tekuća, plinovita) čine 13,2 % proizvedene obnovljive energije. Oko 1,8 % obnovljive električne energije proizvedeno je spaljivanjem otpada. Ostatak proizvedene energije iz OIE ~1,1 % dolazi iz geotermalnih elektrana i solarnih toplinski sustava. U proizvodnji toplinske energije iz OIE u 2021., najveći udio od čak 71,6 % otpada na kruta biomasa (peleti, sječka, komadno drvo). Također, značajni dio, 17,1 % dobiven je spaljivanjem otpada. Ostatak je proizveden spaljivanjem bioplina (4,7 %), dizalicama topline (3,6 %) dok je jako mali udio, od samo 0,3 % proizvedeno putem solarnih toplovodnih sustava.

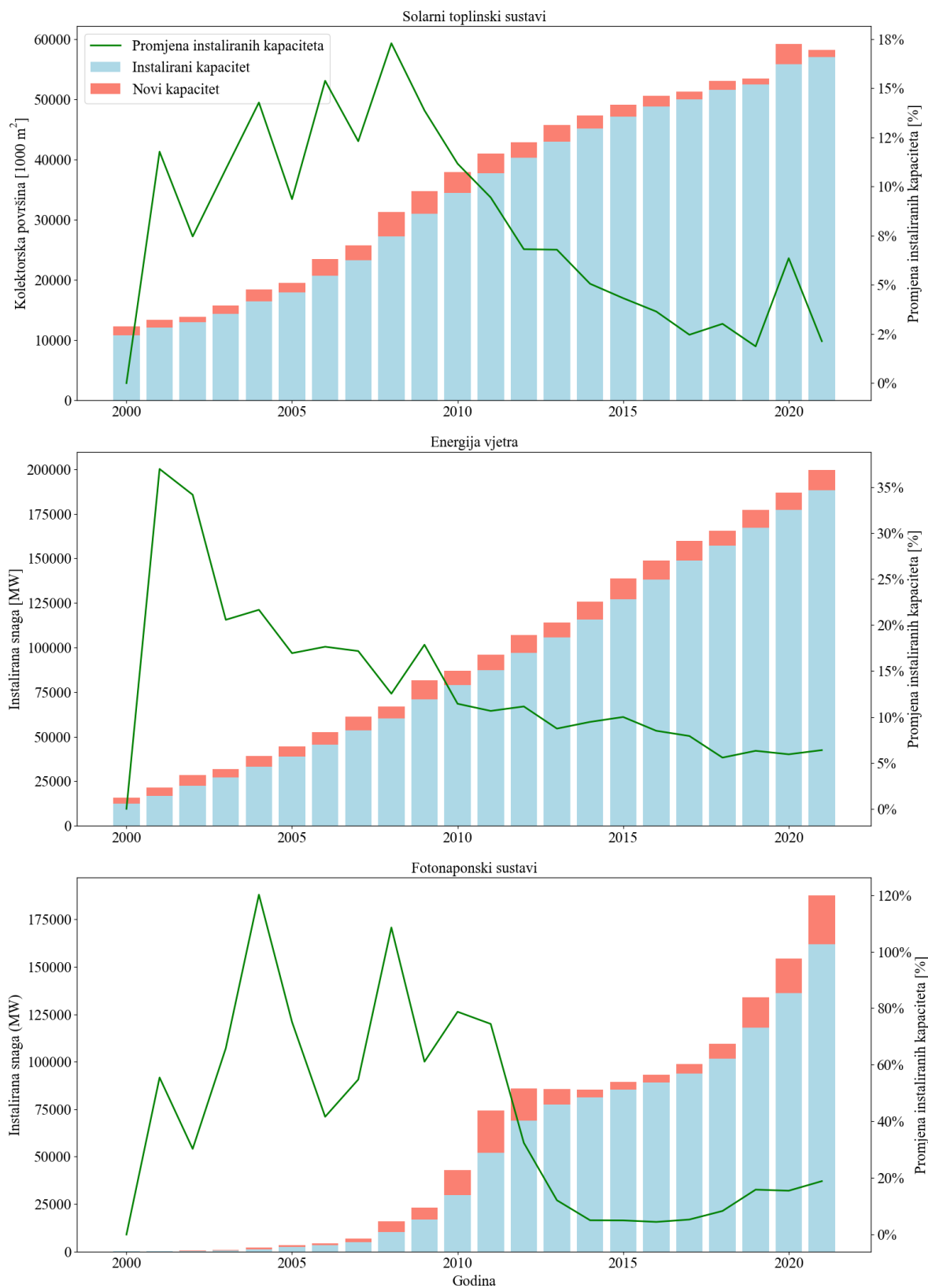
Od 2000. godine zabilježen je veliki rast instalirane snage FN sustava i vjetroagregata dok su solarni toplovodni sustavi imali nešto skromniji rast (Slika 3). Velike fluktuacije do 2010. godine uzrokovane su različitim faktorima kao što su regulatorne promjene, tržišni uvjeti i

razvoj tehnologije. Od 2010. godine zabilježeno je smanjenje rasta novo instaliranih kapaciteta za sve tri tehnologije, a od 2018. podaci pokazuju trend stabilnijeg kretanja krivulja, s prosječnim rastom novih kapaciteta vjetroagregata od 6,1 % i solarnih toplovodnih sustava od 2,3 % (izuzev 2020.). Kod FN sustava godišnje instalirana snaga kontinuirano raste od 2014., da bi u 2021. porast iznosio 18,9 %.

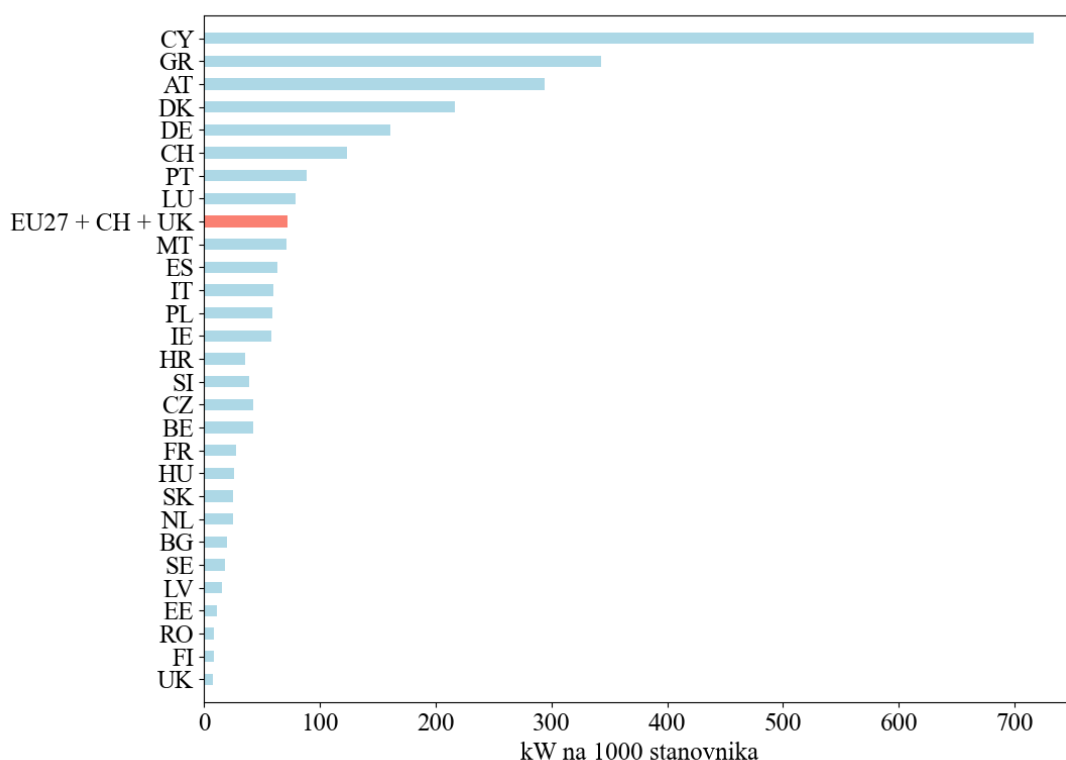


Slika 2 Udio obnovljivih tehnologija u proizvodnji toplinske i električne energije [8]

Prema istraživanju Europskog udruženja za solarnu toplinsku energiju (Solar Heat Europe, nekadašnji ESTIF) u zemljama članicama EU27+ Švicarska i Ujedinjeno Kraljevstvo ukupno je instalirano 37 770 GW solarnih toplinskih kolektora. Detaljniji prikaz po zemljama dan je na Slika 4. Iz prikazanih podataka je vidljivo da Cipar predvodi s brojem instaliranih kapaciteta što je i u skladu s očekivanjima kada se uzme u obzir prosječno sunčevo ozračenje na horizontalnu plohu od 5,21 kWh/m²/danu. Nadalje, slijede Grčka i Austrija koje imaju oko 490 i 420 kW na 1000 stanovnika, uz prosječno sunčevo ozračenje na horizontalnu plohu od 4,45 i 3,21 kWh/m²/danu. Iznad prosjeka EU27 + Švicarska + Ujedinjeno Kraljevstvo je ukupno 8 zemalja koje imaju oko 75 % udjela instaliranih kapaciteta iako neke od država (Danska, Njemačka, Švicarska) imaju relativno male vrijednosti sunčevog ozračenja na horizontalnu plohu. Nadalje, neke države članice koje imaju veće vrijednosti sunčevog ozračenja na horizontalnu plohu poput Španjolske (4,58 kWh/m²/danu), Italije (4,07 kWh/m²/danu), Hrvatske (3,74 kWh/m²/danu) zaostaju za prosjekom instaliranih kapaciteta.



Slika 3 Promjena instaliranih kapaciteta [9]



Slika 4 Ukupno instaliranih kapaciteta na 1000 stanovnika [9,10]

Očekuje se da će iskorištavanje solarne toplinske energije, uz biomasu i geotermalnu energiju, odigrati ključnu ulogu u osiguravanju energetske potrebe za grijanjem i hlađenjem u EU do 2050. i smanjenje emisije stakleničkih plinova. Od 2021. sve nove zgrade i one koje se obnavljaju moraju imati određeni udio OIE, minimalno 20 %, a prijedlozi nove revizije EPBD (*Energy Performance Building Directive*) predviđaju obvezu gradnje ZEB (*Zero Energy Building*) zgrada te obavezu ugradnje solarnih toplovodnih i FN sustava na nove zgrade i one koje se obnavljaju.

Direktno iskorištavanje solarne energije u zgradarstvu moguće je kroz FN sustave i solarne toplinske sustave (STS). Dugogodišnji poticaji i snažna politička potpora doveli su do toga da su FN sustavi danas vodeća tehnologija za direktno iskorištavanje solarne energije, dok STS stagnira. Isto tako, to je rezultiralo smanjenjem troškova proizvodnje i rada vezanih uz FN sustave, što je dovelo do konkurentnih cijena električne energije proizvedene putem FN sustava (Slika 8). Cijena toplinske energije dobivene iz STS-a iznosi ≈ 154 €/MWh, dok je cijena električne energije iz FN sustava niža, te iznosi ≈ 117 €/MWh.

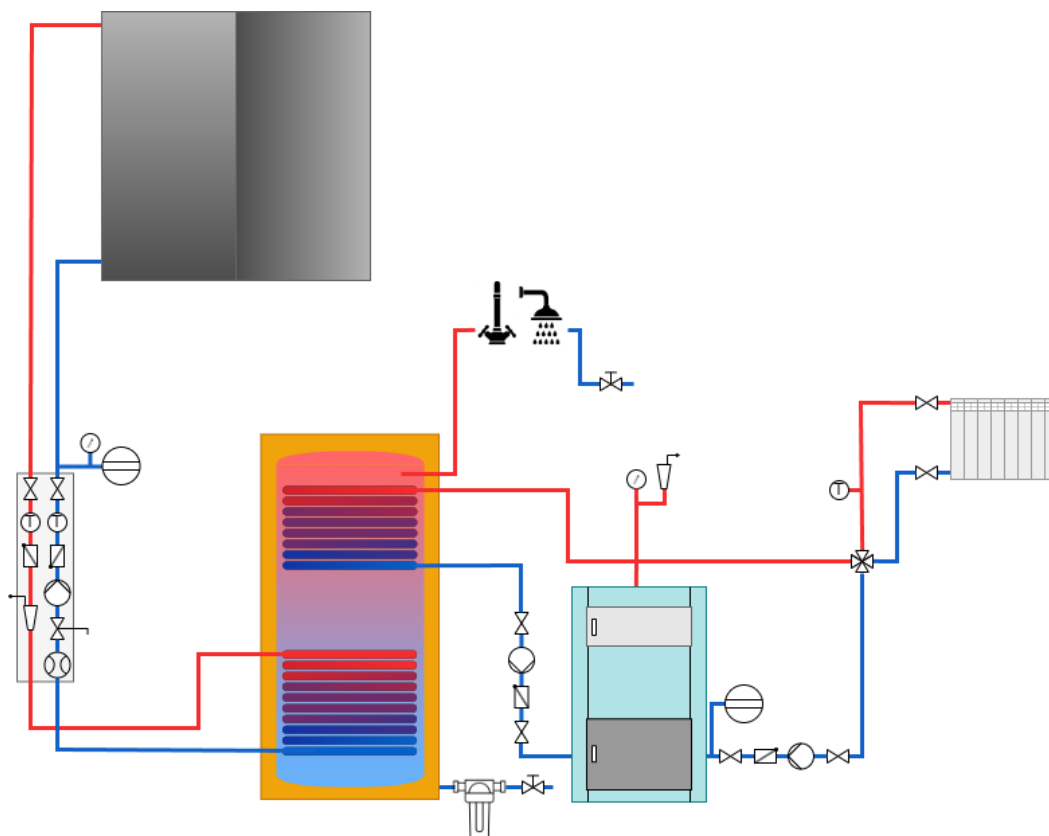
Prema podacima međunarodne agencije za energiju (IEA) od ukupnog broja novo instaliranih STS-a u Europi, 54,4 % otpada na sustave za pripremu potrošne tople vode (PTV) u obiteljskim kućama, dok 14,1 % čine kombinirani sustavi za pripremu PTV i grijanje u obiteljskim i višestambenim objektima [11]. Također, veliki udio novih sustava, 28,5 % čine veliki sustavi za pripremu PTV u višestambenim zgradama, kao u zgradama javne namjene i turizmu. Kako je prije spomenuto, sektor zgradarstva ima najveći udio u ukupnoj potrošnji finalne energije u EU, 41,7 % od čega 27,9 % udjela u ukupnoj potrošnji finalne energije otpada na sektor kućanstva, a najveći dio te potrošnje se odnosi na grijanje prostora (64,4 %) i PTV (14,5 %). Udio obnovljive energije 2021. iznosio 29,2 % za potrebe grijanja prostora i 13,9 % za pripremu PTV [6]. Vidljivo je kako u sektoru zgradarstva postoji još dosta prostora za napredak u pogledu povećanja udjela tehnologija za iskorištavanje OIE, prvenstveno direktno iskorištavanje solarne energije putem STS-a. Za povećanje kompetentnosti STS-a i daljnje smanjenje cijene solarne toplinske energije potrebna su istraživanja, razvoj i inovacije, ali i osiguravanje iste razine političke potpore kao i kod drugih važnih tehnologija za iskorištavanje OIE. Cilj ovog istraživanja je razvoj prototipa polimernog solarnog kolektora što bi dovelo do daljnjeg snižavanja cijene solarne toplinske energije i povećanje kapaciteta STS-a. Trenutno je cijena toplinske energije iz STS-a iznosi ≈ 154 €/MWh, dok je cijena električne energije iz FN sustava znatno niža, ≈ 117 €/MWh za obiteljske kuće u kontinentalnim klimama. Razlika u cijeni energije jasno pokazuje potrebu za inovacijama u solarnoj toplinskoj tehnici, gdje se polimerni kolektori nameću kao jedno od rješenja za povećanje konkurentnosti solarne toplinske tehnike i daljnje širenje tržišnog udjela.

1.1. Solarni toplinski sustavi i kolektori

Solarni toplinski sustavi (STS) iskorištavaju sunčevu energiju za proizvodnju toplinske energije koju je kasnije moguće koristiti u sustavima za pripremu potrošne tople vode (PTV), grijanje prostora, u proizvodnim procesima ili za proizvodnju električne energije. Podjela STS-a moguća je prema više kriterija, a najčešća je ona prema temperaturnom režimu (niskotemperaturni, srednjetemperaturni i visokotemperaturni) [12]. Niskotemperaturni sustavi mogu zagrijati vodu od 30-150 °C koja se onda koristi za grijanje prostorija, bazenske vode, PTV ili u industrijskim procesima. Glavni cilj ovog rada je razvoj prototipa polimernog solarnog kolektora koji bi se primarno koristio u sustavima za pripremu PTV i

niskotemperaturno grijanje prostora čija je namjena zagrijavanje vode do 70 °C. Iz tog razloga, u nastavku ovog rada više će se pažnje posvetiti tim sustavima.

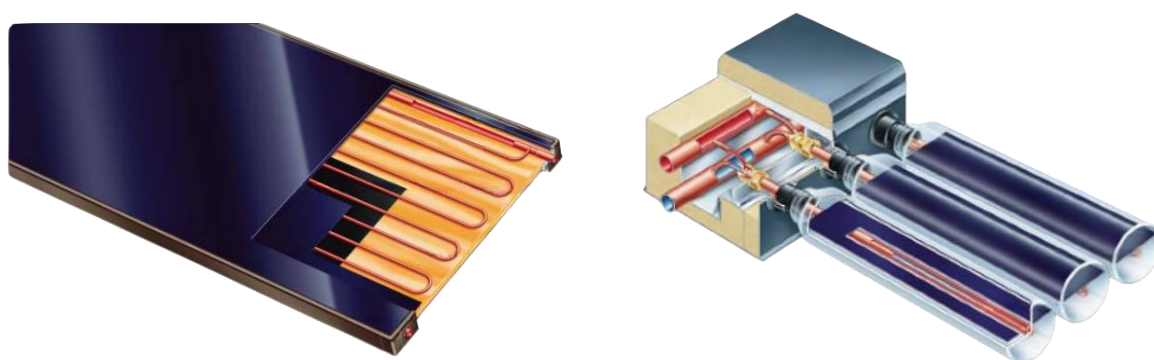
Osnovni elementi solarnog sustava za pripremu PTV-a i grijanje prostora su solarni kolektor i akumulacijski spremnik (Slika 5). Ovisno o tipu sustava, ostali dijelovi čine pomoćni izvor topline, regulacija, pumpe i pripadajuća armatura. Uobičajeni radni medij u sustavu je voda ili mješavina vode i glikola koja je otporna na smrzavanje. Na tržištu postoje termosifonski sustavi gdje je cirkulacija vode ostvarena na temelju temperature razlike odnosno gustoće. Takvi sustavu su u pravilu povoljniji za ugradnju i pogon jer ne zahtijevaju složenu regulaciju kao i električnu energiju za pogon pumpe. S obzirom na to da je zbog načina izvedbe polimernog kolektora koji je opisan u nastavku potrebna pumpa za pogon radnog medija, ovaj sustav nije dalje opisivani. Polimerni kolektor opisan u ovom istraživanju predviđen je da radi u tzv. *drain-back* sustavu. U ovim sustavima radni medij nije pod tlakom, te kada dođe do prekida rada pumpe radni medij se povlači iz kolektora i cjevovoda gravitacijskim putem, te na mjesto vode dolazi zrak. Prisustvo zraka u kolektoru tijekom prekida rada pumpe ključno je za funkciju opisanog kolektora jer omogućuje primjenu Snellovog zakona loma za snižavanje temperature (Poglavlje 2.5). Ponovnim uključivanjem pumpe radni medij ponovno počinje cirkulirati kroz kolektor. Ovakvi sustavi imaju nešto veći prinos i niže troškove održavanja, te su pogodni za sustave koji nemaju stalnu potražnju za toplinskom energijom. Glavni nedostaci vežu se uz projektiranje takvih sustava gdje je potrebno osigurati minimalni nagib cjevovoda između kolektora i spremnika. Isto tako, definirana je i maksimalna razlika u visini između pumpe solarnog kruga i najviše toke kolektora.



Slika 5 Shema sustava za pripremu PTV [13]

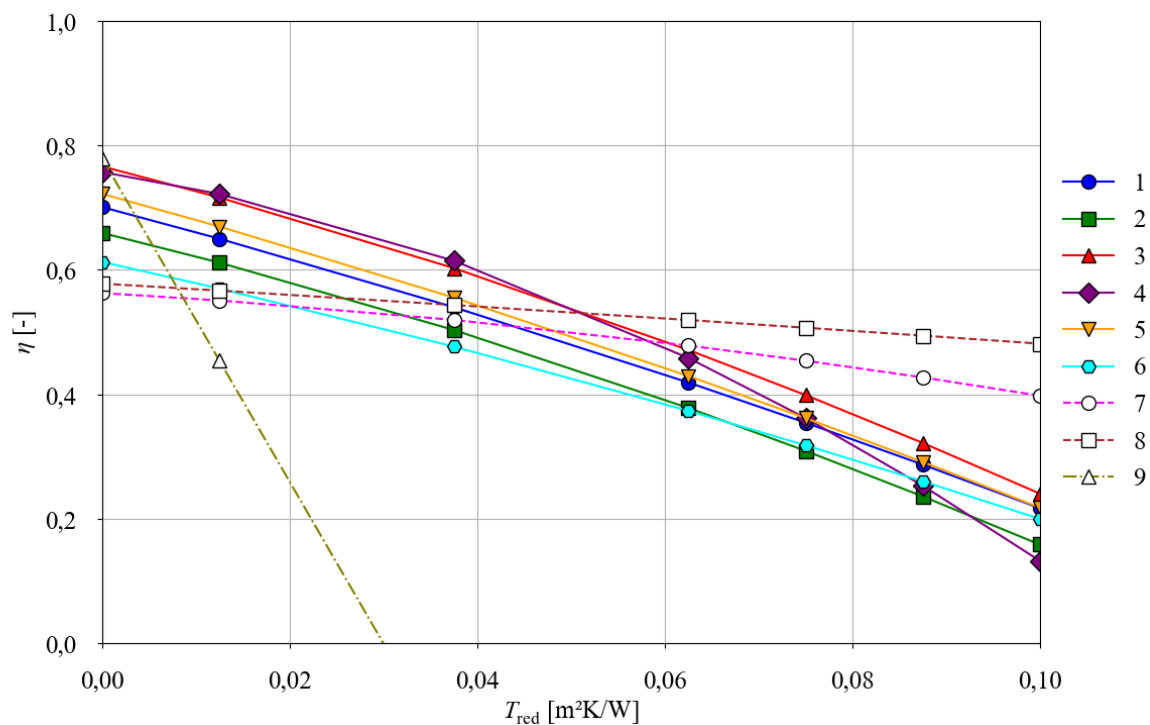
Na tržištu je dostupan veliki broj solarnih kolektora koje možemo podijeliti u dvije glavne kategorije: koncentrirajući i nekoncentrirajući. Daljnja podjela nekoncentrirajućih solarnih kolektora je na neostakljene i ostakljene kolektore. Neostakljeni kolektori su jednostavne konstrukcije i sastoje se od apsorbera, bez pokrovnog stakla i izolacije što rezultira niskim vrijednostima toplinske učinkovitosti. Takvi kolektori se koriste u sustavima gdje su potrebne niže temperature vode, do 30 °C, npr. grijanje bazenske vode. S ciljem smanjivanja toplinskih gubitaka ploča apsorbera se s gornje strane pokriva staklom, a s donje strane se stavlja izolacija što rezultira povećanjem toplinske učinkovitosti. Iz tog razloga, pločasti i cijevni vakuumski kolektori se koriste u sustavima gdje potrebna voda više temperature do 70 °C, kao što su sustavi za pripremu PTV i grijanje prostora. Danas na tržištu postoji veliki broj pločastih solarnih kolektora koje karakterizira visoka učinkovitost, izdržljivost i stabilnost u radu. Pločasti solarni kolektori sastoje se od pokrovnog stakla, cijevnog registra ploče apsorbera, izolacije i kućišta (Slika 6). Pokrova stakla koja se danas koriste u proizvodnji solarnih kolektora odlikuju se visokim vrijednostima faktora propusnosti u vidljivom dijelu spektra (0,90-0,94), dok emisijski faktor za infracrveno područje iznosi (0,84-0,89). Cijevni

registar može biti izveden u obliku serpentine ili kao paralelni cijevni registar zavaren ili zalemljen na ploču apsorbera ovisno o tome koji se materijal koristi, aluminij ili bakar. Također, postoje i izvedbe gdje su cijevi formirane u materijalu ili je cijevni registar u napravljen od valovitih ploča zavarenih na apsorber. Prostor između pokrovnog stakla i apsorbera je ispunjen zrakom, dok je kod cijevnih vakuumskih kolektora taj prostor zrakoprazan, čime su dodatno smanjeni toplinski gubitci. Na ploču apsorbera se dodatno nanosi selektivni premaz koji ima dobru apsorpciju u vidljivom spektru sunčevog zračenja (0,93-0,96), a mali emisijski faktor u infracrvenom spektru (0,04-0,06) čime su smanjeni toplinski gubitci zračenjem.



Slika 6 Pločasti i vakuumski solarni kolektor [14]

Učinkovitost solarnog kolektora se u širem smislu definira kao omjer korisnog toplinskog toka predanog radnom fluidu i upadnog sunčevog zračenja na površinu kolektora i najčešće se prikazuje kao polinom drugog stupnja (Slika 7), gdje je na osi apscisa reducirana temperaturna razlika (T_{red}). Reducirana temperaturna razlika predstavlja omjer razlike srednje temperature fluida i okolišnog zraka te upadnog sunčevog zračenja. Na slici je prikazana krivulja toplinske učinkovitosti za ukupno 9 različitih komercijalno dostupnih solarnih kolektora. U Tablica 1 ispod slike za pojedini kolektor dane se konstrukcijske značajke, vrijednosti faktora propusnosti za staklo, te apsorpcije i emisijskog faktora za korišteni selektivni premaz. Pločasti solarni kolektori imaju veću učinkovitost pri nižim vrijednostima T_{red} i ta učinkovitost brže pada s porastom T_{red} . S druge strane cijevni vakuumski kolektori imaju nižu početnu učinkovitost, ali nagib krivulje je blaži što znači da učinkovitost puno manje pada s porastom T_{red} . Neostakljeni kolektori imaju linearnu krivulju učinkovitosti koja se drastično smanjuje s porastom T_{red} što ih čini neprikladnima za primjenu gdje su potrebne temperature više od 30 °C.



Slika 7 Učinkovitost različitih izvedbi kolektora, podaci proizvođača

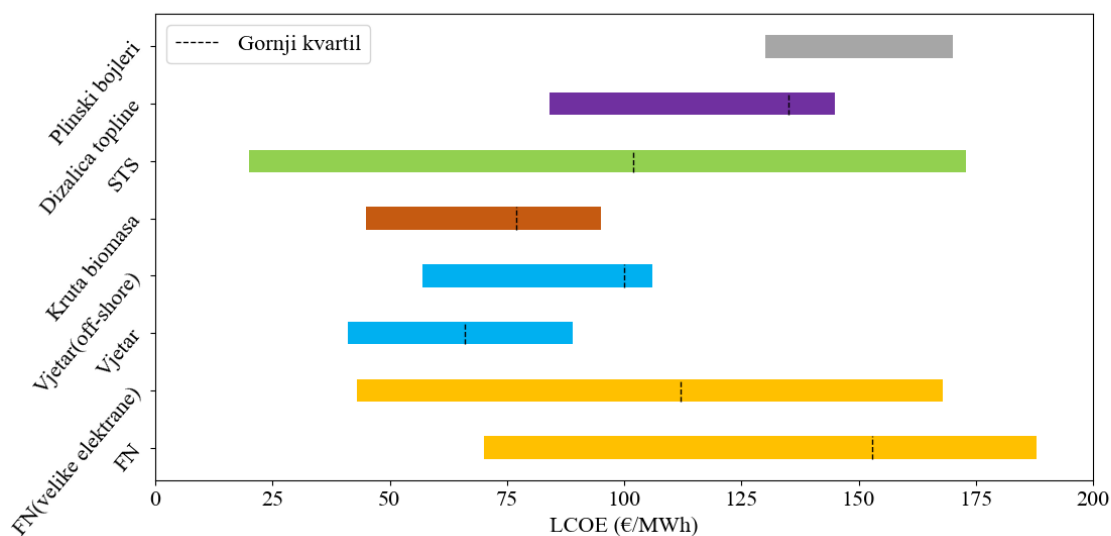
Tablica 1 Pregled kolektora s obzirom na korištene materijale, svojstva premaza i konstrukciju [13,15–22]

Br.	Tip	Materijal apsorbera	Izvedba cijevnog registra	Staklo (propusnost)	Selektivni premaz (apsorpcija)	Selektivni premaz (emisijski faktor)	Orijentacija
1.	Pločasti	Aluminij	Paralelni	90 %	96 %	5 %	Vertikalna
2.	Pločasti	Aluminij	Serpentina	88 %	90 %	20 %	Vertikalna
3.	Pločasti	Aluminij	Serpentina	96 %	95 %	5 %	Vertikalna
4.	Pločasti	Aluminij	Serpentina	96 %	95 %	5 %	Horizontalna
5.	Pločasti	Aluminij	Paralelni	92 %	95 %	10 %	Vertikalna
6.	Pločasti	Bakar	Paralelni	90 %	96 %	5 %	Vertikalna
7.	Vakuumski	Aluminij	U-cijev	90 %	96 %	5 %	Vertikalna
8.	Vakuumski	Čelik	U-cijev	95 %	94 %	5 %	Vertikalna
9.	Neostakljeni	-	-	-	-	-	Vertikalna

1.2. Motivacija i opis problema

Klimatske promjene, nepredvidivost kretanja cijena energenata na tržištu, stabilnost i mogućnosti dobave istih važne su teme u nadolazećim vremenima. Iskorištavanje punog potencijala solarne toplinske energije, predstavljat će važan faktor u osiguravanju energetske tranzicije i dekarbonizacije

EU. Nadalje, ne treba ni isključiti pojavu novih radnih mjesta kao i razvoj drugih regija svijeta. Konstantan pritisak drugih obnovljivih tehnologija poput FN sustava, vjetroagregata i dizalica topline, predstavljaju potencijalni rizik za povećanje novoinstaliranih kapaciteta. Relativno visoka cijena STS-a u odnosu na konvencionalne sustave za pripremu PTV-a također predstavlja prepreku većem udjelu takvih sustava u ukupnoj energetskej bilanci [23,24]. Nivelirani trošak energije (LCOE – *Levelised cost of electricity*, LCOH – *Levelised cost of heat*) je globalno prihvaćena metodologija za izračun cijene proizvodnje električne ili toplinske energije, te obuhvaća investicijske (fiksne) i operativne (varijabilne) troškove. Ovakav način izračuna cijene energije (EUR/MWh ili EUR/kWh) omogućava usporedbu troškova proizvodnje električne ili toplinske energije iz različitih izvora. Prema dostupnim podacima za 2018. godinu nivelirani trošak energije STS-a unutar EU27 kretao se u rasponu od 20-173 €/MWh dok je granica gornjeg kvartila 102 €/MWh (Slika 8). Cijena proizvedene električne energije iz malih FN sustava ugrađenih na krovovima obiteljskih kuća ili javnih zgrada kreće se u rasponu od 70-188€/MWh, dok je granica gornjeg kvartila 153 €/MWh. Faktori poput cijene materijala i rada, geografske lokacije i zakonodavnog okvira pojedinih zemalja članica mogu imati značajan utjecaj na nivelirani trošak energije pojedinog sustava. Cijena proizvedene električne energije iz FN sustava pala je na razine proizvedene toplinske energije iz STS-a, što je posljedica dugogodišnjih poticaja za ugradnju FN sustava i posljedičnog povećanja proizvodnje, koje je smanjilo troškove tehnologije i instalacije. Također, porast cijene materijala i rada doveo je do povećanja cijene toplinske energije iz STS-a. Izračunati LCOH iz STS-a za obiteljsku kuću u RH za kontinentalnu klimu iznosu 154 €/MWh dok je LCOE iz FN sustava 117 €/MWh. To, kao i činjenica da su FN sustavi jednostavniji za ugradnju i održavanje djelomično objašnjava negativne trendove u broju novo ugrađenih kapaciteta STS-a i sve veći interes kupaca za ugradnju FN sustava. Iz tog razloga, nužna su istraživanja i daljnji razvoj na području solarne tehnike s ciljem dodatnog snižavanja cijene i povećanje konkurentnost STS-a.



Slika 8 Nivelirani trošak energije [25]

European Solar Thermal Technology Panel (ESTTP) koji su dio *European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling* (RHC-Platform) su 2022. objavili dokument pod nazivom „*Strategic Research Priorities for Solar Thermal Technology*“ [26]. U dokumentu se naglašava važnost integracije obnovljivih izvora energije, poput solarne, geotermalne energije i biomase, koji imaju ključnu ulogu u postizanju ciljeva dekarbonizacije sektora grijanja i hlađenja do 2050. godine. Poseban fokus stavljen je na povećanje istraživačko-razvojnih aktivnosti i implementaciju inovativnih rješenja, čime bi se omogućilo šire korištenje tehnologija obnovljivog grijanja i hlađenja. U dokumentu „*Solar Heating and Cooling Technology Roadmap*“ [27] su detaljno razrađene potrebne istraživačko-razvojne aktivnosti te su razvrstane u tri osnovne grupe koje je potrebno provoditi u isto vrijeme:

- Razvoj solarnih kompaktnih hibridnih sustava (*Solar compact hybrid systems*, SCOHYS) s ciljem smanjenja troškova proizvodnje toplinske energije putem STS-a od 50 % do 2020. godine,
- Tehnološka unapređenja u području solarno aktivnih kuća (*Solar-Active-House*, SAH) koje se nameću prikladno rješenje za ostvarivanje nZEB (*Nearly Zero Energy Building*) standarda
- Razvoj solarnih sustava za proizvodnju toplinske energije za industrijske procese (*Solar heat for industrial processes*, SHIP)

Ciljevi i aktivnosti u sklopu pojedinih grupa obuhvaćaju:

a) SCOHYS

- Sniženje troškova energije povećanjem učinkovitosti i korištenjem jeftinijih komponenti
- Integraciju solarnog sustava s pomoćnim sustavima grijanja
- Jednostavnija izvedba sustava, kao i lakša montaža solarnih kolektora
- Istraživanja, inovacije i poboljšanja kolektora, spremnika, razvoda i pumpi, regulacije i montažnih setova za kolektore
- Razvoj i implementaciju normi i sustava osiguranja kvalitete
- Razvoj novih poslovnih modela, programa podrške i zakonske regulative
- Ciljane grupe: jedno i više-obiteljske kuće

b) SAH

- Povećanje udjela solarne energije za PTV i grijanje prostora s 25 % na ~60 % pri istoj cijeni solarne energije
- Poboljšanje kolektorski polja
- Integracija spremnika velikog volumena u zgradama
- Poboljšanje hidrauličkih shema i regulacije
- Povećanje učinkovitosti solarnih sustava, smanjenje kolektorske površine i zapremnine spremnika
- Razvoj, inovacije i poboljšanja se odnosno na komponente i izvedbe sustava, prototipe, ispitivanja i demonstracijske projekte
- Ciljana grupe: novoizgrađene jedno i više-obiteljske kuće nZEB standarda, energetske obnovljene kuće

c) SHIP

- Standardizirana i troškovno optimalna rješenja za sve industrijske procese ostvarena razvojem kolektora prilagođenim za industrijske zgrade
- Poboljšanje velikih kolektorskih polja, kao i novih alata za planiranje i projektiranje
- Razvoj nove generacije solarnih kolektora za raspon temperatura 100-250 °C

- Smanjenje troškova proizvodnje toplinske energije putem solarnih sustava na 3-6 €/kWh za niskotemperaturne, odnosno 4-7 €/kWh za srednjotemperaturne primjene

Primjenom ovog razvojnog plana, moguće je daljnje smanjenje troškova proizvodnje toplinske energije iz STS-a čime će ugradnja istih postati cjenovno konkurentna i privlačna za krajnjeg korisnika, pridonoseći europskim ciljevima smanjenja emisija stakleničkih plinova, stabilizacije cijena energije, povećanju udjela OIE i smanjenju ovisnosti o uvozu energije.

Kako je prije spomenuto tradicionalno korišteni materijali koji se koriste u procesu proizvodnje solarnih kolektora su staklo, bakar, aluminijski, te mineralna vuna. Zbog toga cijena kolektora, a time i cijena STS-a najviše će ovisiti o cijeni tih materijala na tržištu, ali i cijeni rada kod sklapanja kolektora koje je većinom ručno. Uz to problemi dobave i transporta uslijed različitih kriza također mogu utjecati na cijenu cjelokupnog sustava, kao i na vremenske rokove isporuke. Kako bi se preokrenuli zabilježeni negativni trendovi na tržištu te povećao interes investitora za ugradnji STS-a u ovom radu prikazano je istraživanje s ciljem određivanja toplinskih karakteristika prototipa polimernog solarnog kolektora. Polimerni materijali predstavljaju potencijalnu alternativu konvencionalno korištenim materijalima u proizvodnji solarnih kolektora. Karakterizira ih mala masa, mogućnost serijske proizvodnje (npr. proces ekstruzije), kao i oblikovljivost što može rezultirati dodatnim snižavanjem troškova proizvodnje i porast ugradnje solarnih kolektora. Lošija toplinska, mehanička i optička svojstva predstavljaju najveću prepreku širem korištenju polimernih materijala u proizvodnji solarnih kolektora. Polimerni materijali se danas pretežno koriste za izradu neostakljenih solarnih kolektora koji se koriste za grijanje bazenske vode, dok se kod ostakljenih pločastih kolektora polimerni materijali najčešće koriste za izradu pojedinih komponenti kolektora. Bitno je naglasiti da istraživanje i razvoj prototipa polimernog solarnog kolektora opisanog u ovome radu direktno podržava ciljeve i aktivnosti koje su postavile RHC-Platform i ESSTP.

1.3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Učinkovitost STS-a najviše ovisi o samom solarnom kolektoru, te je iz tog razloga najviše pažnje posvećeno razvoju i poboljšanju toplinskih karakteristika solarnih kolektora. Današnji

kolektori već su dosegli visoke vrijednosti toplinske učinkovitosti i daljnja poboljšanja je moguće ostvariti izmjenom konstrukcije kolektora, korištenjem novih radnih fluida, smanjenjem toplinskih gubitaka i ugradnjom uređaja za poboljšanje izmjene topline (npr. turbulatora) [28–30]. Nadalje, osim termodinamičkog aspekta prilikom predlaganja poboljšanja važno je da ta poboljšanja nemaju značajniji utjecaj na povećanje cijene samog kolektora. Izmjenom konstrukcije apsorbera moguće je povećati toplinsku učinkovitost uz korištenje manje materijala, što bi rezultiralo smanjenjem mase samog kolektora, a time i proizvodnih troškova. Autori su u [31] analizirali pločasti solarni kolektor sa spiralnim cijevnim registrom, te je učinkovitost povećana za 21,94 % uz ~30 % uštede materijala. U [32] autori numerički i eksperimentalno istražuju pločasti solarni kolektor s mikro kanalima i vodom kao radnim medijem. Rezultati pokazuju kako ovakav kolektor ima veću učinkovitost za ~10 % pri vrijednosti reducirane temperature $0 \text{ m}^2\text{K/W}$ i smanjene toplinske gubitke pri višim vrijednostima temperatura u odnosu na konvencionalni kolektor. Autori također upozoravaju da ovakva konstrukcija može rezultirati većim padom tlaka kroz kolektor. Smanjenje toplinskih gubitaka do ~9 % moguće je ostvariti i korištenjem valovitih ili trapeznih apsorbera [33]. Zbog smanjenih toplinskih gubitaka moguće je izvršiti izmjene na drugim dijelovima konstrukcije, npr. povećanje kanala ili smanjenje razmaka između pokrova i apsorbera što bi rezultiralo povećanjem toplinskih gubitaka, ali bi takve izmjene imale pozitivan efekt sa strane pada tlaka i čvrstoće. U [34] provedena je numerička i eksperimentalna analiza kolektora s aluminijskim apsorberom i integriranim kanalima za strujanje radnog medija. Rezultati pokazuju povećanje učinkovitosti do 5 %, za vrijednosti reducirane temperature do $0,0275 \text{ m}^2\text{K/W}$, što odgovara ljetnom režimu rada. Mogućnost složenijih konstrukcijskih izmjena apsorbera i cijevnog registra bit će ograničena prije svega mogućnošću oblikovanja korištenog materijala (bakar, aluminij). Primjenom drugih materijala u procesu proizvodnje, poput polimernih materijala, moguće je smanjiti masu kolektora, lakše ostvariti konstrukcijske izmjene i dodatno sniziti troškove proizvodnje [35]. Autori su u [36] numerički odredili toplinsku učinkovitost i izlazne temperature pločastog kolektora s 3 različita rasporeda cijevnog registra, U-cijevni, valoviti i spiralni. Dodatno, istražen je i utjecaj korištenja nanofluida, CuO i Al_2O_3 kao radnog medija. Pokazalo se da korištenjem valovitog i spiralnog cijevnog registra moguće je povećati koeficijent prijelaza topline. Također, zaključeno je da zbog malih dimenzija kolektora korištenje nanofluida i drugačije izvedbe cijevnog registra ne utječe značajnije na učinkovitost kolektora. U novije vrijeme

postoje brojna istraživanja vezana uz upotrebu raznih nanofluida poput CuO i Al₂O₃ nanofluida [37,38], ali i nekih drugih poput Ti₂O i Si₂O nanofluida [39], dok je u [40] prikazan detaljan pregled korištenja nanofluida u solarnoj tehnologiji. Upotreba nanofluida može povećati toplinsku učinkovitost, međutim šira upotreba je moguća tek nakon što se provedu istraživanja i da odgovor na ključna pitanja vezana uz histerezu i stabilnost nanofluida [41]. Također, nisu pronađeni radovi koji istražuju interakciju između nanofluida i polimernih materijala.

Kroz zadnja dva desetljeća razni autori su istraživali mogućnosti upotrebe polimernih materijali u konstrukciji solarnih kolektora. Autori su u [42,43] proveli matematičko modeliranje i eksperimentalno ispitivanje neostakljenog kolektora kod kojeg je apsorber napravljen od paralelnog cijevnog snopa od polimernog materijala. Iako se radi o neostakljenom solarnom kolektoru, autori ističu prednosti primjene polimernih materijala kod izrade solarnog kolektora kao što su otpornost na koroziju i pojavu kamenca te mala masa. Isto tako, autori su se osvrnuli i na probleme koji se mogu javiti kod korištenja polimera u ostakljenim kolektorima. Degradacija i deformacija kod dugotrajnog izlaganja polimera visokim temperaturama, kao i niže vrijednosti toplinske provodnosti predstavljaju glavne poteškoće koje je potrebno otkloniti prije šire upotrebe polimera u ostakljenim solarnim kolektorima. Lošija toplinska svojstva polimera, prije svega toplinska provodnost, moguće je kompenzirati izmjenom konstrukcije kolektora. Takve konstrukcijske izmjene moguće je lakše ostvariti korištenjem polimera, zbog njihove bolje oblikovljivosti u usporedbi s metalnim materijalima. Teoretska analiza polimernog kolektora s potpuno potopljenom pločom apsorbera radi ostvarivanja što veće kontaktne površine između apsorbera i radnog medija provedena je u [44–46]. Rezultati pokazuju da je moguće ostvariti povećanje učinkovitosti od 14 %. Lošija toplinska svojstva također je moguće kompenzirati dodavanjem ugljikovih nanocijevi u osnovni polimerni materijal [47,48]. Kolektori su ostvarili učinkovitost ~32 % pri reduciranoj razlici temperatura 0,05 m²K/W. Iako su vrijednosti učinkovitosti niže od onih koje je moguće ostvariti korištenjem konvencionalnih pločastih kolektora, autori ističu prednosti zbog mogućeg smanjenja proizvodnih troškova uslijed korištenja polimernih materijala. Izvedba kolektora kod kojeg je apsorber napravljen od polimera prikazana je u [49]. Kolektor je ostvario izlazne temperature vode oko 60 °C uz dnevnu učinkovitost u rasponu 50-60 %. Orijentacija kolektora je prema jugu uz vrijednosti

masenog protoka od 25,8 kg/h po m². U [50] je napravljena numerička i eksperimentalna analiza polimernog solarnog kolektora u kojem je radni fluid ujedno i apsorber. Pokrov i kanali za strujanje radnog fluida izrađeni su od polimera i umetnuti su unutar aluminijskog kućišta. Eksperimentalni rezultati su pokazali relativno dobro poklapanje s rezultatima simulacija. Prikazana je krivulja učinkovitosti prvog stupnja i prosječna učinkovitost ovakve izvedbe kolektora pokazala se sličnom kao kod komercijalno dostupnih pločastih solarnih kolektora nižih troškova. Ista grupa autora je u [51] provela parametarsku analizu s ciljem daljnjeg poboljšanja učinkovitosti ovog polimernog solarnog kolektora. Polimerni solarni kolektor, u kojemu su pokrov i apsorber napravljeni od polimernog materijala dok je kućište napravljeno od aluminijskog, podvrgnut je eksperimentalnom ispitivanju u realnim uvjetima rada [52,53]. Rezultati istraživanja pokazali su da je toplinska učinkovitost 8-15 % niža u odnosu na ispitivani konvencionalni pločasti solarni kolektor uz ~68 % smanjene mase zbog korištenja polimernih materijala za izradu pojedinih dijelova kolektora. U [54] provedena je numerička analiza s ciljem optimizacije konstrukcije polimernog kolektora u odnosu na konstrukcijske parametre i radne uvjete. Međutim, u studiji nije prikazana usporedba krivulje učinkovitosti s konvencionalnim ostakljenim kolektorom. Polimerni solarni kolektor izrađen od mikrokapilarnog filma podvrgnut je eksperimentalnom i numeričkom ispitivanju [55]. Rezultati su, u laboratorijskim uvjetima ispitivanja, usporedivi s onima komercijalno dostupnih solarnih kolektora, međutim troškovi takvog proizvodnog procesa nisu otkriveni.

Pregledom literature nisu pronađeni radovi koji opisuju potpuno polimerni solarni kolektor napravljen iz jednog materijala koji bi bili pogodni za veću serijsku proizvodnju. Istraživani kolektori su uglavnom konvencionalni pločasti kolektori u kojima su dijelovi kolektora ili pojedine komponente napravljene od polimera. Prednosti polimernih materijala u odnosu na konvencionalno korištene metalne materijale i staklo, prvenstveno su mala masa kao i mogućnost oblikovanja kompleksnijih geometrija na relativno jednostavan način. Pregled literature također ukazuje na to da bi daljnje poboljšanje toplinskih karakteristika solarnih kolektora moglo biti postignuto izmjenom konstrukcije apsorbera i kanala za strujanje radnog medija. S te strane polimerni materijali se nameću kao potencijalno rješenje s obzirom na prije spomenute prednosti. Isto tako, na taj je način moguće kompenzirati lošija toplinska svojstva, prije svega toplinsku provodnost polimernih materijala u odnosu na metalne materijale u konvencionalnim pločastim solarnim kolektorima. Ovo, uz niže troškove

proizvodnje, čini primjenu polimernih materijala u izradi solarnih kolektora vrijednom istraživanja.

1.4. Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj ovog istraživanja je provesti numeričko modeliranje procesa izmjene topline unutar polimernog solarnog kolektora i eksperimentalno potvrditi dobivene rezultate, na temelju kojih je moguće procijeniti temperaturna polja kao i toplinsku učinkovitost takvog kolektora. Nadalje, cilj je numerički i eksperimentalno istražiti utjecaj različitih materijala i konstrukcijskih rješenja na toplinske i mehaničke karakteristike takvih kolektora propisane EN normama.

Hipoteza ovog istraživanja glasi: „Konstrukcijskim rješenjima i odabirom materijala moguće je postići toplinska i mehanička svojstva polimernog solarnog kolektora koja zadovoljavaju sve zahtjeve propisane europskim normama.“

1.5. Znanstveni doprinos

Ovim istraživanjem postiže se sljedeći doprinos u području tehničkih znanosti:

1. Eksperimentalno potvrđeni rezultati numeričkog modeliranja izmjene topline unutar polimernog solarnog kolektora.
2. Smjernice za razvoj prototipa komercijalnog polimernog solarnog kolektora koji će zadovoljavati sve zahtjeve propisane odgovarajućim EN i ISO normama.

1.6. Podrška istraživanju i razvoju

Istraživanje u ovom radu provedeno je u sklopu projekta „Razvoj sustava grijanja Višenamjenskim solarnim kolektorom“. Projekt je sufinanciran sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj (ERDF) u okviru Operativnog programa Konkurentnost i kohezija. Zahvaljujući ovom projektu omogućeni su razvoj eksperimentalnih metoda, izrada prototipova i provođenje numeričkih simulacija, što je značajno doprinijelo ostvarivanju ciljeva istraživanja.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Polimerni materijali

Polimeri su skupina materijala i tvar i prirodnog i umjetnog porijekla čiji je osnovni sastojak sustav polimernih molekula odnosno makromolekula koja se sastoji od velikog broja ponavljajućih jedinica, mera. Prirodni polimeri su materijali poput drva, kože i raznih vlakana biljnog i životinjskog porijekla. S druge strane, sintetičke polimerne tvari dobivamo tijekom kemijske reakcije polimerizacije velikog broja malih molekula, monomera, načinjenih obično baziranih na sirovinama poput nafte, prirodnog plina ili ugljena. Rezultat tog procesa je polimerizat, te je kao samostalan rijetko upotrebljiv kao tehnički materijal. Polimerizat je u najčešćem slučaju samo osnovni sastojak polimernog materijala, te mu se dodaju razne niskomolekulne i visokomolekulne tvari s ciljem postizanja određenih svojstva. Općenito, polimeri se odlikuju niskom gustoćom, uz odgovarajuće dodatke postojanost prema atmosferskim utjecajima te postojanost na djelovanje agresivnih medija, dobro podnošenje naglih temperaturnih promjena i lako se oblikuju. Glavni nedostatak polimera je njihova ograničena toplinska postojanost. Također, njihova dobra toplinska izolacijska svojstva predstavljaju dodatni nedostatak u pogledu primjene polimera u solarnoj tehnici.

Na tržištu danas postoji veliki broj polimernih materijala koji se mogu grupirati na temelju njihovog ponašanja pri visokim temperaturama: plastomeri, duromeri i elastomeri. Plastomeri su taljivi i topljivi materijali linearnih i granatih makromolekula. Duromeri su za razliku od plastomera materijali koji su netaljivi, netopljivi i ne bubre te imaju guste prostorno umrežene makromolekule. Elastomeri imaju rahlo umrežene makromolekule, netaljivi su i netopljivi, ali bubre. Plastomeri su danas najraširenija skupina polimernih materijala od kojih su najzastupljeniji polietilen (PE) s 22,1 %, zatim slijede polipropilen (PP) s 15,4 % te poli(vinilklorid) (PVC) s oko 9,1 % [56]. Primjeri i karakteristične primjene plastomera, duromera i elastomera prikazani su u Tablica 2. Primjena plastomera je raznovrsna, od pakiranja (PE) preko izrade spremnika i cijevi za vodu (PE, PP, PVC), do izrade strojnih dijelova i kućišta (PS, PA). U pogledu solarne tehnike izdvajaju se PMMA i PC koji se zbog dobrih optičkih

svojstava i otpornosti na atmosferske uvjete nameću kao materijali prikladni za proizvodnju solarnog kolektora.

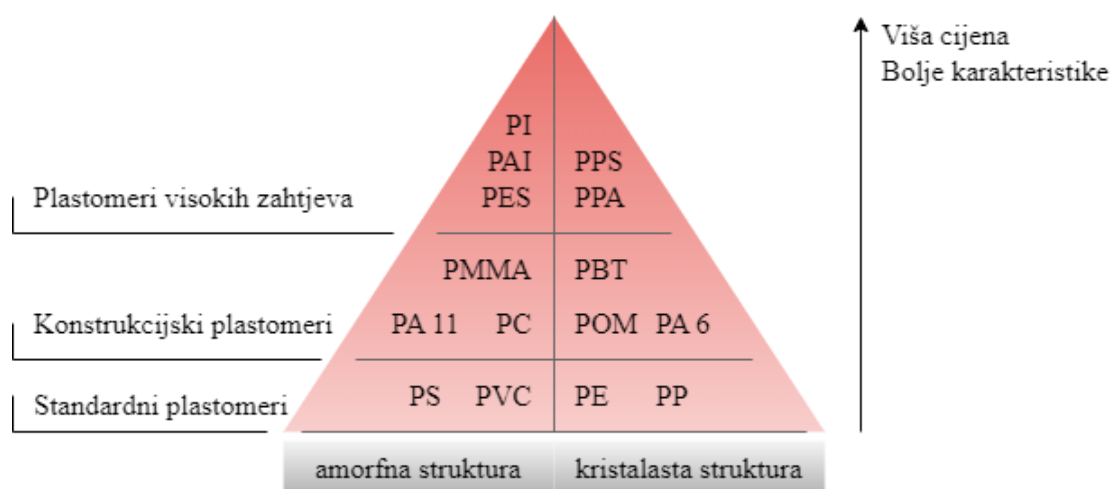
Tablica 2 Pregled polimernih materijala i njihova karakteristična primjena

Vrsta polimera / Naziv	Kratika	Karakteristična primjena
Plastomeri		
Polietilen niske gustoće	PE-LD	Pakiranja, vrećice, spremnici
Polietilen visoke gustoće	PE-HD	Spremnici za kemikalije, vodu, otpad
Polipropilen	PP	Spremnici, cijevi
Poli(vinil-klorid)	PVC	Cijevi za vodu, kanalizacijske cijevi, folije
Polistiren	PS	Spremnici, cijevi, kućišta
Poliamid	PA	Strojni dijelovi, medicinska oprema
Poli(metil-metakrilat)	PMMA	Prozirni konstrukcijski elementi i dijelovi, zamjena za staklo
Polikarbonat	PC	Zamjena za staklo, električni dijelovi, medicinska oprema
Duromeri		
Nezasićena poliesterna smola	UP	Konstrukcijski elementi, dijelovi karoserija automobila, korita čamca
Vinil-esterna smola	VE	Konstrukcijski elementi, dijelovi karoserija automobila, korita čamca
Epoksidna smola	EP	Cijevi, prototipovi proizvoda, površinski premaz
Poliuretan	PUR	Izolacijski elementi, dijelovi karoserija automobila
Elastomeri		
Prirodni kaučuk	NR	Elementi u proizvodnji raznih aparata
Butadeinski kaučuk	BR	Gume za vozila, potplati za cipele
Butilni kaučuk	IIR	Vanjski sloj na pneumaticima, brtve, prigušni elementi

Prilikom zagrijavanja kod plastomera dolazi do omekšavanja, a prilikom hlađenja se ponovno vraćaju u kruto stanje zadržavajući svojstva koja su imali prije zagrijavanja. Prema stupnju uređenosti strukture plastomeri mogu biti amorfni ili kristalasti te ovisno o temperaturi moguća su tri različita fizička stanja: staklasto ili čvrsto stanje, gumasto stanje i kapljasto stanje. Prijelazi među stanjima nisu tako jasno izraženi kao kod taljenja metala, a mogu se definirati određenim temperaturama. Prijelaz iz staklastog i gumasto stanje određeno je temperaturom ϑ_g (staklište). Kod amornih plastomera prijelaz iz gumastog u kapljasto stanje je definiran temperaturom ϑ_f (tecište), a kod kristalastih plastomera je određen temperaturom

T_m (talište). Maksimalna radna temperatura plastomera s amorfnom strukturom je niža od temperature staklišta, dok je kod plastomera s kristalastom strukturom maksimalna radna temperatura niža od temperature tališta. U grupu plastomera s amorfnom strukturom spadaju PVC, PS, PC i PMMA dok su plastomeri s kristalastom strukturom PP, PA i PE. Plastomeri s amorfnom strukturom se mogu proizvesti s visokim vrijednostima optičke propusnosti za sunčevo zračenje i upravo je ta skupina materijala interesantna za primjenu u solarnoj tehnici. S obzirom na maksimalnu radnu temperaturu i cijenu pojedine plastomere moguće je dalje kategorizirati kako je prikazano na Slika 9, dok su u

Tablica 3 prikazane vrijednosti temperatura staklišta za određene plastomere.



