

# Lokalna energijska i entropijska analiza umreženoga izmjenjivača topline

---

**Rauch, Martina**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:462614>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Martina Rauch

**LOKALNA ENERGIJSKA I  
ENTROPIJSKA ANALIZA UMREŽENOGA  
IZMJENJIVAČA TOPLINE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Martina Rauch

**LOCAL ENERGY AND ENTROPY  
ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER IN  
A HEAT EXCHANGER NETWORK**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Martina Rauch

**LOKALNA ENERGIJSKA I  
ENTROPIJSKA ANALIZA UMREŽENOGA  
IZMJENJIVAČA TOPLINE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
Prof. dr. sc. Antun Galović

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL  
ARCHITECTURE

Martina Rauch

**LOCAL ENERGY AND ENTROPY  
ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER IN  
A HEAT EXCHANGER NETWORK**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
Prof. dr. sc. Antun Galović

Zagreb, 2021.

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 536.24: 236.27: 536.75

Ključne riječi: umreženi izmjenjivač topline, matematički model, maksimalni toplinski tok, maksimalna generirana entropija, eksperiment

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: Prof. dr. sc. Antun Galović

Broj stranica: 221

Broj slika: 130

Broj tablica: 15

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 133

Datum obrane:

Povjerenstvo: Prof. dr. sc. Ivanka Boras, predsjednica povjerenstva

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji, član

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, članica

Doc. dr. sc. Danijel Šestan, član

Prof. dr. sc. Marija Živić, članica

Institucije u kojima je rad pohranjen:

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu

## ZAHVALA

Zahvaljujem članovima povjerenstva: prof. dr. sc. Ivanki Boras, prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec, prof. dr. sc. Mariji Živić, doc. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju i doc. dr. sc. Danijelu Šestanu na korisnim savjetima i smjernicama koje su dovele do uspješnog završetka ovog rada.

Zahvaljujem tvrtki PIREKO d.o.o. na ustupljenoj mjernoj liniji i opremi za mjerenje, a posebnu zahvalu upućujem Josipu Pasancu za izdvojeno vrijeme, mnogo volje te na zanimljivim i korisnim diskusijama. Hvala Josipe, bez tebe ne bi bilo eksperimentalnog dijela ovog rada!

Zahvaljujem Laboratoriju za procesna mjerenja za pomoć pri umjeravanju termometara te Laboratoriju za toplinsku energiju za pomoć pri umjeravanju protokomjera.

Hvala kolegicama i kolegama s Katedre i Zavoda na podršci i učestalim upitima: „Kada će to više biti gotovo?!“

Velika hvala mojoj obitelji – roditeljima, bratu i baki na cjeloživotnoj podršci i ljubavi. Posebna hvala mojim roditeljima, kojima i posvećujem ovaj rad.

Zahvaljujem svojim prijateljima na podršci, poticajima i ljubavi, a osobito Tamari, Luciji, Tomislavu, Mateju i Luki.

Hvala profesoru Zovku.

Posebno zahvaljujem profesoru Juriću, velikom čovjeku koji je preokrenuo moje svjetove.

Zahvaljujem mojoj Mihaeli, koja je u mojem životu *condicio sine qua non*.

Zahvaljujem mojem Damjanu. On zna sve.

Naposljetku, najveća hvala mojem najdražem profesoru i mentoru, velikom čovjeku i uzoru, prof. dr. sc. Antunu Galoviću. Hvala Vam profesore na svom znanju, predanosti, motivaciji te izdvojenom vremenu za diskusije i razgovore. Hvala Vam na radosti za svaki mali pomak za vrijeme pisanja ovog rada te na neumornoj vjeri i podršci za sunčanih i kišnih dana.

Kaže se da osrednji učitelj govori, dobar objašnjava, superiorniji demonstrira, a izvrstan učitelj inspirira.

Hvala Vam profesore na inspiraciji i nematerijalnim vrijednostima koje ću nositi kroz cijeli život!

*Years ago, anthropologist Margaret Mead was asked by a student what she considered to be the first sign of civilization in a culture. The student expected Mead to talk about fishhooks or clay pots or grinding stones.*

*But no. Mead said that the first sign of civilization in an ancient culture was a femur (thighbone) that had been broken and then healed. Mead explained that in the animal kingdom, if you break your leg, you die. You cannot run from danger, get to the river for a drink or hunt for food. You are meat for prowling beasts. No animal survives a broken leg long enough for the bone to heal.*

*A broken femur that has healed is evidence that someone has taken time to stay with the one who fell, has bound up the wound, has carried the person to safety and had tended the person through recovery.*

*Helping someone else through difficulty is where civilization starts.*



# SADRŽAJ

SAŽETAK.....	IX
EXTENDED ABSTRACT.....	X
POPIS SLIKA.....	XII
POPIS TABLICA.....	XX
POPIS OZNAKA.....	XXI
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	4
1.2. Motivacija.....	20
1.3. Cilj i hipoteza istraživanja.....	21
1.4. Metodologija i plan istraživanja.....	21
1.5. Struktura doktorskog rada.....	23
2. MATEMATIČKI OPIS PROBLEMA.....	25
2.1. Razvoj kriterija maksimalnog toplinskog toka.....	26
2.1.1. Razvoj algoritma koristeći definicijske veličine $\pi_{1A} = \varepsilon_A$ i $\pi_{1B} = \varepsilon_B$ .....	26
2.1.2. Razvoj algoritma postupkom integracije lokalnog toplinskog toka.....	29
2.1.3. Specijalni slučajevi jednadžbe (13).....	34
2.1.3.1. Slučaj kod kojeg je $\pi_3 = 0,0$ .....	34
2.1.3.2. Slučaj kod kojeg je $\pi_3 = 1,0$ .....	39
2.1.4. Općeniti slučajevi $0 < \pi_3 < 1,0$ .....	44
2.1.5. Omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora.....	50
2.1.6. Rješenje za slučaj $\pi_{3A} = \frac{C_{1A}}{C_2} \neq \pi_{3B} = \frac{C_{1B}}{C_2}$ .....	50
2.2. Razvoj algoritma po kriteriju maksimalne generirane entropije.....	53
2.2.1. Posebni (specijalni) slučajevi jednadžbe (85).....	60
2.2.1.1. Slučaj $\pi_3 = 0,0$ .....	60

2.2.1.2.	Slučaj $\pi_3 = 1,0$ .....	65
2.3.	Razvoj algoritma po kriteriju omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.....	67
3.	DIJAGRAMSKI PRIKAZ I INTERPRETACIJA REZULTATA PRORAČUNA .....	69
3.1.	Bezdimenzijski toplinski tok za slučaj $\pi_{3A} = \pi_{3B}$ .....	69
3.1.1.	Grafički prikaz toplinskog toka za slučajeve koji udovoljavaju kriteriju u jednadžbi (67).....	69
3.1.2.	Grafički prikaz toplinskog toka za fiksne vrijednosti $M$ i $\pi_3$ za slučajeve koji udovoljavaju kriteriju u jednadžbi (69).....	72
3.1.2.1.	Slučaj $\pi_3 = 0,0$ .....	72
3.1.2.2.	Slučaj $\pi_3 = 0,5$ .....	75
3.1.2.3.	Slučaj $\pi_3 = 1,0$ .....	77
3.1.3.	Detaljnija analiza postignutih maksimalnih toplinskih tokova .....	79
3.1.3.1.	Slučaj $\pi_3 = 0,0$ .....	79
3.1.3.2.	Slučaj $\pi_3 = 0,5$ .....	81
3.1.3.3.	Slučaj $\pi_3 = 1,0$ .....	82
3.1.4.	Analiza veličina $\omega_A$ i $\omega_B$ .....	84
3.2.	Slučajevi koji udovoljavaju kriterijima danim jednadžbama (50) i (51) .....	90
3.2.1.	Slučaj $\pi_{2uk} = 1,0$ .....	90
3.2.1.1.	Slučaj $M < \exp(-\pi_{2uk})$ .....	90
3.2.1.2.	Slučaj $M > \exp(\pi_{2uk})$ .....	91
3.3.	Dijagramski prikaz rješenja za slučaj $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$ .....	93
3.4.	Dijagramski prikazi generirane bezdimenzijske entropije .....	98
3.4.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	98
3.4.1.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	99
3.4.1.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	100
3.4.1.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	101

3.4.1.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	103
3.4.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	105
3.4.2.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 0,5$ .....	105
3.4.2.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 1,0$ .....	106
3.4.2.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 1,5$ .....	108
3.4.2.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 2,0$ .....	109
3.4.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	112
3.4.3.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	112
3.4.3.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	113
3.4.3.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	114
3.4.3.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	115
3.4.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ i $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	117
3.4.4.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	117
3.4.4.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	119
3.4.4.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	121
3.4.4.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	123
3.4.5.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	125
3.4.5.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	125
3.4.5.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	126
3.4.5.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	127
3.4.5.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	128
3.4.6.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	131
3.4.6.1.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	131
3.4.6.2.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	133
3.4.6.3.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	134
3.4.6.4.	Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	136

3.5.	Dijagramski prikazi omjera $R$ bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.....	138
3.5.1.	Slučajevi za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	139
3.5.1.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	139
3.5.1.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	140
3.5.1.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	141
3.5.1.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	142
3.5.2.	Slučajevi za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	143
3.5.2.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	143
3.5.2.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	144
3.5.2.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	145
3.5.2.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	146
3.5.3.	Slučajevi za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	146
3.5.3.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	147
3.5.3.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	148
3.5.3.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	149
3.5.3.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	150
3.5.4.	Slučajevi za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	151
3.5.4.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	151
3.5.4.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	152
3.5.4.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	153
3.5.4.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	154
3.5.5.	Slučajevi za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	155
3.5.5.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	155
3.5.5.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	156
3.5.5.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	157
3.5.5.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	158
3.5.6.	Slučajevi za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	158

3.5.6.1.	Omjer za $M = 0,5$ .....	159
3.5.6.2.	Omjer za $M = 1,0$ .....	160
3.5.6.3.	Omjer za $M = 1,5$ .....	161
3.5.6.4.	Omjer za $M = 2,0$ .....	162
4.	EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE.....	163
4.1.	Opis mjerne linije i postupak mjerenja .....	163
4.2.	Rezultati i diskusija .....	168
4.3.	Mjerna nesigurnost.....	178
4.3.1.	Standardna nesigurnost mjerenja temperature platinskim otporničkim termometrima s PT100 osjetnicima .....	178
4.3.2.	Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka .....	179
4.3.3.	Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka .....	182
4.3.4.	Sastavljena mjerna nesigurnost omjera maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora .....	185
4.4.	Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata .....	187
4.5.	Eksperimentalna analiza proširenog matematičkog modela za $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$ .....	188
5.	SAŽETA DISKUSIJA PROVEDENE ANALIZE I ZAKLJUČAK.....	196
5.1.	Ostvareni znanstveni doprinos .....	206
5.2.	Mogući smjerovi nastavka istraživačkog rada .....	206
	LITERATURA.....	207
	KRATAK ŽIVOTOPIS.....	220
	KRATAK ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU.....	221

## SAŽETAK

Kao jedan od glavnih procesnih uređaja, izmjenjivači topline predmet su intenzivnih istraživanja usmjerenih na različita područja interesa koji uključuju optimalan dizajn, poboljšanja strukture, poboljšanja prijenosa topline, dinamičko ponašanje, automatsko upravljanje, sintezu mreže, numeričku simulaciju, eksperimentalne metode, proizvodnju i razvoj novih vrsta površina za prijenos topline. U ovom radu se za zadanu ukupnu površinu izmjenjivača topline traži optimalno mjesto priključka dodatne struje, određenog protoka i temperature, iz dostupne mreže izmjenjivača topline kako bi se ispunila dva cilja: ostvarenje maksimalnog toplinskog toka kao prvi cilj te iznalaženje mjesta priključka dodatne struje za postizanje maksimalne entropije kao drugi cilj. Definirani su kriteriji koji određuju pri kojim uvjetima se lokalni maksimum toplinskog toka postiže za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke, pri kojim uvjetima se pojavljuje za neke vrijednosti te iste značajke te kada se maksimum ne pojavljuje. Razvijen je i algoritam za izračun generirane entropije te je istraženo pri kojim uvjetima se pojavljuje njezin maksimum. Rezultati istraživanja prikazani su u odgovarajućim dijagramima te su interpretirani, s posebnim osvrtom na slučajeve koji udovoljavaju kriteriju maksimalnog toplinskog toka za sve radne točke protusmjernog rekuperatora, odnosno za pojedine radne točke rekuperatora. Također su prikazani i interpretirani slučajevi kod kojih niti jedna radna točka rekuperatora neće udovoljiti postavljenoj hipotezi za realizaciju maksimalnog toplinskog toka. Dijagramski su prikazani te interpretirani rezultati bezdimenzijske generirane entropije te omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije. U ovom radu provedeno je i eksperimentalno istraživanje s ciljem potvrde izvedenog matematičkog modela za ostvarenje maksimalnog toplinskog toka. Rezultati matematičkog modela uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima kojima su pridružene izračunate sastavljene standardne mjerne nesigurnosti.

**Ključne riječi:** umreženi izmjenjivač topline, matematički model, maksimalni toplinski tok, maksimalna generirana entropija, eksperiment

## EXTENDED ABSTRACT

As one of the main process equipment, heat exchangers are the subject of intensive research focused on various areas of interest including optimal design, structure improvements, enhanced heat transfer techniques, dynamic response behavior, automatic control, network synthesis, numerical simulation, experimental methods, manufacturing, and development of new types of heat transfer surfaces. For the purpose of this thesis, a counterflow heat exchanger of a given total heat transfer area was selected, in which the required amount of heat load needs to be exchanged, having various mass flow rates and supply temperatures of the streams available from the heat exchanger network. Those inlet parameters are such that by connecting either only stream A or only stream B to the heat exchanger with a given surface it would not be possible to achieve the targeted heat flow rate. Thus, the question arises as to whether the targeted amount of exchanged heat flow rate can be achieved by the simultaneous action of both stream A and stream B on a given overall heat exchange area. This means that such simultaneous operation of both streams does not *a priori* allow greater exchanged heat flow rate than in the case where these streams act individually. This thesis aims to obtain the general criterion that needs to be met in order not only to achieve an increase in heat flow rate in such connected (networked) heat exchangers, but to maximize the exchanged heat flow rate. Fulfillment of this criterion means finding the optimal position on a heat exchanger for connection of the stream A, so that the maximum heat flow rate can be, along with the stream B, achieved in a single networked heat exchanger. In other words, within this mathematical model, the criterion of the existence of the maximum heat flow rate, as a local extreme, should be found, which is greater than the heat flow rate achieved only with stream A or stream B. Also, an algorithm for entropy generation in a heat exchanger network is developed. Entropy generation due to heat transfer between streams at finite temperature differences is considered in the model. Due to the complexity of the expression for the calculation of entropy generation, it was not possible to extract the analytical criteria for achieving the local maximum entropy, so it is necessary to determine the maximum of the function numerically, for each case separately.

The research is based on the following hypotheses: maximum heat flow rate and maximum entropy generation is possible to achieve, as local extrema, if the criteria that can be written in explicit dimensionless form are fulfilled. The goal of this research is to obtain these criteria, which will contain the given overall surface of the heat flow rate, inlet temperatures of the weaker and stronger stream as well as the temperature of the weaker

stream which is taken from the heat exchanger network. The first criterion must relate to maximum heat flow rate goal and the second to maximum entropy generation goal. A very important parameter  $M$  is formulated, representing the ratio between temperature difference of the weaker inlet connecting stream from heat exchanger network and inlet stronger stream and the temperature difference of the inlet weaker stream and inlet stronger stream of the observed (separated) counterflow heat exchanger.

The results of the research are presented in related diagrams and interpreted, with special emphasis on cases fulfilling the maximum heat flow rate criterion for all operating points of the counterflow heat exchanger as well as for certain operating points of the counterflow heat exchanger. Cases where none of the operating points of heat exchanger will meet the hypothesis for achieving the maximum heat flow rate are also presented and interpreted. Finally, the results of dimensionless entropy generation and ratio between dimensionless heat flow rate and dimensionless entropy generation are presented in diagrams and interpreted.

An experimental study was also conducted with the aim of confirming the derived mathematical model for developing the criterion for the maximum heat flow rate. The results of the mathematical model are compared with the experimental results with associated calculated composed standard uncertainties.

The dissertation confirms the thesis regarding the existence or non-existence of operating parameters of a networked heat exchanger with the aim of achieving the desired maximum heat flow rate, maximum entropy or the desired maximum ratio between dimensionless heat flow rate and dimensionless entropy. For given available (specific) data on flows and stream temperatures as well as the overall exchange surface of the networked heat exchanger, using developed computer program it is possible to give a very quick and easy answer to given demands or criteria.

**Keywords:** heat exchanger in a heat exchanger network, mathematical model, maximum heat flow rate, maximum entropy generation, experiment



## POPIS SLIKA

Slika 1. Broj objavljenih znanstvenih i preglednih radova u ScienceDirect bazi s ključnim riječima Heat Exchanger Network u razdoblju 1980–2020.....	2
Slika 2. Optimalna mreža za problem 4SP1 [12].....	3
Slika 3. Tablice toplinskih kapaciteta za problem TC3 .....	9
Slika 4. Dizajn mreže izmjenjivača topline nakon optimizacije superstrukture .....	11
Slika 5. Zagrijavanje zraka u izmjenjivačima topline kao dio linije za proizvodnju mlijeka u prahu u sušionici .....	20
Slika 6. Uz matematički opis problema .....	26
Slika 7. Uz izvod jednadžbe (13) .....	29
Slika 8. Uz izvod jednadžbe (35) .....	36
Slika 9. Uz izvod jednadžbe (43) .....	39
Slika 10. Usporedba kriterija jednadžbi (47) i (68).....	49
Slika 11. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ uz $\pi_{2uk} = 6,0; M = 0,50$ .....	70
Slika 12. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ uz $\pi_{2uk} = 6,0; M = 1,0$ .....	70
Slika 13. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ uz $\pi_{2uk} = 6,0; M = 1,1$ .....	70
Slika 14. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ uz $\pi_{2uk} = 6,0; M = 1,14$ .....	70
Slika 15. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ uz $M = 2,0$ i $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	72
Slika 16. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,0; M = 0,50$ .....	73
Slika 17. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,0; M = 1,0$ .....	73
Slika 18. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $M = 2,0$ i $\pi_3 = 0,0$ .....	74
Slika 19. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,5; M = 0,50$ .....	75
Slika 20. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,5; M = 1,0$ .....	75
Slika 21. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $M = 2,0$ i $\pi_3 = 0,5$ .....	76

Slika 22. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $M = 0,50$ .....	77
Slika 23. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $M = 1,0$ .....	77
Slika 24. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{2uk}$ uz $M = 2,0$ i $\pi_3 = 1,0$ .....	78
Slika 25. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka ( $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$ ) <sub>max</sub> i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o veličinama $M$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,0$ .....	80
Slika 26. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka ( $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$ ) <sub>max</sub> i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o veličinama $M$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,5$ .....	81
Slika 27. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka ( $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$ ) <sub>max</sub> i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o veličinama $M$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 1,0$ .....	82
Slika 28. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ uz $M = 0,50$ .....	84
Slika 29. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ uz $M = 1,0$ .....	84
Slika 30. Zavisnost $\omega_A$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 0,5$ .....	85
Slika 31. Zavisnost $\omega_B$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 0,5$ .....	85
Slika 32. Zavisnost $\omega_A$ i $\omega_B$ kao i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ uz $M = 1,0$ .....	87
Slika 33. Zavisnost $\omega_A$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 1,5$ .....	88
Slika 34. Zavisnost $\omega_B$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 1,5$ .....	88
Slika 35. Zavisnost $\omega_A$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 2,0$ .....	89
Slika 36. Zavisnost $\omega_B$ umreženog rekuperatora o $\pi_{2uk}$ i $\pi_3$ za $M = 2,0$ .....	89
Slika 37. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ protusmjernog umreženog rekuperatora uz $M = 0,3$ ; $\pi_{2uk} = 1,0$ .....	91
Slika 38. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_3$ protusmjernog umreženog rekuperatora uz $M = 3,0$ ; $\pi_{2uk} = 1,0$ .....	91
Slika 39. Zavisnost veličine $\pi_{2Aopt}$ i ( $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$ ) <sub>max</sub> o veličini $M$ i $\pi_{2uk}$ uz $\pi_3 = 0,50$ .....	92
Slika 40. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 0,50$ i $\pi_{3A} = 0,5$ .....	94
Slika 41. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 0,50$ i $\pi_{3A} = 1,0$ .....	94
Slika 42. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 1,0$ i $\pi_{3A} = 0,5$ .....	95
Slika 43. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 1,0$ i $\pi_{3A} = 1,0$ .....	96
Slika 44. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 2,0$ i $\pi_{3A} = 0,5$ .....	96

Slika 45. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o $\pi_{2A}$ i $\pi_{3B}$ uz $M = 2,0$ i $\pi_{3A} = 1,0$ .....	97
Slika 46. Zavisnost veličine $\pi_{TB}$ o veličinama $\pi_{TA}$ i $M$ .....	99
Slika 47. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,50$ .....	100
Slika 48. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	101
Slika 49. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	102
Slika 50. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	103
Slika 51. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	104
Slika 52. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	105
Slika 53. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	106
Slika 54. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	107
Slika 55. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	107
Slika 56. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	108
Slika 57. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	109
Slika 58. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	110
Slika 59. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	110
Slika 60. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	111
Slika 61. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,50$ .....	112

Slika 62. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	113
Slika 63. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,50$ .....	114
Slika 64. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	115
Slika 65. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	116
Slika 66. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,55$ ; $0,6$ ; $0,65$ ; $0,7$ ; $0,75$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	118
Slika 67. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	119
Slika 68. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,30$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ ; $0,50$ ; $0,55$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	120
Slika 69. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	120
Slika 70. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,30$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ ; $0,50$ ; $0,55$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	121
Slika 71. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	122
Slika 72. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,30$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ ; $0,50$ ; $0,55$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	123
Slika 73. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	124
Slika 74. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	125
Slika 75. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	126

Slika 76. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	127
Slika 77. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	128
Slika 78. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,50$ ; $0,75$ ; $1,0$ ; $1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$	129
Slika 79. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,3$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ i $0,50$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	129
Slika 80. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ .....	130
Slika 81. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,55$ ; $0,60$ ; $0,65$ ; $0,70$ ; $0,75$ ; $0,80$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	132
Slika 82. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	132
Slika 83. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,3$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ ; $0,50$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	133
Slika 84. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	134
Slika 85. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,3$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ ; $0,50$ i $1,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	135
Slika 86. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	135
Slika 87. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,25$ ; $0,3$ ; $0,35$ ; $0,40$ ; $0,45$ i $0,50$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	136
Slika 88. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA} = 0,50$ ; $0,75$ ; $1,0$ ; $1,25$ ; $1,50$ ; $1,75$ i $2,0$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	137
Slika 89. Zavisnost maksimalne generirane entropije $(\Delta S/C_1)_{maks}$ i $\pi_{2Aopt}$ umreženog rekuperatora o $M$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ .....	138
Slika 90. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	139
Slika 91. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	140

Slika 92. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	141
Slika 93. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	142
Slika 94. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	143
Slika 95. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	144
Slika 96. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	145
Slika 97. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	146
Slika 98. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$ .....	147
Slika 99. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$ .....	148
Slika 100. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$ .....	149
Slika 101. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$ .....	150
Slika 102. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	151
Slika 103. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	152
Slika 104. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,50$ .....	153
Slika 105. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	154
Slika 106. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,50$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,50$ .....	155
Slika 107. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,50$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	156

Slika 108. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,50$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,50$ .....	157
Slika 109. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 0,50$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	158
Slika 110. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,00$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$ .....	159
Slika 111. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$ .....	160
Slika 112. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$ .....	161
Slika 113. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o $\pi_{2A}$ i $\pi_{TA}$ uz $\pi_3 = 1,0$ , $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$ .....	162
Slika 114. Eksperimentalna linija.....	163
Slika 115. Izmjenjivači topline.....	163
Slika 116. Izmjenjivač topline sa spiralnim cijevima .....	164
Slika 117. Dijagram toka struja tople i hladne vode .....	165
Slika 118. Usporedba teorijskog i mjerenog bezdimenzijskog toplinskog toka za $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ , $M = 1,0$ i $\pi_3 = 0,215; 0,512$ i $0,887$ .....	176
Slika 119. Usporedba teorijskog i mjerenog bezdimenzijskog toplinskog toka za $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ , $M = 1,0$ i $\pi_3 = 0,231; 0,509$ i $0,873$ .....	177
Slika 120. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	187
Slika 121. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	188
Slika 122. Usporedba teorijskog i mjerenog bezdimenzijskog toplinskog toka za $\pi_{3A} = 0,224$ , $\pi_{3B} = 0,282$ , $\pi_{2uk} = 1,147$ , $\pi_{2A} = 0,606$ i $M = 1,0$ .....	190
Slika 123. Usporedba teorijskog i mjerenog bezdimenzijskog toplinskog toka za $\pi_{3A} = 0,557$ , $\pi_{3B} = 0,349$ , $\pi_{2uk} = 0,815$ , $\pi_{2A} = 0,413$ i $M = 1,0$ .....	191
Slika 124. Usporedba teorijskog i mjerenog bezdimenzijskog toplinskog toka za $\pi_{3A} = 0,674$ , $\pi_{3B} = 0,851$ , $\pi_{2uk} = 0,992$ , $\pi_{2A} = 0,507$ i $M = 1,0$ .....	191
Slika 125. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj $\pi_{3A} = 0,224$ i $\pi_{3B} = 0,282$ .....	194
Slika 126. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj $\pi_{3A} = 0,557$ i $\pi_{3B} = 0,349$ .....	194

Slika 127. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj $\pi_{3A} = 0,674$ i $\pi_{3B} = 0,851$ .....	195
Slika 128. Prostorni prikaz slučaja prikazanih na slikama 11 i 12.....	198
Slika 129. Prostorni prikaz slučaja prikazanog na slici 15.....	198
Slika 130. Prostorni prikaz slučaja prikazanog na slici 38.....	199



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o izmjenjivaču topline .....	164
Tablica 2. Rezultati mjerenja za neumreženi rekuperator za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	171
Tablica 3. Rezultati mjerenja za umreženi rekuperator za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	172
Tablica 4. Izračun $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	173
Tablica 5. Rezultati mjerenja za neumreženi rekuperator za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	173
Tablica 6. Rezultati mjerenja za umreženi rekuperator za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	174
Tablica 7. Izračun $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	174
Tablica 8. Nesigurnost mjerenja temperature .....	179
Tablica 9. Budžet mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerila volumena .....	180
Tablica 10. Sastavljene mjerne nesigurnosti omjera $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	185
Tablica 11. Sastavljene mjerne nesigurnosti omjera $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	186
Tablica 12. Proširene mjerne nesigurnosti omjera $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .....	186
Tablica 13. Proširene mjerne nesigurnosti omjera $\omega$ za slučaj $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .....	186
Tablica 14. Mjereni podaci za prošireni matematički model $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$ .....	189
Tablica 15. Proširene mjerne nesigurnosti bezdimenzijskog toplinskog toka $\Phi_{\text{BEZD}}$ .....	193

## POPIS OZNAKA

### Latinične oznake

<b>Simbol</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_A$	$m^2$	Lokalna izmjenjivačka površina rekuperatora A
$A_B$	$m^2$	Lokalna izmjenjivačka površina rekuperatora B
$A_u$	$m^2$	Ukupna izmjenjivačka površina svedena na unutarnji promjer cijevi
$A_{0A}$	$m^2$	Ukupna površina izmjene topline rekuperatora A
$A_{0B}$	$m^2$	Ukupna površina izmjene topline rekuperatora B
$A_{0uk}$	$m^2$	Ukupna površina izmjenjivača A i B
$A_{0Aopt}$	$m^2$	Optimalna površina izmjenjivača A
$B_1$	-	Integracijska konstanta
$B_1^*$	-	Integracijska konstanta
$B_2$	-	Integracijska konstanta
$B_2^*$	-	Integracijska konstanta
$c_{pA}$	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku slabije struje u rekuperatoru A
$c_{pB}$	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku slabije struje u rekuperatoru B
$c_w$	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet vode
$C_1$	$W/K$	Toplinski kapacitet slabije struje
$C_{1A}$	$W/K$	Toplinski kapacitet slabije struje A
$C_{1B}$	$W/K$	Toplinski kapacitet slabije struje B
$C_2$	$W/K$	Toplinski kapacitet jače struje
$\dot{I}$	$W$	Ireverzibilnost
$k_u$	$W/(m^2 \cdot K)$	Srednja vrijednost koeficijenta prolaza topline svedena na unutarnju površinu cijevi za umreženi izmjenjivač topline

$k_{uA}$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi za izmjenjivač A
$k_{uB}$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi za izmjenjivač B
$M$	-	Bezdimenzijska značajka definirana kao omjer temperaturnih razlika slabije i jače struje
$q_v$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok
$q_{m,A}$	kg/s	Maseni protok slabije struje A
$q_{m,B}$	kg/s	Maseni protok slabije struje B
$q_{v,cijev}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok kotlovske vode koja struji kroz spiralne cijevi za slučaj neumreženog rekuperatora
$q_{v,cijev,A}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok kotlovske vode koja struji kroz spiralne cijevi rekuperatora A za slučaj umreženog rekuperatora
$q_{v,cijev,B}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok kotlovske vode koja struji kroz spiralne cijevi rekuperatora B za slučaj umreženog rekuperatora
$q_{v,plašt}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok vode iz vodovoda u plaštu za slučaj neumreženog rekuperatora
$q_{v,plašt,A}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok vode iz vodovoda u plaštu rekuperatora A za slučaj umreženog rekuperatora
$q_{v,plašt,B}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok vode iz vodovoda u plaštu rekuperatora B za slučaj umreženog rekuperatora
$R$	-	Omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije
$R_{max}$	-	Lokalni maksimum omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije
$R_{min}$	-	Lokalni minimum omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije
$\Delta S$	W/K	Generirana entropija
$\Delta S_A$	W/K	Lokalno generirana entropija u rekuperatoru A
$\Delta S_B$	W/K	Lokalno generirana entropija u rekuperatoru B

$(\Delta \dot{S})_{iz.sust}$	W/K	Prirast entropije izoliranog sustava
$(\Delta \dot{S} / C_1)_{max}$	-	Bezdimenzijski maksimum generirane entropije
$t$	s	Vrijeme
$t_{kon}$	s	Vrijeme završetka mjerenja
$t_{poč}$	s	Vrijeme početka mjerenja
$T_{1A}$	K	Lokalna temperatura slabije struje A
$T'_{1A}$	K	Temperatura slabije struje na ulazu u izmjenjivač A
$T''_{1A}$	K	Temperatura slabije struje na izlazu iz izmjenjivača A
$T_{1B}$	K	Lokalna temperatura slabije struje B
$T'_{1B}$	K	Temperatura slabije struje na ulazu u izmjenjivač B
$T''_{1B}$	K	Temperatura slabije struje na izlazu iz izmjenjivača B
$T_2$	K	Lokalna temperatura jače struje
$T'_2$	K	Ulazna temperatura jače struje
$T_2^*$	K	Temperatura jače struje na mjestu priključka dodatne struje iz mreže izmjenjivača topline
$T_{ok}$	K	Temperatura okoliša
$u(x)$	kao za $x$	Procijenjeno standardno odstupanje
$u_c(x)$	kao za $x$	Sastavljena standardna nesigurnost
$u_c^2(x)$	kao za $x^2$	Sastavljena procijenjena varijanca
$U(x)$	kao za $x$	Proširena mjerna nesigurnost
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen vode
$V_{kon}$	m <sup>3</sup>	Završni volumen vode
$V_{poč}$	m <sup>3</sup>	Početni volumen vode

## Grčke oznake

$\varepsilon_A$	-	Iskoristivost (efikasnost) topline rekuperatora A
$\varepsilon_B$	-	Iskoristivost (efikasnost) topline rekuperatora B
$g_2'$	°C	Temperatura vode na izlazu iz kotla
$g_{izlaz}$	°C	Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača
$g_{ulaz}$	°C	Temperatura vode na ulazu u izmjenjivač
$g_{sr}$	°C	Srednja temperatura vode
$\Delta g_{m,A}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika za rekuperator A
$\Delta g_{m,B}$	°C	Srednja logaritamska temperaturna razlika za rekuperator B
$\pi_{1A}$	-	Iskoristivost topline rekuperatora A
$\pi_{1B}$	-	Iskoristivost topline rekuperatora B
$\pi_{2A}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= (k \cdot A_{0A}) / C_1$
$\pi_{2Aopt}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= (k \cdot A_{0Aopt}) / C_1$
$\pi_{2uk}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= (k \cdot A_{0uk}) / C_1$
$\pi_3$	-	Bezdimenzijska značajka, $= C_1 / C_2$
$\pi_{3A}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= C_{1A} / C_2$
$\pi_{3B}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= C_{1B} / C_2$
$\pi_{TA}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= T_{1A}' / T_2'$
$\pi_{TB}$	-	Bezdimenzijska značajka, $= T_{1B}' / T_2'$
$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vode
$\Phi$	W	Toplinski tok koji je hladna voda primila u neumreženom rekuperatoru
$\Phi_A$	-	Toplinski tok izmijenjen u rekuperatoru ukupne površine između struje 2 i struje 1A
$\Phi_B$	-	Toplinski tok izmijenjen u rekuperatoru ukupne površine između struje 2 i struje 1B
$\Phi_{BEZD}$	-	Bezdimenzijski toplinski tok

$\Phi_{\text{cijev}}$	W	Toplinski tok koji topla voda iz kotla predaje hladnoj vodi iz vodovodne mreže za slučaj neumreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{cijev,A}}$	W	Toplinski tok koji topla voda iz kotla predaje hladnoj vodi iz vodovodne mreže u rekuperatoru A za slučaj umreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{cijev,B}}$	W	Toplinski tok koji topla voda iz kotla predaje hladnoj vodi iz vodovodne mreže u rekuperatoru B za slučaj umreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{gub,1}}$	W	Gubitak toplinskog toka kroz plašt rekuperatora za slučaj neumreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{gub,2}}$	W	Gubitak toplinskog toka kroz plašt rekuperatora za slučaj umreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{maks}}$	W	Maksimalni toplinski tok umreženog rekuperatora, $= \Phi_{\text{plašt,A}} + \Phi_{\text{plašt,B}}$
$\Phi_{\text{plašt}}$	W	Toplinski tok koji hladnija voda prima za slučaj neumreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{plašt,A}}$	W	Toplinski tok koji hladnija voda prima u izmjenjivaču topline A za slučaj umreženog rekuperatora
$\Phi_{\text{plašt,B}}$	W	Toplinski tok koji hladnija voda prima u izmjenjivaču topline B za slučaj umreženog rekuperatora
$\omega$	-	Omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora

Napomena: Oznake statističkih veličina iz poglavlja **4.3**, kao i ostalih veličina koje nisu na ovom popisu, objašnjene su u dijelu teksta na mjestu gdje se koriste.

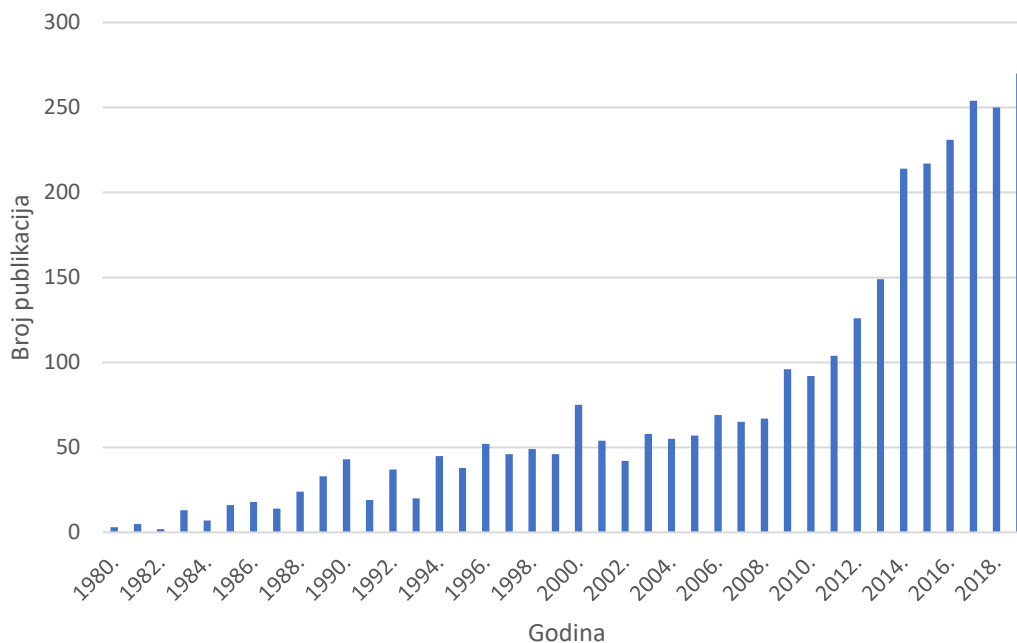
## 1. UVOD

U proizvodnji i upravljanju energijom, 90% korištene toplinske energije prenosi se kroz različite vrste izmjenjivača topline. Izmjenjivači topline primjenjuju se u velikoj mjeri u elektranama i procesnim industrijama kao što su kemijska, naftna, prehrambena i farmaceutska industrija, ali i u mnogim drugim poput zrakoplovne, svemirske i nuklearne industrije [1]. Nakon izbijanja prve naftne krize 1973. godine, značajno je porastao interes za uštedom energije, njezinim učinkovitijim korištenjem i nalaženjem novih izvora energije [1], [2]. Na industrijski sektor koji uključuje rafiniranje, proizvodnju, rudarstvo, poljoprivredu i građevinarstvo otpada više od 50% ukupnog utroška energije te se očekuje porast potrošnje energije u globalnom industrijskom sektoru za više od 30% tijekom projekcijskog razdoblja (do 2050. godine), odnosno potrošnja od približno 332 EJ [3]. U Europskoj uniji približno četvrtina potrošene energije otpada na industriju, pri čemu se na grijanje i hlađenje troši 73% ukupno angažirane energije u tom sektoru [4], [5]. Europska industrija je od 2000. godine smanjila svoj energetske intenzitet (specifičnu potrošnju energije) dvostruko brže od SAD-a. Napredak je osobito ostvaren u energetski intenzivnim sektorima poput kemijskoga koji je prepolovio svoj energetske intenzitet u posljednjih dvadesetak godina. Glavni razlog za to je cijena energije koja predstavlja značajan trošak. Uz daljnje poticaje za uporabu goriva s niskom emisijom ugljika i ulaganja u energetske učinkovitost, predviđa se da je moguće upotrebom postojećih tehnologija smanjiti troškove energije za 4–10% [6].

Kao jedan od glavnih procesnih uređaja, izmjenjivači topline predmet su intenzivnih istraživanja usmjerenih na različita područja interesa koji uključuju optimalan dizajn, poboljšanja strukture, poboljšane tehnike prijenosa topline, dinamičko ponašanje, automatsko upravljanje, sintezu mreže, numeričku simulaciju, eksperimentalne metode, proizvodnju i razvoj novih vrsta površina za prijenos topline [1].

Zbog stalnog porasta troškova energije i sve strožih propisa vezanih uz smanjenje emisija u okoliš tijekom posljednja četiri desetljeća uloženi su veliki naponi u rješavanje problema integracije topline i razvoj tehnologija za iskorištenje topline. Mreža koja nastaje povezivanjem izmjenjivača topline u nekom procesu s ciljem povrata topline naziva se mrežom izmjenjivača topline (engl. *Heat Exchanger Network – HEN*) i tema je mnogobrojnih znanstvenih istraživanja, o čemu svjedoči broj objavljenih znanstvenih članaka u posljednjih nekoliko desetljeća. Pretraživanje baze cjelovitih tekstova ScienceDirect s nacionalnom licencom po ključnim riječima HEN rezultiralo je s ukupno 4550 publikacija unutar kategorije

znanstveni i pregledni radovi (pristupljeno 31. srpnja 2020.). Iako je riječ o samo jednoj bazi, može se opaziti rastući interes za problematiku mreža izmjenjivača topline, osobito u proteklih nekoliko godina.



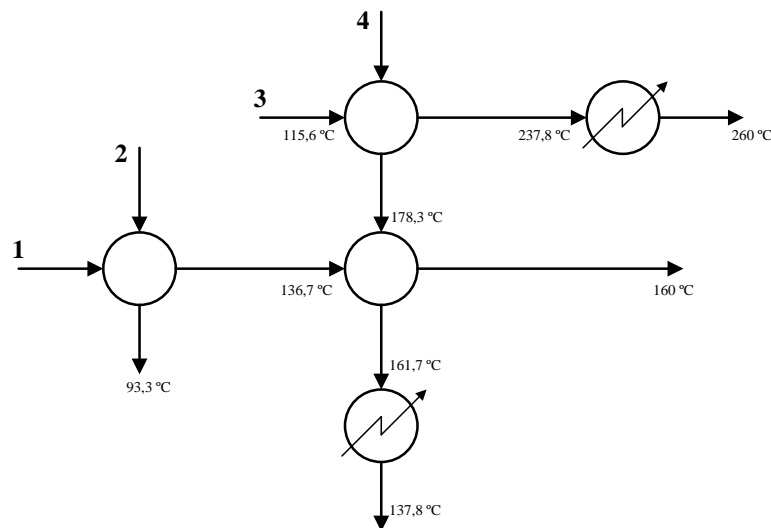
Slika 1. Broj objavljenih znanstvenih i preglednih radova u ScienceDirect bazi s ključnim riječima Heat Exchanger Network u razdoblju 1980–2020.

Problem optimizacije HEN-a naziva se sintezom mreže izmjenjivača (engl. *Heat Exchanger Network Synthesis – HENS*). Cilj sinteze mreže izmjenjivača topline je projektirati optimalnu mrežu, povezujući međusobno tople i hladne procesne struje, odnosno povezujući ih s rashladnim ili ogrjevnim medijima (para, rashladna voda) radi minimiziranja troškova i poboljšanja ekonomičnosti postrojenja [7], [8]. U procesnoj industriji, mreže izmjenjivača topline povezuju industrijski proces s podsustavima postrojenja i općenito čine velik dio ukupnih kapitalnih troškova postrojenja kao i operativnih troškova u pogledu potreba za energijom [9]. Konvencionalna sinteza mreže izmjenjivača topline izvodi se pod pretpostavkom fiksnih radnih parametara pri nominalnim uvjetima određenog procesa. Međutim, za očekivati je da će se radni uvjeti mijenjati zbog varijacija koje se uobičajeno susreću tijekom rada. Ove varijacije, odnosno nesigurnosti, javljaju se zbog nepoznatih poremećaja poput nesigurnosti u parametrima procesa (radni uvjeti), nesigurnih parametara modela (kinetički parametri, koeficijenti prijelaza topline itd.) te diskretne nesigurnosti (kvarovi, dostupnost opreme i sl.). Stoga je fleksibilnost postrojenja važna komponenta



djelotvornosti proizvodnog procesa jer je povezana sa sposobnošću procesa da se adaptira na široki raspon nesigurnih uvjeta [9], [10].

Povrh toga, kombinatorni problem pri sparivanju procesnih struja i sekvenciranju izmjenjivača topline opisan je u literaturi za slučajeve s manje od deset struja, iako tipičan industrijski proces sadrži između 30 i 80 struja koje je potrebno grijati ili hladiti [11]. Lee, Masso i Rudd [12] navode primjer koji uključuje dvije procesne struje koje treba zagrijati i dvije procesne struje koje treba ohladiti, za koje postoji 4200 izvedivih konfiguracija. Primjenjujući poboljšanu metodu grananja i ograđivanja (engl. *branch and bound method*) kao općenitu metodu za rješavanje kombinatornih problema optimizacije, uspješno su reducirali izvorni problem na rješavanje samo 12 problema.



Slika 2. Optimalna mreža za problem 4SP1 [12]

Nadalje, struje mogu mijenjati fazu, a fizikalna i transportna svojstva značajna za problem sinteze mreže izmjenjivača topline mijenjaju se s temperaturom. Zbog interakcije između mreže izmjenjivača topline i ostatka procesa, važno je biti svjestan činjenice da su neki parametri struje rigidno definirani *a priori* dok su drugi fleksibilni. Na primjer, neke ciljne temperature moraju biti zadovoljene iz zahtjeva samog procesa, dok se druge mogu mijenjati u određenim granicama ako to omogućuje bolje iskorištenje topline i time utječe na cjelokupnu ekonomiju procesa. Napokon, postoje i kvalitativni aspekti operativnosti, fleksibilnosti, sigurnosti i upravljivosti. U mnogim slučajevima to znači da će se modelu nametnuti ograničenja koja nisu termodinamičke prirode u obliku zabranjenih, ograničenih ili traženih sparivanja [11].

## 1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Problem dizajna mreže izmjenjivača topline prvi je uveo u literaturu Howard Ten Broeck 1944. godine. U svom radu *Economic Selection of Exchanger Sizes* [13] Broeck je ponudio metodu za ekonomski odabir veličina pojedinih jedinica u tzv. bateriji izmjenjivača (engl. *battery of exchangers*) i detaljno prikazao izvod jednadžbi potrebnih za odabir optimalnih veličina izmjenjivača na primjeru tri izmjenjivača topline i tri pomoćna hladnjaka. Općenitiji pristup optimizaciji koji se temelji na dinamičkom programiranju prikazao je Westbrook 1961. godine te ilustrirao njegovu primjenu na sustavu koji se sastoji od pet izmjenjivača topline, pet hladnjaka i peći [14]. Fan i Wang [15] primijenili su princip diskretnog maksimuma na sličan navedeni mrežni raspored. Iako bi se metode opisane u ove tri publikacije mogle koristiti za određivanje optimalnih mreža izmjenjivača topline, bio bi potreban pristup pokušaja i pogrešaka u kojem bi se ocjenjivale različite konfiguracije opreme [16]. Prvi sustavni pristup problemu sinteze ostvario je 1965. godine Hwa [17] primjenjujući separabilno programiranje (engl. *separable programming*) za uklanjanje neisplativih izmjenjivača topline iz mreže. Međutim, s obzirom na ogroman broj mogućih konfiguracija i poteškoće povezane s njihovim kombiniranjem u jedan model, ovaj pristup nije pružio nikakvu veliku prednost [16]. Kesler i Parker [18] su odabir optimalne konfiguracije razmatrali kao mrežni problem u kojem čvorovi predstavljaju različite vrste uređaja za prijenos topline, a lukovi toplu i hladnu struju procesa. Pri tome su pretpostavili koeficijente prolaza topline i time izbjegli detaljna razmatranja dizajna izmjenjivača topline. Započeli su s dijeljenjem svake struje u procesu u toplinske elemente, odnosno izmjenjivače koji su dovoljno mali da s dovoljnom točnošću izraze ciljnu funkciju problema kao linearnu funkciju. Primijenili su modificiranu verziju problema pridruživanja (engl. *assignment problem*) za odabir izvedivih sparivanja toplih i hladnih elemenata struje pri čemu su linearno programiranje koristili kao pomoć u konfiguriranju najpoželjnije mreže za izmjenu topline [19], [20]. Kobayashi i sur. [21] proučavali su sintezu optimalnog sustava izmjene topline formuliranjem problema kao optimalnog problema pridruživanja. Problem optimizacije podijelili su u dva problema na dvije različite razine – problem optimalnog dizajna za zadanu strukturu sustava (problem prve razine), odnosno problem optimalnog strukturiranja pod pretpostavkom da je problem prve razine optimalno riješen (problem druge razine). Za optimalni dizajn na prvoj razini koristili su kompleks metodu (engl. *CONstrained siMPLEX*), tj. modificiranu simpleks metodu koju je predložio M. J. Box [22], a linearno programiranje za rješavanje optimalnog problema pridruživanja na drugoj razini, pri čemu se ovi dvorazinski

problemi iterativno rješavaju redom sve dok se struktura sustava ne prestane mijenjati. Proširenjem osnovnog pristupa (ponajviše u pogledu dopuštanja izmjene topline između struja više puta) omogućeno je razdvajanje procesnih struja i ciklička sparivanja, što je izvjesno poboljšanje u usporedbi s prethodnim radovima. Nishida i sur. [23] razmatrali su isti problem kao i Kobayashi i sur. [21] te primijenili isti iterativni algoritam za rješavanje optimalnog sustava. Također su mrežu izmjenjivača topline razložili na unutarnji podsustav koji sadrži sve procesne izmjenjivače topline i vanjski podsustav koji se sastoji samo od pomoćnih grijača i hladnjaka koji se eventualno mogu koristiti tek po završetku izmjene topline među strujama. Ovakav pristup omogućuje odvojenu sintezu unutarnjeg podsustava i vanjskog pomoćnog podsustava te naknadnu kombinaciju u jedan jedinstveni sustav. Radi pojednostavljenja problema sinteze unutarnjeg podsustava uvedeno je nekoliko pretpostavki: (1) trošak unutarnjeg podsustava aproksimiran je linearnom funkcijom ukupne površine prijenosa topline u podsustavu; (2) u unutarnjem podsustavu koriste se protusmjerni izmjenjivači topline tipa cijevi u plaštu (engl. *shell-and-tube heat exchanger*), a izmjena topline odvija se bez promjene faze procesnih struja i (3) jednake vrijednosti koeficijenta prolaza topline za sve izmjenjivače. U skladu s navedenim pretpostavkama, cilj je bio pronaći za traženi ukupni toplinski tok i svojstva procesnih struja, strukturu mreže izmjenjivača unutarnjeg podsustava i raspodjelu toplinskih tokova u mreži takvu da je ukupna površina prijenosa topline najmanja. Manipulirajući dijagramom na kojem je svaka struja predočena blokom čija površina odgovara količini topline koja se treba odvoditi ili dovoditi struji s ciljem postizanja zadane izlazne temperature, ostvarili su sintezu unutarnjeg podsustava. Nakon toga se sinteza vanjskog pomoćnog podsustava izvodi izravno, pripremajući, ako je potrebno, odgovarajuću pomoćnu opremu za grijanje ili hlađenje za svaku struju koja izlazi iz unutarnjeg podsustava kako bi se osigurala tražena vrijednost temperature pojedine struje. Budući da vrijednost ukupnog izmijenjenog toplinskog toka nije poznata sve dok se ne utvrdi optimalna struktura cijelog sustava, za pokretanje sinteze unutarnjeg podsustava potrebno ju je pretpostaviti. Stoga je iterativni postupak neizbježan u nastojanju dobivanja optimalne vrijednosti ukupnog izmijenjenog toplinskog toka. U pokušaju sinteze mreže izmjenjivača topline u pogonu za atmosfersku destilaciju sirove nafte koji je prikazan u radu [21], Nishida i sur. dobili su drugačiju optimalnu strukturu od one koju su prikazali Kobayashi i sur. Usprkos brojnim pretpostavkama potrebnim za razvoj njihovog analitičkog pristupa, dobili su bolju mrežu od one koja se obično susreće u komercijalnim pogonima.

Problem sinteze mreže izmjenjivača topline prvi su strogo formulirali A. H. Masso i D. F. Rudd 1969. godine [24], a temelji se na definiranom skupu procesnih struja  $s$ , od kojih se  $n$

treba zagrijati, dok se preostalih  $m = s - n$  treba ohladiti. Za svaku struju poznata je njezina ulazna temperatura, izlazna temperatura i toplinski kapacitet. Također su na raspolaganju pomoćni parni grijači i hladnjaci s rashladnom vodom. Postavljeni problem bio je razviti mrežu izmjenjivača topline uz minimalne troškove na način da se postigne željena izlazna temperatura svake procesne struje. Općenito, investicijski troškovi za  $i$ -ti izmjenjivač, grijač i hladnjak, označeni sa  $C_{Ei}$ ,  $C_{Hi}$ , odnosno  $C_{Ci}$ , mogu se povezati s odgovarajućim površinama prijenosa topline  $A_{Ei}$ ,  $A_{Hi}$  i  $A_{Ci}$  empirijskim izrazima  $C_{Ei} = aA_{Ei}^b$ ,  $C_{Hi} = aA_{Hi}^b$  i  $C_{Ci} = aA_{Ci}^b$ , gdje su  $a$  i  $b$  konstante. Radi praktičnosti, pretpostavljena je upotreba protusmjernih izmjenjivača topline tipa cijevi u plaštu s jednim prolazom uz izmjenu topline bez promjene faze procesnih struja i uz poznate vrijednosti koeficijenata prolaza topline za sve izmjenjivače, parne grijače i hladnjake s rashladnom vodom. Prema tome, cilj sinteze bio je strukturirati sustav sposoban za izvršavanje definiranih zadataka uz minimalne godišnje troškove. Način na koji su Masso i Rudd definirali zadatak sinteze mreže izmjenjivača topline razlikovao se u stanovitj mjeri od načina drugih autora, iako se većina njih u narednim godinama fokusirala na rješavanje identičnih vrsta problema [12], [25]–[30]. Masso i Rudd [24] su svoju heurističku metodu strukturiranja primijenili na tri problema vezanih uz mrežu izmjenjivača topline. Jedan je problem obuhvaćao pet procesnih struja, dok su druga dva uključivala sedam procesnih struja. Sparivanja procesnih struja izvodili su slučajnim odabirom jednog od nekoliko ponderiranih heurističkih pravila za određeni stupanj dekompozicije. Svi reziduali uključuju se u preostale neintegrirane struje te se uzimaju u obzir u daljnjim sparivanjima. Nakon što se ostvare sva izvediva sparivanja procesnih struja, reziduali se otpremaju na pomoćno grijanje i hlađenje te se izračunavaju ukupni troškovi mreže. Postupak se zatim ponavlja. Ako je nova mreža jeftinija od prethodne, težinski faktor povezan s heuristikom koja se koristi u svakoj fazi blago se povećava i tako raste vjerojatnost da bude ponovno odabrana u toj fazi. Suprotno tome, ako je dobivena mreža lošija od prethodne najbolje mreže, odgovarajući težinski faktori se smanjuju. Na taj način ostvaruje se oblik učenja zasnovan na iskustvu. Ovaj postupak se ponavlja izvršavanjem predodređenog broja iteracija ili dok se ne pojavi dosljedno ponavljanje jeftine mreže kao rezultata sinteze. Iako je ova metoda jednostavna, ona ne nudi jamstvo optimalnosti ili stvarno dobar kriterij završetka. Težinski faktori mogu se toliko ukorijeniti da se više puta generira isto rješenje koje nije optimalno. Također je moguće da sparivanje koje bi dovelo do optimalnog rješenja ne može odabrati niti jedna heuristika. Nadalje, težinski faktori funkcija su samo one faze u sintezi u kojoj se primjenjuje pravilo, a ne toplinskog stanja. Kao posljedica toga, iskustvo „naučeno“ tijekom jedne sinteze ima ograničenu korist u rješavanju drugih problema [31], [32].

Edward Charles Hohmann objavio je 1971. godine doktorsku disertaciju na temu dizajna mreže izmjenjivača topline [33]. Jedan od glavnih doprinosa ovog doktorskog rada bio je proširenje prikaza temperature svake struje u ovisnosti o sadržaju entalpije za tu struju koji je izvorno osmislio A. M. Whistler [34]. Hohmann je na dijagramu spojio sve tople struje u jednu kompozitnu toplu krivulju, a sve hladne struje u jednu kompozitnu hladnu krivulju, dobivši tako prikaz koji je danas poznat kao Hohmann-Lockhartov dijagram kompozitnih krivulja. Svojom disertacijom E. C. Hohmann položio je temelje *pinch* metodi za sintezu mreže izmjenjivača topline. Preuzevši primjer problema sa četiri procesne struje (tzv. problem 4SP1) kojeg su uveli Lee i sur. [12] izračunom je pokazao da su pomoćni parni grijači i hladnjaci s rashladnom vodom potrebni ako se želi izgraditi izvediva mreža.

Pri tome je predložio izraz  $U = N - 1$  za procjenu kvaziminimalnog broja jedinica (engl. *quasi-minimum number of units*), gdje je  $N$  ukupan broj struja, tj. zbroj toplih i hladnih procesnih struja te pomoćnog grijanja i hlađenja. Prefiks „kvazi“ ukazuje da je Hohmann znao da izraz nije univerzalno primjenjiv. Linnhoff i sur. [35] pokazali su da je to poseban slučaj pozivajući se na Eulerovu relaciju iz teorije grafova<sup>1</sup> [36]. Općenitiji zapis Eulerovog teorema primijenjen na mreže izmjenjivača topline ima sljedeći oblik:  $U = N + L - S$ , gdje je  $U$  broj jedinica,  $N$  ukupan broj struja (procesnih i pomoćnih),  $L$  broj neovisnih petlji te  $S$  broj zasebnih komponenata u mreži. Iz ovoga slijedi da se za zadani broj struja, smanjenjem broja petlji u mreži ili povećanjem broja zasebnih komponenata (podmreža), smanjuje broj jedinica. U skladu s time, opći oblik Eulerovog teorema povezuje stvarni broj jedinica u mreži (a ne minimalni) s brojem zasebnih komponenata na koje se mreža može podijeliti i brojem petlji (povratnih ciklusa).

Značajno otkriće koje se smatra prekretnicom u sintezi mreže izmjenjivača topline je otkriće uskog grla izmjene topline (engl. *bottleneck*), tj. *pinch* točke koju su neovisno jedni od drugih opisali Linnhoff i Flower [37], [38] i Umeda i sur. [39], [40], iako njezin puni značaj nije prepoznat ni u jednom od navedenih radova. Nekoliko godina poslije Linnhoff i Hindmarsh [41] predstavili su *pinch* metodu za sintezu mreže izmjenjivača topline. Metoda se temelji na novom pristupu koji prepoznaje *pinch* kao područje dizajna mreže s najvećim ograničenjima budući da minimalna temperaturna razlika ( $\Delta T_{\min}$ ) između toplih i hladnih struja postoji baš u *pinchu*. Kao rezultat toga, broj izvedivih sparivanja u ovom području strogo je ograničen. Prema tome, točka u kojoj je vertikalna udaljenost između kompozitnih

---

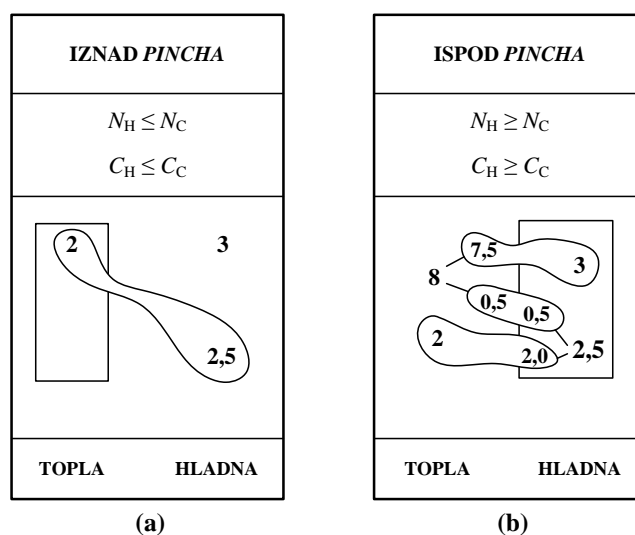
<sup>1</sup> Graf  $G$  sastoji se od konačnog nepraznog skupa  $V = V(G)$  od  $p$  vrhova (točaka, čvorova) zajedno s propisanim skupom  $X$  od  $q$  neuređenih parova iz skupa  $V$  koje nazivamo bridovima. Primijenjeno na mreže izmjenjivača topline, vrhovi grafa (čvorovi) odgovaraju procesnim strujama i strujama pomoćnog sustava (grijanje, hlađenje), a bridovi izmjenjivačima topline. Petlja je brid koji spaja vrh sa samim sobom.

krivulja u  $T, \Delta H$  - dijagramu najmanja (i jednaka  $\Delta T_{\min}$ ) djeluje kao usko grlo i definira granicu iskorištenja topline za zadanu topologiju mreže. *Pinch* metoda za sintezu HEN-a započinje s dizajnom u *pinch* točki, razvijajući ga u dva odvojena sustava, iznad i ispod *pinch* točke. Ovaj se pristup potpuno razlikuje od uobičajenog intuitivnog pristupa kod kojeg dizajn započinje s „tople“ strane i razvija se prema „hladnoj“. Budući da se u sintezi mreže prilično često moraju ostvariti krucijalna sparivanja, u slučaju da ona izostanu, doći će do prijenosa topline preko *pincha*, a time i do povećane upotrebe toplih i hladnih struja pomoćnog sustava. U skladu s time, kada sinteza mreže započne s „tople“ strane, početne odluke mogu poslije zahtijevati daljnje odluke, tj. takva sparivanja koja dovode do povrede *pincha*, odnosno kriterija  $\Delta T_{\min}$  prilikom približavanja *pinchu* [42]. S druge strane, kada se sa sintezom mreže započne u *pinch* točki, početne odluke o dizajnu donose se u najsloženijem dijelu problema i manja je vjerojatnost da će poslije dovesti do poteškoća. Stoga započinjanje dizajna u *pinchu* ima posebnu prednost jer omogućuje identificiranje bitnih sparivanja u najsloženijem dijelu sinteze mreže koja su u skladu sa zahtjevom o minimalnom korištenju toplih i hladnih struja pomoćnog sustava [41]. Na ove se struje primjenjuju kriteriji izvedivosti radi identifikacije neophodnih sparivanja struja u *pinch* točki, dostupnih mogućnosti dizajna i potrebe za razdvajanjem struja. Prvi kriterij izvedivosti odnosi se na broj toplih i hladnih struja u *pinch* točki (engl. *the stream population at the pinch*) koji treba biti takav da omogućuje raspored izmjenjivača koji je u skladu s minimalnim korištenjem struja pomoćnog sustava. Uzimajući u obzir područje iznad *pincha*, to se može postići samo ako se svakoj toploj struji može naći odgovarajuća hladna struja, tj. ako je broj toplih struja ili grana manji ili jednak broju hladnih struja ili grana ( $N_H \leq N_C$ , gdje je  $N_H$  broj toplih struja ili grana, a  $N_C$  broj hladnih struja ili grana). Kako bi se ispunila ova nejednakost, ponekad će biti potrebno razdvojiti procesne struje. Prema tome, u području iznad *pincha* potrebno hlađenje toplih procesnih struja mora se ostvariti izmjenom topline s hladnim procesnim strujama. Suprotno vrijedi za područje ispod *pincha*. Kako bi se izbjeglo korištenje toplih struja pomoćnog sustava svaka hladna procesna struja treba se dovesti do *pinch* temperature izmjenom topline s toplim procesnim strujama, a to se može ostvariti samo ako je broj toplih struja ili grana veći ili jednak broju hladnih struja ili grana ( $N_H \geq N_C$ ). I u ovom će području ponekad biti potrebno razdvojiti struje kako bi se osigurala ova nejednakost. Drugi kriterij odnosi se na temperaturnu izvedivost – udaljavanjem od *pincha* temperaturne razlike između struja moraju se povećavati. Promatrajući područje iznad *pincha*, ovaj je kriterij zadovoljen kada je toplinski kapacitet tople struje manji ili jednak toplinskom kapacitetu hladne struje. Dakle, počevši od  $\Delta T_{\min}$  na *pinchu*, da bi

udaljavanjem od njega temperaturne razlike rasle, mora biti ispunjena nejednakost  $C_H \leq C_C$ , gdje je  $C_H$  toplinski kapacitet tople struje ili grane, a  $C_C$  toplinski kapacitet hladne struje ili grane. Ako se pokaže da nije moguće zadovoljiti ovu nejednakost, tada je potrebno promijeniti jedan ili više toplinskih kapaciteta dijeljenjem struja. U području ispod *pincha*, da bi udaljavanjem od *pinch* točke temperaturne razlike između struja rasle, mora biti zadovoljena nejednakost  $C_H \geq C_C$ .

K tome treba imati na umu da se ove nejednakosti primjenjuju samo na *pinch* točku, tj. daleko od nje temperaturne razlike između struja mogu se povećati dovoljno da se dopuste sparivanja kod kojih toplinski kapaciteti sparenih struja krše spomenute nejednakosti.

Identifikacija bitnih sparivanja procesnih struja u području *pincha* može se olakšati korištenjem tablica u kojima se vrijednosti toplinskih kapaciteta toplih i hladnih struja na *pinchu* prikazuju u padajućem redoslijedu (engl. *CP table*). Na vrhu tablice zabilježe se odgovarajući kriteriji izvedivosti, a toplinski kapaciteti koji predstavljaju struje koje moraju biti uključene u proces izmjene topline na *pinchu* se uokvire i tako naglasi nužnost njihova sparivanja. Neophodni spoj na *pinchu* se u tablici prikazuje sparivanjem toplinskih kapaciteta tople i hladne struje, a dijeljenje struja se naznačuje zapisivanjem zasebnih toplinskih kapaciteta grana uz izvorni toplinski kapacitet struje [41].



Slika 3. Tablice toplinskih kapaciteta za problem TC3

(a) izvedivo sparivanje struja na *pinchu* (za područje iznad *pincha*) (b) izvediva topologija za područje ispod *pincha* s dva razdvajanja struja [41]

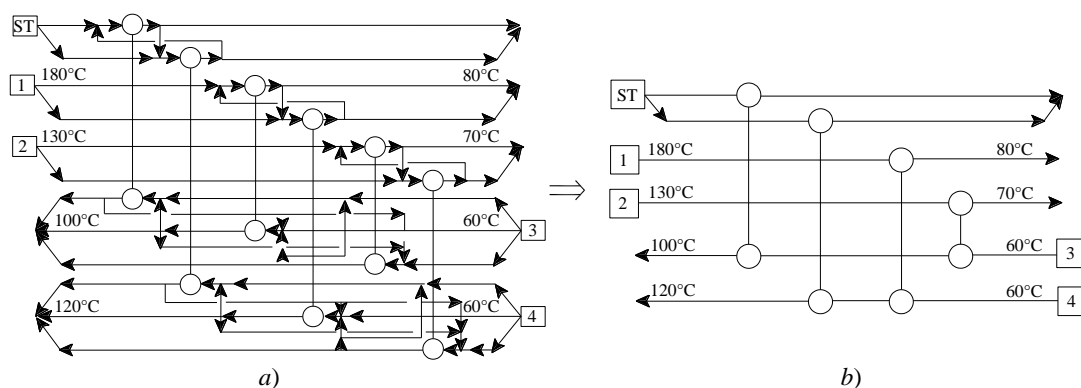
Nakon što se odaberu sparivanja struja oko *pincha* koja zadovoljavaju kriterij o minimalnom korištenju pomoćnog sustava, dizajn treba nastaviti u smjeru minimiziranja kapitalnih

troškova, tj. prema minimalnom broju jedinica. To se može postići korištenjem tzv. „tick-off“ heuristike koja proizlazi izravno iz jednadžbe za minimalni broj jedinica, tj.  $U_{\min} = N - 1$ . Ova jednadžba je zadovoljena ako svako sparivanje struja dovede jednu struju do njezine ciljne temperature ili iscrpi struju pomoćnog sustava [41]. U tom slučaju se procesna struja ili struja pomoćnog sustava obilježi i više se ne smatra dijelom preostalog zadatka sinteze mreže.

*Pinch* metoda za sintezu mreže izmjenjivača topline kreira mrežnu strukturu koja se temelji na pretpostavci da niti jedan izmjenjivač topline ne smije imati temperaturnu razliku manju od  $\Delta T_{\min}$  te se tako stvorena struktura može podvrgnuti optimizaciji. Svaka mreža dobivena pomoću opisanih smjernica za dizajn optimalna je s obzirom na svoje energetske potrebe, ali je obično daleko od optimalnog ukupnog troška. Uvođenje petlji u konačnu topologiju uzrokuje porast broja izmjenjivača u mreži, stoga je posljednji korak u sintezi mreže izmjenjivača topline razvoj topologije. Tijekom ove faze, prethodno definirani rigorozni zahtjevi, kao na primjer da sve temperaturne razlike moraju premašiti vrijednost  $\Delta T_{\min}$  i da se zabranjuje prijenos topline kroz *pinch*, obično se ublažuju. Rezultirajuće formulacije za optimizaciju obično su nelinearne i uključuju strukturne odluke, stoga su to problemi koji spadaju u domenu mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja (engl. *Mixed Integer Nonlinear Programming – MINLP*). Za dobivanje linearnih i/ili kontinuiranih formulacija mogu se uvesti različite aproksimacije i pojednostavljenja. Korak u razvoju mreže može biti čak i ručno prekidanje petlji i smanjenje broja izmjenjivača topline. Uklanjanje izmjenjivača topline iz topologije vrši se nauštrb prebacivanja toplinskih opterećenja iz uklonjenih izmjenjivača topline na grijače i hladnjake pomoćnog sustava. Razvoj topologije prestaje kad rezultirajući porast troškova energije premaši predviđenu uštedu u kapitalnim troškovima, što odgovara minimalnom ukupnom trošku [43].

Pristup dizajnu mreže izmjenjivača topline o kojem je do sada bilo riječ zasniva se na stvaranju strukture u kojoj nisu uključene suvišne značajke. Međutim, nakon što je stvorena struktura, neke bi se značajke optimizacijom mogle ukloniti jer su posljedica pretpostavki donesenih tijekom stvaranja početne strukture. Alternativni pristup je stvaranje superstrukture koja namjerno uključuje suvišne značajke i njezino naknadno podvrgavanje optimizaciji radi uklanjanja suvišnih značajki [42]. Iako je Hwa [17] prvi primijenio superstrukturu u sintezi mreže izmjenjivača topline, Floudas i sur. [44] predložili su superstrukturu koja ima ugrađene mrežne konfiguracije koje zadovoljavaju kriterij minimalnih troškova vezanih uz pomoćni sustav i sadrži minimalan broj sparivanja predviđen *transshipment* modelom kojeg su predložili Papoulias i Grossmann [45].





Slika 4. Dizajn mreže izmjenjivača topline nakon optimizacije superstrukture

a) superstruktura za dio mreže izmjenjivača topline b) optimizirani dizajn [42]

Slika 4.(a) prikazuje superstrukturu za dio problema mreže izmjenjivača topline koja uključuje dvije tople struje, dvije hladne struje i paru. Osnovna ideja je optimizirati superstrukturu kako bi se uklonile nepotrebne značajke i smanjili troškovi, što bi moglo dovesti do dizajna prikazanog na slici 4.(b). Iako ovo u načelu izgleda prilično jednostavno, potrebna optimizacija je problem mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja (MINLP). Jedan od načina za izbjegavanje ovog složenog problema optimizacije je pojednostavljivanje superstrukture kako bi se uklonile neke od strukturnih opcija prikazanih na slici 4.(a). To se postiže dijeljenjem svake tople struje na broj grana jednak broju hladnih struja i dijeljenjem svake hladne struje na broj grana jednak broju toplih struja. Na taj se način stvara struktura koja omogućuje da se svaka topla struja spari sa svakom hladnom strujom. Značajna prednost tako pojednostavljene superstrukture očituje se u tome što se svaki izmjenjivač može modelirati linearnom jednačbom ako su početne i ciljne temperature struja fiksne.

Osim *pinch* metodologije (sekvencijalna metoda s elementima heuristike), za sintezu mreže izmjenjivača topline na raspolaganju su i metodologije matematičkog programiranja i stohastičke metodologije optimizacije. Iako se tijekom sinteze mreže *pinch* metodologijom određuju ciljevi za iskorištenje energije, korištenje toplih i hladnih struja pomoćnog sustava, broj izmjenjivača topline i ukupne godišnje troškove mreže što vodi prema specifičnoj topologiji mreže, rezultat ne mora nužno biti dizajn koji uključuje najmanje ukupne godišnje troškove. S druge strane, metodologije matematičkog programiranja za sintezu HEN-a uključuju sekvencijalni i simultani pristup. Međutim, većina ovih metodologija orijentirana je na istovremenu optimizaciju potrošnje energije, površine prijenosa topline, sparivanja i broja

izmjenjivača topline, bez razlaganja problema sinteze na nekoliko potproblema, kao što je to uobičajeno kod *pinch* metode [46], [47], [48]. U tu svrhu koriste se MINLP modeli što u mnogim slučajevima dovodi do postojanja više suboptimalnih rješenja. Pri tome se koriste lokalne optimizacijske tehnike i determinističke globalne optimizacijske tehnike [49], [50] za istodobnu sintezu HEN-a. Ipak, rješenje s lokalnim optimizacijskim tehnikama često daje suboptimalni dizajn, a zbog vrlo zahtjevnog računalnog rada, primjena determinističkih tehnika globalne optimizacije ograničena je na rješavanje problema strukturiranog matematičkog programiranja koji uključuju samo mali broj procesnih struja.

Metodologije temeljene na tehnikama stohastičke optimizacije također se primjenjuju u sintezi HEN-a zbog njihove sposobnosti da se nose s većim problemima, a da ih pri tome ne ograniče nekonveksnosti u modelima. Najosnovniji stohastički algoritmi za optimizaciju jednostavni su za razumijevanje i primjenu [51]. Među tim algoritmima, najjednostavnija stohastička metoda za globalnu optimizaciju je metoda slučajnog pretraživanja [52], koja se sastoji od generiranja niza neovisnih i identično raspoređenih uniformnih točaka u izvedivom području, uz istovremeno praćenje najbolje pronađene točke. Ovaj pristup optimizaciji u sintezi HEN-a primijenili su Pariyani i sur. [53] i Gupta i Ghosh [54]. S druge strane, razvijene su sofisticiranije tehnike stohastičke optimizacije pomoću metaheuristike pomoću kojih se pokušavajući pronaći vrlo kvalitetna ili gotovo optimalna rješenja u razumnom vremenu. Ove tehnike oponašaju različite prilagodljive procese kao na primjer učenje, evoluciju, žarenje i sl. Metaheuristika uključuje genetske algoritme (engl. *genetic algorithm*) [55], [56], simulirano žarenje (engl. *simulated annealing*) [57], optimizaciju roja čestica (engl. *particle swarm optimization*) [58], optimizaciju kolonijom mrava (engl. *ant colony*) [59], diferencijalnu evoluciju (engl. *differential evolution*) [60], traženje harmonije (engl. *harmony search*) [61] i dr. Premda stohastičke metodologije optimizacije za sintezu HEN-a mogu pružiti dobra rješenja u razumnom roku za probleme male i srednje veličine, one ne jamče globalnu optimalnost.

Iako je *pinch* tehnologija uvedena kao alat za integraciju topline, s vremenom se razvijala te je proširena na upravljanje drugim pojedinačnim resursima kao i na njihove kombinacije. Dobar primjer za to je minimiziranje otpadnih voda u procesnoj industriji primjenom tzv. *water pinch* analize [62] koja se temelji na općenitijem problemu sinteze mreže izmjene tvari (engl. *Mass Exchange Network Synthesis – MENS*) kojeg su 1989. godine uveli El-Halwagi i Manousiouthakis [63], odnosno sinteza sustava vodika u rafinerijskim postrojenjima na temelju *pinch* analize (engl. *hydrogen pinch*) čiji je osnovni cilj minimiziranje potrošnje

vodika koji se sve više koristi u postupku hidrokrekiranja i hidrodosulfurizacije [64]. Još jedno proširenje *pinch* koncepta bila je *pinch* analiza kisika (engl. *oxygen pinch analysis*) koju su 1999. godine prikazali Zhelev i Ntlhakana [65]. Ideja je bila minimizirati potrošnju energije za transport kisika (agitacija, miješanje, aeracija i dr.) koji je potreban za biorazgradnju organskih tvari u otpadnim vodama u postupku aerobne digestije. Iskoristivši prednost klasičnog *pinch* koncepta koja se očituje u jednostavnoj i atraktivnoj grafičkoj analizi, na dijagramu su prikazali recipročne vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK) u ovisnosti o recipročnim vrijednostima brzine razrjeđenja ( $D$ ) u skladu s Monodovim modelom biorazgradnje [66]. Na temelju provedene analize i sparivanja linije opskrbe kisikom (engl. *oxygen supply line*) s kompozitnom krivuljom (konstruiranom na temelju podataka iz tokova otpadnih voda) tako da se dodiruju u *pinch* točki, moguće je dobiti podatke o brzini rasta mikroorganizama, topljivosti kisika, retencijskom vremenu i utrošku energije za aeraciju [67]. Povećana zabrinutost javnosti zbog oskudnih vodnih resursa, zajedno sa strogim propisima o ispuštanju otpadnih voda, rezultiralo je velikim brojem znanstvenih publikacija objavljenih u posljednjih dvadesetak godina među kojima se posebno ističu tri značajna pregledna rada u kojima se na sustavan način pristupa problemu sinteze mreže tokova vode (engl. *water network synthesis*) na temelju *pinch* analize [68], [69], [70]. Pregled postupaka za projektiranje i nadogradnju mreže tokova vode u rafinerijskim postrojenjima dao je Bagajewicz [68] te je problem razložio na dizajn dva međusobno povezana podsustava – problem raspodjele svježe vode i otpadne vode koja se može ponovno upotrijebiti (engl. *wastewater reuse*) i problem pročišćavanja otpadnih voda. Raspravljajući o konceptu nultog ispuštanja otpadnih voda (engl. *zero liquid discharge*) kao gorućeg izazova za akademsku zajednicu i industriju, istaknuo je nekoliko mogućih pristupa u rješavanju ove problematike koji se temelje na sinergijskoj kombinaciji konceptualnog pristupa (*water pinch* analiza) i matematičkog programiranja. Foo u svom preglednom radu [69] stavlja u središte pozornosti *water pinch* analizu koja se u odnosu na do tada uobičajeni pristup utemeljen na prijenosu tvari (onečišćenja kao što su ukupne organske tvari, ukupne suspendirane tvari, otopljene soli i dr.) iz procesnog toka u tok vode (engl. *fixed load problem*) usmjerava prema protoku kao glavnom ograničenju u sintezi mreže tokova vode. Tipična karakteristika ovakvih modela (engl. *fixed flow rate problem*) ogleda se u činjenici da ulazni i izlazni protoci u procesima koji koriste vodu ne moraju biti jednoliki, što se potpuno razlikuje od problema usmjerenih na prijenos tvari iz procesnog toka u tok vode. Povrh toga, u radu su detaljno prikazane različite tehnike ciljanja protoka razvijene za vodu koja se može ponovno upotrijebiti bez prethodnog pročišćavanja (engl. *water reuse*), recikliranu vodu kao i za pročišćavanje otpadnih voda,

zajedno s tehnikama mrežnog dizajna kojima se postižu utvrđeni ciljevi. Jezowski [70] dao je pregled metoda za sintezu mreže tokova vode s anotiranom bibliografijom, pri čemu je slijedio format preglednog rada vezanog za sintezu mreže izmjenjivača topline, autori kojeg su Furman i Sahinidis [7]. Ovaj pregledni rad ograničen je na radove koji su objavljeni na engleskome jeziku i obuhvaća razdoblje od 1980. godine, kada je objavljen pionirski rad Takame i sur. [71] koji su prvi primijenili koncept superstrukture na mreže tokova vode, do otprilike sredine 2009. godine. Klasifikacije i neke statistike za ilustraciju trendova u literaturi dane su nakon anotirane bibliografije. One pokazuju neprekidni rast objavljenih znanstvenih radova na ovu temu u kojem se posebno ističe 2007. godina kada je ostvaren najveći broj objavljenih radova. Analiza otkriva diversifikaciju u istraživanju – standardne formulacije ukupne mreže tokova vode (engl. *total water network – TWN*), mreže koja koristi vodu (engl. *water-using network – WUN*) i mreže za pročišćavanje otpadnih voda (engl. *wastewater treatment network – WWTN*) nedavno su se počele širiti i ugrađivati šaržne operacije [72], istodobnu integraciju topline i vode [73], [74], [75] te nesigurne podatke (engl. *uncertain data*) [76], [77] i integracije između postrojenja (engl. *interplant integration*) s ciljem postizanja veće uštede vode u odnosu na uobičajeno postupanje kod kojeg se očuvanje vode provodi zasebno u pojedinim tvrtkama [78], [79].

Pred kraj prošlog stoljeća zanimanje za *pinch* analizu počelo je opadati najvjerojatnije zbog činjenice da se analiza dugo vremena bavila upravljanjem jednim resursom. Očekivan iskorak bio je prema razvoju alata za upravljanje kombiniranim resursima [67]. To je dovelo do formuliranja vremenski ovisne integracije [80], [81], sinteze industrijskih pomoćnih sustava (engl. *industrial utility system*) s niskim emisijama stakleničkih plinova [82] i pristupa koji uključuju kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije (kogeneracija) [83], [84], [85]. Puigjaner [83] predložio je novu metodologiju koja se temelji na kombinaciji *pinch* analize i eksergijske analize za kombinirane sustave koji proizvode toplinsku i električnu energiju (engl. *Combined Heat and Power – CHP*), pri čemu u središte pozornosti stavlja ekonomske i ekološke koristi ovakvog sustavnog pristupa. Predložena metodologija obuhvaća odgovarajuće alate za fino podešavanje i optimizaciju CHP sustava u kontinuiranim i šaržnim proizvodnim shemama. Axelsson i sur. [84] razvili su metodologiju koja omogućuje identifikaciju poboljšane izmjene topline i različitih tehnika zagrijavanja (kotao i kogeneracija) s raznim vrstama goriva koja daje troškovno optimalno rješenje za dano ograničenje emisije stakleničkih plinova. Nove vrste kompozitnih krivulja utemeljene na *pinch* tehnologiji primijenjene su kao alat za procjenu mogućnosti integracije kogeneracije i kompromisa između poboljšane izmjene topline i kogeneracije. El-Halwagi i sur. [85] uveli su

sustavni postupak za istodobno energetska iskorištavanje otpada, toplinsko upravljanje procesom i kogeneraciju energije. Toplinsko upravljanje procesom optimizirali su pomoću alata za integraciju topline kao što su matematičko programiranje, *pinch* analiza i velike kompozitne krivulje (engl. *Grand Composite Curve – GCC*), a integracija tvari (engl. *mass integration*) provedena je tehnikama koje uključuju *pinch* analizu materijalne oporabe (engl. *material recovery pinch analysis*) [86] radi izbjegavanja korištenja otpadnih tvari kao goriva ili kao dodatka glavnom gorivu u postupku suspaljivanja kada se mogu izravno reciklirati. Pri tome su analize integracije tvari i topline korištene za utvrđivanje potencijala za proizvodnju i upotrebu pare.

Primjena *pinch* tehnologije napredovala je u smjeru širih područja primjene na tzv. cjelokupna područja (engl. *total site*), gdje je više procesa povezano zajedničkim središnjim pomoćnim sustavom (engl. *common central utility system*). Značaj ovakvog pristupa u integraciji topline više procesa prepoznat je prije svega u naftnoj i petrokemijskoj industriji gdje postoje klasteri postrojenja i procesa [87]. Proširenje postupaka *pinch* tehnologije s pojedinačnih procesa na koncept „*Total Sites*“ prvi su predložili Dhole i Linnhoff [88]. *Total site* koncept za integraciju topline usredotočuje se na korištenje središnjeg pomoćnog sustava kao mjesta na kojem se izmjenjuju viškovi i manjkovi pare iz postrojenja povezanih u klaster. U skladu s time, procesi s viškovima pare čine dio opskrbe parom procesima kojima para nedostaje. Preostali deficit topline zatim se namiruje toplinom dobivenom iz goriva, nudeći potencijal za maksimiziranje učinkovitosti kogeneracije. Zahtjevi za grijanjem i hlađenjem ovih procesa prikazuju se njihovim odgovarajućim velikim kompozitnim krivuljama (*GCC*) – one predstavljaju zahtjeve za grijanjem i hlađenjem procesa koji preostaju nakon iskorištenja topline unutar procesa. Ove krivulje prikazuju preostalu toplinu u ovisnosti o temperaturi nakon što je došlo do izmjene topline između procesnih toplih struja i procesnih hladnih struja, uzimajući u obzir odgovarajući  $\Delta T_{\min}$  za izmjenu topline između toplih i hladnih struja. Temperaturna ljestvica na velikoj kompozitnoj krivulji iskazuje se u smislu pomaknute temperature  $T^*$ . Pomaknuta skala temperature nastaje pomicanjem početnih i ciljnih temperatura toplih struja prema dolje (na niže vrijednosti) za  $0,5 \Delta T_{\min}$  i pomicanjem početnih i ciljnih temperatura hladnih struja prema gore (na više vrijednosti) za  $0,5 \Delta T_{\min}$ , čime se ugrađuje u krivulju izvediva izmjena topline (pri odabranoj vrijednosti  $\Delta T_{\min}$ ) u izmjenjivačima topline. *Pinch* položaj također se lako vidi u prikazu velike kompozitne krivulje. Pored toga, također su lako uočljivi ukupni zahtjevi za dodatnim grijanjem ( $Q_{H\min}$ ) i hlađenjem ( $Q_{C\min}$ ) koje moraju osigurati vanjski izvori grijanja i hlađenja [89]. Cjelokupni

postupak za postizanje ciljeva povrata topline na cijelom području temelji se na toplinskim profilima za cjelokupno područje tzv. *Total Site Profiles (TSPs)*. Za izgradnju profila potrebni su podaci u obliku toplinskih izvora i ponora i specifikacije elemenata koji čine pomoćni sustav – vrste i temperature. Dobivanje podataka za specifikacije toplinskih izvora i ponora naziva se ekstrakcija podataka za *total site* [90]. Iz ovih profila proizlazi *total site pinch* kao i potrebe za dodatnim grijanjem i hlađenjem. Klemeš i sur. [91] ostvarili su daljnji napredak u ovom području dodavanjem ciljeva za kogeneraciju energije, pri čemu su primjenom ove metodologije postigli uštedu u gorivu do 20% i poboljšanje razina emisija od najmanje 50% u usporedbi s rezultatima postignutima primjenom metodologije na pojedinačne procese. Njihova metodologija uzela je također u obzir specifičnosti polukontinuiranih i šaržnih operacija, kao i mogućnosti koje nudi višeciljna optimizacija strategije dizajna za tzv. *total site*. U radu je opisan razvoj alata nazvanog “*Site Utility Grand Composite Curve (SUGCC)*” – područje obuhvaćeno ovom krivuljom proporcionalno je kogeneracijskom potencijalu cjelokupnog parnog sustava. Povrh toga, definirali su jednostavan koeficijent proporcionalnosti, čija se vrijednost obično procjenjuje za svako industrijsko mjesto zasebno. Ovaj model ciljanja kogeneracije naziva se „*T-H model*“, jer se temelji na toplinskim tokovima kroz parni sustav. Korištenje SUGCC-a omogućilo je Klemešu i sur. [91] da postave termodinamičke ciljeve za kogeneraciju zajedno sa ciljevima za povrat topline koji bi trebali minimizirati troškove pomoćnog sustava.

Brojni autori proširili su metodologiju ciljanja *total site*. Perry i sur. [92] upotrijebili su *total site* ciljanje koristeći procese s različitim vrijednostima  $\Delta T_{\min}$  za predstavljanje toplinskih izvora i ponora za integraciju malih kemijskih procesa s bolničkim kompleksom, obiteljskim kućama i uredskim kompleksima. U radu se također ispitala mogućnost integriranja obnovljivih izvora energije radi smanjenja emisija ugljika. Matsuda i sur. [93] primijenili su *total site* analizu na industrijskom području Kashima u Japanu, koje se sastoji od 31 mjesta/područja koje, između ostaloga, uključuje petrokemijsku industriju, rafineriju i elektroenergetsku tvrtku. Cjelokupno područje podijeljeno je na blok A (17 mjesta) i blok B (14 mjesta). Na području postoje dvije združene termoelektrane koje opskrbljuju toplinom i električnom energijom sva mjesta u oba bloka, stoga pojedinačna mjesta nemaju nijedan kotao kao ni plinske turbine. Za razmatranje energetske integracije na cijelom području korištene su tzv. *R-curve* i *Site Source –Sink Profile (SSSP)* analize. *R-curve* analiza korištena je za analiziranje pomoćnog sustava u tadašnjim uvjetima na temelju metode koju su predložili Kimura i Zhu [94], dok je SSSP analiza korištena za procjenu stvaranja projekata dijeljenja topline. Na temelju *R-curve* analize postoji ogroman potencijal uštede energije od

$24,7 \times 10^6$  GJ/god, odnosno  $4 \times 10^6$  GJ/god na temelju SSSP analize. Hackl i sur. [95] također su primijenili *total site* analizu (TSA) na klasteru od pet kemijskih tvrtki koje proizvode razne proizvode, uključujući polietilen, polivinilklorid, amine, etilen, kisik, dušik i plastifikatore, s različitim zahtjevima za grijanjem i hlađenjem. U radu je pokazana prednost TSA kao alata za pronalaženje rješenja za poboljšanu potrošnju energije izmjenom topline preko pomoćnog sustava na razini cjelokupnog područja. Identificirano je nekoliko mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti kemijskog klastera koje mogu uštedjeti do 122 MW trenutne vanjske potražnje. Boldyryev i sur. [96] prikazali su metodologiju za procjenu minimalnih troškova za naknadnu ugradnju i preuređivanje sustava za povrat topline na cjelokupnom području (*total site*) koja uključuje energiju i investicije. Korištena metodologija, prethodno opisana u radu Boldyryeva i sur. [97], daje izračun minimalnih kapitalnih ulaganja tijekom integracije topline industrijskog mjesta i temelji se na analizi uravnoteženih toplinskih profila za cjelokupno područje (TSP) te uključuje postupak za izračunavanje površine prijenosa topline. Prikazana analiza slučaja upućuje na značajan potencijal za uštedu energije na cjelokupnom području – korištenjem viška topline omogućuje se smanjena upotreba primarne energije i doprinosi ublažavanju emisija CO<sub>2</sub>. Iskorištenje topline povećalo se na 1,94 MW, ukupni zahtjevi za grijanjem smanjeni su na 37,3%, a zahtjevi za hlađenjem na 39,6%. Procijenjeni kapitalni troškovi projekta adaptacije zahtijevaju 777474 EUR, a vrijeme povrata je 11,96 mjeseci.

Pored primjene u industrijskim kompleksima, *total site* metodologija primjenjuje se vrlo široko u dugim okruženjima. Boldyryev i Varbanov [98] pokazali su postojanje značajnog potencijala za uštedu energije u procesu i na cjelokupnom području proizvodnje broma i bromida poboljšanjem rekuperacije topline pri čemu se zahtjevi za grijanjem smanjuju za 57%, a zahtjevi za hlađenjem za 97% primjenom tri projekta nadogradnje. Rad Axelssona i sur. [99] nastao u sklopu švedskog nacionalnog istraživačkog programa „Future Resource-Adapted Pulp Mill“ (FRAM) bila je jedna od prvih industrijskih primjena ove metodologije u industriji celuloze i papira. Walmsley i sur. [100] predstavili su ultra niskoenergetski dizajn postrojenja za mlijeko u prahu pomoću *total site* metodologije i procijenili da se nakon uvođenja sedam značajnih promjena (kao npr. predkoncentracija mlijeka na 30% upotrebom reverzne osmoze, recikliranje zraka u ventilacijskom sustavu zgrade i dr.) smanjuje potrošnja toplinske energije za 51,5%, električne energije za 19%, a emisije za 48,6% u usporedbi s modernim postrojenjem za mlijeko u prahu.

S obzirom na to da porast potrošnje energije nije samo povezan s potrošnjom u industriji, već je u velikoj mjeri povezan s potrošnjom energije u domaćem sektoru (kućni, poslovni i društveni prostori), Perry i sur. [92] predložili su koncept LIES (engl. *Locally Integrated*

*Energy Sector*), sličan konceptu *total site*, za analizu zahtjeva za grijanjem i hlađenjem na proširenom geografskom području. Ova metoda osigurava temelj za cjelokupni dizajn lokalno integriranih energetske sektora (LIES) koji uključuje i toplinsku i električnu energiju. U ovom slučaju, zahtjevi za grijanjem/hlađenjem i električnom energijom u jedinicama (npr. stanovi, uredi, bolnice ili škole) mogu se lokalno zadovoljiti obnovljivim izvorima energije kao što su vjetar, fotonaponske solarne ćelije ili dizalice topline, kao i nekim viškom topline i energije dostupne iz lokalne industrije. Lee i sur. [101] integrirali su LIES i PoPA (engl. *Power Pinch Analysis*) metodologije radi optimizacije sustava toplinske i električne energije lokalnog područja. Tehnologije skladištenja i pretvorbe energije mogu dodatno poboljšati integraciju energije u lokalnom području. Zahtjevi za toplinom ispunjavaju se striktnim redoslijedom – maksimiziranjem toplinske energije dobivene iz obnovljivih izvora, zatim uskladištene toplinske energije, a na kraju preostali zahtjevi pokrivaju se stalno raspoloživim pomoćnim sustavima [102]. PoPA je još jedno proširenje koncepta *total site* integracije topline (engl. *Total Site Heat Integration – TSHI*), uvedeno radi optimizacije decentraliziranog sustava upravljanja energijom procesnog postrojenja s obzirom na kolebanja u potražnji i opskrbi energijom [101], a oslanja se na sustav baterija za skladištenje energije. Analiza slučaja pokazala je da sustav s najnižom cijenom energije zahtijeva sustave za pohranu toplinske energije, kogeneraciju energije iz otpadne topline (višak topline ispod *total site pincha*), *power pinch* analizu (PoPA), sustav baterija za skladištenje i mrežu za opskrbu električnom energijom. Rezultati analize slučaja pokazuju da su ukupni troškovi energije optimiziranog sustava za 52% niži od osnovnog slučaja bez integracije. Međutim, u ovom energetskom sustavu utvrđeno je da bi porast energetske učinkovitosti za sustav pare (toplinske energije) mogao dovesti do niže ukupne energetske učinkovitosti i viših ukupnih operativnih troškova. Ta se situacija može dogoditi kada je na raspolaganju manja količina otpadne topline. Yong i sur. [103] razvili su novi okvir za optimizaciju trigeneracijskih sustava (engl. *Combined Cooling, Heating and Power – CCHP*). Sustav toplinske, rashladne i električne energije integriran je u LIES pomoću koncepta TSHI i PoPA s ciljem povećanja energetske učinkovitosti, dok se povrat energije obuhvatio metodom TSL (engl. *time slide*) koja je poslužila za upravljanje intermitentnošću procesne struje. Rezultati analize slučaja pokazuju stopostotno smanjenje potrebe za vodenom parom, rashladnom vodom i električnom energijom te se pokazalo da je sustav uspio proizvesti više električne energije nego što je bilo potrebno. Integracija trigeneracijskog i kogeneracijskog sustava u LIES pruža novi okvir za postizanje minimalnih ukupnih zahtjeva za energijom (hlađenje, toplinska i električna energija). Skladištenje energije u sustavu LIES također doprinose maksimiziranju povrata

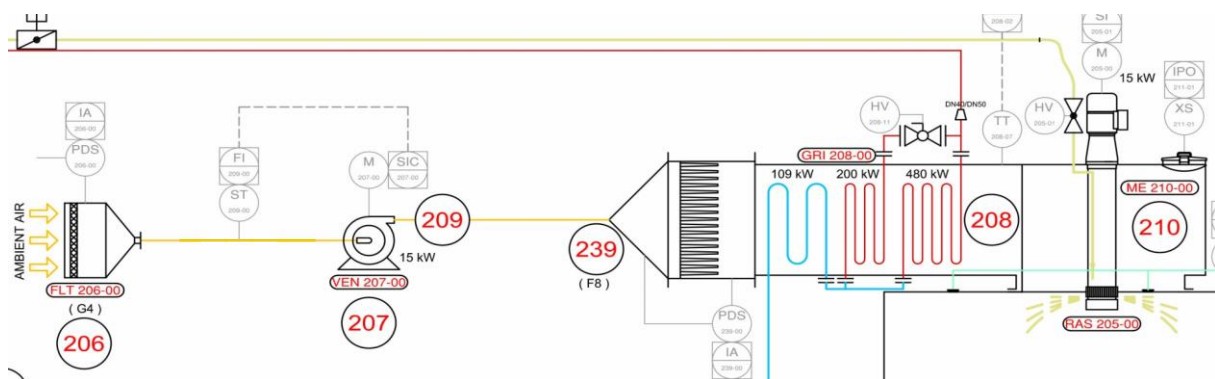


toplinske ili el. energije u sustavu. Authin i sur. [104] predstavili su novu metodologiju za integraciju kogeneracijskog postrojenja s plinsko-turbinskim sustavom u sustavu LIES s varijabilnom opskrbom i potražnjom te skladištima energije za toplinske i elektroenergetske sustave. Predložena metodologija imala je za cilj maksimizirati povrat energije između procesa tijekom vremena, istovremeno smanjujući ukupnu potrošnju energije. Hipotetička analiza slučaja sastoji se od više procesa industrijskih postrojenja, stambenih naselja, poslovnih zgrada i zgrada namijenjenih za društveno korisni rad. Kako bi se proučio slijed optimizacije toplinske i električne energije putem njihove integracije, analiza slučaja provedena je na temelju tri scenarija. Prvi scenarij je osnovni, referentni slučaj bez kogeneracije s plinskom turbinom i bez sustava za pohranu energije. Drugi scenarij uključuje plinsku turbinu i kogeneriranu opskrbu električnom energijom bez pohrane toplinske energije i s baterijom za skladištenje, dok treći scenarij obuhvaća plinsku turbinu i kogeneriranu opskrbu toplinskom energijom uz skladištenje toplinske i električne energije. Veću godišnju uštedu ukupnih troškova (203.397 USD) omogućio je slijed optimizacije opisan trećim scenarijem u usporedbi s godišnjom uštedom od 34.267 USD za slijed optimizacije naveden u drugom scenariju.

Sinteza HEN-a tradicionalno se izvodi bez da se uzima u obzir detaljna konstrukcijska izvedba izmjenjivača topline [105]. S druge strane, uvođenje pretpostavki za pojednostavljenje problema poput konstantnih koeficijenta prolaza topline kao i zanemarivanje negativnog utjecaja nečistoća na izmjenjivačkim površinama na prienos topline i pad tlaka, može dovesti do mreže koja nije optimalna i čiji se rezultati sinteze ne mogu izravno primijeniti na industrijske uvjete. Izmjenjivači topline najvažniji su dio HEN-a, stoga u sintezi mreže detaljno poznavanje njihovog dizajna može rezultate optimizacije učiniti prikladnijima za industriju [106]. Povrh toga, važna je i učinkovitost samog izmjenjivača topline koja se može analizirati i po drugom stavku termodinamike pri čemu je generirana entropija mjera veličine prisutnih nepovratnosti. Mnogo je radova pisano na temu entropijske produkcije u pojedinačnim izmjenjivačima topline, kao što je prikazano u [107] i [108] gdje se izračunava entropijska produkcija u jednom izmjenjivaču topline tipa cijevi u plaštu ili u [109] u kojem je prikazana entropijska analiza jednog zrakom hlađenog rekuperatora. Zanimljiva entropijska analiza tri različita izmjenjivača topline koji kao radni medij koriste nanofluid prikazana je u [110]. Također je zamjetan broj znanstvenih radova u kojima su optimalni parametri rada izmjenjivača topline određeni prema kriteriju minimalne entropijske produkcije [111], [112], [113]. Autori u [114] predlažu napredni pristup minimiziranja entropijske produkcije s ciljem projektiranja optimalnog izmjenjivača topline. Optimizaciju

jednog križnog pločastog izmjenjivača topline sa svrhom minimiziranja entropijske produkcije opisali su Babaelahi i sur. [115]. Entropijska produkcija u izmjenjivaču topline posljedica je prijenosa topline pri konačnim temperaturnim razlikama između struja i pada tlaka u samom izmjenjivaču, tako da je konačno optimalno rješenje dobiveno korištenjem Pareto fronte. Termodinamički optimalni parametri rada dizalice topline sa zemljom kao toplinskim spremnikom određeni su također metodom minimiziranja entropijske produkcije u radu [116].

## 1.2. Motivacija



Slika 5. Zagrijavanje zraka u izmjenjivačima topline kao dio linije za proizvodnju mlijeka u prahu u sušionici

Slika 5 prikazuje proces zagrijavanja zraka u izmjenjivačima topline pomoću tople vode i ogrjevnice vodene pare kao dio linije za proizvodnju mlijeka u prahu u sušionici. Novom zahtjevu za povećanjem proizvodnje mlijeka u prahu tadašnje postrojenje zbog nedovoljnog kapaciteta nije moglo odgovoriti te je bilo potrebno nadograditi postojeće postrojenje (engl. *retrofitting*). To se odnosilo i na izmjenjivače topline u proizvodnom procesu. U postupku nadogradnje postojeći izmjenjivači topline zamijenjeni su novima što je rezultiralo povećanom investicijom. Načelno, rješenje problema se moglo tražiti i promjenom ulaznih radnih parametara tople vode i ogrjevnice vodene pare, kako bi se s postojećim izmjenjivačkim površinama udovoljilo zahtjevu za povećanim toplinskim tokom. Postavlja se pitanje je li moguće za tako definiranu ukupnu izmjenjivačku površinu, dovođenjem dostupnih procesnih struja iz postrojenja na određeno mjesto izmjenjivačke površine ostvariti, ne samo povećani, već i moguće maksimalni toplinski tok. U okviru ovog doktorskog rada upravo se želi dati odgovor na to pitanje, tj. da se za zadanu ukupnu površinu izmjenjivača topline pronade optimalno mjesto priključka dodatne struje, određenog protoka i temperature, iz dostupne

mreže izmjenjivača topline kako bi se ispunio zahtjev maksimalnog toplinskog toka kao prvi cilj. Kako je evidentno da režim rada umreženog izmjenjivača rezultira i povećanom entropijskom produkcijom, tada se kao drugi cilj postavlja iznalaženje režima rada umreženog izmjenjivača topline pri kojem se javlja neželjeni maksimalni entropijski prirast.

### 1.3. Cilj i hipoteza istraživanja

Istraživanje se temelji na sljedećim hipotezama: maksimalni toplinski tok i maksimalno generiranu entropiju moguće je, kao lokalne ekstreme, postići ukoliko se ispune kriteriji koji se mogu napisati u eksplicitnom bezdimenzijskom obliku.

Cilj ovog istraživanja jest iznaći te kriterije, koji će u sebi sadržavati zadanu ukupnu površinu izmjenjivača, ulazne temperature slabije i jače struje kao i temperaturu slabije struje koja se preuzima iz mreže izmjenjivača topline. Pri tome se jedan kriterij mora odnositi na cilj maksimalnog toplinskog toka, a drugi kriterij se mora odnositi na zahtjev maksimalne generirane entropije. Formulirat će se vrlo bitna značajka  $M$ , koja predstavlja omjer temperaturne razlike ulazne slabije priključne struje iz mreže izmjenjivača i ulazne jače struje i temperaturne razlike ulazne slabije i ulazne jače struje promatranog (izdvojenog) protusmjernog rekuperatora.

### 1.4. Metodologija i plan istraživanja

U okviru mreže izmjenjivača odabran je jedan protusmjerni izmjenjivač topline zadane (poznate) ukupne izmjenjivačke površine. U tom izmjenjivaču potrebno je, u okviru prvog zahtjeva, ostvariti maksimalni traženi toplinski tok. No, sa zadanim protocima struja, zadanom površinom izmjenjivača te ulaznim temperaturama struja, konstatira se da se taj zahtjev ne može ispuniti. Pod pretpostavkom da se promatrani izmjenjivač nalazi u mreži ostalih izmjenjivača topline, rješenje postavljenog zadatka se nalazi u mogućnosti da se na nekom mjestu promatranog izmjenjivača iz postojeće mreže izmjenjivača topline priključi medij određene temperature. To priključno mjesto mora biti na takvoj poziciji promatranog izmjenjivača da se eventualno ostvari maksimalno izmijenjeni toplinski tok kao prvi cilj, odnosno da se pronađe mjesto priključenja, kojim bi se generirala maksimalna entropija u tom izmjenjivaču, kao drugi postavljeni cilj. Jasno je da će mjesto priključka te struje iz mreže izmjenjivača imati jednu vrijednost za postizanje maksimalnog toplinskog toka, a drugu

vrijednost za postizanje maksimalne entropije. Već iz same kvalitativne analize proizlazi da za oba kriterija mora postojati sasvim decidirano mjesto priključka struje iz mreže izmjenjivača kako bi se za ta dva postavljena cilja dobio lokalni ekstrem - maksimum. Ako se taj priključak postavi blizu onom kraju promatranog izmjenjivača na kojem ulazi jača struja, tada preostaje premalo površine za željeni efekt priključne struje, a ako bi se taj priključak postavio bliže kraju izmjenjivača na kojem ulazi slabija struja, tada bi se izgubio temperaturni efekt te slabije struje. To znači da upravo treba istražiti pravo mjesto priključenja da bi se udovoljilo postavljenim ciljevima. Cilj maksimalnog toplinskog toka je poželjan, dok je ostvarenje cilja maksimalne entropije nepoželjno, budući da bi u takvim uvjetima dotični izmjenjivač radio, shodno drugom zakonu termodinamike, s maksimalnom eksergijskom destrukcijom.

Istraživanje u okviru ovog doktorskog rada je bilo teorijskog i eksperimentalnog karaktera, a provedeno je u četiri faze.

**Prva faza istraživanja** uključuje razvitak algoritma u bezdimenzijskom obliku u svrhu pronalazanja optimalnog mjesta priključka dodatne struje iz raspoložive mreže izmjenjivača topline s ciljem postizanja maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora. Problem je definiran sustavom diferencijalnih jednačbi s pridruženim rubnim uvjetima prije svega za izmijenjeni bezdimenzijski toplinski tok u općenitom obliku. Potom se izdvajaju specijalni slučajevi koji uključuju slučaj kada jača struja mijenja svoje agregatno stanje te slučaj kada obje struje imaju međusobno jednake toplinske kapacitete. Za te slučajeve analitičkim se načinom pronalaze uvjeti postizanja lokalnog maksimuma, tj. postizanje maksimalne vrijednosti toplinskog toka. Za ostale slučajeve, kod kojih je omjer toplinskih kapaciteta struja veći od nula, a manji od jedan, zbog složenosti problema, uvjete ekstrema potrebno je pronaći numeričkim putem. Definirani su kriteriji koji određuju pri kojim uvjetima se lokalni maksimum postiže za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke, pri kojim uvjetima se pojavljuje za neke vrijednosti te iste značajke, te kada se maksimum ne pojavljuje. Matematički model je prikazan za slučaj kad obje slabije struje imaju međusobno jednake toplinske kapacitete, te za slučaj kad su različiti toplinski kapaciteti slabijih struja.

U **drugoj fazi istraživanja** razvijen je algoritam za generiranu entropiju kod umreženog rekuperatora. U modelu je uzeta u obzir samo generirana entropija zbog prijenosa toplinskog toka između struja pri njihovim konačnim temperaturnim razlikama. Zbog kompleksnosti izraza za izračun generirane entropije nije bilo moguće izvesti analitičke kriterije za postizanje lokalnog maksimuma entropije, već je za svaki slučaj potrebno numerički odrediti maksimum izvedene entropijske funkcije. Generirana entropija se

prikazuje i za dva specijalna slučaja, već spomenuta u prvoj fazi istraživanja. U okviru druge faze istraživanja teorijski je postavljen i treći kriterij koji pokazuje omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.

**Treća faza istraživanja** uključuje prikaz rezultata istraživanja u odgovarajućim dijagramima i isti su interpretirani, s posebnim osvrtom na dokaz postavljenih hipoteza u ovoj disertaciji. Za zadanu vrijednost varijable  $M$  prikazani su slučajevi koji udovoljavaju kriteriju u postavljenoj hipotezi za sve radne točke protusmjernog rekuperatora, odnosno za pojedina radna stanja rekuperatora, te su prikazani i interpretirani slučajevi kod kojih niti jedna radna točka rekuperatora neće udovoljiti postavljenoj hipotezi za realizaciju maksimalnog toplinskog toka. Dijagramski su prikazani te interpretirani rezultati bezdimenzijske generirane entropije te omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.

U okviru **četvrte faze istraživanja** osmišljen je i proveden eksperimentalni dio istraživanja s ciljem potvrde izvedenog algoritma za izračun maksimalnog toplinskog toka u umreženom rekuperatoru. Rezultati matematičkog modela uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima kojima su pridružene izračunate sastavljene standardne mjerne nesigurnosti.

## 1.5. Struktura doktorskog rada

U prvom poglavlju rada dan je uvod u područje optimizacije mreža izmjenjivača topline i pregled dosadašnjih istraživanja. Potom je pojašnjena motivacija za energijsku i entropijsku analizu umreženog izmjenjivača topline. Postavljene su hipoteze i cilj istraživanja te je razrađena metodologija i plan istraživanja.

U drugom poglavlju dan je matematički model za razvoj kriterija maksimalnog toplinskog toka, maksimalne generirane entropije i omjera maksimalnog toplinskog toka i generirane entropije.

U trećem poglavlju su dijagramski prikazani i interpretirani rezultati proračuna. Oni obuhvaćaju slučajeve koji udovoljavaju kriteriju maksimalnog toplinskog toka u umreženom rekuperatoru za sve radne točke, odnosno za pojedina radna stanja rekuperatora, te su prikazani rezultati za one radne točke rekuperatora koji ne udovoljavaju postavljenom zahtjevu za realizaciju maksimalnog toplinskog toka. Također, dani su rezultati za odabrane slučajeve generirane entropije te omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.