Slika 9 Podjela plastomera s obzirom na maksimalnu temperaturu i cijenu [57]

Tablica 3 Temperatura staklastog prijelaza pojedinih plastomera

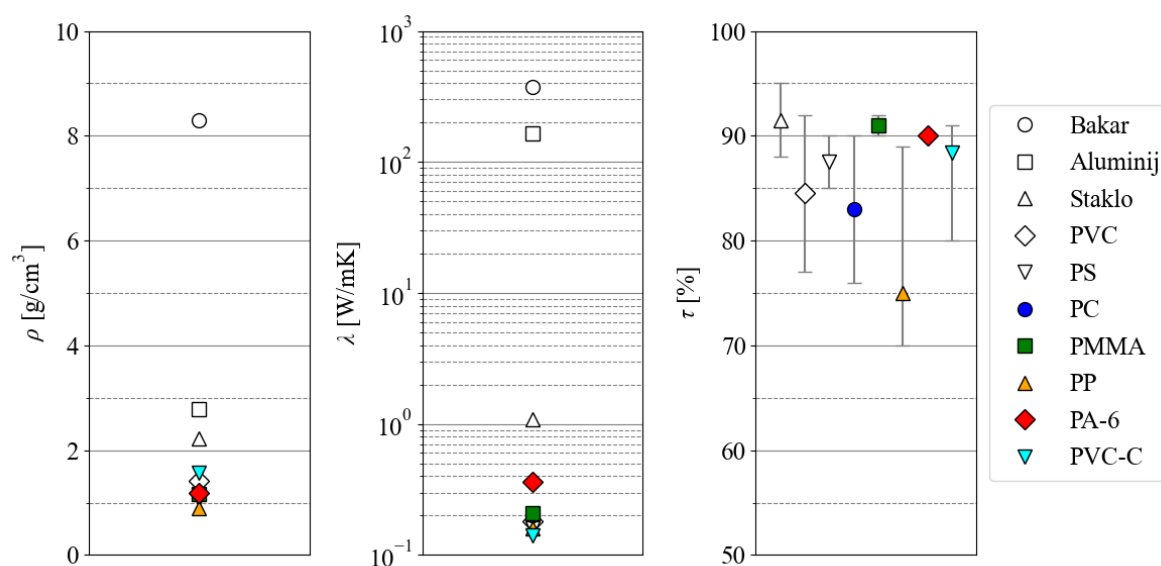
Plastomer	Kratica	Staklište [°C]	
		Izvor [58]	Izvor [57]
Poli(vinil-klorid)	PVC	85, 87	70
Polistiren	PS	106, 121	95
Poli(metil-metakrilat)	PMMA	113, 105	105
Polikarbonat	PC	138, 163	150
Poli(fenilen-oksidi)	PPO	239, 244	190
Poli(eter-sulfon)	PES	175, 225	230
Poli(eter-imid)	PEI	212, 240	220
Poli(amid-imid)	PAI	276	-

Temperatura staklišta plastomera za široku potrošnju, odnosno standardnih polimera je najmanja te ovisno o literaturi za PVC ona iznosi 70 °C ili 85 °C dok je nešto viša za PS, 95 °C. Konstrukcijski polimeri nude bolja svojstva važna za konstrukcijsku primjenu, ali uz višu cijenu. U toj grupi se nalaze PMMA ($T_g = 105$ °C), PC ($T_g = 150$ °C) i PPO ($T_g = 190$ °C i 239 °C). U tom kontekstu važno je osigurati da temperature kojima je polimerni kolektor izložen ne prelaze temperaturu staklišta korištenog materijala, kako bi se izbjegla degradacija materijala i osigurala dugoročna stabilnost kolektora. Za primjene s najstrožim zahtjevima dostupni su plastomeri visokih zahtjeva poput PES, PEI i PAI koji imaju vrlo visoke vrijednosti temperature staklišta ($T_g > 200$ °C). Osim temperature staklišta, bitno je razmotriti i optička i mehanička svojstva pojedinog plastomera kao i njihovu cijenu prilikom odabira prikladnog materijala za izradu solarnog kolektora. Iz tog razloga, u nastavku ovog rada će se više pažnje posvetiti plastomerima u kategorijama standardnih i konstrukcijskih plastomera, koji se zbog svojih određenih prednosti, ali i cijene, nameću kao pogodnija skupina polimernih materijala za primjenu u solarnoj tehnici.

2.2. Primjena polimernih materijala u solarnoj tehnici

Polimerni materijali predstavljaju potencijalnu alternativu tradicionalno korištenim materijalima u proizvodnji solarnih kolektora kao što su bakar, aluminij i staklo. Pločasti solarni kolektori sastoje se od pokrova, apsorbera, cijevnog registra, kućišta i izolacije. Poželjna svojstva polimernih materijala prikladnih za izradu pojedinih komponenti solarnog kolektora uključuju visoke vrijednosti faktora propusnosti i indeksa loma, niski emisijski faktor, otpornost na ultraljubičasto (UV) zračenje, postojanost u kontaktu s radnim medijem te postojanost u rasponu temperatura od 10 do 150 °C [59,60]. Na Slika 10 prikazana je usporedba određenih termodinamičkih i optičkih svojstva. Gustoća polimernih materijala je manja u odnosu na bakar, aluminij ili staklo te ovisno o tipu plastomera ona se kreće u rasponu vrijednosti 0,85 – 0,92 g/cm³ za PP, pa do 1,37 – 1,44 g/cm³ za PVC. Gustoća polikarbonata se kreće od 1,14 do 1,22 g/cm³ i u slučaju zamjene pokrovnog stakla debljine 4 mm PC pločom iste debljine moguće je smanjiti masu kolektora ~22 % [53]. Ako se uz pokrov, polimernim materijalom zamijeni i ploča apsorbera, moguće je smanjiti težinu kolektora za ~57 %. Dodatna prednost polimernih materijala u odnosu na staklo je da su manje krhki što olakšava i pojeftinjuje transport i montažu. Pokrov kolektora mora izdržati povišene temperature od 50 °C do 90 °C i sunčevo UV zračenje, uz zadržavanje

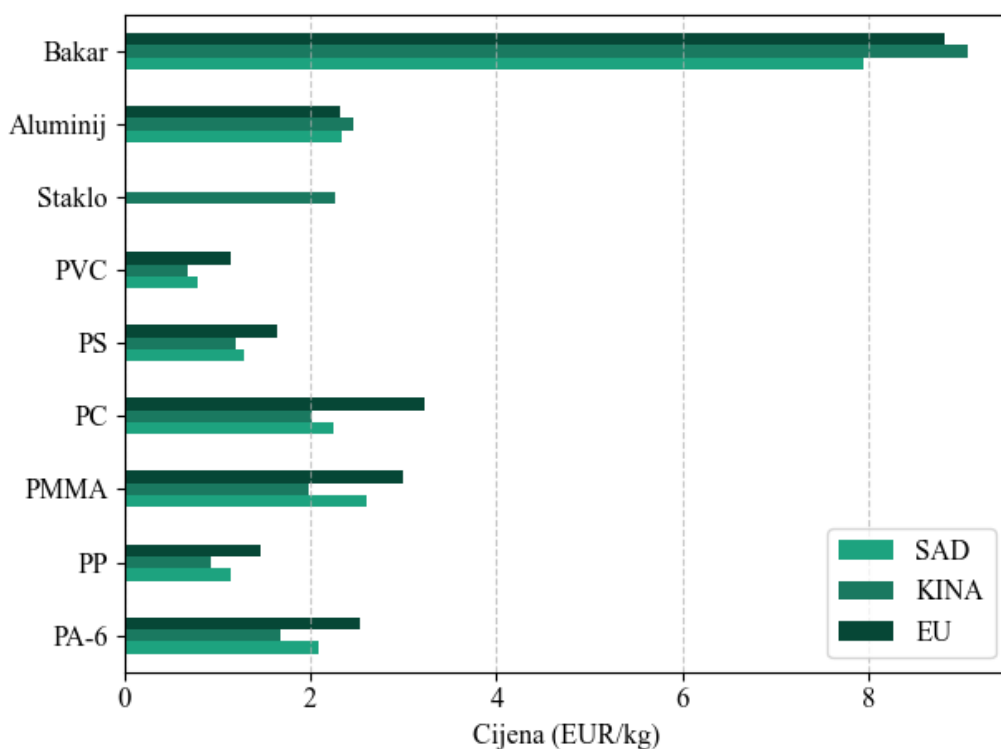
zadovoljavajućih mehaničkih i optičkih karakteristika tijekom razdoblja od 10 – 20 godina [61]. Na Slika 10 prikazane su vrijednosti faktora propusnosti za staklo i različite polimerne materijale te je vidljivo da na tržištu postoje polimerni materijali (PMMA, PC, PVC, PS) koji mogu zadovoljiti zahtjeve u pogledu faktora propusnosti sunčevog zračenja u vidljivom spektru. Faktor propusnosti uvelike ovisi o debljini materijala kroz koji sunčevo zračenje prolazi. Uobičajene debljine pokrovnog stakla su ~ 3 mm pri čemu solarno staklo ima propusnost za sunčevo zračenje > 90 %. Ovisno o debljini, većina polimernih većina komercijalno dostupnih polimernih materijala imaju relativno visoke vrijednosti faktora propusnosti, > 85 %. Osim faktora propusnosti bitna je postojanost na UV zračenje, pogotovo prilikom dugotrajnog izlaganja materijala sunčevom zračenju. Od prikazanih polimernih materijala konstrukcijski plastomer PMMA ima najbolju postojanost na UV zračenje dok su ostali plastomeri, PC, PVC, PS, PP, PA postojani uz određene dodatke ili premaze. Izvedba pokrova od polimernog materijala može biti u standardnoj izvedbi kao jednostruka ploča od PC [50,54] ili kao višeslojna (sačasta) PC ploča [53]. Utjecaj zamjene jednostruke ploče višeslojnom na toplinske karakteristike polimernog solarnog kolektora istražen je putem numeričkih simulacija u nastavku ovog rada.



Slika 10 Usporedba gustoće, toplinske provodnosti i faktora propusnosti različitih materijala [53,58,62–64]

Degradacija i deformacije polimernih materijala koje se javljaju pri nižim vrijednostima temperatura predstavljaju prepreku korištenju polimernih materijala za izradu toplinski najopterećenijeg dijela kolektora, apsorbera. Osim toga važna je i kemijska postojanost, jer je dio apsorbera (cijevi/kanali) izložen radnom mediju, vodi ili mješavini vode i glikola. Razni konstrukcijski plastomeri [65,66] i plastomeri široke potrošnje [67] razmatrani kao potencijalni materijal za izradu apsorbera ispitani su u pogonskim uvjetima (voda temperature 80 °C, do 16 000 h) i stagnacijskom režimu rada (zrak temperature 140 °C, do 500 h) s ciljem određivanja stupnja degradacije. Rezultati su pokazali da konstrukcijski plastomeri s amorfnom strukturom, PC i mješavina poli(fenilen-eter) (PPE) i PS imaju izraženiju degradaciju kada su izloženi zraku, dok izlaganje vodi više utječe na konstrukcijske plastomere s kristalastom strukturom, PA12 i njegove modifikacije. Od plastomera široke potrošnje testirani su umreženi polietilen PE-X i PP. Rezultati su pokazali da je moguće koristiti PE-X i PP s određenim modifikacijama kao materijal za izradu apsorbera. Autori navode da se svi ispitani materijali mogu upotrijebiti za proizvodnju apsorbera u ostakljenim kolektorima ako će se takvi kolektori koristiti u sjevernijim klimama uz određene mjere za zaštitu od pregrijavanja. Tu se svakako može govoriti i o pravilnom projektiranju sustava kao jednom od metoda kojom se sprječavaju velika toplinska opterećenja na pojedine komponente solarnog kolektora, odnosno da se osiguraju temperature u kolektoru koju se niže od temperature staklišta korištenog materijala. Uz ograničenu toplinsku postojanost na višim temperaturama, veliki problem predstavlja i niža toplinska provodnost polimernih materijala u odnosu na npr. bakar ili aluminij (Slika 10). Utjecaj promjene toplinske provodnosti na toplinske karakteristike detaljnije je opisan u Poglavlju 3.5.4. Problem niže toplinske provodnosti se može kompenzirati na način da se osigura što veća kontaktna površina između radnog medija i apsorbera [44–46]. Osim kao materijal pokrova, saćaste PC ploče [50,53,54] i PPO ploče [68] se mogu koristiti za izradu apsorbera. Kako je prije spomenuto, materijali poput PC, PMMA i PPO spadaju u kategoriju konstrukcijskih plastomera, koji nude bolja svojstva, ali uz višu cijenu. Kada se razmatra zamjena konvencionalnih materijala polimernim, moraju se uzeti u obzir ne samo ekonomske, već i tehničke karakteristike materijala. Slika 11 prikazuje usporedbu tržišnih cijena materijala koji se koriste u proizvodnji solarnih kolektora (bakar, aluminij i solarno staklo) i alternativnih polimernih materijala. Visoka cijena bakra, od ~8 EUR/kg, ukazuje na potrebu za istraživanjem moguće primjene polimernih materijala u solarnoj tehnici. Cijena PMMA se u ožujku 2024., ovisno o

regiji, kretala u rasponu od 1,98 do 2,99 EUR/kg, slično kao i cijena PC koja se kretala između 2,01 – 3,22 EUR/kg. Isto tako, treba napomenuti da je cijena aluminija relativno slična cijeni spomenutih konstrukcijskih plastomera (2,33 – 2,46 EUR/kg). Uzimajući u obzir lošija svojstva koja nude u odnosu na aluminij, to dovodi u pitanje ekonomsku smislenost korištenja konstrukcijskih plastomera za izradu polimernog solarnog kolektora. Iz tog se razloga polimeri široke potrošnje, prije svega PVC nameće kao ekonomski smisljeno rješenje (0,68 – 1,15 EUR/kg). Ovdje treba napomenuti da su cijene prikazane ovdje dane radi međusobne usporedbe materijala.



Slika 11 Usporedba cijena različitih materijala, ožujak 2024. [69]

PVC je treći najkorišteniji polimerni materijal koji ima široko područje primjene, od onih dugoročnih u građevinskoj industriji do kratkoročnih za izradu folija za pakiranje hrane.

Prema svojstvima i području primjene PVC se može podijeliti u dvije osnovne kategorije, meki (*flexible*) PVC i tvrdi (*rigid*) PVC. Općenito, PVC je otporan koroziju i teško zapaljiv, te se često koristi kao materijal za izradu kanalizacijskih cijevi i cijevi za hladnu vodu. S druge strane, slabo je toplinski postojan s relativno niskom temperaturom staklišta, $\vartheta_g = 70 - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, što ga čini neprikladnim za primjenu u solarnim toplovodnim sustavima za grijanje i pripremu

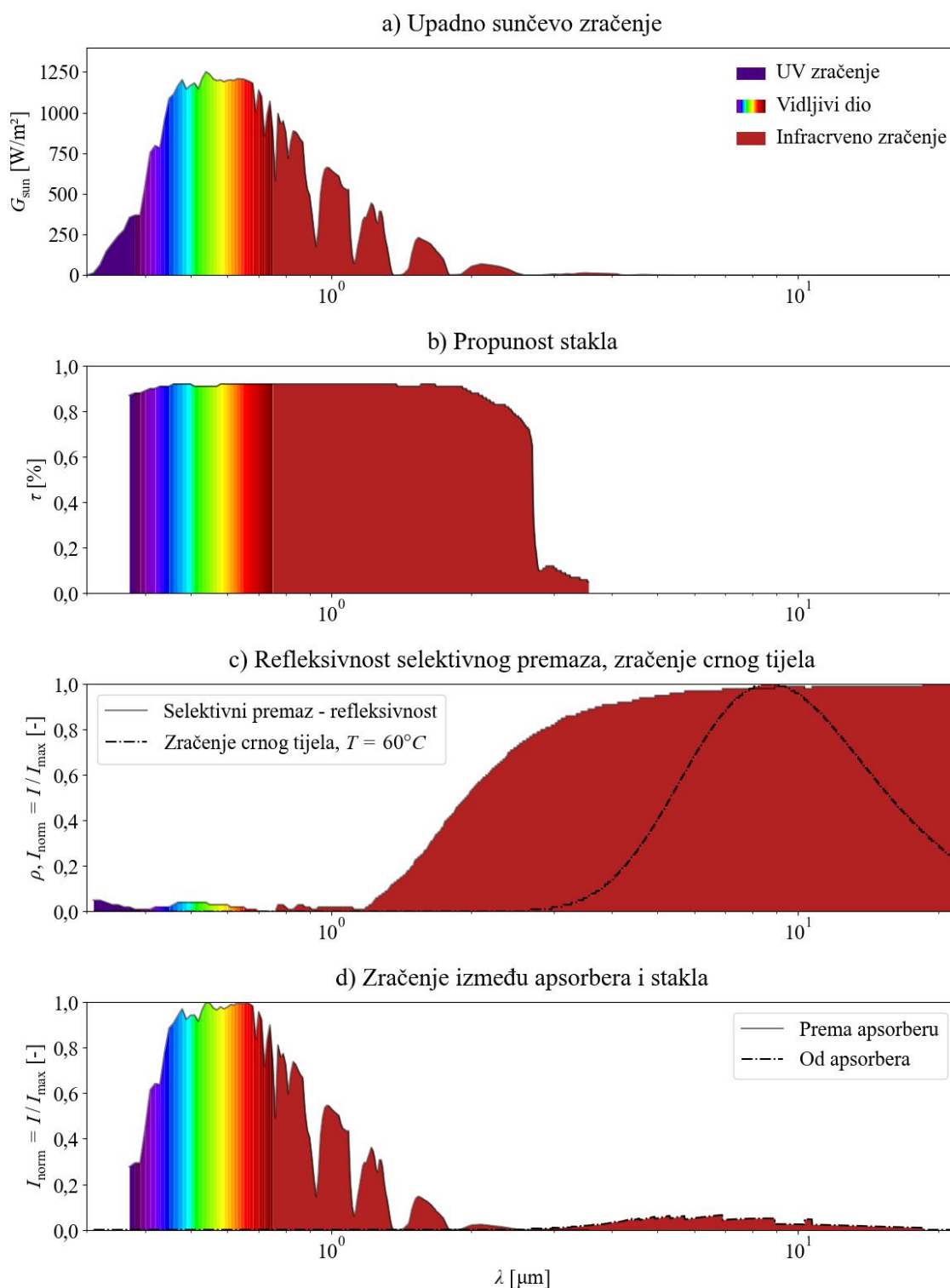
PTV. U pogledu optičkih svojstava, postiže slične vrijednosti faktora propusnosti kao i staklo, ali otpornost na UV zračenje se postiže korištenjem određenih dodataka ili premaza. Za primjenu na višim temperaturama može se koristiti klorirani poli(vinil-klorid) (PVC-C). PVC-C se dobiva postupkom kloriranja smole PVC-a. Povećanjem udjela klora povećava se i temperatura staklišta s $\vartheta_g = 70 - 85$ °C za PVC (

Tablica 3) , na $\vartheta_g = 115 - 135$ °C za PVC-C. Osim više temperature staklišta, PVC-C se ističe poboljšanom kemijskom postojanošću u smislu otpornosti na hidrolizu (za razliku od npr. PC) pri povišenim temperaturama koje se očekuju u radu kolektora. PVC-C ima veću čvrstoću i otpornost na udarce, u odnosu na PVC što dodatno proširuje njegovu primjenu i čini ga prikladnim za izradu solarnih kolektora. Gustoća PVC-C-a je $1,56 \text{ g/cm}^3$, što je malo više u odnosu na osnovni materijal, dok toplinska provodnost iznosi $0,14 - 0,16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [70]. Cijena PVC-C je nešto viša u odnosu na PVC, ali je i dalje niža od cijene aluminijskog i bakra. Isto tako, PVC-C je lako dobavljan u većim količinama potrebnih za izradu prototipa i kasnije serijsku proizvodnju kolektora. Optička svojstva su slična kao i kod osnovnog materijala (PVC), a UV stabilnost se može poboljšati uz pomoć aditiva koji se dodaju u procesu proizvodnje. Zbog navedenih prednosti PVC-C-a u odnosu na ostale polimerne materijale, PVC-C je odabrani materijal za izradu prototipa polimernog solarnog kolektora.

2.3. Izmjena topline u solarnom kolektoru

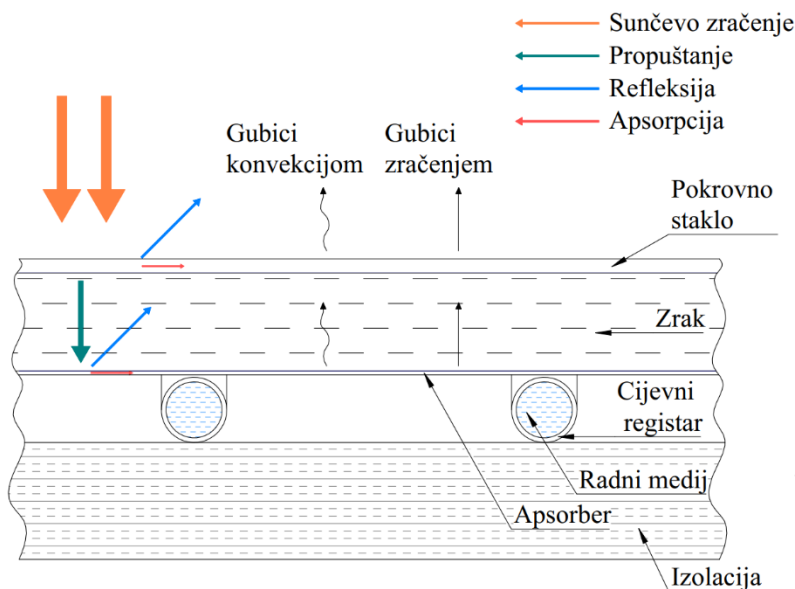
Većina sunčevog zračenja prenosi se u vidljivom (VIS) (48 % pri valnim duljinama $\lambda = 0,38 - 0,78 \text{ }\mu\text{m}$) i kratkovalnom infracrvenom (NIR) dijelu elektromagnetskog spektra (42,4 % pri valnim duljinama $\lambda = 0,78 - 2,5 \text{ }\mu\text{m}$), dok se manji dio energije prenosi u UV (6,4 % pri valnim duljinama $\lambda < 0,38 \text{ }\mu\text{m}$) i srednjevalnom infracrvenom (MIR) (3,2 % pri valnim duljinama $\lambda = 2,5 - 8 \text{ }\mu\text{m}$) području (Slika 12 a)). U dugovalnom području ($\lambda > 8 \text{ }\mu\text{m}$) se odzrači ~50 % ukupnog zračenja na 60 °C (Slika 12 c)) što je još i više pri nižim radnim temperaturama apsorbera koje su prisutne veći dio godine. Sunčevo zračenje koje dolazi na površinu pokrovnog stakla faktora propusnosti τ većim dijelom prolazi kroz staklo prema ploči apsorbera dok se manji dio reflektira i apsorbira u samom staklu (Slika 12 b)). Za tipične vrijednosti faktora propusnosti pokrovnog stakla $\tau = 88 - 95$ % gubitci uslijed refleksije i apsorpcije iznose od 5 – 12 %. Dio sunčevog zračenja koje je prošlo kroz staklo dolazi do površine apsorbera na koju je nanesen selektivni premaz koji se odlikuje visokim faktorom apsorpcije u vidljivom dijelu spektra (Slika 12 c) i d)). S druge strane, takvi premazi

imaju niske vrijednosti faktora apsorpcije (samim time i emisijskog faktora) u dugovalnom infracrvenom području čime se smanjuju gubici zračenjem s površine apsorbera.



Slika 12 Spektralna analiza sunčevog zračenja i optičkih karakteristika stakla i premaza apsorbera [71,72]

Kada je solarni kolektor izložen sunčevom zračenju dolazi do apsorpcije sunčevog zračenja i zagrijavanja ploče apsorblera te se toplina prenosi prvo provođenjem kroz materijal apsorblera i cijevi, a onda konvekcijom sa stijenke cijevi na radni fluid (Slika 13).



Slika 13 Shematski prikaz izmjene topline u pločastom solarnom kolektoru

U normalnim radnim uvjetima, temperatura ploče apsorblera obično je viša od temperature okoline, što rezultira toplinskim gubitcima prema okolini. Dio apsorbirane energije prenosi se kroz pokrovno staklo, dok se manji dio gubi kroz izolaciju na stražnjoj i bočnim stranama kolektora. Za određivanje korisnog toplinskog toka koji se prenosi na radni fluid, potrebno je kvantificirati različite toplinske gubitke. Toplota se s ploče apsorblera prenosi na zrak koji se nalazi između apsorblera i stakla putem slobodne konvekcije. Zrak dalje izmjenjuje toplinu s unutarnjom stranom stakla istovjetnim mehanizmom. Prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, intenzitet zračenja idealnog crnog tijela površine A proporcionalan je četvrtoj potenciji njegove apsolutne temperature T . Za crno tijelo temperature $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ maksimum emitiranog zračenja je pri valnoj duljini $\sim 8,7\text{ }\mu\text{m}$, odnosno u dugovalnom infracrvenom dijelu spektra (Slika 12 c)). Isto tako, veliki dio zračenja se emitira i u dugovalnom području pri valnim duljinama $\lambda > 8\text{ }\mu\text{m}$. Primjenom selektivnog premaza, koji u području valnih duljina koje odgovaraju srednjevalnom i dugovalnom infracrvenom zračenju, imaju niže vrijednosti emisijskog faktora čime su smanjeni toplinski gubici zračenjem s ploče apsorblera. Dio zračenja koje se emitira s površine apsorblera dolazi do stakla koje je nepropusno za

infracrveno dugovalno zračenje te dolazi do apsorpcije istog, što uz apsorpciju kratkovalnog sunčevog zračenja uzrokuje porast temperature stakla. Toplina se zatim provodi do vanjske površine stakla gdje se izmjenjuje s okolinom putem konvekcije i zračenjem.

S obzirom na ograničena financijska sredstva u okviru projekta u kojem je rađeno ovo istraživanje, mogućnosti su bile reducirane na izradu maksimalno dva alata za ekstruziju prototipa polimernog solarnog kolektora. To je zahtijevalo provedbu preliminarnih numeričkih simulacija predloženih konstrukcijskih rješenja prikladnih za proizvodnju prototipa solarnog kolektora. Numeričke simulacije su iz tog razloga prvo provedene na klasičnom pločastom solarnom kolektoru, a njihova točnost potvrđena je usporedbom s analitičkim proračunom i rezultatima mjerenja dostupnim u literaturi. U nastavku ovog poglavlja prikazat će se analitički proračun pločastog solarnog kolektora, koji će poslužiti za verifikaciju modela izmjene topline u preliminarnim numeričkim simulacijama.

2.3.1. Određivanje toplinski gubitaka solarnog kolektora

Za potrebe izračuna toplinske učinkovitosti potrebno je prvo odrediti sve pojedinačne toplinske gubitke koji se potom oduzimaju od ukupnog apsorbiranog sunčevog zračenja kako bi se dobio koristan toplinski tok koji se prenosi na radni fluid. Toplinski gubici od apsorbera prema okolišu preko pokrova kolektora su prikazani shematski na Slika 14. Ukupni otpor izmjeni topline od apsorbera na okolinu preko vrha kolektora može se pisati kao:

$$r_t = \frac{1}{U_t} = \left(\frac{1}{r_{\text{konv,aps-st}}} + \frac{1}{r_{\text{zr,aps-st}}} \right)^{-1} + r_{\text{kond}} + \left(\frac{1}{r_{\text{konv,st-ok}}} + \frac{1}{r_{\text{zr,st-ok}}} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

gdje su:

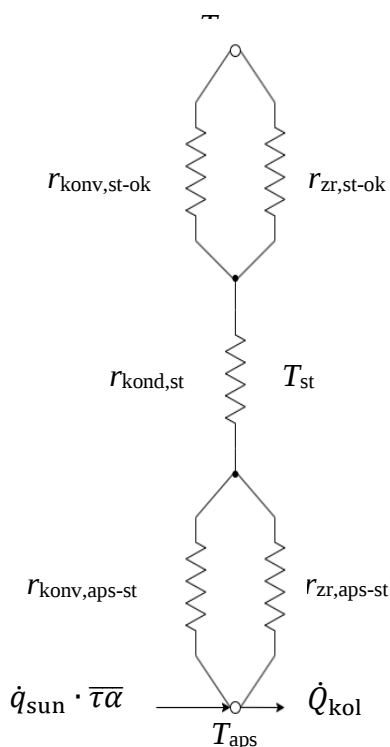
$r_{\text{konv,aps-st}}$ – otpor izmjeni topline uslijed slobodne konvekcije u zatvorenom prostoru između apsorbera i pokrovnog stakla, [(m²K)/W],

$r_{\text{zr,aps-st}}$ – otpor izmjeni topline zračenjem između apsorbera i pokrovnog stakla, [(m²K)/W],

r_{kond} – otpor izmjeni topline provođenjem kroz pokrovno staklo, [(m²K)/W],

$r_{\text{konv,st-ok}}$ – otpor izmjeni topline uslijed slobodne ili prisilne konvekcije između pokrovnog stakla i okolišnog zraka, [(m²K)/W],

$r_{\text{zr,st-ok}}$ – otpor izmjeni topline zračenjem između pokrovnog stakla i okoline, [(m²K)/W].



Slika 14 Shematski prikaz otpora izmjeni topline u pločastom solarnom kolektoru

1. *Određivanje otpora izmjeni topline uslijed slobodne konvekcije u zatvorenom prostoru između apsorbera i pokrovnog stakla*

Za određivanje koeficijenta prijelaza topline u zatvorenom prostoru između ploče apsorbera i stakla potrebno je odrediti Nusseltov broj za što je moguće koristiti dostupne izraze u literaturi [73]:

$$Nu = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\gamma} \right]^+ \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin(1,8 \cdot \gamma))^{1,6}}{Ra \cdot \cos\gamma} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos\gamma}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad (2.2)$$

gdje su:

Ra – Rayleighov broj, [-],

γ – kut nagiba solarnog kolektora u odnosu na horizontalu, [°].

Rayleighov broj se određuje koristeći izraz:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (\vartheta_{\text{aps}} - \vartheta_{\text{st}}) \cdot h^3}{\nu \cdot \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}} \quad (2.3)$$

gdje su:

ϑ_{aps} – prosječna temperatura ploče apsorbera, [°C],

ϑ_{st} – prosječna temperatura pokrovnog stakla, [°C],

g – gravitacijska konstanta, [$\sim 9,81 \text{ m/s}^2$],

β – volumetrički koeficijent ekspanzije koji se za idealne plinove (uključujući i zrak) računa kao $\beta = \frac{1}{T}$, [1/K],

ν, λ, ρ, c_p – fizikalna svojstva zraka, sva fizikalna svojstva zraka (uključujući i β) su očitana za srednju temperaturu između temperature apsorbera i stakla,

h – karakteristična duljina za promatrani slučaj, [m], u ovom slučaju karakteristična duljina je razmak između ploče apsorbera i pokrovnog stakla.

Nakon što su izračunati Ra broj, a zatim i Nu broj koeficijent prijelaza topline za slučaj slobodne konvekcije u zatvorenom prostoru određuje se uz pomoć izraza:

$$\alpha_{\text{konv,aps-st}} = \frac{1}{r_{\text{konv,aps-st}}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{h} \quad (2.4)$$

2. Određivanje otpora izmjeni topline zračenjem između apsorbera i pokrovnog stakla

Toplinski tok koji se prenosi zračenjem između dvije površine može se općenito zapisati kao:

$$\dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2 = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 e_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2.5)$$

gdje su:

T – termodinamička temperatura, [K],

σ – Stean-Boltzmannova konstanta, [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$],

ε – emisijski faktor promatranih površina u infracrvenom srednjevalnom području, [-],

e_{12} – vidni faktor, [-].

Poseban oblik ove jednadžbe uključuje model bliskih stijenki za koji vrijedi da su promatrane površine jednake, te za koje je vidni faktor $e_{12} = 1$. Jed. (2.5) se tada može preformulirati kao:

$$\dot{q}_{\text{zr,aps-st}} = \frac{\sigma \cdot (T_{\text{aps}}^4 - T_{\text{st}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{st}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{aps}}} - 1} \quad (2.6)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem i time pripadajućeg otpora može se odredit svođenjem dobivenog toplinskog toka na odgovarajuću temperaturnu razliku:

$$\alpha_{\text{zr,aps-st}} = \frac{1}{r_{\text{zr,aps-st}}} = \frac{q_{\text{zr,aps-st}}}{T_{\text{aps}} - T_{\text{st}}} \quad (2.7)$$

3. *Određivanje otpora izmjeni topline uslijed slobodne ili prisilne konvekcije između pokrovnog stakla i okolišnog zraka*

Izmjena topline uslijed strujanja zraka preko gornje površine može značajno utjecati na toplinsku učinkovitost solarnog kolektora. Konvekcija preko nagnute ravne plohe može biti slobodna ili prisilna. Koeficijent prijelaza topline uslijed prisilne konvekcije u ovisnosti o brzini vjetra w_{vjetar} može se izračunati koristeći izraz prema [71]:

$$\alpha_{\text{vjetar}} = 2,8 + 3 \cdot w_{\text{vjetar}} \quad (2.8)$$

Slobodnu konvekciju s nagnute plohe moguće je opisati jednadžbama dostupnim u [73]:

$$Nu = \left\{ 0,68 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.9)$$

$$\alpha_{\text{sl.konv}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_0} \quad (2.10)$$

gdje su:

Pr – Prandtlov broj, [-],

l_0 – karakteristična duljina, omjer površine i opsega promatrane plohe, $l_0 = \frac{A}{\phi}$, [m].

Ra broj se određuje koristeći Jed. (2.3) za temperaturu zraka koja je srednja vrijednosti između temperature stakla i temperature okolišnog zraka. Također, za tako određenu srednju temperaturu zraka potrebno je očitati sva fizikalna svojstva. Ukupni koeficijent prijelaza topline koji uzima u obzir slobodnu i prisilnu konvekciju je:

$$\alpha_{\text{konv,st-ok}} = \frac{1}{r_{\text{konv,st-ok}}} = \sqrt[3]{\alpha_{\text{sl.konv}}^3 + \alpha_{\text{vjetar}}^3} \quad (2.11)$$

4. *Određivanje otpora izmjeni topline zračenjem između pokrovnog stakla i okoliša*

Izmjena topline zračenjem između stakla i okoliša, odnosno nebeskog svoda može se izračunati korištenjem modela obuhvaćenog tijela za koji vrijedi da omjer površina A_1 / A_2 teži nuli, a vidni faktor $e_{12} = 1$. U tom slučaju jednačba (2.5) se transformira u oblik:

$$\dot{q}_{\text{zr,st-ok}} = \varepsilon_{\text{st}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{st}}^4 - T_{\text{neba}}^4) \quad (2.12)$$

gdje je T_{neba} – efektivna temperatura neba, [K].

Otpora izmjeni topline zračenjem može se odredit svođenjem dobivenog toplinskog toka na odgovarajuću temperaturnu razliku:

$$\alpha_{\text{zr,st-ok}} = \frac{1}{r_{\text{zr,st-ok}}} = \frac{\dot{q}_{\text{zr,st-okt}}}{T_{\text{st}} - T_{\text{ok}}} \quad (2.13)$$

Efektivna temperatura neba uzima u obzir nejednoliku raspodjelu temperature, činjenicu da atmosfera emitiran najveći dio zračenja u području valnih duljina 8 – 14 μm , te dodatno ovisi o lokaciji, nadmorskoj visini te mikroklimatskim uvjetima (temperatura okoline, vlažnost), količina naoblake. U literaturi postoji veliki broj izraza koji se mogu koristiti za određivanje efektivne temperature neba [74]. U ovom radu se za proračun toplinskih gubitaka zračenjem efektivna temperatura neba uzima kao:

$$T_{\text{neba}} = 0,0552 \cdot T_{\text{ok}}^{1,5} \quad (2.14)$$

5. *Određivanje otpora izmjeni topline provođenjem kroz pokrovno staklo*

Otpor izmjeni topline provođenjem kroz staklo može predstavljati omjer debljine i toplinske provodnosti pokrovnog stakla:

$$r_{\text{kond}} = \frac{s_{\text{st}}}{\lambda_{\text{st}}} \quad (2.15)$$

Osim gubitka topline s apsorbera na okoliš preko vrha kolektora javljaju se i toplinski gubici s donje strane kolektora kao i s bočnih površina. Toplinski gubici s donje strane kolektora smanjuju se korištenjem izolacije te se zbog velikog toplinskog otpora izolacije zanemaruju toplinski otpori konvekciji i zračenju. Koeficijent prolaza topline s apsorbera na okoliš s donje strane kolektora se određuje kao omjer toplinske provodnosti i debljine izolacije:

$$U_b = \frac{\lambda_{\text{izo}}}{s_{\text{izo}}} \quad (2.16)$$

Gubitci topline s bočnih površina imaju relativno mali udio u ukupnim toplinskim gubitcima. Ti toplinski gubitci se procjenjuju kao jednodimenzijski prolaz topline s bočnih površina sveden na površinu kolektora:

$$U_e = \frac{\lambda_{izo}}{\delta_e} \cdot \frac{A_e}{A_{aps}} \quad (2.17)$$

Ukupni koeficijent prolaska topline sa svih površina kolektora je tada:

$$U_{uk} = U_t + U_b + U_e \quad (2.18)$$

Proračun određivanja toplinskih gubitaka je iterativan zbog ovisnosti koeficijenta prijelaza topline o temperaturama ploče apsorbera i pokrovnog stakla. U nastavku su dani izrazi kojima je moguće odrediti korisni toplinski tok i temperature pojedinih dijelova kolektora.

2.3.2. Analitički pristup određivanju toplinske učinkovitosti

U stacionarnim uvjetima korisni toplinski tok moguće je odrediti koristeći izraz:

$$\dot{Q}_{kol} = A_{aps} \cdot [\dot{q}_{aps} - U_{uk} \cdot (\vartheta_{aps} - \vartheta_{ok})] \quad (2.19)$$

gdje su:

$\dot{Q}_{kol}$ – korisni toplinski tok, [W],

$\dot{q}_{aps}$ – apsorbirani sunčevo zračenje, [W/m²],

U_{uk} – ukupni koeficijent prolaska topline s ploče apsorbera prema okolišu, [W/(m²·K)],

A_{aps} – površina ploče apsorbera, [m²].

Problem koji se javlja pri korištenju jednadžbe (2.19) je taj što je prosječnu temperaturu ploče apsorbera teško izračunati ili izmjeriti s obzirom na to da je ona funkcija upadnog sunčevog zračenja i ulazne temperature radnog medija. Iz tog razloga je potrebno preoblikovati taj izraz kako bi se korisni toplinski tok mogao izraziti preko ulazne temperature radnog medija. Apsorber se može podijeliti na jednake dijelove tako da svaki dio čini rebra oko pojedine cijevi. Cijevi solarnog kolektora ponašaju se poput toplinskog ponora na ploči apsorbera. Rješavanjem diferencijalne jednadžbe izmjene topline na jednom segmentu rebra moguće je odrediti temperaturnu raspodjelu samog rebra. Na taj način je moguće dobiti izraze za korisni toplinski tok koji ne ovise o prosječnoj temperaturi ploče apsorbera [71]. Korisni toplinski tok se može onda pisati kao:

$$\dot{Q}_{kol} = [(W - d_v) \cdot F + d_v] \cdot [\dot{q}_{aps} - U_{uk} \cdot (\vartheta_b - \vartheta_{ok})] \cdot L \quad (2.20)$$

gdje su:

W – širina segmenta rebra, [m],

d_v – vanjski promjer cijevi, [m],

L – duljina kolektora, [m],

F – faktor učinkovitosti rebra, [-],

ϑ_b – temperatura spoja između apsorbera i cijevi, [°C].

Faktor učinkovitosti rebra se definira kao:

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{m(W - d_v)}{2} \right]}{\frac{m(W - d_v)}{2}} \quad (2.21)$$

gdje je m – faktor rebra, $m = \sqrt{\frac{U_{uk}}{\lambda_{aps} \cdot s_{aps}}}$, [1/m].

Isti toplinski tok mora biti predan fluidu te onda vrijedi:

$$\dot{Q}_{kol} = \frac{\vartheta_b - \vartheta_f}{\frac{1}{\alpha_f \cdot \pi \cdot d_u \cdot L} + \frac{1}{C_b \cdot L}} \quad (2.22)$$

gdje su:

ϑ_f – temperatura vode, [°C],

α_f – koeficijent prijelaza topline s cijevi na radni fluid, [W/(m²·K)],

d_u – unutarnji promjer cijevi, [m],

C_b – koeficijent toplinske provodnosti zavora, [W/(m·K)].

Kombinirajući jednadžbe (2.20) i (2.22) moguće eliminirati temperaturu spoja T_b i toplinski tok izraziti preko temperature fluida kao:

$$\dot{Q}_{kol} = W \cdot F' \cdot [\dot{q}_{aps} - U_{uk} \cdot (\vartheta_f - \vartheta_{ok})] \quad (2.23)$$

gdje je F' faktor učinkovitosti kolektora i računa se koristeći jednadžbu (2.24). Faktor učinkovitosti kolektora dakle predstavlja omjer između stvarno predane topline radnom mediju unutar cijevi i topline koja bi se predala kada bi temperatura površine apsorbera bila jednaka temperaturi fluida.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{uk}}}{W \cdot \left[\frac{1}{U_{uk} \cdot [d_v + (W - d_v) \cdot F]} + \frac{1}{C_b \cdot L} + \frac{1}{\alpha_f \cdot \pi \cdot d_u \cdot L} \right]} \quad (2.24)$$

U gornjim jednadžbama uzeta je pretpostavka da je temperatura fluida konstanta u smjeru strujanja radnog medija kroz kolektor. Kako bi se uzela u obzir promjenjivost temperature radnog medija prilikom strujanja kroz cijevi kolektora korisni toplinski tok je moguće prikazati preko kao:

$$\dot{Q}_{kol} = A_{aps} \cdot F_R \cdot [\dot{q}_{aps} - U_{uk} \cdot (\vartheta_{f,ul} - \vartheta_{ok})] \quad (2.25)$$

gdje su:

$\vartheta_{f,ul}$ – ulazna temperatura radnog medija, [°C],

F_R – faktora odvođenja topline, [-].

Faktor odvođenja topline uzima u obzir promjenjivost temperature radnog fluida u smjeru strujanja i računa se uz pomoć Jed. (2.26). Faktor odvođenja topline, slično kao i F' predstavlja omjer između stvarnog toplinskog toka prema radnom mediju i maksimalno mogućeg toplinskog toka. Najveći toplinski tok javio bi se u slučaju da kada bi temperatura površine apsorbera bila jednaka ulaznoj temperaturi fluida.

$$F_R = \frac{\dot{m}_{kol} \cdot c_p}{A_{aps} \cdot U_{uk}} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_{aps} \cdot U_{uk} \cdot F'}{\dot{m}_{kol} \cdot c_p} \right) \right] \quad (2.26)$$

gdje su:

$\dot{m}_{kol}$ – maseni protok kroz kolektor, [kg/s],

c_p – specifični toplinski kapacitet za radni fluid, [J/(kgK)].

Na kraju moguće je definirati izraze s pomoću kojih se mogu odrediti srednje temperature vode i ploče apsorbera:

$$\vartheta_{f,avg} = \vartheta_{f,ul} + \frac{\dot{Q}_{kol}}{A_{aps} \cdot F_R \cdot U_{uk}} \cdot \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad (2.27)$$

$$\vartheta_{aps,avg} = \vartheta_{f,ul} + \frac{\dot{Q}_{kol}}{A_{aps} \cdot F_R \cdot U_{uk}} \cdot (1 - F_R) \quad (2.28)$$

Kako je i prije spomenuto određivanje temperatura pojedinih dijelova kolektora i korisnog toplinskog toka, a time i učinkovitosti kolektora je iterativan postupak. Za provedbu proračuna korišten je programski paket Python. Prvi korak uključuje učitavanje svih ulaznih

podataka kao što su geometrijske značajke kolektora poput duljine, širine, visine, razmak između stakla i apsorbera, broj cijevi itd., kao i pogonski uvjeti (ulazna temperatura radnog medija, apsorberano sunčevo zračenje, temperatura okolišnog zraka. Nakon toga potrebno je odrediti sve otpore izmjeni topline na temelju početnih pretpostavki temperatura apsorbera i stakla, te dodatno se pretpostavlja temperatura spoja. Na temelju toga se prvo određuju faktori učinkovitosti rebra i odvođenja topline, te zatim korisni toplinski tok koristeći sve jednadžbe prikazane prije. Kao zadnji korak određuju se i srednje temperature radnog medija i apsorbera.

Za rješavanje gore prikazanog sustava jednadžbi korišten je optimizacijski algoritam koji je dostupan unutar programskog paketa Python. Cilj optimizacije je minimizacija funkcije cilja f , koja predstavlja sumu kvadrata razlike izračunatih vrijednosti pojedinih varijabli x između dvije uzastopne iteracije:

$$f = \min \sum_{i=1}^5 X_i^2 \quad (2.29)$$

Gdje su:

X_1 – razlika toplinskih tokova izračunatih jednadžbama (2.20) i (2.22)

X_2 – razlika toplinskih tokova izračunatih jednadžbama (2.20) i (2.23)

X_3 – razlika toplinskih tokova izračunatih jednadžbama (2.20) i (2.25)

X_4 – razlika temperature fluida izračunate optimizacijskim algoritmom i jednadžbe (2.27)

X_5 – razlika temperature apsorbera izračunate optimizacijskim algoritmom i jednadžbe (2.28)

Nakon određivanja temperatura apsorbera i srednje temperature fluida moguće je izračunati toplinsku učinkovitost kolektora:

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{Q}_{kol}}{\dot{q}_{sun} \cdot A_{aps}} \quad (2.30)$$

Gdje je:

$\dot{q}_{sun}$ – doznačena energija sunca, $[W/m^2]$.

2.3.3. Izračun koeficijenta prijelaza topline sa stijenke cijevi na radni fluid

U određenim jednadžbama prikazanim u prethodnom poglavlju za određivanje toplinskog toka koji je predan vodi potrebno je poznavati koeficijent prijelaza topline s cijevi na radni fluid (voda). Isto tako, koeficijent prijelaza topline sa stijenke apsorbera na vodu je jedan od rubnih uvjeta u 2D numeričkim simulacijama. Nusseltova značajka za potpuno razvijeno laminarno strujanje kroz cijev može izračunati s pomoću Jed. (2.31) ovisno da li se radi o uvjetu konstante temperature ili toplinskog toka promatrane stijenke. U analitičkom proračunu i preliminarnim simulacijama s ciljem verifikacije modela izmjene topline i analize preliminarne konstrukcije prototipa polimernog solarnog kolektora pretpostavljeno je potpuno izobraženo strujanje pri konstantom toplinskom toku.

$$Nu = \begin{cases} 3,66 & \vartheta_s = konst \\ 4,36 & q_s = konst \end{cases} \quad (2.31)$$

U literaturi [75] postoje razni izrazi koji obuhvaćaju neizobraženo i izobraženo područje strujanju kojima u obzir uzima korekcija zbog razvijanja temperaturnog i hidrodinamičkog graničnog sloja. Za uvjet konstantnog toplinskog toka koristi se izraz:

$$Nu = \begin{cases} 4,364 + 0,263 \cdot Gz^{0,506} \cdot e^{-\frac{41}{Gz}} & Gz \leq 667 \\ 1,032 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} - 0,5 & 667 \leq Gz \leq 2 \cdot 10^4 \\ 1,032 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} - 0,5 & Gz > 2 \cdot 10^4 \end{cases} \quad (2.32)$$

Za uvjet konstante temperature stijenke Nusseltova značajka u ovisnosti udaljenosti od ulaza kanala je:

$$Nu = \begin{cases} 3,657 + 0,2362 \cdot Gz^{0,488} \cdot e^{-\frac{57,2}{Gz}} & Gz \leq 1000 \\ 1,077 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} - 0,7 & Gz > 1000 \end{cases} \quad (2.33)$$

gdje je:

Gz – Graetzov broj [-]

Graetzov broj se određuje prema:

$$Gz = \frac{Re \cdot Pr \cdot d_u}{z} \quad (2.34)$$

gdje su:

Re – Reynoldsov broj, [-],

Pr – Prandtlov broj, [-],

z – udaljenost od ulaza, [m]

Re broj se računa kao:

$$Re = \frac{\rho \cdot d_u \cdot w_f}{\mu} \quad (2.35)$$

gdje su:

ρ, μ – fizikalna svojstva vode za srednju temperaturu vode,

w_f – brzina strujanja vode kroz cijev, [m/s].

Za slučaj turbulentnog strujanja u cijevima moguće je koristiti izraz Gnielinskog, na temelju Darcyeva faktora trenja f , koji vrijedi za veliki raspon Re brojeva uključujući i prijelazno poručuje:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (2.36)$$

Darcyev faktor trenja se može očitati iz Moodyevog dijagrama, ili ako se radi o glatkim cijevima, može se izračunati uz pomoć:

$$f = (0,79 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (2.37)$$

Sva potrebna fizikalna svojstva vode određuju se za srednju temperaturu vode. Izračunati koeficijenti prijelaza topline u Poglavlju 3.5.3 uspoređeni su s koeficijentima prijelaza topline izračunatih na temelju prikazanih izraza u ovdje. Prototip polimernog solarnog kolektora opisan u Poglavlju 2.5 ima kanale pravokutnog poprečnog presjeka. U tom slučaju u gornjim izrazima je potrebno koristiti hidraulički promjer D_h . Za provedbu simulacija opisanih u Poglavlju 3.2 i 3.3 korištena je Jed. (2.31) pri uvjetima konstantnog toplinskog toka.

2.4. Analitičko-eksperimentalni postupak određivanja optičkih karakteristika polimernih materijala

2.4.1. Optička svojstva materijala u solarnoj tehnici

Poznavanje optičkih svojstava materijala korištenih u solarnoj tehnici od velike je važnosti za analizu toplinskih karakteristika solarnih kolektora. Kod konvencionalnih materijala koji se koriste kod proizvodnje kolektora, poput stakla, aluminijske, bakra i pojedinih premaza, optička svojstva kao što su faktori propusnosti i refleksije te koeficijent prigušenja, su dostupna u za

to pripadajućoj literaturi. Međutim, za većinu polimernih materijala potencijalnih za izradu polimernog solarnog kolektora optička svojstva potrebna za analizu toplinskih karakteristika nisu dovoljno istražena.

Faktori propusnosti, refleksije i apsorpcije su funkcije dolaznog sunčevog zračenja, valne duljine, debljine materijala, indeksa loma i koeficijenta prigušenja. Indeks loma n općenito se može definirati kao omjer brzine svjetla u vakuumu i u promatranom materijalu ili mediju. Nadalje, kod nemagnetnih materijala indeks loma n povezan je s dielektričnom konstantnom ε_r preko jednadžbe:

$$n = (\varepsilon_r)^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

Gornji izraz ne sadrži informacije o prigušenju svjetla unutar samog materijala te kako bi bolje razumjeli interakciju svjetla s različitim materijalima potrebno je uvesti kompleksni indeks loma $\tilde{n}$ [76] definiran kao:

$$\tilde{n} = n + i \cdot k \quad (2.39)$$

gdje su:

n – realni dio kompleksnog indeksa loma, indeks loma, [-],

k – imaginarni dio kompleksnog indeksa loma, koeficijent prigušenja, (engl. *damping constant, attenuation index, extinction coefficient*), [-].

Kombinirajući izraze (2.38) i (2.39) kompleksni indeks loma još je moguće i definirati kao:

$$(n + i \cdot k)^2 = \varepsilon' + i \cdot \varepsilon'' \quad (2.40)$$

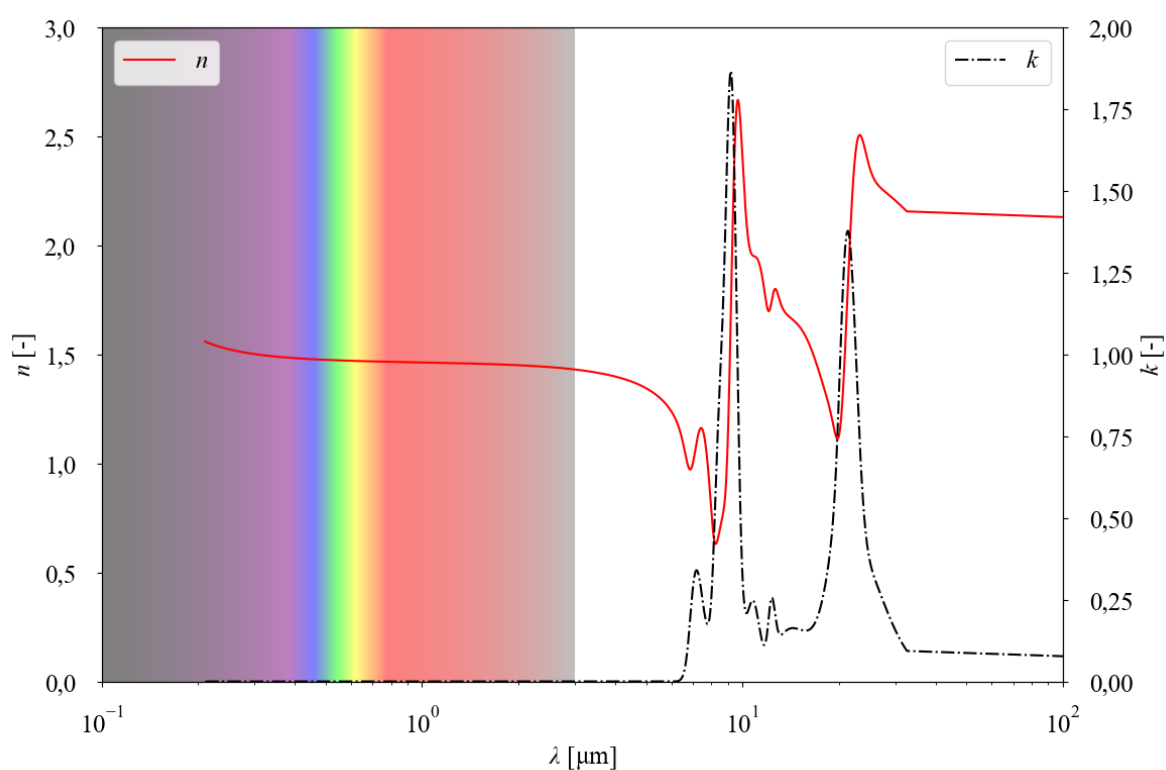
gdje su ε' i ε'' realni, odnosno imaginarni dio kompleksne dielektrične funkcije.

Realni dio predstavlja sposobnost materijala da pohranjuje energiju iz elektromagnetskog polja, dok je imaginarni dio povezan s gubitcima energije. Indeks loma i koeficijent prigušenja se mogu izračunati poznavanjem realnog i imaginarnog dijela kompleksne dielektrične funkcije:

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon')} \quad (2.41)$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon')} \quad (2.42)$$

Određivanje optičkih konstanti materijala, indeksa loma n i koeficijenta prigušenja k moguće je korištenjem spektroskopskih metoda, kao što su UV-VIS spektrometrija, elipsometrija, refleksijska spektrometrija gubitkom energije elektrona (REELS) uz primjenu Kramers-Kroningovih relacija koje povezuju realni i imaginarni dio kompleksne dielektrične funkcije. Osim ovih metoda, a analizi optičkih svojstava mogu se koristiti i druge tehnike, poput RTM (*Ray Tracing Method*) ili REM2 (*Radiative Element Method*), koje omogućuju određivanje optičkih konstanti kroz simulacije ili izravno iz mjerenja faktora propusnosti i refleksije. Takav kombinirani pristup omogućuje određivanje optičkih konstanti, odnosno realnog i imaginarnog dijela kompleksnog indeksa loma, u širokom rasponu valnih duljina (Slika 15).



Slika 15 Kompleksni indeks loma borosilikatnog stakla u ovisnosti o valnoj duljini [77]

Za praktične inženjerske izračune apsorbiranog sunčevog zračenja na ploči apsorbera toplinskog kolektora neophodno je poznavanje optičkih konstanti pokrovnog materijala u vidljivom području i dijelu infracrvenog spektra. Iz Slika 15 je vidljivo da su optička svojstva u određenim dijelovima spektra relativno konstantna te je moguće odrediti prosječne vrijednosti pogodne za inženjerske izračune. Literaturni podaci za vrijednost indeksa loma i koeficijenta prigušenja za polimerne materijale i staklo prikazani su u Tablica A.1.

Kada se pogledaju dostupni podaci iz literature, prosječna vrijednost indeksa loma za polimere u vidljivom dijelu spektra (VIS, *Visible*) za polimere iznosi oko 1,59 za PC, ~1,49 - 1,51 za PMMA, te ~1,53 - 1,55 za PVC uz relativno malo rasipanje vrijednosti. Određeni izvori prijavljuju niže ili veće vrijednosti indeksa loma što može biti rezultat različitih ispitnih metoda, debljine samog uzorka ili pripreme istog. U bliskom infracrvenom (NIR, *Near infrared*) području zračenja vrijednosti indeksa su nešto niže u odnosu na vidljiv dio spektra s manjim smanjenjem indeksa loma, ~0,03 manje za PC, 0,01 – 0,05 za PMMA, te 0,01 – 0,08 za PVC ovisno o izvoru. Koeficijent prigušenja za polimerne materijale je relativno mali (red veličine $1e-7$ – $1e-3$) u VIS i NIR području. Prilikom korištenja određenih metoda (elipsometrija, REELS) javlja se problem mjerenja malih vrijednosti koeficijenta prigušenja prozirnih materijala, jer je njegova vrijednost ispod granice detekcije korištenih uređaja [66, 67]. Taj problem se može riješiti mjerenjem faktora propusnosti kao funkcija valne duljine i korištenjem određenih optičkih modela, pod pretpostavkom da se materijal ponaša u skladu s primijenjenim optičkim modelom. Podaci iz literature o koeficijentu prigušenja pokazuju puno veće rasipanje s obzirom na izvor, jer su korištene različite metode ispitivanja. Zbog svega navedenog, upitna je točnost određenih faktora propusnosti, refleksije i apsorpcije na temelju dostupnih podataka o koeficijentu prigušenja. Mjerenje optičkih konstanti materijala ne zahtijeva samo skupu opremu, već i dubinsko poznavanje problematike u području optičkih svojstava materijala. Također, prema dostupnoj literaturi, nisu pronađeni podaci za PVC-C. Iz tog razloga, u ovom radu je predložena analitičko-eksperimentalne metoda koja se temelji na mjerenju faktora propusnosti ploče poznate debljine, na temelju čega se inverznim putem određuje koeficijent apsorpcije μ (u literaturi se nekada koristi i oznaka K) željenog materijala. Pretpostavlja se da je indeks loma promatranog materijala poznat. Ovdje treba napomenuti kako su koeficijent prigušenja k (*extinction coefficient*) i koeficijent apsorpcije μ različiti parametri. Koeficijent prigušenja k , zajedno sa indeksom loma n predstavljaju fundamentalne optičke konstante materijala. S druge strane koeficijent apsorpcije μ ovisi o koeficijentu prigušenja k prema izrazu:

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda} \quad (2.43)$$

Isto tako, vidljivo je da je i koeficijent apsorpcije funkcija valne duljine. Poznavanjem vrijednosti indeksa loma n i eksperimentalno određene vrijednosti koeficijenta apsorpcije μ moguće je odrediti faktore propusnosti, refleksije i apsorpcije pokrova polimernog solarnog

kolektora, a time i apsorbiranog sunčevog zračenja. Taj podatak se zatim koristi kao ulazna veličina u proračune apsorpcije sunčevog zračenja što je i opisano u sljedećem poglavlju. Apсорbirana energija sunčevog zračenja jedan je od ključnih parametara za provedbu analitičkih proračuna i numeričkih simulacija.