U četvrtom poglavlju opisan je eksperimentalni dio istraživanja s ciljem potvrde matematičkog modela glede postizanja maksimalnog toplinskog toka. Opisana je mjerna linija i sam postupak mjerenja i obrade rezultata mjerenja. Dani su rezultati za odabrane mjerne točke te je za svako provedeno mjerenje izračunata sastavljena standardna mjerna nesigurnost. Eksperimentalni rezultati su uspoređeni s teorijskim rezultatima te interpretirani.

U petom poglavlju dana je sažeta diskusija provedene analize i zaključak, sažeti su ostvareni znanstveni doprinosi te definirani mogući smjerovi nastavka istraživanja.

## 2. MATEMATIČKI OPIS PROBLEMA

Razrada ovog matematičkog modela polazi od činjenice da je na raspolaganju izmjenjivač topline zadane ukupne površine  $A_{0uk}$  u kojem se želi izmijeniti traženi iznos toplinskog toka, raspolažući pri tome iz dostupne mreže izmjenjivača masenim protocima struja A i B i njihovim ulaznim temperaturama. Ti ulazni parametri su takvi da priključivanjem samo struje A ili struje B na izmjenjivač zadane površine ne bi bilo moguće ostvariti traženi toplinski tok. Postavlja se pitanje može li se istovremenim djelovanjem i struje A i struje B na zadanoj ukupnoj izmjenjivačkoj površini moći ostvariti traženi iznos izmijenjenog toplinskog toka. To znači da takvo istovremeno djelovanje jedne i druge struje *a priori* ne omogućava veći izmijenjeni toplinski tok negoli u slučaju kada te struje djeluju pojedinačno. Stoga je u ovom radu potrebno pronaći generalni kriterij koji mora biti ispunjen ne samo da bi došlo do efekta povećavanja toplinskog toka u ovakvim povezanim (umreženim) rekuperatorima, već da bi izmijenjen toplinski tok bio maksimalan. Ispunjenje tog kriterija znači iznalaženje optimalne pozicije (mjesta) priključenja struje A na izmjenjivaču ukupne površine, da se postigne zajedno sa strujom B, maksimalni toplinski tok u jednom umreženom rekuperatoru. Drugim riječima, u okviru ovog matematičkog modela treba iznaći i kriterij egzistiranja maksimalnog toplinskog toka, kao lokalnog ekstrema, koji je po svom iznosu veći od toplinskog toka ostvarenog samo sa strujom A odnosno sa strujom B. Dobiveno se rješenje može primijeniti i za drugu varijantu problema. Naime, ako je definirana geometrija ovakvog složenog (umreženog) rekuperatora u smislu već određene (fiksne) pozicije priključivanja dodatne struje iz mreže izmjenjivača topline, tada kriterij za dobivanje maksimalnog toplinskog toka počiva na izboru struja odgovarajućih temperatura i protoka na rekuperatoru A i rekuperatoru B.

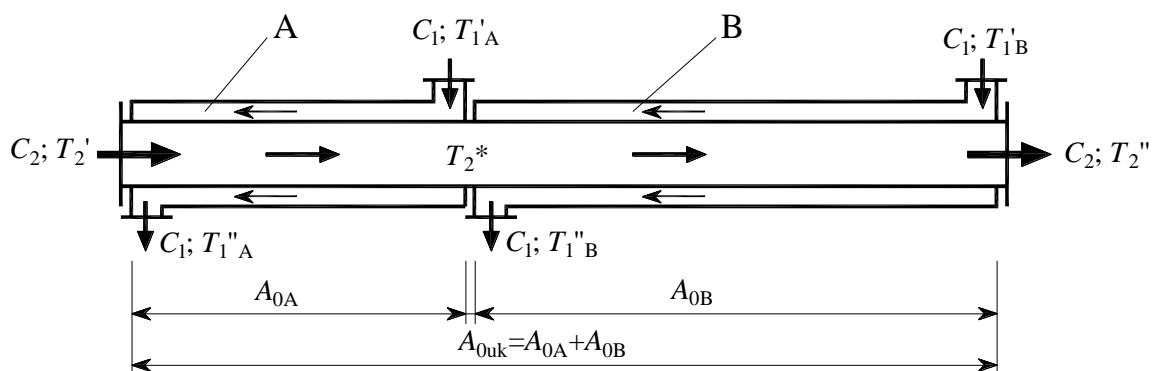
Zbog potpunije analize rada ovakvog umreženog rekuperatora potrebno je uključiti u razmatranje i entropijsku analizu, pri kojoj će sve tri struje činiti adijabatski sustav, a time i izolirani sustav relevantan za dotičnu entropijsku analizu. U takvom modelu generirana entropija odnosno prirast entropije izoliranog sustava imat će svoju izvornost samo u prijenosu toplinskog toka između dotičnih struja pri postojećim, dakle konačnim razlikama njihovih temperatura, što znači da se pad tlaka struja neće uzimati u obzir. Ovime se želi pokazati kakav je prirast entropije izoliranog sustava za ovakav povezani (umreženi) rekuperator, s naglaskom na pronalazak maksimuma generirane entropije kao lokalnog ekstrema. To predstavlja nepoželjan režim rada rekuperatora s aspekta drugog zakona

termodinamike. Naime, poznat je općeniti izraz, koji počiva na Gouy-Stodola teoremu [117],  $\dot{i} = T_{\text{ok}} (\Delta \dot{S})_{\text{iz.sust}}$ , koji povezuje prirast entropije izoliranog sustava i nastalu eksergijsku destrukciju, a koju se često i naziva ireverzibilnošću. Dotični izraz jasno ukazuje na činjenicu da veći prirast entropije izoliranog sustava znači ujedno i veću eksergijsku destrukciju u procesu, što je svakako poželjno izbjegavati. Za očekivati je da će ovakav složeni rekuperator pod određenim nametnutim uvjetima generirati maksimalnu entropiju, ali dotični uvjeti neće korespondirati uvjetima pojavnosti maksimalnog toplinskog toka.

## 2.1. Razvoj kriterija maksimalnog toplinskog toka

U promatranoj analizi zadana je ukupna površina protusmjernog rekuperatora  $A_{0\text{uk}}$ , a time je određena i bezdimenzijska značajka  $\pi_{2\text{uk}}$ . Na raspolaganju su, prema slici 6, i poznate vrijednosti ulazne temperature slabije i jače struje  $T_{1\text{B}}'$  i  $T_2'$ . Također je na raspolaganju i slabija struja temperature  $T_{1\text{A}}'$ , koja se priključuje na određenoj površini  $A_{0\text{A}}$  s ciljem ostvarenja maksimalnog toplinskog toka u tom rekuperatoru. Već kvalitativna analiza problema daje do znanja da mora postojati u danom slučaju optimalna površina izmjenjivača  $A_{\text{Aopt}}$  za koju se postiže maksimalni toplinski tok. Ako bi površina  $A_{0\text{A}}$  bila prevelika, tada ne bi bio optimalno iskorišten temperaturni pad struje B, a ako bi  $A_{0\text{A}}$  bila premala, tada ne bi postojala mogućnost optimalnog korištenja temperaturnog pada struje A.

### 2.1.1. Razvoj algoritma koristeći definicijske veličine $\pi_{1\text{A}} = \varepsilon_{\text{A}}$ i $\pi_{1\text{B}} = \varepsilon_{\text{B}}$



Slika 6. Uz matematički opis problema

Uz pretpostavku da struje A i B, kao slabije struje, imaju iste toplinske kapacitete, izraz za toplinski tok se može zapisati kao



$$\Phi = C_1 (T'_{1A} - T''_{1A} + T'_{1B} - T''_{1B}) \quad (1)$$

Nepoznate temperature  $T''_{1A}$  i  $T''_{1B}$  dobivaju se iz jednadžbi koje definiraju efikasnost rekuperatora A odnosno rekuperatora B

$$\pi_{1A} = \varepsilon_A = \frac{T'_{1A} - T''_{1A}}{T'_{1A} - T_2} \quad (2)$$

$$\pi_{1B} = \varepsilon_B = \frac{T'_{1B} - T''_{1B}}{T'_{1B} - T_2^*} \quad (3)$$

Temperatura  $T_2^*$  proizlazi iz energijske bilance rekuperatora A

$$C_2 (T_2^* - T_2') = C_1 (T'_{1A} - T''_{1A}) \quad (4)$$

Razrješenjem temperatura  $T_2^*$ ,  $T''_{1A}$  i  $T''_{1B}$  iz jednadžbi (2) – (4) te njihovim vraćanjem u jednadžbu (1), dobiva se sljedeći izraz za toplinski tok

$$\Phi = C_1 \left[ \pi_{1B} (T'_{1B} - T_2') - \pi_3 \pi_{1B} \pi_{1A} (T'_{1A} - T_2') + \pi_{1A} (T'_{1A} - T_2') \right] \quad (5)$$

koji je u bezdimenzijskom obliku prikazan sljedećom jednadžbom

$$\frac{\Phi}{C_1 (T'_{1B} - T_2')} = M \pi_{1A} (1 - \pi_3 \pi_{1B}) + \pi_{1B} \quad (6)$$

U jednadžbi (6) bezdimenzijske veličine definirane su na sljedeći način

$$M = \frac{T'_{1A} - T_2'}{T'_{1B} - T_2'} \quad (7)$$

Veličina  $M$  predstavlja temperaturni omjer normiran na zadanu temperaturnu razliku ulaznih struja, struje B i struje 2.

$$\pi_{1A} = \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})} \quad (8)$$

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} \quad (9)$$

$$\pi_{2A} = \frac{kA_{0A}}{C_1} \quad (10)$$

$$\pi_{1B} = \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \quad (11)$$

$$\pi_{2uk} = \frac{kA_{0uk}}{C_1} \quad (12)$$

Jednadžba (6) se može napisati u sljedećem proširenom obliku

$$\begin{aligned} \frac{\Phi}{C_1(T_{1B}' - T_2')} &= M \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})} \left( 1 - \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \right) \\ &\quad + \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \end{aligned} \quad (13)$$

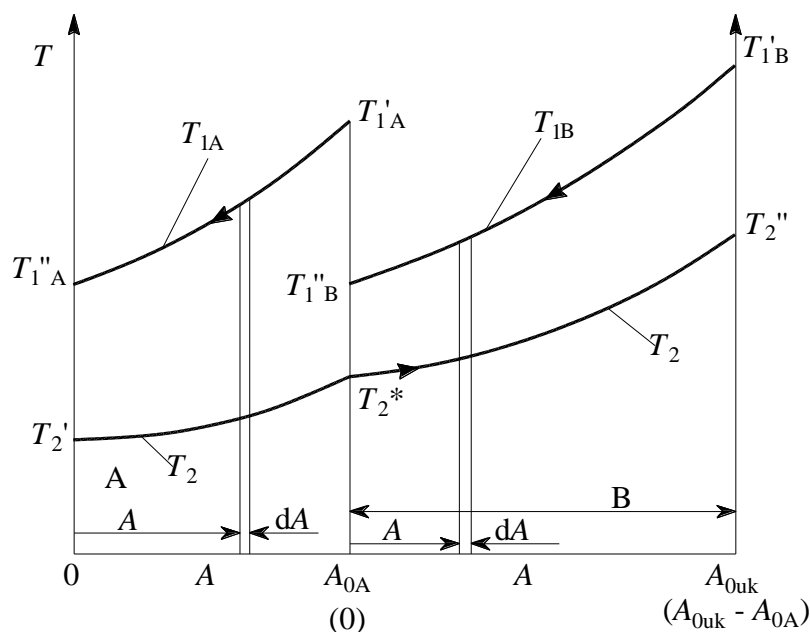
Sumarno, pretpostavke koje su uzete u obzir pri razvoju ovog matematičkog modela su:

- slabije struje A i B su međusobno jednakih toplinskih kapaciteta ( $C_{1A} = C_{1B}$ )
- specifični toplinski kapaciteti su neovisni o temperaturi
- vrijednost bezdimenzijske veličine  $M$  je veća od nule, što znači da su ulazne temperature slabijih struja A i B ili veće ili manje od ulazne temperature jače struje

### 2.1.2. Razvoj algoritma postupkom integracije lokalnog toplinskog toka

Moguće je jednadžbu (13) izvesti i postupkom integracije lokalnog toplinskog toka, shodno slici 7, nad izmjenjivačkim površinama A i B.

Ako se kvalitativno prikažu promjene temperatura struje A i B, kao slabijih struja jednakih toplinskih kapaciteta, te jače struje 2 dobiva se dijagramski prikaz dan slikom 7.



Slika 7. Uz izvod jednadžbe (13)

Shodno slici 7 može se napisati sljedeća jednadžba za toplinski tok uz pretpostavku istog koeficijenta prolaza topline na rekuperatoru A i rekuperatoru B

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = k \int_0^{A_{0A}} (T_{1A} - T_2) dA + k \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} (T_{1B} - T_2) dA \quad (14)$$

Opći izrazi za lokalne temperature  $T_{1A}$ ,  $T_2$  i  $T_{1B}$  mogu se izravno iščitati iz [118].

Varijabla  $A_A$  se kreće u intervalu  $[0, A_{0A}]$ , dok varijabla  $A_B$  u intervalu  $[A_{0A}, A_{0uk}]$ .

$$T_{1A} = B_1 + B_2 \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right) \quad (15)$$

$$T_2 = B_1 + B_2 \pi_3 \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right) \quad (16)$$

$$T_{1B} = B_1^* + B_2^* \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_B\right) \quad (17)$$

$$T_2 = B_1^* + B_2^* \pi_3 \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_B\right) \quad (18)$$

Integracijske konstante  $B_1$  i  $B_2$  u jednadžbama (15) i (16) određene su rubnim uvjetima rekuperatora A

$$A_A = 0; \quad T_2 = T_2' \quad \text{i} \quad A = A_{0A}; \quad T_{1A} = T_{1A}' \quad (19)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (19) u jednadžbu (15) i (16) slijede izrazi za tražene konstante

$$B_1 = T_2' - \frac{(T_{1A}' - T_2')\pi_3}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A}) - \pi_3} \quad (20)$$

$$B_2 = \frac{T_{1A}' - T_2'}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A}) - \pi_3} \quad (21)$$

Rješenje za toplinski tok na rekuperatoru A odredi se ako se jednadžbe (15) i (16) zajedno s jednadžbama (20) i (21) uvrste u prvi integral desne strane jednadžbe (14)

$$\Phi_A = \frac{(T_{1A}' - T_2')(1 - \pi_3)}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_2) - \pi_3} \int_0^{A_{0A}} \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right) dA_A \quad (22a)$$

$$\Phi_A = k \frac{(T_{1A}' - T_2')(1 - \pi_3)}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_2) - \pi_3} \left(-\frac{C_1}{k(\pi_3 - 1)}\right) \left(\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A}) - 1\right) \quad (22b)$$

Množenjem brojnika i nazivnika desne strane gornje jednadžbe sa  $\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A})$  dobiva se konačno rješenje za toplinski tok  $\Phi_A$

$$\Phi_A = C_1 (T'_{1A} - T_2') \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})} \quad (23)$$

Evidentno je, prema jednadžbi (8), da razlomak desne strane gornje jednadžbe predstavlja efikasnost rekuperatora A,  $\pi_{1A}$ , pa se gornja jednadžba može napisati i u obliku

$$\Phi_A = C_1 (T'_{1A} - T_2') \pi_{1A} \quad (24)$$

Rješenje drugog integrala u jednadžbi (14) provodi se sličnim postupkom, s time da su drugačiji rubni uvjeti, a time i konstante  $B_1^*$  i  $B_2^*$ . Rubni uvjeti za ovaj slučaj glase:

$$A_B = A_{0uk}; \quad T_{1B} = T'_{1B} \quad \text{i} \quad A_B = 0; \quad T_2 = T_2^* \quad (25)$$

pri čemu se  $T_2^*$  dobiva ako se u jednadžbu (18) uvrste konstante prema jednadžbama (20) i (21), te uz  $A_A = A_{0A}$

$$T_2^* = T_2' - \frac{(T'_{1A} - T_2')\pi_3}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A}) - \pi_3} + \frac{(T'_{1A} - T_2')\pi_3 \exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A})}{\exp(-(\pi_3 - 1)\pi_{2A}) - \pi_3} \quad (26)$$

Veličinu  $B_2^*$  se dobije uvrštavanjem rubnih uvjeta jednadžbe (25) u jednadžbe (17) i (18)

$$B_2^* = \frac{T'_{1B} - T_2^*}{\exp(-(\pi_3 - 1)(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) - \pi_3} \quad (27)$$

$$\Phi_B = kB_2^* (1 - \pi_3) \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \exp\left(-\frac{k}{C_1} (\pi_3 - 1) A_B\right) dA_B \quad (28a)$$

$$\Phi_B = kB_2^* (1 - \pi_3) \left(-\frac{C_1}{k} (\pi_3 - 1)\right) \left(\exp(-(\pi_3 - 1)(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) - 1\right) \quad (28b)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (27) u jednadžbu (28b) i množenjem brojnika i nazivnika sa  $\exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk}-\pi_{2A}))$ , dobiva se sljedeći oblik jednadžbe za veličinu  $\Phi_B$

$$\Phi_B = C_1 \left( T'_{1B} - T_2' - \pi_3 (T'_{1A} - T_2') \frac{1 - \exp(-(1-\pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1-\pi_3)\pi_{2A})} \right) \frac{1 - \exp(-(1-\pi_2)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \quad (29)$$

Razlomci u gornjoj jednadžbi predstavljaju efikasnosti rekuperatora A i rekuperatora B,  $\pi_{1A}$  i  $\pi_{1B}$ , pa uvrštavajući jednadžbe (29) i (23) u jednadžbu (14), normirajući toplinski tok s produktom  $C_1(T'_{1B} - T_2')$  i koristeći jednadžbu (7), dobiva se konačni bezdimenzijski oblik toplinskog toka

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T_2')} = M \pi_{1A} + \pi_{1B} - \pi_3 M \pi_{1A} \pi_{1B} = M \pi_{1A} (1 - \pi_3 \pi_{1B}) + \pi_{1B} \quad (30)$$

Uvrštavajući jednadžbe (8) i (11) u jednadžbu (30) dobiva se sljedeći bezdimenzijski izraz, koji je identičan izvedenom izrazu u jednadžbi (13)

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T_2')} = M \frac{1 - \exp(-(1-\pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1-\pi_3)\pi_{2A})} \left( 1 - \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \right) + \frac{1 - \exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1-\pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \quad (13)$$

Izraz u jednadžbi (13) pokazuje da je promatrani toplinski tok funkcija sljedećih bezdimenzijskih veličina:  $M$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$ , dakle funkcija je četiri međusobno nezavisne varijable. Jedan od ciljeva ovoga rada je iznalaženje uvjeta da funkcija u jednadžbi (13) postigne maksimum kao lokalni ekstrem, što će se provesti na način da se sve ostale veličine drže konstantnima, a varira se samo varijabla  $\pi_{2A}$ , koja se kreće u intervalu  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$ .

Traženje ekstrema funkcije ostvaruje se prema sljedećem izrazu

$$\frac{d}{d\pi_{2A}} \left( \frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} \right) = 0 \quad (31)$$

No, eksplicitno traženje uvjeta ekstrema, zbog složenosti funkcije u jednadžbi (13), nije moguće, nego je potrebno ili provesti odgovarajući numerički postupak ili je jednostavnije pratiti tijek funkcije u jednadžbi (13) s vrlo malim koracima varijable  $\pi_{2A}$  i iščitavati za koju se njezinu vrijednost postiže maksimum funkcije u jednadžbi (13).

Prije traženja tog ekstrema pokazuje se prikladnim navesti neke od specifičnih vrijednosti jednadžbe (13), kako slijedi.

Za  $\pi_{2A} = 0,0$  jednadžba (13) poprima oblik

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \quad (32)$$

i koji ne ovisi o  $M$  jer izraz u jednadžbi (32) ustvari predstavlja rješenje za klasični protusmjerni rekuperator, u kojem izmjenjuju toplinu struja 2 ulazne temperature  $T'_2$  i struja B ulazne temperature  $T'_{1B}$  [118].

Za drugu krajnju vrijednost veličine  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , izraz u jednadžbi (13) se transformira na

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \quad (33)$$

Kako je veličina  $M$  definirana jednadžbom (7), tada jednadžba (3) pokazuje da se radi u tom slučaju također o klasičnom protusmjernom rekuperatoru, kod kojeg struja 2 ulazne temperature  $T'_2$  i struja 1 ulazne temperature  $T'_{1A}$  izmjenjuju toplinski tok.

Upravo između vrijednosti danih jednadžbama (32) i (33) se nalaze ili ne nalaze, za zadane vrijednosti  $M$  i  $\pi_{2uk}$ , lokalni maksimumi izraza (13). Evidentno je da za  $M = 1,0$ , jednadžbe (32) i (33) daju iste vrijednosti na krajevima intervala  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  te je optimalna vrijednost jednaka

$$\pi_{2Aopt} = \frac{\pi_{2uk}}{2} \quad (34)$$

### 2.1.3. Specijalni slučajevi jednadžbe (13)

Kako je već naglašeno, eksplicitno iznalaženje ekstrema izraza (13) praktički je nemoguće te se nameće zahtjev provedbe takve analize za specijalne slučajeve rekuperatora, koje se svode na dva slučaja:  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 1,0$ .

Slučaj  $\pi_3 = 0,0$  se fizikalno odnosi na situaciju kada jača struja isparava ili kondenzira [118 - 122]. Drugi se slučaj,  $\pi_3 = 1,0$ , odnosi na situaciju u kojoj obje struje imaju jednake toplinske kapacitete pa se takav slučaj u literaturi najčešće spominje kao izbalansirani protusmjerni rekuperator [117].

#### 2.1.3.1. Slučaj kod kojeg je $\pi_3 = 0,0$

Ako se u jednadžbu (13) uvrsti da je  $\pi_3 = 0,0$ , ista se transformira u oblik

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M(1 - \exp(-\pi_{2A})) + 1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) \quad (35)$$

Gornja se jednadžba za  $\pi_{2A} = 0,0$  odnosi na konvencionalni isparivač ili kondenzator kod kojeg je toplinski tok određen jednadžbom

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = 1 - \exp(-\pi_{2uk}) \quad (36a)$$

kao i za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M(1 - \exp(-\pi_{2uk})) \quad (36b)$$



Zanimljivo je ispitati postoji li lokalni ekstrem funkcije (35), uz pretpostavku da se veličina  $\pi_{2uk}$  drži konstantnom, a varira se veličina  $\pi_{2A}$  unutar intervala  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$ . Deriviranjem jednadžbe (35) po  $\pi_{2A}$  i izjednačavanjem s nulom

$$\frac{d}{d\pi_{2A}} \left[ M(1 - \exp(-\pi_{2A})) + (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \right] = 0 \quad (a)$$

$$M \exp(-\pi_{2A}) - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) = 0 \quad (b)$$

dobiva se optimalna vrijednost  $\pi_{2Aopt}$ , za koju jednadžba (35) ima maksimum

$$\pi_{2Aopt} = \frac{1}{2} (\ln M + \pi_{2uk}) \quad (37)$$

Lako je dokazati da za vrijednost danu jednadžbom (37) funkcija (35) ima maksimum. Naime, druga derivacija funkcije (35) ima oblik

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{(d\pi_{2A})^2} \left[ M(1 - \exp(-\pi_{2A})) + (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \right] = \\ = -M \exp(-\pi_{2A}) - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) \end{aligned} \quad (c)$$

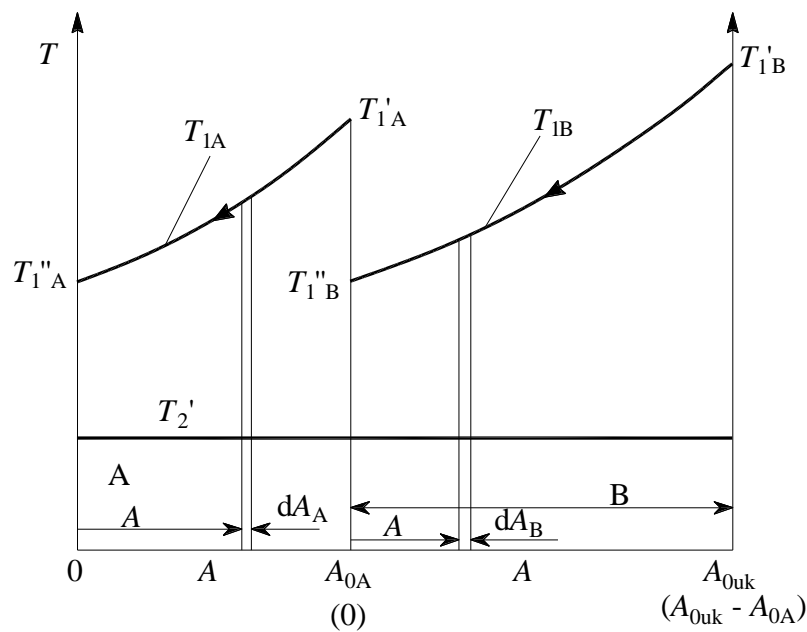
Uvrštavanjem jednadžbe (37) u jednadžbu (c) dobiva se sljedeći izraz

$$\frac{d^2}{(d\pi_{2A})^2} \left( \pi_{2Aopt} = \frac{1}{2} (\ln M + \pi_{2uk}) \right) = -(M + 1) \exp\left(-\frac{1}{2} (\ln M + \pi_{2uk})\right) \quad (d)$$

i čija je vrijednost, za  $M > 0$ , uvijek manja od nule, a što je eksplicitni dokaz da funkcija u jednadžbi (35) u stacionarnoj točki danoj jednadžbom (37) postiže uvijek maksimum kao lokalni ekstrem. Vraćanjem jednadžbe (37) u jednadžbu (35) dolazi se do eksplicitnog izraza za maksimalni toplinski tok

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T_2')} = M + 1 - 2\sqrt{M} \exp\left(-\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) \quad (38)$$

Jednadžbu (35) moguće je izvesti koristeći lokalne promjene temperatura  $T_{1A}$ ,  $T_{1B}$  i  $T_2'$  na primjeru jednog isparivača, u kojem lokalnu promjenu temperatura struja kvalitativno prikazuje dijagram na slici 8.



Slika 8. Uz izvod jednadžbe (35)

Prikazani izmjenjivač (isparivač) zadane ukupne površine podijeljen je na dva izmjenjivača A i B pa se za svaki od njih mogu napisati sljedeće diferencijalne jednadžbe:

- izmjenjivač A

$$k(T_{1A} - T_2')dA_A = C_1dT_{1A} \quad (a)$$

- izmjenjivač B

$$k(T_{1B} - T_2')dA_B = C_1dT_{1B} \quad (b)$$

s pridruženim rubnim uvjetima

$$\text{za } A = A_{0A}; \quad T_{1A} = T'_{1A} \quad (c)$$

$$\text{za } A_B = A_{0uk} - A_{0A}; \quad T_{1B} = T'_{1B} \quad (d)$$

Nakon rješavanja diferencijalne jednadžbe (a) i korištenja rubnog uvjeta prema jednadžbi (c) se dolazi do izraza lokalne temperature struje 1A

$$T_{1A} = T'_2 + (T'_{1A} - T'_2) \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) \quad (e)$$

Analognim se postupkom dolazi do izraza lokalne temperature struje 1B, rješenjem diferencijalne jednadžbe (b) te korištenjem rubnog uvjeta prema jednadžbi (d)

$$T_{1B} = T'_2 + (T'_{1B} - T'_2) \exp\left[\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right] \quad (f)$$

Toplinski se tok može nadalje izraziti sljedećom jednadžbom

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = k \int_0^{A_{0A}} (T_{1A} - T'_2) dA_A + k \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} (T_{1B} - T'_2) dA_B \quad (g)$$

pa uvrštavanjem jednadžbi (e) i (f) u jednadžbu (g) slijedi

$$\Phi = k (T'_{1A} - T'_2) \int_0^{A_{0A}} \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) dA_A + k (T'_{1B} - T'_2) \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \exp\left(\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right) dA_B \quad (h)$$

Po provedenoj integraciji i uvrštavanjem granica integracije gornji izraz prelazi u oblik

$$\Phi = C_1 (T'_{1A} - T'_2) (1 - \exp(-\pi_{2A})) + (T'_{1B} - T'_2) (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \quad (i)$$

Normiranjem dobivenog izraza s produktom  $C_1 (T'_{1B} - T'_2)$  dobiva se konačni izraz

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M(1 - \exp(-\pi_{2A})) + (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \quad (j)$$

koji je identičan jednadžbi (35)!

Jednadžbe (37) i (38) pokazuju da jednadžba (35) ima ekstrem i to maksimum. To znači da se uz te uvjete u isparivaču ili kondenzatoru prenosi maksimalno mogući toplinski tok, a što jest i hipoteza ovog rada. Optimalna vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  se nalazi, ovisno o vrijednosti veličine  $M$ , unutar intervala  $0 \leq \pi_{2Aopt} \leq \pi_{2uk}$ .

Ako se želi postići da je vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  jednaka nuli, tada iz jednadžbe (37) slijedi da je

$$M = \exp(-\pi_{2uk}) \quad (39)$$

s pripadajućom maksimalnom vrijednosti

$$\left( \frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\max, \pi_{2Aopt}=0} = 1 - \exp(-\pi_{2uk}) \quad (40)$$

Ako se želi postići maksimum na kraju intervala,  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}$ , tada je

$$M = \exp(\pi_{2uk}) \quad (41)$$

uz pripadajući maksimum

$$\left( \frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\max, \pi_{2Aopt}=\pi_{2uk}} = \exp(\pi_{2uk}) - 1 \quad (42)$$

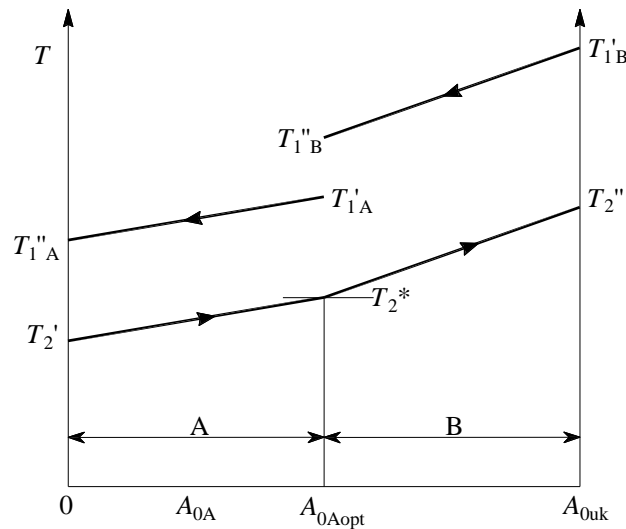
Također se iz jednadžbe (37), za  $M = 1,0$ , vidi da je vrijednost  $\pi_{2Aopt} = \pi_{uk}/2$ , a što je već općenito utvrđeno jednadžbom (34).

2.1.3.2. Slučaj kod kojeg je  $\pi_3 = 1,0$ 

Za  $\pi_3 = 1,0$  jednadžba (13) daje neodređeni oblik  $0/0$ , pa koristeći L'Hospitalovo pravilo, istu se lako prevodi na sljedeći oblik

$$\frac{\Phi}{C_1(T_{1B}' - T_2')} = M \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \left( 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \right) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \quad (43)$$

Jednadžbu (43) moguće je izvesti koristeći se sljedećom slikom 9.



Slika 9. Uz izvod jednadžbe (43)

Kao što se vidi iz slike 9, u slučaju istih toplinskih kapaciteta, tj. uz  $\pi_3 = 1,0$ , promjene temperatura struja slijede linearni zakon pa su to međusobno paralelni pravci u pojedinom rekuperatoru. Evidentno je da se u promatranom slučaju radi i o *konstantnoj* razlici temperatura struja uzduž izmjenjivačke površine, a što i jest suštinski fizikalni razlog da za taj slučaj jednadžba (13) daje neodređeni oblik  $0/0$ .

Za promatrani slučaj može se napisati sljedeći izraz

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = k \int_0^{A_{0A}} (T_{1A} - T_2) dA_A + k \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} (T_{1B} - T_2) dA_B \quad (a)$$

Za rješenje gornjeg integrala potrebno je izraziti funkcijske veze  $T_{1A}(A)$ ,  $T_2(A)$  i  $T_{1B}(A)$ , shodno slici 9

$$T_{1A}(A) = T_{1A}'' + \frac{T_{1A}' - T_{1A}''}{A_{0A}} A_A \quad (b)$$

$$T_2(A) = T_2' + \frac{T_2'' - T_2'}{A_{0A}} A_A \quad (c)$$

Jednadžbe (b) i (c) vrijede za interval  $0 \leq A_A \leq A_{0A}$

$$T_{1B}(A) = T_{1B}'' + \frac{T_{1B}' - T_{1B}''}{A_{0B}} A_B \quad (d)$$

$$T_2(A) = T_2^* + \frac{T_2'' - T_2^*}{A_{0A}} A_A \quad (e)$$

Jednadžbe (d) i (e) vrijede za interval  $0 \leq A_B \leq A_{0B} \rightarrow 0 \leq A_B \leq A_{0uk}$ .

Uvrštavajući jednadžbe (b) – (e) u jednadžbu (a), te koristeći činjenicu postojanja konstantnih temperaturnih razlika, jednadžba (a) prelazi u oblik

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = k(T_{1A}'' - T_2')A_{0A} + k(T_{1B}'' - T_2^*)A_{0B} \quad (f)$$

U gornjoj jednadžbi je potrebno eliminirati veličine  $T_{1A}''$ ,  $T_{1B}''$  i  $T_2^*$ .

Postavljanjem energijske bilance za rekuperator A, slijedi jednakost

$$k(T_{1A}'' - T_2')A_{0A} = C_1(T_{1A}' - T_{1A}'') = \Phi_A \quad (g)$$

iz koje se dobiva

$$T_{1A}'' = \frac{kA_{0A}T_2' + C_1T_{1A}'}{kA_{0A} + C_1} \quad (\text{h})$$

Vraćanjem jednadžbe (h) u prethodnu jednadžbu dobiva se

$$\Phi_A = \frac{kA_{0A}}{kA_{0A} + C_1} C_1 (T_{1A}' - T_2') = \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} C_1 (T_{1A}' - T_2') \quad (\text{i})$$

Za rekuperator B energijska jednadžba ima oblik

$$k(T_{1B}'' - T_2^*)A_{0B} = C_1(T_{1B}' - T_{1B}'') = \Phi_B \quad (\text{j})$$

iz koje slijedi veličina  $T_{1B}''$

$$T_{1B}'' = \frac{kA_{0B}T_2^* + C_1T_{1B}'}{kA_{0B} + C_1} \quad (\text{k})$$

Vraćanjem jednadžbe (k) u (j) dobiva se

$$\Phi_B = \frac{kA_{0B}}{kA_{0B} + C_1} C_1 (T_{1B}' - T_2^*) = \frac{\pi_{2B}}{\pi_{2B} + 1} C_1 (T_{1B}' - T_2^*) \quad (\text{l})$$

Temperaturu  $T_2^*$  dobiva se iz energijske bilance adijabatskog balansirano rekuperatora A

$$T_{1A}' - T_{1A}'' = T_2^* - T_2' \rightarrow T_2^* = T_{1A}' + T_2' - T_{1A}'' \quad (\text{m})$$

Koristeći jednadžbu (h) te zajedno s jednadžbom (m) vraćanjem u jednadžbu (l), jednostavno se dobiva

$$\Phi_B = \frac{\pi_{2B}}{\pi_{2B} + 1} C_1 \left( T_{1B}' - T_2' - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} (T_{1A}' - T_2') \right) \quad (\text{n})$$

Zbrajanjem jednadžbi (i) i (n) i dijeljenjem s  $C_1(T'_{1B} - T'_2)$ , te koristeći jednadžbu (7), slijedi sljedeći izraz

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} M \left( 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \right) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \quad (o)$$

a što i jest, na drugi način, izvedena jednadžba (43)!

U jednadžbama (43) odnosno (o) sadržane su i iskoristivosti topline, odnosno efikasnosti  $\pi_{1A} = \varepsilon_A$  i  $\pi_{1B} = \varepsilon_B$  i to u članovima, gdje je uvršteno da je  $\pi_{2B} = \pi_{2uk} - \pi_{2A}$

$$\pi_{1A} = \varepsilon_A = \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \quad (44a)$$

$$\pi_{1B} = \varepsilon_B = \frac{\pi_{2B}}{\pi_{2B} + 1} = \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \quad (44b)$$

tako da se i jednadžbe (44a) i (44b) mogu napisati kao jednadžba (30) uz  $\pi_3 = 1,0$ .

Ako se u jednadžbu (8) i (11) uvrsti da je  $\pi_3 = 1,0$  tada one daju neodređene oblike 0/0 te se za rješenje tih neodređenih oblika smije primijeniti L'Hospitalovo pravilo, pa je

$$\begin{aligned} \lim_{\pi_3 \rightarrow 1,0} \pi_{1A} &= \lim_{\pi_3 \rightarrow 1,0} \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})} \\ &= \lim_{\pi_3 \rightarrow 1,0} \frac{-\exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A}) \cdot (\pi_{2A})}{-\exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A}) - \pi_3 (\exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A}) (\pi_{2A}))} = \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \end{aligned} \quad (44c)$$

a što i jest upravo jednadžba (44a). Na isti bi se način dokazala i jednadžba (44b).

Za  $\pi_{2A} = 0,0$  jednadžba (43) prelazi u jednadžbu za konvencionalni protusmjerni balansirani rekuperator, koji je opisan u [117], prema jednadžbi



$$\left( \frac{\Phi}{C_1 (T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\pi_{2A}=0,0} = \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk} + 1} \quad (45a)$$

odnosno za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  jednadžba (43) prelazi u oblik

$$\left( \frac{\Phi}{C_1 (T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\pi_{2A}=\pi_{2uk}} = M \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk} + 1} \quad (45b)$$

Za  $M > 0,0$  i  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$  potrebno je ispitati ima li funkcija u jednadžbi (43), lokalni ekstrem. Koristeći uvjet ekstrema jednadžbe (43) dolazi se do izraza za  $\pi_{2Aopt}$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{1 - \sqrt{-M(M\pi_{2uk} + M - 2 - \pi_{2uk})}}{M - 1} \quad (46)$$

Kako je prema matematičkom modelu  $M > 0,0$ , tada iz jednadžbe (46) slijedi nužni dodatni uvjet, koji osigurava činjenicu da rješenje postoji

$$M \leq \frac{\pi_{2uk} + 2}{\pi_{2uk} + 1} \quad (47)$$

Za  $M = 1,0$  jednadžba (46) prelazi u neodređeni oblik  $0/0$ , pa primjenom L'Hospitalova pravila, dotična poprima oblik

$$\pi_{2Aopt} = \lim_{M \rightarrow 1} \frac{1 - \sqrt{-M(M\pi_{2uk} + M - 2 - \pi_{2uk})}}{M - 1} = \lim_{M \rightarrow 1} \left( -\frac{1}{2} \right) \frac{-2M\pi_{2uk} - 2M + 2 + \pi_{2uk}}{\sqrt{-M^2\pi_{2uk} - M^2 + 2M + M\pi_{2uk}}} \quad (48)$$

$$\left( \pi_{2Aopt} \right)_{M=1,0} = \frac{\pi_{2uk}}{2}$$

i taj je rezultat već naglašen jednadžbom (34).

Uvrštavanjem jednadžbe (48) u jednadžbu (43) dobiva se eksplicitni izraz za maksimalni toplinski tok

$$\left( \frac{\Phi}{C_1 (T_{1B}' - T_2')} \right)_{\max, M=1, 0; \frac{\pi_{2uk}}{2}} = \frac{\pi_{2uk} (\pi_{2uk} + 4)}{(\pi_{2uk} + 2)^2} \quad (49)$$

Jednadžbe (39) i (41) daju ujedno i kriterije za koje se neće pojaviti lokalni ekstrem (maksimum) izmijenjenog toplinskog toka za sve vrijednosti  $\pi_3$ , a iz kojih slijedi poveznica između veličina  $M$  i  $\pi_{2uk}$ .

$$0 < M < \exp(-\pi_{2uk}) \quad (50)$$

$$M > \exp(\pi_{2uk}) \quad (51)$$

#### 2.1.4. Općeniti slučajevi $0 < \pi_3 < 1,0$

Za ove općenitije slučajeve nije moguće, zbog složenosti samog algoritma, pronaći lako eksplicitna rješenja za  $\pi_{2Aopt}$ . Međutim, računalnim alatima moguće je pronaći rješenja za slučajeve  $0 < \pi_3 < 1,0$ . Iznalaženje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  vrši se na način da se u jednadžbu (13) uvrste konkretne vrijednosti za  $\pi_3$ , pa se nakon provođenja postupka deriviranja, shodno jednadžbi (31), dobivaju vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ . Varirane su vrijednosti  $\pi_3$  s korakom 0,1, te su dobiveni sljedeći rezultati.

Za  $\pi_3 = 0,1$ , izraz za  $\pi_{2Aopt}$  prikazuje sljedeća jednadžba

$$\pi_{2Aopt} = \frac{10}{9} \ln \left( \frac{3\sqrt{10} \left( M \left( M + 100 \exp\left(\frac{9\pi_{2uk}}{10}\right) - 10M \exp\left(\frac{9\pi_{2uk}}{10}\right) - 1 \right)^{0,5} - 10M + 10 \right)}{10M - 100} \right) \quad (52)$$

$$\pi_3 = 0,2$$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{5}{4} \ln \left( \frac{2\sqrt{5} \left( M \left( M + 25 \exp\left(\frac{4\pi_{2uk}}{5}\right) - 5M \exp\left(\frac{4\pi_{2uk}}{5}\right) - 1 \right)^{0,5} - 5M + 5 \right)}{5M - 25} \right) \quad (53)$$

$$\pi_3 = 0,3$$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{10}{7} \ln \left( \frac{\sqrt{70} \left( M \left( 9M + 100 \exp\left(\frac{7\pi_{2uk}}{10}\right) - 30M \exp\left(\frac{7\pi_{2uk}}{10}\right) - 9 \right)^{0,5} - 30M + 30 \right)}{30M - 100} \right) \quad (54)$$

$$\pi_3 = 0,4$$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{5}{3} \ln \left( \frac{\sqrt{15} \left( M \left( 4M + 25 \exp\left(\frac{3\pi_{2uk}}{5}\right) - 10M \exp\left(\frac{3\pi_{2uk}}{5}\right) - 4 \right)^{0,5} - 10M + 10 \right)}{10M - 25} \right) \quad (55)$$

$$\pi_3 = 0,5$$

$$\pi_{2Aopt} = 2 \ln \left( \frac{\sqrt{2} \left( M \left( M + 4 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) - 2M \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) - 1 \right)^{0,5} - 2M + 2 \right)}{2(M - 2)} \right) \quad (56)$$

Nadalje se iz jednadžbe (56) vidi da se dobiva također neodređeni oblik 0/0 za  $M = 2,0$  pa se primjenom L'Hospitalova pravila dobiva konačno rješenje

$$\pi_{2Aopt}(M = 2) = 2 \ln \frac{2 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) + 0,5}{2} \quad (57)$$

$$\pi_3 = 0,6$$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{5}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{10} \left( M \left( 9M + 25 \exp\left(\frac{2\pi_{2uk}}{5}\right) - 15M \exp\left(\frac{2\pi_{2uk}}{5}\right) - 9 \right)^{0,5} - 15M + 15 \right)}{15M - 25} \right) \quad (58)$$

$$\pi_3 = 0,7$$

$$\pi_{2Aopt} = \frac{10}{3} \ln \left( \frac{\sqrt{30} \left( M \left( 49M + 100 \exp\left(\frac{3\pi_{2uk}}{10}\right) - 70M \exp\left(\frac{3\pi_{2uk}}{10}\right) - 49 \right)^{0,5} - 70M + 70 \right)}{70M - 100} \right) \quad (59)$$

$$\pi_3 = 0,8$$

$$\pi_{2Aopt} = 5 \ln \left( \frac{\sqrt{5} \left( M \left( 16M + 25 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) - 20M \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) - 16 \right)^{0,5} - 20M + 20 \right)}{20M - 25} \right) \quad (60)$$

$$\pi_3 = 0,9$$

$$\pi_{2Aopt} = 10 \ln \left( \frac{\sqrt{10} \left( M \left( 81M + 100 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) - 90M \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) - 81 \right)^{0,5} - 90M + 90 \right)}{90M - 100} \right) \quad (61)$$

Ako se u jednađbe (37), (46) i (52) – (61) uvrsti da je  $M = 1,0$ , izravno sve jednađbe pokazuju da je za sve  $\pi_3$  ista vrijednost  $\pi_{2Aopt}$ .

$$\pi_{2Aopt}(M = 1, 0) = \frac{\pi_{2uk}}{2} \quad (48)$$

a što je već ranije i naglašeno.

Nadalje je evidentno iz jednadžbi (52) – (61) da svaki promatrani slučaj ima neodređeni oblik 0/0 i to za one vrijednosti veličine  $M$  za koje vrijednost nazivnika odnosnih jednadžbi teži nuli. To znači da se primjenom L'Hospitalova pravila mogu iznaći konačne vrijednosti (limesi) i za dotične neodređene oblike. Već je jednadžbom (57) prikazan slučaj za  $\pi_3 = 0,50$ . Za slučajeve  $0,1 \leq \pi_3 \leq 0,40$  nema praktičnog smisla tražiti dotične konačne vrijednosti, budući da se u tim slučajevima radi o visokim vrijednostima veličine  $M$  koje se ne očekuju u realnim uvjetima. U slučajevima  $0,5 \leq \pi_3 \leq 1,0$  ima smisla rješavati dotične neodređene oblike, budući da se u tim slučajevima radi o vrijednostima  $M$  koje se mogu pojaviti u praktičnim aplikacijama. Za  $M = 2,0$  i  $1,0$  rješenja tih neodređenih oblika već su pokazana jednadžbama (57) i (34) pa preostaje još dati rješenja za slučajeve  $0,6 \leq \pi_3 \leq 0,90$ . Po provedenim postupcima ta su rješenja dana sljedećim jednadžbama:

$$\pi_3 = 0,6$$

$$\pi_{2Aopt}(M = \frac{5}{3}) = \frac{5}{2} \ln \frac{25 \exp\left(\frac{2\pi_{2uk}}{5}\right) - 6}{30} \quad (62)$$

$$\pi_3 = 0,7$$

$$\pi_{2Aopt}(M = \frac{10}{7}) = \frac{10}{3} \ln \frac{100 \exp\left(\frac{3\pi_{2uk}}{10}\right) + 49}{140} \quad (63)$$

$$\pi_3 = 0,8$$

$$\pi_{2Aopt}(M = \frac{5}{4}) = 5 \ln \frac{25 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) + 16}{40} \quad (64)$$

$$\pi_3 = 0,9$$

$$\pi_{2Aopt} \left( M = \frac{10}{9} \right) = 10 \ln \frac{100 \exp\left(\frac{\pi_{2uk}}{5}\right) + 81}{180} \quad (65)$$

Jednadžbe (52) – (65) zajedno s prethodno izvedenim jednadžbama (37) i (46) pokazuju da za zadanu vrijednost  $\pi_3$ , koja je ista za oba rekuperatora A i B, vrijednost  $\pi_{2Aopt}$ , a time i bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka, ovisi o varijablama  $M$  i  $\pi_{2uk}$ . To znači da se s promjenom veličine  $M$  mijenja i pozicija priključka umreženog rekuperatora s ciljem postizanja, za novo nastale uvjete, maksimalnog toplinskog toka.

Pogleda li se tijek jednadžbe (13), vidi dijagrame na slikama 11 i 13, evidentno je da za vrijednosti  $0 \leq \pi_{2Aopt} \leq \pi_{2uk}/2$  vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  su najveće za  $\pi_3 = 0,0$ , dok za  $\pi_{2uk}/2 \leq \pi_{2Aopt} \leq \pi_{2uk}$ , najveće se vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  dobivaju za  $\pi_3 = 1,0$ . Iz te činjenice proizlazi traženi kriterij koji mora biti ispunjen, za koji će sve parametarske krivulje  $\pi_3 = \text{konst.}$  imati lokalni ekstrem - maksimum toplinskog toka, iz uvjeta koji je najrestriktivniji za  $\pi_3 = 1,0$ .

To znači da veličina  $M$  mora biti unutar intervala

$$M(\pi_3 = 1,0; \pi_{2A} = 0) < M < M(\pi_3 = 1,0; \pi_{2A} = \pi_{2uk}) \quad (66)$$

Uvrštavajući granice prema jednadžbi (66) u jednadžbu (46) dobiva se traženi kriterij

$$\frac{1}{\pi_{2uk} + 1} < M < \left( 1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1} \right) \quad (67)$$

Kriterij u jednadžbi (67) jednoznačno uvjetuje ispunjenje traženog zahtjeva da se za sve vrijednosti varijable  $\pi_3$  lokalni maksimumi bezdimenzijskog toplinskog toka nađu unutar intervala  $[0, \pi_{2uk}]$ . Evidentno je da kriterij u jednadžbi (67) omogućava da se izravno istraži vrijednost veličine  $M$  te da se udovolji kriteriju u jednadžbi (47) istovremeno za sve odabrane vrijednosti  $\pi_{2uk}$ .

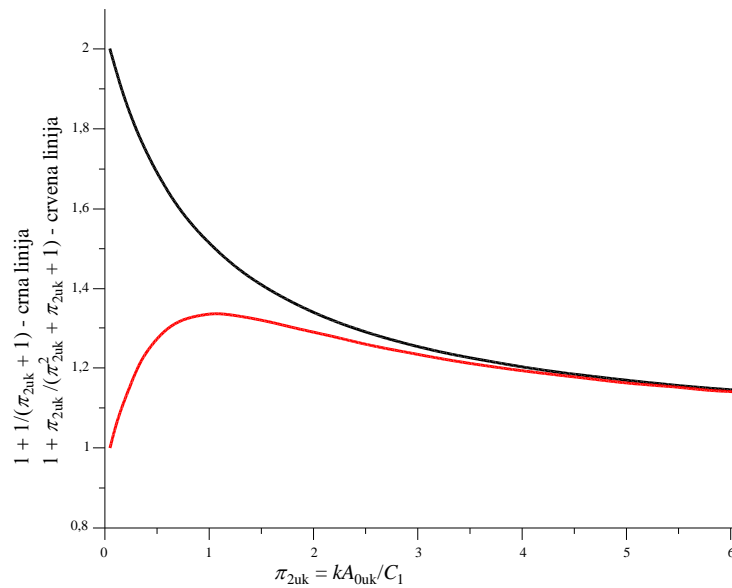
Nadalje je na ovom mjestu važno povezati kriterij koji proizlazi iz kriterija u jednadžbi (67)

$$M < \left( 1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1} \right) \quad (68)$$

s uvjetom danim izrazom u jednadžbi (47)

$$M \leq \frac{\pi_{2uk} + 2}{\pi_{2uk} + 1} = 1 + \frac{1}{\pi_{2uk} + 1} \quad (47)$$

Analiza gornja dva izraza potvrđuje da ukoliko je zadovoljen kriterij u jednadžbi (68), automatski je zadovoljen i kriterij u jednadžbi (47), kao što to prikazuje dijagram na slici 10.



Slika 10. Usporedba kriterija jednadžbi (47) i (68)

Jednadžbama (50) i (51) je pokazano u kojim se slučajevima uopće neće pojaviti lokalni maksimum toplinskog toka pa se može zaključiti da će se vrijednosti lokalnih maksimuma pojaviti samo na pojedinim vrijednostima  $\pi_3$  i to ako se veličina  $M$  nalazi unutar intervala

$$\exp(-\pi_{2uk}) \leq M \leq \frac{1}{\pi_{2uk} + 1} \cup \left( 1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1} \right) \leq M \leq \exp(\pi_{2uk}) \quad (69)$$

Pomoću jednadžbi (37), (46) i (52) – (61) dokazana je hipoteza rada da se lokalni maksimum bezdimenzijskog toplinskog toka jednog umreženog protusmjernog rekuperatora postiže samo ukoliko su ispunjeni kriteriji dani jednadžbama (67) i (69). Ispunjenjem kriterija u jednadžbi (67) će u promatranom rekuperatoru sve parametarske vrijednosti  $\pi_3$  dostići dotični lokalni ekstrem, a ukoliko je udovoljeno kriteriju danom jednadžbom (69) tada će se lokalni maksimum postići samo za neke vrijednosti veličine  $\pi_3$ . Ako veličina  $M$  poprimi vrijednost shodno kriterijskim jednadžbama (50) – (51) tada se lokalni maksimum toplinskog toka neće pojaviti.

### 2.1.5. Omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora

Kako je naznačenim eksplicitnim kriterijem pokazano da postoji mogućnost postizanja maksimalnog toplinskog toka u protusmjernom umreženom rekuperatoru zadane ukupne površine, zanimljivo je pokazati kako zavisi omjer maksimalnog toplinskog toka prema ostvarenom toplinskom toku samo rekuperatora A odnosno samo rekuperatora B, tj. zanimljivo je pokazati omjere  $\omega_A$  i  $\omega_B$ .

$$\omega_A = \frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi_A} \quad (70)$$

$$\omega_B = \frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi_B} \quad (71)$$

pri čemu su vrijednosti  $\Phi_{\text{maks}}$  određene prethodno pojašnjenim algoritmom, a veličine  $\Phi_A$  i  $\Phi_B$  se dobiju ako se u jednadžbe (13), (35) i (43) uvrsti da je  $\pi_{2A} = \pi_{2\text{uk}}$  odnosno  $\pi_{2A} = 0,0$ .

### 2.1.6. Rješenje za slučaj $\pi_{3A} = \frac{C_{1A}}{C_2} \neq \pi_{3B} = \frac{C_{1B}}{C_2}$

Prethodna analiza bezdimenzijskog toplinskog toka umreženih rekuperatora odnosila se za slučaj jednake bezdimenzijske značajke  $\pi_3$  za rekuperator A i rekuperator B, što znači da je u tim slučajevima bio uvjet jednakih toplinskih kapaciteta slabije struja, tj.



$C_{1A} = C_{1B} = C_1 = q_{mA} c_{pA} = q_{mB} c_{pB}$ . Dakako da to u praktičnoj primjeni ne mora biti slučaj, nego se može raditi i o različitim toplinskim kapacitetima slabije struje u rekuperatoru A i rekuperatoru B. U tom slučaju se problem proširuje s dodatnom varijablom, a sam se algoritam razvoja bezdimenzijskog toplinskog toka prikazuje sljedećim postupkom.

Za ovaj slučaj izraz za ukupni toplinski tok je

$$\Phi = C_{1A} (T'_{1A} - T''_{1A}) + C_{1B} (T'_{1B} - T''_{1B}) \quad (72)$$

te koristeći jednadžbe (2) i (3), jednadžba (72) se može transformirati na oblik

$$\Phi = C_{1A} \pi_{1A} (T'_{1A} - T'_2) + C_{1B} \pi_{1B} (T'_{1B} - T_2^*) \quad (a)$$

Temperaturu  $T_2^*$  se dobiva iz energijske bilance rekuperatora A i jednadžbe (2)

$$C_2 (T_2^* - T'_2) = C_{1A} (T'_{1A} - T''_{1A}) \quad (b)$$

$$T_2^* = T'_2 + \frac{C_{1A}}{C_2} (T'_{1A} - T''_{1A}) = T'_2 + \pi_{3A} \pi_{1A} (T'_{1A} - T'_2) \quad (c)$$

Vraćanjem jednadžbe (c) u jednadžbu (72), te normiranjem iste s  $C_2 (T'_{1B} - T'_2)$ , dobiva se traženi izraz za bezdimenzijski toplinski tok

$$\frac{\Phi}{C_2 (T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_{3A} \pi_{1A} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B} \quad (73)$$

U jednadžbi (73) veličina  $M$  definirana je jednadžbom (7), dok su efikasnosti rekuperatora  $\pi_{1A}$  i  $\pi_{1B}$  određene sljedećim jednadžbama:

$$\pi_{1A} = \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_{3A}) \pi_{2A})}{1 - \pi_{3A} \exp(-(1 - \pi_{3A}) \pi_{2A})} \quad (74)$$

$$\pi_{1B} = \frac{1 - \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) k \frac{A_{0uk} - A_{0A}}{C_{1B}} \frac{C_{1A}}{C_{1A}}\right)}{1 - \pi_{3B} \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) k \frac{A_{0uk} - A_{0A}}{C_{1B}} \frac{C_{1A}}{C_{1A}}\right)} \quad (75a)$$

$$\pi_{1B} = \frac{1 - \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) k \frac{A_{0uk} - A_{0A}}{C_{1A}} \frac{C_{1A}}{C_{1B}}\right)}{1 - \pi_{3B} \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) k \frac{A_{0uk} - A_{0A}}{C_{1A}} \frac{C_{1A}}{C_{1B}}\right)} \quad (75b)$$

$$\pi_{1B} = \frac{1 - \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) (\pi_{2uk} - \pi_{2A}) \frac{\pi_{3A}}{\pi_{3B}}\right)}{1 - \pi_{3B} \exp\left(- (1 - \pi_{3B}) (\pi_{2uk} - \pi_{2A}) \frac{\pi_{3A}}{\pi_{3B}}\right)} \quad (75c)$$

Iz prikazanog izvoda veličina  $\pi_{2uk}$  ima oblik

$$\pi_{2uk} = \frac{kA_{0uk}}{C_{1A}} \quad (d)$$

Evidentno je da skup jednadžbi od jednadžbe (73) do jednadžbe (d) predstavljaju jedan širi oblik rješenja u odnosu na rješenje dano jednadžbom (6), što znači da ukoliko se u ovaj prošireni, s obzirom na broj varijabli, oblik rješenja uvrsti da je  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$ , jer je  $C_{1A} = C_{1B} = C_1$ , dobiva se rješenje oblika

$$\frac{\Phi}{C_2 (T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_3 \pi_{1A} (1 - \pi_3 \pi_{1B}) + \pi_3 \pi_{1B} \quad (76)$$

te ako jednadžbu (76) podijelimo s  $\pi_3$  dobiva se rješenje

$$\frac{\Phi}{C_1 (T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_{1A} (1 - \pi_3 \pi_{1B}) + \pi_{1B} \quad (77)$$

koje je identično prethodno pokazanom rješenju jednadžbe (6)!

I za ovaj prošireni sustav, prikazan jednadžbama (73 - d) treba ispitati pokazuje li, s obzirom na varijablu  $\pi_{2A}$ , maksimum kao lokalni ekstrem. Zbog složenosti prikazanih funkcijskih odnosa nije moguće eksplicitno iznaći to rješenje. Stoga se i u ovom slučaju rješenje iznalazi parametrizacijom problema, što znači da se pojedine veličine drže konstantnim (parametri), a varira se samo varijabla  $\pi_{2A}$  u intervalu  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$ . Neki od odabranih slučajeva prikazuju se dijagramski u poglavlju 3.3.

## 2.2. Razvoj algoritma po kriteriju maksimalne generirane entropije

Pored razvijenog algoritma za maksimalni toplinski tok, kako je naznačeno u cilju ove disertacije, potrebno je razviti i algoritam za generiranu maksimalnu entropiju kod ovako jednog složenog (umreženog) protusmjernog rekuperatora, pretpostavljajući jednakost toplinskih kapaciteta slabijih struja A i B. I za ovaj slučaj treba istražiti, slično kao i u prethodnom poglavlju, hoće li se pod danim uvjetima pojaviti ili ne entropijski maksimum. U modelu će se obraditi generirana entropija zbog tzv. eksterne ireverzibilnosti, što znači da u model ulazi samo generirana entropija zbog prijenosa toplinskog toka između struja pri njihovim konačnim temperaturnim razlikama, a ne uzima se u obzir generirana entropija zbog tzv. unutrašnjih ireverzibilnosti, a u koje su poglavito uključene ireverzibilnosti zbog pada tlaka slabije i jače struje u rekuperatoru. Te ireverzibilnosti su izravno povezane, prema Goy–Stodola teoremu [117], sa sveukupnom promjenom entropije izoliranog sustava, u koji u ovom slučaju, shodno slici 6, ulazi jača struja 2 i slabije struje 1A i 1B. Načelnu potrebu borbe s ireverzibilnostima nagovijestio je još profesor Bošnjaković u svojem radu [123], davne 1938. godine. Tako se već dugi niz godina javljaju znanstveni radovi koji upravo analiziraju za razne uvjete entropijsku produkciju odnosno eksergijsku destrukciju kod rekuperativnih izmjenjivača topline. Neki od tih radova dani su u [124 – 131].

Razvoj ovoga algoritma bi se mogao provesti analogno prethodnom, to znači da se prati lokalno generirana entropija, a onda se sveukupna dobiva jednostavno integriranjem tih lokalnih (infinitesimalnih) iznosa shodno [117], prema sljedećoj jednadžbi

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = k \int_0^{A_{0A}} \frac{(T_{1A} - T_2)^2}{T_{1A} T_2} dA_A + k \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \frac{(T_{1B} - T_2)^2}{T_{1B} T_2} dA_B \quad (78)$$

Zavisnosti lokalnih temperatura struja  $T_{1A}$ ,  $T_{1B}$  i  $T_2$  o lokalnim izmjenjivačkim površinama  $A_A$  i  $A_B$  općenito su prikazane jednadžbama (15) – (18), te ih se kao takve može uvrstiti u gore navedene podintegralne funkcije te pokušati naći rješenje naznačenih integrala.

$$\begin{aligned} \Delta S = & kB_2^2 (1 - \pi_3)^2 \int_0^{A_{0A}} \frac{\exp\left(-2\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right)\right) dA_A}{B_1^2 + B_1 B_2 (1 + \pi_3) \exp\left(-\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right)\right) + B_2^2 \pi_3 \exp\left(-2\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right)\right)} \\ & + kB_2^{*2} (1 - \pi_3)^2 \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \frac{\exp\left(-2\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_B\right)\right) dA_B}{B_1^{*2} + B_1^* B_2^* (1 + \pi_3) \exp\left(-\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_B\right)\right) + B_2^{*2} \pi_3 \exp\left(-2\left(\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_B\right)\right)} \end{aligned} \quad (79)$$

Postupak je složen, ali su oblici funkcija takvi da se koristeći mnoge korisne transformacije mogu iznaći eksplicitna rješenja gornjih integrala.

Rješenja su nađena uz prethodnu preinaku jednadžbe (79), na način da se prvo uvedu supstitucije i preinake oblika, rješavajući prvi integral

$$t = \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right) \quad (a)$$

$$dt = -\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1) \exp\left(-\frac{k}{C_1}(\pi_3 - 1)A_A\right) dA_A \quad (b)$$

$$dA_A = \frac{C_1}{k}(1 - \pi_3) \frac{dt}{t} \quad (c)$$

Uvođenjem jednadžbi (a – c) u prvi pribrojnik jednadžbe (73) dobiva se integral oblika

$$\left(\frac{\Delta S}{C_1}\right)_A = \int_1^{-\left(\pi_3 - 1\right)\pi_{2A}} \frac{tdt}{B_1^2 + B_1 B_2 (1 + \pi_3)t + \pi_3 B_2^2 t^2} \quad (d)$$

Rješenje gornjeg integrala s uvrštenim granicama poprima oblik

$$\left(\frac{\Delta S}{C_1}\right)_A = \frac{1}{\pi_3} \ln \frac{B_1 + B_2 \pi_3 e^{-(\pi_3-1)\pi_{2A}}}{B_1 + \pi_3 B_2} + \ln \frac{B_1 + B_2}{B_1 + B_2 e^{-(\pi_3-1)\pi_{2A}}} \quad (e)$$

Konstante  $B_1$  i  $B_2$  dobivaju se izravno koristeći se [118] uz oznake na slici 6

$$B_1 = \frac{T'_{1A} \left(1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right) - \pi_{1A} (T'_{1A} - T'_2)}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}} \quad (f)$$

$$B_2 = \frac{\pi_{1A} (T'_{1A} - T'_2) e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}} \quad (g)$$

Vraćanjem jednadžbi (f) i (g) u jednadžbu (e) slijedi izraz

$$\left(\frac{\Delta S}{C_1}\right)_A = \frac{1}{\pi_3} \ln \left[ \frac{T'_{1A} \pi_3 \left(1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right)}{T'_2 \left(1 - \pi_3 e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right)} + \frac{1 - \pi_3}{1 - \pi_3 e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}} \right] + \ln \frac{T'_{1A} \pi_3 \left(1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right) - \pi_{1A} (T'_{1A} - T'_2) \left(1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right)}{T'_{1A} \left(1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}\right)} \quad (h)$$

Dodavanjem u brojnik drugog pribrojnika, u uglatoj zagradi, člana  $\pm \pi_3 e^{-(1-\pi_3)\pi_{2A}}$  gornji se izraz u jednadžbi (h) dovodi, korištenjem jednadžbi (8 – 10), na svoj konačni oblik

$$\left(\frac{\Delta S}{C_1}\right)_A = \frac{1}{\pi_3} \ln \left[ 1 + \pi_{1A} \pi_3 (\pi_{TA} - 1) \right] + \ln \left( 1 - \pi_{1A} \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \right) \quad (80)$$

$\pi_{TA}$  varijabla u gornjem izrazu definirana je kao  $T'_{1A} / T'_2$ .

Rješenje drugog integrala u jednadžbi (79), zahtijeva prvo definiranje konstanti  $B_1^*$  i  $B_2^*$ .

Procedura je slična prethodnom slučaju pa se shodno oznakama na slici 6 mogu napisati sljedeći izrazi

$$B_1^* = \frac{T'_{1B} - T''_{1B} e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}} \quad (i)$$

$$B_2^* = \frac{(T'_{1B} - T''_{1B})e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}} \quad (j)$$

ali se dobivaju duga i nepregledna rješenja i stoga se kao takva izostavljaju iz sadržaja ovog rada. Zbog kraćeg načina razvijanja algoritma, pribjegava se racionalnijem postupku, a sam razvoj algoritma prema jednadžbi (79) bit će pokazan samo za dva specijalna slučaja  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 1,0$ .

Kako je, shodno oznakama na slici 6, efikasnost rekuperatora B jednaka

$$\pi_{1B} = \varepsilon_B = \frac{T'_{1B} - T''_{1B}}{T'_{1B} - T_2^*} \quad (81)$$

potrebno je odrediti temperature  $T''_{1B}$  i  $T_2^*$  a što se pokazuje sljedećom procedurom.

Temperatura  $T''_{1A}$  slijedi iz iskoristivosti izmjenjivača A,  $\varepsilon_A = \pi_{1A}$

$$T''_{1A} = T'_{1A} - \pi_{1A} (T'_{1A} - T_2') \quad (k)$$

dok temperatura struje 2,  $T_2^*$ , slijedi iz energijske bilance rekuperatora A

$$T_2^* = \pi_3 (T'_{1A} - T''_{1A}) + T_2' \quad (l)$$

pa uvrštavanjem jednadžbe (k) u jednadžbu (l) slijedi konačni izraz za  $T_2^*$

$$T_2^* = \pi_3 \pi_{1A} (T'_{1A} - T_2') + T_2' \quad (m)$$

Temperatura  $T''_{1B}$  slijedi iz izraza za iskoristivost rekuperatora B,  $\varepsilon_B = \pi_{1B}$

$$T''_{1B} = T'_{1B} - \pi_{1B} (T'_{1B} - T_2^*) \quad (n)$$

te uvrštavanjem jednadžbe (m) u jednadžbu (n) dobiva se konačni traženi izraz za  $T_{1B}''$

$$T_{1B}'' = T_{1B}' - \pi_{1B} \left( T_{1B}' - \pi_3 \pi_{1A} (T_{1A}' - T_2') - T_2' \right) \quad (o)$$

Vraćanjem jednadžbe (o) u jednadžbe (i) i (j) dobivaju se relevantni izrazi za konstante  $B_1^*$  i  $B_2^*$

$$B_1^* = \frac{T_{1B}' \left( 1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}} \right) + \pi_{1B} \left[ T_{1B}' - T_2' - \pi_3 \pi_{1A} (T_{1A}' - T_2') \right] e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}} \quad (p)$$

$$B_2^* = \frac{\pi_{1B} (T_{1B}' - T_2') - \pi_3 \pi_{1A} (T_{1A}' - T_2')}{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_{2B}}} \quad (r)$$

Rješenje drugog integrala u jednadžbi (79) formalno je isto kao i rješenje u jednadžbi (s) samo s promijenjenim konstantama

$$\left( \frac{\Delta S}{C_1} \right)_B = \frac{1}{\pi_3} \ln \frac{B_1^* + B_2^* \pi_3 e^{-(\pi_3-1)\pi_{2B}}}{B_1^* + \pi_3 B_2^*} + \ln \frac{B_1^* + B_2^*}{B_1^* + B_2^* e^{-(\pi_3-1)\pi_{2B}}} \quad (s)$$

Uvođenjem nove bezdimenzijske veličine

$$\pi_{TB} = \frac{T_{1B}'}{T_2'} \quad (82)$$

može se pokazati, koristeći jednadžbu (7), da vrijedi sljedeća relacija

$$\pi_{TB} = \frac{M + \pi_{TA} - 1}{M} = 1 + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} \quad (83)$$

Uvođenjem jednadžbi (p), (r), (82), i (83) u jednadžbu (s) dobiva se, nakon provedene procedure, izraz za generiranu entropiju u rekuperatoru B

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta S}{C_1}\right)_B &= \frac{1}{\pi_3} \ln \left[ \pi_3 \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M} - \pi_3 \pi_{1A} (\pi_{TA} - 1) \right) \right] \\ &+ \ln \left[ 1 - \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} - \pi_3 \pi_{1A} \frac{M (\pi_{TA} - 1)}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (84)$$

pa se konačno rješenje za ukupni prirast entropije promatranog umreženog rekuperatora dobiva zbrajanjem jednažbi (80) i (84)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1} &= \frac{1}{\pi_3} \ln \left[ 1 + \pi_3 \pi_{1A} (\pi_{TA} - 1) + \pi_3 \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M} - \pi_3 \pi_{1A} (\pi_{TA} - 1) \right) \right] \\ &+ \ln \left( 1 - \pi_{1A} \frac{(\pi_{TA} - 1)}{\pi_{TA}} \right) + \ln \left[ 1 - \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} - \pi_3 \pi_{1A} \frac{M (\pi_{TA} - 1)}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (85)$$

U radu je prikazan ovakav razvoj algoritma generirane entropije iz razloga što se razvijenim algoritmom, uz male dodatne preinake, može dobiti rješenje generirane entropije u zavisnosti o lokalnoj koordinati izmjenjivačke površine umreženog rekuperatora.

U gornjoj jednažbi veličine  $\pi_{1A}$  i  $\pi_{1B}$  su definirane jednažbama (8) i (11) pa je evidentno da je generirana entropija ovako jednog umreženog rekuperatora funkcija sljedećih bezdimenzijskih varijabli:  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{2A}$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Dakle, u odnosu na jednažbu (13) u jednažbi (85) je dodatna varijabla  $\pi_{TA}$ . Važno je ovdje napomenuti da su veličine  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{2A}$ ,  $\pi_3$  involvirane, shodno jednažbama (8) i (11), u veličinama  $\pi_{1A}$  i  $\pi_{1B}$ . Ako bi se dotične funkcijske oblike uvrstilo u jednažbu (85) dobio bi se izrazito dugački oblik jednažbe koja u najopćenitijem slučaju opisuje bezdimenzijsku generiranu entropiju. Također je evidentno da je jednažba (85) matematički kompliciranija od jednažbe (13) koja opisuje u općem slučaju bezdimenzijski toplinski tok. Zbog izrazito složene strukture jednažbe provedeni su postupci iznalaženja ekstrema za pojedinačno uzete vrijednosti  $\pi_3 = \text{konst}$ . Na taj način nisu dobivena eksplicitna rješenja, stoga za detaljniju analizu izraza u jednažbi (85) preostaje jedino određeni numerički postupak, kojeg se pojašnjava u okviru dijagramske interpretacije generirane entropije.

Jednažbu (85) moguće je dobiti i koristeći sljedeći izraz za generiranu ukupnu bezdimenzijsku entropiju ovog umreženog rekuperatora



$$\frac{\Delta S}{C_1} = \frac{1}{\pi_3} \ln \frac{T_2''}{T_2'} + \ln \frac{T_{1A}''}{T_{1A}'} + \ln \frac{T_{1B}''}{T_{1B}'} \quad (86)$$

Uvrštavajući u jednadžbu (85) da je  $\pi_{2A} = 0,0$  odnosno  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobivaju se izrazi za generiranu entropiju dvaju osnovnih rekuperatora i to za  $\pi_{2A} = 0,0$  se radi o rekuperatoru B značajke  $\pi_{2B} = \pi_{2uk}$  i ulaznih temperatura  $T_2'$  i  $T_{1B}'$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1}(\pi_{2A} = 0) &= \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \frac{\pi_3(\pi_{TA} - 1)}{M} \right) \\ &+ \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \end{aligned} \quad (87)$$

a ako se radi o slučaju da je  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  radi se o osnovnom protusmjernom rekuperatoru A temperatura struja na ulazu  $T_2'$  i  $T_{1A}'$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1}(\pi_{2A} = \pi_{2uk}) &= \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \pi_3(\pi_{TA} - 1) \right) \\ &+ \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2uk})} \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \right) \end{aligned} \quad (88)$$

U mnogim radovima poput [124] i [125] mogu se pronaći rezultati detaljne kvantitativne analize jednadžbi (87) i (88) i ti su rezultati pokazali, fizikalno sasvim opravdano, da se nisu pojavljivali maksimumi generirane entropije kao lokalni ekstremi!

*Uspoređujući jednadžbe (13) i (85) vidi se da izmijenjeni toplinski tok ovisi o  $\pi_2$ ,  $\pi_3$  i veličini  $M$ , dok generirana entropija, pored tih veličina, dodatno ovisi i o varijabli  $\pi_{TA}$ . To znači da za istu vrijednost toplinskog toka postoji više različitih vrijednosti generirane entropije, što se kasnije i kvantificira.*

### 2.2.1. Posebni (specijalni) slučajevi jednadžbe (85)

Posebnim slučajevima jednadžbe (85) pridružuju se dva slučaja i to prvi kod kojeg je  $\pi_3 = 0,0$  i drugi kod kojeg je  $\pi_3 = 1,0$ . Dakle prvi se slučaj odnosi na kondenzaciju ili isparivanje, tj. za slučaj u kojem jača struja prolazi kroz faznu promjenu. Drugi slučaj se odnosi na tip tzv. izbalansiranog protusmjernog rekuperatora kod kojeg slabije i jače struje imaju jednake toplinske kapacitete.

#### 2.2.1.1. Slučaj $\pi_3 = 0,0$

Evidentno je da za ovaj slučaj prvi pribrojnik jednadžbe (85) daje neodređeni oblik 0/0, a jednadžbe (8) i (11) poprimaju sljedeće oblike

$$\pi_{1A} = 1 - \exp(-\pi_{2A}) \quad (89)$$

$$\pi_{1B} = 1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A})) \quad (90)$$

Primijenivši L'Hospitalovo pravilo na prvi pribrojnik jednadžbe (85), te uvrštavajući u dobiveni rezultat kao i u ostale pribrojnike jednadžbe (79) da je  $\pi_3 = 0,0$ , i koristeći još pri tome jednadžbe (89) i (90) dolazi se do bezdimenzijskog izraza za generiranu entropiju

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta S}{C_1} \right)_{\pi_3=0,0} &= \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} (1 - \exp(-\pi_{2A})) \right] + (\pi_{TA} - 1)(1 - \exp(-\pi_{2A})) \\ &+ \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} (1 - \exp(\pi_{2A} - \pi_{2uk})) \right] + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} (1 - \exp(\pi_{2A} - \pi_{2uk})) \end{aligned} \quad (91)$$

Jednadžbu (91) moguće je izvesti i integriranjem lokalne entropije ako se u jednadžbu (85) uvrsti da je  $T_2 = T_2'$ , i da su lokalne temperature dane jednadžbama (e) i (f) vezano na alternativni izvod jednadžbe (35). Za promatrani slučaj jednadžba (78) prelazi u oblik

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = k \int_0^{A_{0A}} \frac{(T_{1A} - T_2')^2}{T_{1A} T_2'} dA_A + k \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \frac{(T_{1B} - T_2')^2}{T_{1B} T_2'} dA_B \quad (a)$$

pa uvođenjem jednadžbi (e) i (f) u jednadžbu (a) dobiva se

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = \frac{k}{T_2'} \left[ \int_0^{A_{0A}} \frac{(T_{1A}' - T_2')^2 \exp\left(2\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right)\right)}{T_2' + (T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right)} dA_A + \int_0^{A_{0uk} - A_{0A}} \frac{(T_{1B}' - T_2')^2 \exp\left(2\left(\frac{k}{C_1} A_A - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right)\right)}{T_2' + (T_{1B}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right)} dA_B \right] \quad (b)$$

Rješenje prvog integrala ide uz supstituciju da je

$$T_2' + (T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) = t \quad (c)$$

$$dt = \frac{k}{C_1} (T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) dA_A \quad (d)$$

Također iz jednadžbe (c) slijedi da je

$$(T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) = t - T_2' \quad (e)$$

Time prvi integral po varijabli  $t$  poprima oblik

$$\Delta S_A = \frac{C_1}{T_2'} \int \frac{t - T_2'}{t} dt = \frac{C_1}{T_2'} [t - T_2' \ln t] \quad (f)$$

Vraćanjem jednadžbe (c) u jednadžbu (f) i postavljanjem donje i gornje granice integracije dobiva se

$$\Delta S_A = \frac{C_1}{T_2} \left[ T_2' + (T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) - T_2' \ln \left( T_2' + (T_{1A}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_A - \pi_{2A}\right) \right) \right]_0^{\pi_{2A}} \quad (g)$$

Uvrštavanjem gornje i donje granice integracije u jednadžbu (g), te vrlo jednostavnim postupkom sređivanja dobiva se rješenje oblika

$$\frac{\Delta S_A}{C_1} = (\pi_{TA} - 1)(1 - \exp(-\pi_{2A})) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} (1 - \exp(-\pi_{2A})) \right] \quad (h)$$

Analognim postupkom se dolazi do rješenja za generiranu entropiju u rekuperatoru B, drugi integral u jednadžbi (b), na način da se u isti uvede supstitucija

$$t = T_2' + (T_{1B}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right) \quad (i)$$

$$dt = \frac{k}{C_1} (T_{1B}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right) dA_B \quad (j)$$

$$(T_{1B}' - T_2') \exp\left(\frac{k}{C_1} A_B - (\pi_{2uk} - \pi_{2A})\right) = t - T_2' \quad (k)$$

$$\frac{\Delta S_B}{C_1} = \frac{\pi_{TA} - 1}{M} (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \right] \quad (l)$$

Zbrajanjem rješenja jednadžbi (h) i (l) dobiva se konačno rješenje

$$\frac{\Delta S}{C_1} = (\pi_{TA} - 1)(1 - \exp(-\pi_{2A})) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} (1 - \exp(-\pi_{2A})) \right] \\ + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} (1 - \exp(-(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))) \right] \quad (m)$$

a koje je identično rješenju prikazanom jednažbom (91)!

Jednažba (91) pokazuje da je u ovom slučaju generirana entropija funkcija četiri varijable:  $\pi_{2A}$ ,  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Postavlja se načelno pitanje ima li gornja funkcija lokalni ekstrem, i to maksimum, za zadane veličine  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ , a varira se samo varijabla  $\pi_{2A}$ .

Dakle, traži se rješenje jednažbe

$$\frac{d}{d\pi_{2A}} \left( \frac{\Delta S}{C_1} \right)_{\pi_{2uk}, \pi_{TA}, M} = 0 \quad (92)$$

Rješenje jednažbe (92), s prethodno uvrštenim izrazom  $M = (\pi_{TA} - 1)/(\pi_{TB} - 1)$  u jednažbu (91), je sljedećeg oblika

$$\pi_{2Aopt} = \ln \left[ \frac{(\pi_{TA} \pi_{TB} - \pi_{TA} - \pi_{TB} + 1)^{\frac{1}{2}} \exp(\pi_{2uk}/2)}{\pi_{TB} - 1} \right] \quad (93)$$

Ako se u jednažbu (93) uvrsti  $\pi_{TB}$  prema jednažbi (83) dobiva se izraz

$$\pi_{2Aopt} = \ln(\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk}/2)) = \frac{1}{2}(\ln M + \pi_{2uk}) \quad (94)$$

Evidentno je da je jednažba (94) identična jednažbi (37), a što znači da se za  $\pi_3 = 0,0$ , podudaraju optimalne vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  po kriteriju maksimalnog toplinskog toka i po kriteriju maksimalne generirane entropije.

Važno je napomenuti da optimalna vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  po kriteriju maksimalnog toplinskog toka i po kriteriju maksimalne generirane entropije ima isto nazivlje, iako je evidentno da je maksimum generirane entropije, po drugom zakonu termodinamike, nepovoljan režim rada rekuperatora.

Uvrštavanjem jednadžbe (94) u jednadžbu (91) dobiva se eksplicitni izraz za maksimalnu generiranu entropiju

$$\left( \left( \frac{\Delta S}{C_1} \right)_{(\pi_3=0)} \right)_{\max} = \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \frac{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2) - 1}{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2)} \right] + (\pi_{TA} - 1) \frac{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2) - 1}{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2)} \\ + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} \frac{\exp(\pi_{2uk} / 2) - \sqrt{M}}{\exp(\pi_{2uk} / 2)} \right] + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} \frac{\exp(\pi_{2uk} / 2) - \sqrt{M}}{\exp(\pi_{2uk} / 2)} \quad (95)$$

Iz jednadžbe (95) se vidi da generirana entropija, u točki ekstrema definiranim jednadžbom (92), ovisi o ukupnoj površini umreženog rekuperatora, veličini  $M$ , kao i o varijabli  $\pi_{TA}$ , dok maksimalni toplinski tok, shodno jednadžbi (38), ovisi samo o varijablama  $\pi_{2uk}$  i  $M$ . Kako je vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ista kako po kriteriju maksimalnog toplinskog toka tako i po kriteriju maksimalne entropije, to znači da se za isti maksimalni toplinski tok mogu generirati različite vrijednosti maksimalne entropije. To je zato što ista vrijednost veličine  $M$  dopušta različite vrijednosti varijable  $\pi_{TA}$ , a time, shodno jednadžbi (83), i pripadajuće vrijednosti varijable  $\pi_{TB}$ . Evidentno je da je za  $\pi_{TA} = 1,0$ , vrijednost maksimalne entropije jednaka nuli. No i jednadžba (b) pokazuje da je i vrijednost lokalne entropije jednaka nuli, a što je i fizikalno opravdano jer je tada i prema jednadžbi (83) i  $\pi_{TB} = 1,0$ , pa se u tom slučaju radi o rekuperatoru u kojem nema izmjene toplinskog toka.

Uvrštavanjem u jednadžbu (91) da je  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobivaju se izrazi za generiranu entropiju za slučaj da se radi o protusmjernom rekuperatoru koji na ulazu ima temperature  $T_2'$  i  $T_{1B}'$  odnosno  $T_2'$  i  $T_{1A}'$ .

Za  $\pi_{2A} = 0,0$  slijedi izraz

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \left[ 1 - \frac{M + \pi_{TA} - 2}{M + \pi_{TA} - 1} (1 - \exp(-\pi_{2uk})) \right] + \frac{M + \pi_{TA} - 2}{M + \pi_{TA} - 1} (1 - \exp(-\pi_{2uk})) \quad (96)$$

Ako se pretpostavi činjenicu da  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , tada jednadžba (96) poprima oblik

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{1}{M + \pi_{TA} - 1} + 1 - \frac{1}{M + \pi_{TA} - 1} \quad (97)$$

dok za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  izraz (91) za generiranu entropiju ima oblik

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} (1 - \exp(-\pi_{2uk})) \right] + (\pi_{TA} - 1) (1 - \exp(-\pi_{2uk})) \quad (98)$$

Uz pretpostavku da  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , gornja se jednadžba preinačuje na

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{1}{\pi_{TA}} + \pi_{TA} - 1 \quad (99)$$

Jednadžbe (96) i (97) se odnose na klasični rekuperator s faznom promjenom struje 2, dok je druga struja ulazne temperature  $T'_{1B}$ , a jednadžbe (98) i (99) opisuju također klasični rekuperator s faznom promjenom struje 2, ali tada struja 1 ima ulaznu temperaturu  $T'_{1A}$ .

### 2.2.1.2. Slučaj $\pi_3 = 1,0$

U ovom slučaju jednadžbe (8) i (11) daju neodređene oblike 0/0 u slučaju da je  $\pi_3 = 1,0$ , te primjenom na iste L'Hospitalova pravila, dotične jednadžbe poprimaju sljedeće oblike

$$\pi_{1A} = \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \quad (100)$$

$$\pi_{1B} = \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \quad (101)$$

Uvrštavanjem jednadžbi u jednadžbu (91) uz  $\pi_3 = 1,0$ , dobiva se sljedeći oblik bezdimenzijskog izraza za generiranu entropiju

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1}(\pi_3 = 1,0) = & \ln \left[ 1 + \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1}(\pi_{TA} - 1) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \left( \frac{M + \pi_{TA} - 1}{M} - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1}(\pi_{TA} - 1) - 1 \right) \right] \\ & + \ln \left( 1 - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \right) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \frac{M(\pi_{TA} - 1)}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (102)$$

Zanimljivo je ovdje ukazati na činjenicu da i umreženi balansirani rekuperator radi reverzibilno za hipotetski slučaj za koji  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ . U tom slučaju član

$(\pi_{2uk} - \pi_{2A}) / (\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1) \rightarrow 1,0$  pa se gornji izraz u jednadžbi (102) transformira na oblik

$$\frac{\Delta S}{C_1}(\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} \rightarrow \infty) = \ln \frac{(\pi_{TA} + \pi_{2A})(1 + \pi_{2A}\pi_{TA})}{\pi_{TA}(1 + \pi_{2A})^2} \quad (102a)$$

Kako, u promatranom slučaju i  $\pi_{2A} \rightarrow \infty$  jasno se vidi iz gornjeg izraza da ukupna generirana entropija ovog balansirano umreženog rekuperatora teži nuli, i čime je ispunjen kriterij reverzibilnog rada rekuperatora.

Ako se detaljnije ispita tijek funkcije u jednadžbi (102a) može se lako pokazati da ta funkcija ima maksimum, neovisno o  $\pi_{TA}$  i  $M$ , za  $\pi_{2A} = 1,0$  pa su koordinate tog maksimuma

$$\frac{\Delta S}{C_1}(\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} \rightarrow \infty)_{\text{maks}} = \left( 1,0; \ln \frac{(1 + \pi_{TA})^2}{4\pi_{TA}} \right) \quad (102b)$$

Za  $\pi_{2A} = 0,0$  izraz u jednadžbi (102) se transformira na oblik

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{\pi_{2uk}M + \pi_{TA}\pi_{2uk} - \pi_{2uk} + M}{M(\pi_{2uk} + 1)} + \ln \left( \frac{M + \pi_{TA} - 1 + M\pi_{2uk}}{(M + \pi_{TA} - 1)(\pi_{2uk} + 1)} \right) \quad (103)$$

Ako se pretpostavi hipotetski slučaj  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , tada izraz u jednadžbi (103) prelazi u oblik



$$\lim_{\pi_{2uk} \rightarrow \infty} \frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{M + \pi_{TA} - 1}{M} + \ln \frac{M}{M + \pi_{TA} - 1} \quad (104)$$

a što je u potpunosti i fizikalno opravdano, budući se u tom slučaju radi o reverzibilnom protusmjernom rekuperatoru, kojeg se u mnogom znanstvenim člancima navodi kao slučaj tzv. *balansiranog protusmjernog reverzibilnog rekuperatora*.

Za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  jednadžba (102) poprima oblik

$$\frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{\pi_{TA} + \pi_{2uk}}{\pi_{TA} (\pi_{2uk} + 1)} + \ln \frac{\pi_{TA} \pi_{2uk}}{\pi_{2uk} + 1} \quad (105)$$

Uz pretpostavku i ovdje hipotetičke mogućnosti da  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , izraz u jednadžbi (105) daje vrijednost

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta S}{C_1} = \ln \frac{1}{\pi_{TA}} + \ln \pi_{TA} = 0 \quad (106)$$

i koja pokazuje da se i u ovom slučaju, također fizikalno opravdanom, radi o reverzibilnom izbalansiranom protusmjernom rekuperatoru.

Jednadžbe (103) i (105) daju vrijednosti generirane entropije klasičnog protusmjernog balansiranog rekuperatora, i to jednadžba (103) opisuje slučaj kada su temperature na ulazu u protusmjerni rekuperator  $T_2'$  i  $T_{1B}'$ , a jednadžba (105) opisuje slučaj kada su ulazne temperature  $T_2'$  i  $T_{1A}'$ .

### 2.3. Razvoj algoritma po kriteriju omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije

Kako je pokazano u poglavljima 2.1 i 2.2, a što je bilo iz fizikalnih razloga i za očekivati, nisu se dobivale međusobno jednake vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  po kriteriju maksimalnog toplinskog toka i po kriteriju maksimalne generirane entropije. Jedino su se pokazala međusobno jednaka rješenja za  $\pi_3 = 0,0$ . Stoga se kao sljedeći logični cilj istraživanja, a što se upravo analizira u okviru ovoga poglavlja, nameće kriterij omjera bezdimenzijskog toplinskog

toka i bezdimenzijske generirane entropije. Taj se problem u općenitom smislu za  $0 < \pi_3 < 1,0$  svodi na omjer jednažbi (13) i (85), odnosno za specijalne slučajeve  $\pi_3 = 0,0$  i  $1,0$  svodi na analizu omjera danih jednažbama (35) i (91) te jednažbama (43) i (102). Zbog složenosti navedenih jednažbi, dotični se omjeri ne prikazuju u formi jednažbi. Ako se taj omjer označi sa  $R$ , tada se može napraviti sljedeći zapis

$$R = \frac{\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)}}{\frac{\Delta S}{C_1}} = \frac{\text{jed(13)}}{\text{jed(85)}} = f(\pi_{2A}, \pi_{2uk}, \pi_3, \pi_{TA}, M) \text{ za } 0 < \pi_3 < 1 \quad (107)$$

$$R = \frac{\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)}}{\frac{\Delta S}{C_1}} = \frac{\text{jed(35)}}{\text{jed(91)}} = f(\pi_{2A}, \pi_{2uk}, \pi_{TA}, M) \text{ za } \pi_3 = 0 \quad (108)$$

$$R = \frac{\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)}}{\frac{\Delta S}{C_1}} = \frac{\text{jed(43)}}{\text{jed(102)}} = f(\pi_{2A}, \pi_{2uk}, \pi_{TA}, M) \text{ za } \pi_3 = 1 \quad (109)$$

### 3. DIJAGRAMSKI PRIKAZ I INTERPRETACIJA REZULTATA PRORAČUNA

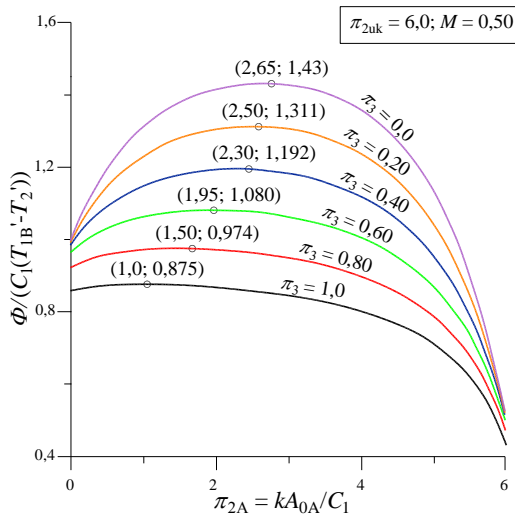
Matematički model, dan jednadžbama (1) – (109), evidentno je kompleksan jer u sebi sadrži veliki broj relevantnih varijabli. Stoga je, glede dijagramskih prikaza, potrebno pojedine varijable držati konstantnima, a ostale varirati, što se upravo i čini u okviru ovoga poglavlja. Za analizu su odabrani pojedini slučajevi za koje je izvršen proračun i dobiveni rezultati su dijagramski prikazani i kritički interpretirani. Svi su prikazi dani u bezdimenzijskim oblicima, čime isti opisuju širok spektar fizikalnih slučajeva koji su opisani tim bezdimenzijskim značajkama, a koje se javljaju u danom matematičkom modelu.

#### 3.1. Bezdimenzijski toplinski tok za slučaj $\pi_{3A} = \pi_{3B}$

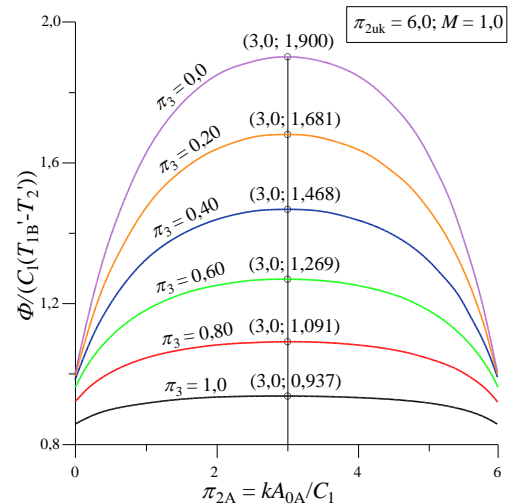
Pomoću jednadžbi (1) – (77) u potpunosti je razrađen algoritam bezdimenzijskog toplinskog toka u jednom umreženom protusmjernom rekuperatoru. Prikazanim algoritmom je dokazana jedna od postavljenih hipoteza: postojanje lokalnog maksimuma toplinskog toka je za *sve* vrijednosti značajke  $\pi_3$  jedino moguće ostvarivo ako je ispunjen kriterij dan jednadžbom (67) pa se u okviru grafičke prezentacije prvo analiziraju takvi slučajevi.

##### 3.1.1. *Grafički prikaz toplinskog toka za slučajeve koji udovoljavaju kriteriju u jednadžbi (67)*

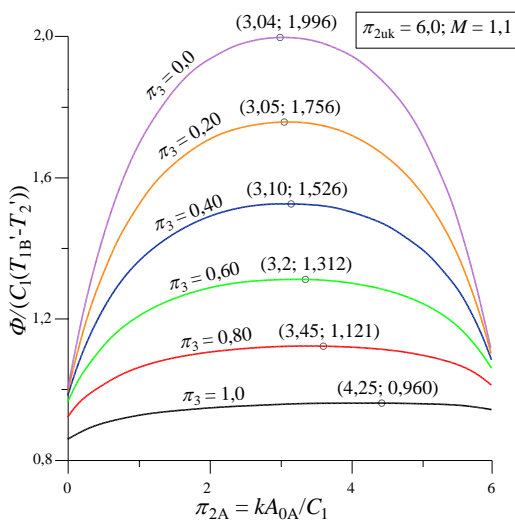
Dijagrami na slikama 11 – 14 prikazuju zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o veličini  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$ . Svi dijagrami imaju fiksnu vrijednost  $\pi_{2uk} = 6,0$ , a dodatno svaki dijagram ima također zadanu vrijednost  $M = 0,50; 1,0; 1,1$  i  $1,14$ . Te su konstantne vrijednosti odabrane tako da u svakom slučaju bude zadovoljen kriterij dan jednadžbom (67), s time da je vrijednost  $M = 1,14$  uzeta takva da se maksimum pojavi za  $\pi_3 = 1,0$  pri  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk} = 6,0$ , što upravo pokazuje i dijagram na slici 14. Ta vrijednost je upravo ona granična vrijednost kriterija (67) za dane parametre. Prikazani rezultati su dobiveni prema jednadžbi (13) uključujući i specijalne slučajeve dane jednadžbama (37), (38) i (43).



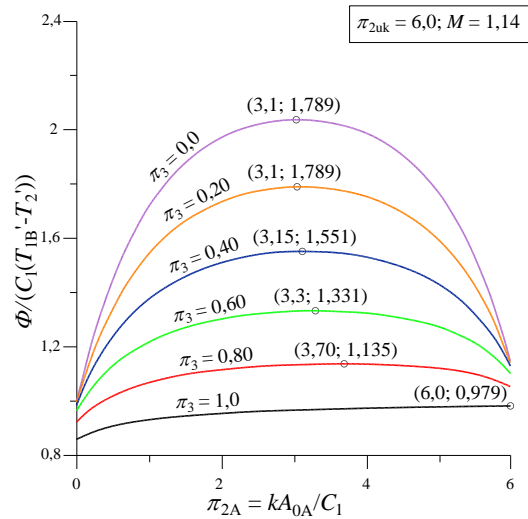
Slika 11. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  uz  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $M = 0,50$



Slika 12. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  uz  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $M = 1,0$



Slika 13. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  uz  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $M = 1,1$



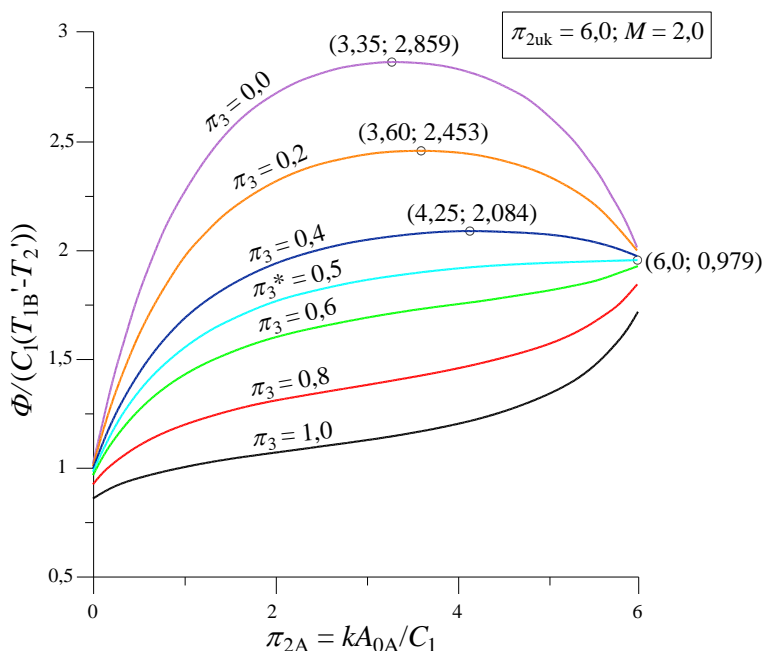
Slika 14. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  uz  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $M = 1,14$

Svi dijagrami pokazuju, a što je u skladu s usvojenim kriterijem, da u svim slučajevima postoji maksimalna vrijednost, kao lokalni ekstrem, bezdimenzijskog toplinskog toka. Također dotični dijagrami prikazuju na svojim krajevima  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  vrijednosti ostvarenih toplinskih tokova kod klasičnih (neumreženih) protusmjernih rekuperatora. Tako se za  $\pi_{2A} = 0,0$  radi o rekuperatoru u kojem na jednom kraju ulazi struja temperature  $T_{1B}'$ , a na

drugom kraju ulazi struja temperature  $T_2'$ . Za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , radi se također o neumreženom rekuperatoru ulaznih temperatura  $T_2'$  i  $T_{1A}'$ . Vrijednosti toplinskih tokova za te neumrežene rekuperatore dane su jednadžbama (32), (33), (36a), (36b), (45a) i (45b). Evidentno je iz prikazanih dijagrama da su ostvarene vrijednosti toplinskih tokova tih rekuperatora manje od vrijednosti umreženih rekuperatora s istim ulaznim temperaturama struja, što i dijagramski pokazuje i dokazuje navedenu hipotezu.

Iz dijagramskih prikaza je vidljivo da toplinski tok, a time i maksimalni toplinski tok, raste s porastom  $\pi_{2uk}$  i  $M$ , ali se smanjuje s porastom vrijednosti  $\pi_3$ . Iz navedenih dijagrama se vidi da se u svim slučajevima postižu optimalne vrijednosti  $\pi_{2opt}$ , a čije su vrijednosti određene jednadžbama (37), (46) i (52) – (61). Za  $M = 1,0$  sve parametarske vrijednosti imaju iste vrijednosti  $\pi_{2Aopt} = 3$ , što znači, kao što pokazuje i dijagram na slici 12, da sve parametarske krivulje  $0 \leq \pi_3 \leq 1,0$  pokazuju simetrične vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka. Također je iz navedenih dijagrama razvidno da se omjeri maksimalnog toka umreženog rekuperatora i toplinskog toka neumreženog rekuperatora, definiranih jednadžbama (70) i (71), smanjuju s povećavanjem vrijednosti  $\pi_3$ , što znači da su isti najveći za  $\pi_3 = 0,0$  a najmanji za  $\pi_3 = 1,0$ . Ta činjenica vodi na zaključak da će efekt umrežavanja rekuperatora, sa svrhom postizanja veće vrijednosti maksimalnog toplinskog toka, biti jače izražen pri nižim vrijednostima veličine  $\pi_3$ .

Ako se promatrani slučaj analizira sa  $M = 2,0$  tada se dobiju rezultati proračuna koje prikazuje dijagram na slici 15. Daljnja analiza obuhvaća slučaj kada varijabla  $M$ , shodno jednadžbi (69) leži u intervalu  $1,14 < M = 2,0 < 403$ , pa dijagram na slici 15 pokazuje zanimljivo ponašanje vrijednosti  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$  u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  za odabranu (konstantnu) vrijednost  $\pi_{2uk}$ . Pojedine parametarske krivulje  $\pi_3$  čije se vrijednosti kreću u intervalu  $0 \leq \pi_3 \leq \pi_3^*$  pokazuju postojanje maksimuma, dok preostale vrijednosti  $\pi_3$  takvo ponašanje više ne pokazuju, nego je evidentno da u tim slučajevima postoji kontinuirani porast vrijednosti  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$  nad cjelokupnim područjem vrijednosti varijable  $\pi_{2A}$ . Za te slučajeve najveće vrijednosti toplinskog toka dobivaju se za  $\pi_{2uk}$ . Vrijednost  $\pi_3^*$  predstavlja ustvari onu vrijednost varijable  $\pi_3$  za koju je  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}$ , a zbog složenosti jednadžbe (13) nije eksplicitno moguće naći vrijednost  $\pi_3^*$ , nego se problem rješava adekvatnim numeričkim postupkom. Tim numeričkim postupkom se za gornji slučaj dobije da je vrijednost  $\pi_3^* = 0,5$ , tako da dijagram na slici 15 pokazuje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  s pripadajućim  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  za upravo taj postojeći interval varijable  $\pi_3$ ,  $0 \leq \pi_3 \leq \pi_3^* = 0,5$ .



Slika 15. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$

Za ostale vrijednosti  $0,5 < \pi_3 \leq 1,0$  vidi se da vrijednosti bezdimenzijskog toka kontinuirano rastu s porastom  $\pi_{2A}$ , i najveće se vrijednosti postižu za  $\pi_{2uk}$ .

### 3.1.2. Grafički prikaz toplinskog toka za fiksne vrijednosti $M$ i $\pi_3$ za slučajeve koji udovoljavaju kriteriju u jednadžbi (69)

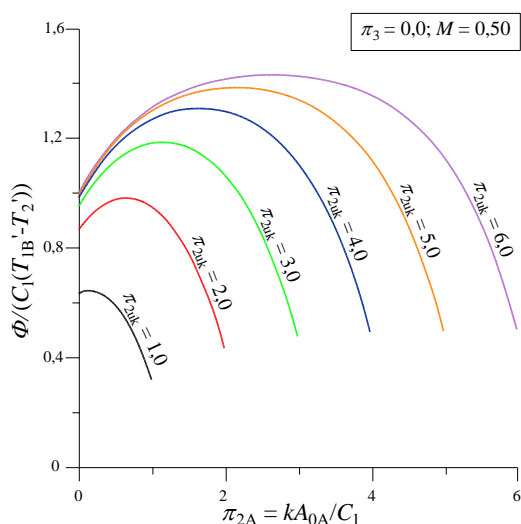
Sljedeći dijagramski prikazi prikazuju bezdimenzijske vrijednosti toplinskog toka također o veličini  $\pi_{2A}$ , na način da su uzete fiksne vrijednosti  $M$  i  $\pi_3$ , a u svakom dijagramu su parametarske vrijednosti  $1,0 \leq \pi_{2uk} \leq 6,0$  koje su stupnjevane po 1,0.

#### 3.1.2.1. Slučaj $\pi_3 = 0,0$

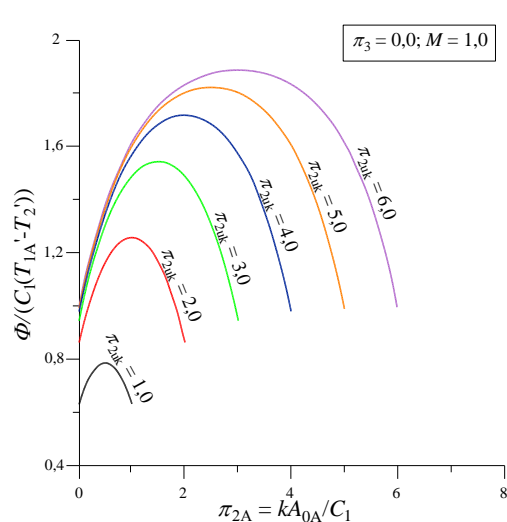
Dijagrami na slikama 16 – 18 prikazuju bezdimenzijske vrijednosti toplinskog toka umreženog protusmjernog rekuperatora za slučajeve  $\pi_3 = 0,0$ , dakle za slučajeve kada jača struja prolazi kroz faznu promjenu, isparivanje ili kondenzaciju. Ti su dijagramski prikazi praktični budući da svaka parametarska krivulja u navedenom dijagramu završava sa  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

Dijagram na slici 16 prikazuje vrijednosti  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$  u ovisnosti o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  za  $M = 0,5$ . Vidljivo je da dotične vrijednosti rastu s porastom  $\pi_{2uk}$  te da svaki parametar  $\pi_{2uk}$  dostiže lokalni maksimum  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$ , s pripadajućim  $\pi_{2Aopt}$ . Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  se povećavaju s porastom  $\pi_{2uk}$  i dobivaju se ako se u jednadžbu (37) uvrsti  $M = 0,5$  te slijedi

$$\pi_{2Aopt} = \frac{\pi_{2uk} - 0,6931}{2} \quad (110)$$



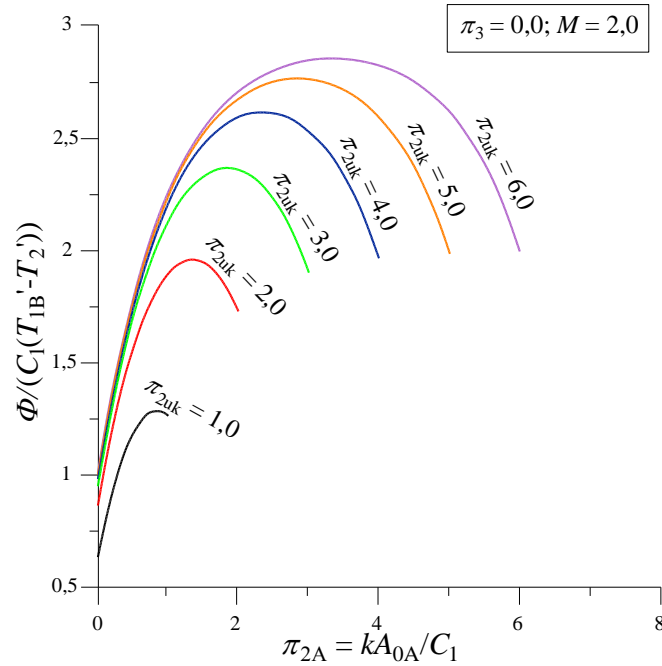
Slika 16. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $M = 0,50$



Slika 17. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $M = 1,0$

Dijagram na slici 17 prikazuje bezdimenzijski toplinski tok umreženog rekuperatora, za slučaj da je  $M = 1,0$ . Dijagram na gornjoj slici pokazuje da toplinski tok raste s porastom  $\pi_{2uk}$  i da svaki  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$  ima maksimum za  $\pi_{2opt} = \pi_{2uk}/2$ , a što također proizlazi iz jednadžbe (37), tako da su dobivene vrijednosti toplinskog toka, za svaki  $\pi_{2uk}$ , simetrične u odnosu na pripadajući  $\pi_{2uk}/2$ .

Ako se uzme da je  $M = 2,0$ , tada za promatrani slučaj, rezultate bezdimenzijskog toplinskog toka prikazuje dijagram na slici 18 iz kojeg je vidljivo da i ovdje toplinski tok raste s porastom  $\pi_{2uk}$  te da svaka krivulja postiže maksimum pri  $\pi_{2Aopt}$ , čiju se vrijednost dobiva ako se u jednadžbu (37) uvrsti  $M = 2,0$



Slika 18. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_3 = 0,0$

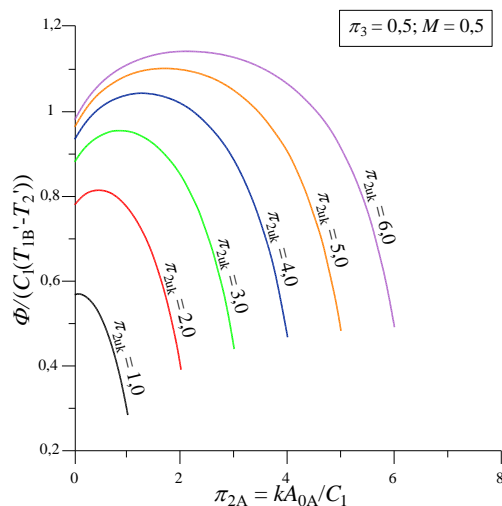
$$\pi_{2Aopt} = \frac{\pi_{2uk} + 0,6931}{2} \quad (111)$$

Važno je ovdje napomenuti, što se vidi iz dijagrama 16 - 18, da sve odabrane vrijednosti  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$ , postižu lokalne maksimume, što znači da svi promatrani slučajevi udovoljavaju kriteriju danim izrazom u jednadžbi (69). Usporedbom dobivenih vrijednosti bezdimenzijskih toplinskih tokova, vidi se da one rastu s porastom kako veličine  $\pi_{2uk}$  tako i veličine  $M$ . Dobivene maksimalne vrijednosti slijede iz jednadžbe (38), a vrijednosti na krajevima intervala tj. na  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  slijede iz jednadžbi (36a) i (36b). Nadalje se iz svih dijagrama može zaključiti da su vrijednosti toplinskih tokova za  $M < 1,0$  veće za  $\pi_{2A} = 0,0$  nego li na drugom kraju tj. za  $\pi_{2A} = \pi_{2Auk}$ . Situacija je obrnuto za  $M > 1,0$ , dok se za  $M = 1,0$ , dobivaju, kako je već naglašeno, iste vrijednosti.