2.4.2. Analitički proračun koeficijenta apsorpcije μ i faktora propusnosti, refleksije i apsorpcije

Apsorpcija sunčevog zračenja u materijalu koji je djelomično propustan za sunčevo zračenje može se opisati Lambert-Beer-Bouguerovog zakona koji kaže da intenzitet svjetlosti eksponencijalno pada u ovisnosti o debljini promatranog materijala.

$$dI = -\mu \cdot I dx \quad (2.44)$$

Integracijom gornje jednadžbe dobije se izraz za određivanje faktora propusnosti koji uzima u obzir samo gubitke uslijed apsorpcije sunčevog zračenja:

$$\tau_a = \frac{I_t}{I_0} = \exp\left(-\frac{\mu \cdot s}{\cos \theta_2}\right) \quad (2.45)$$

Pri čemu su:

I_t – propušteno sunčevo zračenje, [W/m²],

I_0 – upadno sunčevo zračenje, [W/m²],

μ – koeficijent apsorpcije, [1/m],

s – debljina materijala kroz koji polazi sunčevo zračenje, [m],

θ_2 – kut loma sunčevog zračenja, [°].

Kako bi analitički odredili vrijednost koeficijenta apsorpcije μ potrebno je prvo odrediti faktore propusnosti τ , refleksije ρ i apsorpcije α uzimajući u obzir gubitke uslijed refleksije i apsorpcije. Pojedini faktori određuju se za paralelnu (oznaka ||) i okomitu (oznaka $\perp$) komponentu polarizacije koristeći izraze (2.46) – (2.48). Ukoliko je upadno sunčevo zračenje nepolarizirano, optička svojstva se računaju kao prosjek vrijednosti paralelne i okomite komponente. Također, treba napomenuti da su paralelna i okomita komponenta polarizacije jednake ako je upadni kut 0°. Nakon određivanja optičkih svojstava traži se vrijednost koeficijenta prigušenja k koja će zadovoljiti uvjet jednakosti prema Jed. (2.49).

$$(\tau)_{\parallel\perp} = \frac{\tau_a \cdot (1 - (r)_{\parallel\perp})^2}{1 - (\tau_a \cdot (r)_{\parallel\perp})^2} \quad (2.46)$$

$$(\rho)_{\parallel\perp} = (r)_{\parallel\perp} \cdot (1 + \tau_a \cdot (\tau)_{\parallel\perp}) \quad (2.47)$$

$$(\alpha)_{\parallel\perp} = (1 - \tau_a) \cdot \frac{1 - (r)_{\parallel\perp}}{1 - \tau_a \cdot (r)_{\parallel\perp}} \quad (2.48)$$

$$\tau_{\text{mjereno}} = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2} = (\tau)_{\parallel\perp} \quad (2.49)$$

Gdje je r udio svjetlosti reflektirane na površini između dva medija, a izračunava se uz pomoć Fresnelovih jednadžbi. Pri upadnom kutu 0° i ukoliko je jedan od medija zrak, r se može izračunati koristeći jednadžbu.

$$r = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (2.50)$$

Vrijednosti indeks loma n za materijale za koji je proveden postupak preuzeti su iz literature (Tablica A.1). Indeks loma n i μ su funkcije valne duljine i ovisno o materijalu mogu značajnije varirati s promjenom valne duljine. Za provedene proračune pretpostavlja se da su svojstva neovisna o valnoj duljini.

Prethodno prikazani proračun primjenjiv je u slučaju kada zračenje prolazi kroz jedan sloj materijala ili pokrova, što je slučaj u klasičnom pločastom kolektoru. U slučaju da zračenje prolazi kroz sustav od 2 ili više slojeva materijala odnosno pokrova, što je i slučaj kod promatranog polimernog kolektora, potrebno je koristiti izmijenjene izraze (2.51) – (2.53).

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_{\parallel} + \tau_{\perp}) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\parallel} + \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_{\perp} \right] \quad (2.51)$$

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}) = \frac{1}{2} \left[\left(\rho_1 + \frac{\tau \rho_2 \tau_1}{\tau_2} \right)_{\parallel} + \left(\rho_1 + \frac{\tau \rho_2 \tau_1}{\tau_2} \right)_{\perp} \right] \quad (2.52)$$

$$\alpha = 1 - \tau - \rho \quad (2.53)$$

Nakon određivanja optičkih svojstava sustava pokrovnih ploča moguće je izračunati ukupno apsorbirano zračenje apsorbera. Dio zračenja koji dolazi na ploču apsorbera reflektira se nazad prema pokrovu, dok se dio tog ponovno reflektira nazad prema apsorbera te se ukupno apsorbirana energija može izračunati uz pomoć Jed. (2.54). Za zračenje koje se reflektira s apsorbera se pretpostavlja da je difuznog karaktera i nepolarizirano.

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (2.54)$$

Gdje ρ_d predstavlja faktor refleksije difuzne komponente zračenja pokrovnog materijala te se određuje prema:

$$\rho_d = \tau_a(60^\circ) - \tau(60^\circ) \quad (2.55)$$

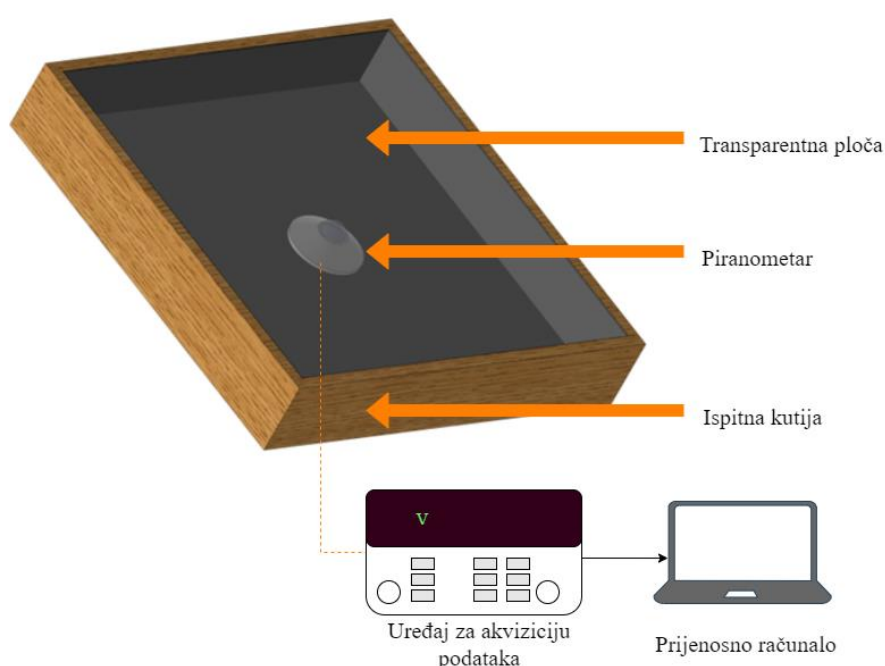
2.4.3. Mjerna linija za određivanje faktora propusnosti polimernih materijala

Određivanje faktora propusnosti, refleksije i apsorpcije temelji se na poznavanju osnovnih optičkih konstanti materijala, indeksa loma n i koeficijenta prigušenja k . U poglavlju 2.4.1 pokazane su metode kojima je moguće eksperimentalno odrediti optičke konstante, kao i izazovi povezani s provedbom takvih mjerenja. Iz tog razloga se u ovom istraživanju koristio troškovno prihvatljiv eksperimentalni postav, kojim je moguće odrediti faktor propusnosti ispitivanog materijala određene debljine. S izmjerenim vrijednostima faktora propusnosti i proračunom koji je opisan u poglavlju 2.4.2 moguće je doći do ukupno apsorbirane energije sunčevog zračenja u pojedinim dijelovima polimernog kolektora. Taj podatak se zatim koristi kao ulazni parametar u analitički proračun i numeričke simulacije. Eksperimentalni postav za određivanje faktora propusnosti prikazan je na Slika 22.

Mjerna linija za određivanje faktora propusnosti sastoji se od ispitne kutije veličine 81x81 cm u čijem je središtu postavljen visoko precizni piranometar *Kipp&Zonen CMP 11* (*secondary standard* klasifikacija prema ISO 9060). Piranometar mjeri dozračenu sunčevu energiju u području valnih duljina 285 – 2800 nm. Piranometar kalibracijske konstante 8,61 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ spojen je na uređaj za akviziciju podataka (A/D pretvaraču *Agilent* tip 34970A) s intervalom očitavanja podataka 30 s. Ispitna kutija postavljena je na pokretno postolje koji omogućuje provedbu mjerenja pri različitim kutovima upadnog zračenja. Unutrašnjost ispitne kutije obojena je crno kako bi se spriječila eventualna refleksija sunčevog zračenja unutar same kutije. Mjerenja se provode za vrijeme potpuno sunčanog dana bez naoblake. Procedura ispitivanja provodi se prema sljedećim koracima:

1. Piranometar se postavlja u središte ispitne kutije

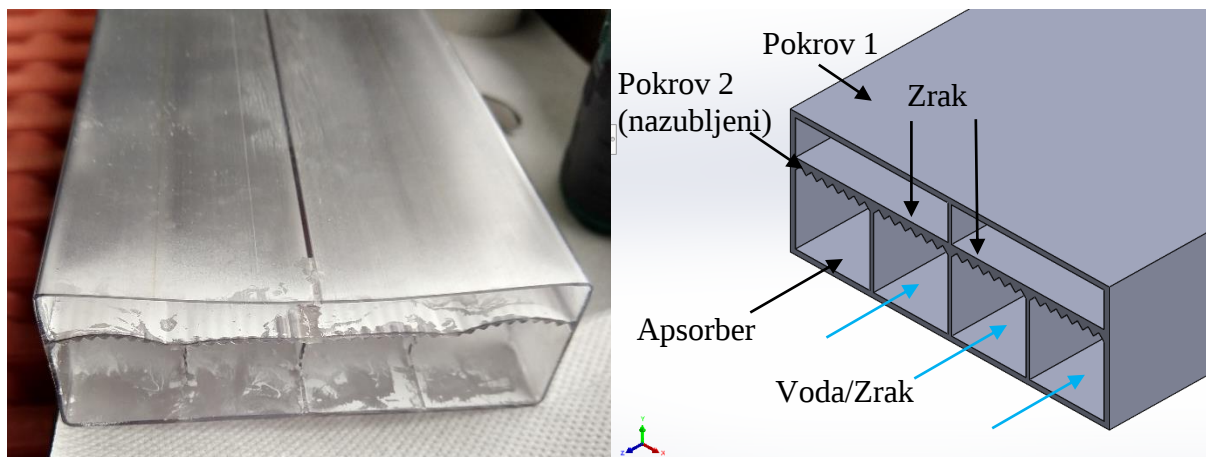
2. Na uređaju za akviziciju podataka prati se odziv piranometra do uspostave stacionarnog stanja
3. Nakon uspostave stacionarnog stanja, na vrh ispitne kutije, preko piranometra se postavlja uzorak polimernog materijala
4. Na uređaju za akviziciju podataka prati se odziv piranometar do uspostave stacionarnog stanja
5. Nakon uspostave stacionarnog stanja uzorak se uklanja
6. Ponoviti postupak od 2.-5. s drugim polimernim materijalom



Slika 16 Eksperimentalni postav za određivanje faktora propusnosti polimernih materijala
[80]

2.5. Prototipovi polimernog solarnog kolektora

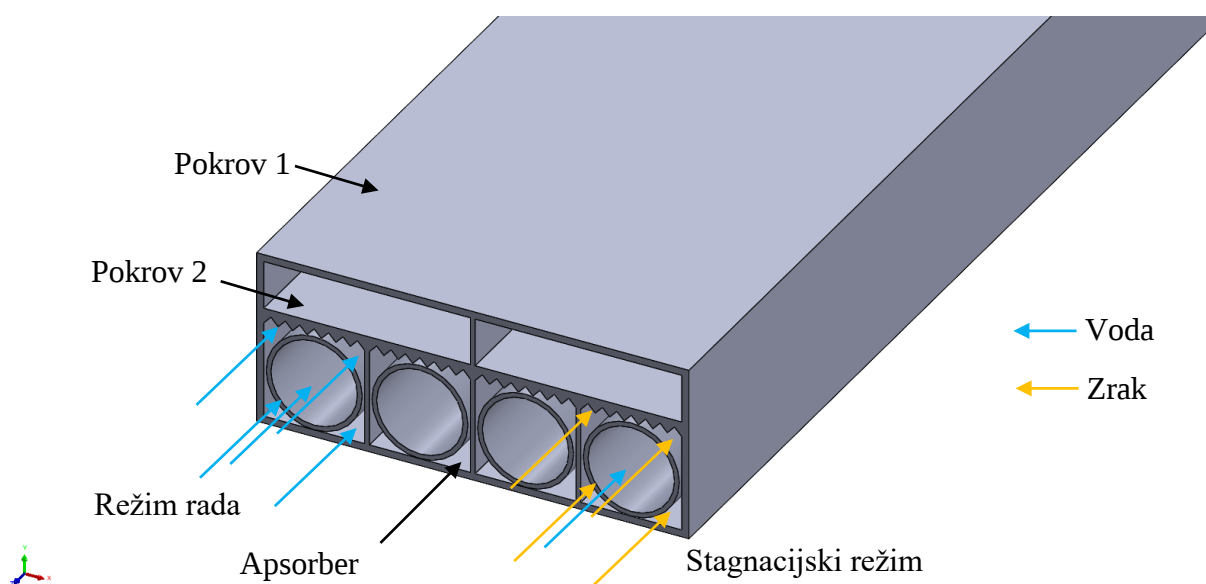
U ovom poglavlju su opisani prototipovi polimernog solarnog na kojima su provedena mjerenja opisana u Poglavlju 2.6 Mjerenje toplinskih karakteristika prototipa. Prototipovi su sastavljeni od više segmenata koji su napravljeni procesom ekstruzije od PVC-C granula. Izvedeni poprečni presjek jednog segmenta i CAD model istog prikazani su na Slika 17. Geometrija prototipa kao i materijala za izradu definirani su temelju rezultata preliminarnih analitičkih proračuna i numeričkih simulacija, i eksperimentalno određenih optičkih karakteristika određenih materijala (Poglavlja 3.1 i 3.2).



Slika 17 Poprečni presjek jednog segmenta prototipa polimernog solarnog kolektora, izvedeno stanje i definirani CAD model

Uočljiva razlika između izvedenog stanja i definiranog CAD modela je nastala zbog ograničenja u proizvodnom procesu. Istraživanje uzroka greški zbog kojih dolazi do različite geometrije ekstrudiranih segmenata u odnosu na definirani CAD model je van opsega ovog istraživanja. Zbog različitosti svakog segmenta pokušalo se identificirati što je više mogućih sličnih segmenata za koje su se potom izradili priključci putem tehnologije 3D ispisa. Segment se sastoji od 2 kanala u kojima se nalazi zrak, te ukupno 4 kanala kroz koje struji radni fluid (voda). Pokrov 2 je s donje strane izveden s nazubljenom površinom. Ovakva nazubljena geometrija pokrova iskorištava Snellov zakon loma svjetlosti. Prema ovom zakonu, pri određenim kutovima upada svjetlosti dolazi do potpune unutarnje refleksije kada svjetlost prelazi iz medija s većim indeksom loma n u medij manjeg indeksa loma. S obzirom na to da je ovaj polimerni solarni kolektor dizajniran za rad u *drain-back* sustavu, radni fluid (voda, $n \approx 1,33$) iz kanala povlači se tijekom stagnacijskog režima, a prostor popunjava zrak ($n \approx 1$). Time su ostvareni potrebni uvjeti za pojavu potpune unutarnje refleksije ($n_{\text{PVC-C}} \approx 1,37$). Na ovaj način moguće je smanjiti temperaturu kolektora u stagnacijskom režimu za ~ 60 °C [81]. S druge strane u normalnom radu, cijeli prostor ispunjava voda približno istog indeksa loma kao i PVC-C što omogućuje neometan prolaz sunčevog zračenja do ploče apsorbera. Segmenti i priključci su potom spajani posebnim silikonom za visoke temperature. Ukupno su napravljena dva prototipa (Prototip 1 i 2) različite konfiguracije na kojima su provedena ispitivanja toplinskih karakteristika. Razlike u pojedinim izvedbama prototipova opisane se u nastavku ovog poglavlja.

Prototip 1 je izveden od ukupno 8 segmenata gdje je unutar kanala umetnuta dodatna cijev (Slika 18). Kroz cijev je predviđeno da struji voda dok se oko cijevi nalazi zrak/voda ovisno u kojem se režimu rada kolektor nalazi. U normalnom režimu rada oko cijevi se nalazi voda te zbog izvedbe gornje nazubljene površine i na temelju vrijednosti indeksa loma n , sunčevo zračenje prolazi do cijevi i apsorbera. Kada kolektor postigne zadane temperature u spremniku tople vode pumpa se isključuje, te s obzirom na to da kolektor radi u *drain-back* sustavu, voda iz dijela oko cijevi se povlači. Umjesto vode tu se sada nalazi zrak te zbog odnosa indeksa loma n PVC-C i zraka dolazi do totalne refleksije i sunčevo zračenje ne prolazi do cijevi i ploče apsorbera što smanjuje maksimalne temperature pojedinih dijelova kolektora. U ovoj fazi za potrebe toplinskih ispitivanja nije bilo potrebno izvoditi dva zasebna kruga za strujanje vode jer je promatran samo normalan pogonski režim.



Slika 18 CAD model Prototipa 1 s prikazanim smjerovima strujanja vode u različitim režimima rada

Priključci za vodu su izvedeni na način da se unutar svakog priključka spaja po 2 segmenta (Slika 19 a)). Zatim se ukupno 4 priključka svaki s po 2 segmenta međusobno spajaju, također uz pomoć silikona (Slika 19 b)). Na priključcima se nalazi navoj koji omogućuje spajanje na mjernu liniju.



a) Spajanje pojedinih segmenata

b) Prototip 1

Slika 19 Fotografije Prototipa 1 polimernog solarnog kolektora

Zbog relativno malih dimenzija kanala sa zrakom i vodom, kao i samog tijela kolektora bilo je teško osigurati kvalitetno brtvljenje na svim dijelovima. Tijekom mjerenja na Prototipu 1 primijećeno je propuštanje na pojedinim spojevima između segmenata i priključnih komada na kolektoru. Zbog načina spajanja segmenata i priključnih komada, svaki pokušaj rastavljanja s ciljem osiguravanja, boljeg brtvljenja bi zasigurno doveo do nepovratnog oštećenja. Prilikom mjerenja na višim temperaturama uočeno je zamagljivanje površine pokrova s donje strane što ukazuje na propuštanje vode u prostor između pokrova i apsorbera.

U drugoj fazi istraživanja za Prototip 2 odlučeno je da će se svaki segment spajati zasebno na svoj priključak kako bi se pokušao otkloniti problem vezan uz brtvljenje. Isto tako, zbog toga su uklonjene i cijevi iz kanala. Poprečni presjek ove izvedbe je već pokazan na Slika 17 b). Kod ovakve izvedbe, zbog modularnog spajanja postoji mogućnost neravnomjerne raspodjele strujanja kroz pojedini segment kolektor, dok je prednost ovakvog spajanja relativno brza zamjena pojedinog segmenta. Način spajanja Prototipa 2 prikazan je na Slika 20.



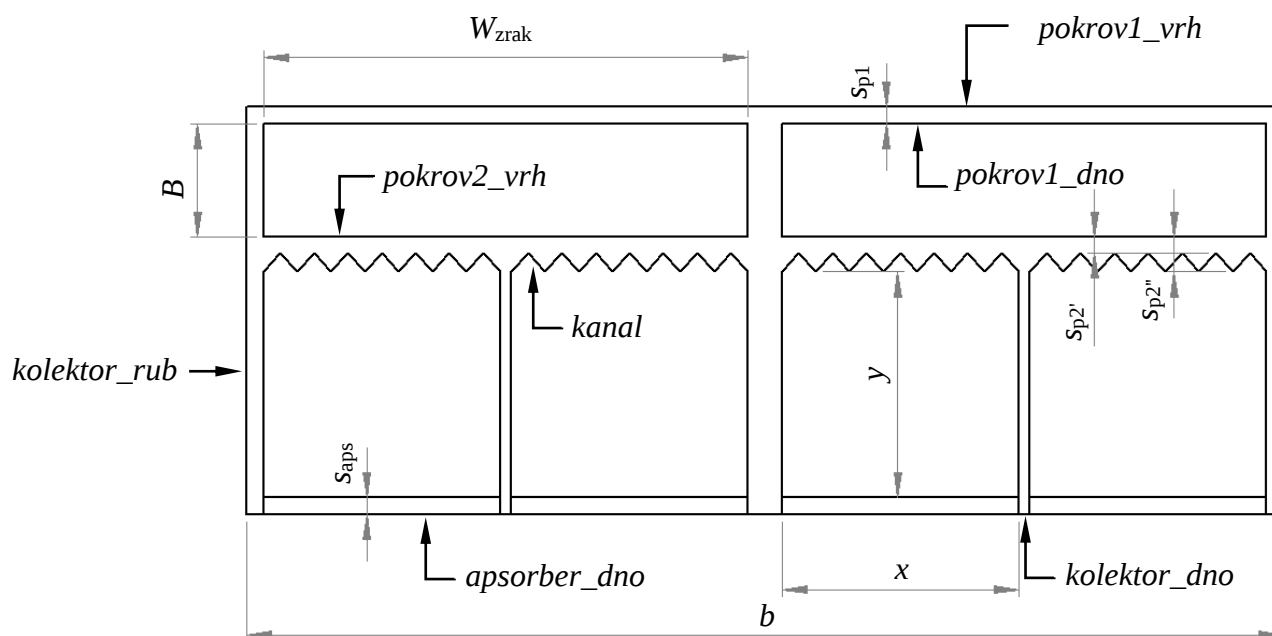
Slika 20 Fotografija Prototipa 2, prikaz načina spajanja prototipa na mjernu liniju

Prilikom provedbe preliminarnih mjerenja Prototipa 2 uočeno je propuštanje kod određenih segmenata. Zbog ograničenja u količini dostupnih segmenata odlučno je da će se ostala mjerenja provoditi na jednom segmentu na kojem nema propuštanja koje uzrokuje zamagljivanje površine pokrova. Nedostatak provedbe ispitivanja s jednim segmentom je veći utjecaj rubnih uvjeta na bočnim plohamo što se pokušalo riješiti dobrim izoliranjem istih ili umetanjem segmenta koji se ispituje između ostalih segmenata. Pojedini kanali stvarno izvedenog segmenta su izmjereni uz pomoć pomičnog mjerila, te se generiranim CAD modelom pokušalo što vjernije replicirati stvarno dobiveni poprečni presjek, za potrebe provedbe numeričkih simulacija. Dimenzije dijelova kolektora pojedine geometrije dani su u Tablica 4, dok je poprečni presjek s odgovarajućim oznakama prikazan na Slika 21. Najveća razlika između definiranog CAD modela i izvedenog prototipa je u širini kanala sa zrakom i vodom što će rezultirati nešto drugačijom ukupnom površinom apsorbera. Verifikacija numeričkih 3D simulacija opisanih u poglavlju 3.5 provedene su na geometriji Prototipa 2 koji je bio podvrgnut ispitivanjima tijekom lipnja i srpnja 2022. U budućem nastavku istraživanja očekuje se unaprjeđenje proizvodnog procesa, a time i dobivanje segmenata jednolikog poprečnog presjeka kako je i definirano CAD modelom. Zbog tog razloga se parametarska analiza napravila na geometriji koja je prvotno definirana CAD modelom.

Tablica 4 Dimenzije dijelova prototipa polimernog kolektora definiranog CAD modela i stvarno izvedenog prototipa, sve prikazane veličine su u [mm]

Geometrija	Definirani CAD model	Prototip 2
Debljina pokrova s_{p1}	1,5	1,5
Debljina pokrova s_{p2}^a	2,32	2,35
Debljina apsorbera s_{abs}	1,5	1,5
Širina kanala, zrak, W_{zrak}	43	47
Visin kanala, zrak, B	10	10
Širina kanala, voda, x	21	27,2
Visin kanala, voda, y	21	21
Hidraulički promjer, D_h	19	21,5
Duljina kolektora, L	1950	1950
Širina kolektora, b	92	115

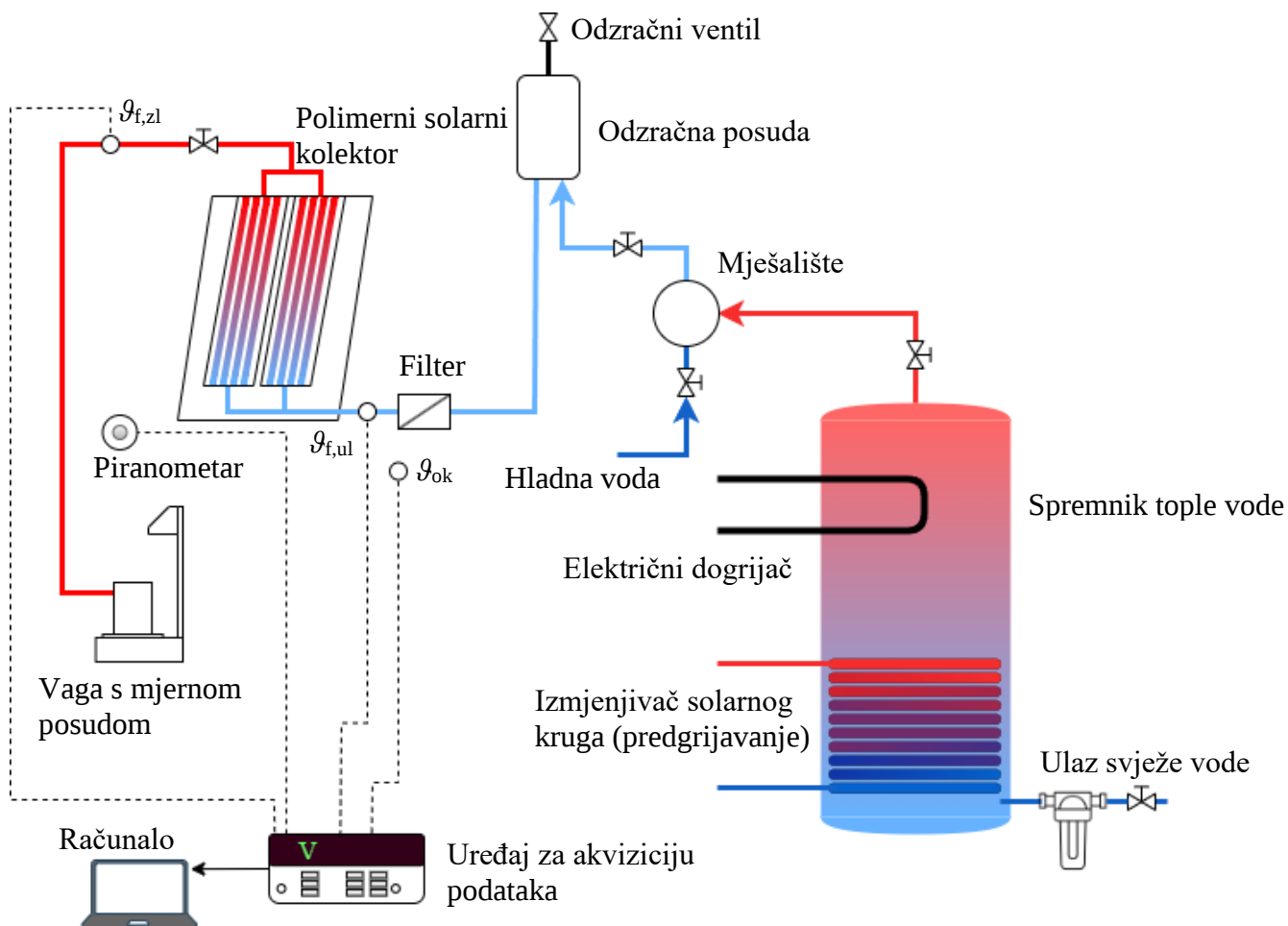
^aDebljina drugog pokrova je određena kao prosječna vrijednost dimenzija $s_{p2'}$ i $s_{p2''}$



Slika 21 Prikaz dimenzija prototipa polimernog solarnog kolektora (Geometrija 2 – 2D)

2.6. Mjerenje toplinskih karakteristika prototipa

Ispitna linija za mjerenje toplinske učinkovitosti pripremljena je prema odredbama norme HRN EN ISO 9806:2017 u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitna linija je shematski prikazana na Slika 22.



Slika 22 Shematski prikaz mjerne linije za određivanje toplinske učinkovitosti prototipa polimernog solarnog kolektora

Prototip polimernog solarnog kolektora postavljen je na pokretni stalak koji je nagnut pod 45° u odnosu na horizontalu. Topla voda za ispitivanje kolektora struji kroz protočnu grijalicu u otvorenom krugu, a prethodno se predgrijava u akumulacijskom spremniku. Željena ulazna temperatura vode se postiže podešavanjem napona na regulacijskom transformatoru. Prije kolektora postavljena je posuda koja služi za smirivanje oscilacija temperature nakon izlaska iz grijača, ali i kao odzračna posuda. Ulazna i izlazna temperatura vode mjere se s pomoću

termoparova ugrađenih u koljena, što omogućuje dobro miješanje vode i mjerenje temperature pri relativno malim ispitnim protocima. Temperatura okolišnog zraka se također mjeri uz pomoć zasjenjenog termopara, dodatno zaštićenog od utjecaja zračenja reflektirajućom folijom. Korišteni termoparovi su T-tipa razreda točnosti $\pm 0,5$ °C, odnosno 0,4 % od očitavanja (veća vrijednost od dviju). Generirani termonapon pretvaran u A/D pretvaraču *Agilent* tip 34970A u digitalni signal koji se očitavao na prijenosnom računalu. Korišteni termoparovi, kao i pripadajući kompenzacijski vodovi prethodno su umjereni u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje gdje su utvrđena međusobna odstupanja manja od 0,1 °C. Dozračena energija sunčevog zračenja mjerena je piranometrom (Poglavlje 2.4.3). Piranometar je postavljen uz prototip pod istim kutom te je spojen na uređaj za akviziciju podataka. Interval zapisivanja svih vrijednosti je 30 s. Brzina strujanja zraka uz površinu pokrova kolektora mjerena je uz pomoć anemometara s krilcima. Maseni protok kroz kolektor se podešava na regulacijskom ventilu na način da se ostvari 0,02 kg/s po m² svijetle površine kolektora. Maseni protok vode kroz kolektor je mjereno s pomoću vage i štoperice, te se periodički kontrolirao svakih 5 minuta tijekom bilježenja stacionarnih uvjeta. Za vrijeme mjerenja određivala se trenutačna toplinska učinkovitost kako bi se moglo procijeniti da li se postiglo stacionarno stanje. Nakon utvrđivanja perioda stacionarnog stanja, na grijaču je podešena maksimalno moguća temperatura te se pristupilo mjerenju druge radne točke pri višoj temperaturi vode na ulazu u kolektor. Mjerenja su provedena za vrijeme vedrog sunčanog dana u periodu od 12 – 15 h.

2.6.1. Proračun toplinske učinkovitosti

Toplinski učin određuje na temelju izmjerenih vrijednosti masenog protoka i razlike temperatura na izlazu i ulazu kolektora prema:

$$\dot{Q}_{kol} = \dot{m}_{kol} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{f,iz} - \vartheta_{f,ul}) \quad (2.56)$$

Specifični toplinski kapacitet vode u gornjoj jednadžbi određuje se za srednju temperaturu vode u kolektoru. Toplinski kapacitet u svim korištenim izrazima je određen s pomoću modula *CoolProp* dostupnog unutar programskog paketa Python. Maseni protok u gornjem izrazu se određuje vaganjem mase fluida M koja je protekla kroz kolektor u vremenu t .

$$\dot{m}_{kol} = \frac{M}{t} \quad (2.57)$$

Toplinska učinkovitost kolektora se dobije kao omjer korisne topline predane vodi i ukupno dozračene energije sunca izmjerene piranometrom prema Jed. (2.30). Uz svako pojedino mjerenje opisano u poglavljima rezultati prikazana je i relevantna površina uzeta u proračunu. Toplinska učinkovitost solarnih kolektora se često prikazuje kao funkcija srednje temperature fluida, temperature okolišnog zraka i dozračene sunčeve energije:

$$\eta_{kol} = \eta_0 - a_1 \cdot T_{red} - a_2 \cdot \dot{q}_{sun} \cdot T_{red}^2 \quad (2.58)$$

Gdje su:

T_{red} – reducirana temperaturna razlika, [m^2K/W],

η_0 – maksimalna toplinska učinkovitosti pri $T_{red} = 0$ m^2K/W [-],

a_1 – koeficijent gubitaka prvog reda, [$W/(m^2 \cdot K)$],

a_2 – koeficijent gubitaka drugog reda, [$W/(m^2 \cdot K^2)$].

Reducirana temperaturna razlika se određuje kao omjer razlike srednje temperature fluida i temperature okolišnog zraka i dozračenog sunčevog zračenja.

$$T_{red} = \frac{\vartheta_{f,avg} - \vartheta_{ok}}{\dot{q}_{sun}} \quad (2.59)$$

Koeficijenti gubitaka određuju se na temelju metode najmanjih kvadrata temeljem rezultata mjerenja. Za prikaz toplinske učinkovitosti krivuljom drugog stupnja potrebno je imati minimalno 3 radne točke (RT). Prilikom provedbe ispitivanja toplinske učinkovitosti nije bilo moguće provesti mjerenja na tri različite ulazne temperature fluida kako bi se odredile potrebne radne točke. Treća radna točka potrebna za definiranje krivulje toplinske učinkovitosti polimernog kolektora kao polinom drugog stupnja određena je na temelju verificiranog numeričkog modela. Tijekom mjerenja identificirani su intervali unutar kojih su za svaku izmjerenu točku tijekom (interval uzimanja podataka na akvizicijskom uređaju je 30 s) izračunata trenutačna toplinska učinkovitost prema Jed. (2.57). Unutar svakog intervala određene su prosječne vrijednosti (μ), razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti (Δ), te standardna devijacija (σ) za sve mjerene i izračunate veličine. Na dijagramima u Poglavlju 3.4 vrijednosti trenutačne toplinske učinkovitosti su prikazane s uklonjenim izdvojenim vrijednostima prema:

$$\eta_{kol,avg} - \sigma(\eta) \leq \eta \leq \eta_{kol,avg} + \sigma(\eta) \quad (2.60)$$

2.6.2. Provedba mjerenja toplinske učinkovitosti

Mjerenja provedena 1.-2. ožujka 2021.

Preliminarna mjerenja toplinske učinkovitosti provedena su tijekom 2021. godine s ciljem podešavanja i pripreme mjerne linije. Prvi set mjerenja provedena su u ožujku 2021. na prototipu polimernog kolektora (Prototip 1) koji je opisan u Poglavlju 2.5. Prilikom ispitivanja uočeno je propuštanje vode na spojevima i blagog zamagljivanja površine što dovodi u pitanje točnost mjerenja. Nakon zadnjeg mjernog intervala puštena je topla voda kako s ciljem uzimanja dodatne točke za određivanje krivulje toplinske učinkovitosti, ali se površina pokrova kolektora nakon nekog vremena potpuno zamaglila. Nakon ovih mjerenja pristupilo se pripremi novih segmenata koji su se koristili u narednim mjerenja. Prilikom pripreme novih segmenata posebna pažnja se posvetila ostvarivanju boljeg brtvljenja između segmenata i priključnih komada.

Mjerenja provedena 8.-9. srpnja 2021.

U ovom slučaju ispitan je jedan segment površine $A_{kol} = 0,227 \text{ m}^2$, koja se odnosi na površinu apsorbera, postavljen je između više drugih segmenata kako bi se smanjio utjecaj rubnih uvjeta (Slika 23). Iako je tijekom ispitivanja zabilježeno blago propuštanje vode kroz priključni komad na ulazu u kolektor, nije dolazilo do zamagljivanja površine pokrova s donje strane što sugerira na dobro brtvljenje na tom dijelu. Kako se radilo o relativno malom propuštanju vode koje, isto je zanemareno te se nastavilo dalje s ispitivanjima.

Nova mjerenja su napravljena dan poslije pri čemu je ispitan jedan segment identične površine, ali su u ovom slučaju bočne plohe bile dodatno izolirane. S donje strane između apsorbera i izolacije postavljen je dodatni izolacijski materijal kako bi se ti gubici dodatno smanjili. Prilikom mjerenja toplinske učinkovitosti pri višim vrijednostima ulazne temperature nije bilo moguće postići stacionarne uvjete za koje bi se mogla izračunati toplinska učinkovitost.



Slika 23 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe ispitivanja, prototip postavljen između više segmenata, srpanj 2021.

Mjerenja provedena 15. rujna 2021.

Za provedbu ovih mjerenja opet je korišten jedan segment identične površine kao i za prethodna mjerenja. U ovom slučaju se kolektor dodatno izolirao s donje strane, dok se izolacijski materijal crne boje na bočnim površinama zamijenio onim bijele boje kako ne bi došlo do dodatne apsorpcije sunčevog zračenja (Slika 24). Prvo se pristupilo određivanju toplinske učinkovitosti pri većoj temperaturi vode na ulazu u kolektor. Dodatno su izolirani dijelovi crijeva za vodu kako bi se smanjile moguće oscilacije temperature.



Slika 24 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe ispitivanja, prototip postavljen samostalno s boljom izolacijom rubova, rujan 2021.

Preliminarna mjerenja provedena u razdoblju od ožujka do rujna 2021. poslužila su kao osnova za pripremu i podešavanje mjerne linije, ali su i pružila uvid u rad prototipa polimernog kolektora. Tijekom početnih ispitivanja identificiranu su glavni problemi, uključujući propuštanje vode na spojevima segmenata i priključaka, te zamagljivanje donje površine pokrova uslijed prodora vode u prostor između pokrova i apsorbera. Ovi problemi su posljedica lošijeg brtvljenja te su utjecali na točnost izračuna toplinske učinkovitosti, osobito pri višim temperaturama vode. U nastavku preliminarnih ispitivanja odlučno je da će se svaki segment zasebno spajati na svoj priključak što je rezultiralo boljim brtvljenjem (Prototip 2). U ovoj fazi se jedan segment polimernog solarnog kolektora ispitivao zasebno, pri čemu je segment inicijalno postavljen između više drugih segmenata koji nisu bili u funkciji kako bi se minimizirao utjecaj rubnih gubitaka. U završnoj fazi mjerenja pojedinačni segment je ispitan zasebno s boljom izolacijom rubova i donje strane apsorbera što je rezultiralo je boljom stabilnošću mjerenja i točnijim izračunom toplinske učinkovitosti.

Završna mjerenja

Kroz sva preliminarna mjerenja identificirani problemi pružili su povratne informacije koje su omogućilo pripremu i prilagodbu mjerne linije za završna ispitivanja koja su provedena tijekom 2022. godine. Također, određena je i krivulja toplinske učinkovitosti s pripadajućim koeficijentima. Budući da su izmjerene radne točke pri dvije različite vrijednosti reducirane temperaturne razlike, krivulju je moguće definirati kao polinom prvog stupnja. Nadalje, prilikom provedbe numeričkih simulacija uočeno je da takva izvedba polimernog kolektora ne omogućuje predaju topline apsorbiranog sunčevog zračenja vodi duž cijele visine bočne stijenke kanala, već je na određenom dijelu temperatura vode unutar kanala viša od temperature stijenke i okolišnog zraka. To rezultira da na tim određenim dijelovima postoje toplinski gubici što smanjuje toplinsku učinkovitost. Isto tako, toplinska učinkovitost prilikom provedbe preliminarnih ispitivanja je određena za jedan segment površine $A_{kol} = 0,227 \text{ m}^2$. Relativno mala površina može za posljedicu imati veći utjecaj rubnih uvjeta, te je zaključeno da bi završna mjerenja svakako bilo bolje provesti s više segmenata. Iz tog razloga za provedbu završnih mjerenja pripremljena su dva segmenta ukupne površine $A_{kol} = 0,449 \text{ m}^2$ (Slika 25).



Slika 25 Fotografija dijela mjerne linije tijekom provedbe završnih ispitivanja srpanj 2022.

Tijekom mjerenja provedenih u lipnju 2022., za prvu radnu točku (RT1) pri nižoj temperaturi vode na ulazu u kolektor nije bilo moguće postići stacionarno stanje. Prisustvo zraka u sustavu utjecalo je na značajnije varijacije izlazne temperature, iako su bile poduzete potrebne mjere kako bi se iz sustava uklonio zrak. S obzirom na to da su mjerenja ograničena na period dana od 12-15 h obustavljeno je mjerenje prve radne točke, te se odmah pristupilo dodatnom odzračivanju mjerne linije, kako bi bilo moguće provesti mjerenje druge radne (RT2) točke pri višoj temperaturi vode na ulazu u kolektor. S obzirom na prethodni problem sa zrakom u sustavu, ponovno se pristupilo mjerenju radne točke pri nižoj temperaturi vode na ulazu u kolektor. Temperatura na izlazu se nije dovoljno stabilizirala da bi se mogao odrediti period stacionarnog stanja te izračunati toplinska učinkovitost. Nakon ovih mjerenja, odlučeno je provesti još jedan set mjerenja pri prvom vedrom sunčanom danu kako bi se odredila dodatna radna točka za i time odredila krivulja toplinske učinkovitosti. Sljedeća mjerenja provedena su u srpnju 2022 na temelju kojih je određena krivulja učinkovitosti prototipa polimernog solarnog kolektora. Eksperimentalno dobiveni rezultati poslužili su za verifikaciju 3D numeričkih simulacija prototipa kako je opisano u Poglavlju 0. Sve to napravljeno je s ciljem provedbe parametarske analize i daljnje optimizacije konstrukcije polimernog solarnog kolektora.

2.6.3. Zahtjevi norme EN ISO 9806:2017

Norma EN ISO 9806:2017 definira metode ispitivanja za procjenu izdržljivosti, pouzdanosti, sigurnosti i toplinskih karakteristika različitih tipova solarnih toplinskih kolektora. Cilj norme je da solarni kolektori zadovolje specifične zahtjeve vezane uz toplinsku učinkovitost, mehaničku otpornost, otpornost na uvjete okoline i hidrauličke karakteristike. Primjena polimernih materijala u solarnoj tehnici prepoznata je i u spomenutoj norme, te su zbog toga definirani posebni uvjeti ispitivanja zbog niže otpornosti polimernih materijala na visoke temperature i tlakove. Unutar norme propisuju se ispitivanja koja je potrebno provesti kako bi kolektor zadovoljio propisane zahtjeve i ostvario dio uvjeta za dobivanje *Solar Keymark* certifikata. Pojedina potrebna ispitivanja opisana su u nastavku.

Ispitivanje standardne temperature stagnacije

Ovim ispitivanjima se određuje maksimalna temperatura (standardna temperatura stagnacije ϑ_{stg}) koja se javlja u kolektoru kada nema odvođenja topline radnim medijem. Ispitivanja se provode pri standardnim stagnacijskim uvjetima $G_{\text{sun}} = 1000 \text{ W/m}^2 \pm 100 \text{ W/m}^2$ i $\vartheta_{\text{as}} = 30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Određivanje ove temperature moguće je provesti i računski koristeći određene koeficijente krivulje učinkovitosti. U ovom radu standardna temperatura stagnacije izmjerena je za jedan segment te je onda korigirana na standardne uvjete okoliša prema normi. Standardnu temperaturu stagnacije moguće je odrediti na temelju koeficijenata krivulje učinkovitosti prema Jed. (2.61). To je korišteno u slučaju računanja standardne temperature stagnacije za kolektor sa smanjenim toplinskim gubitcima kako je opisano u poglavlju 3.5.4.

$$\vartheta_{\text{stg}} = 1,2 \cdot \left(\vartheta_{\text{as}} + \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4 \cdot \eta_0 \cdot a_2 \cdot G_{\text{sun}}}}{2 \cdot a_2} \right) \quad (2.61)$$

Test izloženosti

Kolektor se izlaže 30 ili 15 dana u slučaju polu-izloženosti s ciljem otkrivanja indikacija starenja materijala. Test može biti vanjski ili unutarnji na solarnom simulatoru. Prilikom izlaganja moraju biti zadovoljeni određeni uvjeti u pogledu minimalne zabilježene vrijednosti sunčevog zračenja i broja sati izloženosti tim razinama zračenja i okolišnoj temperaturi. Uvjeti su propisani u normi. Napravljena su preliminarna mjerenja izloženosti koja su rađena paralelno prilikom provedbe mjerenja toplinske učinkovitosti na zasebnim segmentima. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja završne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

Ispitivanje na vanjske i unutarnje toplinske šokove

Svrha ovog ispitivanja je ustanoviti sposobnost kolektora da izdrži vanjske toplinske šokove koji mogu biti prouzročeni iznenadnim olujama za vrijeme vrućeg sunčanog dana i unutarnje toplinske šokove uslijed strujanja hladnog radnog medija. Prije provedbe ispitivanja kolektor je potrebno izložiti uvjetima okoliša kako je propisano u normi. Nakon 1 sata izlaganja specificiranim uvjetima kolektor se izlaže raspršenim kapljicama vode temperature $10 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ najmanje 15 minuta u slučaju vanjskog toplinskog šoka. U slučaju unutarnjeg toplinskog šoka kroz kolektor s pušta voda temperature $< 25 \text{ }^\circ\text{C}$ pri protoku $0,02 \text{ kg/s}$ po m^2 površine

kolektora. Napravljena su preliminarna mjerenja ispitivanja na vanjske i unutarnje toplinske šokove koja su rađena paralelno prilikom provedbe mjerenja toplinske učinkovitosti na zasebnim segmentima. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja završne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

Ispitivanje propuštanja kiše

Cilj ispitivanja je ustanoviti hoće li dići do propuštanja kiše. Kolektor prvotno mora biti podvrgnut testu izloženosti. Zbog toga što je kolektor napravljen iz jednog komada procesom ekstruzije eventualno propuštanje može biti na spoju segmenata i priključaka. Napravljena su preliminarna mjerenja propuštanja kiše koja su rađena paralelno prilikom provedbe mjerenja toplinske učinkovitosti na zasebnim segmentima. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja završne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje

Ovo ispitivanje se provodi s vodom temperature $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ova ispitivanja se provode samo za kolektore koji su deklarirani kao otporni na smrzavanje ili imaju tzv. konstrukciju *heat-pipe*. Prototip nije deklariran kao otporan na smrzavanje.

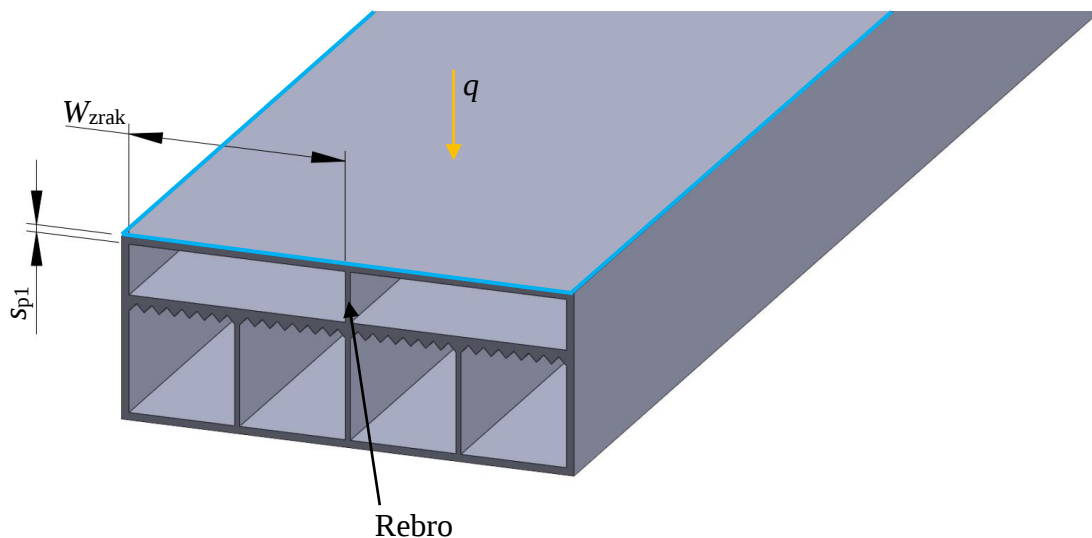
Ispitivanje opterećenja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka

Svrha ispitivanja je otkriti može li apsorber izdržati tlakove koji se mogu javiti tijekom rada. Ukoliko se radi o polimernim materijalima kolektor se podvrgava tlaku koji je 1,5 puta veći od maksimalnog radnog tlaka kojeg definira proizvođač. S obzirom na to da se radi o kolektoru predviđenog za rad u *drain-back* sustavu, ispitivanja se provode na maksimalnoj radnoj temperaturi u trajanju od 1 sat. Provedeno je preliminarno ispitivanje opterećenja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja finalne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

Ispitivanje otpornosti na mehanička opterećenja uslijed djelovanja vanjskog tlaka

Ispitivanja se provode s ciljem određivanja otpornosti kolektora na opterećenje pozitivnog tlaka zbog vjetra ili snijega, te opterećenje negativnog tlaka koji je posljedica uzgonskih sila vjetra. Proizvođač može definirati da je vrijednost maksimalnog opterećenja 0 Pa. Ispitivanje

nije provedeno zbog ograničene količine segmenata za ispitivanje toplinskih karakteristika, već je analiza napravljena na temelju analitičkog proračuna [82]. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja završne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa. Pokrov možemo promatrati kao pravokutnu ploču fiksiranu u svim bridovima (Slika 26).



Slika 26 Prikaz segmenta za potrebe provedbe proračuna čvrstoće pokrova

Za slučaj jednolikog opterećenja po cijeloj ploči moguće je izračunati maksimalno naprezanje na dužem bridu $\sigma_{\max}$ i maksimalni progib $y_{\max}$ koristeći izraze

$$\sigma_{\max} = \frac{-\beta_1 \cdot q \cdot W_{\text{zrak}}^2}{s_{p1}^2} \quad (2.62)$$

$$y_{\max} = \frac{\alpha \cdot q \cdot W_{\text{zrak}}^4}{E \cdot s_{p1}^3} \quad (2.63)$$

Gdje su:

α i β_1 – proračunski koeficijenti koji ovise o omjeru duljine i širine kolektora [82] [-],

q – jednoliko opterećenje na pravokutnu ploču [N/m^2],

E – Youngov modul elastičnosti [N/m^2].

Proračun je proveden za slučaj s i bez rebra. Rebro povoljno djeluje sa stajališta čvrstoće jer služi kao ukruta, smanjujući efektivno širinu ploče što će rezultirati manjim naprezanjima i progibom.

Ispitivanje otpornosti na mehanička opterećenja uslijed udarca

Svrha testa je provjeriti može li kolektor izdržati opterećenje nastalo uslijed udarca npr. tuče. Ispitivanje se provodi koristeći kuglice leda ili čelične kuglice definiranog promjera i mase ispućane na površinu kolektora određenom brzinom (kuglice leda) ili baćene s određene visine(ćelićne kuglice). Isto tako, proizvođać moćže definirati da je vrijednost maksimalnog opterećenja 0 Pa. Provedeno je preliminarno ispitivanje na jednom segmentu polimernog solarnog kolektora. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja završne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa. Za provedbu preliminarnih ispitivanja korišćen je ćelićni cilindar mase 156 g koji je pobrušen ja jednom kraju kako bi se ostvarilo zaobljenje. Cilindar je ispućtan na pokrov kolektora s poćetne visine 0,4 m s korakom od 0,2 m.

Ispitivanje toplinskih karakteristika

Raćuna se trenutaćna toplinska ućinkovitost te se na temelju rezultata definira krivulja toplinske ućinkovitosti koja slućži za usporedbu s ostalim tehnologijama dostupnim na trćištu. U normi su propisani uvjeti koji moraju biti zadovoljeni prilikom ispitivanja u pogledu korišćenja mjerene opreme, kao i metoda proraćune toplinske ućinkovitosti. U istraćživanju su provedena detaljna ispitivanja toplinskih karakteristika prototipa polimernog solarnog kolektora koji je opisan u Poglavlju 2.5.

Ispitivanje hidraulićkih karakteristika

Odrećuje se pad tlaka pri razlićitim protocima radnog medija te se rezultati prikazuju kao funkcija protoka. Kako predloćženi prototip kolektora ima kanale relativno velikih dimenzija oćekivane vrijednosti pada tlaka su male te iz tog razloga nije provedeno ovo ispitivanje. Pad tlaka je izraćunat na temelju numerićkih simulacija i korišćenjem Jed. (2.64) za koju je potrebno poznavati koeficijent trenja ζ u kanalima prototipa. S obzirom na to da se radi o laminarnom strujanju koeficijent trenja nije ovisan o hrapavosti površine već je funkcija *Re* broja (Jed. (2.65)).

$$\Delta p = 0,5 \cdot \zeta \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \rho \cdot w_f^2 \quad (2.64)$$

$$\zeta = \frac{64}{Re} \quad (2.65)$$

2.7. Numeričke simulacije

Analitičkim proračunom koji je pokazan u Poglavlju 2.3 opisana je izmjena topline u pločastom kolektoru. Takav proračun dobro opisuje izmjenu topline konvencionalne geometrije pločastog kolektora. Toplinsku učinkovitost, kao i prosječne temperature pokrova i apsorbera polimernog solarnog kolektora moguće je odrediti uz pomoć istog proračuna uz zadržavanje iste geometrije. Eventualne male konstrukcijske izmjene za koje bi bio primjenjiv proračun su u pogledu debljina pojedinih dijelova kolektora, širina promatranog rebra kolektora, visina razmaka između pokrova i apsorbera, te broj i dimenzije cijevi. Proračunom je također moguće istražiti i utjecaj optičkih karakteristika (propusnost i emisijski faktor selektivnog premaza), kao i utjecaj pogonskih parametara na toplinske karakteristike. Za provedbu proračuna izvedbi koje su značajno različite od one konvencionalnog pločastog kolektora potrebno je koristiti numeričke simulacije. Numeričke simulacije izmjene topline unutar polimernog solarnog kolektora napravljene su korištenjem ANSYS Fluent programskog pakta. Izmjena topline unutar solarnog kolektora je složeni proces koji uključuje zračenje i slobodnu konvekciju u prostoru između apsorbera i pokrova u kojoj se nalazi zrak, provođenje kroz materijal kao i konvektivni prijelaz topline uslijed strujanja radnog medija unutar kanala.

2.7.1. Korišteni numerički modeli za izmjenu topline zračenjem, slobodnom konvekcijom i korišteni model turbulencije

Gubitci zračenjem s površine apsorbera kod konvencionalnog pločastog kolektora smanjeni su upotrebom selektivnog premaza niskog emisijskog faktora. Zbog toga, kod pločastih kolektora udio gubitaka zračenjem je relativno mali. Analizirani polimerni kolektor ne koristi spomenuti premaz te su kod njega gubitci zračenjem u srednjevalnom i dugovalnom infracrvenom području veći. Način modeliranja i izračuna tih gubitaka je od velike važnosti u postupku određivanja toplinskih karakteristika. Unutar programskog paketa FLUENT dostupni su razni modeli zračenja, među kojima se izdvajaju DTRM (*Discrete Transfer Radiation Model*), DO (*Discrete Ordinates*) i S2S (*Surface-to-Surface*) kao relevantni za ovo istraživanje. DTRM model se temelji na algoritmu praćenja zraka (*ray tracing*) i relativno je jednostavan [83]. Povećanje točnosti DTRM modela postiže se korištenjem većeg broja zraka, što rezultira većim zahtjevima za računalnim resursima i duljim vremenom izračuna. Nadalje, značajan nedostatak ovog modela je njegova primjenjivost isključivo u 3D simulacijama. Iako

su u istraživanju korištene 3D simulacije, DTRM model nije dalje razmatran, jer su za parametarsku analizu planirane 2D simulacije kako bi se skratilo vrijeme izračuna i smanjila potreba za računalnim resursima. Odabirom jednog modela zračenja za sve simulacije osigurana je konzistentnost rezultata kroz sve provedene numeričke simulacije. S2S model koristi se za izračun prijenosa topline zračenjem sivih tijela, te se pretpostavlja da je zračenje difuznog karaktera i temelji se na algebri vidnih faktora. Faktori apsorpcije i emisije su uzeti kao neovisni o valnoj duljini. S2S model zračenja temelji se na algebri vidnih faktora. Ovaj model za dugovalno zračenje, zajedno sa SRT (*Solar Ray Tracing*) algoritmom, dostupnog unutar programskog paketa ANSYS FLUENT, kojim se uzima u obzir kratkovalno sunčevo zračenje može se koristiti za 3D numeričke simulacije pločastog kolektora [84]. SRT algoritam proračunava toplinski tok na temelju upadnog sunčevog zračenja i zadanih optičkih karakteristika, te se onda povezuje s rješavačem putem izvorskog člana u energetskeo jednadžbi. S druge strane, apsorbirano kratkovalno sunčevo zračenje može se proračunati na temelju ukupne apsorpcije sunčevog zračenja ($\tau\alpha$) i upadnog sunčevog zračenja. Taj toplinski tok se zatim zadaje kao rubni uvjet i to kao izvorski član u tankom sloju materijala apsorbera. Takav način modeliranja kratkovalnog sunčevog zračenja zajedno sa S2S modelom se može koristiti za analizu prijenosa topline unutar solarnih kolektora [85,86]. Ovakav način modeliranja je interesantan jer osigurava dovoljnu točnost bez korištenja *ray tracing* algoritama za određivanje apsorbiranog sunčevog zračenja. U određenim slučajevima S2S model zračenja može rezultirati netočnim temperaturnim poljima, dok se u istom slučaju DO model pokazao točnijim [87]. DO model zračenja omogućuje analizu kratkovalnog i dugovalnog zračenja te se može koristiti u slučajevima kombiniranog prijenosa topline slobodnom konvekcijom i zračenja [88–90]. Primjenom DO modela moguće je eliminirati potrebu za izračunom apsorbirane energije na način da se upadno sunčevo zračenje izravno primjeni kao rubni uvjet [91]. DO i S2S modeli zračenja se najčešće koriste za analizu toplinskih karakteristika solarnih kolektora. Prednosti S2S modela zračenja su kraće vrijeme izračuna u odnosu na DO ili DTRM model, iako izračun vidnih faktora može zahtijevati nešto više računalnih resursa. Za razliku od S2S modela zračenja, DO model može uzeti u obzir zračenje kroz polupropusnu (*semi-transparent*) stijenku materijala. U ovom radu se u prvoj fazi analize preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora istražuju pojedini modeli za izmjenu topline zračenja. Korišteni modeli za izmjenu topline zračenjem u dugovalnom području su DO i S2S. Kratkovalno sunčevo zračenje se modeliralo kao izvor u tankom sloju

materijala ili se direktno zadala vrijednost sunčevog zračenja na površini pokrova, što je moguće uz primjeni *semi-transparent* rubnog uvjeta unutar DO modela zračenja.

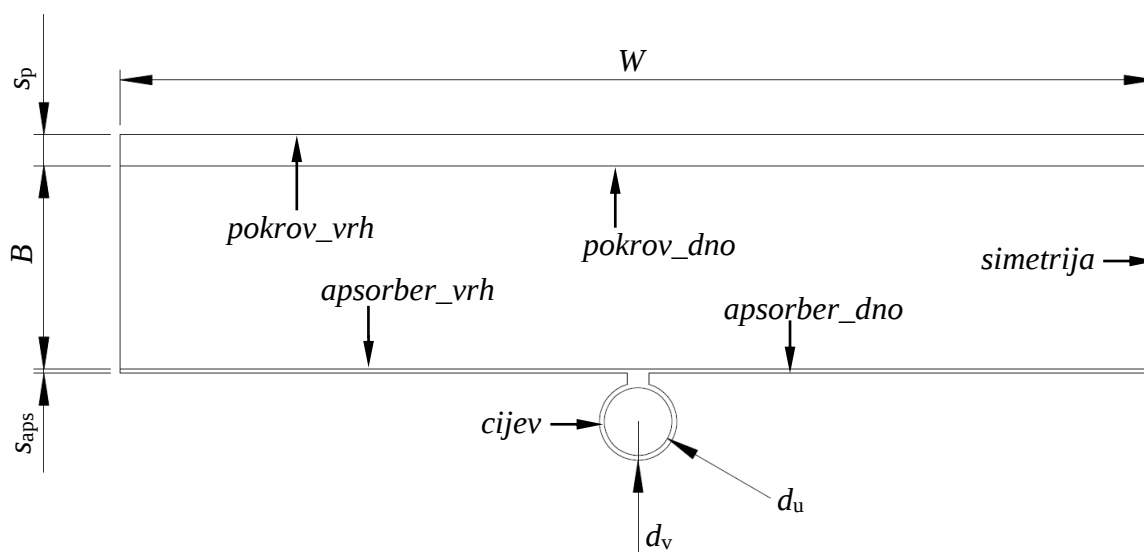
Slobodna konvekcija u prostoru između pokrova i apsorbera u svim provedenim numeričkim simulacijama pod Boussinesqovom pretpostavkom temperaturne ovisnosti gustoće zraka o temperaturi. Zbog uvedene pretpostavke model je ograničen na slučajeve kada su razlike temperature fluida i stijenke dovoljno male što je i bio slučaj u svim provedenim simulacijama. Također, ova pretpostavka je valjana za slučaj laminarnog strujanja zraka, odnosno kada je Ra broj $< 10^8$. Osim zračenja i slobodne konvekcije u 3D simulacijama javlja se i prisilna konvekcija uslijed strujanja vode kroz cijevi/kanale kolektora. Iz tog razloga je primijenjen $k-\omega$ SST model turbulencije. Ovaj model je odabran zbog boljeg predviđanja graničnog sloja što je važno za pravilno modeliranje izmjene topline u blizini stijenke. U Tablica 5 prikazani su korišteni parametri i podrelaksacijski faktor u svim provedenim numeričkim simulacijama. Detalji o pojedinim generiranim numeričkim domenama, kao i korištenim modelima za izmjenu topline i rubnim uvjetima dani su u nastavku ovog poglavlja.

Tablica 5 Pregled korištenih parametara i podrelaksacijskih faktora u provedenim numeričkim simulacijama

Povezivanje polja tlaka i brzine	SIMPLE
Interpolacijska shema tlaka	PRESTO
Scheme i red točnosti – ostali parametri	programski postavljeno
Model turbulencije	$k-\omega$ SST
Podrelaksacijski faktori:	
<i>Pressure</i>	0,3
<i>Density</i>	0,7
<i>Body Forces</i>	0,8
<i>Momentum</i>	0,5
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	0,8
<i>Specific Dissipation Rate</i>	0,8
<i>Turbulent Viscosity</i>	0,8
<i>Energy</i>	0,9
<i>Discrete Ordinates</i>	0,9

2.7.2. Računalne domene pri provedbi inicijalnih numeričkih simulacija

Numeričke simulacije napravljene su u dvije faze prateći tako tijekom razvoja polimernog solarnog kolektora. U prvoj fazi simulacije su korištene za analizu preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora. Svrha te analize je definiranje geometrije poprečnog presjeka na temelju koje će biti proizveden prototip polimernog solarnog kolektora. Iz tog razloga verifikacije numeričkih modela izmjene topline su prvo napravljene na računalnoj domeni konvencionalnog pločastog kolektora (Slika 27). Rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim podacima dostupnim u literaturi, ali i korištenjem prethodno opisanog analitičkog proračuna. Pločasti kolektor je podijeljen na jednake dijelove širine W . Računalna domena (RD-1-Metalni) još obuhvaća pokrovno staklo i ploču apsorbera debljine s_p , odnosno s_{aps} . Zatvoreni prostor u kojem se nalazi zrak je visine B . Cijevi kroz koje struji voda su vanjskog promjera d_v , dok je za izračun koeficijenta prijelaza topline relevantan unutarnji promjer d_u . Na slici su također prikazani nazivi bridova za koje je potrebno zadati rubne uvjete. Podaci o dimenzijama korištenim za pojedinu domeni prikazani su u Tablica 6.



Slika 27 Računalna domena 1 (RD-1-Metalni), pločasti solarni kolektor s pripadajućim dimenzijama

Prve 2D numeričke simulacije napravljene na RD-1-Metalni poslužile su za verifikaciju modela za izmjenu topline zračenjem (M1, M2, M3). U svim korištenim modelima slobodna konvekcija modelirana je na isti način (Boussinesqova aproksimacija) te je korišten isti model turbulencije, kao i svi ostali parametri numeričke simulacije. Razlika između pojedinih

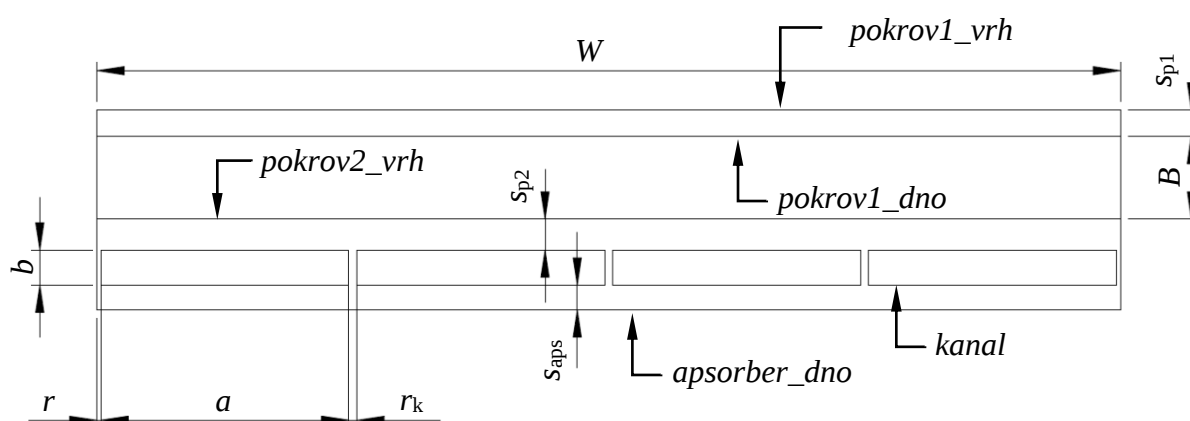
modela je u načinu modeliranja kratkovalnog i dugovalnog zračenja. Korišteni rubni uvjeti prikazani su u Tablica A.2.

Model 1 – kratkovalno sunčevo zračenje modelirano je kao izvor topline koji se zadaje kao rubni uvjet u tankom sloju ploče apsorbera. Proračun apsorbiranog sunčevog zračenja temelji se na analitičkom proračunu ukupnog faktora apsorpcije ($\tau\alpha$) pokazanog u poglavlju 2.4.2. Za modeliranje izmjene topline zračenjem u srednjevalnom i dugovalnom spektru valnih duljina $\lambda = 2,5 - 1000 \mu\text{m}$ korišten je DO model zračenja.

Model 2 – kratkovalno sunčevo zračenje modelirano je kao izvor topline na isti način kao i M1. Za modeliranje izmjene topline zračenjem u srednjevalnom i dugovalnom spektru valnih duljina $\lambda = 2,5 - 1000 \mu\text{m}$ korišten je S2S model zračenja.

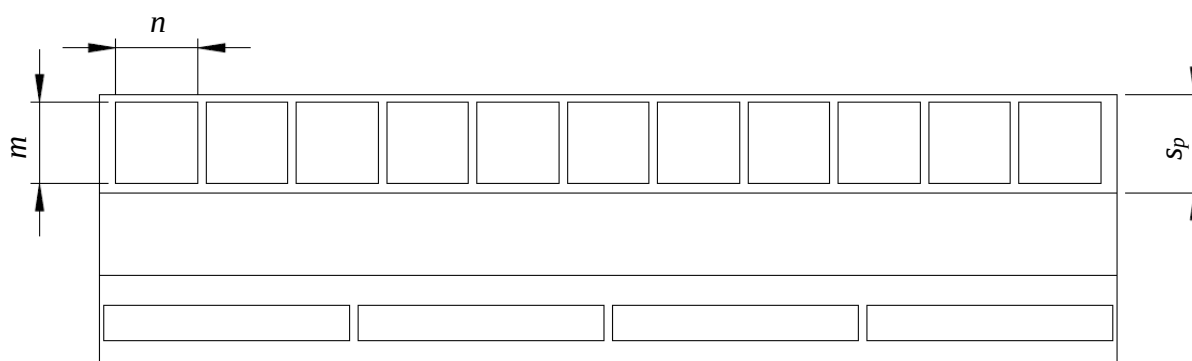
Model 3 – kratkovalno sunčevo zračenje u spektru valnih duljina $\lambda = 0,3 - 2,5 \mu\text{m}$, te izmjena topline zračenjem u srednjevalnom i dugovalnom spektru valnih duljina $\lambda = 2,5 - 1000 \mu\text{m}$ modelirano je korištenjem DO modela.

U sljedećem koraku istraživanja provedena je analiza preliminarne izvedbe prototipa polimernog solarnog kolektora. U prvom koraku provedena je simulacija varijante polimernog kolektora (RD-1-Polimerni) kada bi konstrukcija bila istovjetna metalnom pločastom kolektoru (RD-1-Metalni prikazan na Slika 27). Računalna domena preliminarne izvedbe kolektora (RD-2) prikazana je na Slika 28.



Slika 28 Računalna domena 2 (RD-2), preliminarne izvedba polimernog solarnog kolektora s pripadajućim dimenzijama

Kod ove izvedbe je karakteristično da se kanali kroz koje struji radni medij nalaze unutar apsorbera, čime je osigurana veća kontaktna površina između polimernog materijala i vode. Pripadajuće dimenzije RD-2 su prikazane u Tablica 6. Dimenzija pravokutnog kanala a i b su odabrane na način da je hidraulički promjer približno jednak unutarnjem promjeru cijevi konvencionalnog kolektora, što bi rezultiralo istim vrijednostima koeficijenta prijelaza topline pri istim brzinama strujanja kroz pojedini kanal. Isto tako napravljen je izračun koeficijenata prijelaza topline i pada tlaka za različite odnose širine i visine kanala. Nedostatak ovakve izvedbe je u tome da sunčevo zračenje mora proći kroz dodatni sloj materijala (dva pokrova), jer se apsorber nalazi s donje strane, što će efektivno smanjiti ukupno apsorbirano sunčevo zračenje. Crni premaz visokog faktora apsorpcije kratkovalnog sunčevog zračenja ($> 95\%$) se nalazi s donje strane kolektora (izvan kanala) zbog trenutačnih ograničenja u proizvodnom procesu. U parametarskoj analizi se razmatra slučaj da je apsorpcijski premaz nanesen na donju stijenku kanala. Debljina prvog pokrova s_{p1} je identična kao i kod pločastog kolektora, dok je razmak između dva pokrova B manji kod polimernog kolektora. Umjesto jednoslojne ploče polimerni kolektor je moguće izvesti sa saćastom pločom pokrova. Prednost takve konstrukcije je veća toplinska učinkovitost u odnosu na izvedbu s jednom pločom zbog smanjenih toplinskih gubitaka. Zrak koji se nalazi u kanalima pokrova služi kao izolator i smanjuje konvektivne toplinske gubitke. Računalna domena (RD-3) kojim je istražen utjecaj postavljanja saćaste ploče je prikazana na Slika 29. Sve dimenzije domene RD-3, osim debljine pokrova, su istovjetne domeni RD-2.



Slika 29 Računalna domena 3 (RD-3), preliminarna izvedba polimernog solarnog kolektora s pripadajućim dimenzijama, izvedba s višeslojnim pokrovom

Tablica 6 Dimenzije pojedinih dijelova numeričkih domena RD-1 do RD-3

Dimenzije [mm]	RD-1-Metalni	RD-1-Polimerni	RD-2	RD-3
W	94	94	124	124
B	21	21	10	10
$s_p (m \times n)^a$	3,2	3,2	3 i 3,75	12 (10 x 10)
s_{aps}	0,4	0,4	3	3
$d_v \times d_u$ ili $a \times b$	8 x 7	8 x 7	4,25 x 30	4,25 x 30
r, r_k	-	-	1, 1,5	1, 1,5

^a($m \times n$) se odnosi na dimenzije kanala sa zrakom unutar višeslojnog pokrova

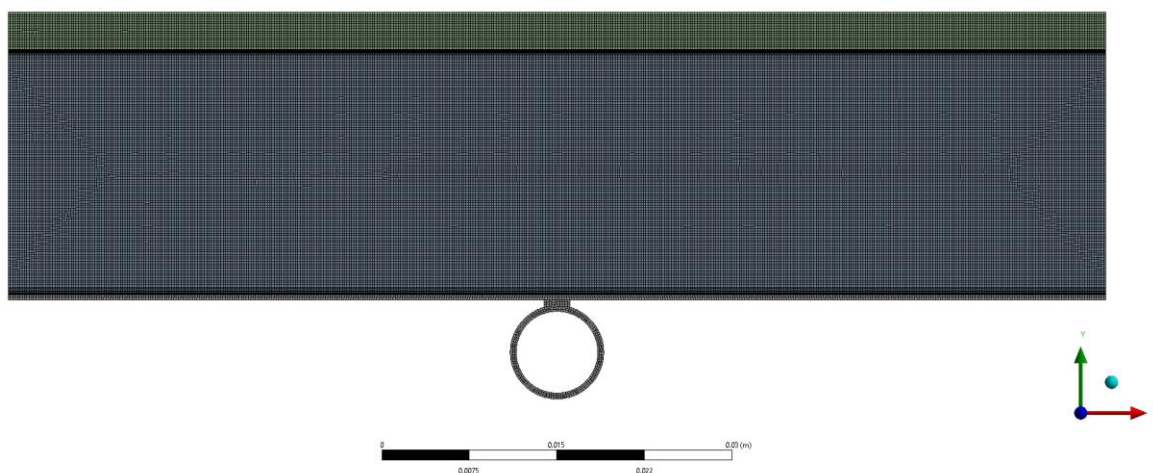
U Prilogu A su prikazane tablice (Tablica A.2 i Tablica A.3) sa skupnim podacima o korištenim rubnim uvjetima pri provedbi numeričkih simulacija pločastog kolektora sa svrhom verifikacije modela izmjene topline, kao i simulacija s ciljem preliminarne ocjene predloženog konstrukcijskog rješenja prototipa polimernog solarnog kolektora.

2.7.3. Diskretizacija domena korištenih pri provedbi preliminarne simulacije

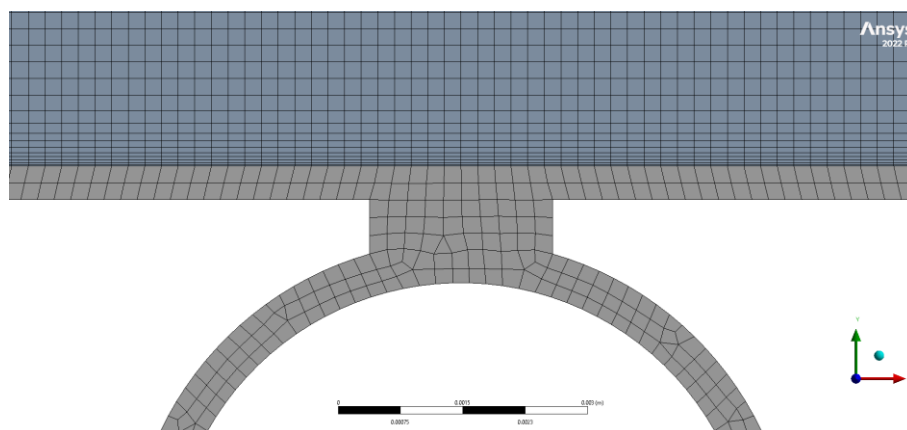
Prostorne domene korištene prilikom provedbe preliminarne simulacije diskretizirane su korištenjem ANSYS *Meshing* programa dostupnog unutar ANSYS paketa. Prikaz diskretizirane računalne domene RD-1-Metalni i RD-1-Polimerni je na Slika 30. Domena je diskretizirana s ukupno 64 707 elemenata pretežno kvadratnog oblika. Detalj generirane mreže uz cijev i stijenku apsorbera prikazan je na Slika 30 b), dok je na Slika 30 c) prikazana mreža uz stijenku pokrova. Generirana mreža računalne domene RD-2 prikazan je na Slika 31 a), dok je na Slika 31 b) prikazana detalj generirane mreže uz stijenske pokrova i sami rub kolektora. Slično, na Slika 32 a) je prikazana generirana mreža u slučaju izvedbe s višeslojnim pokrovom (RD-3) zajedno s detaljima prikaza generirane mreže uz stijenske pokrova i rub kolektora (Slika 32 b)). Na Slika 32 c) je prikazan detalj generirane mreže u kanalima višeslojne ploče. Svi statistički parametri za pojedine generirane mreže dani su u Tablica 7. Za sve provedene preliminarne simulacije napravljen je test neovisnosti mreže praćenjem prosječne temperature i brzine strujanja na domeni zraka.

Tablica 7 Statistički podaci generiranih mreža korištenih u provedbi preliminarne simulacije

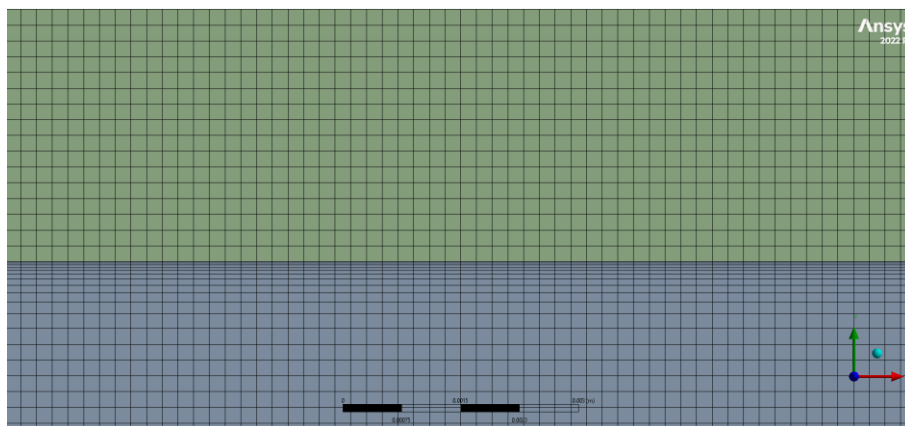
Parametar	RD-1 (metalni i polimerni)	RD-2	RD-3
Broj elemenata	67 477	68 159	127 288
Veličina elementa	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Tip kontrolnih volumena	Pretežno kvadrati	Pretežno kvadrati	Pretežno kvadrati
<i>Orthogonal quality</i>			
avg.	0,999	0,979	0,959
max.	1,000	1,000	1,000
st. dev.	0,003	0,055	0,079
<i>Skewness</i>			
avg.	0,003	0,061	0,099
max.	0,443	0,554	0,510
st. dev.	0,016	0,117	0,157



a) Prikaz cijele diskretizirane prostorne domene

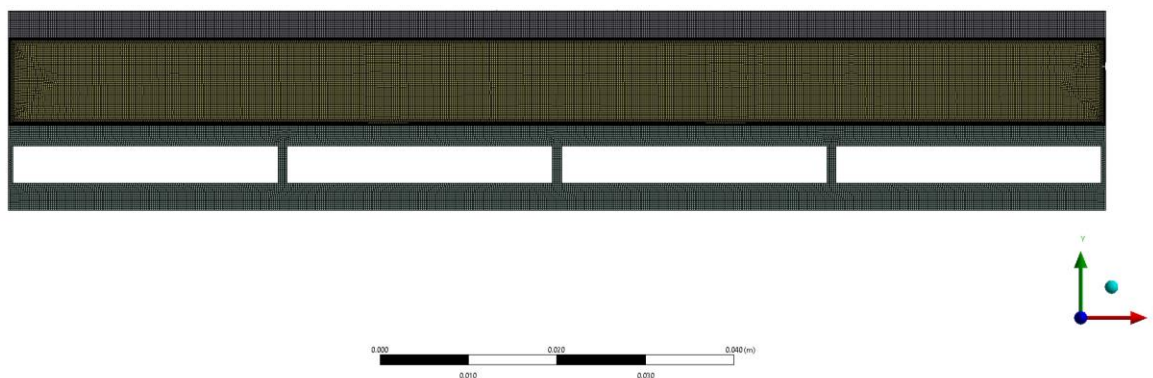


b) Detalj prikaza mreže uz cijevi i apsorber

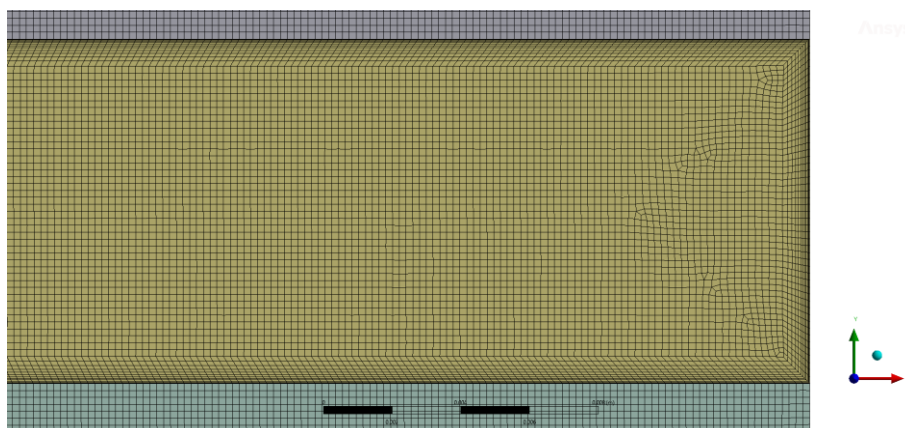


c) Detalj prikaza mreže uz pokrov

Slika 30 Prikaz generirane mreže za računalne domene RD-1-Metalni i RD-Polimerni-1

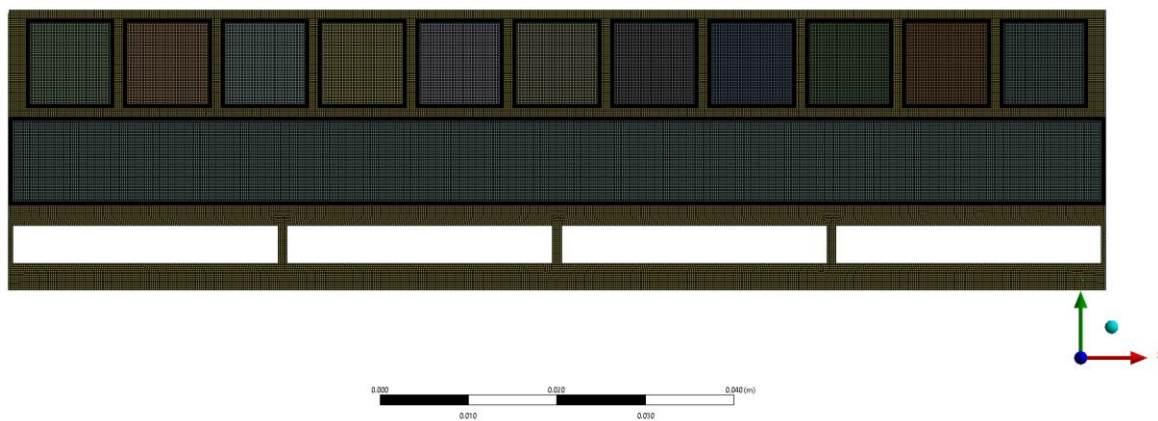


a) Prikaz cijele diskretizirane prostorne domene

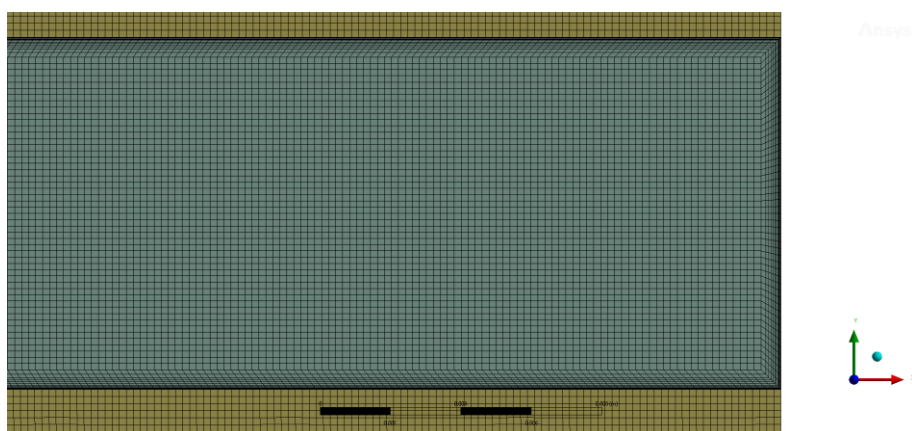


b) Detalj prikaza mreže uz dva pokrova i rub kolektora

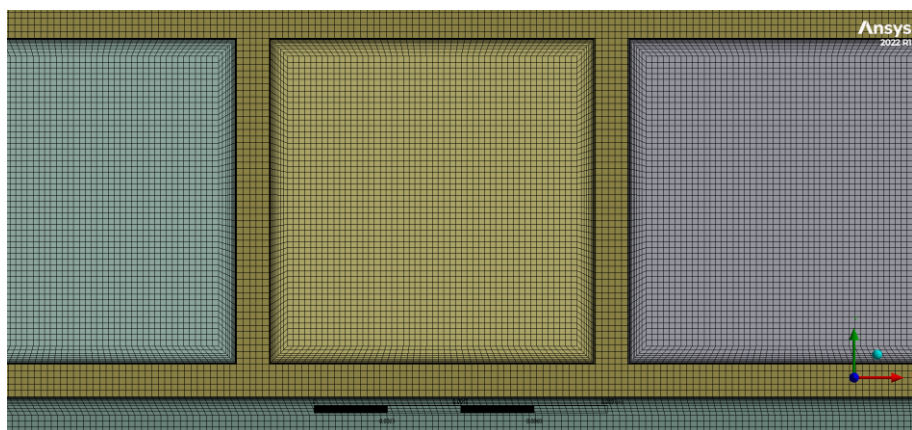
Slika 31 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu RD-2



a) Prikaz cijele diskretizirane prostorne domene



b) Detalj prikaza mreže uz dva pokrova i rub kolektora



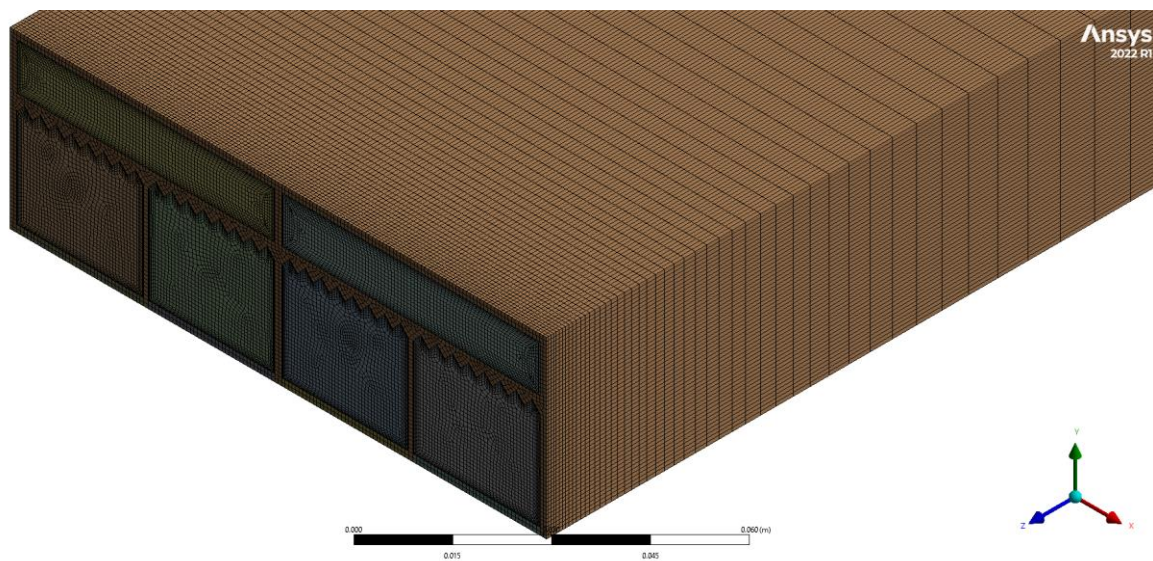
b) Detalj prikaza mreže kanala višeslojne ploče

Slika 32 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu RD-3

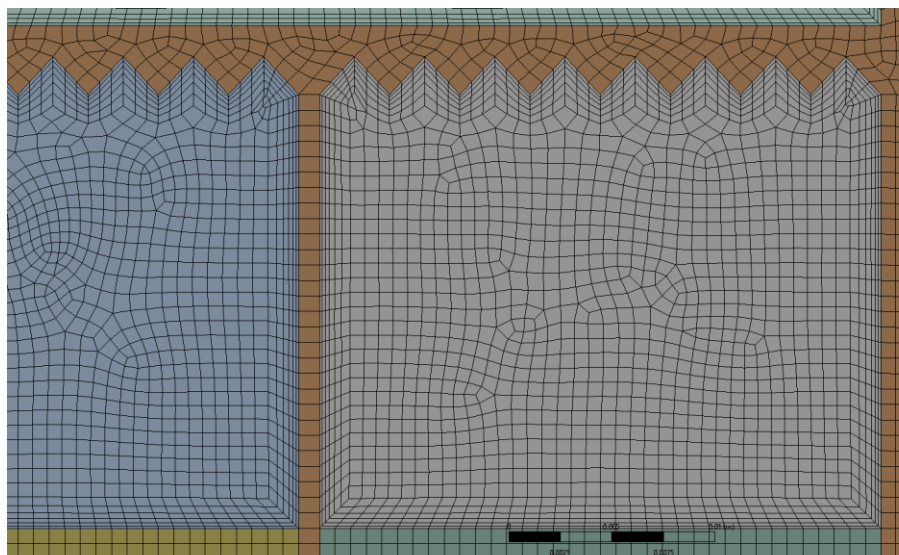
2.7.4. Diskretizacija domene prototipa polimernog solarnog kolektora

Nakon provedenih preliminarnih 2D simulacija, čiji je cilj bio verifikacija numeričkih modela izmjene topline, te analiza preliminarne izvedbe konstrukcije polimernog solarnog kolektora, predložena je geometrija polimernog kolektora na temelju koje je izrađen prototip. Za ovu geometriju napravljene su 3D simulacije kako bi se detaljno istražio proces izmjene topline, što nije bilo moguće u potpunosti analizirati u 2D modelu. Međutim, s obzirom na to da 3D simulacije zahtijevaju značajne računalne resurse i dulje vrijeme izračuna, za potrebe parametarske analize odlučeno je koristiti 2D simulacije na poprečnom presjeku prototipa. Prethodno je napravljena usporedba 2D i 3D modela te nisu ustanovljene značajnije razlike (Poglavlje 0), što opravdava korištenje 2D simulacija za potrebe parametarske analize. Time je moguća brža evaluaciju različitih konstrukcijskih i radnih parametara. Diskretizacija prostornih domena korištenih za 3D i 2D simulacije opisana je u ovom poglavlju.

Prostorna domena diskretizirana je korištenjem ANSYS *Meshing* programa dostupnog unutar ANSYS paketa. Generirane su ukupno dvije mreže prototipa polimernog solarnog kolektora, jedna za stvarno proizvedeni prototip (Geometrija 1), a druga za idealni CAD model definiran za proizvodnju prototipa putem postupka ekstruzije (Geometrija 2). Opis geometrija i podaci o korištenim dimenzijama domene za generiranje mreže kontrolnih volumena dani su u Poglavlju 2.5. Mreža je generirana korištenjem *Sweep* metode pri čemu se prvo generira domena na 2D poprečnom presjeku na ulazu u kolektor. Tako generirana 2D mreža se zatim pomiče duž kolektora u smjeru strujanja. Prilikom generiranja računalne domene definirane su dvije glavne varijable koje će utjecati na veličinu mreže, a to su veličina elementa na 2D presjeku i broj podjela u smjeru strujanja. Prikaz generirane mreže Geometrije 1 je na Slika 33. Domena je diskretizirana s ukupno $N = 2\,006\,080$ kontrolnih volumena pretežno heksaedara. Kako bi se optimizirala mreža i smanjio ukupni broj elemenata te skratilo vrijeme računanja, mreža je napravljena gušća uz krajeve kolektora, dok su elementi postupno povećavani (rastegnuti) u smjeru strujanja. Statistički parametri generirane mreže konačnih volumena Geometrije 1 i 2 su dani u Tablica 8. U području uz stijenku kanal s vodom korištena je finija mreža, što je potrebno zbog detaljnije analize izmjene topline na stijenkama kanala. Generirana mreža Geometrije 2 je slična kao i ona za Geometriju 1 prikazana na Slika 33, te iz tog razloga nije zasebno prikazana.



a) Izometrijski prikaz



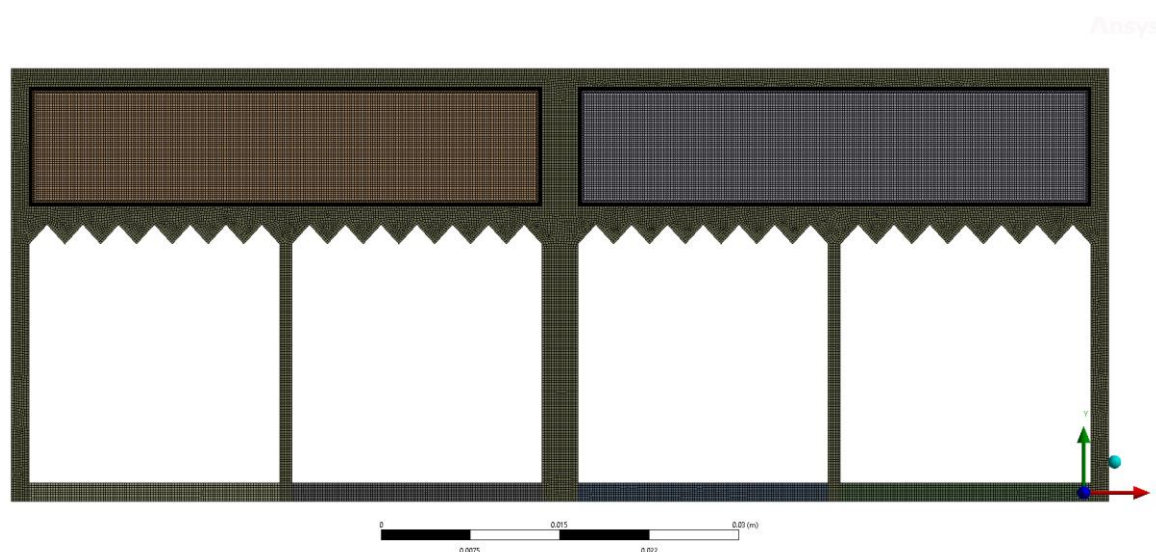
b) Detalj prikaza mreže uz stijenke kanala

Slika 33 Prikaz generirane mreže za računalnu domenu Geometrije 1, broj kontrolnih volumena $N = 2\,006\,080$

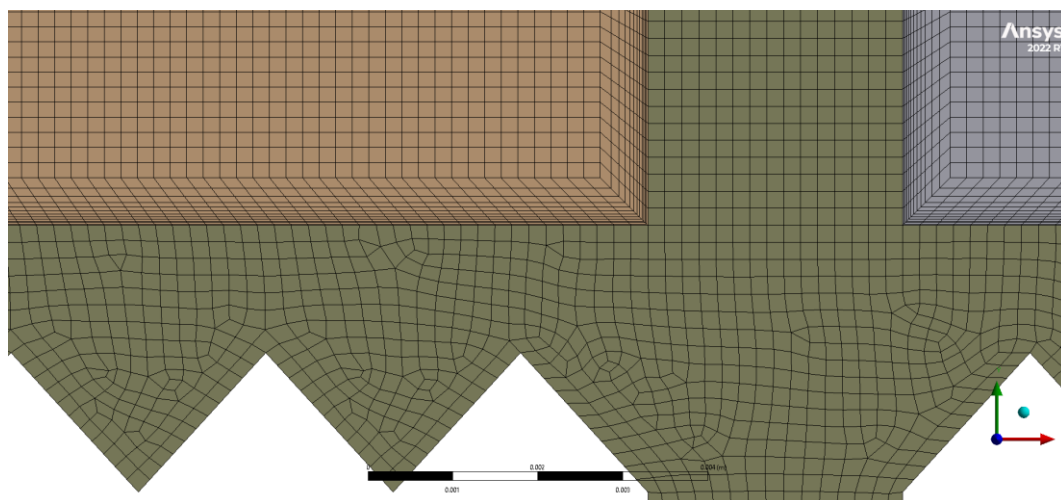
Tablica 8 Statistički podaci generiranih mreža za Geometrije 1 i 2 (3D simulacije)

Parametar	Geometrija 1	Geometrija 2
Broj kontrolnih volumena	2 006 080	1 927 360
Veličina elementa	0,75 mm	0,75 mm
Broj elemenata u smjeru strujanja	160	160
Tip kontrolnih volumena	Pretežno heksaedri	Pretežno heksaedri
<i>Orthogonal quality</i>		
avg.	0,929	0,918
max.	1,000	1,000
st. dev.	0,067	0,084
<i>Skewness</i>		
avg.	0,205	0,217
max.	0,718	0,635
st. dev.	0,102	0,139

Parametarska analiza provedena je ne temelju 2D numeričkih simulacija. Za to je generirana zasebna mreža na poprečnom presjeku Geometrije 2 što je i pokazano na Slika 34 a). Računalna domena je prikazana na Slika 21 u Poglavlju 2.5. Na Slika 34 b) prikazan je detalj generirane mreže uz stijenku kanala sa zrakom. Za slučaj kada je razmak između dva pokrova $B = 10$ mm domena je diskretizirana s ukupno 53 180 elemenata. U slučaju kada je razmak između dva pokrova $B = 20$ i 30 mm generirana mreža je ista s jedinom razlikom u ukupnom broju elemenata, te iz tog razloga nije zasebno prikazana. Svi statistički podaci za generirane mreže koje su korištene u parametarskoj analizi dani su u Tablica 9. U Tablica A.4 prikazani su dani rubni uvjeti korišteni za provedbu 3D i 2D simulacija u prototipa polimernog solarnog kolektora.



a) Prikaz cijele prostorne domene



b) Detalj prikaza mreže uz stijenke kanal sa zrakom

Slika 34 Prikaz računalne domene Geometrije 2 korištena pri provedbi 2D simulacija za potrebe parametarske analize, $B = 10 \text{ mm}$

Tablica 9 Statistički podaci generiranih mreža korištenih u parametarskoj analizi (2D simulacije)

Parametar	Geometrija 2 – $B = 10 \text{ mm}$	Geometrija 2 – $B = 20 \text{ mm}$	Geometrija 2 – $B = 30 \text{ mm}$
Broj elemenata	54 694	79 787	105 489
Veličina elementa	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Tip kontrolnih volumena	Pretežno kvadrati	Pretežno kvadrati	Pretežno kvadrati
<i>Orthogonal quality</i>			
avg.	0,967	0,972	0,977
max.	1,000	1,000	1,000
st. dev.	0,069	0,065	0,061
<i>Skewness</i>			
avg.	0,092	0,077	0,065
max.	0,595	0,600	0,617
st. dev.	0,144	0,136	0,129

3. REZULTATI I ANALIZA

3.1. Određivanje optičkih svojstva pokrova i apsorbera

Faktor propusnosti pod upadnim kutom 0° izmjeren je za 3 polimerna materijala (PC, PMMA i PVC-C) različitih proizvođača. Koristeći analitičku metodu opisanu u Poglavlju 2.4 moguće je izračunati koeficijent apsorpcije μ na temelju eksperimentalno određenih vrijednosti faktora propusnosti. Rezultati mjerenja, uz izračunate faktore propusnosti, refleksije i apsorpcije prikazani su tablično (Tablica 10). Vrijednosti indeksa loma n i koeficijenta prigušenja k korištenih u proračunu preuzete su iz literature (Tablica A.1).

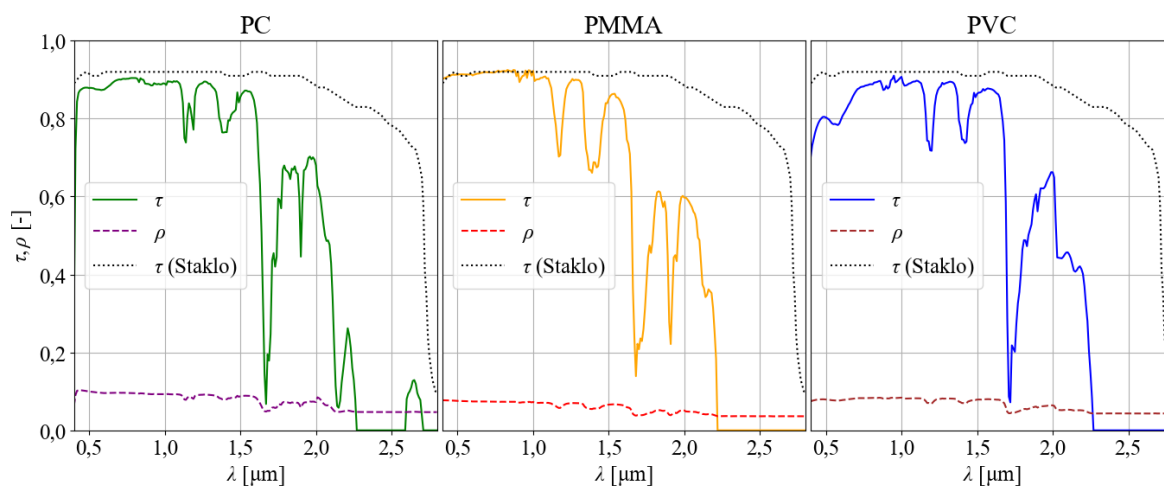
Tablica 10 Optička svojstva polimernih materijala pri upadnom kutu od 0° , usporedba s podacima iz literature [72, 73]

Materijal	n [-]	s [mm]	$\tau_{\text{izmjereno}}$ [%]	μ [1/m]	ρ [%]	α [%]	$\tau_{\text{literatura}}$ [%]	$\Delta\tau$ [%]	$\rho_{\text{literatura}}$ [%]	$\Delta\rho$ [%]
PC	1,578	3	83,24 %	27,465	8,88 %	7,88 %		4,27		0,08
	1,578	3	80,97 %	36,643	8,68 %	10,35 %	78,97	2,00	8,80	-0,12
	1,578	3	82,09 %	32,083	8,78 %	9,13 %		3,12		-0,02
PMMA	1,487	3	85,56 %	26,327	6,87 %	7,57 %	80,87	4,69	6,73	0,14
PVC-C	1,537	3	79,05 %	48,345	7,53 %	13,42 %				
	1,537	3	88,40 %	11,206	8,30 %	3,30 %	b.p.	-	b.p.	-
	1,537	5	76,11 %	36,565	7,31 %	16,58 %				

b.p. – bez podatka

Usporedbom rezultata za pojedini materijal, vidljivo je da postoji razlika kod izmjerenih vrijednosti faktora propusnosti između uzoraka ovisno o dobavljaču. Kod PC uzoraka ta je razlika manja od 3 %, dok kod PVC-C uzoraka ta je razlika nešto izraženija (≈ 12 %). Za PMMA je ispitan samo jedan uzorak. Pri istoj vrijednosti indeksa loma n , razlika u izmjerenoj vrijednosti faktora propusnosti navise će se odraziti na koeficijent prigušenja μ , a time i na izračunati faktor apsorpcije. Vrijednost faktora refleksije će u tom slučaju biti relativno konstantna. Za sve analizirane materijale moguće je izračunati faktore propusnosti, refleksije i apsorpcije koristeći podatke o indeksu loma n i koeficijenta prigušenja k dostupne u literaturi u području valnih duljina $\lambda = 0,4 - 2,80 \mu\text{m}$. Izračunati faktori propusnosti i refleksije za

pojedini materijal prikazani su na dijagramima na Slika 35. Iz dijagrama se vidi da je sva tri materijala pokazuju sličan trend kretanja u prikazanom području valnih duljina. Također, u istom dijagramu je prikazana i potpunost stakla. U VIS području svi materijali imaju relativno visoke vrijednosti faktora propusnosti. Veće razlike u odnosu na staklo nastaju u NIR području gdje se polimernim materijalima značajnije smanjuje propusnost. Na temelju ovih podataka moguće je izračunati ponderiranu srednju vrijednost faktora propusnosti, kako bi se u obzir uzela spektralna raspodjela sunčevog zračenja. Izračunate vrijednosti faktora propusnosti i refleksije iz literature uspoređene su s onima dobivenim eksperimentalnim putem koristeći proceduru opisanu u Poglavlju 2.4. Odstupanja su manja od 5 %, što opravdava korištenje ove metode u svrhu određivanja optičkih svojstava PVC-C.



Slika 35 Izračunate vrijednosti faktora propusnosti za PC, PMMA, PVC u području valnih duljina $\lambda = 0,4 - 2,80 \mu\text{m}$ [60, 72, 73]

Budući da u literaturi nisu dostupni podaci o faktoru propusnosti za PVC-C u ovisnosti o valnoj duljini, na temelju prikazanog za pretpostaviti je da će spektralna zavisnost biti slična kao za PVC. Iako je za razne primjene korisno poznavati optička svojstva u ovisnosti o valnoj duljini, za praktične inženjerske proračune apsorbiranog sunčevog zračenja pretpostavlja se da su optička svojstva neovisna o valnoj duljini. PVC-C uzorak br. 2 je odabran kao materijal koji će biti korišten za izradu prototipa zbog visoke vrijednosti faktora propusnosti ($\tau = 88,40$ % za debljinu materijala $s = 3$ mm). Uz eksperimentalno određenu vrijednost koeficijenta apsorpcije $\mu = 11,21$ 1/m izračunati su faktori refleksije i apsorpcije, koji iznose $\rho = 8,30$ %

odnosno $\alpha = 3,30$ %. Apsorbirana energija sunčevog zračenja u pojedinim dijelovima kolektora prikazana je u Tablica 11. U tablici je također prikazana i vrijednost umnoška ($\tau\alpha$) koji se koristi u proračunu ukupne apsorpcije sunčevog zračenja (Jed. (2.54)). Ukupna apsorpcija prototipa na ploči apsorbera iznosi ($\tau\alpha$) = 77,51 %, dok se u pokrovu 1 i 2 apsorbira 1,67 %, odnosno 1,77 %. Rezultati su izračunati uz pretpostavku faktora apsorpcije premaza apsorbera od 95 %. Za staklo su korištene vrijednosti indeksa loma $n = 1,526$ i koeficijenta apsorpcije $\mu = 4$ 1/m. Vrijednosti prikazane ovdje korištene su za proračun toplinskih izvora (Tablica A2) koji se onda koristio u numeričkim simulacijama za modeliranje kratkovalnog sunčevog zračenja.

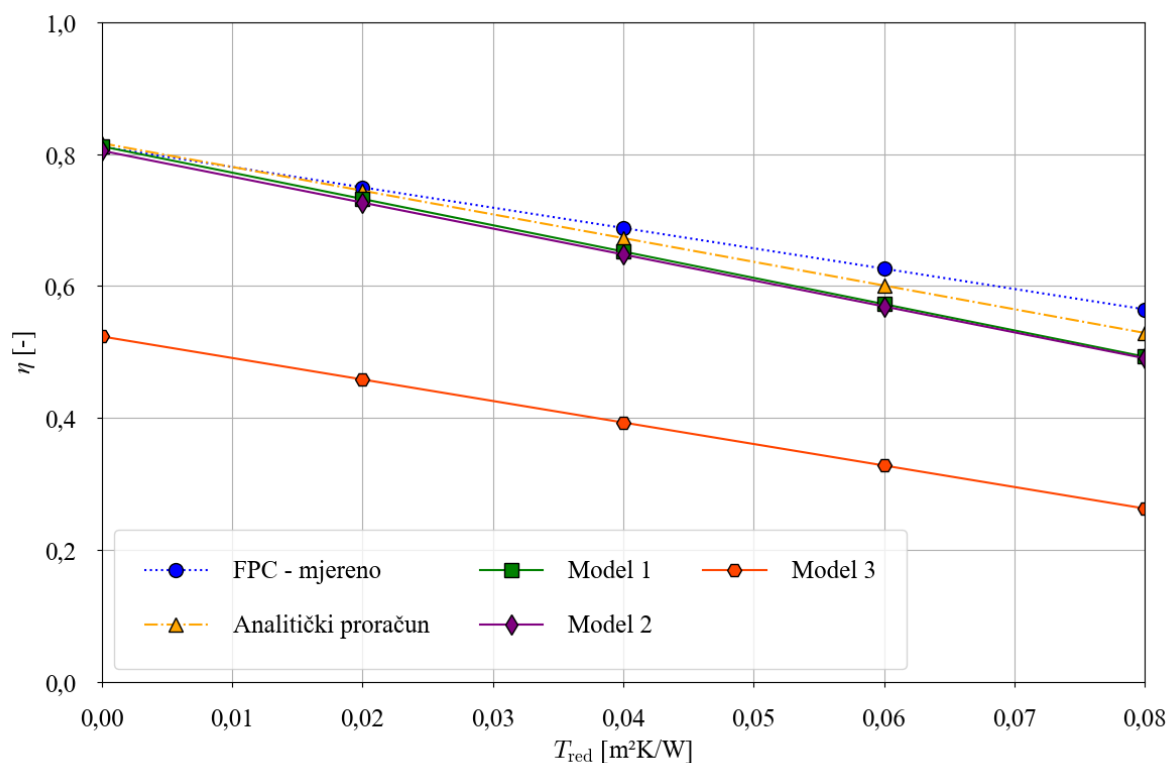
Tablica 11 Apsorpcija sunčevog zračenja u pojedinim dijelovima prototipa za različite računalne domene korištene pri provedbi numeričkih simulacija

Domena	s [mm]	τ	α [%]	($\tau\alpha$)
RD-1 (Metalni i polimerni)				
Pokrov	3,2	90,52	1,27	-
Apsorber	0,4	-	-	86,68
RD-2				
Pokrov 1	3,2	88,40	3,30	-
Pokrov 2	3,75	78,01	-	3,43
Apsorber	3	-	-	74,95
Geometrija 1 i 2				
Pokrov 1	1,5	89,89	1,67	-
Pokrov 2	2,32	-	-	1,77
Apsorber	1,5	-	-	77,51

3.2. Verifikacija analitičkih i numeričkih modela izmjene topline u kolektoru

U ovom poglavlju su prikazani rezultati analitičkog proračuna pločastog solarnog kolektora koji se koriste u svrhu verifikacije numeričkih modela izmjene topline. Proračun je opisan u Poglavlju 2.3. Analitičkim proračunom dobivene su vrijednosti toplinske učinkovitosti za različite vrijednosti ulazne temperature fluida, a sve pri konstantnoj insolaciji i temperaturi okolišnog zraka. Na temelju toga moguće je regresijskom analizom dobiti funkcijsku ovisnost toplinske učinkovitosti o reduciranoj temperaturnoj razlici. Uz pomoć tako određenih koeficijenta krivulje moguće je napraviti usporedbu rezultata dobivenih analitičkim

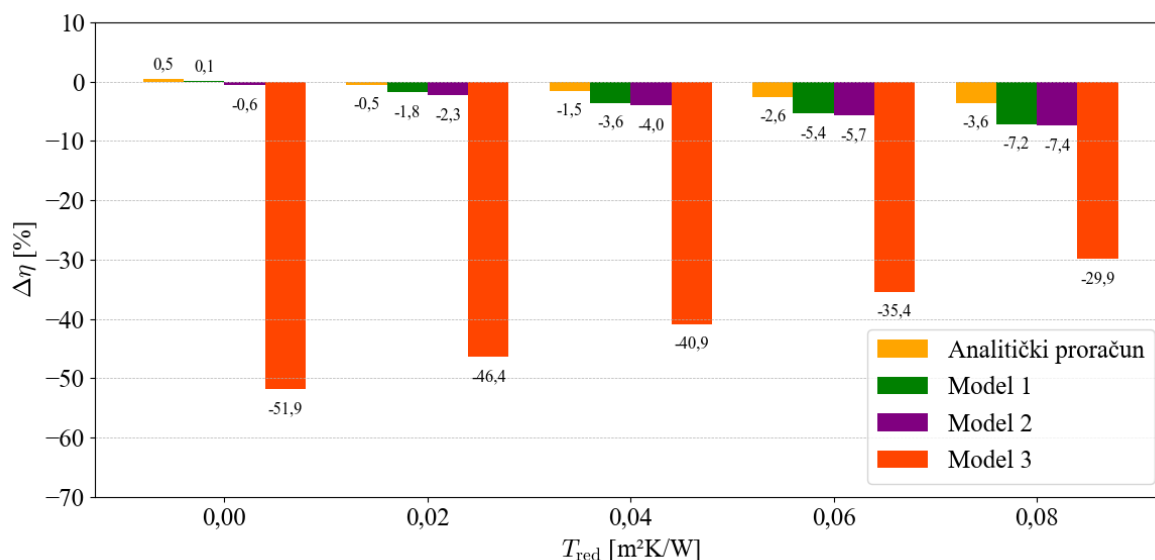
proračunom i mjerenih podataka dostupnih u [86]. Na isti način su određene krivulje učinkovitosti dobivene numeričkim simulacijama na RD-1-Metalni s različitim modelima izmjene topline (Slika 36). Detalji o korištenim numeričkim modelima izmjene topline i opis računalnih domena su dani u Poglavlju 2.7.



Slika 36 Krivulje učinkovitosti pločastog solarnog kolektora određene analitičkim proračunom i numeričkim simulacijama (RD- 1-Metalni), usporedba s mjerenim podacima

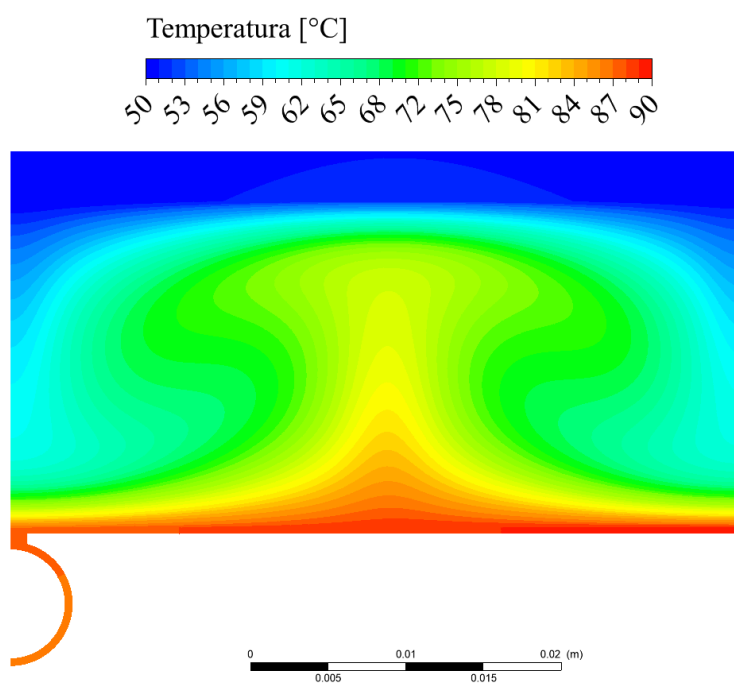
Odstupanja svih prikazanih modela, kao i analitičkog proračuna pokazuju sličan trend za sve vrijednosti reducirane temperaturne razlike T_{red} (Slika 37). Pri vrijednostima $T_{red} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$ toplinska učinkovitost analitičkog proračuna je nešto veća u odnosu na mjerene podatke, dok Model 1 i 2 daju neznatno veću toplinsku učinkovitost. S povećanjem vrijednosti T_{red} svi modeli uključujući i analitički proračun pokazuju niže vrijednosti toplinske učinkovitosti. Analitički proračun pokazuje minimalan odstupanja u odnosu na mjerene podatke do vrijednosti $T_{red} \leq 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, s maksimalnim odstupanjem 3,6 % za $T_{red} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$. Model 1 i 2 imaju skoro identična odstupanja za sve vrijednosti T_{red} , s maksimalnim odstupanjem 7,2 % za $T_{red} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ za Model 1, te 7,4 % za Model 2. Model 3 pokazuje iznimno velika odstupanja ($> 30 \%$) u odnosu na izmjerene podatke što sugerira da ovaj

model nije pogodan za razmatranje u kontekstu ovog istraživanja. Model 2 zahtjeva manje računalnih resursa i vrijeme izračuna je kraće nego što je to slučaj kod Modela 1, ali je primijećena veća osjetljivost dobivenih rezultata na početne uvjete simulacije u odnosu na Model 1.