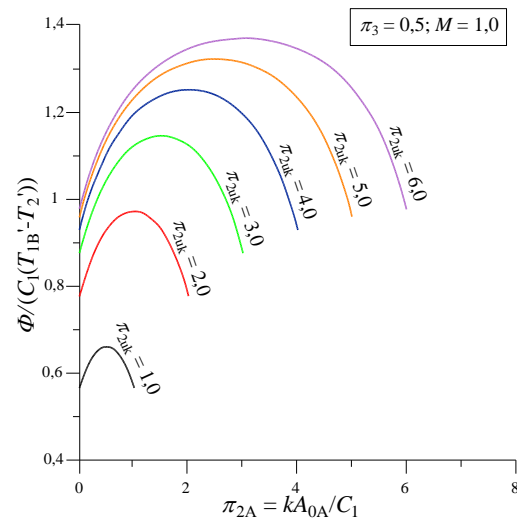


3.1.2.2. Slučaj  $\pi_3 = 0,5$ 

Dijagramski prikazi na slikama 19 – 21 prikazuju vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka u kojem je  $\pi_3 = 0,50$ , dok su ostale vrijednosti iste kao i u 3.1.2.1.



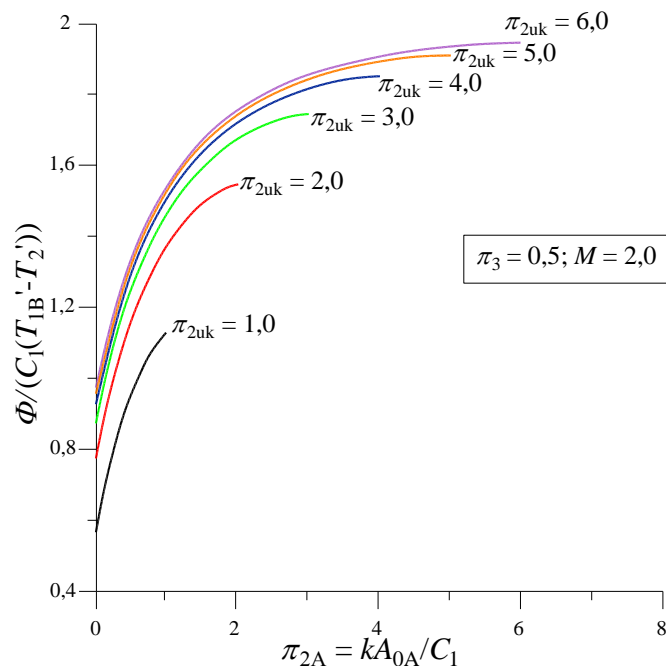
Slika 19. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $M = 0,50$



Slika 20. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $M = 1,0$

Dijagram na slici 19 prikazuje rezultate bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\pi_3 = 0,5$ , i  $M = 0,5$ , koji pokazuje sličnu zavisnost, ali i niže vrijednosti u odnosu na sliku 16. Sličnost se naglašava zbog činjenice da se i u ovom slučaju  $\pi_3 = 0,5$  pojavljuju lokalni maksimumi toplinskog toka  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$ , dakako uz pripadajuće  $\pi_{2opt}$ , za sve vrijednosti  $\pi_{2uk}$ . Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  lako se iznalaze iz jednadžbe (56), koja pokazuje već naglašenu činjenicu da u promatranom slučaju za sve vrijednosti  $0 \leq \pi_{2uk} \leq 6,0$  postoje lokalni ekstremi bezdimenzijskog toplinskog toka. Iz dijagramskog prikaza je vidljivo da rastu i  $\pi_{2Aopt}$  kao i pripadajući  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$  s porastom  $\pi_{2uk}$ .

Rezultate bezdimenzijskog toplinskog toka, za  $M = 1,0$ , prikazuje dijagram na slici 20, iz kojeg je evidentno da dotični toplinski tok raste s povećanjem  $\pi_{2uk}$ , te da svaki slučaj  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$ , pokazuje maksimum kao lokalni ekstrem, a što je ujedno i apsolutno najveći iznos toplinskog toka. Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  određuju se prema jednadžbi (34), iz koje je vidljivo da i u ovom slučaju za sve vrijednosti  $0 \leq \pi_{2uk} \leq 6,0$  postoje lokalni ekstremi (maksimumi), čije kvantitativne vrijednosti prikazuje dijagram na slici 20.



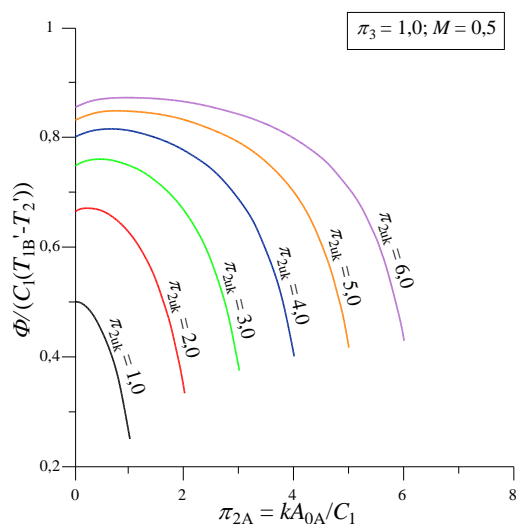
Slika 21. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_3 = 0,5$

Bezdimenzijske vrijednosti toplinskog toka pri istom  $\pi_{2uk}$  su veće negoli u slučaju slike 19. Također se uočava simetričnost dobivenih vrijednosti u odnosu na pripadajuće  $\pi_{2Aopt}$ , što znači da se za svaki  $\pi_{2uk} = konst.$ , dobivaju iste vrijednosti toplinskog toka za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

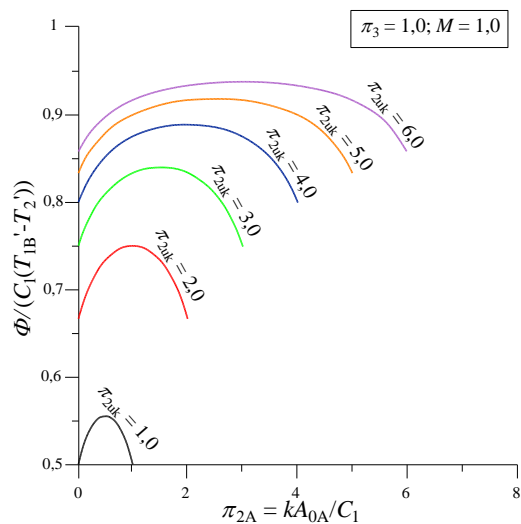
Slika 21 prikazuje za  $M = 2,0$ , ( $\pi_3 = 0,50$ ;  $0 \leq \pi_{2uk} \leq 6,0$ ) vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$ . Toplinski tok raste s porastom  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_{2A}$ , ali niti na jednoj krivulji  $\pi_{2uk} = konst.$  nije se pojavio lokalni maksimum. To samo znači da u tom slučaju nije niti za jedan slučaj nije zadovoljen kriterij maksimuma koji je prikazan jednadžbom (69). Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za  $M = 2,0$  i  $\pi_{2uk} = 1,0$ ;  $2,0$ ;  $3,0$ ;  $4,0$ ;  $5,0$  i  $6,0$  iznose, shodno jednadžbi (57),  $1,282$ ;  $2,176$ ;  $3,109$ ;  $4,067$ ;  $5,040$  i  $6,025$ . Dakle, evidentno je da su sve vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  veće od pripadajućih vrijednosti  $\pi_{2uk}$ . Stoga se u promatranom slučaju najveće vrijednosti toplinskog toka dobivaju za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , dakle za slučaj običnog protusmjernog rekuperatora zadane ukupne površine  $\pi_{2uk}$ , u kojem na jednom kraju ulazi jača struja ulazne temperature  $T_2'$ , a na drugom kraju slabija struja ulazne temperature  $T_1'A$ . Prema tome, za ove slučajeve nema smisla umrežavati protusmjerni rekuperator.

3.1.2.3. Slučaj  $\pi_3 = 1,0$ 

Dijagrami na slikama 22 – 24 prikazuju bezdimenzijski toplinski tok za slučajeve izbalansiranog umreženog protusmjernog rekuperatora  $\pi_3 = 1,0$ ;  $1,0 \leq \pi_{2uk} \leq 6,0$ , ali kao u prethodnim slučajevima za  $M = 0,50$ ;  $1,0$  i  $2,0$ .

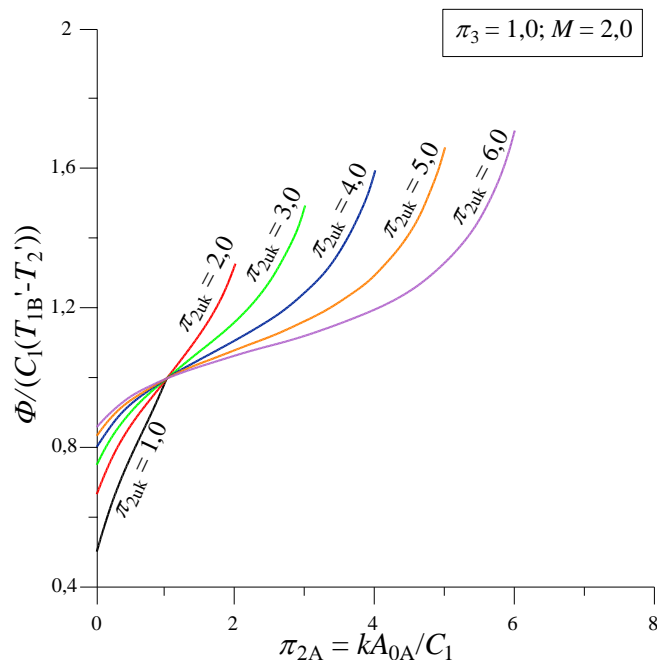


Slika 22. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $M = 0,50$



Slika 23. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $M = 1,0$

Dijagrami na slikama 22 – 24 prikazuju bezdimenzijske toplinske tokove u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i dotične su vrijednosti slične, ali niže od prethodna dva slučaja  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 0,5$ . Na dijagramu na slici 22 za uočiti je da sve parametarske vrijednosti  $\pi_{2uk} = 1,0 - 6,0$  postižu lokalni ekstrem, čije su pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$ . Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  se dobivaju za  $M = 0,50$  iz jednadžbe (46), a pripadajuće vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  se dobivaju po uvrštavanju  $\pi_{2Aopt}$  iz jednadžbe (46) u jednadžbu (43). To znači da je u ova dva slučaja udovoljeno kriteriju u jednadžbi (69). Vidi se da u ovom slučaju toplinski tok raste s porastom  $\pi_{2uk}$  te da se lokalni maksimumi postižu pri vrlo malim vrijednostima  $\pi_{2Aopt}$ . I u ovom su slučaju krajnje vrijednosti toplinskog toka na  $\pi_{2A} = 0,0$  veće od vrijednosti na  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , budući je u promatranom slučaju  $M = 0,50 < 1,0$ .



Slika 24. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_3 = 1,0$

Dijagram na slici 23 prikazuje bezdimenzijske vrijednosti toplinskog toka za  $M = 1,0$  ovog izbalansiranog rekuperatora. Evidentno je i u ovom slučaju da za sve parametarske vrijednosti  $\pi_3 = \text{konst.}$ , postoje maksimumi kao lokalni ekstremi, a što su ujedno i apsolutno najveće vrijednosti ostvarenog bezdimenzijskog toplinskog toka. Iz dijagrama se lako iščitava da dotični toplinski tok raste s porastom  $\pi_{2uk}$ , i da te razlike između dviju susjednih  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$  postaju manje s povećanjem  $\pi_{2uk}$ . Nadalje, i ovdje se vidi da se vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , za koje se postižu ti maksimumi, jednaki  $\pi_{2uk}/2$ , što znači da su vrijednosti toplinskog toka za svaki  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$  simetrični obzirom na  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}/2$ , pa se dobiju iste vrijednosti toplinskog toka za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Za  $M = 1,0$ ,  $\pi_{2Aopt}$  određen je jednadžbom (48), a pripadajući maksimum eksplicitno je determiniran jednadžbom (49).

Dijagram na slici 24, pokazuje da za  $M = 2,0$  ne postoje lokalni maksimumi, nego vrijednosti  $\Phi / (C_1(T_{1B}' - T_2'))$  kontinuirano rastu s povećanjem  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$ . Zanimljivo je uočiti da sve parametarske vrijednosti  $\pi_{2uk} = 1,0 - 6,0$  postižu za  $\pi_{2A} = 1,0$  istu jediničnu vrijednost. No to vrijedi samo za  $M = 2,0$ , što se lako dokazuje ako se u jednadžbu (43) uvrsti  $M = 2,0$  i  $\pi_{2A} = 1,0$ .

$$\begin{aligned} \frac{\Phi}{C_1(T_{1B}' - T_2')} &= M \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \left( 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \right) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \\ &= 2 \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk}} \right) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk}} = 1,0 \end{aligned} \quad (112)$$

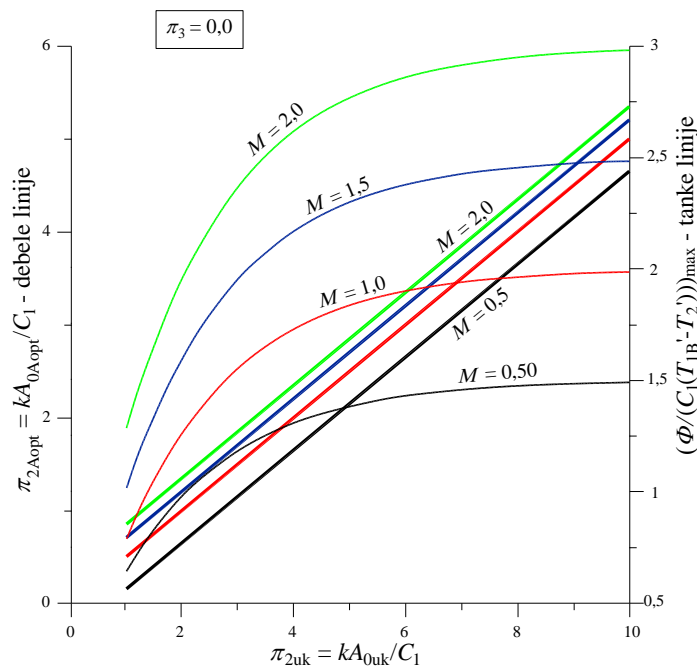
Razvidno je da se vrijednosti  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$  povećavaju s porastom  $\pi_{2uk}$  ako se veličina  $\pi_{2A}$  kreće u intervalu  $0 \leq \pi_{2A} < 1,0$ . Za  $\pi_{2A} > 1,0$  situacija je drugačija u smislu da je iznos  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))$  veći za niže vrijednosti  $\pi_{2uk}$ , a što se odnosi samo do granične vrijednosti veličina  $\pi_{2uk}$ . To samo znači da jednadžba (43) za  $M = 2,0$ ;  $\pi_3 = 1,0$  ima točku infleksije s koordinatama  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  i  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2')) = 1,0$  za sve parametarske krivulje  $1 < \pi_{2uk} \leq 6,0$ , što kvantitativno i potvrđuje dijagram na slici 24. Zanimljivo je zaključiti da se u tom slučaju, dakle za  $M = 2,0$ ;  $\pi_3 = 1,0$  za  $\pi_{2A} = 1,0$ , dobiva ista vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka  $\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2')) = 1,0$  neovisno o iznosu ukupne izmjenjivačke površine  $\pi_{2uk}$ .

### 3.1.3. Detaljnija analiza postignutih maksimalnih toplinskih tokova

U prethodnim poglavljima 3.1.1 i 3.1.2 analiziran je širi pristup zavisnosti bezdimenzijskog toplinskog toka o utjecajnim varijablama;  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_3$ ,  $M$  i  $\pi_{2A}$ . U okviru dotične analize provjeravan je i kriterijski uvjet, jednadžba (69), glede postizanja maksimalnog toplinskog toka, kao lokalnog ekstrema, a što znači da je taj toplinski tok, umreženog rekuperatora, veći od ostvarenih toplinskih tokova klasičnog (neumreženog) rekuperatora kod kojeg je ili  $\pi_{2A} = 0,0$  ili  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Stoga se u ovom poglavlju detaljnije razrađuju upravo slučajevi kod kojih postoje dotični maksimumi kao lokalni ekstremi.

#### 3.1.3.1. Slučaj $\pi_3 = 0,0$

Dijagram na slici 25 prikazuje zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka i pripadajućih vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  u zavisnosti o  $\pi_{2uk}$  i  $M$  za slučaj umreženog rekuperatora kod kojeg je jača struja izložena faznoj promjeni, tj. radi se o umreženom kondenzatoru ili umreženom isparivaču pa je u tom slučaju  $\pi_3 = 0,0$ . Iz dijagrama je vidljivo da je veličina  $\pi_{2uk}$  varirana u intervalu  $1 \leq \pi_{2uk} \leq 10,0$ , a veličina  $M$  je varirana unutar intervala  $0,5 \leq M \leq 2,0$  s prirastom  $\Delta M = 0,50$  te se za sve te slučajeve dobivaju maksimalne vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$ , što je također u skladu s dijagramskim prikazima 11 – 18.



Slika 25. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2')))_{\max}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o veličinama  $M$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,0$

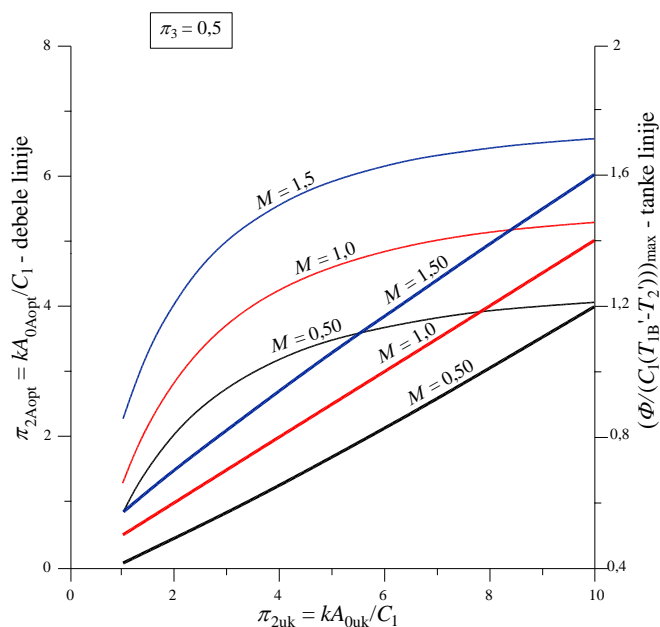
Lijeva ordinatna os gornjeg dijagrama prikazuje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i dotične su vrijednosti računane prema jednadžbi (37), koja pokazuje, što se vidi i iz gornjeg dijagrama, da vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za  $\pi_{2uk} = \text{konst.}$  slijede zakon pravca. Vidi se da vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  rastu s porastom  $\pi_{2uk}$  i s porastom  $M$ , a što je u skladu s dijagramskim prikazima na slikama 11 – 18. Prikazani pravci su međusobno paralelni, a što je u skladu s jednadžbom (37), jer imaju isti koeficijent smjera  $\pi_{2uk}/2,0$ . S druge pak strane maksimalne vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2')))_{\max}$ , desna ordinatna os, određene su jednadžbom (38) i gornji dijagram jasno pokazuje da se dotične vrijednosti povećavaju kako s porastom  $\pi_{2uk}$  tako i s porastom veličine  $M$ . Razlike dotičnih vrijednosti obzirom na varijablu  $M$  se povećavaju s povećavanjem  $\pi_{2uk}$ , i to je povećanje jače izraženo za niže vrijednosti  $\pi_{2uk}$ . Također je iz gornjeg dijagrama evidentno da se vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2')))_{\max}$ , za zadani  $M$ , približavaju relativno brzo svojim asimptotskim vrijednostima, a koje se dobiju ako se u jednadžbu (38) uvrsti da  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , pa se može pisati

$$\lim_{\pi_{2uk} \rightarrow \infty} \left( \frac{\Phi}{C_1(T_{1B}' - T_2')} \right)_{\max} = \lim_{\pi_{2uk} \rightarrow \infty} \left( M + 1 - 2\sqrt{M} \exp\left(-\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) \right) = M + 1 \quad (113)$$

Asimptotske vrijednosti za  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$  iznose  $1,50; 2,0; 2,50$  i  $3,0$ , što potvrđuje i dijagramski prikaz na slici 25. Dijagram jasno pokazuje da za  $\pi_{2uk} > 6,0$  maksimalne vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  praktički pokazuju, uz pripadajući  $M$ , zanemarivo povećavanje.

### 3.1.3.2. Slučaj $\pi_3 = 0,5$

Ako se uzme da je  $\pi_3 = 0,50$ , tada se dobiju vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  koje dijagramski prikazuje slika 26.



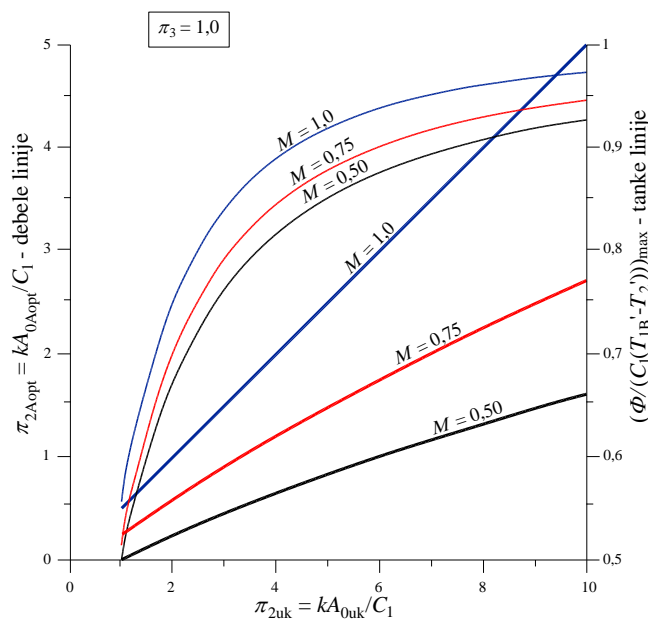
Slika 26. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o veličinama  $M$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,5$

Dijagram na slici 26 pokazuje da i ovom slučaju vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , lijeva ordinatna os, rastu kako s porastom  $\pi_{2uk}$  tako i s porastom veličine  $M$ . No, to više nije linearna zavisnost, kao na slici 25, već su dotične vrijednosti određene jednadžbom (56). No za uočiti je da se u ovom slučaju vrijednosti  $M$  kreću u intervalu od  $0,50$  do  $1,50$ , što znači da ne postoje za  $M = 2,0$  vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , a time za tu vrijednost  $M$  ne postoji i maksimalni toplinski tok, kao lokalni ekstrem. Ta je činjenica potpuno u skladu s interpretacijom vezanom uz sliku 21, budući da  $M = 2,0$ , ne zadovoljava kriterij izražen jednadžbom (69).

Vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$  prikazuje desna ordinatna os dijagrama na slici 26, koja također pokazuje da i u ovom slučaju dotične vrijednosti rastu s povećanjem varijabli  $\pi_{2uk}$  i  $M$ . Te su vrijednosti kvantificirane na način da su vrijednosti dobivene prema jednadžbi (56) uvrštene u jednadžbu (13). Također se iz dijagrama na slici 26 može zaključiti da za  $M = \text{konst.}$  veličina  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$  teži također svojoj asimptotskoj vrijednosti, koju doduše nije moguće zbog složenosti funkcija u jednadžbama (56) i (13) eksplicirati, kao što je to bio prethodni slučaj, koji je opisan jednadžbom (107). Ako se ove vrijednosti  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$  usporede s vrijednostima danim slikom 25, vidi se da se u ovom slučaju postižu niže vrijednosti.

### 3.1.3.3. Slučaj $\pi_3 = 1,0$

Rezultate proračuna za ovaj slučaj prikazuje slika 27, a dotični su rezultati povezani s rezultatima danim dijagramom na slikama 11 – 14, odnosno 22 – 24. Evidentno je da se u promatranom slučaju ne postižu maksimumi toplinskog toka kako za  $M = 1,5$  tako i za  $M = 2,0$ , budući da su te obje vrijednosti veće od kriterijskih vrijednosti, koje shodno jednadžbi (67) iznose 1,333; 1,2857; 1,2308;...1,09 za  $\pi_{2uk} = 1,0 - 10,0$ . U promatrani su dijagram unesene vrijednosti i za  $M = 0,75$ .



Slika 27. Zavisnost bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{\max}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o veličinama  $M$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 1,0$



Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  određene su iz jednadžbe (46) koja za  $M = 0,50$  i  $0,75$  poprima eksplicitni oblik

$$\pi_{2Aopt}(M = 0,50; \pi_3 = 1,0) = \sqrt{3 + \pi_{2uk}} - 2 \quad (114)$$

$$\pi_{2Aopt}(M = 0,75; \pi_3 = 1,0) = \sqrt{15 + 3\pi_{2uk}} - 4 \quad (115)$$

Za  $M = 1,0$  već je pokazano jednadžbom (48) da je

$$\pi_{2Aopt}(M = 1,0; \pi_3 = 1,0) = \frac{\pi_{2uk}}{2} \quad (48)$$

Usporedbom vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  za ovaj slučaj, slika 27, s vrijednostima na slikama 25 i 26 vidljivo je da se u ovom slučaju dobivaju najveće dotične vrijednosti pa se može generalno zaključiti da vrijednosti veličine  $\pi_{2Aopt}$  rastu s povećavanjem  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_3$  i  $M$ , ali se s povećavanjem  $\pi_3$  smanjuje vrijednost varijable  $M$  pri kojoj se javljaju maksimalni toplinski tokovi umreženog rekuperatora.

Pripadajuće maksimalne vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka za  $M = 0,50$  i  $0,75$ , desna ordinata na slici 27, dobiju se uvrštavanjem jednadžbi (114) i (115) u jednadžbu (43), s time da je za  $M = 1,0$  bezdimenzijski toplinski tok određen jednadžbom (49).

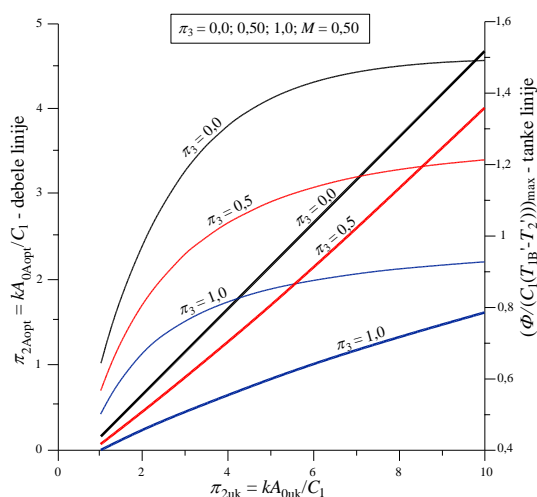
$$\left( \frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\max; \pi_3=1,0; M=0,50} = \frac{0,5(\sqrt{3 + \pi_{2uk}} - 2) + (\sqrt{3 + \pi_{2uk}} - 1)(\pi_{2uk} - \sqrt{3 + \pi_{2uk}} + 2)}{(\sqrt{3 + \pi_{2uk}} - 1)(\pi_{2uk} - \sqrt{3 + \pi_{2uk}} + 3)} \quad (116)$$

$$\left( \frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} \right)_{\max; \pi_3=1,0; M=0,75} = \frac{0,75(\sqrt{15 + 3\pi_{2uk}} - 4) + (\sqrt{15 + 3\pi_{2uk}} - 3)(\pi_{2uk} - \sqrt{15 + 3\pi_{2uk}} + 4)}{(\sqrt{15 + 3\pi_{2uk}} - 3)(\pi_{2uk} - \sqrt{3 + \pi_{2uk}} + 5)} \quad (117)$$

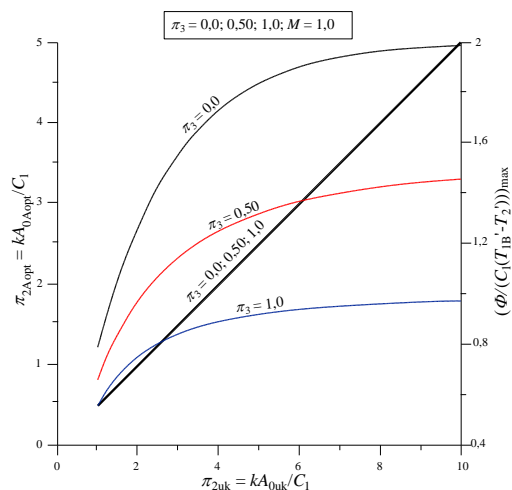
Iz dijagramskog prikaza se može zaključiti da vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka i u ovom slučaju rastu s porastom kako veličine  $M$  tako i s porastom veličine  $\pi_{2uk}$ , a ono što ovaj slučaj razlikuje od prethodna dva, jest činjenica da sve parametarske krivulje  $M = \text{konst.}$  teže jedinici, asimptotskoj vrijednosti, kada veličina  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , a što se lako izravno dokazuje iz izraza u jednadžbama (49), (116) i (117).

Međusobnom usporedbom rezultata danim slikama 25, 26 i 27 može se zaključiti da se, za zadanu vrijednost veličine  $M$ , postižu vrijednosti maksimalnih toplinskih tokova bliske asimptotskim vrijednostima pri nižim vrijednostima veličine  $\pi_3$  i da s porastom  $\pi_3$ , za zadani  $M$ , se smanjuju vrijednosti bezdimenzijskog maksimalnog toplinskog toka.

Navedene zaključke glede kvantitativnog utjecaja relevantnih varijabli na iznose veličina  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$  praktično je prikazati u zajedničkim dijagramima, stoga dijagrami na slikama 28 i 29 prikazuju vrijednosti dotičnih veličina za vrijednosti  $M = 0,50$  i  $1,0$  za  $\pi_3 = 0,0; 0,50$  i  $1,0$ . Uzete su vrijednosti za  $M = 0,50$  i  $1,0$  zato što za njih u dosadašnjim razmatranim slučajevima postoje vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{max}$ .



Slika 28. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  uz  $M = 0,50$

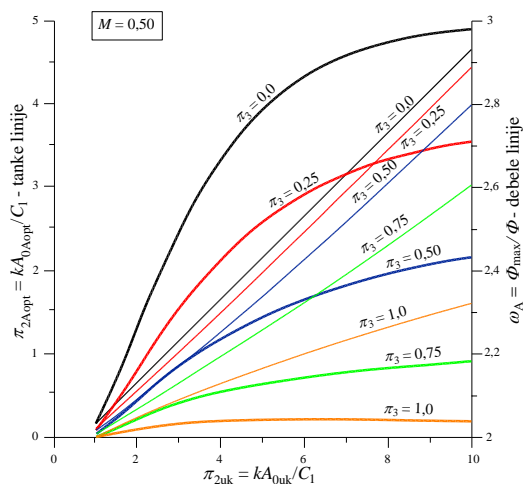


Slika 29. Zavisnost maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  uz  $M = 1,0$

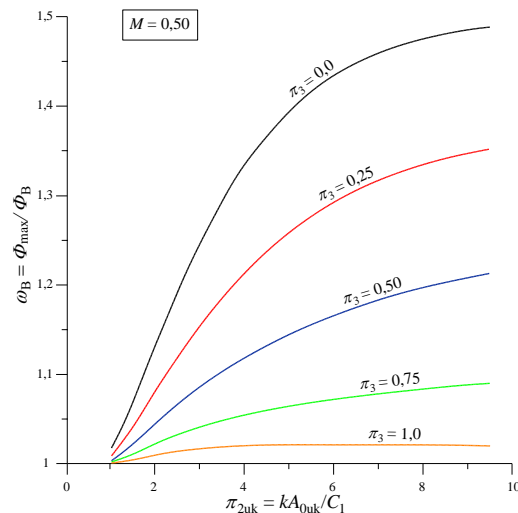
I na kraju ove analize za zaključiti je da se s povećavanjem veličine  $\pi_3$  smanjuje vrijednost veličine  $M$  za koju se postiže vrijednost maksimalnog toplinskog toka, a što i jest već naglašeno vezano uz dijagramske prikaze na slikama 26 i 27.

### 3.1.4. Analiza veličina $\omega_A$ i $\omega_B$

Veličine  $\omega_A$  i  $\omega_B$  definirane su jednadžbama (70) i (71) i prikazuju omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora i neumreženog rekuperatora A ili rekuperatora B.



Slika 30. Zavisnost  $\omega_A$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 0,5$



Slika 31. Zavisnost  $\omega_B$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 0,5$

Kao što pokazuju dijagrami na slikama 11, 16, 19 i 22 za  $M < 1,0$  se dobivaju veći toplinski tokovi za  $\pi_{2A} = 0,0$  u odnosu na slučaj  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , tj. kada je rekuperator B neumreženi rekuperator te se u tim slučajevima dobiva da je  $\omega_B < \omega_A$ , kako to kvantitativno prikazuju dijagrami na slikama 30 i 31.

Lijeva ordinatna os, odnosi se na tanje linije, dijagrama na slici 30 pokazuje zavisnost veličine  $\pi_{2Aopt}$ , za koju se postiže maksimalni toplinski tok, a desna ordinatna os, deblje linije, prikazuje zavisnost veličine  $\omega_A$  o ukupnoj izmjenjivačkoj površini umreženog rekuperatora  $\pi_{2uk}$  i veličini  $\pi_3$  uz  $M = 0,5$ .

Dijagram pokazuje da omjer  $\omega_A$  raste s povećavanjem  $\pi_{2uk}$ , ali se smanjuje s povećavanjem veličine  $\pi_3$ . Također se zaključuje da je veći utjecaj veličine  $\pi_3$  pri većim vrijednostima veličine  $\pi_{2uk}$ . Vidi se da sve parametarske veličine  $\pi_3 = \text{konst.}$  teže svojim asimptotskim vrijednostima, za  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , koje zbog složenosti jednadžbe (70) nije moguće analitički nego samo numerički riješiti pa za vrijednosti  $\pi_3 = 0,0; 0,25; 0,50; 0,75$  i  $1,0$  pripadajuće asimptotske vrijednosti veličine  $\omega_A$  iznose:  $3,0; 2,75; 2,50; 2,25$  i  $2,0$ . Od svih parametarskih vrijednosti  $\pi_3 = \text{konst.}$ , jedina  $\pi_3 = 1,0$  postiže maksimum kao lokalni ekstrem i koji se za promatrani slučaj javlja pri  $\pi_{2uk} = 6,0$  uz maksimalni iznos  $\omega_{Amaks} = 2,042$ , što znači da u tom slučaju  $\omega_A$  prvo raste od vrijednosti  $1,00$  za  $\pi_{2uk} = 1,0$ , postiže naznačeni maksimum, a zatim se smanjuje na vrijednost  $2,037$  za  $\pi_{2uk} = 10,0$ . Koordinate maksimuma  $(6,0; 2,042)$  također su određene računskim putem. Za zaključiti je da svi slučajevi prikazani u dijagramu

na slici 30 postižu maksimalni toplinski tok kao lokalni ekstrem, što znači da svi slučajevi udovoljavaju utvrđenom kriteriju, jednadžba (67).

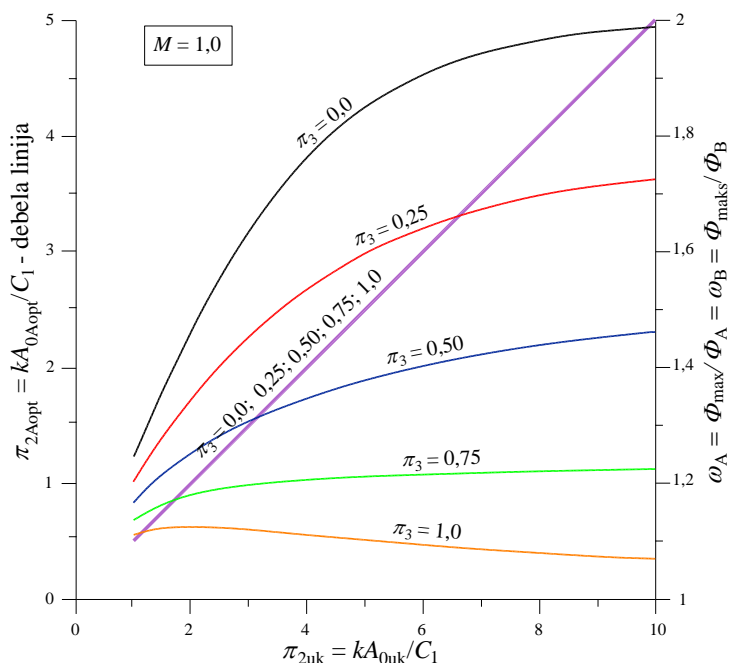
Dijagram na slici 31 pokazuje vrijednosti  $\omega_B$  za iste vrijednosti veličina kao i na slici 30. U dotični dijagram nisu ucrtane vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , budući da su one identične vrijednostima prikazanim na dijagramu 30. I ovaj dijagram pokazuje da vrijednosti  $\omega_B$  kontinuirano rastu s porastom  $\pi_{2uk}$ , osim  $\pi_3 = 1,0$ , koja pokazuje jedan lokalni ekstrem i to  $\omega_{Bmaks} = 1,017$  na  $\pi_{2uk} = 5,23$ . Pripadajuće vrijednosti  $\omega_B$  su manje od vrijednosti  $\omega_A$ , a što je u skladu s fizikalnom realnosti, budući se za oba slučaja radi o istoj vrijednosti  $\Phi_{maks}$ , a za  $M < 1,0$  je  $\Phi_B > \Phi_A$ . Također se nazire iz dijagrama na slici 31 da sve vrijednosti  $\omega_B$  teže konačnim asimptotskim vrijednostima uz hipotetski slučaj  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ . Ispis rezultata proračuna prevedenim numeričkim postupkom daje za redom navedene vrijednosti veličine  $\pi_3$  sljedeće vrijednosti  $\omega_B(\pi_{2uk} \rightarrow \infty)$ : 1,50; 1,375; 1,25; 1,125 i 1,0. Vidi se da su te vrijednosti dvostruko manje od  $\omega_A(\pi_{2uk} \rightarrow \infty)$ , a što je u skladu s vrijednošću  $M = 0,50$ .

Dijagram na slici 32 pokazuje vrijednosti  $\omega_A = \omega_B = f(\pi_{2uk}, \pi_3)$  za  $M = 1,0$ . Ove su vrijednosti međusobno jednake jer su  $M = 1,0$  fizikalno nametnuti uvjeti simetrije, što se vidi na dijagramskim prikazima na slikama 12, 17, 20 i 23. Lijeva ordinatna os dijagrama na slici 32 prikazuje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se dobiva maksimalni toplinski tok i dotične vrijednosti leže na pravcu, neovisno  $\pi_3$ ,  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}/2$ . Desna ordinatna os predstavlja vrijednosti  $\omega_A = \omega_B$ , deblje linije, u zavisnosti o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$ . Vidi se da i u ovom slučaju cjelokupno odabrano područje varijabli postiže maksimalni toplinski tok kao lokalni ekstrem, što znači da je i u ovom slučaju udovoljen istraženi kriterij dan jednadžbom (67). Dijagram pokazuje signifikantan utjecaj veličine  $\pi_3$ , s čijim porastom se smanjuje vrijednost  $\omega_A = \omega_B$ . S porastom veličine  $\pi_{2uk}$  kontinuirano raste vrijednost  $\omega_A = \omega_B$ , osim za vrijednost  $\pi_3 = 1,0$ , za koju se pojavljuje lokalni ekstrem i to maksimum.

Koordinate dotičnog maksimuma lako je odrediti i analitički jer se dotični problem svodi na omjer jednadžbi (49) i (45a) iz kojeg se dobiva sljedeći oblik jednadžbe:

$$\omega_A = \omega_B = \frac{(\pi_{2uk} + 4)(\pi_{2uk} + 1)}{(\pi_{2uk} + 2)^2} \quad (118)$$

Derivirajući izraz (118) po  $\pi_{2uk}$  i izjednačivši vrijednost dobivene derivacije s nulom dobiva se  $\pi_{2ukopt} = 2,0$ , te vrativši tu vrijednost u jednadžbu (118) dobiva se vrijednost traženog lokalnog ekstrema  $\omega_{Amaks} = \omega_{Bmaks} = 9/8 = 1,125$ .

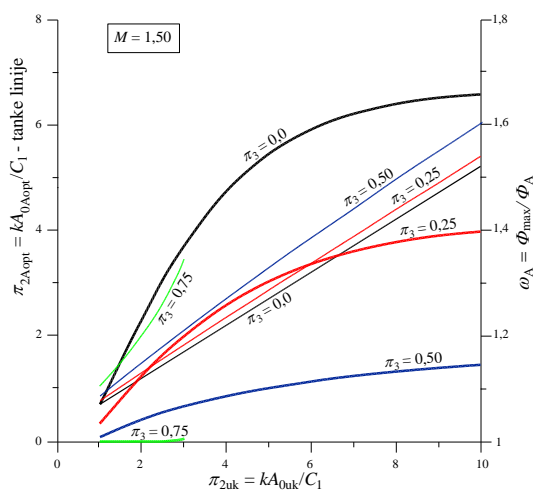


Slika 32. Zavisnost  $\omega_A$  i  $\omega_B$  kao i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  uz  $M = 1,0$

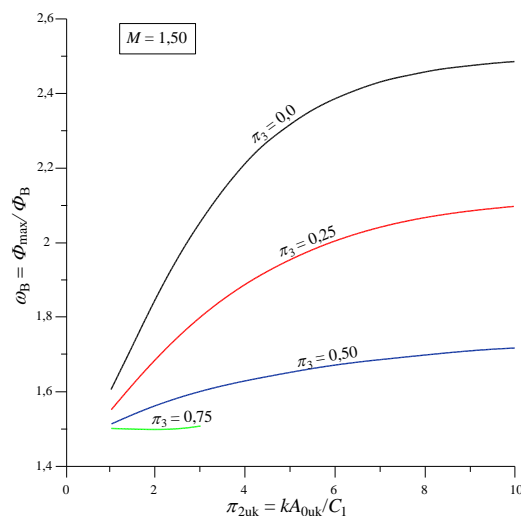
Također se iz slike 32 zaključuje da svaka parametarska krivulja  $\pi_3 = \text{konst.}$  teži svojoj asimptotskoj vrijednosti kada hipotetski veličina  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ . Iz jednadžbe (118) se može izravno zaključiti da je  $\omega_A(\pi_{2uk} \rightarrow \infty; \pi_3 = 1,0) = \omega_B(\pi_{2uk} \rightarrow \infty; \pi_3 = 1,0) = 1,0$ , dok se za ostale vrijednosti  $\pi_3$  asimptotske vrijednosti iznalaze numeričkim postupkom i za  $\pi_3 = 0,0; 0,25; 0,5$  i  $0,75$  redom iznose:  $2,0; 1,75; 1,50$  i  $1,25$ .

Za  $M = 1,50$  lijeva ordinatna os na slici 33 pokazuje zavisnost veličina  $\pi_{2Aopt}$ , tanke linije, i  $\omega_A$  o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$ . Za razliku od dijagrama na slikama 30 i 32, vidi se da u ovom slučaju kriterijima danima jednadžbom (69) udovoljavaju parametarske vrijednosti  $\pi_3 = 0,0; 0,25$  i  $0,50$  za sve odabrane vrijednosti  $\pi_{2uk}$ , dok za  $\pi_3 = 0,75$  samo je zadovoljen interval  $1 \leq \pi_{2uk} \leq 3,0$ . Parametarska vrijednost  $\pi_3 = 1,0$  ne udovoljava postavljenom kriteriju, stoga ne može biti u dijagramskom prikazu. I u ovom slučaju veličina  $\omega_A$  raste s porastom  $\pi_{2uk}$ , ali se smanjuje s porastom  $\pi_3$ . Utjecaj veličine  $\pi_3$  postaje izraženiji porastom  $\pi_{2uk}$ . Iz dijagrama se također može zaključiti da parametarske vrijednosti  $\pi_3 = 0,0; 0,25$  i  $0,50$  teže također svojim

asimptotskim vrijednostima, kada  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ , a dotične vrijednosti  $\omega_A(\pi_{2uk} \rightarrow \infty)$ , shodno ispisu iz numeričkog proračuna, redom iznose: 1,67; 1,42 i 1,167.



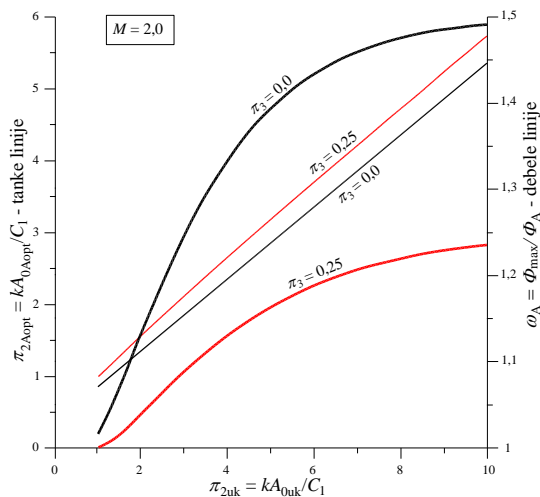
Slika 33. Zavisnost  $\omega_A$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 1,5$



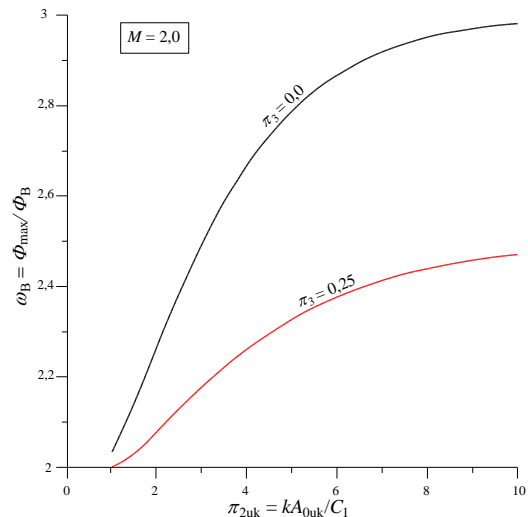
Slika 34. Zavisnost  $\omega_B$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 1,5$

Dijagram na slici 34 prikazuje zavisnost  $\omega_B = f(\pi_{2uk}, \pi_3)$  i koji pokazuje slično ponašanje kao i na slici 33, samo se ovdje radi o nižim vrijednostima veličine  $\omega_B < \omega_A$ . To jest i fizikalno opravdano budući da se radi o istim iznosima  $\Phi_{maks}$  za oba slučaja, ali je zbog  $M > 1,0$ ,  $\Phi_A > \Phi_B$ , kako to već prikazuju dijagrami na slikama 13, 14 i djelomično na slici 15. I u ovom dijagramu parametarske vrijednosti  $\pi_3 = 0,0; 0,25$  i  $0,50$  pokazuju da im iznosi teže asimptotskim vrijednostima za  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$  te iščitavanjem istih iz ispisa numeričkog postupka proračuna vrijednosti su: 2,50; 2,125 i 1,75.

Dijagram na slici 35 prikazuje zavisnost  $\pi_{2Aopt}$ , lijeva ordinatna os i tanke linije na slici, i  $\omega_A$ , desna ordinatna os, u zavisnosti o varijablama  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  ali uz  $M = 2,0$ . Iz dijagrama je jasno da kriterij dan jednadžbom (69) udovoljavaju samo vrijednosti  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 0,25$ , a što koincidira s dijagramskim prikazom na slici 18 i djelomično na slici 15. Lijeve ordinatne osi pokazuje da  $\pi_{2Aopt}$  raste s porastom  $\pi_3$ , dok se iz rezultata na desnoj ordinatnoj osi može zaključiti da  $\omega_A$  raste s porastom  $\pi_{2uk}$ , ali se smanjuje s porastom veličine  $\pi_3$ . I u ovom slučaju vrijednosti  $\omega_A$  teže svojim asimptotskim iznosima kada hipotetski  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ . Dotične vrijednosti za  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 0,25$  iznose: 1,50 i 1,25.



Slika 35. Zavisnost  $\omega_A$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 2,0$



Slika 36. Zavisnost  $\omega_B$  umreženog rekuperatora o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  za  $M = 2,0$

Dijagram na slici 36 prikazuje, za iste uvjete kao što su na slici 35, zavisnost veličine  $\omega_B$  o varijablama  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$ . Dobivene vrijednosti pokazuju slična ponašanja, s time da su vrijednosti  $\omega_B > \omega_A$ , a što jest u skladu s činjenicom da se u oba slučaja radi o istom maksimalnom toplinskom toku, ali je  $\Phi_B < \Phi_A$ . I na slici 36 obje krivulje  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 0,25$  također teže svojim asimptotskim vrijednostima za slučaj da teorijski  $\pi_{2uk} \rightarrow \infty$ . Ispis provedenog numeričkog proračuna pokazuje da te vrijednosti iznose:  $\omega_B(\pi_3 = 0,0; \pi_{2uk} \rightarrow \infty) = 3,0$ ;  $\omega_B(\pi_3 = 0,25; \pi_{2uk} \rightarrow \infty) = 2,50$ .

Analiza provedena pod 3.1.4 pokazuje da veličine  $\omega_A$  i  $\omega_B$  primjetno ovise o varijablama  $\pi_3$ ,  $\pi_{2uk}$  i  $M$ , na način da se smanjuju s porastom varijable  $\pi_3$ , a rastu s porastom varijable  $\pi_{2uk}$ .

Glede varijable  $M$  treba razlikovati tri slučaja:

- $M < 1,0$
- $M = 1,0$
- $M > 1,0$

Za  $M < 1,0$  je  $\Phi_A = f(\pi_{2A} = \pi_{2uk}, \pi_3) < \Phi_B = f(\pi_{2A} = 0, \pi_3)$ , što znači da je u tom slučaju  $\omega_A > \omega_B$ , i s porastom veličine  $M$  do vrijednosti 1,0 smanjuju se vrijednosti veličine  $\omega_B$ , a raste vrijednost veličine  $\omega_A$ . Za  $M = 1,0$  vrijedi jednakost  $\Phi_A = f(\pi_{2A} = \pi_{2uk}, \pi_3) =$

$\Phi_B = f(\pi_{2A} = 0, \pi_3)$  pa je tada i  $\omega_A = \omega_B$ . Za  $M > 1,0$  vrijedi nejednakost  $\Phi_A = f(\pi_{2A} = \pi_{2uk}, \pi_3) > \Phi_B = f(\pi_{2A} = 0, \pi_3)$  pa je  $\omega_A < \omega_B$ , i s povećavanjem  $M$  smanjuju se vrijednosti  $\omega_A$ , ali se povećavaju vrijednosti  $\omega_B$ .

Nadalje se može zaključiti da veličina  $M$  bitno utječe na činjenicu koliki će broj veličina  $\pi_3$  biti obuhvaćen da se udovolji kriteriju danom jednadžbom (69). Iz iznesenog se može zaključiti da su za razmatrane slučajeve vrijednosti  $\pi_3 = 0,0$  i  $0,25$  udovoljavale navedenom kriteriju. S povećavanjem veličine  $M$  smanjuje se broj radnih točaka umreženog rekuperatora u okviru kojih bi se pojavio željeni maksimalni toplinski tok kao lokalni ekstrem.

### 3.2. Slučajevi koji udovoljavaju kriterijima danim jednadžbama (50) i (51)

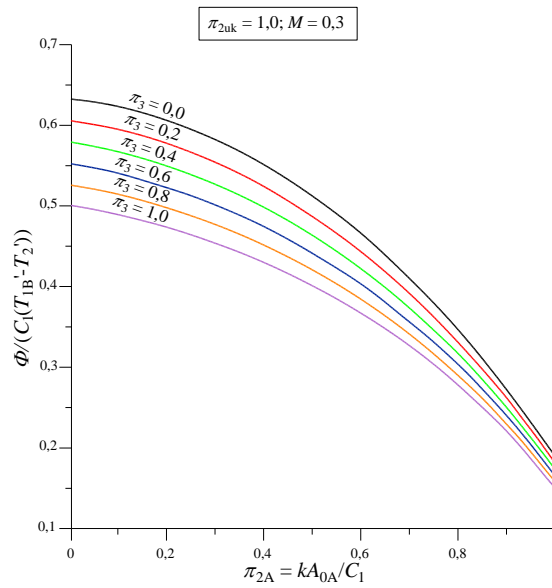
Ako veličina  $M$  poprima vrijednosti dane kriterijskim jednadžbama (50) i (51), tada ne postoji, za promatrani umreženi rekuperator, vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju bi se pojavila mogućnost postizanja maksimalnog toplinskog toka kao lokalnog ekstrema. Dotična tvrdnja kvantificirana je za vrijednost  $\pi_{2uk} = 1,0$ .

#### 3.2.1. Slučaj $\pi_{2uk} = 1,0$

##### 3.2.1.1. Slučaj $M < \exp(-\pi_{2uk})$

Prema jednadžbi (50) granični slučaj vrijednosti varijable  $M$  iznosi  $\exp(-\pi_{2uk}) = \exp(-1) = 0,3679$  pa se odabire slučaj da je  $M = 0,3 < 0,3679$ . Za promatrani slučaj dijagram na slici 37 prikazuje bezdimenzijski toplinski tok u zavisnosti o varijabli  $\pi_{2A}$  i varijabli  $\pi_3$ . Iz tog je dijagrama vidljivo da se vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka kontinuirano smanjuje, za svaki  $\pi_3 = \text{konst.}$ , s povećanjem varijable  $\pi_{2A}$  od  $\pi_{2A} = 0,0$  do  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 1,0$ . Nadalje se vidi da se vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka smanjuje s porastom  $\pi_3$ . No, ono što jest kao očekivana činjenica je evidentnost nepostojanja maksimuma kao lokalnog ekstrema, a najviše vrijednosti toplinskog toka, za pojedini  $\pi_3 = \text{konst.}$  se dobiju za  $\pi_{2A} = 0,0$ , a najniže vrijednosti za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 1,0$ .