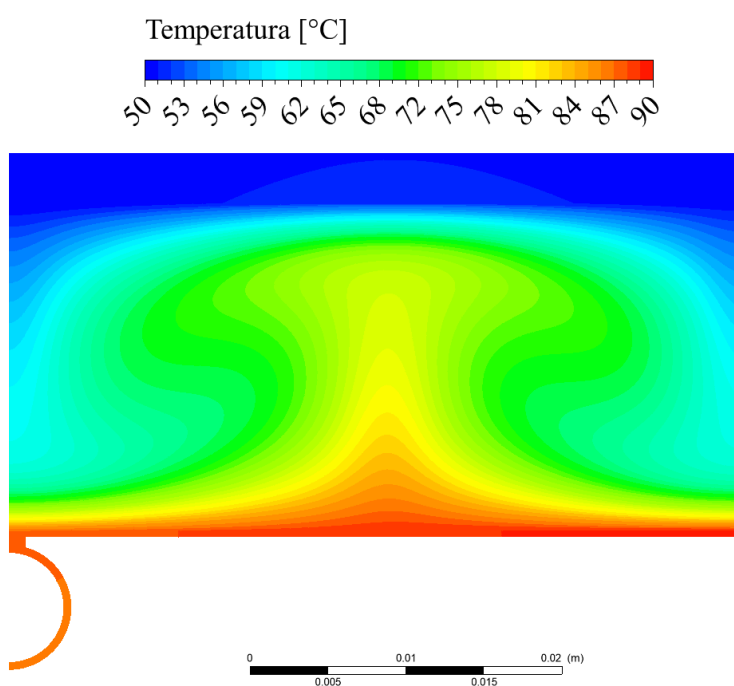


Slika 37 Odstupanja analitičkog proračuna i numeričkih simulacija (RD-1-Metalni), usporedba s mjerenim podacima (Slika 36)

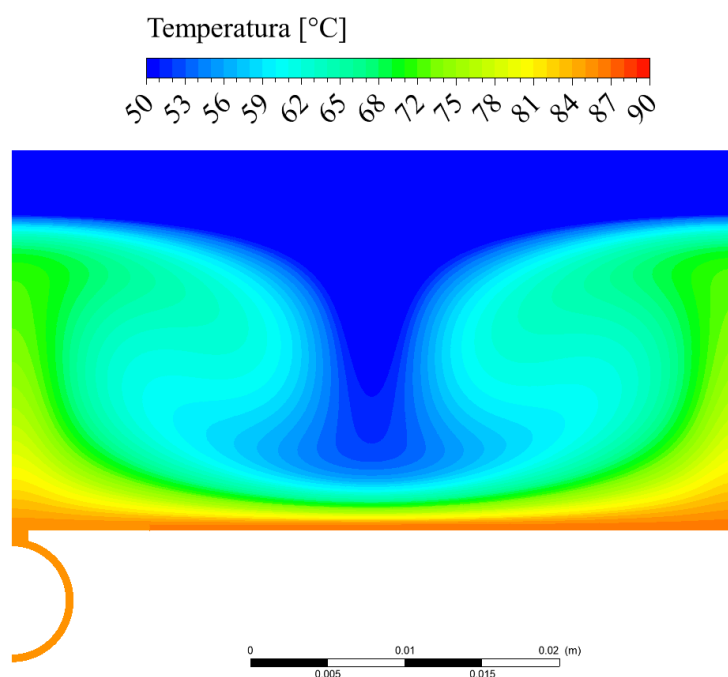
Osim same vrijednosti toplinske učinkovitosti, numeričke simulacije pružaju detaljniji uvid u temperaturnu raspodjelu unutar samog kolektora (Slika 38), dok je prikazanim analitičkim postupkom moguće odrediti prosječne temperature pokrova i apsorbera. Apsorbirana sunčeva energija se provodi kroz materijal apsorbera provođenjem, a zatim na vodu unutar cijevi konvekcijom. Zbog toga se očekuje da će se na poziciji cijevi javiti najniže temperature uslijed odvođenja toplinskog toka prema vodi (Slika 38 a)). S druge strane mjesto pojave maksimalne temperature je na polovici razmaka između dvije cijevi [94]. Kod Modela 3 primjećuje se inverzna temperaturna raspodjela, maksimalna temperatura se javlja na mjestu cijevi, a najniža na poziciji između dviju cijevi. (Slika 38 c). Isto tako, unatoč drugačijoj temperaturnoj raspodjeli ostvarene temperaturne razlike nisu dovoljne što rezultira niskim vrijednostima toplinske učinkovitosti. Temperaturna raspodjela Modela 2 (Slika 38 b)) je slična onoj Modela 1.



a) Model 1



b) Model 2



c) Model 3

Slika 38 Temperaturna raspodjela unutar solarnog kolektora za $T_{\text{red}} = 0,065 \text{ m}^2\text{K/W}$ [94]

Tablica 12 Prosječne i maksimalne temperature pokrova i apsorbera

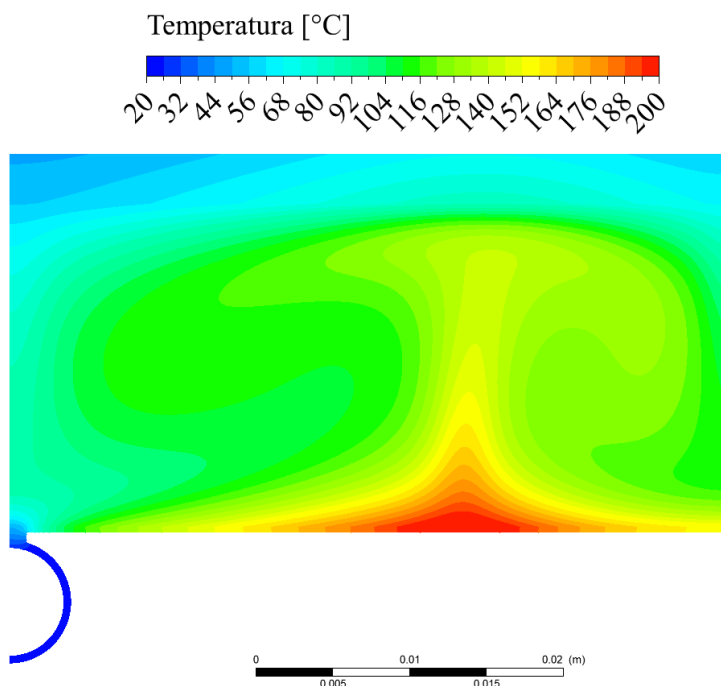
Model / Temperatura	Analitički proračun	Model 1	Model 2	Model 3
$T_{\text{red}} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
$\vartheta_{f,\text{avg}}$	26,26	26,26	26,26	26,26
$\vartheta_{st,\text{avg}}$	24,98	25,94	25,99	24,85
$\vartheta_{aps,\text{avg}}$	37,37	36,35	36,21	32,94
$\vartheta_{st,\text{max}}$	-	26,20	26,24	25,08
$\vartheta_{aps,\text{max}}$	-	39,22	39,05	33,63
$T_{\text{red}} = 0,065 \text{ m}^2\text{K/W}$	[°C]	[°C]	[°C]	
$\vartheta_{f,\text{avg}}$	84,23	84,23	84,23	84,23
$\vartheta_{st,\text{avg}}$	37,24	39,62	39,74	37,66
$\vartheta_{aps,\text{avg}}$	91,37	90,37	90,22	86,00
$\vartheta_{st,\text{max}}$	-	41,18	41,07	39,17
$\vartheta_{aps,\text{max}}$	-	92,19	92,09	86,61

Dodatnu potvrdu valjanosti korištenja analitičkog proračuna i numeričkih modela izmjene topline pruža usporedba srednjih vrijednosti temperatura različitih dijelova kolektora (Tablica 12). Za $T_{\text{red}} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$ analitički proračun daje za $\sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$ nižu prosječnu temperaturu stakla u odnosu na Model 1 i 2, dok je temperatura apsorbera određena analitičkim proračunom viša za $\sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Kod $T_{\text{red}} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ odnos temperatura apsorbera određenih analitičkim proračunom i numeričkim modelima ostaje isti, dok je prosječna temperatura stakla za $\sim 2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ viša u slučaju analitičkog proračuna. Razlika može nastati u načinu modeliranja izmjene topline sa zrakom uslijed slobodne konvekcije i zračenja s ploče apsorbera, čiji utjecaj može biti značajan pri većim vrijednostima T_{red} . S obzirom na to da vrijednosti $T_{\text{red}} > 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ nisu česte u normalnim ljetnim uvjetima rada, prihvaćeno je korištenje Modela 1 za provedbu numeričkih simulacija izmjene topline u polimernom solarnom kolektoru.

3.3. Analiza preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora

Na temelju ovakve verifikacije numeričkog modela za izmjenu topline moguće provesti analizu preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora sa svrhom definiranja konstrukcije koja će biti korištena za izradu prototipa polimernog solarnog kolektora. U prvom koraku pretpostavljeno je da je konstrukcija polimernog kolektora RD-1-Polimerni ostala ista kao i ona pločastog kolektora (RD-1-Metalni). U slučaju da se bakar i staklo zamijene polimernim materijalom s niskim vrijednostima toplinske provodnosti ($\lambda_{\text{PVC-C}} = 0,14 - 0,16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [70]) ova izvedba kolektora ne može ostvariti toplinsku učinkovitost veću od 10 %, kao ni prirast temperature vode veći od $2 \text{ }^\circ\text{C}$, pri istim radnim uvjetima (Tablica 13). Vidljivo je da u slučaju zamjene toplinski provodljivog materijala izolatorom, otpor provođenju topline kroz apsorber postaje značajan. Samo dio topline se predaje vodi, dok se veći dio apsorbirane energije zbog velikog toplinskog otpora ne može predati vodi što dovodi do značajnijeg porasta temperature materijala apsorbera podalje od cijevi (Slika 39). Najveće temperature koje se javljaju kod ovakve konstrukcije su $> 200 \text{ }^\circ\text{C}$, što je daleko iznad maksimalno dozvoljenih temperatura za PVC-C. U Tablica 13 su također prikazani određeni faktori učinkovitosti rebra i kolektora, kao i faktor odvođenja topline. U slučaju kada je širina rebra $W = 0,094 \text{ m}$ kao i kod metalnog kolektora, faktor učinkovitosti rebra polimernog kolektora je značajno smanjen ($F = 0,076$). Faktora učinkovitosti rebra je prema Jed. (2.21) funkcija nekoliko veličina od čega su najznačajnije toplinska provodnost λ i širina rebra W . Vidljivo je da smanjenjem toplinske provodnosti s $\lambda_{\text{Cu}} = 385 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, na $\lambda_{\text{PVC-C}} = 0,16$

$W/(m \cdot K)$ rezultira značajnim smanjenjem faktora učinkovitosti rebra. Iz tog razloga prva predložena konstrukcijska izmjena je povećanje broja cijevi po jednom segmentu, odnosno smanjenje širine rebra W čime bi se kompenziralo smanjenje faktora učinkovitosti rebra uslijed lošije toplinske provodnosti.



Slika 39 Temperaturna raspodjela polimernog kolektora s konstrukcijom pločastog kolektora, RD-1-Polimerni

Rezultati analitičkog proračuna takve izvedbe, kao i usporedba dobivenih rezultata s metalnim pločastim kolektorom također je prikazana u Tablica 13. U ovom slučaju faktor učinkovitosti rebra F je blizu maksimalne vrijednosti što sugerira da rebro širine $W = 0,0094$ m učinkovito provodi toplinu prema radnom mediju u cijevima. S druge strane faktori učinkovitosti kolektora F' i odvođenja topline F_R su i dalje niži kod polimernog kolektora, a posljedica su primjene materijala s manjom vrijednošću toplinske provodnosti, kao i same konstrukcije.

Tablica 13 Detaljni rezultati analitičkog proračuna klasičnog i polimernog solarnog kolektora s konstrukcijskim izmjenama

	RD-1-Metalni, W = 0,094 m			RD-1- Polimerni, W = 0,094 m			RD-1- Polimerni, W = 0,0094 m		
	Faktor učinkovitosti rebra, učinkovitosti kolektora, odvođenja topline								
$\vartheta_{f,ul}$	F	F'	F _R	F	F'	F _R	F	F'	F _R
[°C]	[-]								
20	0,979	0,942	0,912	0,076	0,109	0,109	0,987	0,809	0,784
40	0,979	0,944	0,913	0,076	0,109	0,109	0,987	0,806	0,780
60	0,978	0,943	0,912	0,076	0,109	0,109	0,986	0,802	0,777
80	0,978	0,942	0,910	0,076	0,109	0,109	0,986	0,799	0,770
	Ostvarena temperaturna razlika i temperature pojedinih dijelova kolektora								
$\vartheta_{f,ul}$	$\Delta\vartheta_f$	$\vartheta_{st,avg}$	$\vartheta_{aps,avg}$	$\Delta\vartheta_f$	$\vartheta_{st,avg}$	$\vartheta_{aps,avg}$	$\Delta\vartheta_f$	$\vartheta_{st,avg}$	$\vartheta_{aps,avg}$
[°C]	[°C]								
20	12,520	24,982	37,373	1,502	60,039	179,305	10,760	30,758	64,032
40	11,270	28,799	55,390	1,333	60,559	181,221	10,080	34,359	79,426
60	9,910	32,923	73,389	1,163	61,080	183,139	8,930	38,060	94,692
80	8,460	37,241	91,373	0,990	61,601	185,056	8,460	41,833	109,849
	Toplinska učinkovitost								
$\vartheta_{f,ul}$	T_{red}	η		T_{red}	η		T_{red}	η	
[°C]	[m²K/W]	[-]		[m²K/W]	[-]		[m²K/W]	[-]	
20	-0,001	0,819		-0,007	0,098		-0,001	0,704	
40	0,021	0,737		0,015	0,087		0,021	0,631	
60	0,043	0,649		0,038	0,076		0,043	0,555	
80	0,065	0,556		0,060	0,065		0,065	0,478	

U pogledu postignutih temperatura pojedinih dijelova kolektora, vidljivo je da je pri svim radnim točkama prosječna temperatura pokrova viša kod polimernog kolektora nego metalnog. Prosječna temperatura apsorbera je znatno viša kod polimernog kolektora pri nižim vrijednostima temperatura na ulazu u kolektor što je posljedica velikog toplinskog otpora materijala apsorbera. Isto tako treba primijetiti, da je već pri ulaznoj temperaturi vode od 40 °C ostvarena prosječna temperatura od ~80 °C, dok je pri temperaturi vode od 80 °C postignuta prosječna temperatura apsorbera od ~110 °C. Sve to rezultira da je pri istim radnim uvjetima i istim optičkim svojstvima promatranih materijala toplinska učinkovitost polimernog kolektora manja za ~11,5 – 7,8 % ovisno o ulaznoj temperaturi vode u kolektor.

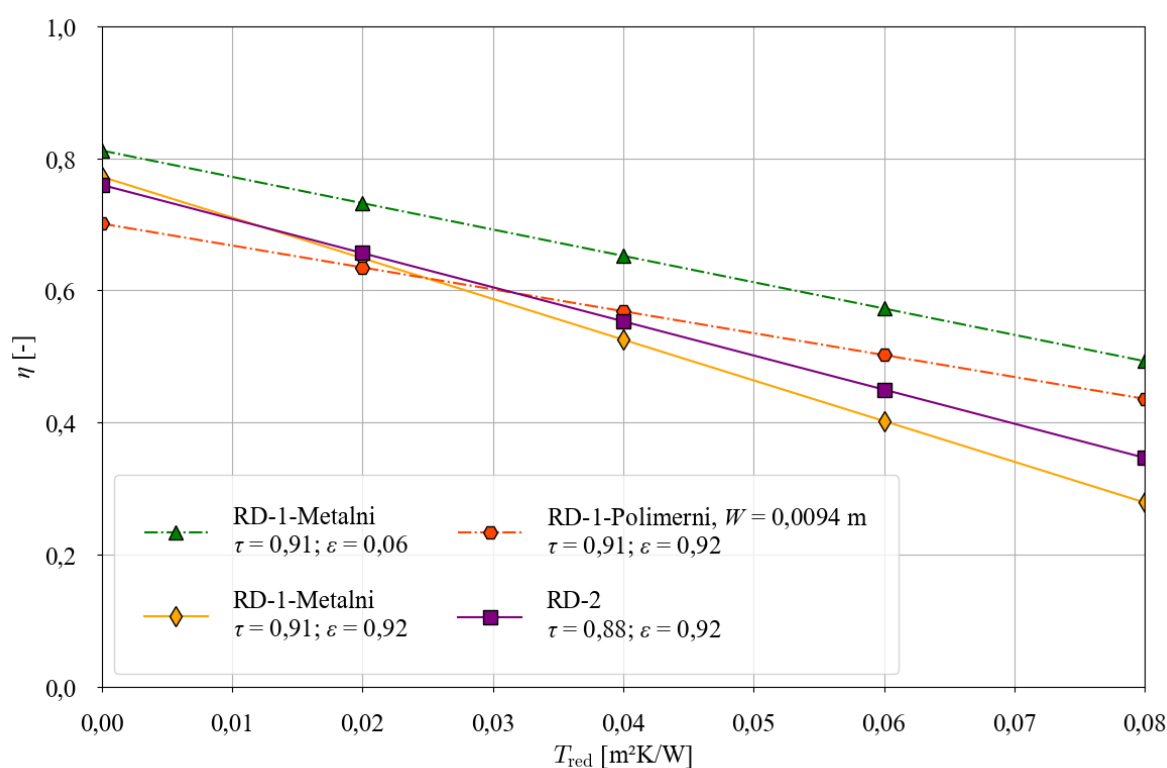
Isto tako, problem s ovom izvedbom polimernog kolektora predstavlja proračunata temperatura apsorbera koja je blizu temperaturi staklastog prijelaza za promatrani materijal ($\vartheta_g = 115 - 135$ °C [59]). Proračunata temperatura analitičkim putem je prosječna, te treba imati na umu da bi maksimalna temperatura koja se javlja u stvarnom radu mogla biti i viša. Na temelju numeričkih simulacija određene su maksimalne temperature u normalnom radnom režimu za razmatrane izvedbe kolektora što je i prikazano u Tablica 14 **Error! Reference source not found.** Usporedbom se vidi da su temperatura apsorbera RD-1-Polimerni bliske metalnim u slučaju povećanja broja cijevi (radni režim), što upućuje i na bliske temperature stagnacije koju se neprihvatljive za polimerne kolektore, te je iz tog razloga bilo potrebno modificirati konstrukciju kako je opisano u nastavku. Jedan od načina je dodatno optimiranje konstrukcije na način da se osigura što veća kontaktna površina između materijala i vode kako bi se kompenzirala lošija toplinska provodnost, i time poboljšao prijenos topline s apsorbera na vodu. Prikazan analiza ukazuje na to da je potrebno korištenje druge konstrukcije u odnosu na cijevni metalni kolektor. Iz tog je razloga, predložena preliminarna konstrukcija RD-2 opisana u Poglavlju 2.7.2.

Tablica 14 Prosječne i maksimalne temperature pokrova i apsorbera u pločastom i polimernom solarnom kolektoru pri $T_{red} = 0,065$ m²K/W, rezultati numeričkih simulacija

Temperatura [°C]	$\vartheta_{st,avg}$	$\vartheta_{st,max}$	$\vartheta_{aps,avg}$	$\vartheta_{aps,max}$
RD-1-Metalni	39,62	41,18	90,37	92,19
RD-1-Polimerni, $W = 0,094$ m	67,81	85,28	143,76	209,96
RD-1-Polimerni, $W = 0,0094$ m	48,04	57,29	90,76	133,16
RD-2	46,42	49,10	87,18	96,76

Krivulja toplinske učinkovitosti određena za izvedbu polimernog kolektora RD-2 prikazana je na dijagramu na Slika 40. Prototip polimernog kolektora koji se razmatra u ovom istraživanju ne koristi specijalni selektivni premaz koji smanjuje emisijski faktor ε , a time i toplinske gubitke s ploče apsorbera. Iz tog su razloga, provedene dodatne numeričke simulacije pločastog cijevnog kolektora u slučaju kada on ne bi imao selektivni premaz, koje su isto prikazane na dijagramu. Polimerni kolektor (RD-2) ima nižu toplinsku učinkovitost kroz cijelo prikazano radno područje u odnosu na metalni cijevni kolektor sa selektivnim premazom. Maksimalna razlika iznosi ~15 % pri $T_{red} = 0,08$ m²K/W (usporedba s RD-1-

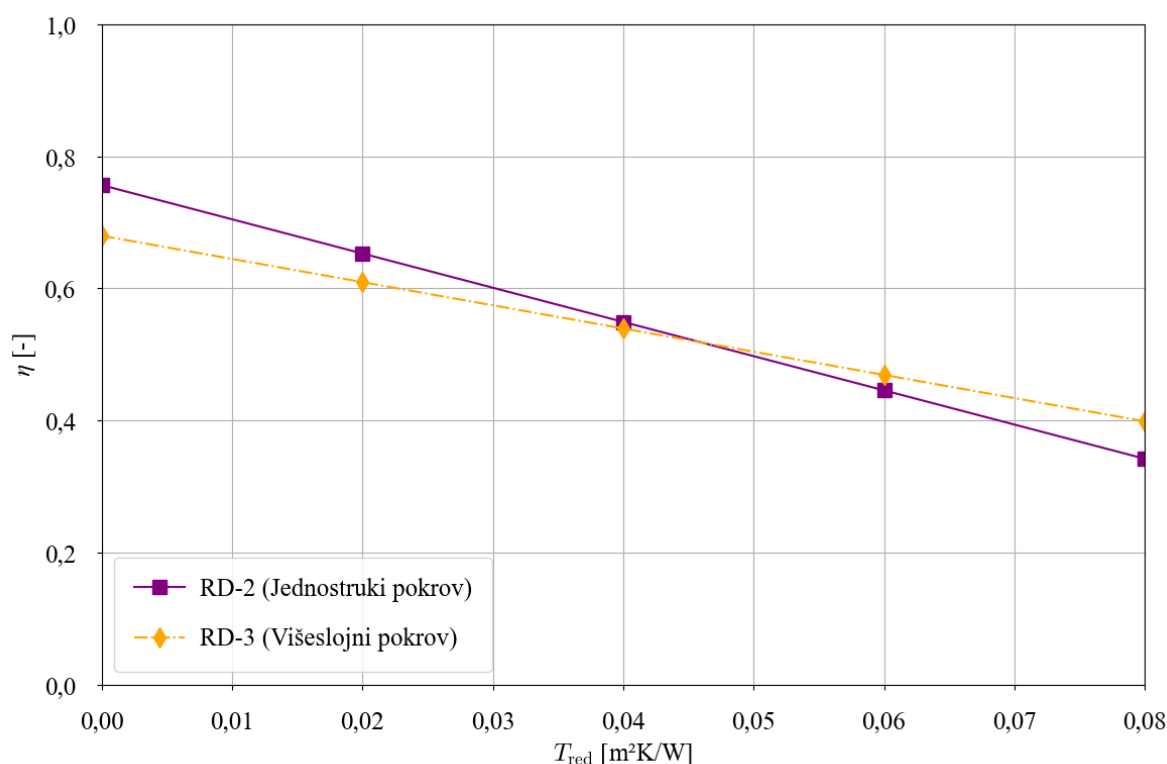
Metalni za $\varepsilon = 0,06$). Ono što treba naglasiti je da pločasti kolektor bez selektivnog premaza ima nižu toplinsku učinkovitost u odnosu na RD-2 pri vrijednostima reducirane temperaturne razlike $T_{\text{red}} > 0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ unatoč nešto manjoj vrijednosti faktora propusnosti τ . Nadalje, prije je spomenuto da je kod polimernih kolektora bitno ograničiti maksimalnu temperature koje se javljaju u radu kolektora. Maksimalna temperatura kojoj je izložen kolektor bi trebala biti niže od temperature staklastog prijelaza. Kod polimernog kolektora RD-2 maksimalna temperatura ploče apsorbera koja se javlja u radu ($T_{\text{red}} = 0,065 \text{ m}^2\text{K/W}$) iznosi $\vartheta_{\text{aps,max}} = 96,76 \text{ }^\circ\text{C}$, što je značajno niže u odnosu na polimerni kolektor RD-1-Polimerni (Tablica 14).



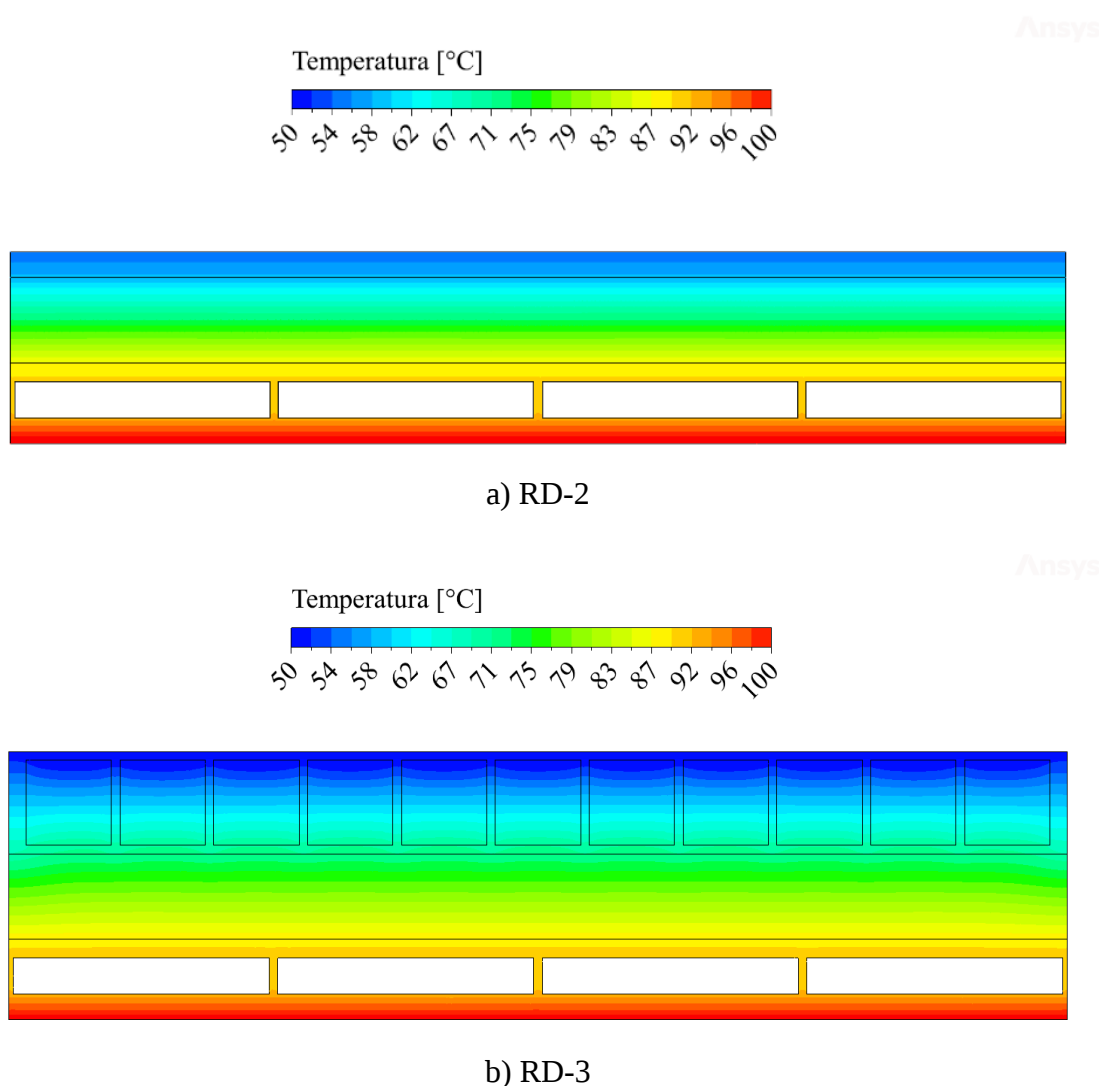
Slika 40 Krivulje toplinske učinkovitosti pločastog i polimernog kolektora dobivene numeričkim simulacijama

Usporedba toplinske učinkovitosti između cijevnog polimernog kolektora (RD-1-Polimerni, $W = 0,0094 \text{ m}$) i predloženog konstrukcijskog rješenja (RD-2) pokazuje da cijevni kolektor ostvaruje 8,9% veću toplinsku učinkovitost pri $T_{\text{red}}=0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$. Iako je takva izvedba rezultirala nešto većom učinkovitošću, zbog zabilježenih visokih temperatura apsorbera koje premašuju prihvatljive vrijednosti, zaključeno je da ova konstrukcija nije zadovoljavajuća.

U ovoj fazi istraživanja dodatno je ispitan utjecaj zamjene jednostruke pokrovne ploče višeslojnom pločom u kojoj se nalaze kanali sa zrakom (RD-3). Zrak unutar tih kanala se ponaša kao izolacijski sloj što dodatno smanjuje toplinske gubitke. Rezultati su prikazani na Slika 41 i Slika 42. U slučaju RD-3 manja je ukupna apsorpcija sunčevog zračenja zbog dodatnog sloja materijala što rezultira nižim vrijednostima toplinske učinkovitosti pri manjim vrijednostima T_{red} . S porastom temperature vode toplinska učinkovitosti kolektora s jednostrukom pločom (RD-2) pada brže nego onog s višeslojnom pločom (RD-3). Ugradnja višeslojne ploče ima smisla ako se kolektor koristi više u zimskom periodu kao potpora grijanju ili u hladnijim klimam. S druge strane, korištenjem višeslojne ploče više su temperature same pokrovne ploče u normalnom režimu rada, 71,42 °C kod višeslojne ploče u odnosu na 58,60 °C. Isto tako, zbog smanjenih toplinskih gubitaka u stagnacijskom režimu rada, maksimalne temperature apsorbera će biti više (~20 °C [95]). Zbog navedenog, višeslojna ploča ne pruža dovoljno prednosti u odnosu na kolektor s jednostrukom pločom pokrova i stoga se ona ne razmatra u daljnjem istraživanju.



Slika 41 Krivulje toplinske učinkovitosti polimernog kolektora određene numeričkim simulacijama na RD-2 i RD-3 [95]



Slika 42 Prikaz raspodjele temperaturnih polja RD-2 i RD-3 za $T_{red} = 0,056 \text{ m}^2\text{K/W}$ [95]

Iz prikazanih preliminaranih proračuna se pokazuje da polimerni materijali mogu biti alternativa u proizvodnji solarnih kolektora uz određene uvjete. Kod primijene jeftinih polimernih materijala kao što je PVC-C bitno je ograničiti maksimalne temperature koje se mogu javiti na pojedinim dijelovima kolektora. Ograničavanje maksimalne temperature je moguće povećanjem toplinskih gubitaka što s druge strane dovodi do niže toplinske učinkovitosti. Na temelju preliminaranih proračuna definirana je finalna geometrija poprečnog presjeka kolektora na temelju koje se napravio prototip polimernog solarnog kolektora putem ekstruzije. Prototip proizveden na temelju tako definirane geometrije podvrgnut je eksperimentalnim ispitivanjima s ciljem završne potvrde točnosti numeričkih modela izmjene topline, kao i provedba parametarske analize predloženog konstrukcijskog rješenja.

3.4. Mjerenje toplinske učinkovitosti prototipa

3.4.1. Ispitivanje prototipova

Rezultati ispitivanja zabilježeni tijekom pojedinog mjerenja su prikazani na dijagramima (Slika 43), dok su detaljni rezultati za odabrane stacionarne periode dani u tablici u prilogu (Tablica A1). Za svako ispitivanje u dijagramu je označen stacionarni period u kojem se računala toplinska učinkovitost. Rezultati pojedinih mjerenja na dijagramima i u tablici prikazani su kronološki te će tako biti opisani i analizirani.

Mjerenja provedena 1.-2. ožujka 2021 – Prototip 1

Tijekom mjerenja vrijednosti temperatura vode na ulazu u kolektor je bila relativno stabilna, dok su na izlazu iz kolektora zabilježene veće oscilacije. Toplinska učinkovitost je izračunata za površinu kolektora, odnosno apsorbera učinkovitost η za prvi i drugi stacionarni period iznose $\eta = 0,690$, odnosno $\eta = 0,706$. Mala razlika je u tome što je druga radna točka mjerena pri većoj temperaturi okoliša, dok su sunčevo zračenje i srednja temperatura vode ostale konstante što je rezultiralo pomicanjem točke ulijevo na x-osi, odnosno manjim vrijednostima reducirane temperaturne razlike T_{red} . Zbog vremenskih uvjeta izmjeren je ograničen broj radnih točaka. Mjerenje drugog dana je provedeno s vodom temperature koja je približno jednaka temperaturi okoline. Izračunate vrijednosti toplinske učinkovitosti su bile slične kao i one određene prethodnog dana. Razlika u odnosu na dan prije su niže temperature okolišnog zraka. Prilikom provedbe ovog mjerenja uočeno je da se voda dodatno zagrijava preko priključnih komada te je zbog toga toplinska učinkovitost određena za površinu $A_{\text{kol}} = 1,747 \text{ m}^2$.

Mjerenja provedena 8.-9. srpnja 2021. – Prototip 2

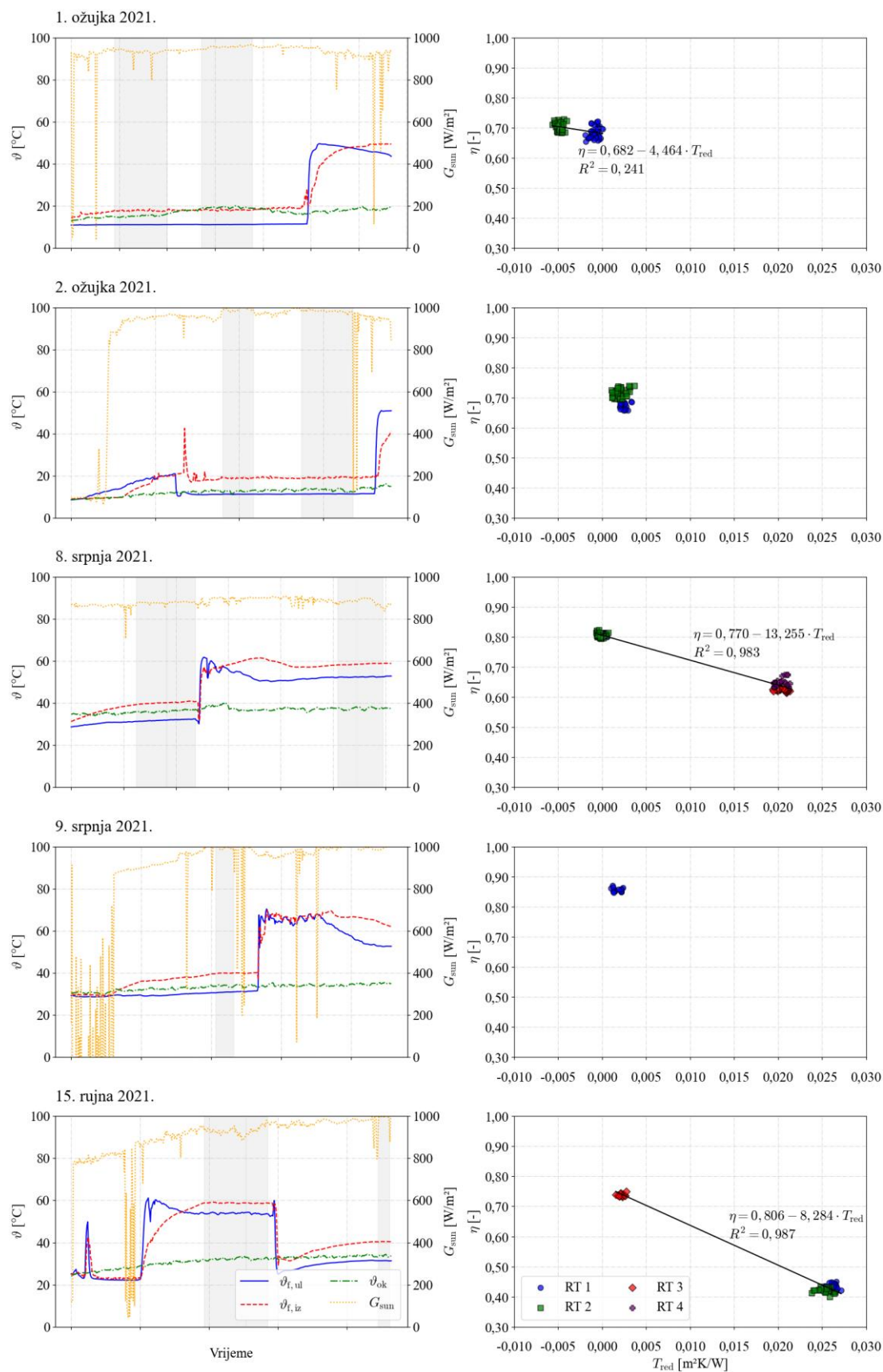
Temperatura vode na izlazu iz kolektora, kao i temperatura okoline su u ovom slučaju manje varirale u odnosu na prvi set mjerenja. Temperatura vode na ulazu u kolektor je podešena tako da je vrijednost $T_{\text{red}} \approx 0 \text{ m}^2\text{K/W}$ za mjerenu temperature okolišnog zraka i sunčevog zračenja. Pri takvim uvjetima izračunata toplinska učinkovitost iznosi $\eta = 0,808$ za prvi interval te $\eta = 0,812$ za drugi promatrani interval. Prilikom mjerenja druge radne točke temperatura okoliša dosegla je svoj maksimum, $\sim 37,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Prosječna temperatura vode je bila $\sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ što uz

postignutu temperaturu zraka okoliša i sunčevo zračenje daje vrijednosti $T_{\text{red}} \approx 0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ i toplinsku učinkovitost od $\eta = 0,622\text{-}0,657$. Krivulja toplinske učinkovitosti prikazana na dijagramu ima značajno veće gubitke u odnosu na proračunski određene gubitke što je vidljivo iz usporedbe koeficijenata pojedinih krivulja (pogledati Slika 40, Polimerni – RD-2 i Slika 43, krivulja za mjerenja provedena 8. srpnja 2021.). Veći toplinski gubici su posljedica sljedećeg. Prvo, prilikom zagrijavanja apsorbera uočeno je blago savijanje kolektora zbog čega je srednji dio kolektora bio uzdignut od izolacije koja je postavljena s donje strane. Drugo, s obzirom na to da je jedan segment bio postavljen između drugih segmenata koji nisu bili priključeni na vodu javljali su se povećani gubici s bočnih ploha. Prilikom provedbe ispitivanja sljedećeg dana pojava naoblake utjecala je značajno utjecala na stacioniranje izlazne temperature. Veća vrijednost toplinske učinkovitosti u odnosu na one određene mjerenjima dan prije je posljedica dodatne apsorpcije koja se javlja u bočnim površinama.

Mjerenja provedena 15. rujna 2021. – Prototip 2

Vrijednost T_{red} za prvi interval iznosi $0,026 \text{ m}^2\text{K/W}$ te je izračunata toplinska učinkovitost $\eta = 0,433$. Za drugi promatrani interval zabilježene su slične prosječne vrijednosti, ali uz veće rasipanje podataka. Za drugu radnu točku izračunata toplinska učinkovitost iznosi $\eta = 0,740$ pri $T_{\text{red}} \approx 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$

U nastavku ovog poglavlja prikazani su rezultati završnih ispitivanja, dok su u Poglavlju 3.5 prikazani rezultati numeričkih simulacija, kao i detaljna analiza izmjene topline i strujanja unutar polimernog kolektora.



Slika 43 Kontinuirani zapis izmjerenih veličina i toplinska učinkovitost za stacionarne periode

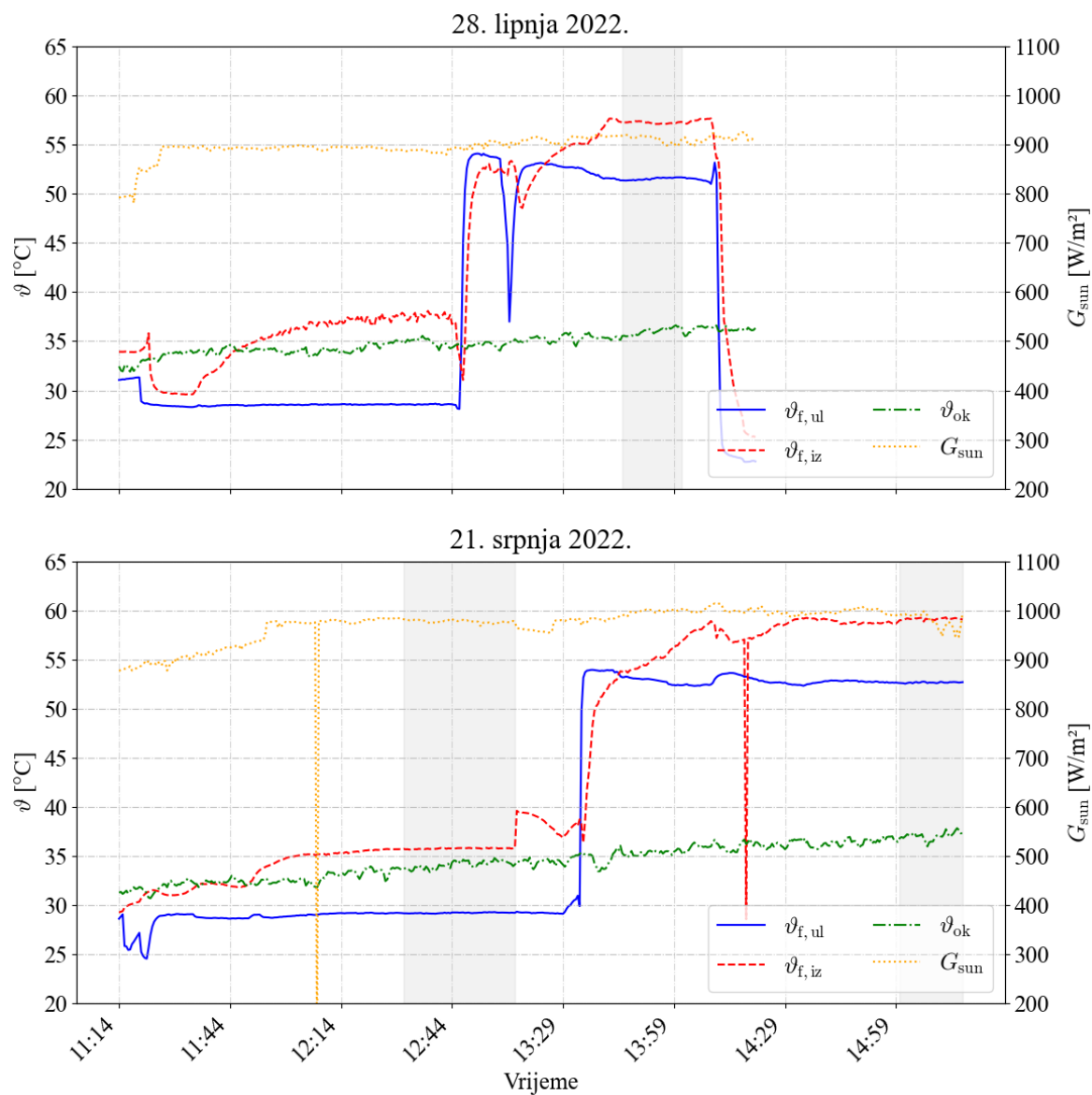
3.4.2. Ispitivanje završnog prototipa

Prva završna mjerenja napravljena su u lipnju 2022. Izmjerene vrijednosti u vremenu prikazane su na dijagramima na Slika 44 **Error! Reference source not found.**, dok su detaljni rezultati za pojedini stacionarni interval prikazani tablično (Tablica A.6). Ukupna površina kolektora za koju je izračunata toplinska učinkovitost iznosi $A_{kol} = 0,449 \text{ m}^2$. Iz zapisa i rezultata prikazanih u tablici vidljivo je da je bilo moguće postići stacionarno stanje u vremenskom intervalu od ~24 minute. Iako su razlike između maksimalne i minimalne vrijednosti ulaznih i izlaznih temperatura vode iznosile od ~0,6-0,7 °C, male vrijednosti standardne devijacije sugeriraju malo rasipanje podataka oko srednje vrijednosti. Isto je zabilježeno s temperaturom okoliša kao i sunčevim zračenjem. Za tako definiran stacionarni period izračunata je prosječna toplinska učinkovitost u iznosu $\eta = 0,545$ pri vrijednosti reducirane temperaturne razlike $T_{red} = 0,020 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Tijekom mjerenja provedenih u srpnju 2022. određena je toplinska učinkovitost za dvije radne točke. Izmjerene vrijednosti temperature vode na ulazi i izlazu, kao i sunčevog zračenja pokazuju mala odstupanja i varijacije tijekom promatranog stacionarnog perioda za pojedinu radnu točku. Visoke ljetne temperature uzrokovale su veća razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti u promatranom stacionarnom periodu nego dan prije. Međutim, izračunate vrijednosti snage, a time i toplinske učinkovitosti nisu oscilirale značajnije. Ostvarene su vrijednosti toplinske učinkovitosti $\eta = 0,797$ pri vrijednosti $T_{red} = -0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$ za RT1 te $\eta = 0,558$ pri vrijednosti $T_{red} = 0,019 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Sve radne točke za mjerenja provedena u lipnju i srpnju 2022., odnosno izračunate vrijednosti toplinske učinkovitosti u ovisnosti o reduciranoj temperaturnoj razlici prikazane su na dijagramu na Slika 45 **Error! Reference source not found.** Za određivanje krivulje toplinske učinkovitosti regresijskom analizom korišteni su podaci izmjereni i u lipnju i u srpnju zbog relativno sličnih okolišnih uvjeta zabilježenih tijekom mjerenja. Nadalje, ovako definirana krivulja učinkovitosti može procijeniti toplinsku učinkovitost u vrlo uskom radnom području $T_{red} = 0 - 0,020 \text{ m}^2\text{K/W}$ tako da je usporedba s ostalim kolektorima moguća za te vrijednosti reducirane temperature razlike. Kako bi se mogla napraviti usporedba pri širem spektru radnih uvjeta potrebno je izmjeriti još jednu radnu točku na višoj temperaturu od one koja je ostvarena pri RT2 ($\vartheta_{f,ul} \approx 56,7 \text{ °C}$) ili pri nižim temperaturama okolišnog zraka. U ovoj fazi

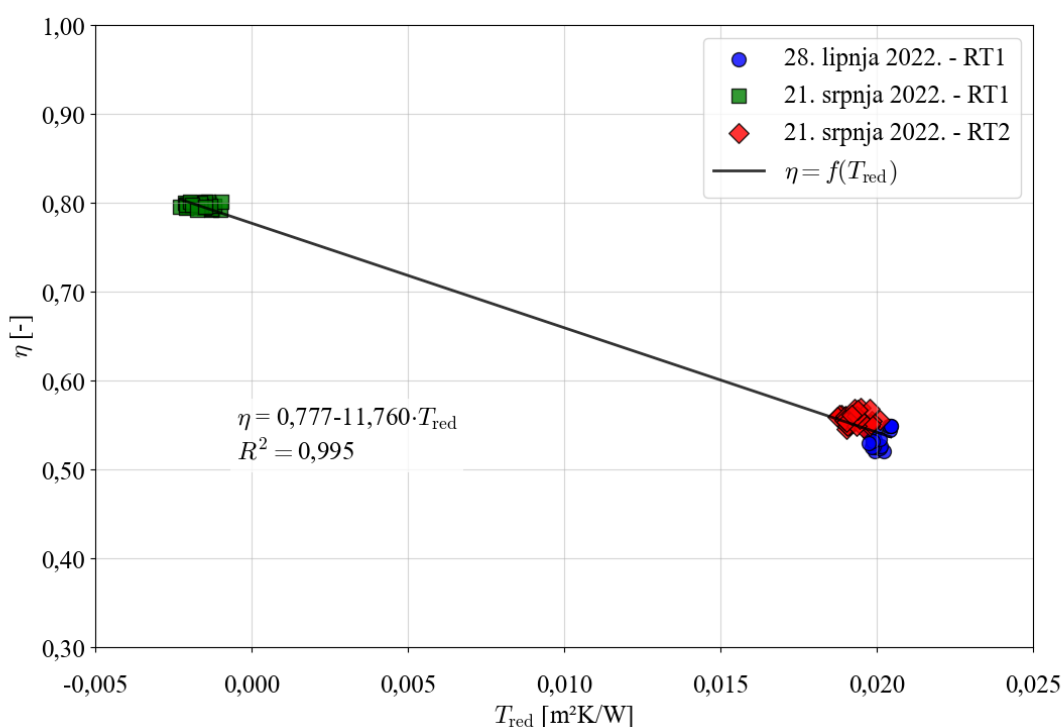
zbog ograničenja mjerne linije nije bilo moguće provesti dodatna ispitivanja u svrhu određivanja dodatne radne točke za definiranje krivulje toplinske učinkovitosti kao polinom drugog stupnja.



Slika 44 Kontinuirani zapis temperatura i sunčevog zračenja tijekom mjerenja

Usporedba dobivenih vrijednosti toplinske učinkovitosti prototipa polimernog kolektora pokazuje niže vrijednosti toplinske učinkovitosti η_0 pri $T_{\text{red}} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$, odnosno kada je srednja temperatura fluida u kolektoru jednaka temperaturi okoliša. Za te vrijednosti T_{red} ,

razlika u toplinskoj učinkovitosti posljedica je različitosti optičkih svojstva korištenih materijala u polimernom, odnosno pločastom kolektoru, ali i same konstrukcije prototipa polimernog solarnog kolektora. Također, dio razlike leži u činjenici da je temperatura apsorbera nešto viša u odnosu na temperaturu fluida, a time i okoliša, što uzrokuje pojavu toplinskih gubitaka. Za polimerni kolektor $\eta_0 = 0,777$ u usporedbi s $\eta_0 = 0,811$ za pločasti kolektor (Slika 40).



Slika 45 Funkcijska ovisnost toplinske učinkovitosti i reducirane temperaturne razlike prototipa polimernog solarnog kolektora

Usporedbom krivulja polimernog kolektora dobivenih završnim mjerenjima, te onih za pločasti solarni kolektor vidljivo je povećanje razlika pri višim vrijednostima reducirane temperaturne razlike zbog većih toplinskih gubitaka prototipa. Toplinska učinkovitosti prototipa polimernog kolektora pri $T_{red} = 0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ je $\approx 19 \%$ manja u odnosu na pločasti kolektor, dok bi pri većim vrijednostima T_{red} ta razlika bila još i veća. U sljedećem koraku istraživanja napraviti će se verifikacija numeričkih modeliranja izmjene topline i strujanja fluida na jednom segmentu prototipa na temelju rezultata završnih mjerenja. Na temelju toga i uz korekciju rubnih uvjeta odredit će se krivulja toplinske učinkovitosti prototipa kao polinom

drugog stupnja što će omogućiti usporedbu toplinske učinkovitosti s pločastim kolektorom za šire područje vrijednosti reducirane temperaturne razlike ($T_{\text{red}} = 0\text{--}0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$). Rezultati verifikacije numeričkih simulacija i određivanje krivulje toplinske učinkovitosti prototipa pokazano je u Poglavlju 3.5. Isto tako, na temelju numeričkih simulacija provest će se i parametarska analiza prototipa polimernog solarnog kolektora s ciljem poboljšanja toplinskih karakteristika.

3.5. Numeričke simulacije prototipa polimernog solarnog kolektora

3.5.1. Test neovisnosti mreže u 3D simulacijama

Za procjenu greške uzrokovane prostornom diskretizacijom korištena je GCI (*Grid Convergence Index*) metoda [96]. Indeks konvergencije mreže *GCI* je izračunat za izlaznu temperaturu fluida, pad tlaka, toplinski tok prema vodi i toplinske gubitke na numeričkoj domeni Geometrije 1. Rezultati su prikazani u Tablica 15.

Tablica 15 Rezultati provedbe testa neovisnosti mreže Geometrije 1 za dvije radne točke

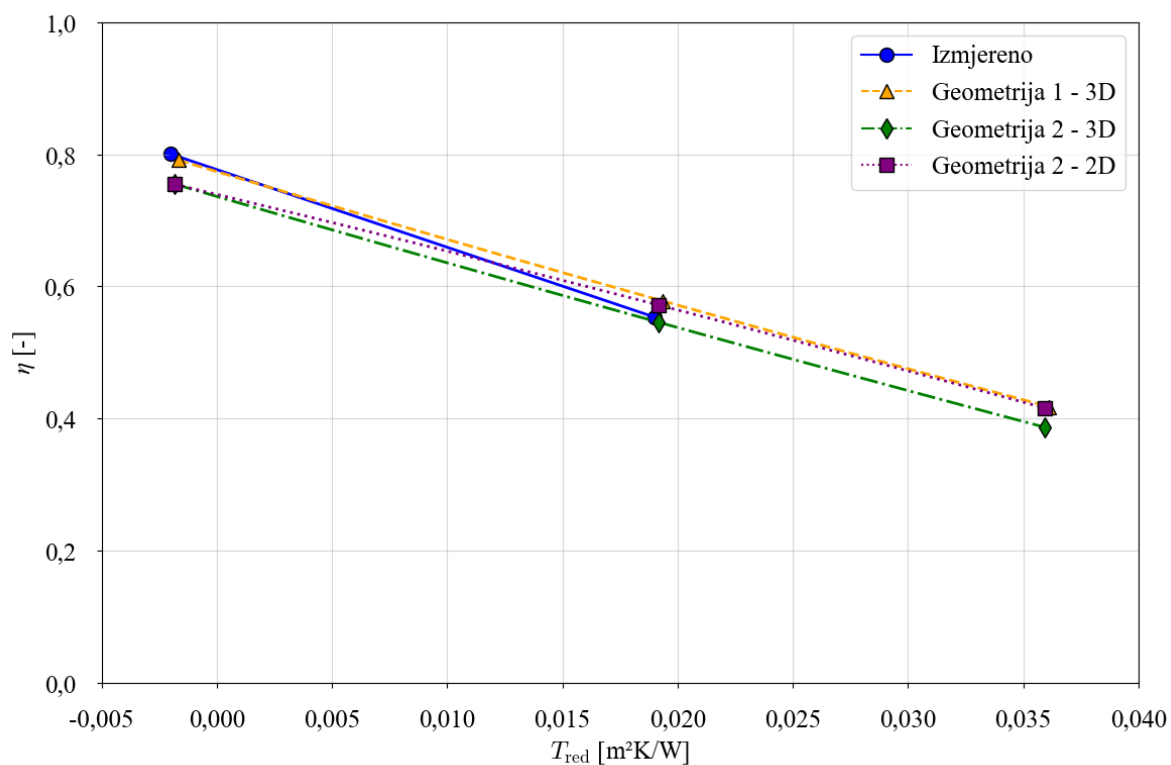
	Φ = izlazna temperatura fluida	Φ = statički tlak na izlazu	Φ = toplinski tok prema vodi	Φ = toplinski gubitci
$N_1 = 2006080, N_2 = 815040, N_3 = 348640$ $r_{21} = 1,35, r_{32} = 1,33$				
RT1				
Φ_1	35,732	-23,514	702,570	2,078
Φ_2	35,729	-22,814	704,389	2,116
Φ_3	35,699	-20,689	706,853	2,260
p	8,12	3,99	1,22	4,81
GCI_{21}	0,00 %	1,61 %	0,74 %	0,69 %
RT2				
Φ_1	59,358	-23,165	638,034	93,592
Φ_2	59,347	-22,476	639,868	93,220
Φ_3	59,330	-20,426	642,164	93,123
p	1,99	3,92	0,95	4,17
GCI_{21}	0,03 %	1,66 %	1,09 %	0,20 %

Test neovisnosti mreže napravljen je za 3 različite mreže (N_1, N_2 i N_3) s faktorom usitnjavanja mreže $r_{21} = 1,35$ te $r_{32} = 1,33$ za dvije radne točke (RT1 i RT2). Za sve promatrane varijable osim za pad tlaka vrijednost indeksa konvergencije mreže *GCI* je manji od 1 % za RT1. Za pad tlaka je indeks konvergencije mreže $GCI = 1,61$ % uz vrijednost prividnog reda točnosti

metode $p \approx 4$. Slični rezultati su zabilježeni i za RT2. Dobiveni rezultati ukazuju na vrlo malu grešku uzrokovanu prostornom diskretizacijom mreže. Također, pretpostavlja se da je izračunata vrijednost indeksa konvergencije mreže manja od ostalih izvora grešaka poput nesigurnosti ulaznih podataka. Uz to, daljnje usitnjavanje mreže bi znatno produljilo vrijeme izračuna te je zaključeno kako je mreža dovoljno fina za postizanje pouzdanih rezultata. Konačno odabrana mreža je ona s brojem elemenata $N = 2\,006\,080$ elemenata. Geometrija 2 je gabaritnim dimenzijama manja od Geometrije 1 i budući da su korištene iste postavke za generiranje numeričke domene rezultati testa neovisnosti mreže ovom metodom su slični.

3.5.2. Verifikacija numeričkih simulacija

U okviru ovog istraživanja provedene su 3D i 2D numeričke simulacije u svrhu detaljne analize rada polimernog solarnog kolektora. Verifikacija numeričkih simulacija provedena je usporedbom s eksperimentalno određenim vrijednostima toplinske učinkovitosti i temperature vode na izlazu iz kolektora. Rezultati usporedbe dani su u Tablica 16 i u dijagramu na Slika 46. Iz dijagrama i podataka u tablici vidljivo je relativno dobro poklapanje eksperimentalno određene toplinske učinkovitosti Prototipa 2 i one izračunate 3D numeričkim simulacijama.



Slika 46 Usporedba toplinske učinkovitosti dobivene mjerenjima i numeričkim simulacijama

Tablica 16 Prikaz rezultata i međusobnih odstupanja vrijednosti izlazne temperature fluida i toplinske učinkovitosti, usporedba rezultata simulacije s eksperimentalnim podacima uz podatke o reduciranoj temperaturnoj razlici

Izmjereno				3D Simulacije			Odstupanje Δ	
	T_{red} [m ² ·K/W]	$\vartheta_{f,iz}$ [°C]	η [-]	T_{red} [m ² ·K/W]	$\vartheta_{f,iz}$ [°C]	η [-]	$\vartheta_{f,iz}$ [°C]	η [%]
Geometrija 1								
RT1	-0,0020	35,773	0,797	-0,0017	35,732	0,792	-0,041	-0,5
RT2	0,0190	59,127	0,558	0,0194	59,357	0,578	0,230	2,0
RT3	-	-	-	0,0361	74,833	0,418	-	-
Geometrija 2								
	2D Simulacije			3D Simulacije			b	c
RT1	-0,0018	32,327 ^a	0,755	-0,0018	35,429	0,755	-3,7	0,0
RT2	0,0192	55,822 ^a	0,572	0,0192	58,985	0,546	-3,2	2,6
RT3	0,0359	72,236 ^a	0,416	0,0359	74,473	0,387	-3,1	2,9

^aOdnosi se na srednju temperaturu fluida

^bOdnosi se na odstupanje toplinske učinkovitosti 3D simulacija Geometrije 1 i 2

^cOdnosi se na odstupanje toplinske učinkovitosti 3D i 2D simulacija Geometrije 2

Iz usporedbe rezultata dobivenih 3D numeričkim simulacijama Geometrije 1 vidi se relativno malo odstupanje (2 %) toplinske učinkovitosti u odnosu na eksperimentalno određenu toplinsku učinkovitost. Isto tako, zabilježeno je malo odstupanje (0,23 °C) izlazne temperature pri višim temperaturama vode na ulazu u kolektor. S obzirom na to da mjerenjima nije bilo moguće odrediti dodatnu radnu točku, čime bi bilo moguće definirati krivulju učinkovitosti kao polinom drugog stupnja, korištene su numeričke simulacije, a sve za potrebe parametarske analize. Zadana je proizvoljna temperatura vode na ulazu (70 °C) te su zadržani isti radni uvjeti (sunčevo zračenje, temperatura okoliša i maseni protok) koji su bili izmjereni prilikom određivanja stacionarnog stanja za RT2. U tom slučaju prirast temperature u kolektoru će biti nešto manji (4,83 °C), dok je toplinska učinkovitost $\eta = 0,418$. Kako je spomenuto u Poglavlju 2.5 zbog nedostataka u proizvodnom procesu, izvedena geometrija segmenata polimernog solarnog kolektora je odstupala u odnosu na definirani CAD model. Zbog nemogućnosti provedbe simulacija za svaki stvarno izvedeni segment odlučeno je provesti numeričke simulacije za definirani CAD model (Geometrija 2), jer se u

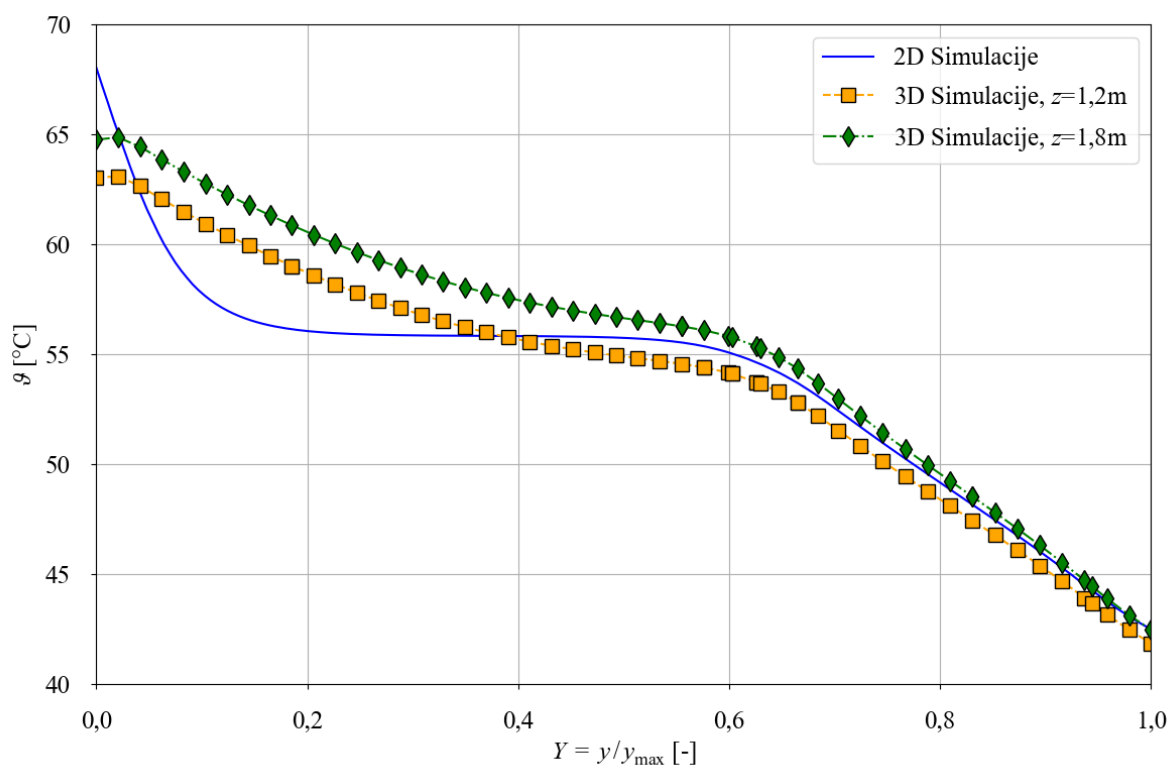
budućnosti ovog istraživanja očekuje korekcija proizvodnog procesa. Rezultati 3D simulacija provedenih na Geometriji 2 pokazuju da se za iste rubne uvjete ostvaruje nešto niža izlazna temperatura ($\sim 0,4$ °C). Izračunata toplinska učinkovitost numeričkim simulacijama na Geometriji 2 je 3,7 % (RT1) niža u odnosu na onu izračunatu na Geometriji 1. S porastom temperature vode odstupanja se smanjuju. Za provedbu parametarske analize prikazane u nastavku korištene su 2D numeričke simulacije jer zahtijevaju manje računalnih resursa i vrijeme izračuna je kraće. Rezultati 2D simulacija također su prikazani u dijagramu i tablici. Rezultati pokazuju da pri nižim vrijednostima temperature fluida (RT1) 2D simulacije provedene na Geometriji 2 daju identične vrijednosti toplinske učinkovitosti kao i one izračunate 3D simulacijama na istoj geometriji. Pri višim vrijednostima temperatura vode, 2D simulacijama se dobije do 2,9 % veća toplinska učinkovitosti pri $T_{\text{red}} = 0,0359 \text{ m}^2\text{K/W}$. Kako je spomenuto prije u 2D numeričkim simulacijama strujanje vode se uzima u obzir preko temperature vode i pripadajućeg koeficijenta prijelaza topline koje se zadaje kao rubni uvjet na stijenkama kanala. Simulacije su provedene za slučajeve kada su koeficijenti prijelaza topline zadani kao prosječne vrijednosti izračunate na temelju rezultata 3D simulacija i koristeći Jed. (2.31). Rezultati su prikazani u Tablica 17.

Tablica 17 Rezultati toplinske učinkovitosti dobiveni 2D simulacijama korištenjem koeficijenta prijelaza topline izračunatog na temelju 3D simulacija i Jed. 2.31

Radna točka [$\text{m}^2\text{K/W}$]	α – 3D simulacije	α – Jed. 2.31, $\vartheta_s = \text{konst}$	α – Jed. 2.31, $q_s = \text{konst}$
RT1 – $T_{\text{red}} = -0,0018$	0,759	0,755	0,758
RT2 – $T_{\text{red}} = -0,0192$	0,573	0,572	0,574
RT3 – $T_{\text{red}} = -0,0359$	0,417	0,416	0,417

Iz rezultata prikazanih u tablici vidljivo je da su sve vrijednosti izračunatih vrijednosti toplinske učinkovitosti unutar 0,5 %. Male razlike između pojedinih slučajeva proizlaze iz činjenice da je glavni toplinski otpor provođenje topline kroz materijal, koji je zapravo toplinski izolator. Ukupni koeficijent prolaza topline je recipročna vrijednost toplinskog otpora, koji uključuje konvektivni prijelaz topline sa stijenke kanala na vodu i provođenje topline kroz materijal. Iz tog razloga povećanje koeficijenta prijelaza topline neće značajno utjecati na ukupni koeficijent prolaza topline, a time i na toplinsku učinkovitost. Analiza utjecaja koeficijenta prijelaza topline opisana je u Poglavlju 3.5.4. Eventualno odstupanje

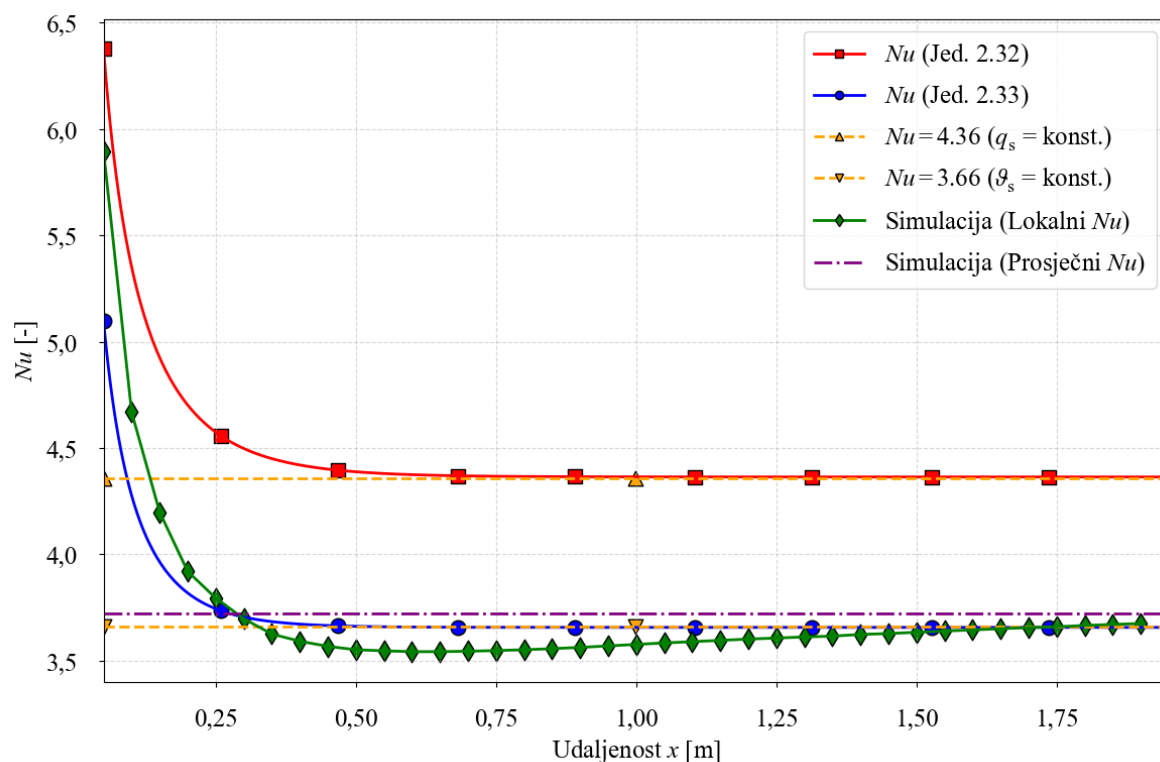
između simulacija može biti u pogledu dobivene temperaturne distribucije unutar polimernog kolektora. Profili temperatura po visini na središnjem dijelu kolektora prikazan je na dijagramu na Slika 47. Temperaturni profil dobiven 2D simulacijama ima strmiji pad temperature s porastom visine dok je kod 3D simulacija taj pad više linearan. To je posljedica zadavanja konstantnog koeficijenta prijelaza topline na bočnim stijenkama kanala. Od polovice kolektora temperaturni profili pokazuju isti trend kretanja. Pri vrhu kolektora dolazi do poklapanja vrijednosti temperatura određenih 2D i 3D simulacijama za $z = 1,8$ m. Temperaturni profil na dijagramu prikazan je kao funkcija bezdimenzijske visine Y koja je izračunata kao omjer visine y na kojoj je zabilježena temperatura i maksimalne visine $y_{\max}$ unutar domene kolektora.



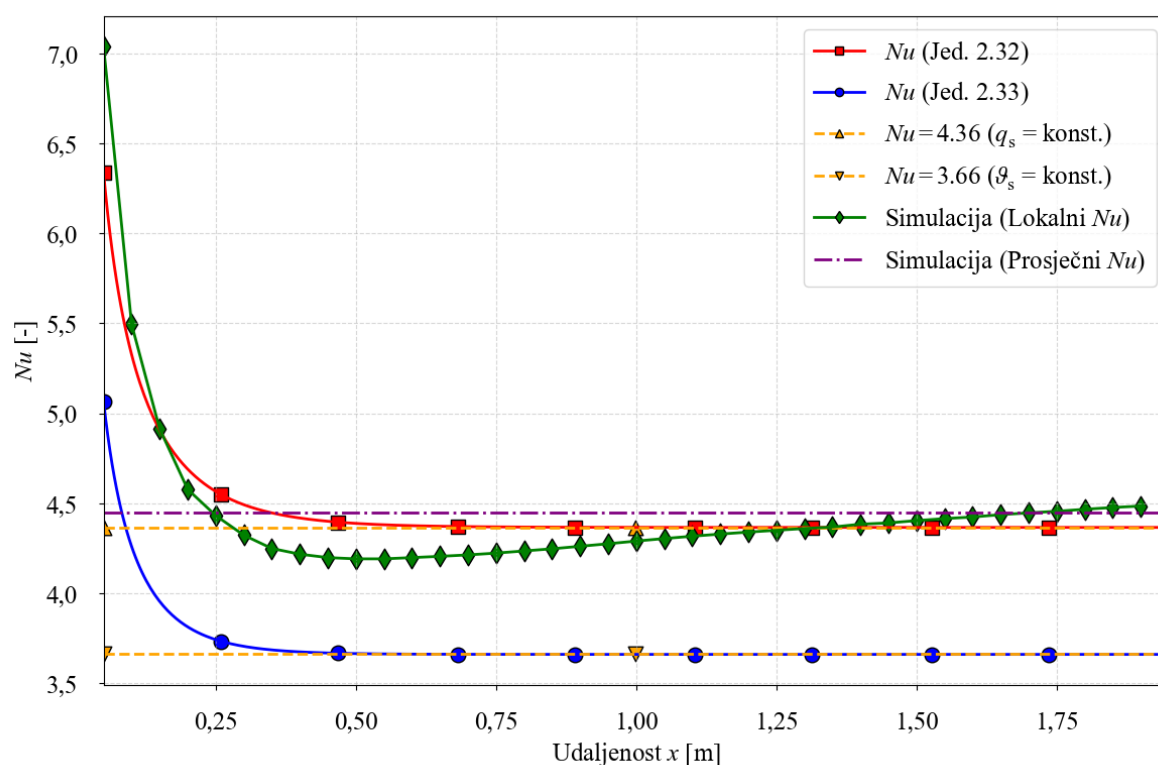
Slika 47 Temperaturni profil po visini na središnjem dijelu kolektora, usporedba profila određenih 2D i 3D simulacijama na različitoj udaljenosti z od ulaza

3.5.3. Izmjena topline unutar prototipa polimernog solarnog kolektora

Na temelju provedenih 3D simulacija određeni su koeficijenti prijelaza topline sa stijenki kanala na radni fluid, s obzirom na to da je to jedan od glavnih rubnih uvjeta za provedbu parametarske analize putem 2D simulacija. Prikaz lokalnih i prosječnih vrijednosti Nu broja izračunatih na temelju 3D numeričkih simulacija za $\vartheta_{f,avg} = 55,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ i za $\vartheta_{f,avg} = 55,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ Geometrije 1 prikazan je na Slika 48, odnosno na Slika 49 prikaz lokalni. Lokalni Nu broj je određen na presjecima u smjeru strujanja fluida razmaknutim 5 cm, na temelju prosječne temperature svih stijenki kanala i fluida na promatranom presjeku. Na ulazu u kolektor izmjena topline je intenzivnija zbog vrlo tankog temperaturnog graničnog sloja i veće razlike između temperature stijenske i fluida. Udaljavanjem od ulaza kolektora dolazi do povećanja debljine temperaturnog graničnog sloja što smanjuje iznos toplinskog toka (Slika 50). U srednjem i krajnjem dijelu kanala lokalne vrijednosti Nu broja se približavaju teorijskim vrijednostima za potpuno razvijeno laminarno strujanje u uvjetima konstantnog toplinskog toka pri uvjetima konstantne temperature stijenske. Isto tako treba primijetiti kako formirani temperaturni granični sloj nije simetričan. Rast Nu broja s porastom temperature kao i porast u smjeru strujanja duž kanala je posljedica načina njegova izračuna i činjenici da se temperaturni granični sloj nije u potpunosti formirao.

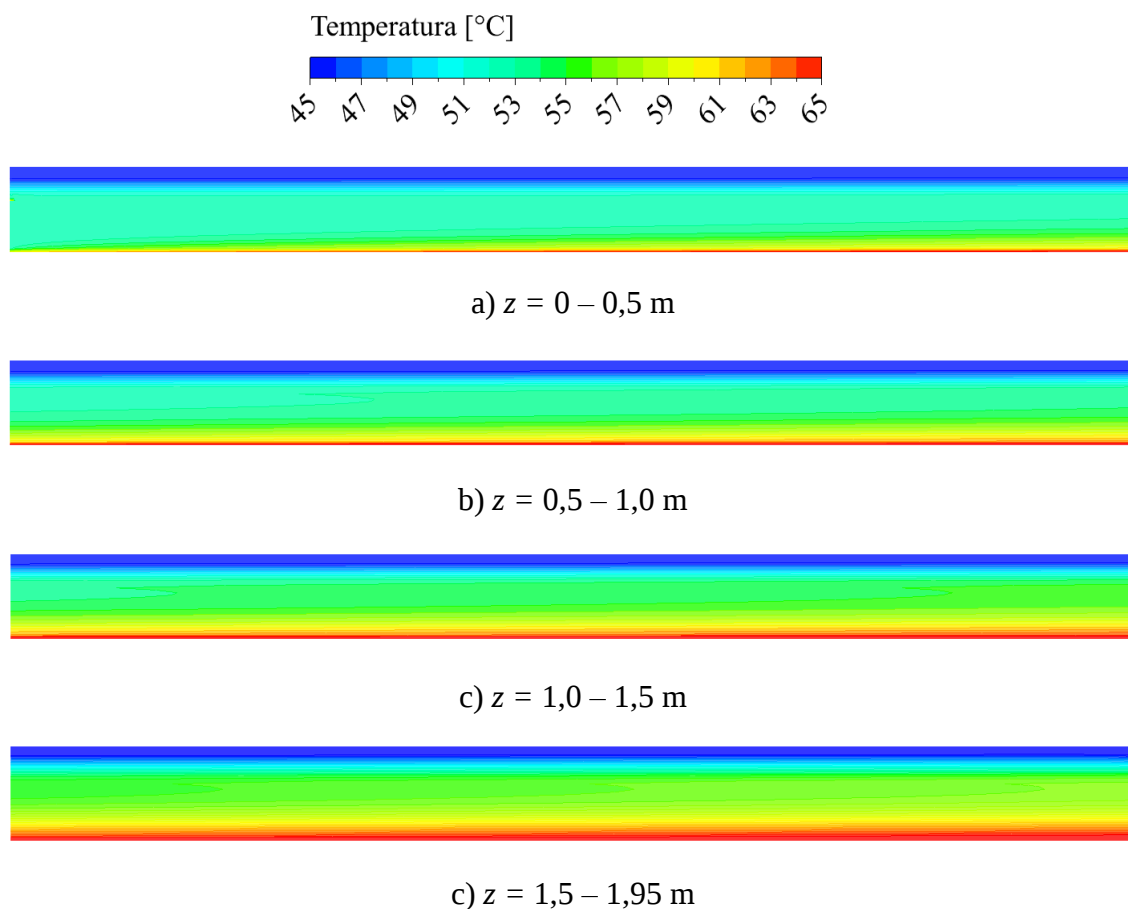


Slika 48 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 82,31$; $D_h = 21,5$ mm; $\vartheta_{f,avg} = 55,86$ °C

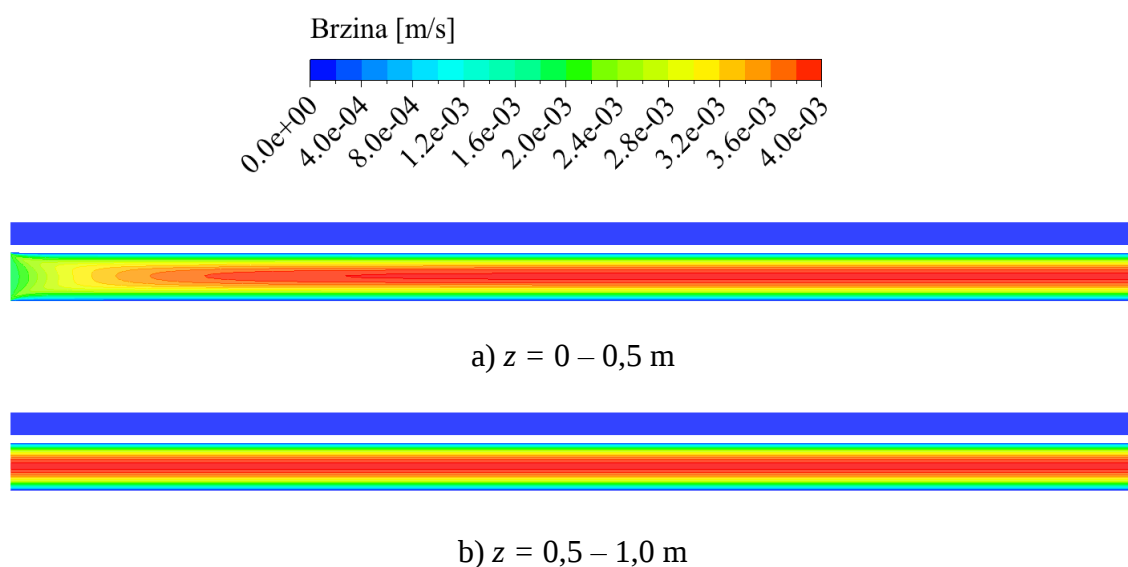


Slika 49 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 104,65$; $D_h = 21,5$ mm; $\vartheta_{f,avg} = 72,42$ °C

Smanjeni iznos toplinskog toka uslijed formiranja temperaturnog graničnog sloja negativno utječe na povećanje temperature apsorbera. Kao potencijalno rješenje, promjena geometrije kanala, poput primjene spiralnih kanala, omogućila bi razbijanje temperaturnog graničnog sloja uslijed višestrukih zavoja i promjena smjera strujanja fluida [97]. Isti efekt se može postići i ugradnjom komponenti za smanjenje debljine graničnog sloja [98,99]. Pri korištenju ovakvih tehnika za razbijanje graničnog sloja treba obratiti pažnju na eventualno povećanje pada tlaka, osobito pri nižim vrijednostima Re broja [100]. Istovremeno, potpuno formiranje hidrodinamičkog graničnog sloja se događa vrlo brzo nakon ulaska fluida u kanal (Slika 51). Kod visine razmaka između apsorbera i pokrova ≤ 10 mm spriječeno je gibanje zraka što je i vidljivo iz slike (maksimalna brzina zraka $< 0,0002$ m/s). Utjecaj visine razmaka između apsorbera i pokrova detaljnije je istražen u Poglavlju 3.5.4.

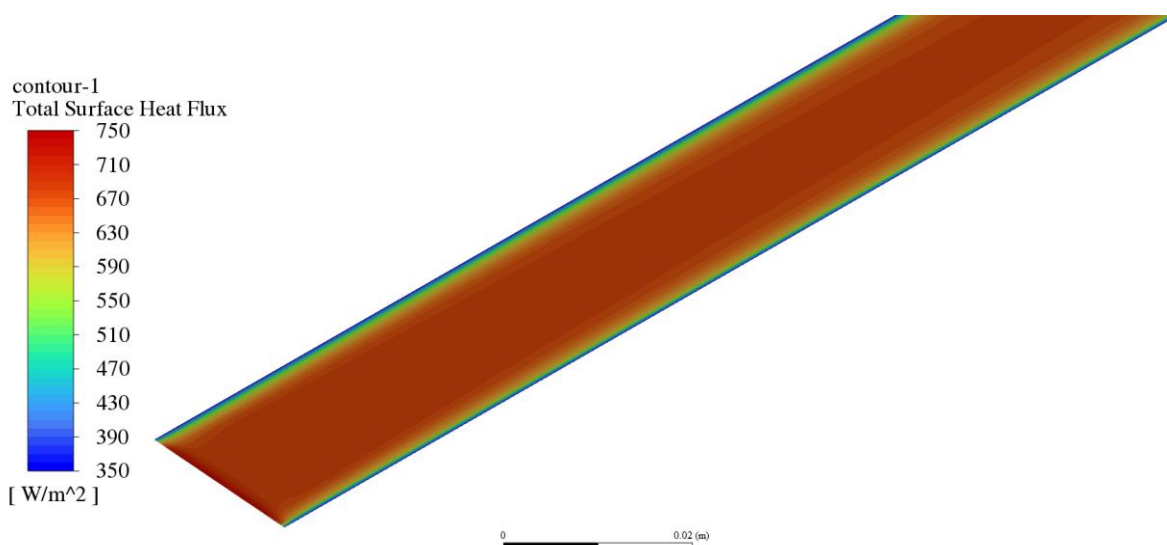


Slika 50 Prikaz formiranja temperaturnog graničnog sloja u vertikalnoj ravnini kolektora na sredini kanala na različitim duljinama kanala, $T_{\text{red}} = 0,0192 \text{ m}^2\text{K/W}$

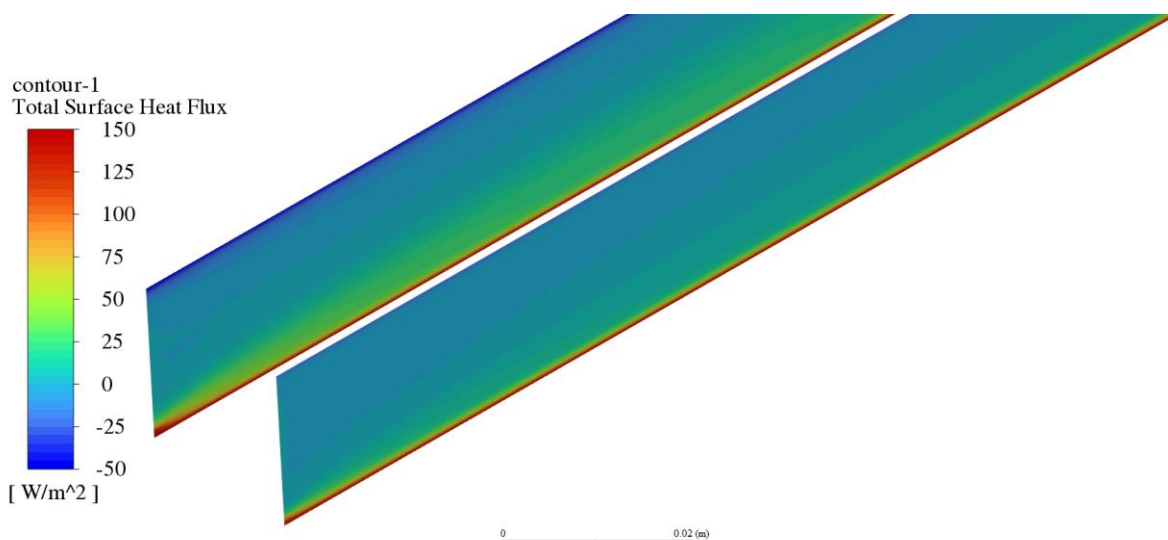


Slika 51 Prikaz formiranja hidrodinamičkog graničnog sloja u vertikalnoj ravnini kolektora na sredini kanala na različitim duljinama kanala, $T_{\text{red}} = 0,0192 \text{ m}^2\text{K/W}$

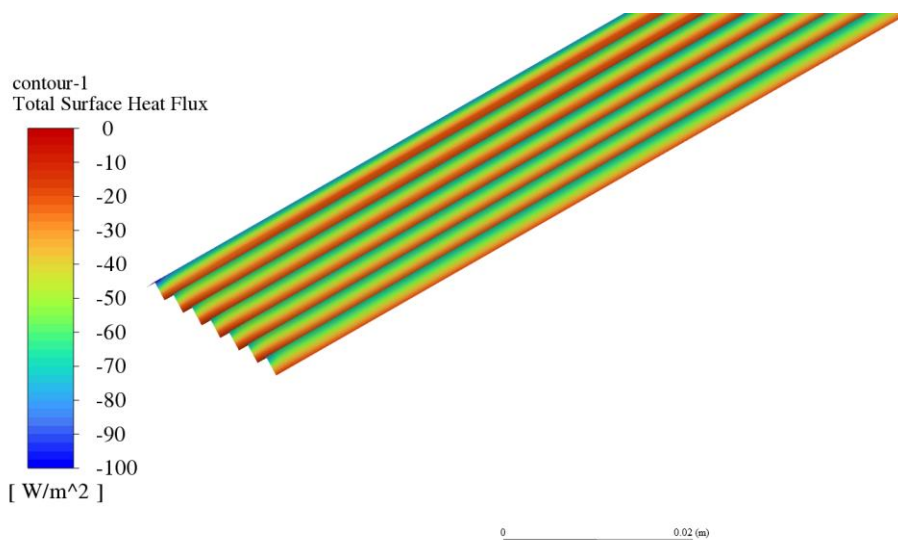
Toplina se vodi predaje preko cijele površine donjeg dijela kanala i do otprilike trećine visine bočnih stijenki kanala što je vidljivo iz raspodjele specifičnih toplinskih tokova prikazanih na Slika 52 a) do c), kao i na Slika 55 gdje je prikazana raspodjela temperatura. Pri tome, najveći dio toplinskih gubitaka od fluida prema okolini nastaje preko nazubljene gornje stijenke kanala, dok se manji dio gubi preko odijela bočnih stijenki. Takva situacija je zabilježena na svim presjecima duž kanal u smjeru strujanja. Obzirom na to da se cijelo apsorbirano sunčevo zračenje mora predati radnom mediju, ne očekuje se da je bitno moguće povećati korisni toplinski tok povećanjem površine apsorbera i dijela bočnih stijenki (npr. nazubljivanjem) ili povećanjem koeficijenta prijelaza topline u kanal, kao što je to npr. slučaj u cijevnim kolektorima gdje je apsorber u kontaktu sa zrakom. Ovo posljednje je provjereno kroz parametarsku analizu u Poglavlju 3.5.4. Ti konstrukcijski i radni parametri mogu jedino utjecati na smanjivanje temperature apsorbera što je korisno sa stanovišta izdržljivosti polimernog materijala. Dodatno, navedeno smanjenje temperature moglo bi se ostvariti uvođenjem dodatnog kanala s donje strane apsorbera [101].



a) Donja stijenska kanala



b) Bočne stijenke kanala

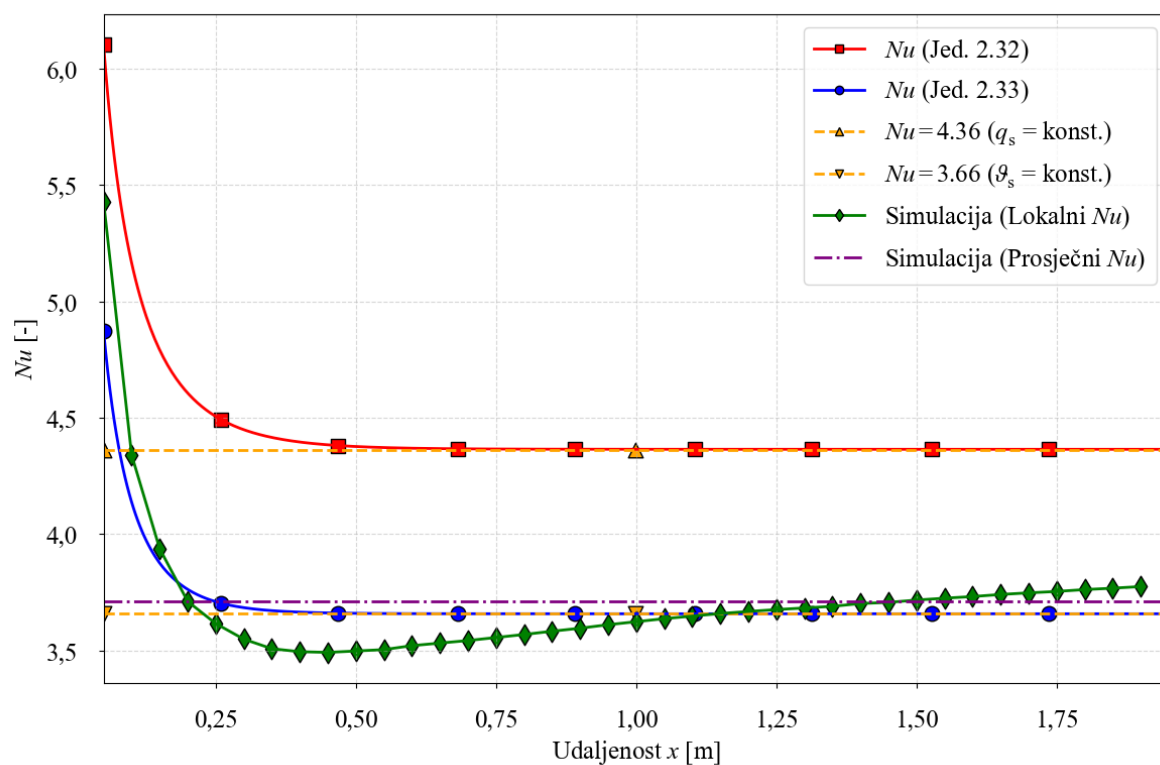


c) Gornja stijenska kanala

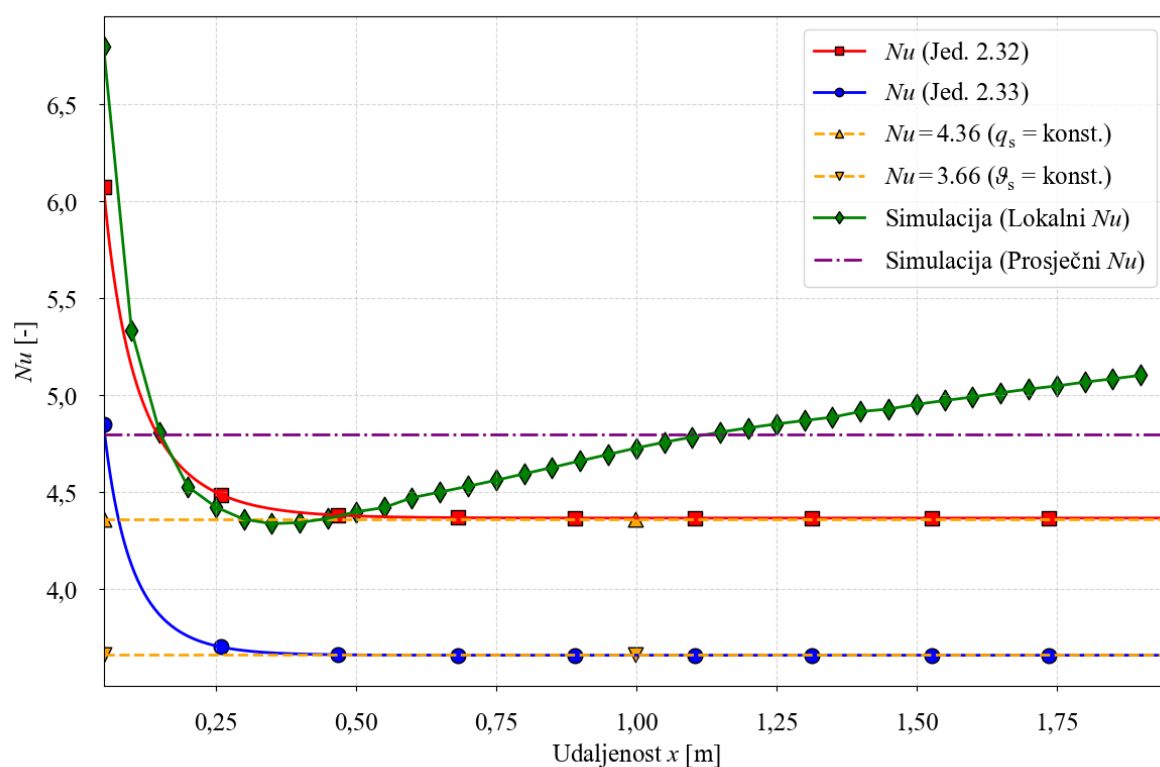
Slika 52 Raspodjela izmijenjenog specifičnog toplinskog toka na ulazu u kolektor, $T_{\text{red}} = 0,0192 \text{ m}^2\text{K/W}$

Za simulacije provedene na Geometriji 2 izračunate lokalne vrijednosti Nu broja za dvije radne točke prikazane su na Slika 53 i Slika 54. Sva zapažanja zabilježena na Geometriji 1 su ista kao i na Geometriji 2. Iz prikazanih dijagrama lokalnih Nu brojeva moguće je zaključiti kako s trenutačnom izvedbom polimernog kolektora nije moguće ostvariti bitno bolje koeficijente prijelaza topline u odnosu na one dobivene teorijskim izrazima za laminarno

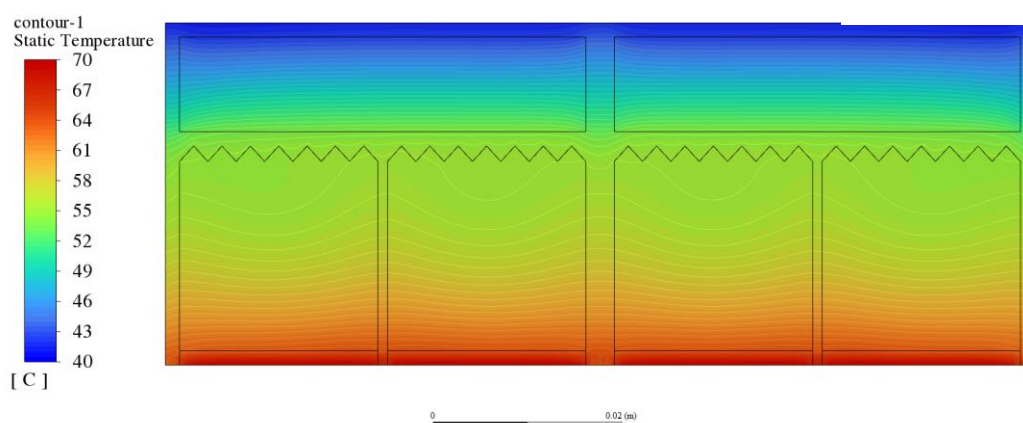
strujanje. Analiza utjecaja koeficijenta prijelaza topline pokazana je u sklopu parametarske analize opisana je u Poglavlju 3.5.4



Slika 53 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 79,21$; $D_h = 19$ mm; $\theta_f = 55,86$ °C



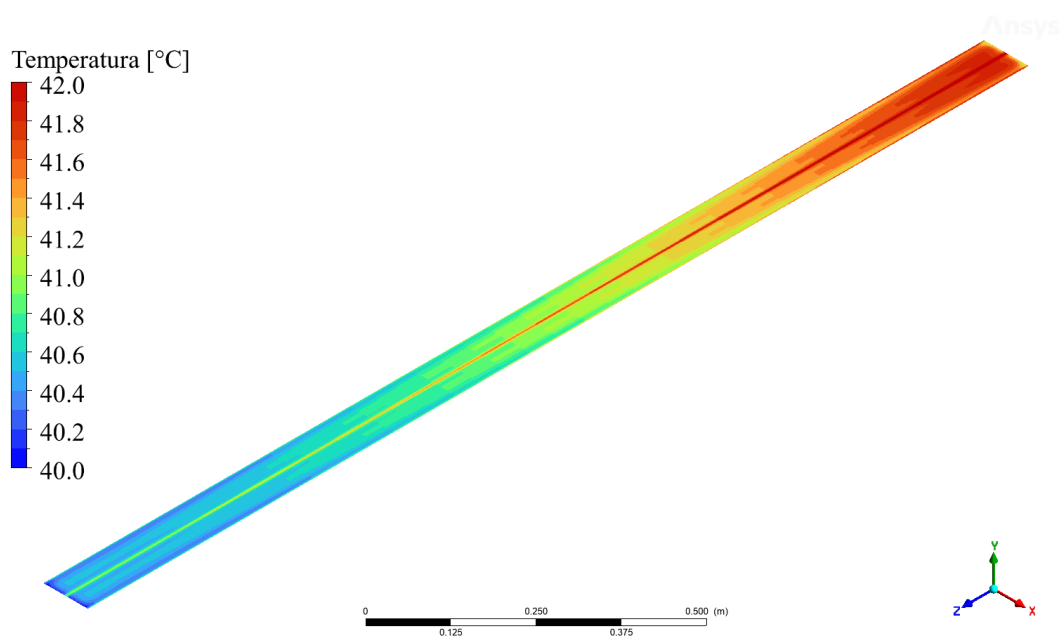
Slika 54 Distribucija Nu broja duž duljine kanala polimernog solarnog kolektora, usporedba s teoretskim vrijednostima, $Re = 100,76$; $D_h = 19$ mm; $\vartheta_f = 72,42$ °C



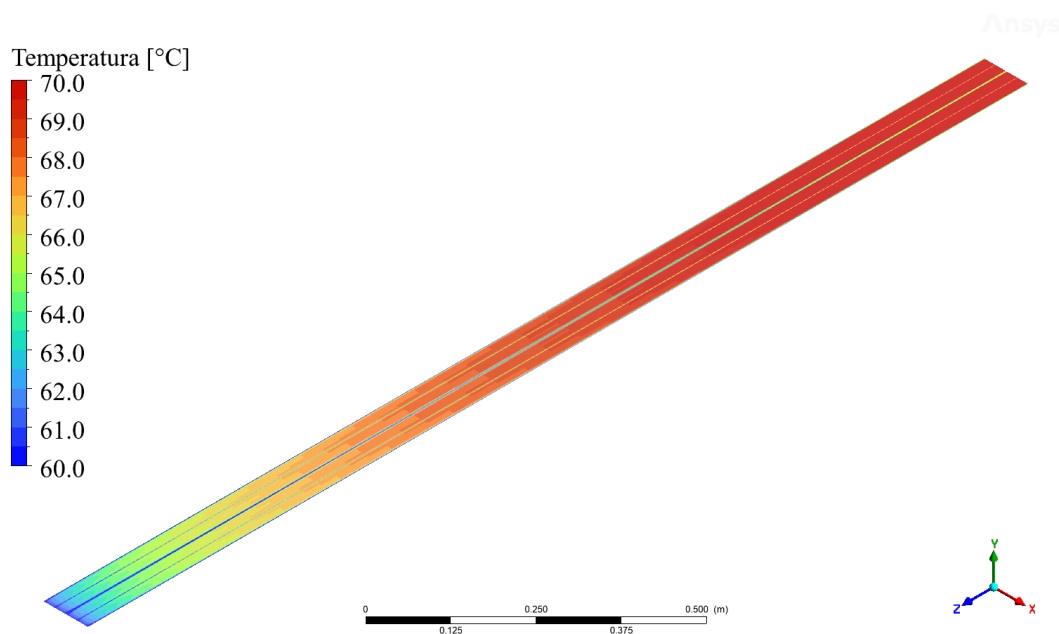
a) Bez granice prikaza

Slika 55 Prikaz raspodjele temperature na domeni Geometrije 2 na udaljenosti $z = 1,5$ m od ulaza

Gore spomenuti problemi vezani izmjenu topline i određivanja koeficijenta prijelaz topline posljedica su izvedbe polimernog kolektora u kojoj se središnji dio kolektora, ali i bočne stijenke kanala ponašaju kao svojevrsna rebra. U slučaju bolje provodnosti materijala to će zapravo imati negativan efekt na toplinsku učinkovitost, kako je opisano u Poglavlju 3.5.4. Raspodjela temperatura na površini pokrova i apsorbera prikazana je na Slika 56 i Slika 57. Iz slika se može primijetiti relativno ravnomjerna raspodjela temperatura koji prati rast temperature fluida prema izlazu iz kolektora. Dodatno, može se vidjeti da se određena mjesta kolektora (središnji dio, bočne stijenke kanala) pokazuju kao toplija područja slučaju prikaza površinske temperature pokrova, odnosno hladnija kod prikaza raspodjele temperature apsorbera što potvrđuje prije spomenuti efekt rebra. S druge strane, na temelju proračuna čvrstoće je zaključeno kako je rebro nužno zbog značajnijeg progiba pokrova pri većem proračunskom opterećenju.



Slika 56 Raspodjela temperature površine pokrova (Geometrija 2), $T_{red} = 0,0192 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

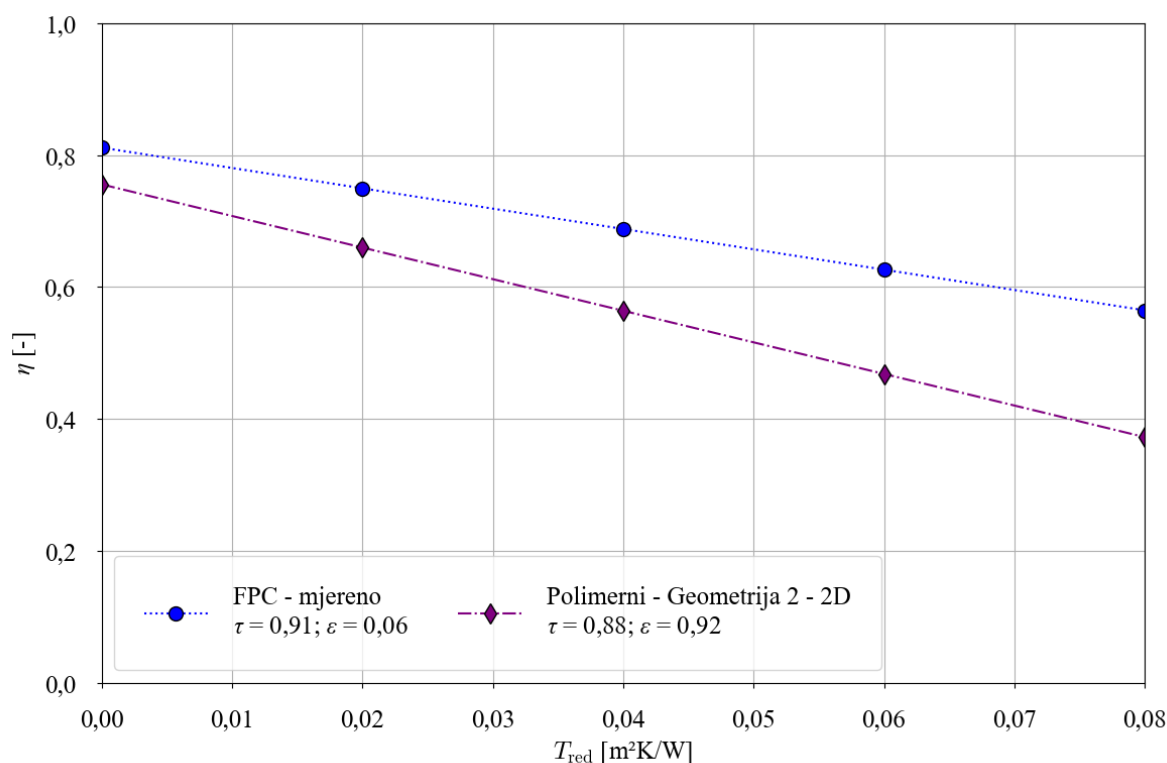


Slika 57 Raspodjela temperature površine apsorbera (Geometrija 2), $T_{\text{red}} = 0,0192 \text{ m}^2\text{K/W}$

3.5.4. Parametarska analiza konstrukcijskih i radnih parametara

Svrha provedene parametarske analize je istražiti utjecaj ključnih parametara poput razmaka između apsorbera i pokrova B , toplinske provodnosti λ , emisijskog faktora ε , koeficijenta prijelaza topline α i pozicije premaza apsorbera na toplinske karakteristike polimernog kolektora. Na temelju rezultata analize moguće je definirati smjernice za daljnji razvoj polimernog kolektora s ciljem povećanje toplinske učinkovitosti na vrijednosti metalnih cijevnih kolektora. S obzirom na to da je verifikacija numeričkih simulacija opisana u Poglavlju 0 rađena za jedan segment, izraženiji su toplinski gubici s bočnih ploha nego što je to bio slučaj kod provedbe simulacija pločastog solarnog kolektora. Iz tog razloga za potrebe parametarske analize provedene su dodatne 2D simulacije na Geometriji 2 s korekcijom rubnih uvjeta. Pretpostavljen je isti koeficijent prolaska topline s donje strane kolektora kao i isti pogonski uvjeti (temperatura okolišnog zraka, brzina vjetera i sunčevo zračenje). Za tako provedene simulacije rezultati su prikazani na dijagramu na Slika 58. Numerički određena toplinska učinkovitost polimernog kolektora je do 20 % niža za vrijednosti reducirane temperature $T_{\text{red}} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$. Nižu toplinsku učinkovitost moguće je kompenzirati proporcionalno većom instaliranom površinom. Isto tako, trenutačno određena krivulja polimernog kolektora ne koristi selektivni premaz koji bi dodatno smanjio toplinske gubitke

te povećao toplinsku učinkovitost. Analiza utjecaja primjene selektivnog premaza, ali i promjena drugih parametara prikazana je u nastavku.



Slika 58 Izračunata toplinska učinkovitost polimernog kolektora, 2D simulacija Geometrije 2 uz korekciju rubnih uvjeta, usporedba s pločastim kolektorom (izmjerene vrijednosti) [80]

Rezultati provedene parametarske analize prikazani su u dijagramu na Slika 59 i u Tablica 18. Povećanje udaljenosti između apsorbera i pokrova s $B = 10$ mm na $B = 30$ mm donosi povećanje toplinske učinkovitosti do 2 % pri višim vrijednostima reducirane temperature razlike T_{red} . Pri nižim vrijednostima T_{red} povećanje je nešto manje izraženo. Kod razmaka između pokrova i apsorbera $B = 20$ mm povećanje toplinske učinkovitosti je manje od 1 % kroz cijelo radno područje. Nanošenjem selektivnog premaza manjeg emisijskog faktora na gornju površinu drugog pokrova rezultira povećanjem toplinske učinkovitosti do 8 % pri razmaku $B = 10$ mm. Iz Slika 60 b) uočava se da je temperatura gornje nazubljene površine kanala nešto viša u usporedbi s konfiguracijom bez selektivnog premaza (Slika 60 a)). Iako je temperatura nazubljene površine blago povišena u odnosu na slučaj kada se ne koristi selektivni premaz, zbog istog su smanjeni toplinski gubici zračenjem u dugovalnom području što rezultira povećanjem toplinske učinkovitost. Daljnjim povećanjem razmaka

između apsorbera i pokrova na $B = 20$ mm dolazi do povećanja učinkovitosti od 7,1 % pri $T_{\text{red}} = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$, što je zapravo i manje povećanje nego pri razmaku $B = 10$ mm. Razlog tome je što je pri razmaku $B \leq 10$ mm gibanje zraka u zatvorenom prostoru između apsorbera i pokrova spriječeno, te se toplina s apsorbera prema pokrovu prenosi uglavnom provođenjem i zračenjem. Pri povećanju razmaka dolazi do gibanja zraka uslijed slobodne konvekcije (Slika 60 d) što rezultira povećanjem toplinskih gubitaka. Daljnjim povećanjem razmaka opet dolazi do blagog smanjenja toplinskih gubitaka.

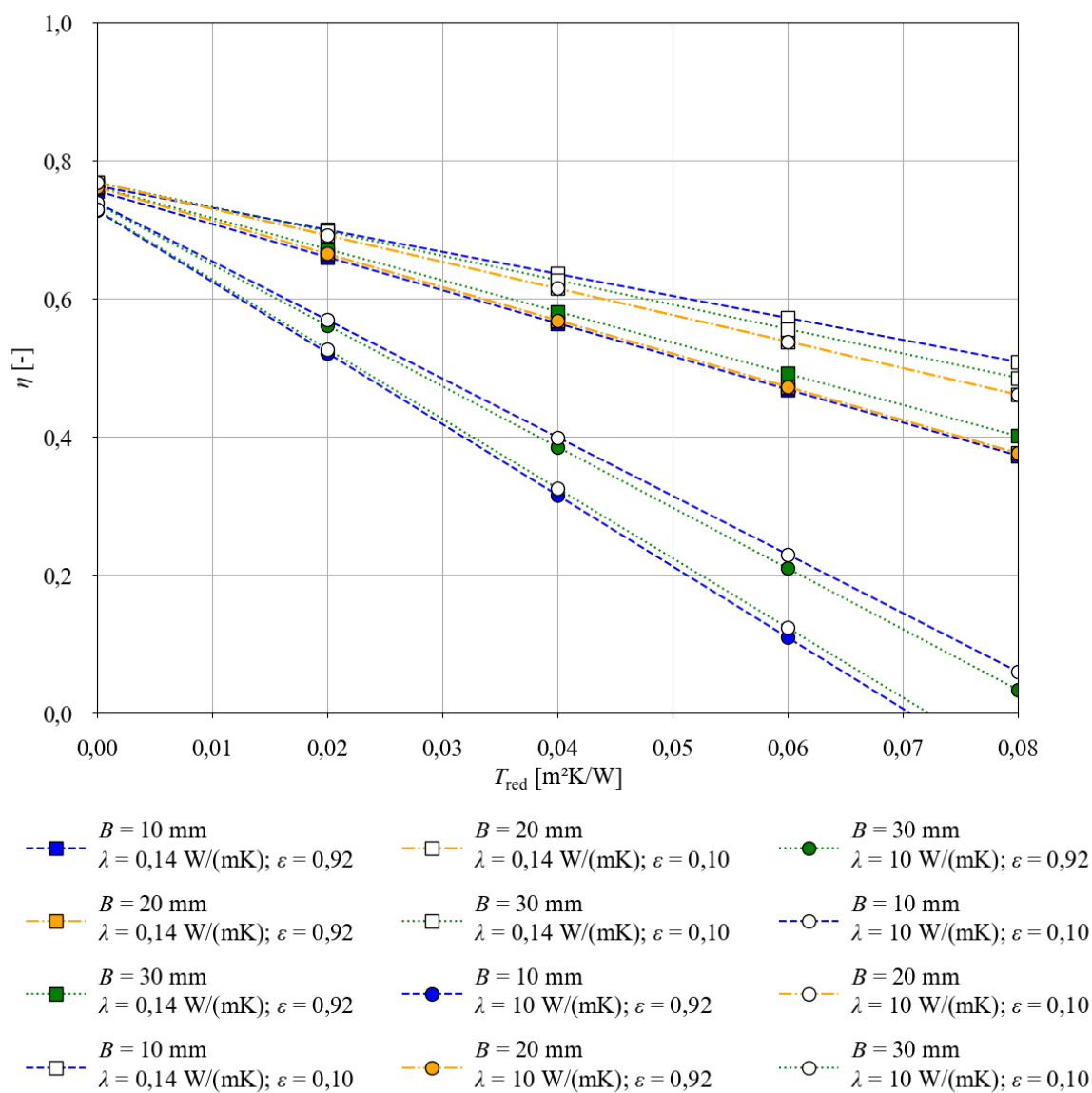
U literaturi se navodi kako je povećanje toplinske učinkovitosti kod promatranih polimernih kolektora moguće ostvariti dodavanje karbonskih nanocijevi u osnovni polimerni materijal. Povećanje toplinske učinkovitosti se ostvaruje na račun bolje toplinske provodnosti i ovisi o izvedbi kolektora. Osim bolje toplinske provodnosti osnovnog materijala, poboljšana su i mehanička svojstva. Povećanjem toplinske provodnosti materijala s $0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ na $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, kod razmaka $B = 10$ i $B = 30$ mm dolazi do znatnog smanjenja toplinske učinkovitosti. Međutim, kod razmaka $B = 20$ mm toplinske učinkovitosti je neznatno veća (<1 %). Iz Slika 60 **Error! Reference source not found.**a) i c) može se vidjeti da uz povećanu toplinsku provodnost materijala, stijenke kolektora zapravo prenose više topline prema gornjim dijelovima kolektora što povećava temperaturu gornjih površina kanala i pokrova. Posljedično, to dovodi to povećanih toplinskih gubitaka. Efekt rebra manje je izražen kod razmaka $B = 20$ mm (Slika 60 d)) zbog manje izražene slobodne konvekcije u prostoru između apsorbera i pokrova. Sličan rezultati su zabilježeni i u konfiguraciji kada se koristi selektivni premaz u slučaju s povećanom toplinskom provodnosti.