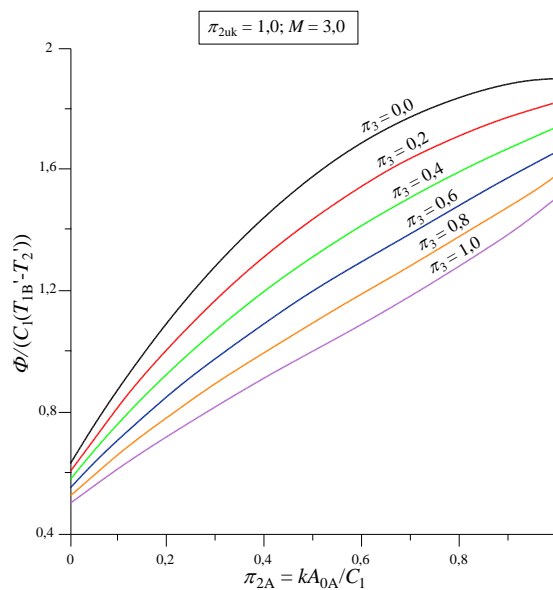




Slika 37. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  protusmjernog umreženog rekuperatora uz  $M = 0,3$ ;  $\pi_{2uk} = 1,0$

### 3.2.1.2. Slučaj $M > \exp(\pi_{2uk})$

Prema kriteriju danom u jednadžbi (51) uz odabrani  $\pi_{2uk} = 1,0$ , slijedi da vrijednost veličine  $M$  mora biti  $> \exp(1) = 2,718$  pa se za daljnji proračun uzima da je  $M = 3,0$ , a rezultate proračuna bezdimenzijskog toplinskog toka prikazuje dijagram na slici 38.

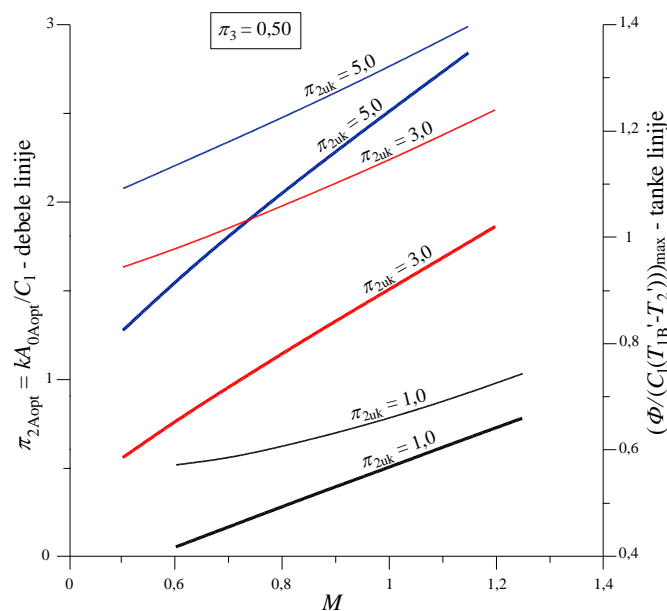


Slika 38. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  protusmjernog umreženog rekuperatora uz  $M = 3,0$ ;  $\pi_{2uk} = 1,0$

Dijagram na slici 38 pokazuje da u ovom slučaju bezdimenzijski toplinski tok, za  $\pi_3 = \text{konst.}$ , kontinuirano raste s porastom  $\pi_{2A}$ , za razliku od slučaja na slici 37. Također je evidentno da se dotične vrijednosti smanjuju s povećanjem veličine  $\pi_3$ . Važno je ovdje uočiti da se nije postigao niti u jednom slučaju maksimum kao lokalni ekstrem, a što kvantificira kriterij dan izrazom u jednadžbi (51).

U sljedećem dijagramskom prikazu kvantificira se utjecaj veličina  $M$  i  $\pi_{2uk}$  na vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{maks}$  za zadane vrijednosti  $\pi_3$ , prema izvedenim jednadžbama (52) – (64). Tako dijagram na slici 39 prikazuje zavisnost dotičnih veličina za odabranu vrijednost  $\pi_3 = 0,50$  pa su dijagramski prikazane vrijednosti dobivene prema jednadžbi (56) za  $\pi_{2Aopt}$  odnosno jednadžbi (13) za  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{maks}$ . Analiza obuhvaća vrijednosti  $\pi_{2uk} = 1,0; 3,0$  i  $5,0$ , dok je vrijednost varijable  $M$  varirana od  $0,25$  do  $1,25$ . Iz dijagrama se uočava da s porastom  $\pi_{2uk}$  rastu i  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{maks}$ . Nadalje se može zaključiti da s porastom  $\pi_{2uk}$  se smanjuje gornja granica vrijednosti varijable  $M$ , za koju biva zadovoljen kriterij dan jednadžbom (67).

Za  $\pi_{2uk} = 1,0$  kriterij je zadovoljen za gornju vrijednost  $M = 1,25$ , dok za  $\pi_{2uk} = 3,0$  i  $5,0$  gornje prihvatljive vrijednosti veličine  $M$  iznose  $1,20$  odnosno  $1,15$ .



Slika 39. Zavisnost veličine  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Phi/(C_1(T_{1B}' - T_2'))))_{maks}$  o veličini  $M$  i  $\pi_{2uk}$  uz  $\pi_3 = 0,50$

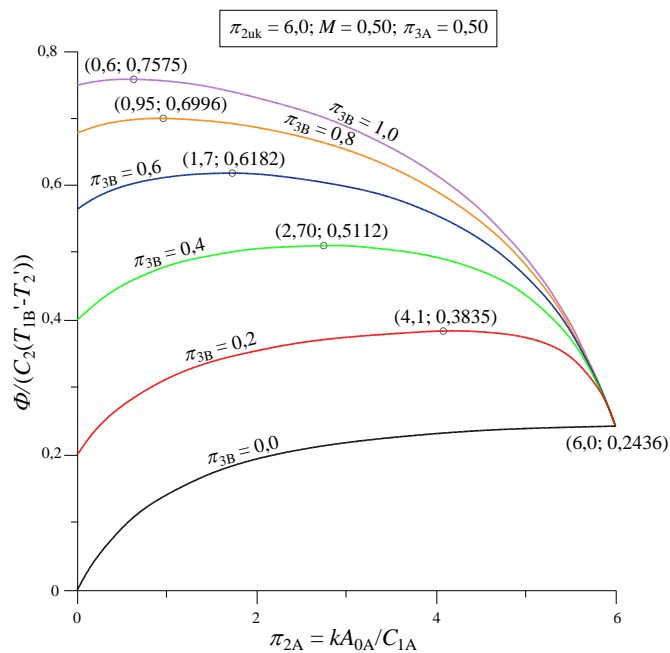
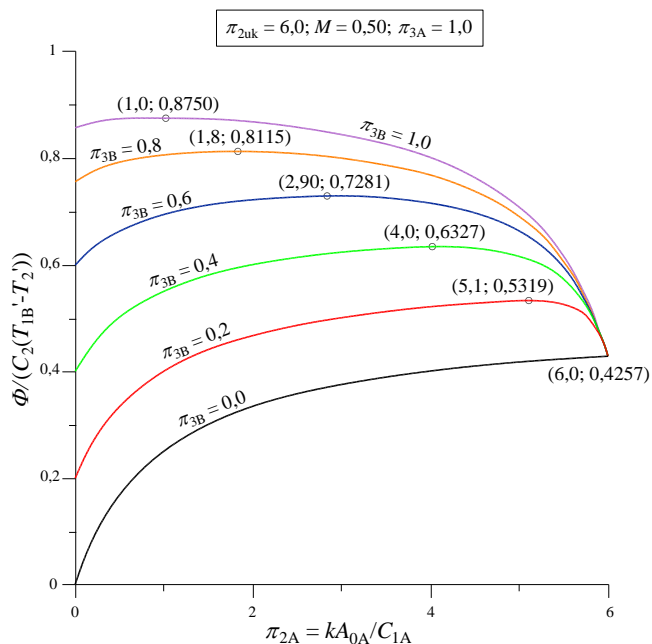
Također se iz gornjeg dijagrama vidi da za  $\pi_{2uk} = 1,0$  prihvatljive vrijednosti polaze od  $M = 0,60$ , budući da se za  $M = 0,50$  prema jednadžbi (56) dobivaju negativne vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$ , a što je prema modelu neprihvatljivo.

Ovaj dijagramski prikaz je jako važan jer se može primijeniti kao rješenje na drugu, već spomenutu, varijantu problema. Ako je definirana geometrija ovakvog umreženog rekuperatora u smislu već određene (fiksne) pozicije priključivanja dodatne struje iz mreže izmjenjivača topline, za ostvarivanje maksimalnog iznosa toplinskog toka potrebno je odabrati struje odgovarajućih temperatura i protoka na rekuperatoru A i rekuperatoru B.

### 3.3. Dijagramski prikaz rješenja za slučaj $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$

U okviru ovih dijagramskih prikaza uzete su veličine  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $M = 0,5$ ; 1,0 i 2,0, nadalje  $\pi_{3A} = 0,50$  i 1,0, dok se veličinu  $\pi_{3B}$  varira od 0,0 do 1,0 s korakom od 0,20.

Dijagrami na slikama 40 i 41 prikazuju bezdimenzijski toplinski tok za  $M = 0,5$  i  $\pi_{3A} = 0,50$  i 1,0. Iz dijagramskih je prikaza razvidno da sve parametarske krivulje  $\pi_{3B} = \text{konst.}$ , osim  $\pi_{3B} = 0,0$ , postižu lokani ekstrem i to maksimum, a što je i željeni cilj. U oba su dijagrama unesene koordinate tih maksimuma i vidi se da vrijednosti tih maksimuma rastu s porastom  $\pi_{3A}$ . S druge pak strane za zaključiti je da s porastom  $\pi_{3B}$  i porastom veličine  $M$  se smanjuje vrijednost značajke  $\pi_{2A} = \pi_{2Aopt}$  pri kojoj se javlja taj maksimum toplinskog toka kao lokalni ekstrem. Nadalje se iz dijagrama može zaključiti da se za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobiva ista vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka za sve vrijednosti  $\pi_{3B}$ . Tu se zajedničku vrijednost lako dobije analizirajući jednadžbe (73 - d) za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

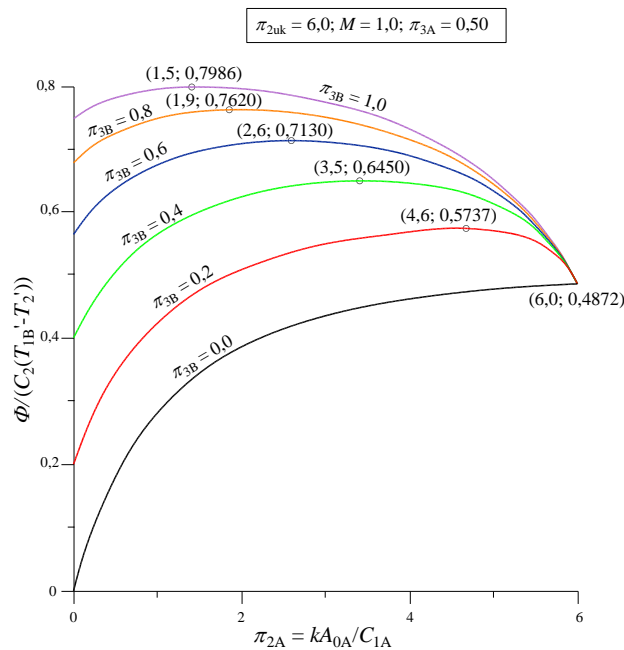
Slika 40. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 0,50$  i  $\pi_{3A} = 0,5$ Slika 41. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 0,50$  i  $\pi_{3A} = 1,0$ 

Ako je  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  tada je, shodno jednadžbi (75c)  $\pi_{1B} = 0,0$  pa i u jednadžbi (73) slijedi da je

$$\frac{\Phi(\pi_{2A} = \pi_{2uk})}{C_2(T_{1B}' - T_2')} = M \pi_{3A} \pi_{1A} = M \pi_{3A} \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_{3A})\pi_{2uk})}{1 - \pi_{3A} \exp(-(1 - \pi_{3A})\pi_{2uk})} \quad (119)$$

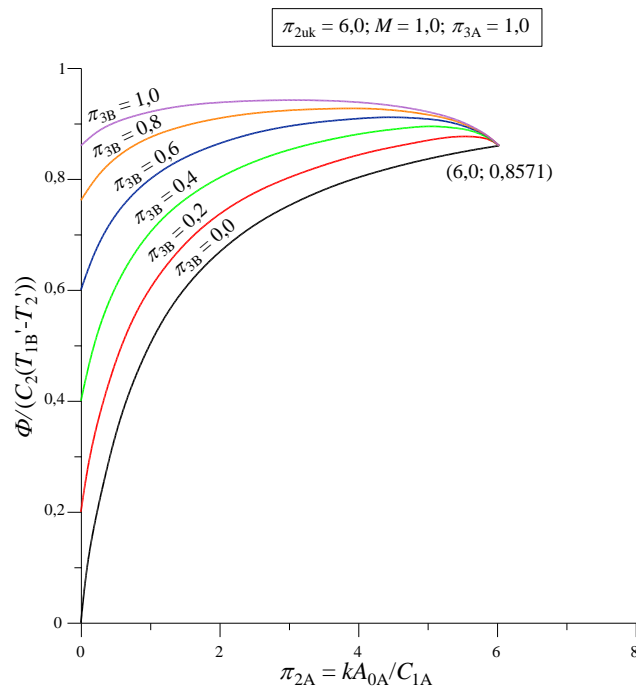
i iz koje je očigledno da dotična vrijednost ne ovisi niti o  $\pi_{1B}$  niti o  $\pi_{3B}$ , a što je i logično jer se u tom slučaju radi o neumreženom rekuperatoru A.

Dijagrami na slikama 42 i 43 prikazuju bezdimenzijsku vrijednost toplinskog toka za  $M = 1,0$  uz  $\pi_{3A} = 0,50$  i  $1,0$ .



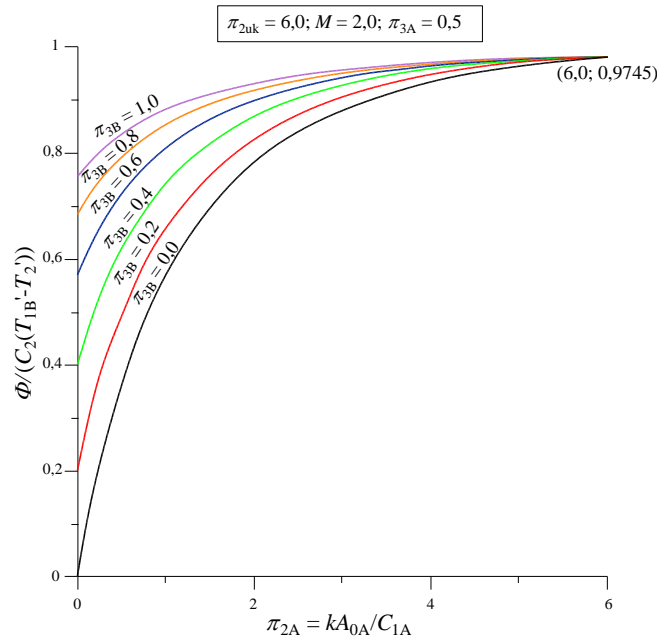
Slika 42. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 1,0$  i  $\pi_{3A} = 0,5$

Dijagrami na slikama 42 i 43 pokazuju da se i u ovim slučajevima javljaju ekstremi i to kao maksimumi bezdimenzijskog toplinskog toka. U dijagramu na slici 42 unesene su i koordinate tih maksimuma pa se one izravno mogu usporediti s vrijednostima na prethodnim dijagramima. Također se u ovim slučajevima za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobivaju međusobno iste vrijednosti, koje su također određene jednadžbom (119). Zbog preglednosti dijagramskog prikaza na slici 43 koordinate maksimuma bezdimenzijskog toplinskog toka nisu prikazane na dijagramu, a one iznose (6,0; 0,8571), (5,58; 0,8733), (5,06; 0,8899), (4,46; 0,9064), (3,74; 0,9224) i (2,96; 0,9373).



Slika 43. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 1,0$  i  $\pi_{3A} = 1,0$

Ako se uzme da je  $M = 2,0$  tada se dobivaju vrijednosti koje su prikazane na slikama 44 i 45.

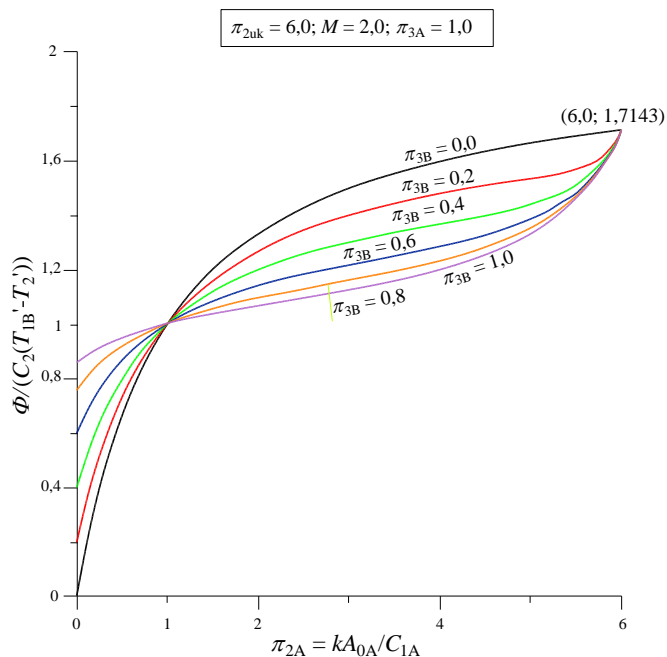


Slika 44. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_{3A} = 0,5$

Dijagram na slici 44 pokazuje da se maksimum kao lokalni ekstrem ne pojavljuje, nego da vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka kontinuirano rastu s porastom  $\pi_{2A}$  i s porastom  $\pi_{3B}$  pa se najveće vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka postižu za slučaj da

je  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Dakle, maksimalni se toplinski tok u tom slučaju postiže za slučaj da se radi samo o rekuperatoru A ukupne površine  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , i prikazana vrijednost 0,9745 također je određena jednadžbom (119).

Rezultate proračuna za  $M = 2,0$  i  $\pi_{3A} = 1,0$  prikazuje dijagram na slici 45.



Slika 45. Zavisnost bezdimenzijskog toplinskog toka o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{3B}$  uz  $M = 2,0$  i  $\pi_{3A} = 1,0$

Ovaj dijagram također pokazuje da se i u ovom slučaju ne javlja lokalni maksimum, nego da se maksimalnu vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka postiže ako rekuperator A radi s ukupnom vrijednosti  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 6,0$  pa iznos tog toplinskog toka, shodno jednadžbi (119), postiže zajedničku vrijednost, neovisnu o  $\pi_{3B}$ , jednaku 1,7143. Još jedan zanimljiv zaključak slijedi iz dijagramskog prikaza na slici 45. Naime, ako je  $\pi_{2A}$  unutar intervala  $0 \leq \pi_{2A} \leq 1,0$  tada vrijednost maksimalnog toplinskog toka raste s porastom  $\pi_{2A}$  i raste s porastom  $\pi_{3B}$ . Za  $\pi_{2A} = 1,0$  vrijednost bezdimenzijskog toplinskog toka za sve slučajeve je jednaka jedinici, dok za  $1 < \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$ , raste vrijednost toplinskog toka, ali se smanjuje s porastom veličine  $\pi_{3B}$ .

Da je  $\Phi(\pi_{2A} = 1; M = 2,0) / (C_2(T_{1B}' - T_2')) = 1,0$  lako se dokazuje pomoću jednadžbe (73) u kojoj je

$$\pi_{1A}(\pi_{2A} = 1,0) = \frac{\pi_{2A}}{1 + \pi_{2A}} = \frac{1}{2}$$

pa je

$$\frac{\Phi}{C_2(T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_{3A} \pi_{1A} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B} = 2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B} = 1,0$$

### 3.4. Dijagramski prikazi generirane bezdimenzijske entropije

Teorijske podloge generirane entropije razrađene su u poglavlju 2.2 i cjelokupni je algoritam prikazan jednadžbama (78) – (106). Jednadžbom (85) je pokazano da je u najopćenitijem slučaju bezdimenzijska generirana entropija funkcija sljedećih veličina:  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{2A}$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ . To znači da je za razliku od bezdimenzijskog toplinskog toka ona dodatno funkcija i veličine  $\pi_{TA}$ , odnosno veličine  $\pi_{TB}$ . No, pri tome se mora naglasiti da veličine  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TB}$  nisu međusobno nezavisne, nego su, shodno jednadžbi (83), međusobno povezane preko veličine  $M$ , što je već i iskorišteno tijekom izvođenja jednadžbe (85). Stoga je za dijagramski prikaz generirane entropije zgodno prikazati sve slučajeve za iste vrijednosti  $\pi_{2uk}$ ,  $M$  i  $\pi_3$  za koje je u poglavlju 3.2 analiziran toplinski tok, ali za entropijsku analizu, zbog dodatne varijable  $\pi_{TA}$ , se prikaz parametrizira na slučajeve prikazane u sljedećim poglavljima.

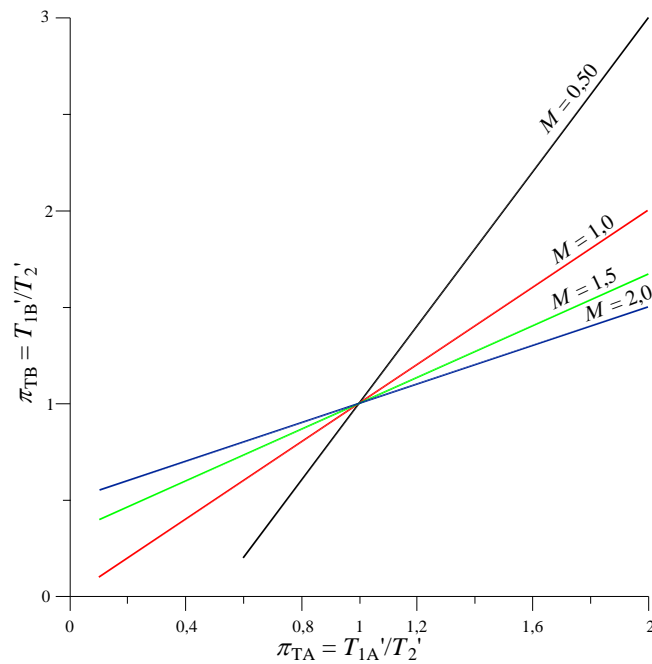
#### 3.4.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

Kako je poveznica između veličina  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TB}$  dana jednadžbom (83)

$$\pi_{TB} = \frac{M + \pi_{TA} - 1}{M} = 1 + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} \quad (83)$$

a predznaci  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TB}$  fizikalno moraju biti pozitivni, kako to prikazuje dijagram na slici 46, u kojem su vrijednosti veličine  $M = 0,50$ ;  $1,0$ ;  $1,50$  i  $2,0$ .



Slika 46. Zavisnost veličine  $\pi_{TB}$  o veličinama  $\pi_{TA}$  i  $M$ 

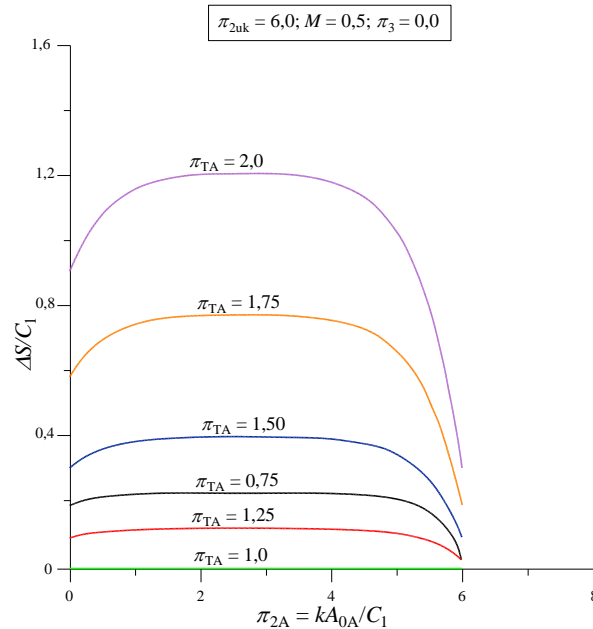
Dijagram na slici 46 potvrđuje linearnu zavisnost između veličina  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TB}$ , pri čemu veličina  $M$  određuje koeficijent smjera dotičnog pravca. Obje veličine moraju fizikalno biti pozitivne. Iz dijagrama je također vidljivo da su vrijednosti  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TB}$  jednake jedinici neovisno o vrijednosti veličine  $M$ . Naime za  $\pi_{TA} = 1,0$  ujedno i  $\pi_{TB} = 1,0$ , jednadžba (83) daje trivijalno rješenje  $\Delta S/C_1 = 0,0$ , a što je i fizikalno opravdano, budući da pod tim uvjetima nema temperaturnih razlika između struja, pa time niti generirane entropije. Kako je entropijska generacija, shodno jednadžbi (85), osim o veličini  $M$ , zavisna i o veličini  $\pi_{TA}$ , jer je utjecaj veličine  $\pi_{TB}$  uzet jednadžbom (83), gornji dijagram jasno pokazuje za istu vrijednost  $M$  mora postojati niz međusobno različitih vrijednosti entropijskih produkcija.

#### 3.4.1.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$

Dijagram na slici 47 prikazuje generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  za  $M = 0,5$  i  $\pi_{TA} = 0,75 - 2,0$ , s prirastom  $\Delta\pi_{TA} = 0,25$ .

Dijagram pokazuje da veličina  $\pi_{TA}$  ima primjetan utjecaj na generiranu entropiju, na način da se s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,75 do 1,0 prvo smanjuje do vrijednosti 0,0, a zatim s daljnjim njezinim porastom kontinuirano raste. Iz dijagrama se također vidi da svaka parametarska vrijednost  $\pi_{TA}$  ima maksimum generirane entropije i to kao lokalni ekstrem. Sve parametarske vrijednosti imaju istu stacionarnu vrijednost  $\pi_{TAopt}$  za koju se postižu dotični maksimumi i ta

je stacionarna vrijednost neovisna o veličini  $\pi_{TA}$ , i određena je jednadžbom (94). Iz te jednadžbe proizlazi da je  $\pi_{2Aopt} = 2,653$ , a pripadajuće maksimalne vrijednosti generirane entropije za naznačene parametarske vrijednosti  $\pi_{TA}$  iznose redom: 0,2305; 0,0; 0,1211; 0,4002; 0,7714 i 1,2035.



Slika 47. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

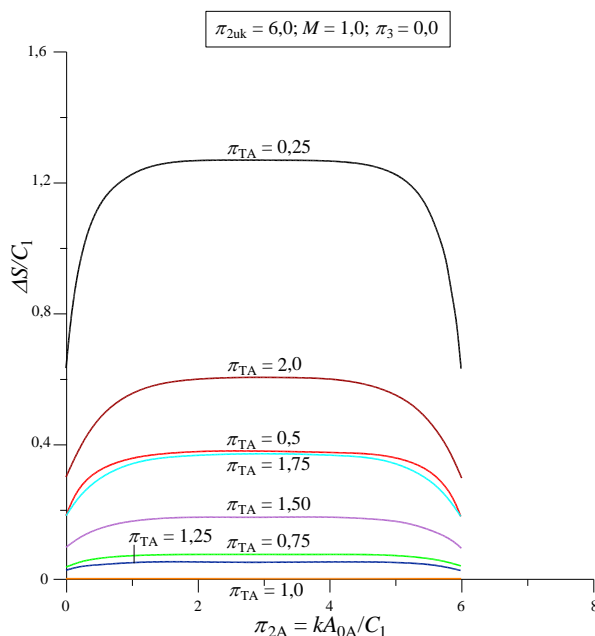
o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,50$

Evidentno je da se vrijednosti generirane entropije oko maksimuma relativno malo mijenjaju i promjene (smanjenja) postaju primjetna približavanjem vrijednosti  $\pi_{2A}$  ili vrijednosti nula ili vrijednosti  $\pi_{2uk}$ . Također je vidljivo iz gornjeg dijagrama da su za sve vrijednosti  $\pi_{TA}$  generirane entropije uvijek veće za  $\pi_{2A} = 0,0$  negoli za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

### 3.4.1.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$

Iz dijagrama na slici 48 se vidi da je za  $M = 1,0$  fizikalno moguće varirati vrijednost  $\pi_{TA}$  još od nižih vrijednosti negoli u prethodnom slučaju pa se u ovom slučaju  $\pi_{TA}$  varira od 0,25 do 2,0 s korakom  $\Delta\pi_{TA} = 0,25$ . Dijagram na slici 48 pokazuje da i u ovom slučaju sve krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu maksimalne vrijednosti generirane entropije za istu vrijednost  $\pi_{2Aopt}$ , koja prema jednadžbi (94), iznosi  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  i pripadajuće maksimalne vrijednosti za odabrane  $\pi_{TA}$  redom iznose: 1,2712; 0,3857; 0,0752; 0,0; 0,0536; 0,1885; 0,3794 i 0,6113. To znači da

se prvo s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0 maksimalne vrijednosti generirane entropije smanjuju od 1,2712 do 0,0 a zatim se dalje povećavaju od 0,0 do 0,6113 s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 1,0 do 2,0.



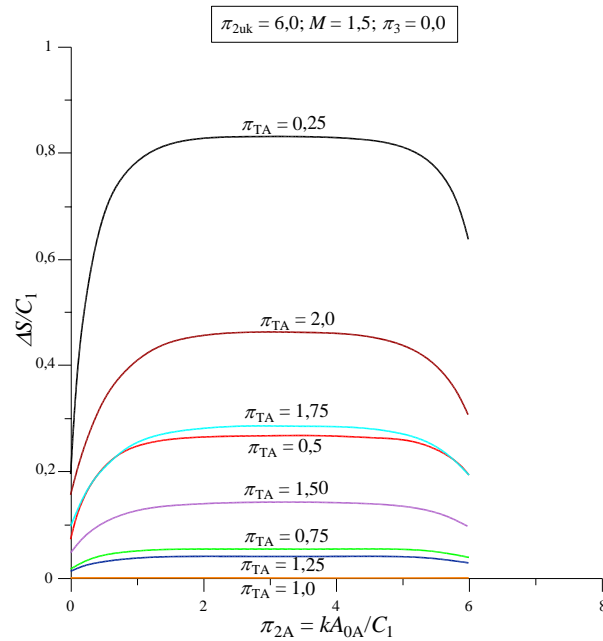
Slika 48. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

Također se vidi da su sve krivulje simetrične u odnosu na  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ , što znači da se za promatranu vrijednost  $\pi_{TA}$  dobiju iste vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . I u ovom su slučaju male promjene generirane entropije u odnosu na maksimalne vrijednosti. Primjetne razlike se javljaju kada se  $\pi_{2A}$  približava ili vrijednosti 0,0 ili  $\pi_{2uk}$ .

Ako se usporede vrijednosti generirane entropije na dijagramima 47 i 48, za iste vrijednosti  $\pi_{TA}$ , tada se vidi da su vrijednosti generirane entropije na slici 48 niže od prethodnih, što znači da se s promjenom veličine  $M$  od 0,50 na 1,0, smanjuje iznos generirane entropije.

### 3.4.1.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$

Dijagram na slici 49 pokazuje da se i za  $M = 1,50$  veličinu  $\pi_{TA}$  može varirati od 0,25 do 2,0 te će se i u ovom slučaju dotičnu veličinu varirati za  $\Delta\pi_{TA} = 0,25$

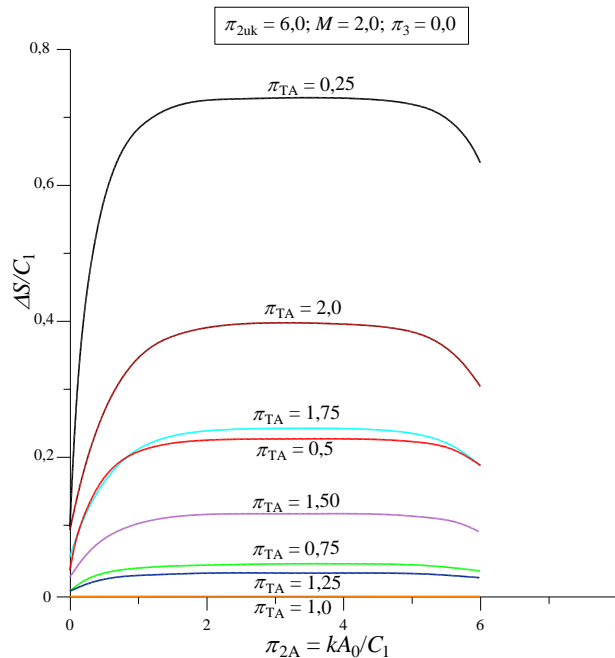


Slika 49. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$

I u ovom slučaju sve parametarske krivulje postižu maksimalnu generiranu entropiju pri, shodno jednadžbi (94),  $\pi_{2Aopt} = 3,203$ , a pripadajuće vrijednosti dotičnih maksimuma s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: 0,8285; 0,2649; 0,0532; 0,0; 0,0393; 0,1398; 0,2840 i 0,4611. Također je vidljivo da su signifikantnije promjene generirane entropije, za zadani  $\pi_{TA}$ , pri  $\pi_{2A}$  vrijednostima koje su bliže ili 0,0 ili  $\pi_{2uk}$ . Za razliku od slučaja prikazanim slikom 47, vidi se da su u ovom slučaju generirane entropije manje za  $\pi_{2A} = 0,0$  negoli za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

### 3.4.1.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$

Za  $M = 2,0$ , rezultate generirane entropije prikazuje dijagram na slici 50.

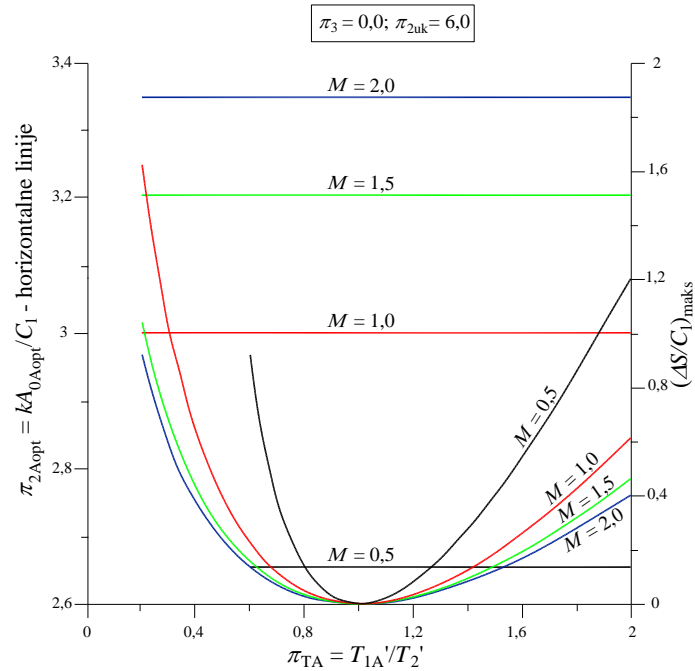


Slika 50. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

I dijagram na slici 50 pokazuje da sve parametarske krivulje  $\pi_{TA}$  postižu maksimalne vrijednosti generirane entropije za, shodno jednadžbi (94),  $\pi_{2Aopt} = 3,3466$  i dotične maksimalne vrijednosti iznose redom kako slijedi: 0,7306; 0,2305; 0,0461; 0,0; 0,0340; 0,1211; 0,2462 i 0,4002. I ovdje je razvidno da je generirana entropija manja za  $\pi_{2A} = 0,0$  negoli za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

Usporedbom vrijednosti generiranih entropija sa slike 50 s vrijednostima danim na slikama 47 - 49, vidi se da se u ovom zadnjem slučaju dobivaju najniže vrijednosti generiranih entropija, što znači da se povećanjem vrijednosti veličine  $M$  generirana entropija smanjuje.

Ako se za promatrani slučaj izdvoje pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  s pripadajućim  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  i prikažu dijagramski, tada se dobiva prikaz dan slikom 51.



Slika 51. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  i  $\pi_{2A\text{opt}}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$

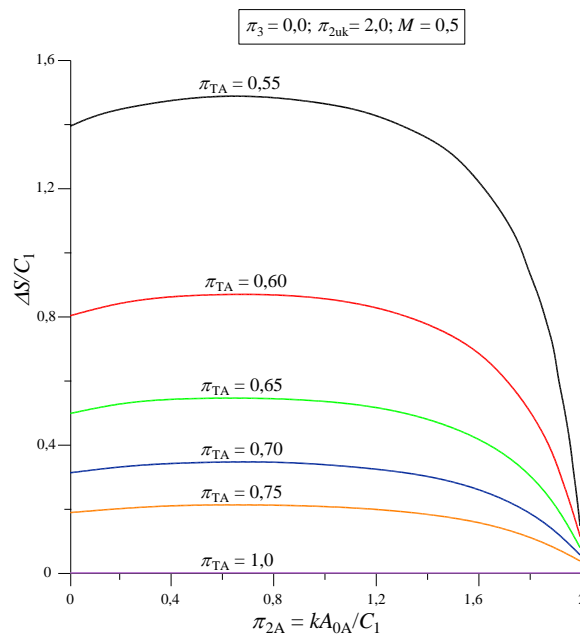
Dijagram pokazuje da vrijednosti  $\pi_{2A\text{opt}}$  rastu s povećavanjem veličine  $M$ , ali ne ovise o vrijednosti veličine  $\pi_{TA}$ . S druge pak strane, pripadajuće vrijednosti maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  zavise i o veličini  $M$  i o veličini  $\pi_{TA}$ . Za zadani  $M$  veličina  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  prvo se smanjuje i jednaka je nuli, lokalni minimum, za  $\pi_{TA} = 1,0$ , a zatim dalje raste s porastom  $\pi_{TA}$ . Što se tiče utjecaja veličine  $M$  na vrijednost  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  potrebno je razlikovati dva područja i to  $\pi_{TA} < 1,0$  i  $\pi_{TA} > 1,0$ . Za  $\pi_{TA} < 1,0$  s porastom  $M$  veličina  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  prvo raste i za  $M = 1,0$  postiže maksimum, a zatim dalje dotična vrijednost opada s porastom veličine  $M$ . Za  $\pi_{TA} > 1,0$  vrijednosti maksimalne generirane entropije se kontinuirano smanjuju s porastom veličine  $M$ .

### 3.4.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$

U okviru ovog poglavlja analiziran je utjecaj veličine  $\pi_{2uk}$  na generiranu entropiju na način da se uzme nižu vrijednost od prethodne  $\pi_{2uk} = 2,0$ .

#### 3.4.2.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 0,5$

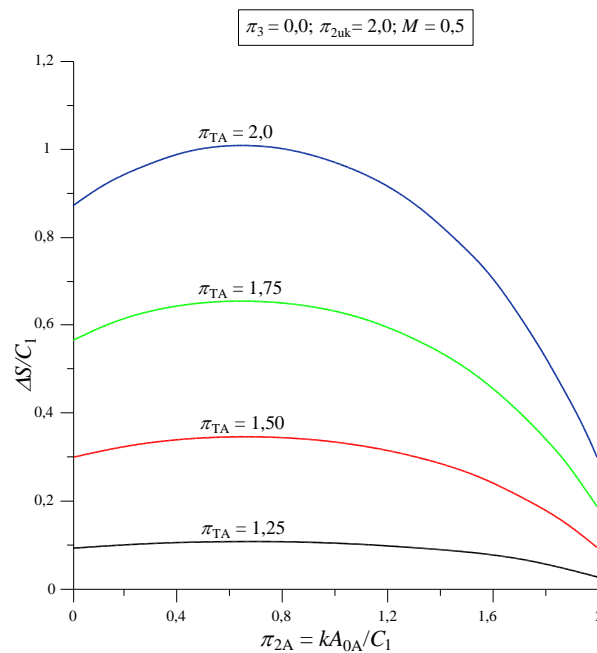
Za ovaj slučaj generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuju dijagrami na slikama 52 i 53 koji pokazuju da i u ovom slučaju sve parametarske krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu maksimume kao lokalne ekstreme, te su u tim maksimumima vrijednosti generirane entropije ujedno i najveće.



Slika 52. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se dobivaju  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$ , shodno jednadžbi (94), su neovisni o veličini  $\pi_{TA}$  pa je za sve  $\pi_{TA}$  vrijednosti, vrijednost  $\pi_{2Aopt} = 0,653$ , a pripadajuće maksimalne vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: 1,4852; 0,8698; 0,5469; 0,3457; 0,2123; 0,000; 0,1058; 0,3436; 0,6526 i 1,005. Usporedbom dobivenih vrijednosti sa slučajem prikazanim slikom 47, vidi se da se u potonjem slučaju dobivaju niže vrijednosti.



Slika 53. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Iz gornjeg je dijagrama vidljivo da se dobivaju više vrijednosti generirane entropije neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$  u odnosu na neumreženi rekuperator za koji je  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

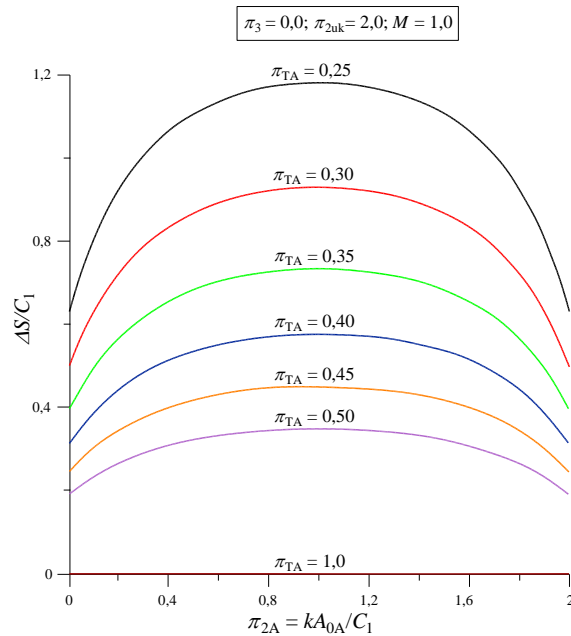
### 3.4.2.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 1,0$

Dijagrami na slikama 54 i 55 prikazuju generiranu entropiju u zavisnosti od  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{2A}$  za  $M = 1,0$ . Vidi se da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  pokazuje simetričnost u odnosu na  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  za koju svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  pokazuje maksimum generirane entropije. Iznos  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  dobiven je iz jednadžbe (94), uz  $M = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ . Pripadajuće maksimalne vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  dobivaju se koristeći jednadžbu (95) i one za promatrani slučaj u smjeru povećavanja  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,00; 1,1787); (1,00; 0,9275); (1,00; 0,7313); (1,00; 0,5752); (1,00; 0,4496); (1,00; 0,3476); (1,00; 0,00); (1,00; 0,0457); (1,00; 0,1589); (1,00; 0,3163) i (1,00; 0,5045).

Usporedbom generirane entropije za  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$  sa dijagramima na slikama 54 i 55 s vrijednostima za isti  $\pi_{TA}$ , za zaključiti je da se u ovom slučaju dobivaju niže

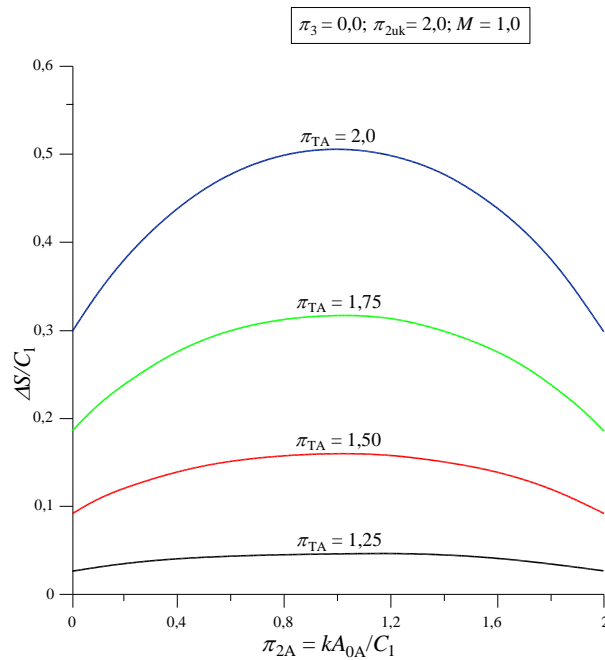


vrijednosti generirane entropije te da su u ovom slučaju jače izražene promjene entropije, za isti  $\pi_{TA}$ , negoli u slučaju 3.4.1.2.



Slika 54. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

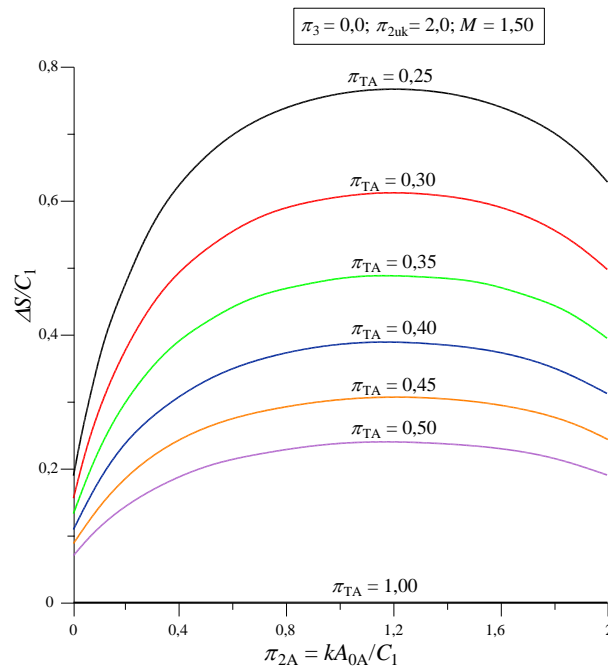


Slika 55. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

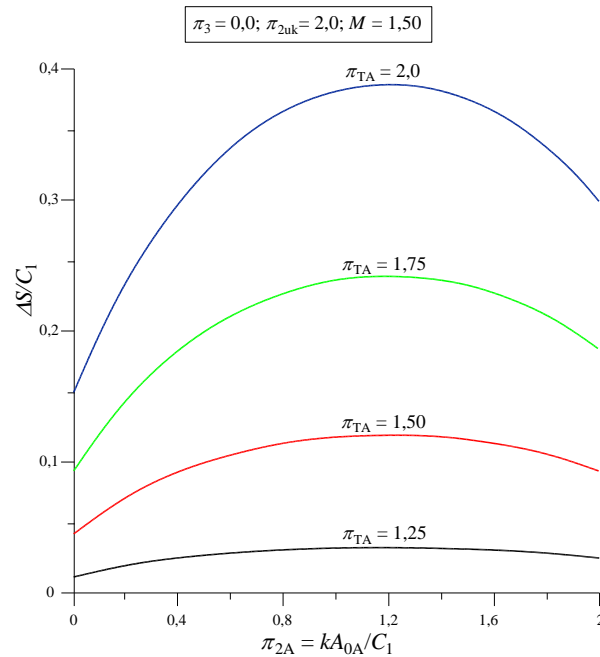
### 3.4.2.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 1,5$

Za navedeni slučaj generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuju dijagrami na slikama 56 i 57, pri čemu je iz dijagrama 56 vidljivo da se, s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 0,5, vrijednosti generirane entropije kontinuirano smanjuju, dok dijagram na slici 57 pokazuje kontinuirani porast generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,25 do 2,0.



Slika 56. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

Također je za primijetiti da i u ovom slučaju svaka parametarska vrijednost postiže maksimum, kao lokalni ekstrem, pri istoj vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , za sve  $\pi_{TA} = konst.$  Tu se vrijednost dobiva iz jednadžbe (94) i ona iznosi  $\pi_{2Aopt} = 1,2027$ . Pripadajući  $\pi_{2Aopt} = 1,2027$  zajedno s maksimumima  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , shodno jednadžbi (95), s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,2027; 0,7695); (1,2027; 0,6143); (1,2027; 0,4905); (1,2027; 0,3901); (1,2027; 0,3079); (1,2027; 0,2402); (1,2027; 0,00); (1,2027; 0,0340); (1,2027; 0,1197); (1,2027; 0,2407) i (1,2027; 0,3873).



Slika 57. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

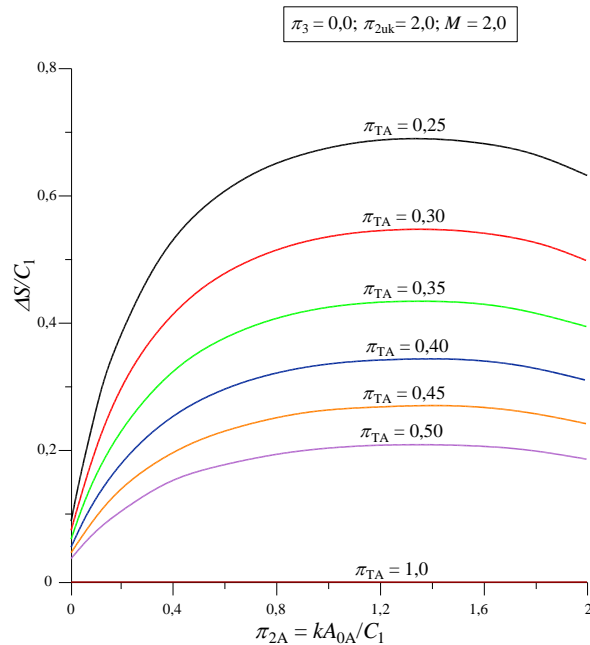
Nadalje se vidi da je u ovom slučaju generirana entropija neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , veća od generirane entropije neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$ . Usporedbom dobivenih rezultata pod 3.4.2.3 s rezultatima dobivenom pod 3.4.1.3 vidi se da se u slučaju 3.4.2.3 dobivaju niže vrijednosti generirane entropije. Također su u slučaju 3.4.2.3 vrijednosti generirane entropije, pri istoj vrijednosti  $\pi_{TA}$ , osjetljivije na promjenu iznosa veličine  $\pi_{2A}$ .

#### 3.4.2.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ ; $M = 2,0$

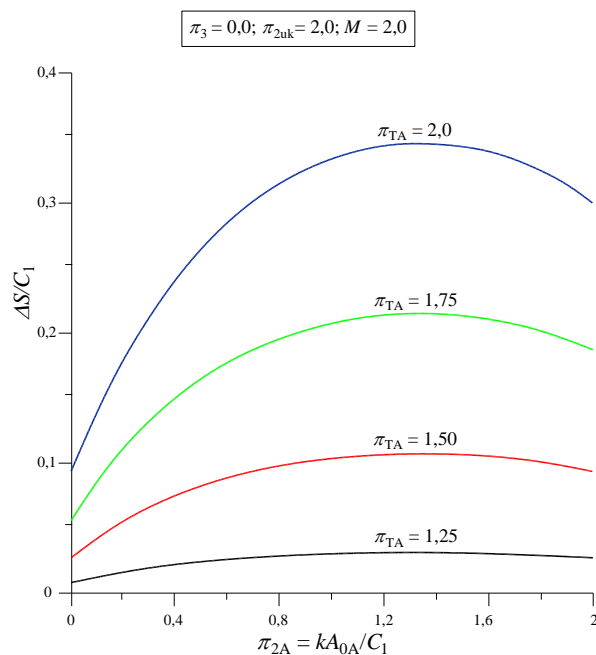
Dijagrami na slikama 58 i 59 prikazuju generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , ali za  $M = 2,0$ , gdje se iz slike 58 vidi smanjenje generirane entropije s porastom veličine  $\pi_{TA}$  od vrijednosti 0,25 do 1,0. S druge strane, dijagram na slici 59 pokazuje porast generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,25 do 2,0. I u ovom slučaju oba dijagrama pokazuju da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  dostiže  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$ , pri, za sve  $\pi_{TA} = \text{konst.}$ , iste vrijednosti  $\pi_{2Aopt} = 1,3466$ , a koja je dobivena iz jednadžbe (94). Pripadajuće vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  računata su prema jednadžbi (95), tako da pripadajuće vrijednosti parova  $(\pi_{2Aopt} = 1,3466; (\Delta S/C_1)_{\text{maks}})$  u smjeru povećavanja veličine  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,3466; 0,6874); (1,3466; 0,5469); (1,3466; 0,4356); (1,3466; 0,3457); (1,3466; 0,2724);

(1,3466; 0,2123); (1,3466; 0,0000); (1,3466; 0,0300); (1,3466; 0,1058); (1,3466; 0,2132) i (1,3466; 0,3436).

I u ovom slučaju se dobivaju veće vrijednosti generirane entropije neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , od također neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$ .



Slika 58. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

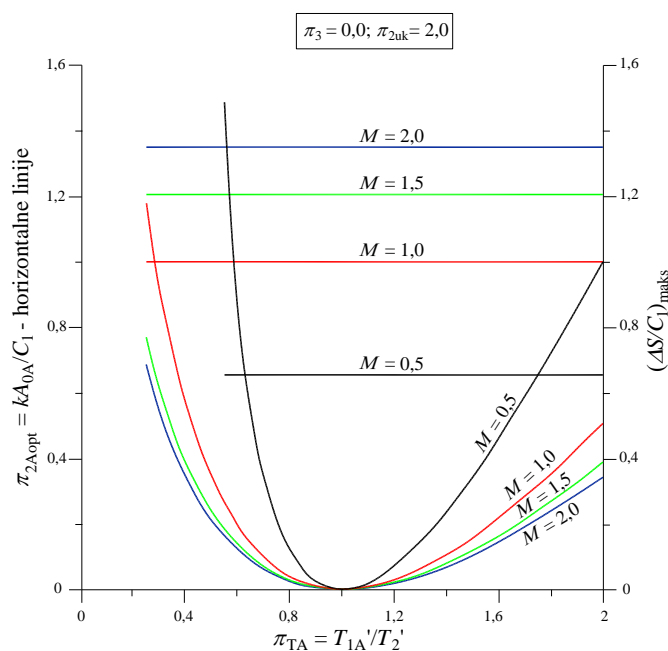


Slika 59. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Usporedbom ovih rezultata s rezultatima pod **3.4.1.4** može se zaključiti da se i u ovom slučaju dobivaju niže vrijednosti generirane entropije negoli u **3.4.1.4**.