Tablica 18 Prikaz rezultata i međusobnih odstupanja toplinske učinkovitosti na temelju provedene parametarske analize, usporedba s rezultatima 2D simulacija [80]

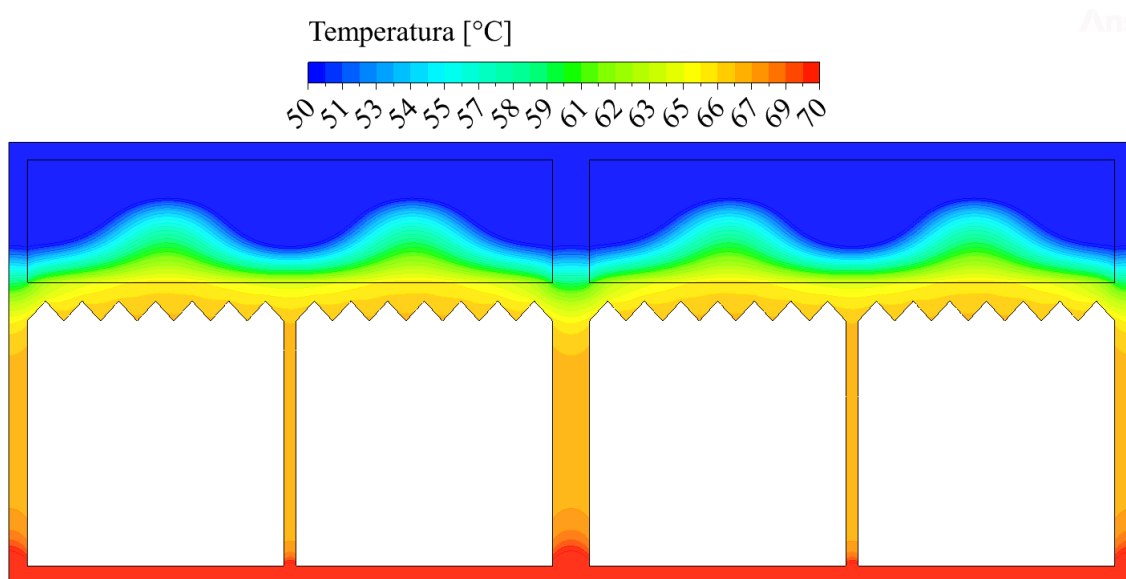
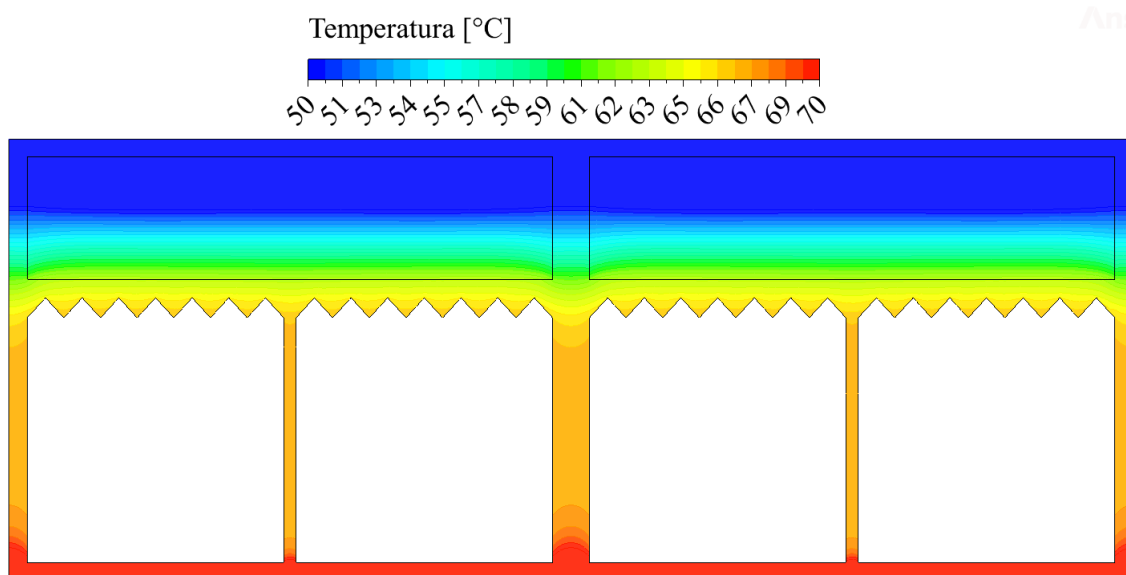
		η [%]			Δ [%]		
		0	0,03	0,05	0	0,03	0,05
	T_h^*						
1.	$B = 10 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92^a$	75,66	59,97	48,65	-	-	-
2.	$B = 20 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92$	76,06	60,72	49,35	0,40	0,75	0,70
3.	$B = 30 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92$	76,19	61,49	50,62	0,53	1,52	1,97
4.	$B = 10 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,10^b$	76,43	65,36	56,60	0,77	5,39	7,95
5.	$B = 20 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,10$	76,78	64,67	55,72	1,12	4,70	7,07
6.	$B = 30 \text{ mm}, \lambda = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,10$	76,80	65,49	57,09	1,14	5,52	8,44
7.	$B = 10 \text{ mm}, \lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92^c$	72,74	40,68	18,10	-2,92	-19,29	-30,55
8.	$B = 20 \text{ mm}, \lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92^d$	76,03	60,72	49,35	0,37	0,75	0,70
9.	$B = 30 \text{ mm}, \lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,92$	73,70	46,36	27,06	-1,96	-13,61	-21,59
10.	$B = 10 \text{ mm}, \lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \varepsilon = 0,10$	73,87	47,75	29,57	-1,79	-12,22	-19,09

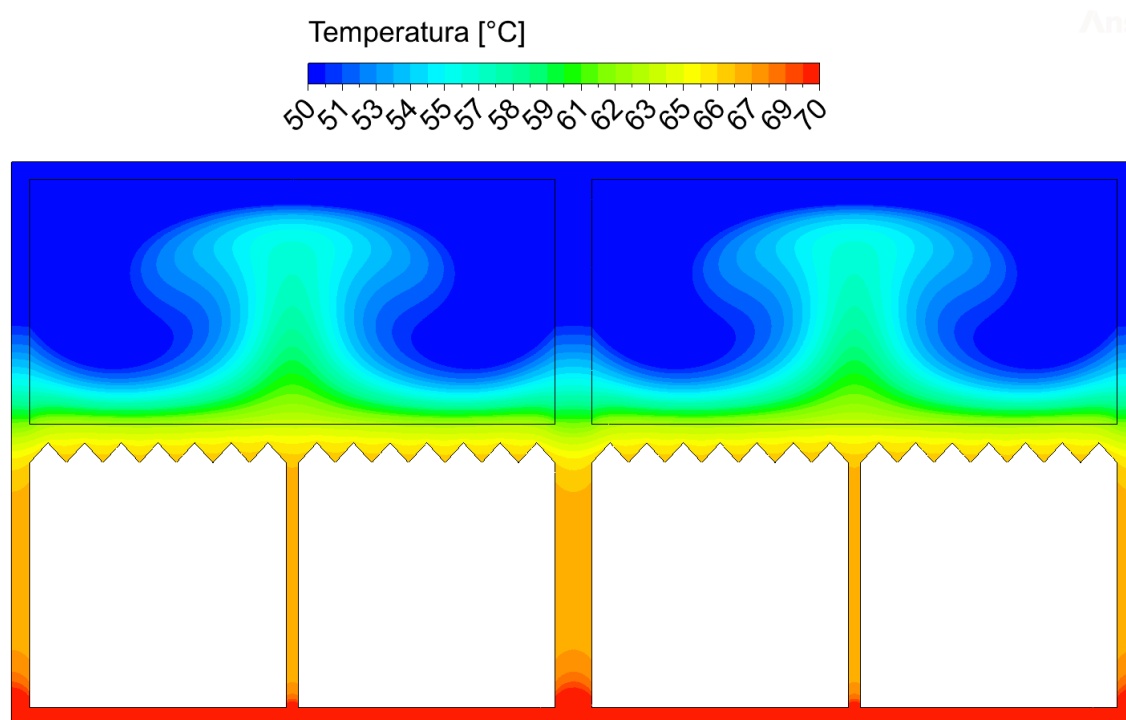
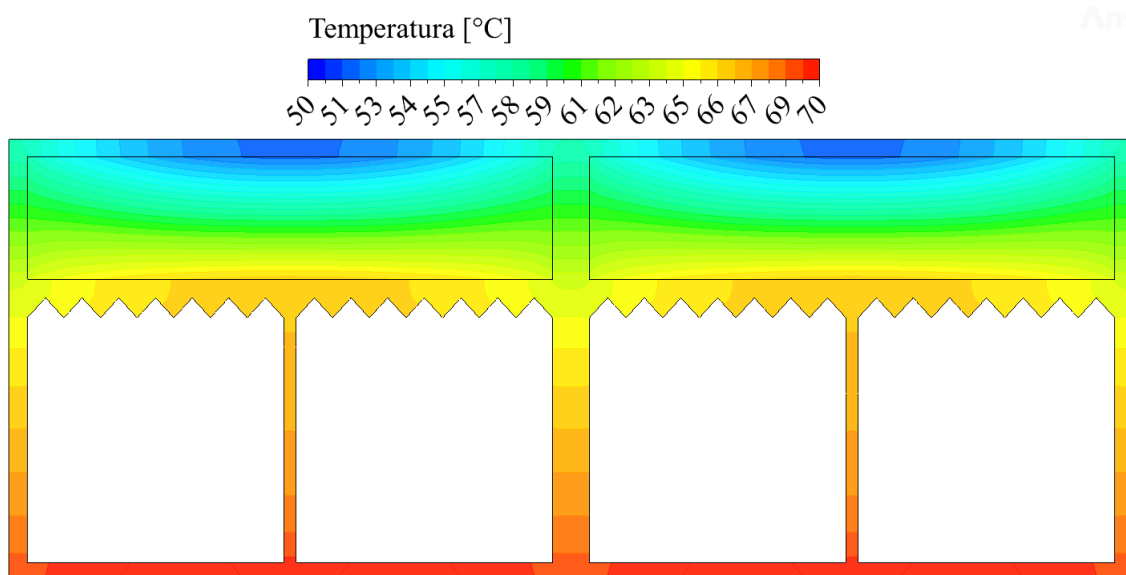
11.	$B = 20 \text{ mm}$, $\lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\varepsilon = 0,10$	76,78	64,67	55,72	1,12	4,70	7,07
12.	$B = 30 \text{ mm}$, $\lambda = 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\varepsilon = 0,10$	72,86	41,71	19,99	-2,80	-18,26	-28,66

^aosnovni slučaj, Slika 60 a), ^bSlika 60 b), ^cSlika 60 c), ^dSlika 60 d)



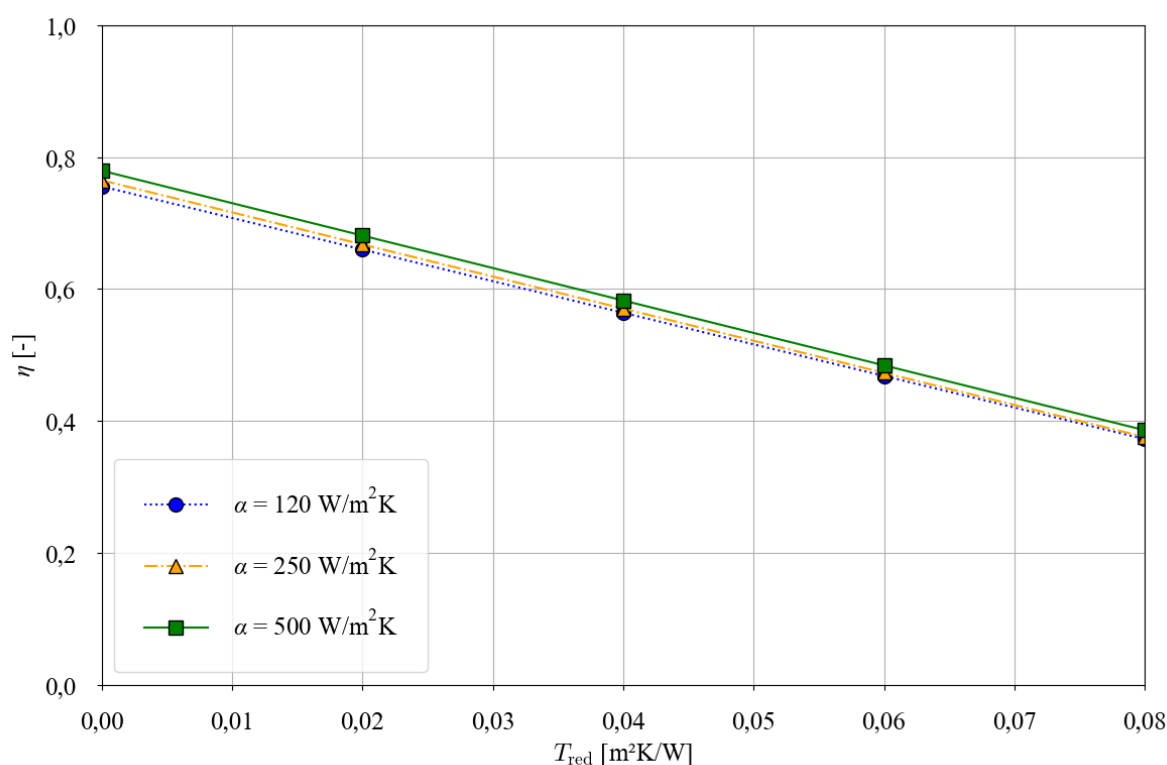
Slika 59 Krivulje učinkovitosti određene parametarskom analizom za pojedini slučaj [80]





Slika 60 Raspodjela temperature kolektora za odabrane slučajeve iz provedene parametarske analize pri vrijednosti reducirane temperaturne razlike $T_{\text{red}} = 0,05 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ [80]

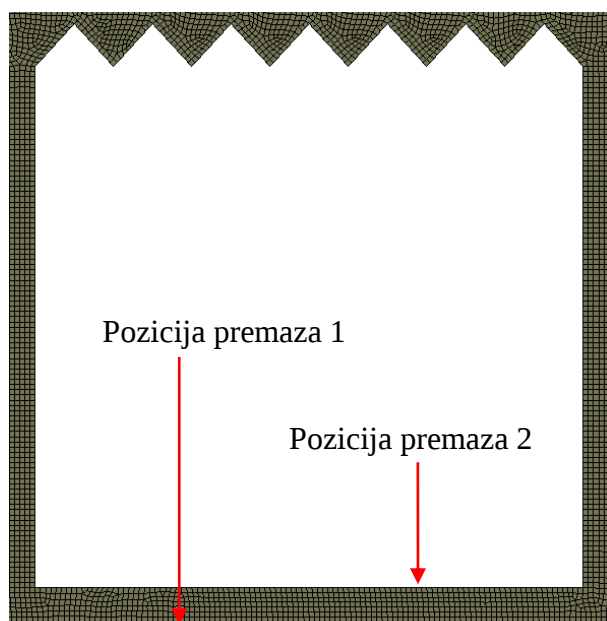
Utjecaj povećanja koeficijenta prijelaza topline veće je djelomično opisan u Poglavlju 0 gdje se pokazalo da malo povećanje koeficijenta prijelaza topline nije imalo značajniji utjecaj na toplinsku učinkovitost kolektora kod osnovne konstrukcije. Rezultati određenih krivulja učinkovitosti su prikazane na dijagramu na Slika 61. Daljnjim povećanjem koeficijenta prijelaza topline na $\alpha = 250 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ i $500 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ rezultiralo bi povećanjem toplinske učinkovitosti od 0,65 %, odnosno 1,17 % pri vrijednosti reducirane temperature $T_{\text{red}} = 0,03 \text{ m}^2\text{K/W}$. Efekt povećanja toplinske učinkovitosti nije veći zbog toga što je i dalje veći toplinski otpor predstavlja provođenje kroz materijal male toplinske provodnosti ($0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Isto tako, s obzirom na to da je uočeno da se toplina gubi preko gornje nazubljene površine i dijela bočnih stijenki povećanjem koeficijenta prijelaza topline povećavaju se i toplinski gubitci preko tih površina, koji su izraženiji s porastom temperature vode.



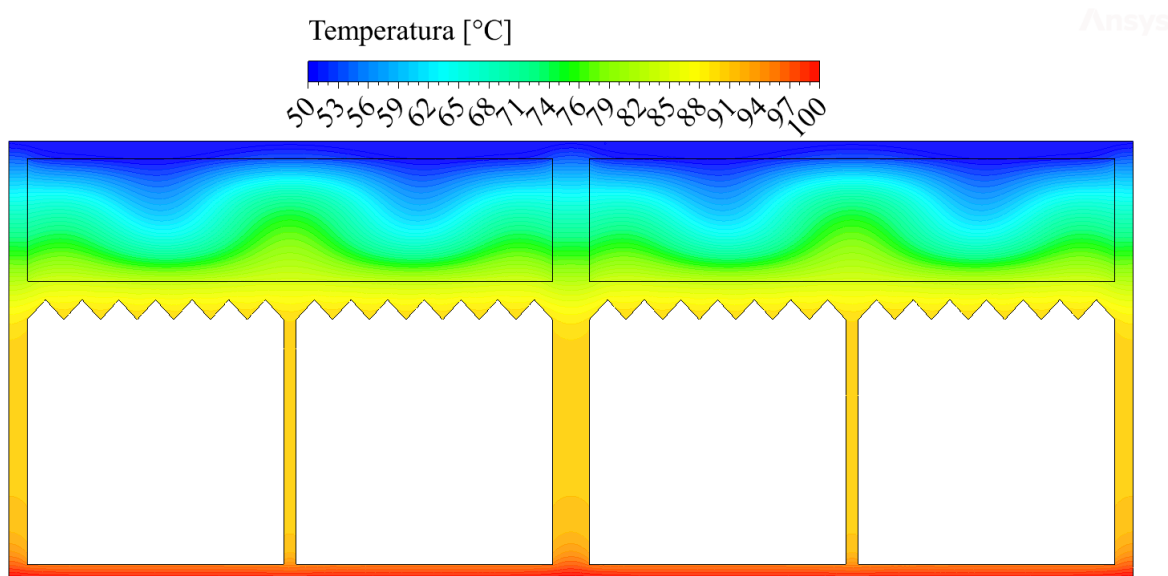
Slika 61 Utjecaj povećanja koeficijenta prijelaza topline na toplinsku učinkovitost [80]

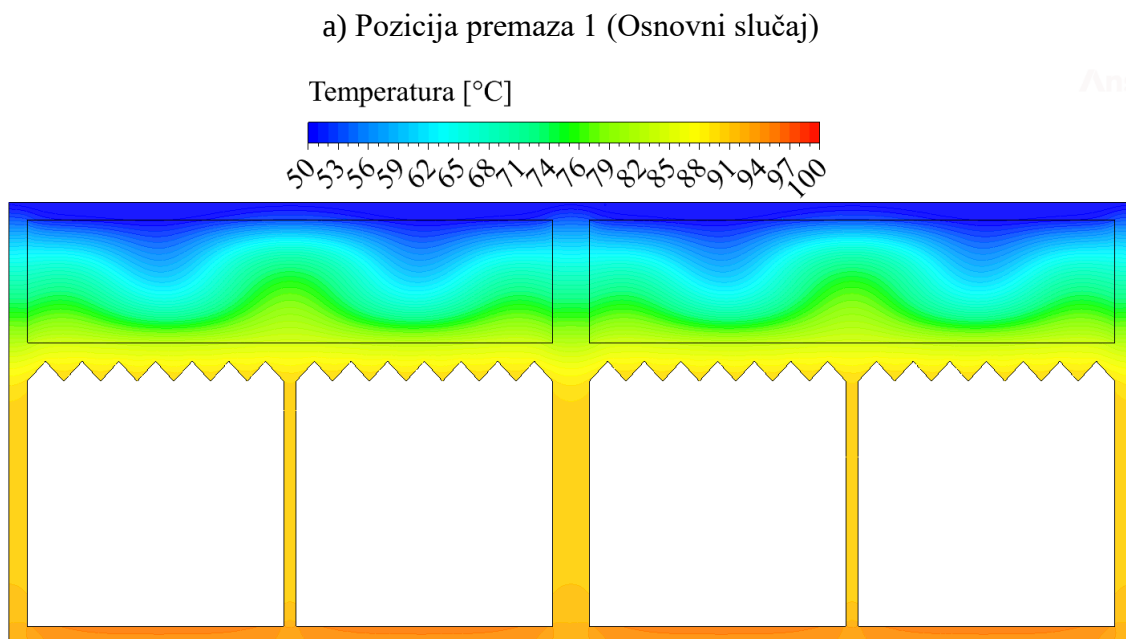
Utjecaj pozicije premaza apsorbera prikazan je u nastavku. Trenutačni prototip premazan je crnim premaza visokog faktora apsorpcije sunčevog zračenja (95 %) (Slika 62). Isto tako, razmatrala se i opcija nanošenja premaza s unutarnje strane kanala. Kada se usporede

raspodjela temperatura unutar kolektora uočava se nešto viša temperatura donje stijenke kanala u osnovnom slučaju (Slika 63 a)). Gornji dijelovi kolektora (pokrov) je na sličnim temperaturama u oba slučaja što isto tako rezultira sličnim toplinskim gubitcima. Unatoč nešto drugačijoj temperaturnoj distribuciji apsorbera, pozicija premaza neće dovesti do značajnijih promjena toplinske učinkovitosti, što je i vidljivo na dijagramu na Slika 64. Nanošenje premaza s unutarnje strane kanala (Pozicija premaza 2) se eventualno može razmatrati u svrhu snižavanja maksimalne temperature apsorbera u radu, koja u tom slučaju iznosi 94,4 °C u odnosi na 101,3 °C (Pozicija premaza 1).



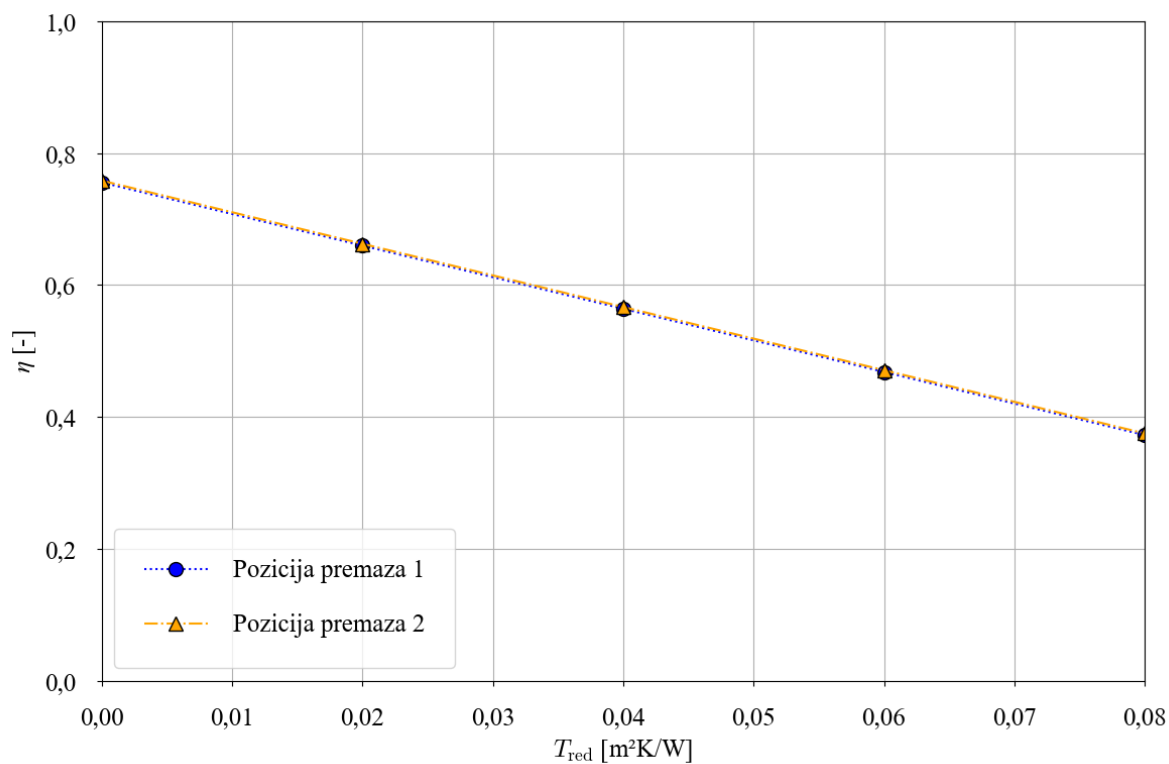
Slika 62 Prikaz razmatranih pozicija premaza apsorbera na jednom kanalu segmenta [80]





b) Pozicija premaza 2

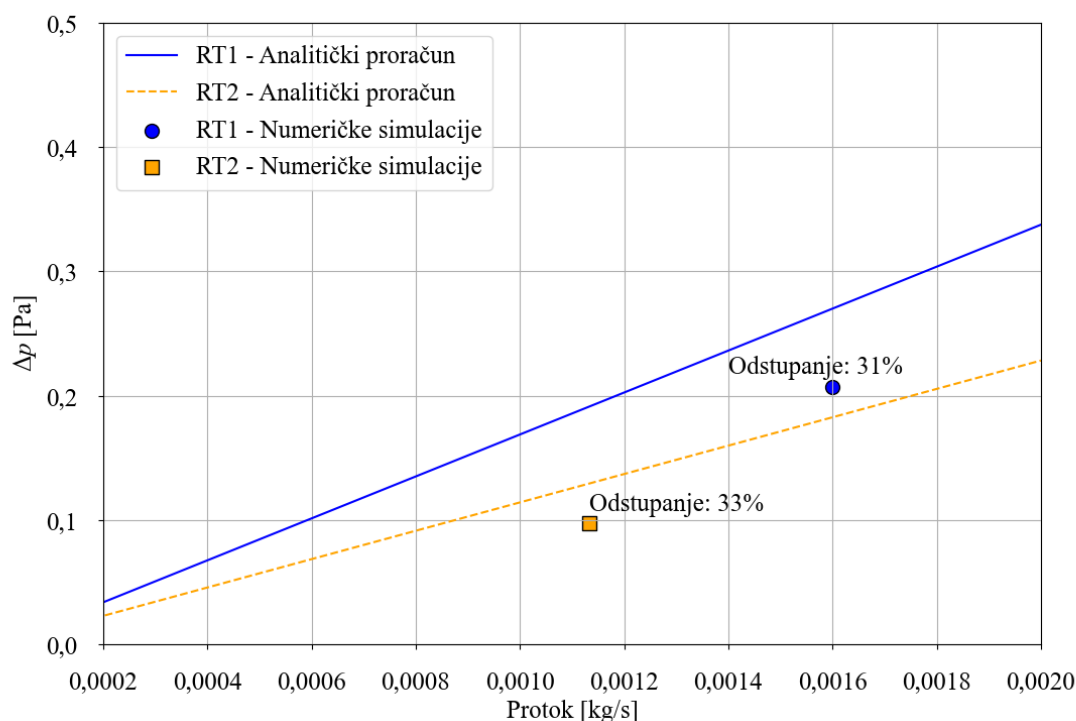
Slika 63 Raspodjela temeprature kolektora ovisno o poziciji premaza pri vrijednosti reducirane temperaturne razlike $T_{\text{red}} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ [80]



Slika 64 Utjecaj pozicije premaza na toplinsku učinkovitost [80]

3.5.5. Pad tlaka

S obzirom na to da je segment napravljen s kanalima relativno velikih dimenzija pad tlaka nije bio mjeran, ali je izračunat koristeći Jed. (2.61) i (2.62). Isto tako, pad tlaka je moguće odrediti na temelju podataka dobivenih numeričkim simulacijama. Rezultati su prikazani na Slika 65. Iz rezultat se vidi kako je linijski pad tlaka kroz kolektor zanemariv ($< 0,3 \text{ Pa}$) što je posljedica malih protoka kroz kanale velikih dimenzija. Ispitni protoci za RT1 i RT2 su iznosili 25 kg/h , odnosno 18 kg/h po m^2 površine apsorbera. Relativno mali ispitni protoci su korišteni kako bi se mogao ostvariti određeni prirast temperature na izlazu iz kolektora. Vrijednost pada tlaka kod metalnih kolektora su više, a osim o protoku, ovise i načinu izvedbe cijevnog registra, načinu spajanja i ukupnom broju kolektora [102]. Ovdje još treba spomenuti da se kod solarnih kolektora može javiti problem s nejednolikom distribucijom radnog fluida koje može uzrokovati smanjenje toplinske učinkovitosti 2-20 % [103]. Ova izvedba prototipa omogućuje vizualni pregled punjenja pojedinog kanala radnim fluidom. Prilikom provedbe toplinskih ispitivanja ustanovljeno je jednoliko punjenje svih kanala, što sugerira na relativno dobru distribuciju strujanja.



Slika 65 Pad tlaka određen numeričkim simulacijama za dvije radne točke, usporedba s analitičkim izrazima

3.6. Ocjena zadovoljenja zahtjeva ispitivanja prema normi EN ISO 9806:2017

Na temelju rezultata provedenog istraživanja moguće je provesti analizu zadovoljenja zahtjeva propisanih normom EN ISO 9806:2017 *Solar Energy – Solar Thermal Collectors – Test Methods*. Na osnovu provedene ocjene zadovoljenja navedenih kriterija moguće je definirati smjernice za konstrukcijska poboljšanja sa svrhom daljnjeg razvoja prototipa komercijalnog polimernog solarnog kolektora.

Standardna temperatura stagnacije

Za Geometriju 1 temperatura stagnacije izmjerena je paralelno prilikom provedbe ispitivanja toplinskih karakteristika, te je onda proračunata standardna temperatura stagnacije. U slučaju smanjenih toplinskih gubitaka zbog bolje izolacije, korišteni su koeficijenti krivulje učinkovitosti dobivenih na temelju 2D simulacija opisanih u Poglavlju 3.5.4. Rezultati su prikazani u Tablici 19. Iz prikazanih rezultata se vidi kako u oba slučaja standardna temperatura stagnacije je viša od maksimalno dozvoljene temperature. Za usporedbu u tablici je prikazan i podatak o temperaturi stagnacije konvencionalnog pločastog kolektora. U tom pogledu potrebno je dodatno spustiti maksimalnu temperaturu koja se javlja u kolektoru. Korištenjem vanjskog zasjenjenja moguće je sniziti maksimalne temperature bez utjecanja na toplinsku učinkovitost [104]. Isto tako, moguće je koristiti sustave sa strujanjem zraka oko kolektora s donje strane čime će se povećati dodatno toplinski gubici samo u stagnacijskom režimu [105]. Primjena neke od metoda za daljnjim snižavanjem temperature stagnacije je nužno kako bi se osigurao dugotrajan i kontinuirana rad polimernog kolektora. S druge strane primjenom nekih rješenja za snižavanjem temperature stagnacije će svakako utjecati na povećanje troškova proizvodnje takvog kolektora.

Tablica 19 Određena standardna temperatura stagnacije prototipa

Korišteni koeficijenti	ϑ_{stg} [°C]
Mjerenje, Geometrija 1 [80]	125,1
2D Simulacija	173,8
Pločasti kolektor [104]	197,0

Test izloženosti

Zbog ograničenog broja funkcionalnih segmenata prototipa koji su bili na raspolaganju za provedbu ispitivanja odlučeno je napraviti preliminarna mjerenja izloženosti koja su rađena paralelno prilikom provedbe mjerenja toplinske učinkovitosti. Zasebni segmenti su postavljeni paralelno prilikom provedbe mjerenja te su praćene temperature između apsorbera i izolacije. Mjerenja su rađena tijekom više dana tijekom perioda od 9 – 17 h. Prilikom mjerenja nisu zabilježene nikakve deformacije i oštećenja na segmentima. S obzirom na maksimalne temperature za PVC-C za očekivati je da će u normalnim okolišnim uvjetima starenje materijala biti zadovoljavajuće. Postojanost na UV zračenje polimera relativno jednostavno je poboljšati uz dodavanje određenih aditiva u postupku proizvodnje ili nanošenjem premaza dostupnih na tržištu. Nakon izrade komercijalnog kolektora potrebno je napraviti završna ispitivanja sukladno normi.

Ispitivanje na vanjske i toplinske unutarnje šokove

Zbog ograničenog broja funkcionalnih segmenata prototipa koji su bili na raspolaganju za provedbu ispitivanja odlučeno je napraviti preliminarna mjerenja na vanjske i toplinske unutarnje šokove koja su rađena paralelno prilikom provedbe mjerenja toplinske učinkovitosti. Ispitivanja su provedena na nešto nižim temperaturama od onih propisanih normom, a koje su ostvarene prilikom toplinskih ispitivanja. Nisu zabilježena nikakva oštećenja ili greške. U slučaju vanjskog toplinskog šoka za pretpostaviti je da će polimerni materijali bolje podnositi izazvana opterećenja u odnosu na staklo. Nakon izrade komercijalnog kolektora potrebno je napraviti završna ispitivanja sukladno normi.

Ispitivanje propuštanja kiše

Zbog toga što je kolektor napravljen iz jednog komada procesom ekstruzije na samom segmentu ne može doći do propuštanja kiše u prostor između apsorbera i pokrova. Eventualno propuštanje kod ovog prototipa moguće je na spoju segmenata i priključaka uslijed lošijeg brtvljenja. Kolektor je zalijevan vodom iz mlaznice na spojevima pri čemu nije uočeno propuštanje.

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje

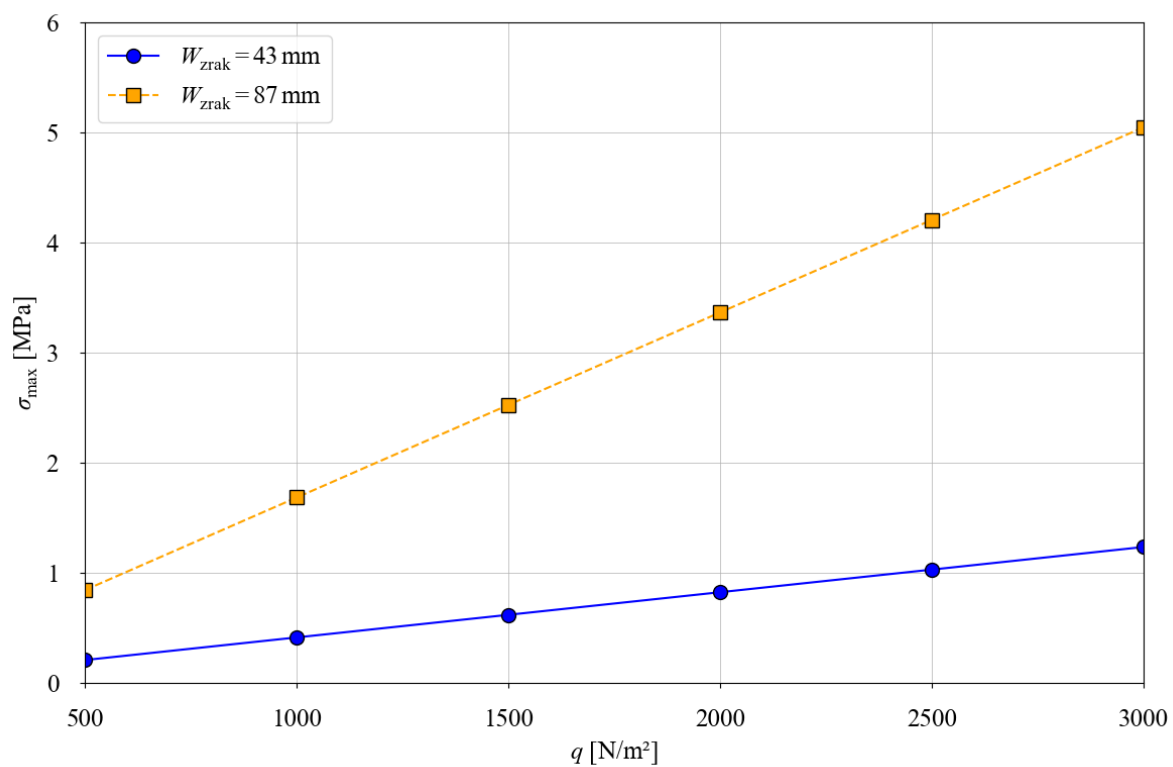
Ovaj test nije proveden jer kolektor nije deklariran kao otporan na smrzavanje. Uobičajeno je koristiti mješavinu vode i glikola koja je otporna na smrzavanje. U ovom slučaju, s obzirom na to da se radi PVC-C materijalu, nije preporučljivo dugotrajno korištenje propilen glikola zbog mogućeg negativnog utjecaja na mehaničke karakteristike. Umjesto toga može se koristiti mješavina na bazi glicerina dostupna na tržištu.

Ispitivanje opterećenja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka

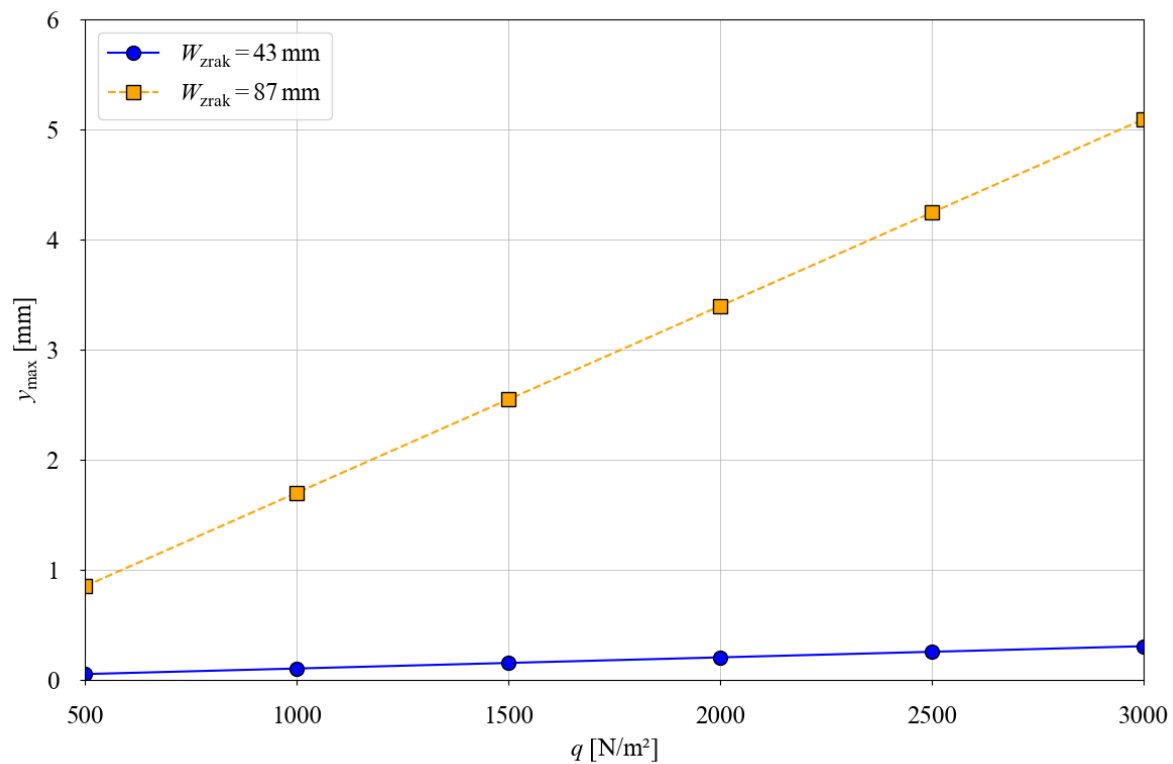
Provedena su preliminarna ispitivanja na posebno pripremljenim cijevima. To je napravljeno jer se segmenti nisu mogli dovoljno dobro zabrtviti što je glavni preduvjet za ostvarivanje određenog pretlaka. Ispitivanja su provedena na djelovanje unutarnjeg tlaka 2,5 bar pri temperaturi od 60 °C u trajanju od 1 h. Nisu zabilježena nikakva oštećenja na materijalu, što pokazuje da materijal može izdržati zahtjeve u pogledu opterećenja uslijed djelovanja tlaka. Nakon izrade komercijalnog kolektora potrebno je napraviti završna ispitivanja sukladno normi.

Ispitivanje otpornosti na mehanička opterećenja uslijed djelovanja vanjskog tlaka

Ispitivanje otpornosti na mehanička opterećenja uslijed djelovanja vanjskog tlaka provedeno je putem analitičkog proračuna opisanog u Poglavlju 2.6.3. Rezultati su prikazani na dijagramima na Slika 66 i Slika 67. Iz rezultata se može primijetiti da je za izvedeni prototip naprezanje pokrova ~1,3 MPa pri opterećenju od 3000 Pa, što je ispod granice dopuštenih naprezanja [106]. Progib pri istom opterećenju je manji od 0,05 mm. U slučaju izvedbe bez rebra naprezanje iznosi ~ 5 MPa, uz progib ~ 5 mm. Rezultati pokazuju da odabrani materijal može zadovoljiti zahtjeve u pogledu opterećenja uslijed djelovanja vanjskog tlaka za obje izvedbe, međutim kod izvedbe bez rebra dolazi do značajnog progiba pokrova. Osim toga, izvedba bez rebra mogla bi pokazati lošije rezultate tijekom ispitivanja otpornosti na udarce. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja finalne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.



Slika 66 Maksimalno naprezanje pokrova pri različitim vrijednostima opterećenja



Slika 67 Maksimalni progib pokrova pri različitim vrijednostima opterećenja

Ispitivanje otpornosti na mehaničko opterećenje uslijed udarca

Provedeno je preliminarno ispitivanje otpornosti na mehaničko opterećenje uslijed udarca čeličnog cilindra sa zaobljenim vrhom mase 156 g. Početna visina bacanja je 0,4 m s korakom od 0,2 m. Prva oštećenja su zabilježena na visini bacanja 1,2 m pri čemu je došlo do blagog površinskog oštećenja. S povećanjem visine bacanja do 2 m i dalje su bilježena oštećenja, ali ne i lom materijala. Normom se propisuje da se kuglica baca unutar 75 mm od rubova kolektora. Ukupna širina prototipa iznosi 115 mm, te isto tako se na sredini pokrova nalazi rebro. Zbog činjenice da polimeri materijali imaju bolju otpornost na udarce u odnosu na staklo za pretpostaviti je da će ovakva izvedba bolje podnositi opterećenja izazvana udarcem. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja finalne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

Ispitivanje toplinskih karakteristika

U istraživanju je provedeno detaljno eksperimentalno i numeričko ispitivanje toplinskih karakteristika prototipa polimernog kolektora. Rezultati su opisani u poglavljima 3.4 i 3.5. Određena krivulja učinkovitosti kao polinom drugog stupnja koristi se za usporedbu s konvencionalnim pločastim kolektorom. Pri istim uvjetima polimerni kolektor ima do $\approx 20\%$ nižu toplinsku učinkovitost za vrijednost reducirane temperature razlike $T_{\text{red}} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$. Nižu toplinsku učinkovitost moguće je kompenzirati proporcionalno većom instaliranom površinom što je ekonomski opravdano u slučaju manjih troškova kolektora. Provedena parametarska analiza pokazala je da primjenom selektivnog premaza moguće ostvariti povećanje toplinske učinkovitosti do $\approx 8\%$ uz zadržavanje razmaka između pokrova i apsorbera 10 mm. Povećanjem razmaka utjecaj na toplinsku učinkovitost je zanemariv. S druge strane povećanje toplinske provodnosti ima negativan efekt na toplinsku učinkovitost zbog same konstrukcije prototipa. U tom slučaju stijenke kolektora se ponašaju kao svojevrsna rebra i u slučaju bolje toplinske provodnosti prenosi se više topline prema gornjim dijelovima kolektora. Posljedica toga je da su gornji dijelovi na višoj temperaturi što dovodi do većih toplinskih gubitaka. Povećanje toplinske provodnosti je opravdano u slučaju korištenja selektivnog premaza i povećanja razmaka između apsorbera i pokrova na 20 mm. Pozicija premaza apsorbera kao i povećanje koeficijenta prijelaza topline u kanalima neće dovesti do značajnih promjena toplinske učinkovitosti. Problem je uočen i kod raspodjele temperature na stijenkama kanala. Kanali s vodom efektivno predaju toplinski tok na donjoj

površini kanala i na polovici bočnih površina. S druge polovice bočnih površina i s gornje površine smjer toplinskog toka je u suprotnom smjeru. Iz tog razloga eventualno povećanje koeficijenta prijelaza topline ne dovodi do željenog efekta povećanja toplinske učinkovitosti. Osiguravanje bolje temperaturne raspodjele, odnosno toga da su sve stijenke kanala na temperaturi višoj od temperature vode. To je moguće korištenje kanala manjeg hidrauličkog promjera ili korištenjem cijevnih kanala unutar debljeg apsorbera.

Ispitivanje hidrauličkih karakteristika

Zbog malih očekivanih vrijednosti pada tlaka nije provedeno mjerenje istog, već je pad tlaka određen numeričkim i analitičkim putem. Rezultati su prikazani u Poglavlju 3.5.5. Izračunate vrijednosti linijskog pada tlaka analitičkim putem i numeričkim simulacijama su manje od 0,3 Pa za definirani hidraulički promjer $D_h = 21,5$ mm. Tako male vrijednosti su posljedica izvedbe kanala relativno velikih dimenzija, kao i mali ispitni protoci kroz kolektor. Završna ispitivanja su moguća nakon definiranja finalne konstrukcije i izrade komercijalnog prototipa.

3.7. Smjernice za razvoj komercijalnog prototipa

Nanošenje selektivnog premaza u procesu proizvodnje

U Poglavlju 3.3 pokazana je usporedba toplinske učinkovitosti preliminarne izvedbe prototipa polimernog kolektora i konvencionalnog metalnog kolektora koji koristi skupe selektivne premaze emisijskog faktora $\varepsilon = 0,06$. Rezultati su pokazali da pločasti kolektor bez selektivnog premaza ima nižu toplinsku učinkovitost u odnosu na predloženu konstrukciju polimernog kolektora RD-2. Na temelju parametarske analize opisane u Poglavlju 3.5.4 pokazano je kako je primjenom selektivnog premaza emisijskog faktora $\varepsilon = 0,10$ moguće povećati toplinsku učinkovitost izvedenog prototipa polimernog kolektora do 8 %, pri razmaku $B = 10$ mm. S druge strane, treba imati na umu da povećanje toplinske učinkovitosti znači smanjenje toplinskih gubitaka što rezultira većom stagnacijskom temperaturom kada kroz kolektor ne struji radni medij. Isto tako, primjena selektivnog premaza u polimernom kolektoru će utjecati na rast proizvodnih troškova što će biti potrebno detaljnije razraditi kroz ekonomsku analizu predloženog konstrukcijskog rješenja.

Povećanje razmaka između dva pokrova i toplinske provodnosti materijala

Kako je istaknuto na početku ovog rada, jedna od prednosti polimernih materijala u odnosu na bakar i aluminij u izradi solarnih kolektora je oblikovljivost. Iz tog razloga, eventualne konstrukcijske izmjene je moguće i relativno jednostavno implementirati. U Poglavlju 3.5.4 analiziran je utjecaj povećanja razmaka B između dva pokrova polimernog kolektora. Povećanje razmaka s $B = 10$ mm na $B = 30$ mm rezultiralo bi povećanjem toplinske učinkovitosti do 2 %. Uz primjenu selektivnog premaza i povećanje razmaka na $B = 30$ mm moguće je ostvariti povećanje toplinske učinkovitosti od ~8,4 %. U sklope parametarske analize provedena je i analiza utjecaja toplinske provodnosti λ na toplinske karakteristike. U ovakvoj izvedbi polimernog kolektora povećanje toplinske provodnosti negativno utječe na toplinsku učinkovitost. Kako je opisano u Poglavlju 3.5.3 stijenke kanala se ponašaju kao rebra i u slučaju veće toplinske provodnosti to povećava temperaturu gornjih površina. Rezultat toga su povećani toplinski gubici i niža toplinska učinkovitost do 19,1 % pri razmaku $B = 10$ mm. Povećanje toplinske provodnosti jedino rezultira povećanjem učinkovitosti uz primjenu selektivnog premaza i povećanje razmaka na $B = 20$ mm.

Promjena geometrije kanala za strujanje radnog medija

U kanalima s vodom korisni toplinski tok se izmjenjuje na donjoj površini (apsorber) i djelomično na bočnim stijenama do trećine njihove visine. Zbog toga eventualno povećanje koeficijenta prijelaza topline ili površine tih dijelova neće rezultirati značajnijim povećanjem toplinske učinkovitosti, ali može smanjiti temperaturu tih dijelova. Trenutačne dimenzije kanala su odabrane kako bi omogućile izradu Prototipa 1, u kojem su unutar kanala umetnute cijevi čime bi se ostvarili željeni režimi rada (Poglavljje 2.5). Odabrani kanali su relativno velikih dimenzija ($D_h = 19$ mm) što rezultira niskim vrijednostima koeficijenta prijelaza topline, koji ovdje nisu problem, ali te dimenzije kanala utječu na pad tlaka (Poglavljje 3.5.5) koji je za ovakvu konstrukciju gotovo zanemariv ($< 0,3$ Pa). Jedno od potencijalnih rješenja za dodatno snižavanje temperature apsorbera i dijela bočnih stijenki kanala jest ugradnja turbulatora za smanjenje debljine temperaturnog graničnog sloja. Također, to smanjenje temperature bi se moglo ostvariti povećanjem površine apsorbera, primjerice uvođenjem valovite ili nazubljene geometrije. Alternativno, ugradnjom dodatnog kanala ispod apsorbera bi se snizila njegova temperatura. Iako je u trenutačnoj izvedbi kolektora moguća prilagodba širine i visine kanala, poprečni presjek mora ostati pravokutni kako bi se zadržala gornja

nazubljena površina zbog iskorištenja Snellovog zakona loma svjetlosti kako je opisano u Poglavlju 2.5. Primjenom dodatnih tehnika za smanjenje stagnacijske temperature moglo bi se razmotriti i uvođenje drugačije geometrije kanala, što bi potencijalno rezultiralo povećanjem toplinske učinkovitosti. Takva poboljšanja bila bi izraženija u slučaju primjene selektivnog premaza na drugom pokrovu (uz radni medij) i materijala s većom toplinskom provodnosti.

Smanjiti debljinu stijenki kanala i pokrova koja još uvijek osigurava dovoljnu mehaničku otpornost

Na temelju proračuna čvrstoće pokrova i preliminarnih ispitivanja propisanih normom ustanovljeno je da prototip polimernog kolektora može zadovoljiti definirane zahtjeve. U pogledu čvrstoće pokrova koji je analiziran na temelju analitičkog proračuna ustanovljeno je da trenutačna debljina i izvedba mogu zadovoljiti opterećenje uslijed djelovanja vanjskog tlaka. Zbog prisutnosti rebra naprezanja i progib za ovakvu izvedbu su relativno mali ($\sim 1,3$ MPa i $< 0,05$ mm pri opterećenju od 3000 Pa). Na temelju toga, može se razmotriti smanjenje debljine pokrova što će rezultirati povećanjem faktora propusnosti i povećanjem ukupno apsorbiranog sunčevog zračenja. Pri tome pažnju treba obratiti na ispitivanje uslijed opterećenja izazvanog udarcem npr. tuče. Preliminarna ispitivanja su pokazala da pokrov može zadovoljiti opterećenje uslijed udarca do visine bacanja 1,2 m uz pojavu malih oštećenja na površini. Preliminarna ispitivanja otpornosti na opterećenje uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka su pokazala kako PVC-C može izdržati tlak od $\sim 2,5$ bar pri temperaturi od 60 °C. U tom pogledu, može se razmotriti smanjenje debljini stijenki kanala i eventualnu izvedbu bez rebra što bi povoljno utjecalo na temperaturnu raspodjelu i toplinsku učinkovitost kako je opisano u Poglavlju 3.5.3. Sve spomenute smjernice moguće je i analizirati na temelju numeričkih simulacija čvrstoće.

Osigurati da maksimalne temperature koje se javljaju u kolektoru ne prelaze temperaturu staklišta za PVC-C

Na temelju preliminarnih ispitivanja ustanovljeno je da je standardna stagnacijska temperatura 125,1 °C kako je opisano u Poglavlju 3.6. Relativno niska stagnacijska temperatura je posljedica izraženih toplinskih gubitaka koji su određeni na temelju rezultata mjerenja (Poglavlje 3.4.2 **Error! Reference source not found.**). Izračunata standardna stagnacijska temperatura na temelju rezultata numeričkih simulacija iznosi 173,8 °C što je dosta više od

temperature staklišta za PVC-C. Na temelju toga preporučuje se detaljnije istraživanje tehnika za snižavanje stagnacijske temperature. Isto tako treba imati na umu da svaka izmjena u pogledu povećanja toplinske učinkovitosti polimernog kolektora će rezultirati i povećanjem standardne temperature stagnacije.

Pronaći bolje rješenje za brtvljenje spojeva segmenata i priključka

U Poglavlju 2.5 opisano je kako su tijekom ovog istraživanja ispitana ukupno 2 prototipa polimernog solarnog kolektora. Prototip 1 je izveden od ukupno 8 segmenata unutar koji je umetnuta cijev kako bi se omogućili različiti režimi strujanja radnog medija, ovisno o tome je li je kolektor u normalnom pogonu ili stagnacijskom režimu. Prilikom sklapanja ovog prototipa uočeni su problemi s propuštanjem vode kroz dijelove kolektora u okoliš, kao i prestrujavanja vode u dijelove gdje se nalazi zrak. Zbog velikog broja komponenti i relativno velike površine spojeva, osiguravanje pouzdanog brtvljenja bilo je izazovno. Iz tih razloga razvijen je Prototip 2, izveden od segmenata, pri čemu svaki segment ima zaseban priključni komad. Segmenti su međusobno povezani vanjskim crijevima, čime je ostvaren paralelni spoj. Ova konstrukcija omogućila je uspješno spajanje dva segmenta ukupne površine $A_{kol} = 0,449 \text{ m}^2$, za koja su onda provedena završna mjerenja opisana u Poglavlju 3.4.2. Na temelju tih mjerenja izrađena je verifikacija numeričkih simulacija i provedena parametarska analiza. Zbog manje površine veći je i utjecaj rubnih uvjeta, stoga se predlaže pronalaženje boljeg rješenja za brtvljenje spojeva segmenata i priključka kako bi se povećao broj segmenata dostupnih za ispitivanje i smanjio utjecaj rubnih uvjeta.

Razmotriti uvođenje višeslojnog pokrova s ciljem smanjenja gubitaka topline

Polimerne ploče često su dostupne u izvedbi kao višeslojne (tzv. saćaste ploče). Analiza izvedbe polimernog kolektora u kojem je jednostruki pokrov zamijenjen višeslojnom pločom opisan je u Poglavlju 3.3. Rezultati su pokazali da u tom slučaju toplinska učinkovitost kolektora je viša pri većim vrijednostima reducirane temperature razlike. Zamjena ploča ima smisla ukoliko se kolektor planira koristiti više u zimskom periodu ili hladnijim klimama. S druge strane, korištenjem višeslojne ploče više su temperature same pokrovne ploče u normalnom režimu rada, $71,42 \text{ °C}$ kod višeslojne ploče u odnosu na $58,60 \text{ °C}$. Isto tako, zbog smanjenih toplinskih gubitaka u stagnacijskom režimu rada, maksimalne temperature apsorbera će biti više ($\sim 20 \text{ °C}$).

Preporučuje se primjena aditiva za povećanje UV izdržljivosti

Iako prilikom provedbe preliminarnih ispitivanja izloženosti sunčevom zračenju nisu uočene nikakve deformacije i nedostaci, PVC-C nije deklariran kao postojan na UV zračenje te bi prilikom provedbe ispitivanja izloženosti u trajanju od 30 dana moglo doći degradacije polimernog materijala. Izloženost UV zračenju utječe na optičke i mehaničke karakteristike polimernog materijala što bi moglo izazvati probleme tijekom dugotrajnog rada ovakvog kolektora. Otpornost na UV zračenje se relativno jednostavno može poboljšati dodavanjem aditiva u procesu proizvodnje ili korištenjem posebnih premaza.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj doktorski rad opisuje primjenu eksperimentalnih i numeričkih metoda u postupku razvoja polimernog solarnog kolektora. Proveden je detaljan pregled dostupne literature u kontekstu primjene polimernih materijala u solarnoj tehnici. Rast cijena proizvodnje i montaže toplinskih kolektora, kao i pritiska drugih tehnologija obnovljivih izvora energije jedni su od glavnih problema i prepreka širem korištenju solarne toplinske energije. Primjena polimernih materijala u proizvodnji identificirana je kao moguće rješenje spomenutih izazova. Također, iz pregleda literature je ustanovljeno da su potrebna dodatna istraživanja sa svrhom optimizacije konstrukcije kolektora kako bi se kompenzirali uočeni nedostaci vezani uz primjenu polimernih materijala. Ti nedostaci su posljedica lošijih toplinskih, mehaničkih i optičkih svojstva polimernih materijala u odnosu na tradicionalne korištene materijale u solarnoj tehnici poput bakra, aluminija i stakla.