Ako se vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  dobivenih od **3.4.2.1** - **3.4.2.4** prikažu u zavisnosti o  $\pi_{TA}$  i  $M$  u zajedničkom dijagramu, tada se dobiva prikaz dan slikom 60, iz kojeg se vidi, a što je već i naglašeno, da vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  ne ovise u promatranim slučajevima o  $\pi_{TA}$  nego samo o veličini  $M$ . Vidljivo je da s porastom  $M$  raste i vrijednost  $\pi_{2Aopt}$ . Usporedbom  $\pi_{2Aopt}$  u promatranom slučaju sa slučajevima analiziranim pod **3.4.1.1** – **3.4.1.4**, za zaključiti je da se u promatranom slučaju dobivaju niže vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ , a što je dokazano jednadžbom (94).

Što se tiče dobivenih maksimalnih vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , evidentno je, a što jest u skladu s jednadžbom (95), da one ovise i o  $\pi_{TA}$  i  $M$ , na način da se s povećavanjem  $M$  dotične vrijednosti smanjuju. Sve parametarske vrijednosti za  $\pi_{TA} = 1$  imaju vrijednost nula i to kao lokalni ekstrem (minimum). Razlika između dviju susjednih parametarskih vrijednosti u analiziranom slučaju iznosi  $\Delta M = 0,50$  pa se iz dijagrama na slici 60 vidi da se smanjuje razlika generiranih maksimalnih entropija između dviju susjednih parametarskih krivulja.



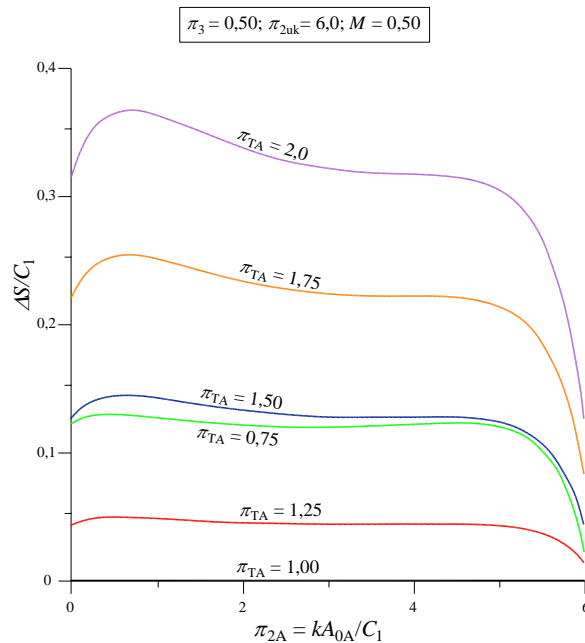
Slika 60. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$

Usporedbom dobivenih rezultata danih slikom 60 s rezultatima prikazanim na slici 51, vidi se da se u slučajevima **3.4.1.1** – **3.4.1.4** dobivaju veće maksimalne vrijednosti generirane entropije.

### 3.4.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

U sljedećim se poglavljima razmatra generirana entropija za slučaj kada omjer toplinskih kapaciteta slabije i jače struje iznosi  $\pi_3 = 0,50$ .

#### 3.4.3.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$



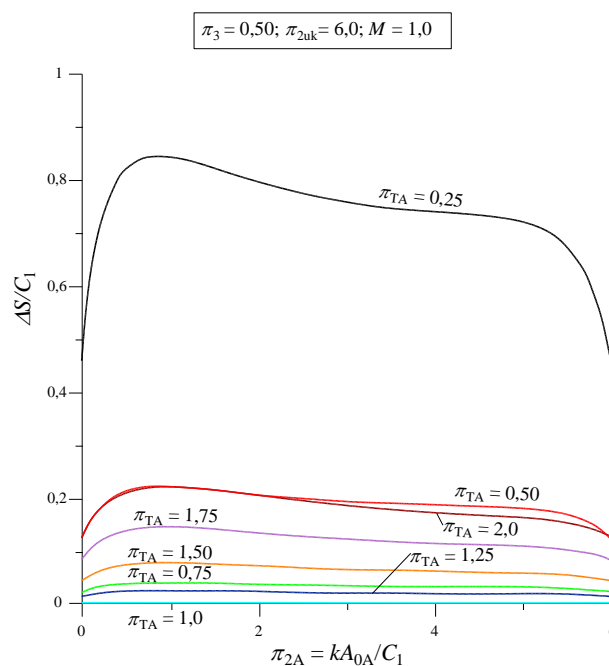
Slika 61. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,50$

Dijagram na slici 61 prikazuje zavisnost generirane entropije o veličinama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , za naznačene ostale fiksne vrijednosti. Te su vrijednosti dobivene prema jednadžbi (85). Ovi rezultati pokazuju da i u ovom slučaju generirana entropija primjetno ovisi kako o veličini  $\pi_{2A}$  tako i o veličini  $\pi_{TA}$ , na način da s povećanjem  $\pi_{2A}$  prvo raste, postiže maksimum, lokalni ekstrem, a zatim se smanjuje. Što se tiče utjecaja  $\pi_{TA}$ , s porastom  $0,75 \leq \pi_{TA} \leq 1,0$  generirana entropija prvo se smanjuje do vrijednosti 0,0 a zatim za  $\pi_{TA} > 1,0$  generirana entropija kontinuirano raste. Nadalje se može zaključiti da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA}$  ima svoj par vrijednosti u točki maksimuma ( $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ ). Iznalaženje ovih vrijednosti analitičkim načinom nije moguće zbog složenosti jednadžbe (85), te se stoga pribjegava numeričkom postupku proračuna, kojim se za naznačene vrijednosti veličine  $\pi_{TA}$  dobivaju redom sljedeći parovi vrijednosti u točkama maksimuma; (0,400; 0,1288); (0,54; 0,0);

(0,600; 0,0483); (0,6500; 0,1433); (0,6500; 0,2528) i (0,7000; 0,3657). Ako se usporede vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  s vrijednostima  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , vidi se na slici 61, da su vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  veće od vrijednosti generiranih entropija za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

### 3.4.3.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$

Za ovaj slučaj rezultate proračuna, prema jednadžbi (85), prikazuje dijagram na slici 62.



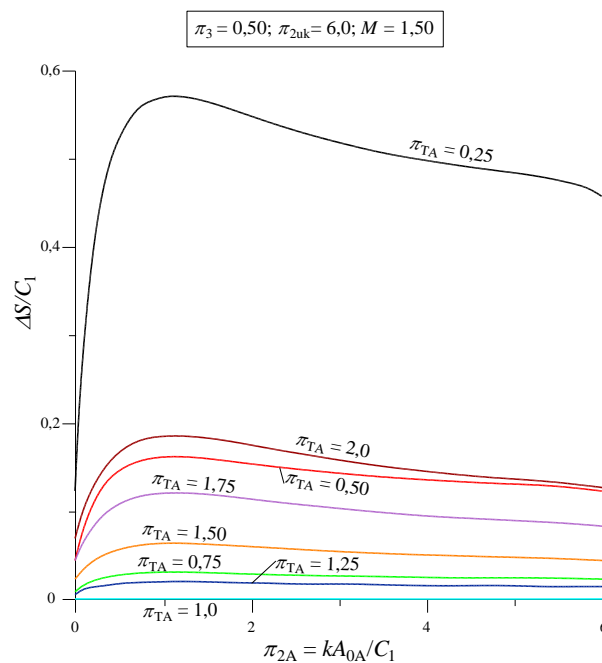
Slika 62. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

Dijagram na slici 62 pokazuje da postoji naglo smanjenje generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,25 na 0,50, a zatim smanjenja do vrijednosti 0,0 za  $\pi_{TA} = 1,0$ . Daljnjim povećavanjem vrijednosti  $\pi_{TA}$  do 2,0 uočava se blago povećanje generirane entropije. Također se vidi da se za  $\pi_{TA} = 0,5$  i 2,0 praktički dobivaju iste vrijednosti generirane entropije. I u ovom slučaju svaka krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže lokalni ekstrem i to maksimum. Pripadajući parovi vrijednosti  $\pi_{TAopt}$  i  $(\Delta S/C1)_{maks}$  s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: (0,900; 0,8438); (0,900; 0,2203); (0,950; 0,0384); (0,95; 0,0); (0,950; 0,0231); (0,950; 0,0759); (0,950; 0,1439) i (1,000; 0,2195). Također se vidi da se u ovom slučaju dobiju iste vrijednosti generirane

entropije za pojedini  $\pi_{TA}$ , za vrijednosti  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , a što i jest fizikalno opravdano samo za  $M = 1,0$ .

### 3.4.3.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$

Za  $M = 1,50$ , i ostale zadane fiksne podatke, rezultate proračuna generirane entropije prikazuje dijagram na slici 63, iz koje je vidljivo da i u ovom slučaju generirana entropija opada s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od vrijednosti 0,25 do vrijednosti 1,0 a zatim dalje raste s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od vrijednosti 1,0 do vrijednosti 2,0. I u ovom slučaju svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima lokalni ekstrem i to maksimum.



Slika 63. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

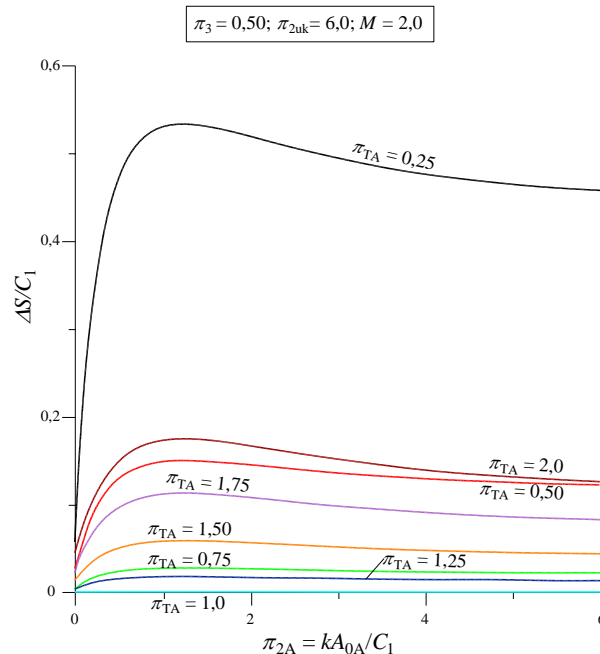
o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,50$

Pripadajući parovi vrijednosti  $\pi_{TAopt}$  i  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,120; 0,5707); (1,130; 0,1608); (1,130; 0,0293); (1,16; 0,0); (1,150; 0,0186); (1,140; 0,0623); (1,150; 0,1198) i (1,150; 0,1849). I u ovom slučaju se dobiju manje vrijednosti generirane entropije neumreženog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$  u odnosu na neumreženi rekuperator za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .



### 3.4.3.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$

Za  $M = 2,0$  i ostale konstantne naznačene vrijednosti, generiranu entropiju prikazuje dijagram na slici 64, iz kojeg je razvidno da i ovom slučaju entropija se prvo smanjuje s povećanjem vrijednosti  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0, a zatim raste s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 1,0 do 2,0.



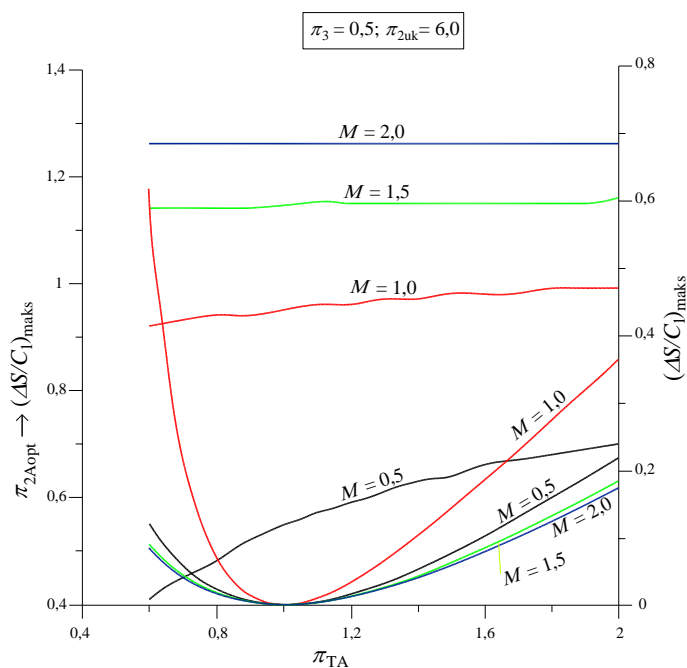
Slika 64. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

Također je vidljivo da i ovom slučaju svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima lokalni ekstrem i to maksimum te dotični parovi vrijednosti,  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , redom iznose: (1,247; 0,5331); (1,195; 0,1499); (1,190; 0,0274); (1,25; 0,0); (1,210; 0,0175); (1,140; 0,0623); (1,190; 0,1130) i (1,190; 0,1748). I ovdje se vidi da su vrijednosti generirane entropije kod neumreženog rekuperatora veće za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  u odnosu na neumreženi rekuperator za  $\pi_{2A} = 0,0$ .

Usporedbom rezultata generirane entropije sa slika 61 – 64 može se zaključiti da se s povećavanjem veličine  $M$  iznos bezdimenzijske generirane entropije smanjuje. Također, vidi se i da se mijenjaju i vrijednosti kako  $\pi_{2Aopt}$ , tako i vrijednosti generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , a dotične parove vrijednosti maksimuma vezanih za slike 61 – 64 prikazuje dijagram na slici 65, u kojem lijeva ordinatna os predstavlja vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$ , za koje se dobivaju maksimalne vrijednosti generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , a koje su prikazane na desnoj ordinatnoj osi.

Dijagram pokazuje da vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  rastu s povećavanjem veličine  $M$  te da više rastu s porastom  $\pi_{TA}$  pri nižim vrijednostima  $M$ , pa tako za  $M = 0,5$  vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  se povećavaju od 0,41 do 0,69, za  $M = 1,0$  vrijednosti se povećavaju od 0,88 do 0,98, za  $M = 1,5$  od 1,12 do 1,15 i konačno za  $M = 2,0$  od 1,24 do 1,25. Za  $M > 1,0$  vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  praktički postaju konstantne i neovisne o vrijednosti  $\pi_{TA}$ . Zbog nemogućnosti iznalaženja nul-točke prve derivacije funkcije u jednadžbi (85), dotične su optimalne vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  određene numerički pa se zato rezultati proračuna tih vrijednosti u dijagramu na slici 65 prikazuju fluktuirajućim linijama.



Slika 65. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$

Prema jednadžbama (56) i (57) optimalne vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  za koje se dobije maksimalni toplinski tok su neovisne o veličini  $\pi_{TA}$  pa za promatrani slučaj  $\pi_3 = 0,50$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,5$ ;  $1,0$ ;  $1,50$  i  $2,0$  iznose: 2,136; 3,0; 3,851 i 6,025. To znači da su te optimalne vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  bitno veće negoli vrijednosti  $kA_{0Aopt}/C_1$  za koje se dobivaju maksimalne generirane entropije, što znači da se u ovom slučaju maksimalni toplinski tokovi umreženog rekuperatora postižu pri manjim vrijednostima generirane entropije, a što je svakako termodinamički povoljno.

Ako se na slici 65 prate vrijednosti generirane entropije tada se vidi da sve parametarske krivulje  $M = konst.$  postižu nultu vrijednost, kao lokalni minimum, pri  $\pi_{TA} = 1,0$ , a za  $\pi_{TA} < 1,0$  najveće se vrijednosti maksimalne generirane entropije dobivaju za  $M = 1,0$ , dok se

za  $\pi_{TA} > 1,0$  najveće maksimalne vrijednosti generirane entropije dobivaju također za  $M = 1,0$ . Nadalje se može zaključiti da se s povećavanjem  $M$  iznad vrijednosti 1,0 smanjuju vrijednosti generirane entropije između dviju susjednih vrijednosti veličina  $M$  pa se iz slike 65 iščitavaju praktički iste vrijednosti generirane entropije za  $M = 1,50$  i  $M = 2,0$ .

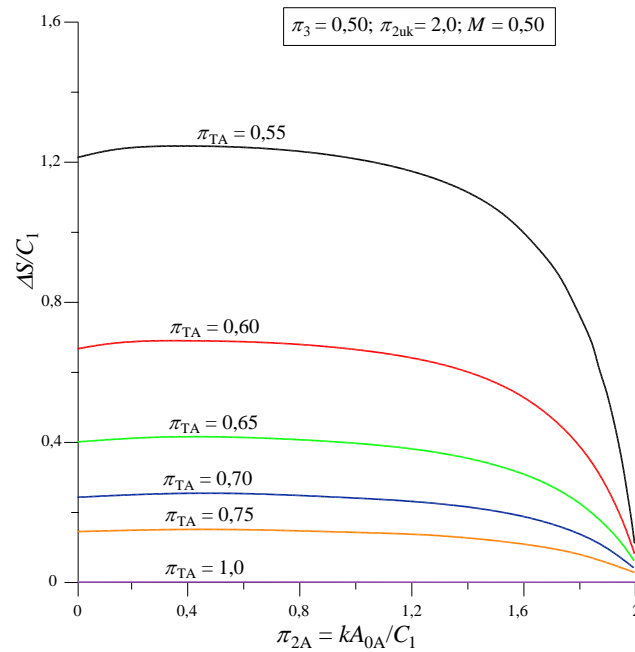
#### **3.4.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ i $\pi_{2uk} = 2,0$**

U prethodnom poglavlju 3.4.3 analizirana je vrijednost generirane entropije za zavisnosti o  $M$  i  $\pi_{TA}$  za  $\pi_3 = 0,50$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$ , a u okviru ovog poglavlja uzima se vrijednost  $\pi_{2uk} = 2,0$ .

##### **3.4.4.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$**

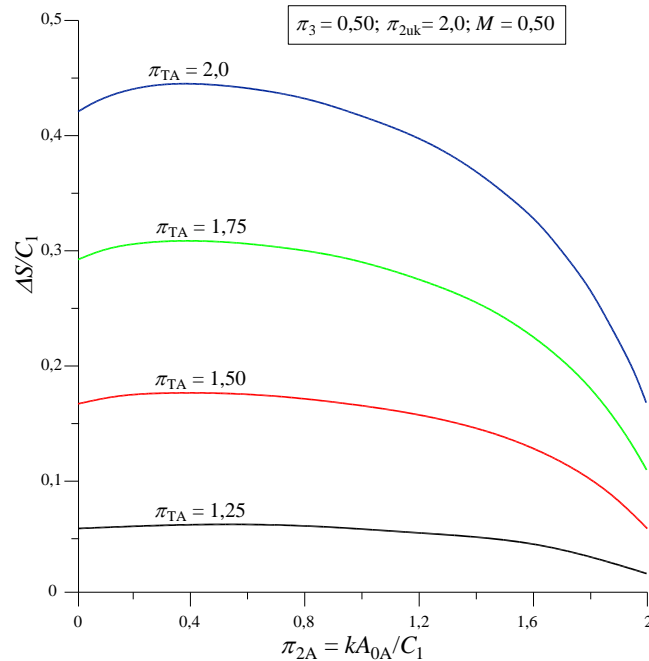
Generiranu entropiju za promatrani slučaj u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuju dijagrami na slikama 66 i 67, s time da rezultati na slici 66 počinju s  $\pi_{TA} = 0,55$ , a što je u skladu s jednadžbom (83) po kojoj bi se za  $\pi_{TA} < 0,50$  dobivale negativne vrijednosti veličine  $\pi_{TB}$ , što je fizikalno neodrživo.

Dijagram na slici 66 pokazuje da se i u ovom slučaju smanjuju vrijednosti generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,55 do 1,0 te da svaka parametarska vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$ , postiže lokalni ekstrem i to maksimum.



Slika 66. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75$  i  $1,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Dijagram na slici 67 pokazuje porast generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,25 do 2,0 te i u ovom slučaju svaka vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže svoj maksimum. Koordinate maksimuma  $\pi_{2Aopt}, (\Delta S/C_1)_{maks}$  za sve naznačene vrijednosti  $\pi_{TA}$  na slikama 66 i 67 redom iznose: (0,400; 1,2502); (0,400; 0,6913); (0,400; 0,4152); (0,400; 0,2523); (0,400; 0,1496); (0,400; 0,00); (0,400; 0,0585); (0,400; 0,1743); (0,400; 0,3076) i (0,400; 0,4444). Rezultati pokazuju da u promatranom slučaju veličina  $\pi_{2Aopt}$  za koju se postiže  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  ne ovisi o  $\pi_{TA}$  i za sve je dotične vrijednosti  $\pi_{TA}$  veličina  $\pi_{2Aopt} = 0,40$ .



Slika 67. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

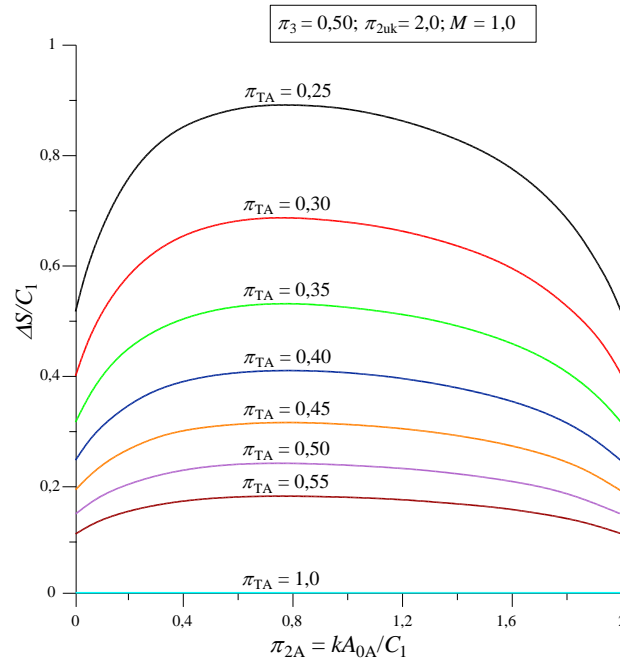
o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

S druge pak strane, ako se prema jednadžbi (56) izračuna veličinu  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobiva maksimalni toplinski tok tada se dobiva vrijednost  $(\pi_{2Aopt})\phi_{maks} = 0,4552$ . Potonja vrijednost je veća od vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koju se postižu maksimalne generirane entropije, no optimalni priključak za oba maksimuma se nalazi relativno blizu jedan drugom.

Nadalje, iz oba dijagrama na slikama 66 i 67 evidentno je da su u promatranom slučaju generirane entropije veće za  $\pi_{2A} = 0,0$  negoli za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

#### 3.4.4.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50; \pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$

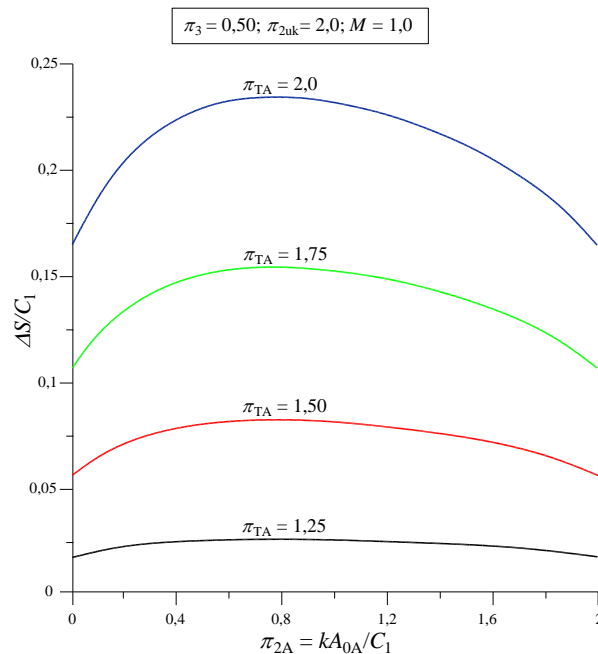
Za ovaj slučaj generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuju dijagrami na slikama 68 i 69. Dijagrami pokazuju slično ponašanje kao i u slučaju 3.4.4.1 s tom razlikom što se u potonjem slučaju dobivaju za istu vrijednost  $\pi_{TA}$  manje vrijednosti generirane entropije, i vidi se da su prihvatljive, shodno jednadžbi (83) i niže vrijednosti veličine  $\pi_{TA}$ .



Slika 68. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55$  i  $1,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

Također je iz dijagrama razvidno da se dobivaju međusobno jednake vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  i za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .



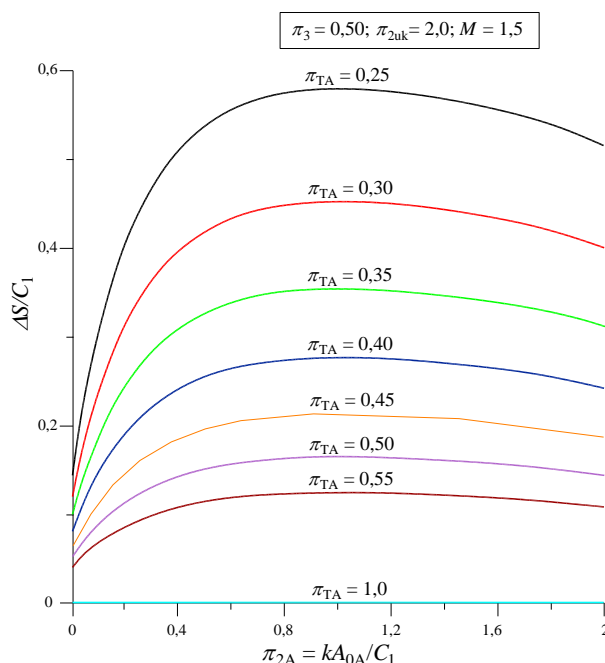
Slika 69. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

I u ovom slučaju se vidi da sve krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  imaju maksimum kao lokalni ekstrem. Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  u smjeru porasta  $\pi_{TA}$  redom iznose: (0,750; 0,8914); (0,750; 0,6839); (0,750; 0,5267); (0,750; 0,4053); (0,750; 0,3102); (0,750; 0,2352); (0,750; 0,1758); (0,750; 0,00); (0,750; 0,0248); (0,750; 0,0815); (0,750; 0,1543) i (0,750; 0,2352). Vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju se postiže  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  ne ovisi o veličini  $\pi_{TA}$  i za sve je vrijednosti  $\pi_{TA}$  vrijednost  $\pi_{2Aopt} = 0,75$ . Prema jednadžbi (34) vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koji se postiže maksimalni iznos toplinskog toka iznosi 1,0 što znači da su u promatranom slučaju više međusobno udaljene dotične optimalne vrijednosti. Razmak iznosi  $\Delta\pi_{2Aopt} = 0,25$  te je veći negoli u slučaju 3.4.4.1, koji je iznosio 0,0552.

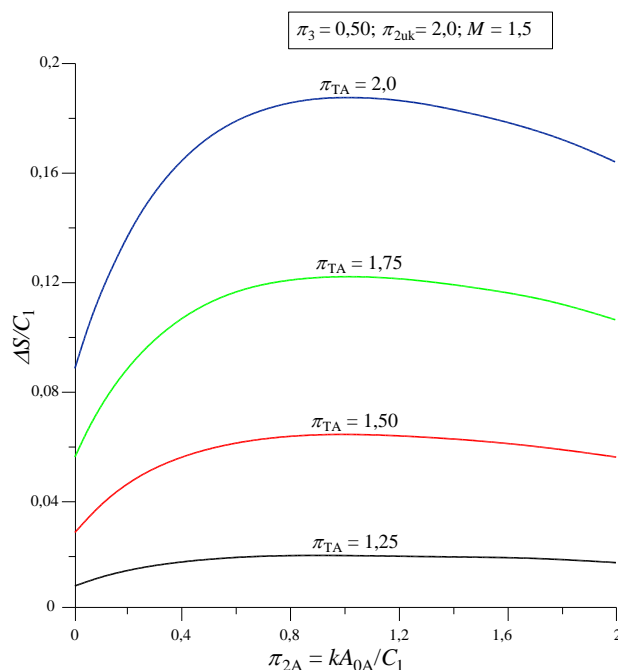
### 3.4.4.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$

Zavisnost generirane entropije, za  $M = 1,50$ , o veličinama  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{2A}$  prikazuju dijagrami na slikama 70 i 71, na način da je na slici 70 veličina  $\pi_{TA}$  varirana od 0,25 do 0,55 s korakom od 0,05, te za  $\pi_{TA} = 1,0$ , dok je na slici 71 ista veličina varirana od 1,25 do 2,0 s korakom od 0,25.



Slika 70. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55$  i 1,0 uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

Evidentno je iz dijagrama na slici 70 da su sve manje razlike generirane entropije, između dviju susjednih krivulja uz isti  $\Delta\pi_{TA} = 0,05$ , ako se pri tome susjedne vrijednosti povećavaju. Obrnuta je situacija na slici 71, u kojoj se s povećavanjem  $\pi_{TA}$ , povećava i razlika u generiranoj entropiji između dviju susjednih vrijednosti  $\pi_{TA}$  i  $\pi_{TA} + 0,25$ . Nadalje je razvidno iz oba dijagrama da su vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  veće pri vrijednostima  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  negoli pri  $\pi_{2A} = 0,0$ . Također se iz oba dijagrama prikaza vidi da sve parametarske krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu maksimalne vrijednosti generirane entropije i vrijednosti pripadajućih koordinata,  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , s porastom  $\pi_{TA}$ , redom iznose: (1,000; 0,5790); (1,000; 0,4519); (1,000; 0,3533); (1,000; 0,2755); (1,000; 0,2134); (1,000; 0,1636); (1,000; 0,1235); (1,000; 0,00); (1,000; 0,0190); (1,000; 0,0636); (1,000; 0,1222) i (1,000; 0,1886).



Slika 71. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

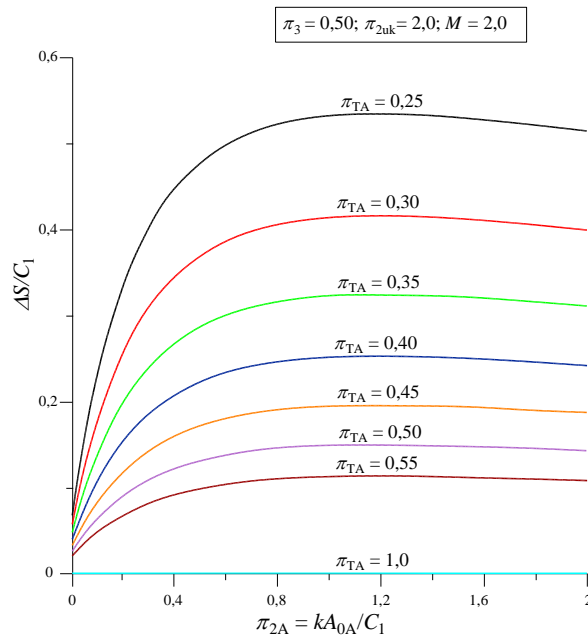
Iz predočenih brojevnih vrijednosti veličina  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  za zaključiti je da i u ovom slučaju veličina  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobivaju vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  ne zavisi o veličini  $\pi_{TA}$  i za sve vrijednosti  $\pi_{TA}$  iznosi  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ . Ako se za promatrani slučaj, koristeći jednadžbu (56), izračuna vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju se postiže maksimalni toplinski tok, dobiva se  $(\pi_{2Aopt})_{\phi maks} = 1,4907$ , što znači da je potonja vrijednost veća za  $1,4907 - 1,000 = 0,4907$ .

Usporede li se vrijednosti generirane entropije ovog slučaja sa slučajem pod 3.4.4.2 za zaključiti je da se u slučaju 3.4.4.3 dobivaju niže vrijednosti generirane entropije.



### 3.4.4.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 0,50$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$

Za  $\pi_3 = 0,50$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$  dijagrami na slikama 72 i 73 prikazuju generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , ali za  $M = 2,0$ .

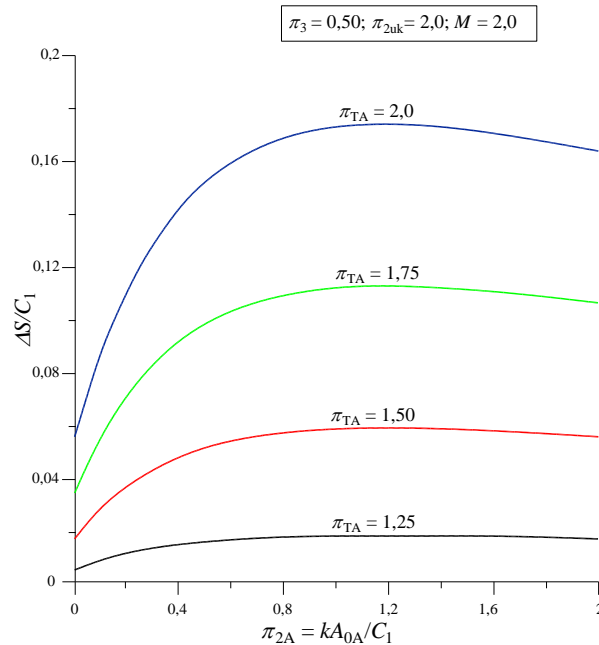


Slika 72. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55$  i  $1,0$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Oba dijagrama pokazuju slično ponašanje kao u slučaju 3.4.4.3 s tom razlikom da se u ovom slučaju dobivaju niže vrijednosti generirane entropije. Vidi se da i u ovom slučaju sve parametarske krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu maksimume kao lokane ekstreme i te su vrijednosti veće i od vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  odnosno za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  s povećavanjem  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,200; 0,5345); (1,200; 0,4161); (1,200; 0,3247); (1,200; 0,2529); (1,200; 0,1958); (1,200; 0,1499); (1,200; 0,1132); (1,200; 0,0175); (1,200; 0,058653); (1,200; 0,1130) i (1,200; 0,1748). Vidi se da i u ovom slučaju veličina  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobivaju vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  ne ovisi o veličini  $\pi_{TA}$  i za sve je vrijednosti u ovom slučaju  $\pi_{2Aopt} = 1,20$ . Ako se za  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$  izračuna prema jednadžbi (56) veličinu  $(\pi_{2Aopt})_{\phi maks}$  tada se dobiva da je  $(\pi_{2Aopt})_{\phi maks} = 2,176$ , a što je veće od  $\pi_{2uk} = 2,0$ . To znači da se u tom slučaju ne postiže  $\Phi_{maks}$ , a što je u skladu s kriterijem danim jednadžbom (67).

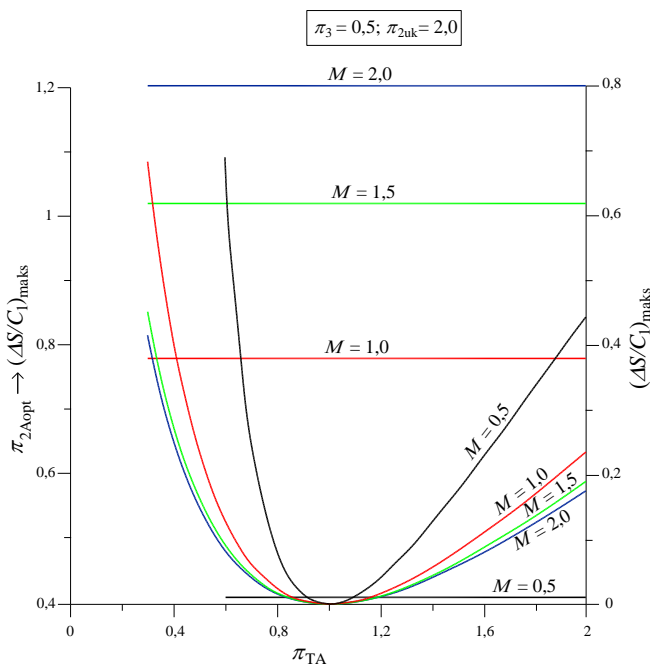


Slika 73. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 0,5; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Dakle, u ovom slučaju ne postoji maksimum toplinskog toka kao ekstrem, ali maksimum generirane entropije postoji i to za svaku parametarsku vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  Ovaj slučaj pokazuje primjer u kojem se javlja generirana entropija kao lokalni ekstrem, a što je ujedno i najveća vrijednost, dok to nije slučaj s toplinskim tokom čija se najveća vrijednost javlja za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 2,0$ . To znači da se tada radi o neumreženom protusmjernom rekuperatoru koji na jednom ulazu ima struju temperature  $T_2'$  a na drugom struju temperature  $T_{1A}'$ .

Ako se sve vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  navedene od 3.4.4.1 – 3.4.4.4 prikažu u jednom zajedničkom dijagramu, tada se dobiva prikaz dan slikom 74. Vidljivo je da vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postiže maksimalna generirana entropija ne ovise o varijabli  $\pi_{TA}$ , nego samo o varijabli  $M$ , na način da s njezinim porastom, raste i veličina  $\pi_{2Aopt}$ . Nasuprot tomu, pripadajuće vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  ovise o  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Ako je  $\pi_{TA} < 1,0$  tada s njezinim povećavanjem od početne vrijednosti do jedinice, vrijednost  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  se smanjuje od početne vrijednosti do nule, a zatim za  $\pi_{TA} > 1,0$  vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  se povećavaju. Za promatrane slučajeve se vidi da se najveće maksimalne generirane entropije postižu za  $M = 0,50$  zatim slijede niže vrijednosti za  $M = 1,0$ , a za  $M = 1,50$  i  $2,0$  se praktički dobivaju jednake vrijednosti maksimalne generirane entropije.



Slika 74. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  i  $\pi_{2A\text{opt}}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$

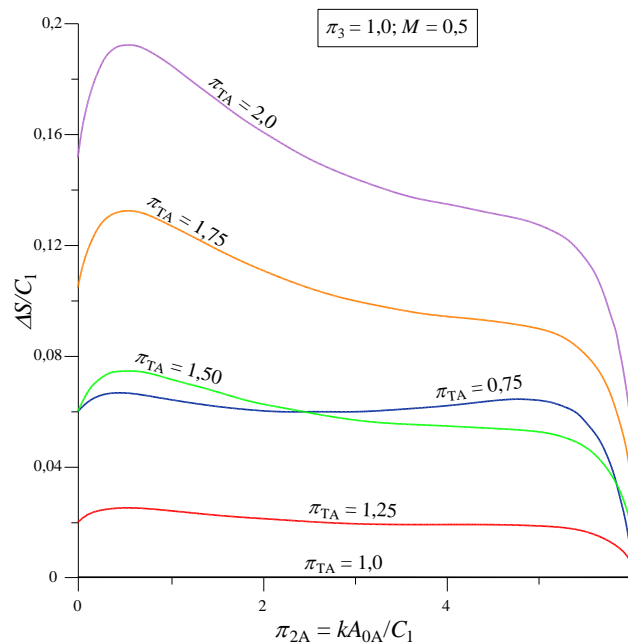
Promatrani slučaj **3.4.4.4** odgovara slučaju u kojem se ne pojavljuje maksimalni toplinski tok kao lokalni ekstrem jer je jednadžbom (56) pokazano da za taj slučaj je  $(\pi_{2A\text{opt}})_{\Phi_{\text{maks}}} = 2,176$ , a koji je veći od ukupno zadane površine  $\pi_{2uk} = 2,0$ . Nasuprot tomu, entropijska je analiza pokazala da se u promatranom slučaju za sve odabrane vrijednosti  $\pi_{TA}$  i  $M$  pojavljuje maksimalna vrijednost generirane entropije. To samo znači da, a što potvrđuju funkcije u jednadžbama (13) i (85), imaju različite vrijednosti pripadajućih  $\pi_{2A\text{opt}}$ , što je fizikalno i opravdano.

### 3.4.5. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

#### 3.4.5.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 0,5$

Rezultati proračuna generirane entropije za ovaj slučaj kao i za ostale slučajeve od **3.4.5.1** – **3.4.5.4** dobiveni su prema jednadžbi (102) pa tako dijagram na slici 75 prikazuje generiranu entropiju u zavisnosti o veličini  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  umreženog izbalansiranog rekuperatora uz  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,50$ . Evidentno je da u ovom slučaju, uz uzeti korak  $\Delta\pi_{TA} = 0,25$ , najniža fizikalno prihvatljiva vrijednost  $\pi_{TA}$ , shodno jednadžbi (83) iznosi 0,75, pa se vrijednosti dotične varijable kreću od 0,75 do 2,0. Dijagram na slici 75 pokazuje da se vrijednosti

generirane entropije prvo smanjuju s povećanjem vrijednosti  $\pi_{TA}$  od 0,75 do 1,0, a zatim se povećavaju s povećanjem  $\pi_{TA}$  od 1,0 do 2,0. Zanimljivo je uočiti da parametarska krivulja  $\pi_{TA} = 0,75$  ima dva lokalna maksimuma generirane entropije, dok ostale parametarske vrijednosti  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  imaju po jedan maksimum kao lokalni ekstrem. Vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  određene su jednadžbama (103) i (105) i vidljivo je da je u svim slučajevima generirana entropija neumreženog izbalansiranog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$  veća od generirane entropije za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

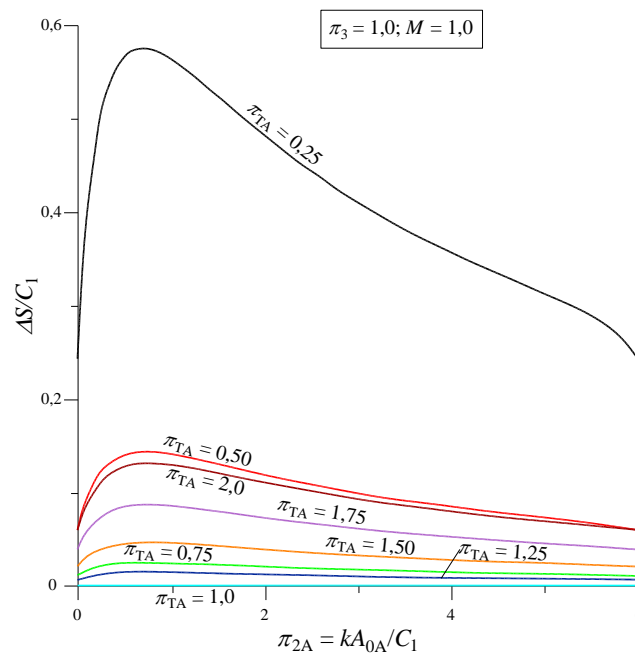


Slika 75. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,5$

Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ;  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , za odabrane vrijednosti  $\pi_{TA}$  redom iznose: (0,4500; 0,0665); (4,80; 0,0641); (0,50; 0,0); (0,500; 0,0249); (0,550; 0,0744); (0,550; 0,1321) i (0,550; 0,1920).

### 3.4.5.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,0$

Dijagram na slici 76 prikazuje generiranu entropiju umreženog izbalansiranog rekuperatora za vrijednost varijable  $M = 1,0$ , iz kojega je razvidno da sve parametarske krivulje imaju također maksimume kao lokalne ekstreme.



Slika 76. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

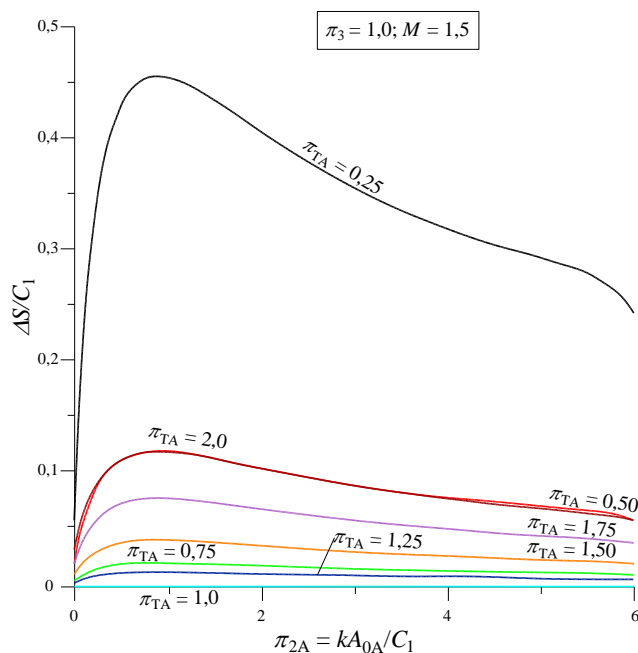
o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

Također se vidi da se za oba neumrežena izbalansirana rekuperatora,  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobivaju međusobno jednake vrijednosti generirane entropije, a što je u skladu s jednadžbama (103) i (105).

Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ;  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , dobivene numeričkim postupkom, za naznačene parametarske vrijednosti  $\pi_{TA}$  redom iznose: (0,700; 0,5751); (0,750; 0,1431); (0,750; 0,0243); (0,750; 0,00); (0,750; 0,0142); (0,750; 0,0460); (0,750; 0,0864) i (0,800; 0,1308). Evidentno je da je u promatranom slučaju  $\pi_{2Aopt}$  praktički neovisan o veličini  $\pi_{TA}$ .

### 3.4.5.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 1,5$

Za  $M = 1,5$  i ostale nepromijenjene vrijednosti generiranu entropiju prikazuje dijagram na slici 77, iz kojeg se vidi da se i ovdje prvo generirana entropija smanjuje s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0 a zatim s daljnjim porastom  $\pi_{TA}$  od 1,0 generirana entropija ponovo raste.



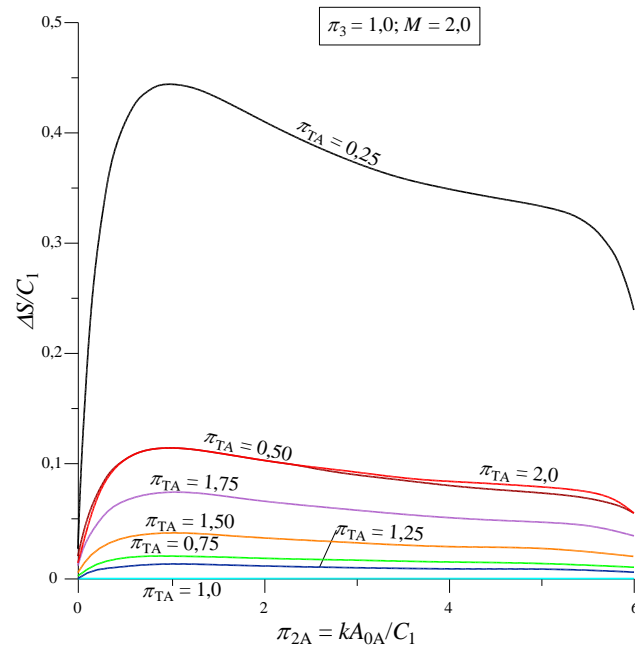
Slika 77. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$

Također se može zaključiti iz gornjeg dijagrama da se dobivaju praktički iste vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{TA} = 0,50$  i  $\pi_{TA} = 2,0$ . Vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  određene su jednadžbama (103) i (105) i vidljivo je da je u svim slučajevima generirana entropija neumreženog izbalansiranog rekuperatora za  $\pi_{2A} = 0,0$  manja od generirane entropije za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Razvidno je i u ovom slučaju da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže maksimum kao lokalni ekstrem, a pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ;  $(\Delta S/C1)_{maks}$ , za naznačene parametarske vrijednosti  $\pi_{TA}$  redom iznose: (0,900; 0,4542); (0,900; 0,1199); (0,900; 0,0210); (0,900; 0,00); (0,900; 0,01263); (0,900; 0,0415); (0,900; 0,0785) i (0,900; 0,1196). Evidentno je da u promatranom slučaju vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ne ovisi o  $\pi_{TA}$ .

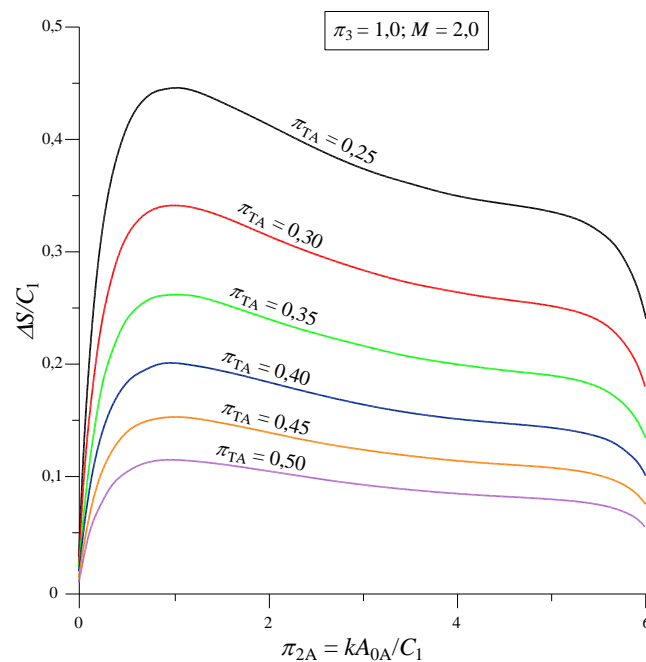
#### 3.4.5.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$ i $M = 2,0$

Dijagram na slici 78 prikazuje generiranu entropiju za  $M = 2,0$ , koji pokazuje slično ponašanje kao i dijagram na slici 77. I u ovom slučaju svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  pokazuje lokalni maksimum, čiji parovi vrijednosti redom iznose: (1,00; 0,4463); (1,00; 0,1178); (1,00; 0,0206); (1,00; 0,00); (1,00; 0,0124); (1,00; 0,0408); (1,00; 0,0773) i

(1,00; 0,1178). Vidi se da u promatranom slučaju vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ne ovisi o  $\pi_{TA}$  i vrijednost mu je za sve  $\pi_{TA}$  jednaka 1,0.



Slika 78. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

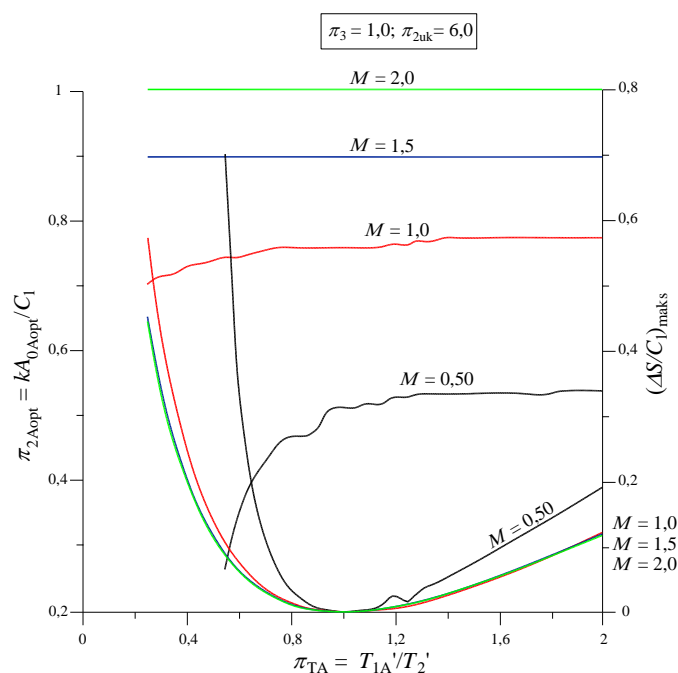


Slika 79. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,40; 0,45$  i  $0,50$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

Kako se vidi velika praznina između parametarskih krivulja  $\pi_{TA} = 0,25$  i  $0,50$  prikladnim se nameće prikazati rješenja i za parametarske krivulje unutar naznačenog intervala pa tako dijagram na slici 79 prikazuje generiranu entropiju za  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 0,50$ , s korakom od  $0,05$ .

Iz dijagrama je vidljivo da se u ovom slučaju generirana entropija kontinuirano smanjuje s povećavanjem veličine  $\pi_{TA}$ , te s povećavanjem  $\pi_{TA}$  vidi se da se smanjuje vrijednost generirane entropije između dviju susjednih parametarskih krivulja. Također je iz gornjeg dijagrama vidljivo da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima lokalni ekstrem i to maksimum.

Ako se vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i pripadajući maksimumi  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  za slučajeve od **3.4.5.1** do **3.4.5.4** prikažu u zajedničkom dijagramu tada se dobiva kvantitativni prikaz dan dijagramski na slici 80, iz koje je vidljivo da vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  raste s povećavanjem veličine  $M$ .



Slika 80. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  i  $\pi_{2Aopt}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$

U promatranom slučaju za  $M = 0,50$ , vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  se povećava od  $0,265$  do  $0,54$  s povećavanjem veličine  $\pi_{TA}$  od  $0,55$  do  $2,0$ . No, iz dijagrama se vidi da za  $1,3 \leq \pi_{TA} \leq 2,0$  vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  postaje praktički konstantna i jednaka  $0,54$ . Za  $M = 1,0$  još je manja promjena veličine  $\pi_{2Aopt}$ , koja u promatranom slučaju raste od  $0,705$  do  $0,775$ , s time da praktički postaje konstantan i jednak  $0,775$  za  $0,80 \leq \pi_{TA}$ . Daljnjim porastom veličine  $M$  na



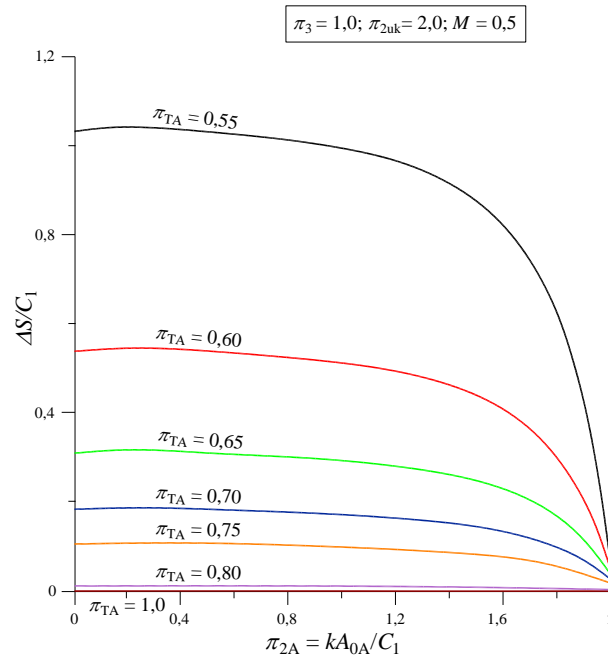
1,50 i 2,0 vidljivo je da su vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  praktički konstantne i jednake 0,90 odnosno 1,0. Dobivene maksimalne vrijednosti za  $\pi_{TA} < 1,0$  padaju s povećavanjem  $M$ . U tom slučaju se razlikuju postignute maksimalne vrijednosti za  $M = 0,50$  i  $1,0$  dok su za  $M = 1,50$  i  $2,0$  praktički jednake vrijednosti maksimalne generirane entropije. Naravno sve parametarske krivulje  $M = konst.$  pokazuju nultu vrijednost, lokalni minimum, za  $\pi_{TA} = 1,0$ . Za  $\pi_{TA} > 1,0$  maksimalna se generirana entropija smanjuje s porastom  $M$ , ali se vidi da se za  $M = 1,0; 1,50$  i  $2,0$  dobivaju praktički međusobno jednake vrijednosti generirane entropije. Važno je i ovdje napomenuti da su sve vrijednosti vezane za sliku 80 dobivene numerički zbog čega se i javlja određena „nestabilnost“ rezultata proračuna, a što se poglavito događa kada se približavamo vrijednosti  $\pi_{TA} = 1,0$ .