Prva faza istraživanja uključivala je primjenu dostupnih analitičkih modela u literaturi za izračun toplinske učinkovitosti pločastih solarnih kolektora.. Korišteni analitički model ima ograničenu primjenu na konstrukcije slične onoj pločastog kolektora. Isto tako, primjenom ovakvog postupka moguće je dobiti ograničene informacije o temperaturnoj raspodjeli unutar kolektora. Tako razvijeni analitički model korišten je za početnu verifikaciju numeričkih modela za izmjenu topline Nadalje, ovaj korak u istraživanju je važan zbog ograničenog financiranja za izradu prototipa. Verificirani numerički modeli su korišteni za analizu preliminarne izvedbe polimernog solarnog kolektora s ciljem definiranja konstrukcije segmenta prototipa koji će biti proizveden postupkom ekstruzije. Na temelju tih rezultata definirana je geometrija poprečnog presjeka segmenta prototipa polimernog solarnog kolektora. Na temelju provedenog pregleda literature u pogledu svojstava polimernih materijala odabran je PVC-C kao materijal za izradu polimernog kolektora. Postupkom ekstruzije proizvedeni su segmenti polimernog solarnog kolektora od kojih su zatim napravljena dva prototipa koja su podvrgnuta nizu eksperimentalnih ispitivanja toplinske učinkovitosti. Dodatno, provedena su zasebna eksperimentalna ispitivanja s ciljem određivanja faktora propusnosti, čiji se rezultati koriste zajedno s analitičkim postupkom u svrhu određivanja svih potrebnih optičkih karakteristika. Rezultati eksperimentalnih

ispitivanja korišteni su u nastavku za verifikaciju numeričkih simulacija izmjene topline na prototipu. U nastavku istraživanja provedene su 3D i 2D numeričke simulacije s ciljem detaljnije analize izmjene topline i strujanja unutar prototipa polimernog solarnog kolektora. Rezultati numeričkog modeliranja izmjene topline su verificirani usporedbom s eksperimentalnim podacima. Odstupanja od eksperimentalnih rezultata su do 5 %. Verificirani numerički model je temelj za provedbu parametarske analiza utjecaja konstrukcijskih, optičkih i pogonskih parametara na toplinske karakteristike polimernog solarnog kolektora. Uz numeričke simulacije strujanja i izmjene topline proveden je i proračun čvrstoće prototipa polimernog kolektora u svrhu ocjene zadovoljenja zahtjeva norme EN ISO 9806:217. Rezultati proračuna čvrstoće pokazuju da prototip polimernog kolektora zadovoljava kriterije mehaničke otpornosti prema relevantnoj normi. Na temelju analize rezultata dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i numeričkim simulacijama dan je pregled ocjene zadovoljenja zahtjeva prema normi, kao i smjernice za razvoj prototipa komercijalnog polimernog solarnog kolektora.

Znanstveni doprinos ovog istraživanja je kako slijedi:

1. Eksperimentalno potvrđeni rezultati numeričkog modeliranja izmjene topline unutar polimernog solarnog kolektora.
2. Smjernice za razvoj prototipa komercijalnog polimernog solarnog kolektora koji će zadovoljavati sve zahtjeve propisane odgovarajućim EN i ISO normama.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako je hipoteza koja glasi: „Konstrukcijskim rješenjima i odabirom materijala moguće je postići toplinska i mehanička svojstva polimernog solarnog kolektora koja zadovoljavaju sve zahtjeve propisane europskim normama“ potvrđena uz primjenu ovdje danih smjernica za razvoj.

Daljnja istraživanja

U sklopu daljnjih istraživanja planira se proizvodnja više segmenata s boljim brtvljenjem koji bi bili podvrgnuti svim ispitivanjima definiranih normom. Pojedine smjernice će se dalje istražiti s ciljem nalaženja optimalne konstrukcije. Planira se provedba dugotrajnih ispitivanja u realnim uvjetima rada kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost u radu polimernog kolektora, s krajnjim ciljem približavanja komercijalnoj primjeni.

5. PRILOZI

PRILOG A. Tablice

Tablica A.1 Optičke konstante (n i k) odabranih polimera i stakla kroz UV, VIS, NIR i MIR područje valnih duljina. μ – prosječna vrijednost; Med – medijan; σ – standardna devijacija; min - minimalna vrijednost; max – maksimalna vrijednost. Podaci su preuzeti iz više studija [77,92,114–116,93,107–113]

Indeks loma n [-]							
Spektar	Materijal	Izvor	μ	Med	σ	min	max
UV $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$	Staklo	Upreti 2017.	1,5089	1,5031	0,0200	1,4855	1,5588
	PC	Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PMMA	Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Tahir 2012.	1,0239	0,8483	0,3293	0,7873	1,7874
		Najeeb 2024.	6,5595	7,2350	2,9788	1,1100	9,9800
		Hong 2023.	1,5124	1,4864	0,0685	1,3974	1,7303
		Parthasarathy 2020.	1,6199	1,6200	0,2529	1,2300	2,0500
	PVC	Taha 2018.	1,9877	2,0187	0,3880	1,4364	2,7847
		El Sayed 2022.	2,0444	2,0492	0,1497	1,7548	2,2743
		Tahir 2012.	1,1603	0,8693	0,4535	0,7662	2,1081
		Al-Taa'y 2014.	1,4537	1,5000	0,3911	0,6680	2,1300
VIS $\lambda = 0,38 - 0,78 \mu\text{m}$	Staklo	Upreti 2017.	1,4728	1,4714	0,0051	1,4664	1,4852
	PC	Zhang 2020.	1,5949	1,5900	0,0153	1,5770	1,6339
		Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Sultanova 2012.	1,5884	1,5826	0,0142	1,5749	1,6117
	PMMA	Zhang 2020.	1,4942	1,4927	0,0062	1,4860	1,5082
		Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Sultanova 2012.	1,4926	1,4903	0,0061	1,4863	1,5025
		Tahir 2012.	1,5091	1,5068	0,0105	1,4999	1,5206
		Najeeb 2024.	2,0333	1,9000	0,3943	1,8700	3,6800
		Hong 2023.	1,4955	1,4950	0,0099	1,4693	1,5400
		Parthasarathy 2020.	1,2418	1,2400	0,0207	1,2100	1,2800
	PVC	Sadov 2022	1,5450	1,5400	0,0076	1,5400	1,5600
		Taha 2018	1,3841	1,3809	0,0260	1,3360	1,4342
		El Sayed 2022	1,5314	1,5049	0,0729	1,4530	1,7317
		Zhang 2020	1,5442	1,5424	0,0074	1,5353	1,5614
		Tahir 2012	1,5470	1,5476	0,0052	1,5402	1,5528
		Al-Taa'y 2014	1,1177	1,1100	0,0117	1,1000	1,1500
NIR $\lambda = 0,78 - 3 \mu\text{m}$	Staklo	Upreti 2017.	1,4585	1,4605	0,0076	1,4310	1,4664
	PC	Zhang 2020.	1,5619	1,5612	0,0122	1,5486	1,6394
		Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Sultanova 2012.	1,5674	1,5683	0,0026	1,5645	1,5695
	PMMA	Zhang 2020.	1,4743	1,4745	0,0056	1,4598	1,4861
		Garcia-Gil 2020.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.

MIR $\lambda = 3 - 10 \mu\text{m}$		Sultanova 2012	1,4829	1,4834	0,0014	1,4813	1,4839
		Tahir 2012.	1,4963	1,4963	0,0030	1,4942	1,4984
		Najeeb 2024.	1,8522	1,8500	0,0083	1,8400	1,8700
		Hong 2023.	1,4529	1,4555	0,0206	1,3971	1,5023
		Parthasarathy 2020.	1,2900	1,2900	1,2900	1,2900	1,2900
	PVC	Sadoh 2022	1.5300	1.5300	0.0000	1.5300	1.5300
		Taha 2018	1.3273	1.3279	0.0049	1.3221	1.3319
		El Sayed 2022	1.4494	1.4543	0.0214	1.3754	1.4773
		Zhang 2020	1.5270	1.5263	0.0029	1.5206	1.5357
		Tahir 2012	1.5360	1.5360	0.0000	1.5360	1.5360
		Al-Taa'y 2014	1.1000	1.1000	0.0000	1.1000	1.1000
	Staklo	Uprety 2017.	1,3151	1,2938	0,4680	0,6306	2,6672
	PC	Zhang 2020.	1,5382	1,5400	0,0961	1,0693	1,9617
	PMMA	Zhang 2020.	1,4648	1,4631	0,0534	1,2365	1,7093
		Tahir 2012.	1,4819	1,4819	1,4819	1,4819	1,4819
	PVC	Zhang 2020.	1,5223	1,5235	0,0079	1,4909	1,5517
		Tahir 2012.	1,5360	1,5360	1,5360	1,5360	1,5360

Koeficijent prigušenja k [-]

Spektar	Materijal	Izvor	μ	Med	σ	min	max
UV $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$	Staklo	Uprety 2017.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PC	Garcia-Gil 2020.	8,56e-6	6,96e-6	4,23e-6	4,50e-6	2,32e-5
	PMMA	Garcia-Gil 2020.	7,05e-7	5,78e-7	2,94e-7	5,06e-7	1,85e-6
		Tahir 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Najeeb 2024.	6,67e-5	5,25e-5	3,02e-5	2,07e-5	1,15e-4
		Hong 2023.	1,36e-3	2,22e-4	2,36e-3	7,07e-5	7,65e-3
		Parthasarathy 2020.	4,10e-4	4,14e-4	2,09e-4	7,59e-5	7,61e-4
	PVC	Taha 2018	6,53e-5	6,74e-5	2,69e-5	2,61e-5	1,12e-4
		El Sayed 2022	2,62e-4	2,22e-4	1,68e-4	2,67e-5	5,99e-4
		Tahir 2012	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Al-Taa'y 2014	5,59e-3	6,14e-3	2,37e-3	1,56e-4	8,16e-3
VIS $\lambda = 0,38 - 0,78 \mu\text{m}$	Staklo	Uprety 2017.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PC	Zhang 2020.	5,86e-7	2,88e-7	1,78e-6	5,95e-9	1,12e-5
		Garcia-Gil 2020.	5,06e-6	4,32e-6	1,62e-6	3,23e-6	1,04e-5
		Sultanova 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PMMA	Zhang 2020.	1,62e-7	1,58e-7	3,46e-8	6,31e-8	2,43e-7
		Garcia-Gil 2020.	6,78e-7	6,38e-7	1,40e-7	4,78e-7	9,58e-7
		Sultanova 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Tahir 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Najeeb 2024.	1,17e-5	1,16e-5	1,57e-6	9,70e-6	1,46e-5
		Hong 2023.	2,89e-5	2,77e-5	9,59e-6	5,11e-6	8,51e-5
		Parthasarathy 2020.	1,70e-4	1,42e-4	1,09e-4	3,83e-5	4,02e-4
	PVC	Sadoh 2022	1,63e-6	1,63e-6	1,63e-6	1,63e-6	1,63e-6

		Taha 2018	3,02e-5	2,91e-5	2,98e-6	2,71e-5	3,76e-5
		El Sayed 2022	3,25e-5	3,28e-5	6,38e-6	8,61e-6	4,14e-5
		Zhang 2020	1,60e-6	1,68e-6	5,87e-7	6,47e-7	2,72e-6
		Tahir 2012	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Al-Taa'y 2014	7,99e-3	7,98e-3	1,24e-4	7,77e-3	8,16e-3
NIR $\lambda = 0,78 - 3 \mu\text{m}$	Staklo	Uprety 2017.	6,10e-144	2,16e-206	3,98e-143	2,57e-322	2,61e-142
	PC	Zhang 2020.	5,69e-4	2,18e-5	8,95e-4	1,97e-9	3,50e-3
		Garcia-Gil 2020.	4,07e-6	3,83e-6	2,96e-7	3,79e-6	4,41e-6
		Sultanova 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PMMA	Zhang 2020.	1,79e-3	3,25e-5	2,42e-3	3,68e-8	6,45e-3
		Garcia-Gil 2020.	6,31e-7	6,31e-7	4,72e-9	6,24e-7	6,39e-7
		Sultanova 2012	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Tahir 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Najeeb 2024.	1,51e-5	1,51e-5	3,48e-7	1,47e-5	1,58e-5
		Hong 2023.	3,32e-4	2,09e-4	3,63e-4	5,36e-6	1,50e-3
		Parthasarathy 2020.	4,29e-4	4,29e-4	1,31e-5	4,11e-4	4,43e-4
	PVC	Sadoh 2022	4,40e-5	3,45e-5	3,63e-5	1,40e-6	1,18e-4
		Taha 2018	3,80e-5	3,80e-5	3,51e-7	3,77e-5	3,84e-5
		El Sayed 2022	4,74e-5	4,75e-5	3,41e-6	4,12e-5	5,31e-5
		Zhang 2020	9,01e-4	3,03e-5	1,30e-3	1,34e-7	3,97e-3
		Tahir 2012	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
		Al-Taa'y 2014	7,74e-3	7,74e-3	1,89e-5	7,73e-3	7,77e-3
MIR $\lambda = 3 - 10 \mu\text{m}$	Staklo	Uprety 2017.	3,58e-1	1,62e-2	5,45e-1	7,71e-140	1,87e+00
	PC	Zhang 2020.	3,68e-2	4,50e-3	1,02e-1	1,20e-3	6,63e-1
	PMMA	Zhang 2020.	2,79e-2	4,97e-3	5,73e-2	3,20e-3	3,64e-1
		Tahir 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.
	PVC	Zhang 2020.	6,71e-3	2,20e-3	9,65e-3	1,26e-3	5,97e-2
		Tahir 2012.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.	b.p.

Tablica A.2 Rubni uvjeti (*boundary conditions* – BC) za provedene preliminarne numeričke simulacije na numeričkoj domeni pločastog solarnog kolektora (RD-1-Metalni) za 3 numerička modela za izmjenu topline

RD-1-Metalni		BC - Toplinski			BC- Zračenje		
Model 1 (DO)	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov_vrh	27	10,3	0,88	1,128e6	-	-	-
pokrov_dno		Coupled		-	Opaque	0,10	0,88
apsorber_vrh		Coupled		7,693e7	Opaque	0,95	0,06
apsorber_dno	27	0,69	-	-	-	-	-
cijev		Convective BC (2.31) $q_s = konst.$		-	-	-	-
RD-1- Metalni		Toplinski rubni uvjet			Zračenje		
Model 2 (S2S)	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov_vrh	27	10,3	0,88	1,128e6	-	-	-
pokrov_dno		Coupled		-		-	0,88
apsorber_vrh		Coupled		7,693e7		-	0,06
apsorber_dno	27	0,69	-	-	-	-	-
cijev		Convective BC (2.31) $q_s = konst.$		-	-	-	-
RD-1- Metalni		Toplinski rubni uvjet			Zračenje		
Model 3 (DO)	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Zračenje W/m ²	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov_vrh	27	10,3	0,88	887,5	Semi-transparent	-	-
pokrov_dno		Coupled				0,10	0,88
apsorber_vrh		Coupled				0,95	0,06
apsorber_dno	27	0,69	-	-	-	-	-
cijev		Convective BC (2.31) $q_s = konst.$		-	-	-	-

Tablica A.3 Rubni uvjeti (*boundary conditions* – BC) za provedene numeričke simulacije sa svrhom analize preliminarne izvedbe polimernog solarnog

RD-2		BC - Toplinski			BC- Zračenje		
Model 1 (DO)	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov1_vrh	27	10,3	0,92	2,929e6	-	-	-
pokrov1_dno		<i>Coupled</i>		-	<i>Opaque</i>	0,10	0,92
pokrov2_vrh		<i>Coupled</i>		3,044e6	<i>Opaque</i>	0,95	0,92
apsorber_dno	27	0,69	-	6,652e7	<i>Opaque</i>	-	-
kanal		<i>Convective BC (2.31)</i> $q_s = konst.$		-	-	-	-
RD-3		Toplinski rubni uvjet			Zračenje		
Model 1 (DO)	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov1_vrh	27	10,3	0,92	2,929e6	-	-	-
pokrov1_dno		<i>Coupled</i>		-	<i>Opaque</i>	0,10	0,92
pokrov2_vrh		<i>Coupled</i>		3,044e6	<i>Opaque</i>	0,95	0,92
apsorber_dno	27	0,69	-	6,652e7	<i>Opaque</i>	-	-
kanal		<i>Convective BC (2.31)</i> $q_s = konst.$		-	-	-	-

Tablica A.4 Rubni uvjeti (*boundary conditions* – BC) za provedene numeričke simulacije na numeričkoj domeni izvedenog prototipa polimernog solarnog kolektora (Geometrija 1 i 2)

Geometrija 1 i 2		BC - Toplinski			BC- Zračenje		
3D – RT1	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov1_vrh	34,117	8,29	0,92	1,584e6	-	-	-
pokrov1_dno		Coupled		-	Opaque	0,10	0,92
pokrov2_vrh		Coupled		2,438e6	Opaque	-	-
apsorber_dno	34,117	3,30	-	7,574e7	Opaque	0,95	0,92
kolektor_rub	34,117	1,20	0,92	-	-	-	-
kolektor_dno	34,117	3,30	0,92	-	-	-	-
kanal	<i>mass flow; 0,00160 kg/s^{a)}</i>						
	<i>inlet temp.; 29,225 °C</i>						
	2D - Convective BC (2.31) ^{b)} <i>q_s = konst.</i>			-	Opaque	0,10	0,92
Geometrija 1 i 2		Toplinski rubni uvjet			Zračenje		
3D – RT2	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Izvor W/m ³	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov1_vrh	37,059	8,29	0,92	1,586e6	-	-	-
pokrov1_dno		Coupled		-	Opaque	0,10	0,92
pokrov2_vrh		Coupled		2,442e6	Opaque	-	-
apsorber_dno	37,059	3,30	-	7,584e7	Opaque	0,95	0,92
kolektor_rub	37,059	1,20	0,92	-	-	-	-
kolektor_dno	37,059	3,30	0,92	-	-	-	-
kanal	<i>mass flow; 0,00113 kg/s^{a)}</i>						
	<i>inlet temp.; 52,660 °C</i>						
	2D - Convective BC (2.31) ^{b)} <i>q_s = konst.</i>			-	Opaque	0,10	0,92
Geometrija 1 i 2		Toplinski rubni uvjet			Zračenje		
3D – RT3	ϑ °C	α W/(m ² ·K)	ε -	Zračenje W/m ²	Zid	$\varepsilon_{\lambda 1}$ -	$\varepsilon_{\lambda 2}$ -
pokrov1_vrh	37,059	8,29	0,92	1,586e6	-	-	-
pokrov1_dno		Coupled		-	Opaque	0,10	0,92
pokrov2_vrh		Coupled		2,442e6	Opaque	-	-
apsorber_dno	37,059	3,30	-	7,584e7	Opaque	0,95	0,92
kolektor_rub	37,059	1,20	0,92	-	-	-	-
kolektor_dno	37,059	3,30	0,92	-	-	-	-
kanal	<i>mass flow; 0,00113 kg/s^{a)}</i>						
	<i>inlet temp.; 70,000 °C</i>						
	2D - Convective BC (2.31) ^{b)} <i>q_s = konst.</i>			-	Opaque	0,10	0,92

^{a)}U slučaju Geometrije 2 rađena je korekcija masenog protok na temelju omjera površine s obzirom da je površina Geometrije 2 manja u odnosu na Geometriju 1 i činjenici da se protok zadavao po m² površine apsorbera

b) U slučaju 3D simulacija zadaje se maseni protok i temperatura na ulazu u kolektor iz rezultata mjerenja. Za 2D simulacije se zadaje konvektivni rubni uvjet na temelju prosječne temperature i izračunatog koeficijenta prijelaza topline

Tablica A.5 Detaljni zapisi rezultata dobivenih preliminarnim mjerenjima; prikazane su prosječne (μ) vrijednosti, razlika (Δ) između maksimalne i minimalne vrijednosti te standardna devijacija (σ) za pojedine izmjerene i izračunate vrijednosti za različite radne točke (RT)

	$\vartheta_{f,ul}$	$\vartheta_{f,iz}$	ϑ_{ok}	$\Delta\vartheta_f$	G_{sun}	T_{red}	$\dot{Q}_{kol}$	η
		[°C]			[W/m ²]	[m ² ·K/W]	[W]	[-]
Datum:		01.03.2021.						
RT	1					Protok	2,280 kg/min	
Vrijeme	11:19:17			11:46:47		Površina	1,648 m ²	
μ	11,135	17,781	15,249	6,646	930,979	-0,0010	1057,955	0,690
Δ	0,085	1,401	1,772	1,383	149,926	0,0020	219,941	0,193
σ	0,022	0,270	0,405	0,273	22,648	0,0000	43,376	0,036
RT	2					Protok	2,310 kg/min	
Vrijeme	12:04:47			12:31:17				
μ	11,191	18,090	19,280	6,900	956,330	-0,0050	1112,703	0,706
Δ	0,141	1,221	1,514	1,233	25,274	0,0020	198,662	0,125
σ	0,037	0,220	0,339	0,226	5,666	0,0000	36,467	0,024
Datum:		02.03.2021.						
RT	1					Protok	2,178 kg/min	
Vrijeme	11:33:15			11:51:45		Površina	1,747 m ²	
μ	11,162	18,822	12,472	7,660	989,783	0,0030	1163,992	0,673
Δ	0,173	0,857	1,662	0,885	28,072	0,0020	134,351	0,077
σ	0,037	0,216	0,435	0,208	7,455	0,0000	31,620	0,019
RT	2					Protok	2,178 kg/min	
Vrijeme	12:20:15			12:50:45				
μ	11,285	19,066	13,217	7,781	981,561	0,0020	1227,503	0,716
Δ	0,158	1,105	2,528	1,124	35,127	0,0030	177,175	0,103
σ	0,038	0,246	0,612	0,250	5,476	0,0010	39,476	0,024

Tablica A.2 Nastavak

	$\vartheta_{f,ul}$	$\vartheta_{f,iz}$	ϑ_{ok}	$\Delta\vartheta_f$	G_{sun}	T_{red}	$\dot{Q}_{kol}$	η
		[°C]			[W/m ²]	[m ² ·K/W]	[W]	[-]
Datum:		08.07.2021.						
RT	1				Protok		0,279 kg/min	
Vrijeme	13:24:41		13:39:11		Površina		0,227 m ²	
μ	31,645	39,892	35,890	8,247	875,960	-0,0000	160,262	0,808
Δ	0,669	0,921	1,126	0,369	28,558	0,0010	7,171	0,040
σ	0,193	0,255	0,259	0,086	4,650	0,0000	1,668	0,009
RT	2				Protok		0,279 kg/min	
Vrijeme	13:39:26		13:52:56					
μ	32,258	40,588	36,639	8,330	880,281	-0,0000	161,879	0,812
Δ	0,584	0,781	1,610	0,604	12,995	0,0010	11,738	0,061
σ	0,134	0,250	0,357	0,167	2,620	0,0000	3,243	0,016
RT	3				Protok		0,300 kg/min	
Vrijeme	15:00:41		15:09:41					
μ	52,369	58,315	37,241	5,946	882,904	0,0210	124,362	0,622
Δ	0,271	0,351	1,760	0,373	18,470	0,0020	7,803	0,038
σ	0,076	0,097	0,516	0,094	4,036	0,0010	1,964	0,009
RT	4				Protok		0,300 kg/min	
Vrijeme	15:10:11		15:22:26					
μ	52,498	58,788	37,562	6,290	884,813	0,0200	131,570	0,657
Δ	0,357	0,488	1,932	0,539	49,765	0,0020	11,275	0,083
σ	0,094	0,149	0,495	0,136	15,396	0,0010	2,846	0,024
Datum:		09.07.2021						
RT	1				Protok		0,308 kg/min	
Vrijeme	12:35:30		12:48:30		Površina		0,227 m ²	
μ	30,788	39,828	33,703	9,041	995,068	0,0020	193,799	0,860
Δ	0,453	0,365	1,326	0,317	26,596	0,0010	6,795	0,042
σ	0,129	0,091	0,399	0,101	7,785	0,0000	2,171	0,013

Tablica A.2 Nastavak

	$\vartheta_{f,ul}$	$\vartheta_{f,iz}$ [°C]	ϑ_{ok}	$\Delta\vartheta_f$	G_{sun} [W/m ²]	T_{red} [m ² ·K/W]	$\dot{Q}_{kol}$ [W]	η [-]
Datum:		15.09.2021.						
RT	1				Protok		0,267 kg/min	
Vrijeme	12:21:31		12:51:31		Površina		0,227 m ²	
μ	53,925	58,813	32,235	4,888	924,738	0,0260	90,618	0,433
Δ	1,152	0,620	2,201	0,800	69,882	0,0020	14,825	0,072
σ	0,274	0,162	0,530	0,230	15,305	0,0000	4,266	0,019
RT	2				Protok		0,257 kg/min	
Vrijeme	12:52:01		13:07:31					
μ	53,741	58,677	32,207	4,936	940,859	0,0260	88,332	0,414
Δ	1,174	0,394	1,615	1,022	70,712	0,0030	18,284	0,077
σ	0,351	0,104	0,443	0,303	20,111	0,0010	5,427	0,019
RT	3				Protok		0,257 kg/min	
Vrijeme	14:27:31		14:36:01					
μ	31,359	40,407	33,636	9,048	995,825	0,0020	167,011	0,740
Δ	0,164	0,238	1,318	0,198	63,979	0,0010	3,655	0,038
σ	0,046	0,070	0,402	0,069	13,743	0,0000	1,268	0,009

Tablica A.6 Detaljni zapisi rezultata dobivenih završnim mjerenjima; prikazane su prosječne (μ) vrijednosti, razlika (Δ) između maksimalne i minimalne vrijednosti te standardna devijacija (σ) za pojedine izmjerene i izračunate vrijednosti

	$\vartheta_{f,ul}$	$\vartheta_{f,iz}$	ϑ_{ok}	$\Delta\vartheta_f$	G_{sun}	T_{red}		
		[°C]			[W/m ²]	[m ² ·K/W]	[W]	[-]
Datum:		28.06.2022.						
RT	1					Protok	0,550 kg/min	
Vrijeme	13:46:13		14:10:13			Površina	0,449 m ²	
μ	51,490	57,295	36,079	5,806	909,914	0,0200	222,603	0,545
Δ	0,685	0,597	1,122	1,224	24,569	0,0010	46,929	0,111
σ	0,146	0,166	0,361	0,288	7,244	0,0000	11,033	0,026
Datum:		21.07.2022.						
RT	1					Protok	0,766 kg/min	
Vrijeme	12:31:42		13:01:42			Površina	0,449 m ²	
μ	29,225	35,773	34,117	6,549	977,338	-0,0020	349,216	0,797
Δ	0,174	0,187	1,424	0,153	15,856	0,0010	8,159	0,020
σ	0,045	0,046	0,352	0,034	3,064	0,0000	1,837	0,005
RT	2					Protok	0,543 kg/min	
Vrijeme	15:00:01		15:17:01					
μ	52,660	59,127	37,059	6,467	978,685	0,0190	244,973	0,558
Δ	0,214	0,421	1,863	0,527	51,911	0,0010	19,967	0,066
σ	0,050	0,089	0,386	0,097	15,279	0,0000	3,660	0,013

PRILOG B. Proračun mjerne nesigurnosti pri određivanju toplinske učinkovitosti

Mjerna nesigurnost toplinske učinkovitosti kolektora određena je u skladu s preporukama ISO/IEC Guide 98-3:2008 (*GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) [117]. Nesigurnost je procijenjena na temelju doprinosa pojedinih parametara u ukupnom budžetu mjerne nesigurnosti. Za svaki parametar nesigurnost je izračunata primjenom metoda propagacije nesigurnosti, uzimajući u obzir standardne devijacije izmjerenih vrijednosti i pridružene nesigurnosti korištenih mjernih instrumenata. Toplinska učinkovitost kolektora računa se korištenjem Jed. (2.30). Mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti ovisi o doprinosu mjerene nesigurnosti određivanja korisnog toplinskog toka, površine kolektora i sunčevog zračenja te se računa prema:

$$u(\eta_{kol}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial \dot{Q}_{kol}} \cdot u(\dot{Q}_{kol})\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial A_{kol}} \cdot u(A_{kol})\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial \dot{q}_{sun}} \cdot u(\dot{q}_{sun})\right)^2} \quad (B.1)$$

pri čemu su:

$u(\dot{Q}_{kol})$ – mjerna nesigurnost određivanja korisnog toplinskog toka, [W],

$u(A_{kol})$ – mjerna nesigurnost određivanja površine kolektora, [m²],

$u(\dot{q}_{sun})$ – mjerna nesigurnost određivanja sunčevog zračenja, [W/m²].

Parcijalne derivacije uz pojedini član za mjernu nesigurnost se određuju na temelju Jed. B.2 – B.4.

$$\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial \dot{Q}_{kol}} = \frac{1}{A_{kol} \cdot \dot{q}_{sun}} \quad (B.2)$$

$$\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial A_{kol}} = -\frac{\dot{Q}_{kol}}{A_{kol}^2 \cdot \dot{q}_{sun}} \quad (B.3)$$

$$\frac{\partial \eta_{kol}}{\partial \dot{q}_{sun}} = -\frac{\dot{Q}_{kol}}{A_{kol} \cdot \dot{q}_{sun}^2} \quad (B.4)$$

Određivanje korisnog toplinskog toka kolektora računa se pomoću Jed. (2.56) te ovisi o masenom protoku, specifičnom toplinskom kapacitetu, te temperaturi vode na ulazu i izlazu iz kolektora. Prilikom proračuna mjerne nesigurnosti korisnog toplinskog toka zanemaren je utjecaj mjerne nesigurnosti specifičnog toplinskog kapaciteta vode prema:

$$u(\dot{Q}_{kol}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \dot{m}_{kol}} \cdot u(\dot{m}_{kol})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \vartheta_{f,ul}} \cdot u(\vartheta_{f,ul})\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \vartheta_{f,iz}} \cdot u(\vartheta_{f,iz})\right)^2} \quad (B.5)$$

pri čemu su:

$u(\dot{m}_{kol})$ – mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka, [kg/s],

$u(\vartheta_{f,ul}), u(\vartheta_{f,iz})$ – mjerna nesigurnost određivanja temperature vode na ulazu i izlazu iz kolektora, [°C].

Parcijalne derivacije uz pojedini član za mjernu nesigurnost se određuju na temelju Jed. B.6 – B.8.

$$\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \dot{m}_{kol}} = c_p \cdot (\vartheta_{f,iz} - \vartheta_{f,ul}) \quad (B.6)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \vartheta_{f,ul}} = -\dot{m}_{kol} \cdot c_p \quad (B.7)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{kol}}{\partial \vartheta_{f,iz}} = \dot{m}_{kol} \cdot c_p \quad (B.8)$$

Maseni protok se računa prema Jed. (2.57) vaganjem mase fluida koja je protekla kroz kolektor u određenom vremenu. Mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka se računa kao:

$$u(\dot{m}_{kol}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_{kol}}{\partial M} \cdot u(M)\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{kol}}{\partial t} \cdot u(t)\right)^2} \quad (B.9)$$

pri čemu su:

$u(M)$ – mjerna nesigurnost određivanja mase vode, [kg],

$u(t)$ – mjerna nesigurnost određivanja vremena, [s].

Parcijalne derivacije uz pojedini član za mjernu nesigurnost se određuju na temelju Jed. B.10 – B.11.

$$\frac{\partial \dot{m}_{kol}}{\partial M} = \frac{1}{t} \quad (B.10)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{kol}}{\partial t} = -M \frac{1}{t^2} \quad (B.11)$$

Površina kolektora izmjerena je s pomoćnim mjerilom i običnog mjerila duljine. Mjernu nesigurnost moguće je izračunati prema:

$$u(A_{\text{kol}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial A_{\text{kol}}}{\partial L} \cdot u(L)\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{\text{kol}}}{\partial W} \cdot u(W)\right)^2} \quad (\text{B.12})$$

pri čemu su:

$u(L)$ – mjerna nesigurnost određivanja duljine kolektora, [m],

$u(W)$ – mjerna nesigurnost određivanja širine kolektora, [m].

Parcijalne derivacije uz pojedini član za mjernu nesigurnost se određuju na temelju Jed B.13 – B.14.

$$\frac{\partial A_{\text{kol}}}{\partial L} = W \quad (\text{B.13})$$

$$\frac{\partial A_{\text{kol}}}{\partial W} = L \quad (\text{B.14})$$

Rezultati određivanja mjerne nesigurnosti za završna mjerenja pokazan su u Tablici B.1

Tablica B.1 Rezultati proračuna mjerne nesigurnosti pri određivanje toplinske učinkovitosti

	RT1	RT2
$u(L)$		0,0025 m
$u(W)$		0,0025 m
$u(A)$		0,0049 m ²
$U(A)$		0,0098 m ²
$u(M)$		0,03 kg
$u(t)$		1 s
$u(\dot{m}_{\text{kol}})$	0,00018 kg/s	0,00017 kg/s
$U(\dot{m}_{\text{kol}})$	0,00036 kg/s	0,00035 kg/s
$u(\vartheta_{\text{f,ul}}), u(\vartheta_{\text{f,iz}})$		0,2 °C
$u(\dot{Q}_{\text{kol}})$	15,876 W	11,785 W
$U(\dot{Q}_{\text{kol}})$	31,751 W	23,570 W
$u(G)$		10 W/m ²
$u(\eta_{\text{kol}})$	0,03813	0,02814
$U(\eta_{\text{kol}})$	0,07627	0,05628

LITERATURA

- [1.] Nasa Earth Observatory: Svijet promjena: globalne temperature [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [2.] Vijeće Europe: Pariški klimatski sporazum [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [3.] Europska komisija: Europski zeleni plan [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [4.] Europska komisija: Ciljevi u pogledu energije iz obnovljivih izvora [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [5.] Vijeće Europe: Spremni za 55 [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [6.] Eurostat (online kod: nrg_bal_c) [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [7.] Europska agencija za okoliš: Udio potrošnje energije iz obnovljivih izvora u Europi [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [8.] Eurostat (online kod: nrg_bal_peh, nrg_bal_pehnf) [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [9.] Eurostat (online kod: nrg_inf_epc, nrg_inf_stcs) [Internet], [citirano 30. listopada 2023.].
- [10.] Solar Heat Europe: Solar Heat Markets in Europe [Internet], 2021 [citirano 30. listopada 2023.].
- [11.] Weiss, W., Spörk-Dür, M., Edition 2023 Global Market Development and Trends 2022 Detailed Market Figures 2021 SOLAR HEAT WORLD WIDE,
- [12.] Ravi Kumar, K., Krishna Chaitanya, NVV., Sendhil Kumar, N., Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 282, pp 125296, 2021.
- [13.] Centrometal., Pločasti solarni kolektor CPK-8023N 4H [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [14.] Viessmann [Internet], [citirano 17. siječanj 2025.].
- [15.] Centrometal., Pločasti solarni kolektor CPK-7210n-alu [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [16.] Centrometal., Cijevni vakuumski solarni kolektor CVSKC-10 [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [17.] Solvis., SolvisLuna 304 Installation Manual [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].

- [18.] Vaillant., Vaillant VFK 125/3 [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [19.] Vaillant., Vaillant VFK 145/2 [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [20.] Vaillant., Vaillant VTK 570 Installation Manual [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [21.] Vaillant., Vaillant auroTHERM VFK 125 Installation Manual [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [22.] Bosch., Solarna tehnologija prospekt [Internet], [citirano 23. studeni 2023.].
- [23.] Gautam, A., Chamoli, S., Kumar, A., Singh, S., A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, No. September 2016, pp 541–562, 2017.
- [24.] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, AA., Kim, K., Solar energy : Potential and future prospects, Vol. 82, No. August 2017, pp 894–900, 2018.
- [25.] Badouard, T., Moreira De Oliveira, D., Yearwood, J., Torres, P., Final Report Cost of Energy (LCOE) [Internet], 2020 [citirano 18. prosinac 2023.].
- [26.] Technology, E., Platform, I., Strategic Research & Innovation Agenda for Solar Thermal Technologies [Internet], str. 38, 2022 [citirano 17. siječanj 2025.].
- [27.] Ivančić, A., Mugnier, D., Stryi-Hipp, G., Weiss, W., European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling: Solar Heating and Cooling Technology Roadmap [Internet],
- [28.] Evangelist, L., De Lieto Vollaro, R., Asdrubali, F., Latest advances on solar thermal collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 114, No. August, pp 1–3, 2019.
- [29.] Colangelo, G., Favale, E., Miglietta, P., Risi, A De., Innovation in flat solar thermal collectors : A review of the last ten years experimental results, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp 1141–1159, 2016.
- [30.] Sakhaei, SA., Valipour, MS., Performance enhancement analysis of The flat plate collectors: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102, pp 186–204, 2019.
- [31.] Verma, SK., Sharma, K., Gupta, NK., Soni, P., Upadhyay, N., “Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector”, *Energy*, Vol. 194, , 2020.
- [32.] Khamis Mansour, M., Thermal analysis of novel minichannel-based solar flat-plate collector, *Energy*, Vol. 60, pp 333–343, 2013.

- [33.] Sharma, HK., Kumar, S., Verma, SK., Comparative performance analysis of flat plate solar collector having circular & trapezoidal corrugated absorber plate designs, *Energy*, Vol. 253, pp 124137, 2022.
- [34.] Del Col, D., Padovan, A., Bortolato, M., Dai Prè, M., Zambolin, E., Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers, *Energy*, Vol. 58, pp 258–269, 2013.
- [35.] Herce-Vigil, JL., Suarez, R., Analysis of a plastic solar collector, *Energy Conversion and Management*, Vol. 31, No. 3, pp 243–254, 1991.
- [36.] Saffarian, MR., Moravej, M., Doranehgard, MH., Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid, *Renewable Energy*, Vol. 146, pp 2316–2329, 2020.
- [37.] Hawwash, AA., Abdel Rahman, AK., Nada, SA., Ookawara, S., Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 130, pp 363–374, 2018.
- [38.] Tong, Y., Lee, H., Kang, W., Cho, H., Energy and exergy comparison of a flat-plate solar collector using water, Al₂O₃ nanofluid, and CuO nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 159, No. June, , 2019.
- [39.] Desisa, TR., Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer Characteristics in Solar Flat Plate Collector Using Nanofluids, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 18, No. March, , 2023.
- [40.] Ajeena, AM., Víg, P., Farkas, I., A comprehensive analysis of nanofluids and their practical applications for flat plate solar collectors: Fundamentals, thermophysical properties, stability, and difficulties, *Energy Reports*, Vol. 8, pp 4461–4490, 2022.
- [41.] Wole-osho, I., Okonkwo, EC., Abbasoglu, S., Kavaz, D., Nanofluids in Solar Thermal Collectors: Review and Limitations [Internet], Sv. 41, International Journal of Thermophysics. Springer US, 1–74 str., 2020.
- [42.] Van Niekerk, WMK., Scheffler, TB., Measured Performance Of A Solar Water Heater With A Parallel Tube Polymer Absorber, Vol. 5, pp 339–347, 1993.
- [43.] Van Niekerk, WMK., Du Toit, CG., Scheffler, TB., Performance modelling of a parallel tube polymer absorber, *Solar Energy*, Vol. 58, No. 1–3, pp 39–44, 1996.
- [44.] Tsilingiris, PT., Towards making solar water heating technology feasible - the polymer

- solar collector approach, *Energy Conversion and Management*, Vol. 40, No. 12, pp 1237–1250, 1999.
- [45.] Tsilingiris, PT., Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers, Vol. 20, pp 1297–1314, 2000.
- [46.] Tsilingiris, PT., Back absorbing parallel plate polymer absorbers in solar collector design, Vol. 43, pp 135–150, 2002.
- [47.] Kim, S in., Kissick, J., Spence, S., Boyle, C., Design, analysis and performance of a polymer-carbon nanotubes based economic solar collector, Sv. 134, *Solar Energy*. str. 251–263, 2016.
- [48.] Pugsley, A., Zacharopoulos, A., Smyth, M., Mondol, J., Performance evaluation of the senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration, *Renewable Energy*, pp 2–9, 2019.
- [49.] Kudish, AI., Evseev, EG., Walter, G., Leukefeld, T., Simulation study of a solar collector with a selectively coated polymeric double walled absorber plate, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, pp 651–671, 2002.
- [50.] Martinopoulos, G., Missirlis, D., Tsilingiridis, G., Yakinthos, K., Kyriakis, N., CFD modeling of a polymer solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 7, pp 1499–1508, 2010.
- [51.] Missirlis, D., Martinopoulos, G., Tsilingiridis, G., Yakinthos, K., Kyriakis, N., Investigation of the heat transfer behaviour of a polymer solar collector for different manifold configurations, *Renewable Energy*, Vol. 68, pp 715–723, 2014.
- [52.] Chen, G., Shestopalov, K., Doroshenko, A., Koltun, P., Polymeric Materials for Solar Energy Utilization: A Comparative Experimental Study and Environmental Aspects, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 54, No. 8, pp 796–805, 2015.
- [53.] Chen, G., Doroshenko, A., Koltun, P., Shestopalov, K., Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 115, pp 577–588, 2015.
- [54.] Mints Do Ango, AC., Medale, M., Abid, C., Optimization of the design of a polymer flat plate solar collector, *Solar Energy*, Vol. 87, No. 1, pp 64–75, 2013.
- [55.] Dorfling, C., Hornung, CH., Hallmark, B., Beaumont, RJJ., Fovargue, H., Mackley, MR., The experimental response and modelling of a solar heat collector fabricated from plastic microcapillary films, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, No.

- 7, pp 1207–1221, 2010.
- [56.] Plastics – the fast Facts 2023 • Plastics Europe [Internet], [citirano 25. ožujak 2024.].
- [57.] Köhl, M., Meir, MG., Papillon, P., Wallner, GM., Saile, S., Polymeric Materials for Solar Thermal Applications, Wiley, 401 str., 2012.
- [58.] Mark, JE., Physical Properties of Polymers, Springer, 1073 str., 2007.
- [59.] Pandey, KM., Chaurasiya, R., A review on analysis and development of solar flat plate collector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp 641–650, 2017.
- [60.] Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P., Louche, A., Modelling And Performance Of A Copolymer Solar Water Heating Collector, Vol. 72, No. 2, pp 99–112, 2002.
- [61.] Köhl, M., Jorgensen, G., Brunold, S., Carlsson, B., Heck, M., Möller, K., Durability of polymeric glazing materials for solar applications, *Solar Energy*, Vol. 79, No. 6, pp 618–623, 2005.
- [62.] Bejan, A., Kraus, AD., Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons, Inc., 1496 str., 2003.
- [63.] Grigorescu, RM., Grigore, ME., Iancu, L., Ghioca, P., Ion, RM., Waste electrical and electronic equipment: A review on the identification methods for polymeric materials, *Recycling*, Vol. 4, No. 3, , 2019.
- [64.] Raman, R., Mantell, S., Davidson, J., Wu, C., Jorgensen, G., A review of polymer materials for solar water heating systems, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 122, No. 2, pp 92–100, 2000.
- [65.] Kahlen, S., Wallner, GM., Lang, RW., Aging behavior of polymeric solar absorber materials – Part 1: Engineering plastics, *Solar Energy*, Vol. 84, No. 9, pp 1567–1576, 2010.
- [66.] Kahlen, S., Wallner, GM., Lang, RW., Meir, M., Rekstad, J., Aging behavior of polymeric solar absorber materials : Aging on the component level, *Solar Energy*, Vol. 84, No. 3, pp 459–465, 2010.
- [67.] Kahlen, S., Wallner, GM., Lang, RW., Aging behavior of polymeric solar absorber materials – Part 2: Commodity plastics, *Solar Energy*, Vol. 84, No. 9, pp 1577–1586, 2010.
- [68.] Sandnes, B., Rekstad, J., A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model, *Solar Energy*, Vol. 72, No. 1, pp 63–73, 2002.

- [69.] Trend indexes - businessanalytiq [Internet], [citirano 18. travanj 2024.].
- [70.] Gugouch, F., Maziri, A., Elghorba, M., Evaluation of damage and failure analysis of CPVC pipes, *Heliyon*, Vol. 10, No. 4, pp e26340, 2024.
- [71.] Duffie, JA., Beckman, WA., Solar Engineering of Thermal Processes. 4. izd., John Wiley & Sons, Inc., 910 str., 2013.
- [72.] Xu, K., Du, M., Hao, L., Mi, J., Yu, Q., Li, S., A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications, *Journal of Materiomics*, Vol. 6, No. 1, pp 167–182, 2020.
- [73.] Incropera, FP., Dewitt, DP., Bergman, TL., Lavine, AS., Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. izd., Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1070 str., 2006.
- [74.] Evangelisti, L., Guattari, C., Asdrubali, F., On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review, *Energy and Buildings*, Vol. 183, pp 607–625, 2019.
- [75.] Lienhard IV, JH., Lienhard V, JH., A Heat Transger Textbook. 6. izd., Cambridge, Massachusetts , U.S.A.: Phlogiston Press, 810 str., 2024.
- [76.] Singh, J., Optical Properties of Condensed Matter and Applications, Wiley. 451 str., 2006.
- [77.] Uprety, P., Junda, MM., Podraza, NJ., Optical properties of borosilicate glass from 3.1 mm to 210 nm (0.4 meV to 5.89 eV) by spectroscopic ellipsometry, *Surface Science Spectra*, Vol. 24, No. 2, pp 3–8, 2017.
- [78.] Larruquert, JI., Gutiérrez-Luna, N., Honrado-Benítez, C., López-Reyes, P., Ríos-Fernández, Á., Pérez-García, M., i ostali., Direct measurement of the extinction coefficient by differential transmittance, *Optics Express*, Vol. 31, No. 20, pp 31734, 2023.
- [79.] Pauly, N., Yubero, F., Espinós, JP., Tougaard, S., Optical properties and electronic transitions of zinc oxide, ferric oxide, cerium oxide, and samarium oxide in the ultraviolet and extreme ultraviolet, *Applied Optics*, Vol. 56, No. 23, pp 6611, 2017.
- [80.] Filipović, P., Dović, D., Horvat, I., Ranilović, B., Evaluation of a novel polymer solar collector using numerical and experimental methods, *Energy*, Vol. 284, No. January, , 2023.
- [81.] Slaman, M., Griessen, R., Solar collector overheating protection, *Solar Energy*, Vol.

- 83, No. 7, pp 982–987, 2009.
- [82.] Young, WC., Budynas, RG., Roark's Formulas for Stress and Strain. 7. izd., Roark's Formulas for Stress and Strain. McGraw Hill, 832 str., 201.
- [83.] Hussain, S., Oosthuizen, PH., Kalendar, A., Evaluation of various turbulence models for the prediction of the airflow and temperature distributions in atria, Sv. 48, Energy and Buildings. str. 18–28, 2012.
- [84.] Cerón, JF., Pérez-García, J., Solano, JP., García, A., Herrero-Martín, R., A coupled numerical model for tube-on-sheet flat-plate solar liquid collectors. Analysis and validation of the heat transfer mechanisms, *Applied Energy*, Vol. 140, pp 275–287, 2015.
- [85.] Reichl, C., Kramer, K., Toma, C., Benovsky, P., Leme, T., Comparison of modelled heat transfer and fluid dynamics of a flat plate solar air heating collector towards experimental data, *Solar Energy*, Vol. 120, pp 450–463, 2015.
- [86.] Dović, D., Andrassy, M., Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 9, pp 2416–2431, 2012.
- [87.] Diarce, G., Campos-Celador, Á., Martin, K., Urresti, A., García-Romero, A., Sala, JM., A comparative study of the CFD modeling of a ventilated active façade including phase change materials, Sv. 126, Applied Energy. str. 307–317, 2014.
- [88.] Kim, K., Song, TH., Discrete ordinates interpolation method incorporated into a flow and energy solver for solution of combined heat transfer problems, Sv. 111, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. str. 2070–2083, 2010.
- [89.] Chekerovska, M., Filkoski, RV., Efficiency of liquid flat-plate solar energy collector with solar tracking system, *Thermal Science*, Vol. 19, No. 5, pp 1673–1684, 2015.
- [90.] Wang, N., Zeng, S., Zhou, M., Wang, S., Numerical study of flat plate solar collector with novel heat collecting components.pdf, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 69, pp 18–22, 2015.
- [91.] Gholamalizadeh, E., Kim, M-H., Three-dimensional CFD analysis for simulating the greenhouse effect in solar chimney power plants using a two-band radiation model, Sv. 63, Renewable Energy. str. 498–506, 2014.
- [92.] Zhang, X., Qiu, J., Li, X., Zhao, J., Liu, L., Complex refractive indices measurements of polymers in visible and near-infrared bands, *Applied Optics*, Vol. 59, No. 8, pp

- 2337, 2020.
- [93.] Zhang, X., Qiu, J., Zhao, J., Li, X., Liu, L., Complex refractive indices measurements of polymers in infrared bands, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 252, pp 107063, 2020.
- [94.] Filipović, P., Dović, D., Ranilović, B., Horvat, I., Numerical and experimental approach for evaluation of thermal performances of a polymer solar collector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 112, pp 127–139, 2019.
- [95.] Filipović, P., Dović, D., Horvat, I., Ranilović, B., Numerical Investigation of Cover Plate Configurations Effect on Thermal Characteristics of a Polymer Solar Collector, *Transactions of FAMENA*, Vol. 45, No. SI-1, pp 75–88, 2021.
- [96.] Celik, IB., Ghia, U., Roache, PJ., Freitas, CJ., Coleman, H., Raad, PE., Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 130, No. 7, pp 0780011–0780014, 2008.
- [97.] Kumar Tyagi, P., Arora, G., Kumar, R., Ali, HM., Rathore, PKS., Recent advances in the shape and configuration of photovoltaic thermal absorbers, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 45, No. 2, pp 4211–4241, 2023.
- [98.] Narendran, G., Jadhav, PH., Gnanasekaran, N., Numerical analysis of thermo hydro-dynamics behavior of solar flat plate collector with square and V-cut twisted tape inserts, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, pp 1–25, 2023.
- [99.] Ikmal, N., Azha, S., Hussin, H., Nasif, MS., Thermal Performance Enhancement in Flat Plate Solar Collector Solar Water Heater A Review, *Processes*, Vol. 8, No. 7, pp 756, 2020.
- [100.] da Silva, FAS., Dezan, DJ., Pantaleão, A V., Salviano, LO., Longitudinal vortex generator applied to heat transfer enhancement of a flat plate solar water heater, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 158, pp 113790, 2019.
- [101.] Moss, RW., Shire, GSF., Henshall, P., Eames, PC., Arya, F., Hyde, T., Optimal passage size for solar collector microchannel and tube-on-plate absorbers, *Solar Energy*, Vol. 153, pp 718–731, 2017.
- [102.] Ramírez-Minguela, JJ., Rangel-Hernández, VH., Alfaro-Ayala, JA., Elizalde-Blancas, F., Ruiz-Camacho, B., López-Núñez, OA., i ostali., Performance Comparison of Different Flat Plate Solar Collectors by Means of the Entropy Generation Rate Using

- Computational Fluid Dynamics, *Entropy*, Vol. 25, No. 4, , 2023.
- [103.] Chiou, JP., The Effect of Nonuniform Fluid Flow of Solar Collector, *Solar Energy*, Vol. 29, No. 6, pp 487–502, 1982.
- [104.] Amiche, A., El Hassar, SMK., Larabi, A., Khan, ZA., Khan, Z., Aguilar, FJ., i ostali., Innovative overheating solution for solar thermal collector using a reflective surface included in the air gap, *Renewable Energy*, Vol. 151, No. xxxx, pp 355–365, 2020.
- [105.] Hussain, S., Harrison, SJ., Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plate solar collector under stagnation conditions, *Solar Energy*, Vol. 122, pp 1023–1036, 2015.
- [106.] Merah, N., Irfan-ul-Haq, M., Khan, Z., Temperature and weld-line effects on mechanical properties of CPVC, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1, pp 247–255, 2003.
- [107.] García-Gil, Á., Pablos, C., García-Muñoz, RA., McGuigan, KG., Marugán, J., Material selection and prediction of solar irradiance in plastic devices for application of solar water disinfection (SODIS) to inactivate viruses, bacteria and protozoa, *Science of the Total Environment*, Vol. 730, , 2020.
- [108.] Tahir, D., Tougaard, S., Electronic and optical properties of selected polymers studied by reflection electron energy loss spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, No. 5, , 2012.
- [109.] Al-Dahash, G., Najeeb, HN., Balakit, AA., Kodeary, A., Balakit, AA., Wahab, GA., i ostali., Study of the optical properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA) doped with a new diarylethen compound, No. January, , 2014.
- [110.] Hong, PTHI., Nguyen, HQ., Nghiem, AHTM., Complex refractive index measurements of poly(methyl methacrylate) (PMMA) over the UV-VIS-NIR region, *Optics Continuum*, Vol. 2, No. 11, pp 2280–2289, 2023.
- [111.] Parthasarathy, V., Nakandhrakumar, RS., Mahalakshmi, S., Senthil kumar, P., Sundaresan, B., Structural, Optical, Thermal and Non-isothermal Decomposition Behavior of PMMA Nanocomposites, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, Vol. 30, No. 8, pp 2998–3013, 2020.
- [112.] Taha, TA., Ismail, Z., Elhawary, MM., Structural, optical and thermal characterization of PVC/SnO₂ nanocomposites, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Vol. 124, No. 4, pp 0, 2018.

- [113.] Sayed, AME., Abdelghany, AM., Abou Elfadl, A., Structural, Optical, Mechanical and Antibacterial Properties of MgO/Poly(Vinyl Acetate)/Poly(Vinyl Chloride) Nanocomposites, *Brazilian Journal of Physics*, Vol. 52, No. 5, , 2022.
- [114.] Sharma, D., Tripathi, D., Dielectric and electrical studies of PVC-PPy blends in dilute solution of THF, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1953, pp 1–5, 2018.
- [115.] Sultanova, NG., Kasarova, SN., Nikolov, ID., Characterization of optical properties of optical polymers, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 45, No. 3, pp 221–232, 2013.
- [116.] M Ravindra, N., Sadoh, A., Hossain, S., Fereira, S., Optical properties of low-refractive index polymers, *Material Science & Engineering International Journal*, Vol. 6, No. 2, pp 68–76, 2022.
- [117.] Joint Committee For Guides In Metrology (JCGM)., ISO/IEC Guide 98-3:2008 - Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), *ISO International Organization for Standardization*, Vol. 50, No. September, pp 134, 2008.

ŽIVOTOPIS

Petar Filipović rođen je 28. lipnja 1992. godine u Zagrebu. Osnovnu školu Davorina Trstenjaka i srednju školu Tehnička škola Ruđer Bošković završio je u Zagrebu. Akademске godine 2011./12. upisao je preddiplomski sveučilišni studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Završni rad pod nazivom "Oblikovanje srpastih lopatica aksijalnog ventilatora" obranio je u ožujku 2016. te je za uspjeh na preddiplomskom studiju nagrađen pohvalom (CUM LAUDE). Iste godine upisao je diplomski sveučilišni studij strojarstva, smjer Procesno-energetski, gdje je diplomski rad pod nazivom "Analiza toplinskih karakteristika polimernog solarnog kolektora" obranio u prosincu 2017. Za taj je uspjeh nagrađen najvećom pohvalom (SUMMA CUM LAUDE) i Medaljom Fakulteta strojarstva i brodogradnje za izvanredan uspjeh u studiju. Također je primio nagradu "Hrvoje Požar" Hrvatskog energetskog društva za izvanredan uspjeh tijekom studiranja. Akademске godine 2017./18. upisao je poslijediplomski doktorski studij, smjer Procesno-energetski, na kojem trenutno radi na doktorskoj disertaciji pod naslovom „Primjena numeričkih i eksperimentalnih metoda u razvoju polimernog solarnog kolektora“. Od ožujka 2018. zaposlen je na Katedri za toplinsku i procesnu tehniku. Osim rada na projektima i istraživačkog rada, sudjeluje u nastavnim aktivnostima na kolegijima „Gradnja aparata“, „Obnovljivi izvori energije“, „Laboratorijski rad“, „Kvantitativna infracrvena termografija“, te na kolegijima u Šibeniku iz područja solarnih toplinskih sustava. Aktivno sudjeluje i u radu akreditiranog Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje. Petar Filipović autor je i suautor više znanstvenih radova i stručnih radova. Za svoj doprinos istraživanjima i obrazovanju nagrađen je godišnjom nagradom Društva mladih znanstvenika i umjetnika za 2023. godinu. Aktivno koristi engleski jezik u govoru i pismu. Od prve godine studija pa do završetka bio je aktivan član Veslačkog kluba FSB-a.

BIOGRAPHY

Petar Filipović was born on June 28, 1992, in Zagreb. He completed his primary education at Davorin Trstenjak Elementary School and his secondary education at Ruđer Bošković Technical School, both in Zagreb. In the academic year 2011/12, he enrolled in the undergraduate university program in Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. He defended his final thesis titled “Design of Axial Fan Sickle-Shaped Blades” in March 2016 and was awarded honors (CUM LAUDE) for his academic achievements in the undergraduate program. The same year, he enrolled in the graduate university program in Mechanical Engineering, specializing in Process and Energy Engineering. He defended his graduate thesis titled “Analysis of Thermal Characteristics of a Polymer Solar Collector” in December 2017. For his achievements, he was awarded the highest honors (SUMMA CUM LAUDE) and the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture Medal for exceptional academic success. Additionally, he received the "Hrvoje Požar" Award from the Croatian Energy Association for outstanding success during his studies. In the academic year 2017/18, he enrolled in the postgraduate doctoral program in Process and Energy Engineering, where he is currently working on his doctoral dissertation titled “Application of Numerical and Experimental Methods in the Development of a Polymer Solar Collector.” Since March 2018, he has been employed at the Chair of Thermal and Process Engineering. In addition to working on projects and conducting research, he participates in teaching activities in the courses “Apparatus Design,” “Renewable Energy Sources,” “Laboratory Work,” and “Quantitative Infrared Thermography,” as well as courses in Šibenik related to solar thermal systems. He is also actively involved in the work of the accredited Laboratory for Heat Transfer and Heat Apparatus. Petar Filipović is the author and co-author of several scientific and professional papers. For his contributions to research and education, he received the Annual Award of the Society of Young Scientists and Artists in 2023. He is proficient in English, both spoken and written. From the first year of his studies until graduation, he was an active member of the FSB Rowing Club.