### 3.4.6. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$

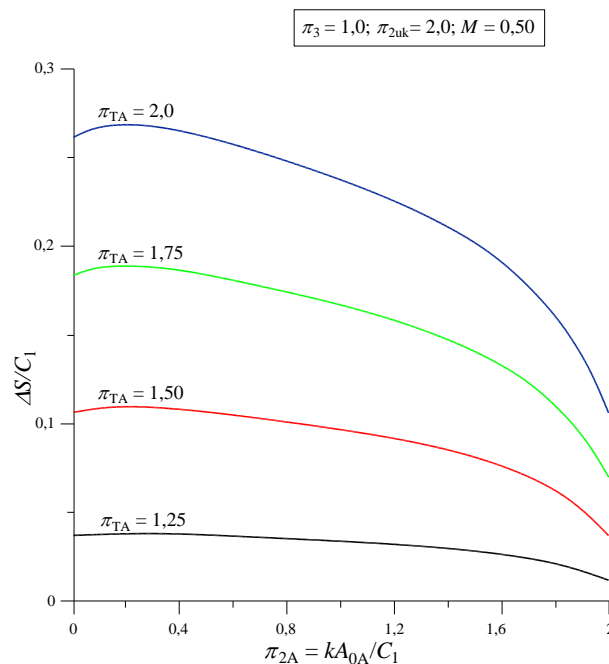
#### 3.4.6.1. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 0,5$

Kako je prema jednadžbi (102) veličina  $\pi_{2uk}$  jedna od signifikantnih varijabli koja utječe na iznos generirane entropije, u okviru poglavlja 3.4.6.1 – 3.4.6.4 uzima se vrijednost  $\pi_{2uk} = 2,0$ , budući da je u prethodnim poglavljima uzeta relativno velika vrijednost varijable  $\pi_{2uk} = 6,0$ .

Dijagrami na slikama 81 i 82 prikazuju generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  za  $M = 0,50$ , na način da je na slici 81  $\pi_{TA}$  variran od 0,55 do 1,0, a na slici 82 variran je od 1,25 do 2,0. Iz dijagrama na slici 81 se vidi da se generirana entropija smanjuje s porastom  $\pi_{TA}$ , dok dijagram na slici 82 pokazuje da se generirana entropija povećava s porastom  $\pi_{TA}$ . Iz oba dijagrama se vidi da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA}$  pokazuje lokalni ekstrem i to maksimum, a pripadajući parovi vrijednosti  $\pi_{2Aopt}; (\Delta S/C_1)_{maks}$  za prikazane parametarske krivulje redom iznose: (0,200; 1,0392); (0,200; 0,5441); (0,200; 0,3145); (0,200; 0,1856); (0,200; 0,1074); (0,2000; 0,0025); (0,200; 0,00); (0,200; 0,0373); (0,200; 0,1082); (0,200; 0,1872) i (0,200; 0,2664). Dobivene vrijednosti pokazuju da u promatranom slučaju  $\pi_{2Aopt}$  ne ovise o vrijednosti  $\pi_{TA}$ .



Slika 81. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80$  i 1,0 uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$



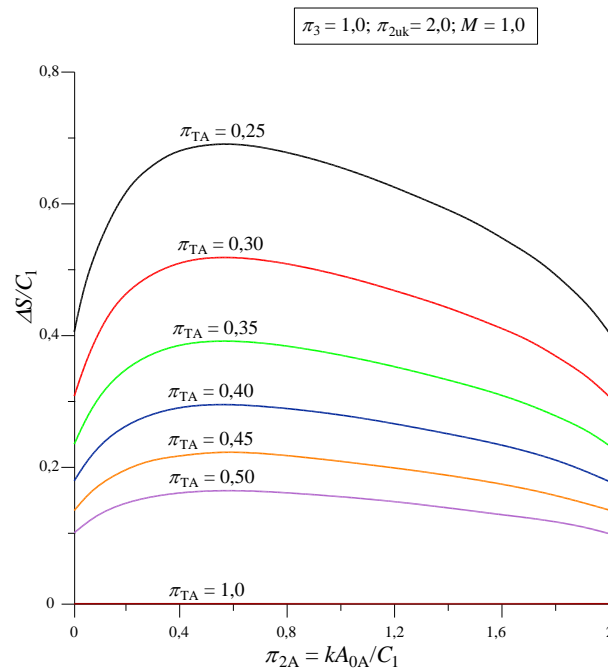
Slika 82. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i 2,0 uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Evidentno je iz oba gornja dijagrama da sve parametarske krivulje  $\pi_{TA}$  u intervalu  $0,65 \leq \pi_{TA} \leq 1,25$  pokazuju vrlo male promjene generirane entropije nad intervalom

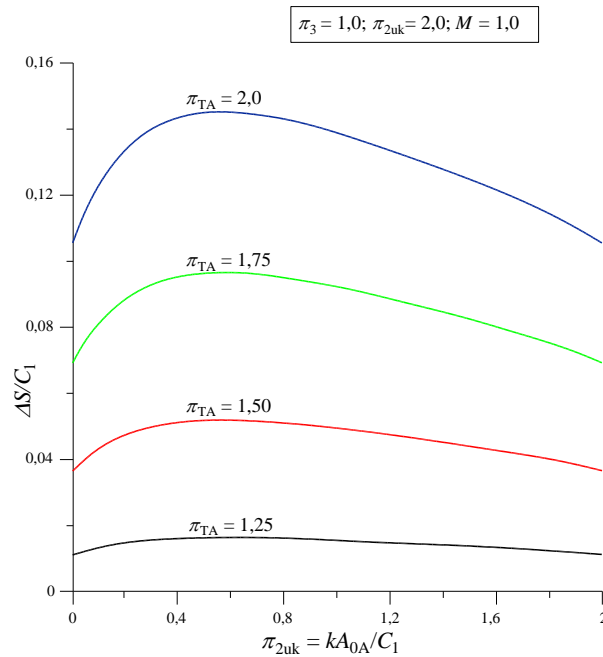
$0 \leq \pi_{2A} \leq 1,40$ . Primjetne su razlike nad ostalim parametarskim krivuljama poglavito s približavanjem vrijednosti  $\pi_{2A}$  prema  $\pi_{2uk}$ . Također se u promatranom slučaju može uočiti da su vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = 0,0$  veće od vrijednosti generirane entropije za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

### 3.4.6.2. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,0$

Za  $M = 1,0$  i ostale fiksne vrijednosti dijagrami na slikama 83 i 84 prikazuju vrijednosti generirane entropije u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , pri čemu dijagram na slici 83 pokazuje da se vrijednosti generirane entropije smanjuju s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0, a dijagram na slici 84 pokazuje porast generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,25 do 2,0.



Slika 83. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50$  i  $1,0$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$



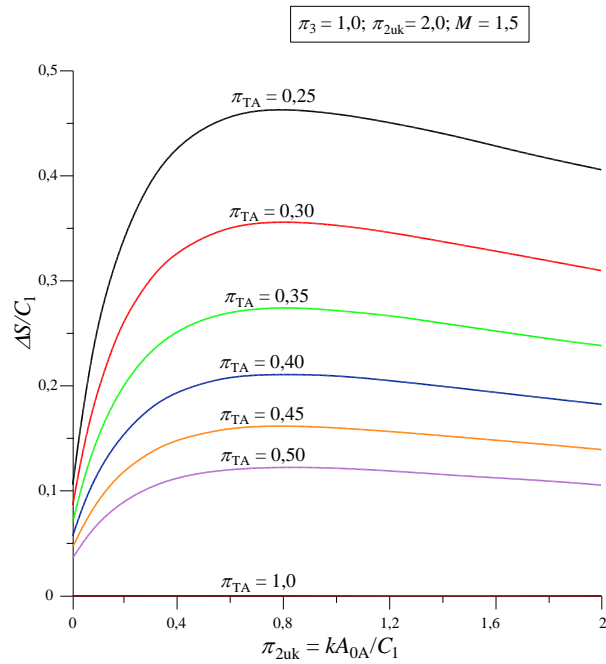
Slika 84. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora

o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

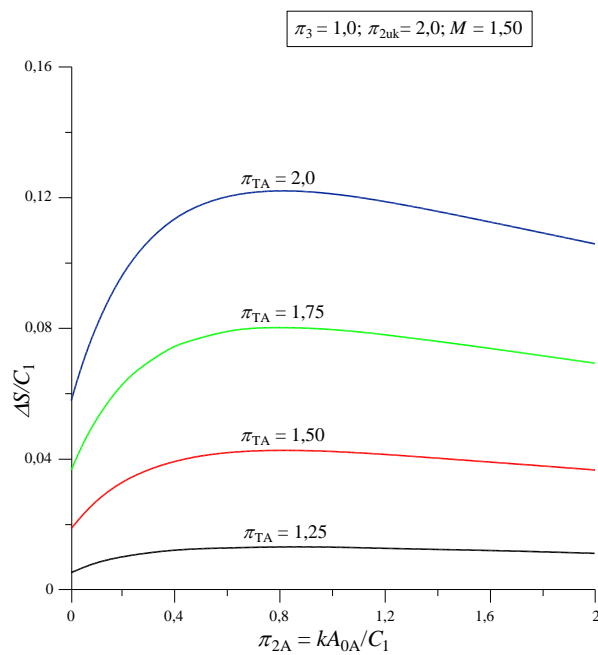
Oba dijagrama pokazuju, pri istom  $\pi_{TA}$ , jednake vrijednosti generirane entropije na krajevima intervala tj. na  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Nadalje, oba dijagrama pokazuju da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima lokalni maksimum i pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ;  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  za naznačene vrijednosti  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  redom iznose:  $(0,550; 0,6842)$ ;  $(0,550; 0,5153)$ ;  $(0,550; 0,3905)$ ;  $(0,550; 0,2962)$ ;  $(0,550; 0,2238)$ ;  $(0,550; 0,1677)$ ;  $(0,550; 0,00)$ ;  $(0,550; 0,0120)$ ;  $(0,550; 0,0516)$ ;  $(0,550; 0,09620)$  i  $(0,550; 0,1448)$ . Vidi se da u ovom slučaju vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ne zavisi o varijabli  $\pi_{TA}$  i za sve je vrijednosti  $\pi_{TA}$  vrijednost  $\pi_{2Aopt} = 0,55$ .

### 3.4.6.3. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 1,5$

Dijagrami na slikama 85 i 86 prikazuju generiranu entropiju u zavisnosti o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_{TA}$ , ali za  $M = 1,50$ , tako da se iz dijagrama na slici 85 vidi da se generirana entropija smanjuje s povećavanjem  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0, dok dijagram na slici 86 pokazuje porast generirane entropije s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,25 do 2,0. Oba dijagrama pokazuju da je u promatranom slučaju generirana entropija veća, za isti  $\pi_{TA}$ , za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  negoli za  $\pi_{2A} = 0,0$ .



Slika 85. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50$  i  $1,0$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$



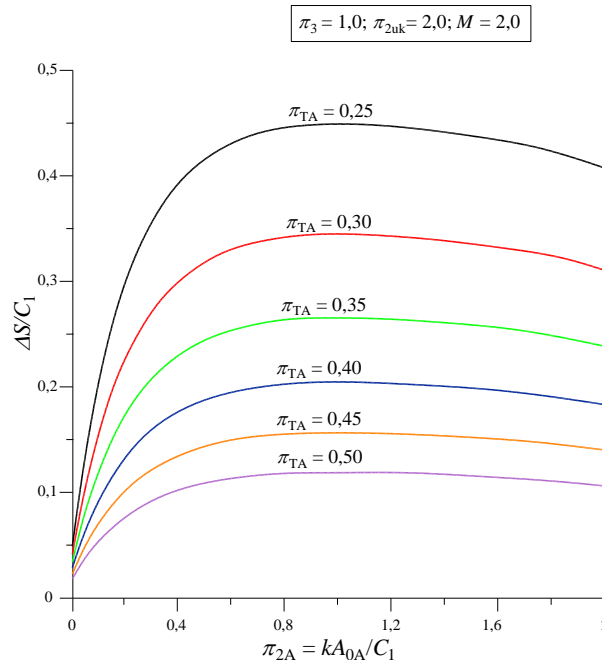
Slika 86. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 1,25; 1,50; 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

Vidi se, nadalje, da i u ovom slučaju sve krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu lokalni maksimum pri čemu odnosne vrijednosti  $\pi_{2Aopt}; (\Delta S/C_1)_{maks}$  redom iznose:  $(0,800; 0,4623); (0,800; 0,3550);$

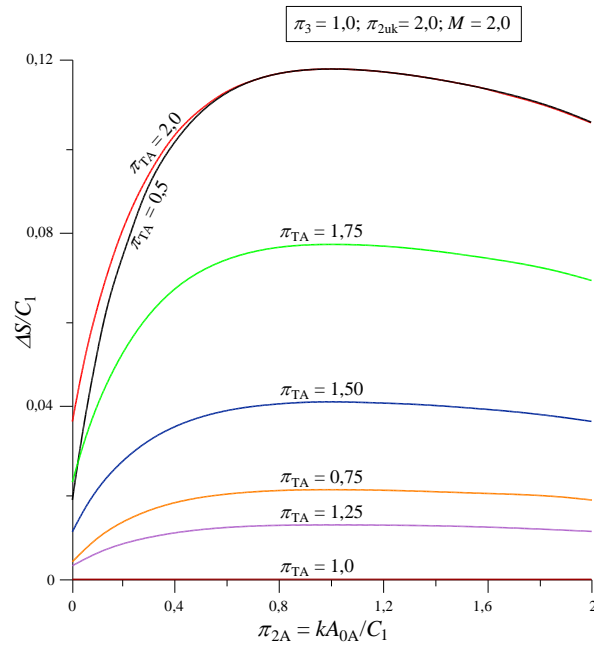
(0,800; 0,2736); (0,800; 0,2106); (0,800; 0,1613); (0,800; 0,1223); (0,800; 0,00); (0,800; 0,0129); (0,800; 0,0422); (0,800; 0,0798); (0,800; 0,1215). Također je vidljivo da je  $\pi_{2Aopt}$  nezavisa o varijabli  $\pi_{TA}$  i za sve slučajeve iznosi  $\pi_{2Aopt} = 0,800$ .

#### 3.4.6.4. Generirana entropija za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$ i $M = 2,0$

Ako se u razmatranje uzme slučaj  $\pi_{2uk} = 2,0$  tada se dobivaju vrijednosti generirane entropije koje dijagramski prikazuju slike 87 i 88, s time da je na slici 87 vrijednost  $\pi_{TA}$  varirana od 0,25 do 0,50, a na slici 88 od 0,50 do 2,0. Iz oba prikaza je vidljivo da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže maksimum generirane entropije i to kao lokalni ekstrem, čije vrijednosti se prvo smanjuju s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,25 do 1,0, a zatim rastu s porastom  $\pi_{TA}$  od 1,0 do 2,0. Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ;  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  s porastom  $\pi_{TA}$  redom iznose: (1,00; 0,4463); (1,00; 0,3424); (1,00; 0,2637); (1,00; 0,2029); (1,00; 0,1553); (1,00; 0,1178); (1,00; 0,0206); (1,00; 0,00); (1,00; 0,01242); (1,00; 0,0408); (1,00; 0,0773) i (1,00; 0,1178). Rezultati pokazuju da u promatranom slučaju  $\pi_{2Aopt}$  ne ovisi o  $\pi_{TA}$  i za sve je slučajeve  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ .



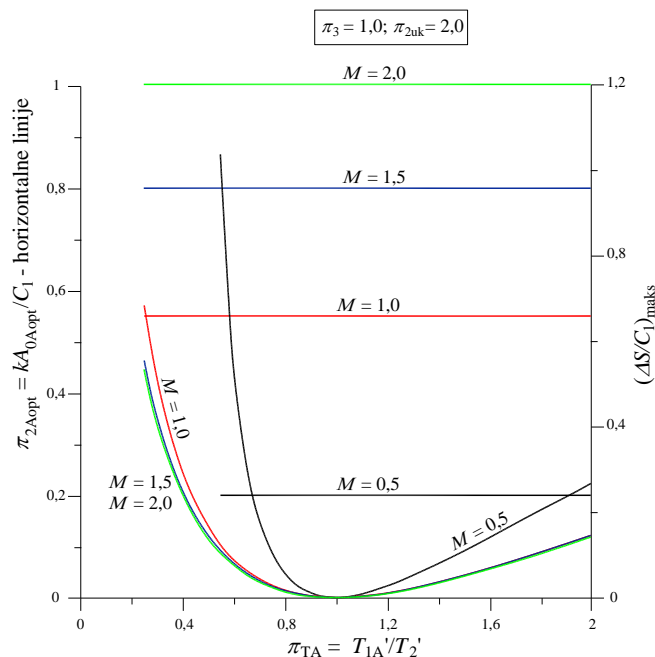
Slika 87. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,25; 0,3; 0,35; 0,40; 0,45$  i  $0,50$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$



Slika 88. Zavisnost bezdimenzijske generirane entropije umreženog rekuperatora o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA} = 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50, 1,75$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 1,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Kako je i za  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $2,0$  uz  $M = 2,0$ , također  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  za zaključiti je da za  $M = 2,0$  je vrijednost  $\pi_{2opt}$  neovisna o  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_{TA}$ . Također, usporedbom dobivenih maksimalnih vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  za  $M = 2,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  s  $\pi_{2uk} = 6,0$  vidi se da se dobivaju međusobno jednake vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  i koje su neovisne o  $\pi_{2uk}$ .

Ako se vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  i pripadajući maksimumi  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  za slučajeve od **3.4.6.1** do **3.4.6.4** prikažu u zajedničkom dijagramu tada se dobiva kvantitativni prikaz dan dijagramski na slici 89.



Slika 89. Zavisnost maksimalne generirane entropije  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$  i  $\pi_{2A_{\text{opt}}}$  umreženog rekuperatora o  $M$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$

Dijagram na slici 89 pokazuje da su u ovom slučaju vrijednosti  $\pi_{2A_{\text{opt}}}$  konstantne i neovisne o  $\pi_{TA}$ , za razliku od slučaja danih slikom 80. Također se vidi da su u ovom slučaju niže vrijednosti maksimalne generirane entropije, što potvrđuje činjenicu da varijabla  $\pi_{2uk}$  ima signifikantan utjecaj kako na  $\pi_{2A_{\text{opt}}}$  tako i na  $(\Delta S/C_1)_{\text{maks}}$ . Jedino za  $M = 2,0$  se dobivaju iste vrijednosti  $\pi_{2A_{\text{opt}}} = 1,0$  za  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$ .

### 3.5. Dijagramski prikazi omjera $R$ bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije

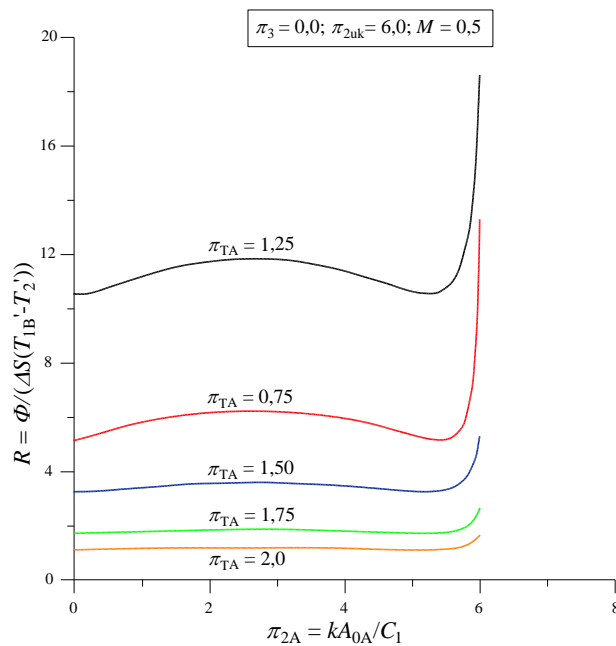
Pored prethodno dva razrađena kriterija, kriterija maksimalnog toplinskog toka i kriterija maksimalne generirane entropije, nameće se korisnim prikazati ponašanje umreženog rekuperatora prema kriteriju omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije, pri čemu je dotični omjer označen s  $R$ . Dotična analiza obuhvaća praćenje omjera, u općem slučaju, jednadžbi (13) i (79), odnosno njihovih specijalnih slučajeva za  $\pi_3 = 0,0$  omjera jednadžbi (35) i (85) odnosno za  $\pi_3 = 1,0$  omjera jednadžbi (43) i (96).



### 3.5.1. Slučajevi za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

#### 3.5.1.1. Omjer za $M = 0,5$

Dijagram na slici 90 prikazuje omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz naznačene dodatne uvjete.

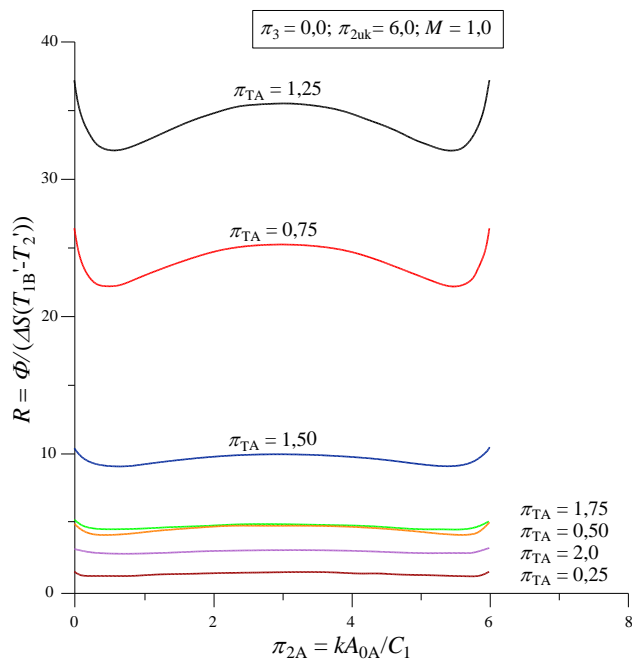


Slika 90. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,5$

Dijagram na slici 90 pokazuje da veličina  $R$  prvo raste s porastom  $\pi_{TA}$ , za  $\pi_{TA} = 1,0$  poprimila bi beskonačnu vrijednost, a zatim daljnjim povećavanjem  $\pi_{TA}$  veličina  $R$  se smanjuje. Evidentno je da svaka parametarska krivulja postiže lokalni ekstrem i to maksimum koji se dobiva pri istom  $\pi_{2Aopt}$  koji je određen jednadžbom (37) odnosno jednadžbom (94) i za sve navedene vrijednosti iznosi  $\pi_{2Aopt} = 2,653$ . Također se iz dijagramskog prikaza vidi da pojedine krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postižu i lokalne minimume i to za vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  koje su bliske vrijednostima  $\pi_{2Aopt} = 0,0$  odnosno  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}$ . Te vrijednosti su termodinamički nepovoljne jer mali iznos  $R$  znači i veću entropijsku produkciju. Iz gornjeg se dijagrama također može vidjeti da se apsolutno najveće vrijednost veličine  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , tj. u slučaju neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A.

3.5.1.2. Omjer za  $M = 1,0$ 

Rezultate proračuna omjera za ovaj slučaj dijagramski prikazuje slika 91, iz koje je razvidno da su dobivene vrijednosti za svaku parametarsku krivulju  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  simetrične u odnosu na apscisnu vrijednost  $\pi_{2Aopt} = \pi_{2uk}/2 = 3,0$ , a što je ujedno i vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  kod koje se javlja maksimum omjera  $R$ , i to kao lokalni ekstrem. Svaka parametarska krivulja dodatno pokazuje i dva minimuma također kao lokalne ekstreme.



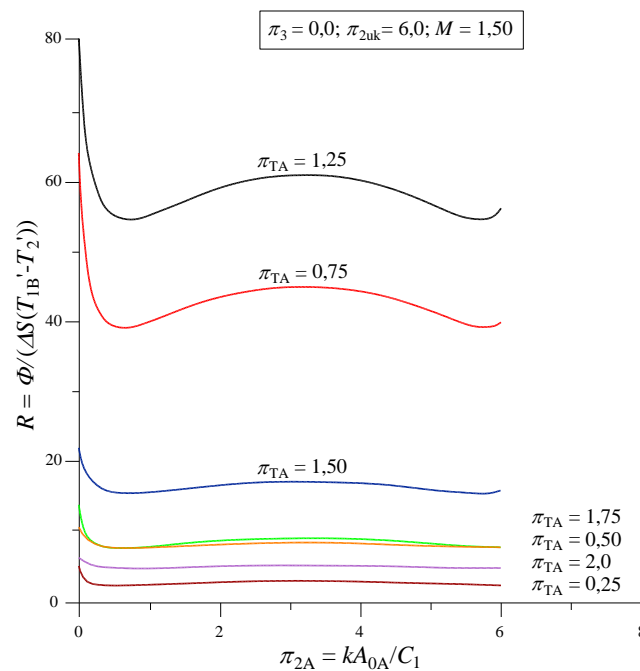
Slika 91. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

I u ovom slučaju pozicije minimuma, a koje svakako treba izbjegavati, također se pojavljuju blizu vrijednosti  $\pi_{2A} = 0,0$  odnosno  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . Apsolutni maksimumi vrijednosti  $R$  javljaju se za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  i međusobno su jednaki. Također se vidi da vrijednosti  $R$  prvo rastu s porastom  $\pi_{TA}$  od 0,25 prema jedinici, pri kojoj bi  $R \rightarrow \infty$ , a zatim se smanjuje s porastom  $\pi_{TA}$  prema vrijednosti 2,0. Ako se usporede ove vrijednosti s vrijednostima na slici 90, za zaključiti je da se u potonjem slučaju, slika 91, za isti  $\pi_{TA}$  dobivaju veće vrijednosti veličine  $R$ . Isto tako se vidi da na slici 91 postoje dvije dodatne vrijednosti  $\pi_{TA} = 0,25$  i  $0,50$ , a što nije bilo moguće u prethodnom slučaju, budući se u tom slučaju za  $\pi_{TA} = 0,25$  i  $0,50$  prema jednadžbi (83) dobivaju fizikalno neprihvatljive negativne vrijednosti veličine  $\pi_{TB}$ .

3.5.1.3. Omjer za  $M = 1,5$ 

Rezultate proračuna za navedeni slučaj prikazuje dijagram na slici 92, u kojem je broj parametarskih vrijednosti  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  jednak onome na slici 91. I u ovom slučaju svaka parametarska vrijednost  $\pi_{TA}$  ima također tri lokalna ekstrema i to po dva minimuma i po jedan maksimum. Također vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  koji odgovaraju minimumima su također vrlo blizu vrijednosti 0,0 odnosno  $\pi_{2uk}$ , dok su vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se javljaju maksimumi omjera  $R$  jednaki za sve  $\pi_{TA}$  i iznose, jednadžba (37) odnosno jednadžba (94),  $\pi_{2Aopt} = 3,203$ . Ako  $\pi_{TA}$  raste od 0,25 prema jedinici tada vrijednost  $R$  također raste i za  $\pi_{TA} = 1,0$  težila bi beskonačnoj vrijednosti. S porastom vrijednosti  $\pi_{TA}$  iznad vrijednosti 1,0, vidi se da dolazi do smanjenja vrijednosti  $R$ . Također je razvidno iz dijagrama na slici 92 da se apsolutno najveće vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za slučaj  $\pi_{2A} = 0,0$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1B.

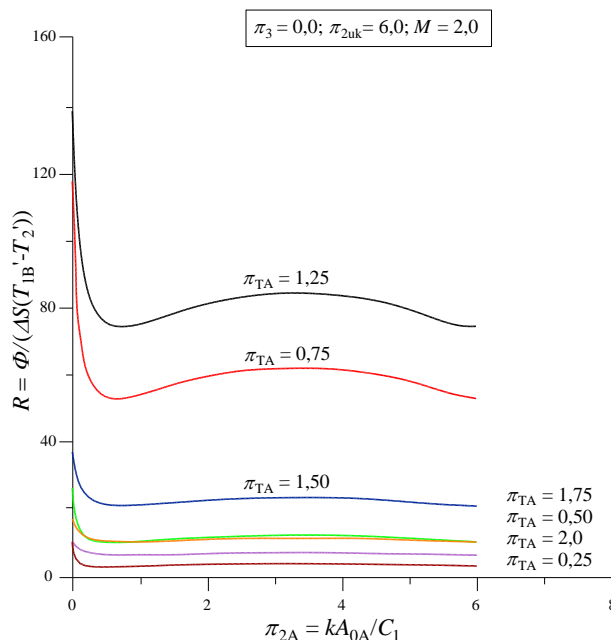
Usporedbom vrijednosti  $R$  za iste  $\pi_{TA}$  u promatranom i prethodnom slučaju vidi se da se u promatranom slučaju dobiju veće vrijednosti omjera  $R$ .



Slika 92. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$

3.5.1.4. Omjer za  $M = 2,0$ 

Dijagram na slici 93 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz naznačene ostale fiksne vrijednosti kao i u prethodnim dijagramima, ali je ovdje uzeto da je  $M = 2,0$ .



Slika 93. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

Vide se slična ponašanja kao i u prethodnom dijagramu, samo što se u potonjem slučaju radi, za isti  $\pi_{TA}$ , o višim vrijednostima veličine  $R$ . Vrijednost za koju se postižu maksimalne vrijednosti veličina  $R$  je i u ovom slučaju neovisna o  $\pi_{TA}$  i prema jednadžbi (37) odnosno jednadžbi (94) je  $\pi_{2Aopt} = 2,347$ .

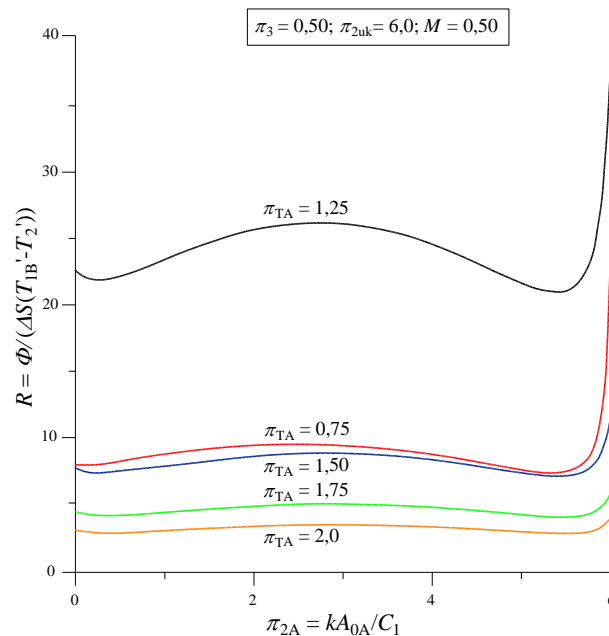
Analizirajući skupno slučajeve 3.5.1.1 – 3.5.1.4 može se zaključiti da se u svim slučajevima pojavljuju dva minimuma i jedan maksimum kao lokalni ekstremi. Minimumi se javljaju za vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  koje su bliske vrijednostima 0,0 odnosno  $\pi_{2uk}$ , dok se lokalni maksimumi javljaju za  $\pi_{2Aopt}$  koji je neovisan o  $\pi_{TA}$  i koji je određen jednadžbom (37) odnosno jednadžbom (94). To znači da se maksimalna vrijednost veličine  $R$ , kao lokalni ekstrem, pojavljuje za vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  koja se dobije bilo po kriteriju maksimalnog toplinskog toka bilo po kriteriju maksimalne generirane entropije. Pripadajuće vrijednosti veličine  $R$  rastu s porastom veličine  $M$ , a apsolutno najveće vrijednosti se dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$  uz  $M < 1,0$ , odnosno za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  uz  $M > 1,0$ . Za  $M = 1,0$  dobivaju se međusobno jednake najveće apsolutne vrijednosti veličine  $R$  za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

### 3.5.2. Slučajevi za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

U okviru poglavlja 3.5.2 drže se konstantnima veličine  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $\pi_3 = 0,50$ , a varira se veličinu  $M$  od 0,50 do 2,0 s korakom 0,50 te se analizira utjecaj tako definiranih varijabli na iznos omjera  $R$ .

#### 3.5.2.1. Omjer za $M = 0,5$

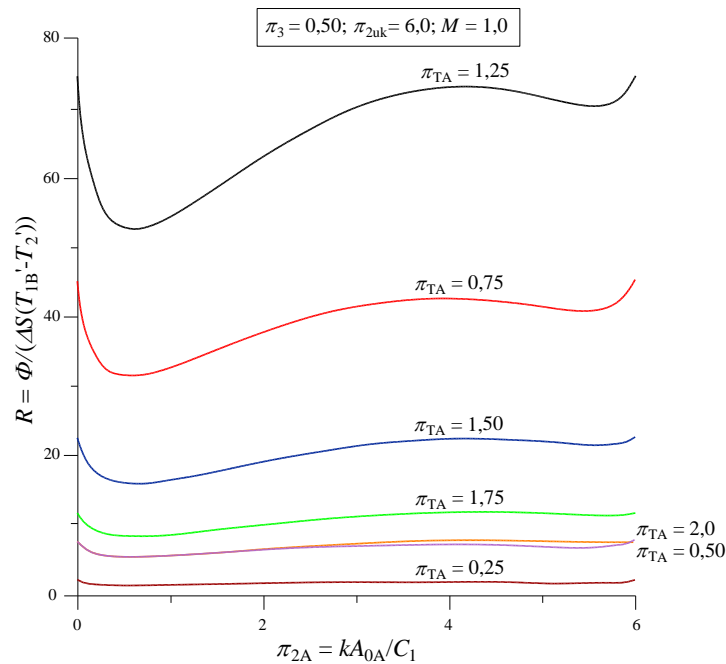
Dijagram na slici 94 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz navedene ostale uvjete. Vidi se da u ovom slučaju svaka parametarska  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima tri lokalna ekstrema i to dva minimuma i jedan maksimum. Razvidno je da pozicije minimuma leže blizu graničnim vrijednostima  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 6,0$ . Jasno je da se te pozicije u radu umreženog rekuperatora treba izbjegavati. S druge pak strane, pozicije poželjnih maksimuma umreženog rekuperatora javljaju se pri  $\pi_{2Aopt}$ , koje se lako iščitavaju iz ispisa rezultata i imaju vrijednosti kako slijedi: 2,47; 2,73; 2,82; 2,91 i 2,98.



Slika 94. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,5$

3.5.2.2. Omjer za  $M = 1,0$ 

Za  $M = 1,0$  i naznačene konstantne vrijednosti ostalih veličina, dijagram na slici 95 prikazuje zavisnost omjera  $R$  bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske entropije o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ . Iz dijagrama je vidljivo, a što je i fizikalno opravdano, da se na krajevima intervala  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$  dobivaju jednake i apsolutno najveće vrijednosti omjera  $R$ . Također se iščitava da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima dva minimuma i jedan maksimum kao lokalne ekstreme. Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu minimumi, a koje dakako u radu umreženog rekuperatora treba izbjegavati, leže blisko vrijednostima  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . S druge pak strane, pozicije  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu poželjni  $R_{maks}$  lako se iščitavaju iz ispisa rezultata i dotične vrijednosti redom iznose: 3,62; 3,82; 3,95; 4,15; 4,22; 4,28 i 4,32.

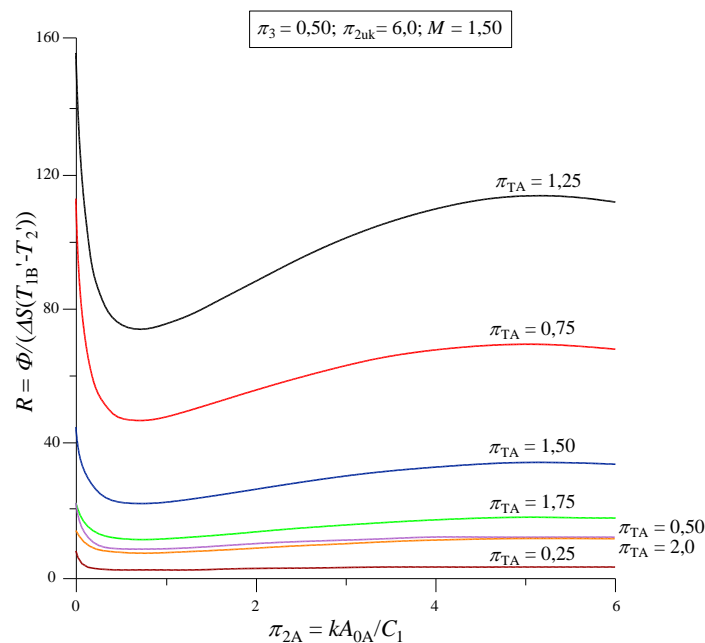


Slika 95. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

Kako je pokazano jednadžbom (34) odnosno dijagramom na slici 12, vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobije maksimalno toplinski tok iznosi 3,0, što znači da pripadajući  $\pi_{2Aopt}$  na slici 95 poprimaju više vrijednosti.

3.5.2.3. Omjer za  $M = 1,5$ 

Za naznačenu vrijednost  $M = 1,5$  i ostale naznačene konstantne vrijednosti, slika 96 dijagramski prikazuje zavisnost veličine  $R$  o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , iz kojeg se iščitava da se apsolutno najveće vrijednosti ovog omjera dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$ , za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1B. Također se vidi da su dobivene vrijednosti veličine  $R$  primjetno veće negoli u prethodnom slučaju. Zanimljivo je ovdje uočiti da svaka vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima dva lokalna ekstrema i to jedan (nepoželjni) minimum i jedan (poželjni) maksimum.

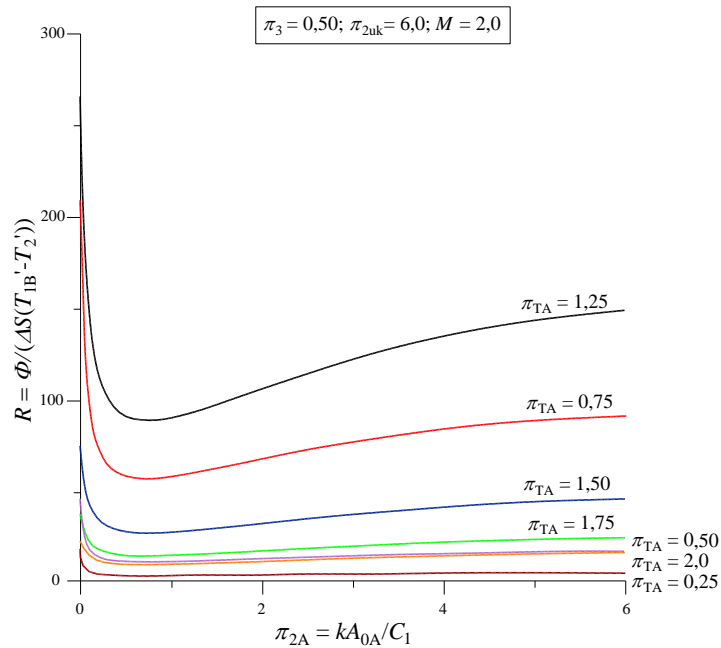


Slika 96. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$

Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  pripadajućih minimuma leže blisko vrijednostima  $\pi_{2A} = 0,0$ , dok pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu  $R_{maks}$  iščitavaju se iz ispisa rezultata i redom iznose: 4,71; 4,91; 5,02; 5,16 ; 5,20; 5,24 i 5,28, dakle s povećavanjem  $\pi_{TA}$  rastu i vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ . Ako se ove vrijednosti usporede s vrijednosti  $\pi_{2Aopt} = 3,85$  za koju se dobiva maksimalni toplinski tok, jednadžba (56), vidi se da su dobivene vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za sve  $\pi_{TA}$  veće od vrijednosti 3,85.

### 3.5.2.4. Omjer za $M = 2,0$

Konačno, dijagram na slici 97 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz navedene ostale konstantne veličine, ali uz  $M = 2,0$ . I ovaj dijagram pokazuje da se apsolutno najveće vrijednosti veličine  $R$  postižu za  $\pi_{2A} = 0,0$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1B. Također su dobivene vrijednosti primjetno veće negoli na slici 96.



Slika 97. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,5$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

Vidljivo je da i u ovom slučaju svaka krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima jedan lokalni ekstrem. Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postiže dotični (nepoželjni) minimum iznosi: 0,62; 0,70; 0,72; 0,74; 0,74; 0,74 i 0,74.

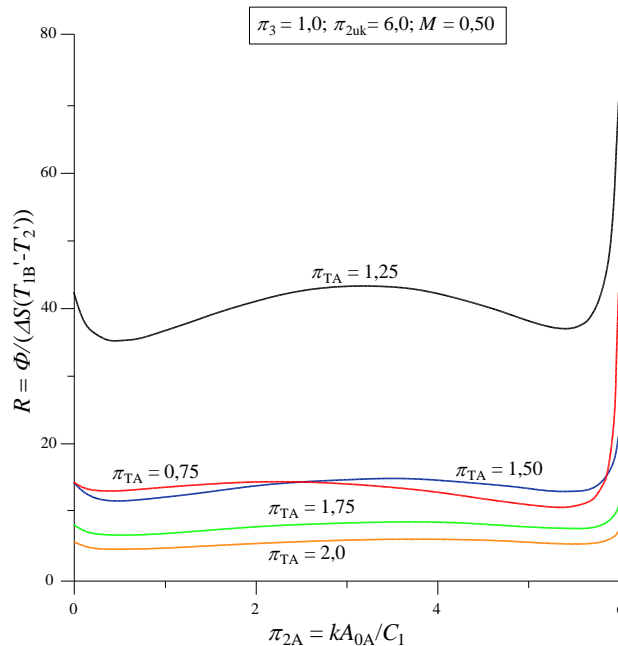
### 3.5.3. Slučajevi za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 6,0$

U okviru ovog poglavlja analizira se vrijednost veličine  $R$  u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  za konstantne vrijednosti  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$ , uz variranje veličine  $M$  od 0,50 do 2,0 s korakom 0,50.



3.5.3.1. Omjer za  $M = 0,5$ 

Dijagram na slici 98 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz ostale konstantne veličine  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$ , iz kojeg se vidi da se apsolutno najveća vrijednost omjera  $R$  postiže za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , tj. u slučaju neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A.

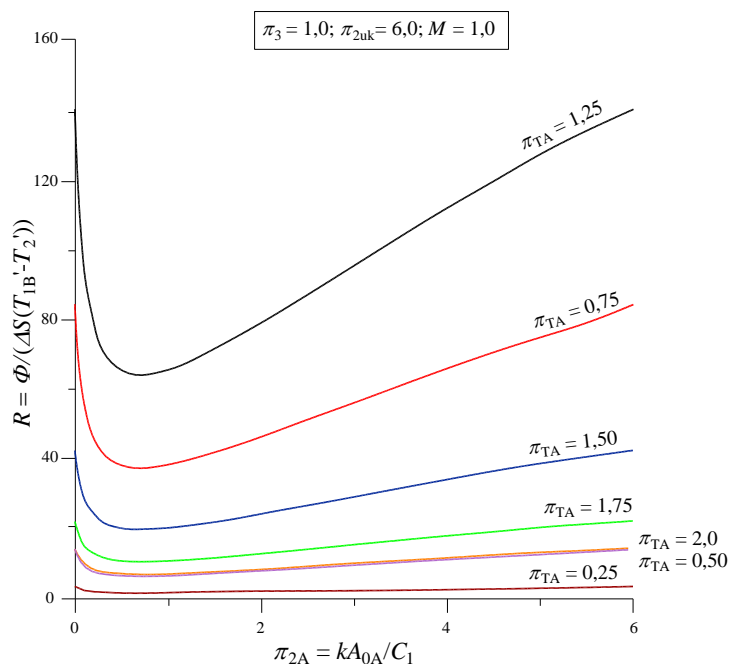


Slika 98. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,5$

Također je iz dijagramskog prikaza vidljivo da se parametarske vrijednosti  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  međusobno ne presijecaju osim krivulja  $\pi_{TA} = 0,75$  i  $\pi_{TA} = 1,50$  koje se presijecaju na  $\pi_{2A} = 2,50$  uz postignutu vrijednost  $R = 14,424$ . Također dotične parametarske vrijednosti imaju međusobno jednaku vrijednost  $R = 14,424$  na  $\pi_{2A} = 0,0$ . Nadalje je iz dijagrama vidljivo da svaka parametarska vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže po dva lokalna minimuma i po jedan lokalni maksimum. Pozicije  $\pi_{2Aopt}$ , pri kojima se javljaju nepoželjni minimumi leže blisko krajnjim vrijednostima  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2Auk}$ . Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu poželjni lokalni maksimumi, iščitavaju se iz ispisa rezultata i za navedenih pet  $\pi_{TA}$  vrijednosti redom iznose: 2,28; 3,18; 3,42; 3,58 i 3,70. Ako se ove vrijednosti usporede s  $\pi_{2Aopt} = 3,0$ , shodno jednadžbi (46) ili slici 22, vidi se da vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu vrijednosti  $R_{maks}$  su veće od 1,0 i rastu s porastom  $\pi_{TA}$ .

3.5.3.2. Omjer za  $M = 1,0$ 

Za  $M = 1,0$ ,  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$  dijagram na slici 99 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o varijabilnim veličinama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ , iz kojeg se vidi da se međusobno jednake vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , i da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  postiže, za razliku od slučaja 3.5.3.1 samo jedan lokalni ekstrem i to minimum.



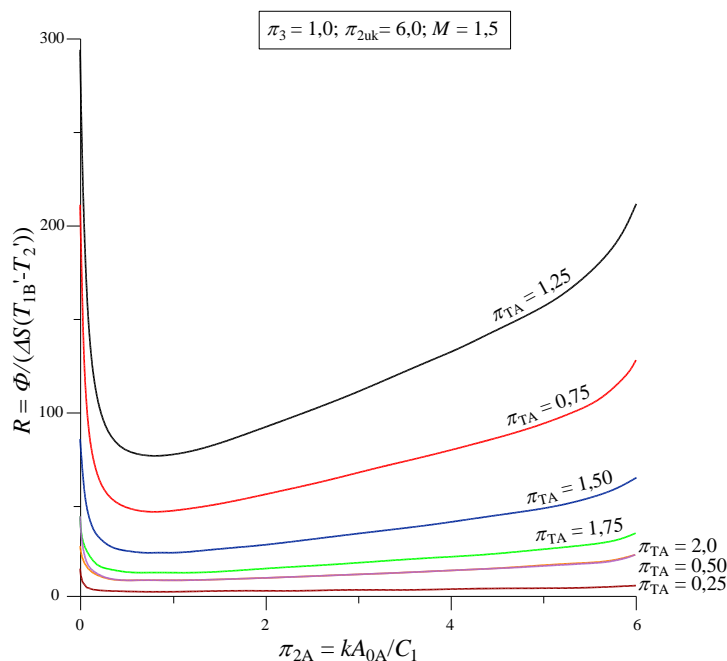
Slika 99. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,0$

Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  pri kojima se postižu dotični nepoželjni minimumi iščitavaju se iz dobivenih ispisa i redom po naznačenim vrijednostima  $\pi_{TA}$  iznose: 0,64; 0,68; 0,70; 0,70; 0,70; 0,70 i 0,70. Vidi se da za  $\pi_{TA} > 1,0$  vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  praktički su konstantne i jednake 0,70. Također je iz gornjeg dijagrama vidljivo da se dobiju praktički iste vrijednosti veličine  $R$  za  $\pi_{TA} = 0,50$  i 2,0. Usporedbom vrijednosti  $R$  na slici 99 s vrijednostima danim slikom 98 vidi se da dijagram na slici 99 daje primjetno veće vrijednosti, što potvrđuje činjenicu da varijabla  $M$  ima signifikantan utjecaj na vrijednost  $R$ . Vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobije maksimalni toplinski tok (jednadžba (48)) jednaka je 3,0. Dotična vrijednost je veća od svih naznačenih  $\pi_{2Aopt}$  za koje se dobiva  $R_{min}$ , što znači da  $\pi_{2Aopt}$  zahvaća područje i porasta vrijednosti  $R$ , kako to već pokazuju i vrijednosti dane dijagramom na slici 99.

3.5.3.3. Omjer za  $M = 1,5$ 

Dijagram na slici 100 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o varijablama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz podržavanje konstanti  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$ , iz kojeg se vidi da se radi o sličnom ponašanju dobivenih, ali primjetno viših vrijednosti, kao što je prikazano na slici 99. I u ovom slučaju se javljaju apsolutno najveće vrijednosti omjera  $R$  za  $\pi_{2A} = 0,0$ , ali se vidi i jači porast veličine  $R$  približavanjem  $\pi_{2A}$  ka  $\pi_{2uk}$ , a što nije bilo izraženo u prethodnom slučaju. Također se i u ovom slučaju pokazuje da se dobivaju praktički iste vrijednosti veličine  $R$  za  $\pi_{TA} = 0,5$  i  $\pi_{TA} = 2,0$ . Što se tiče lokalnih ekstrema funkcije  $R$ , vidljivo je da se javljaju samo minimumi čije se vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  iščitavaju iz ispisa rezultata te redom u odnosu na odabrane vrijednosti  $\pi_{TA}$  iznose: 0,78; 0,78; 0,80; 0,80; 0,78; 0,78 i 0,78.

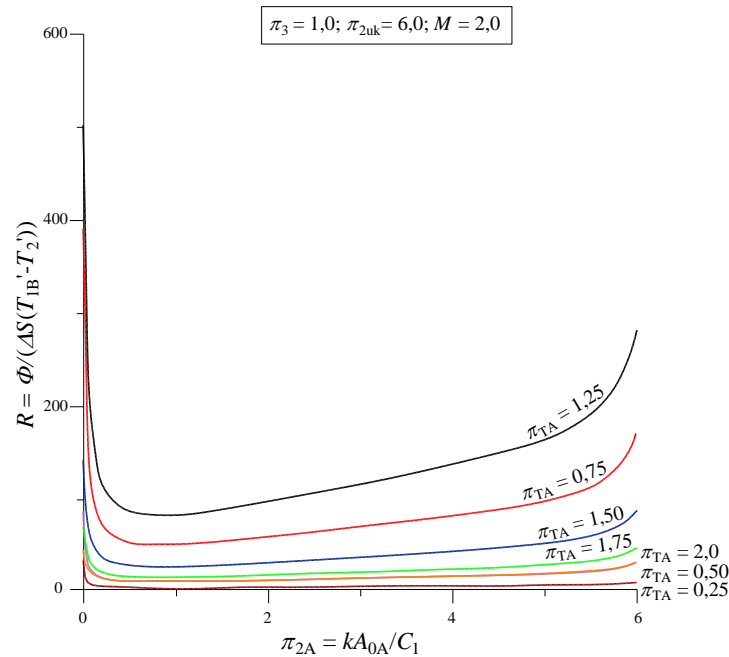
Za ovaj slučaj ne postoji  $\pi_{2Aopt}$  za koji se dobiva maksimalni toplinski tok, budući da promatrani slučaj ne udovoljava kriteriju danom jednadžbom (47).



Slika 100. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 1,5$

3.5.3.4. Omjer za  $M = 2,0$ 

Dijagram na slici 101 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o veličinama  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz konstantne vrijednosti veličina  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$ . Dijagram pokazuje slični tijek krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$ , ali s bitno većim iznosima veličine  $R$ , negoli u slučaju prikazanim slikom 100.



Slika 101. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ;  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 2,0$

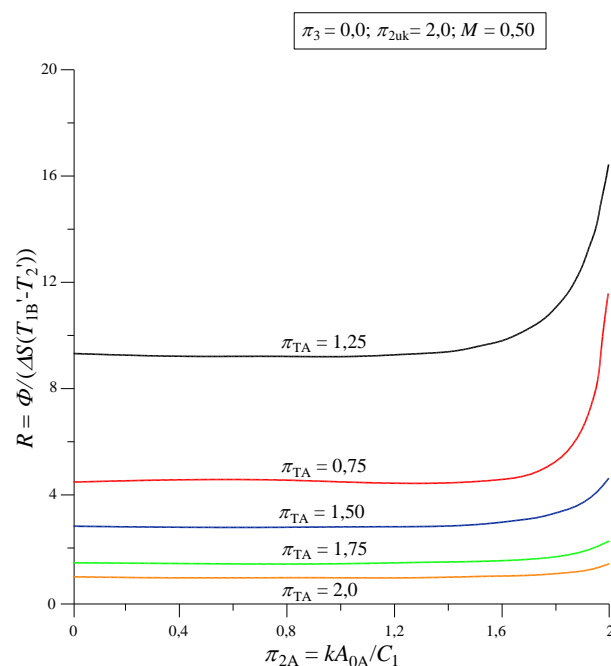
I u ovom slučaju se apsolutno najveću vrijednost veličine  $R$  dobiva za  $\pi_{2A} = 0,0$ , a svaka parametarska linija  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  pokazuje samo jedan lokalni ekstrem i to minimum. Vrijednosti pripadajućih  $\pi_{2Aopt}$  redom iznose: 0,80; 0,82; 0,84; 0,84; 0,82; 0,82 i 0,82. Vidi se da su te vrijednosti veće negoli u prethodnom slučaju. I u ovom slučaju se ne postiže maksimum toplinskog toka kao lokalni ekstrem jer nije zadovoljen kriterij dan jednadžbom (47). No, ako se uzme za relevantan kriterij veličinu  $R$ , tada rezultati 3.5.3.2 – 3.5.3.4 ukazuju da dodatnu struju  $A$  iz mreže izmjenjivača topline treba priključiti na  $\pi_{2A}$  koji mora biti bitno veći od naznačenih vrijednosti pri kojima se postiže  $R_{min}$ , kao lokalni ekstrem.

### 3.5.4. Slučajevi za $\pi_3 = 0,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$

U okviru ovog poglavlja, u odnosu na prethodni, analizira se utjecaj smanjene vrijednosti  $\pi_{2uk} = 2,0$ , uz  $\pi_3 = 0,0$ , i iste vrijednosti veličine  $M$ , kao i u 3.5.1, na vrijednost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije.

#### 3.5.4.1. Omjer za $M = 0,5$

Dijagram na slici 102 prikazuje omjer  $R$  u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  za  $M = 0,50$  i ostale naznačene konstantne vrijednosti. U odnosu na slučajeve pod 3.5.1 ovdje se vidi bitna razlika, u smislu da samo parametarska krivulja  $\pi_{TA} = 0,75$  pokazuje maksimum kao lokalni ekstrem i to za  $\pi_{2Aopt} = 0,65$  i  $R_{max} = 4,62$ , i također dotična parametarska vrijednost ima i lokalni minimum pri koordinatama (1,35; 4,53).



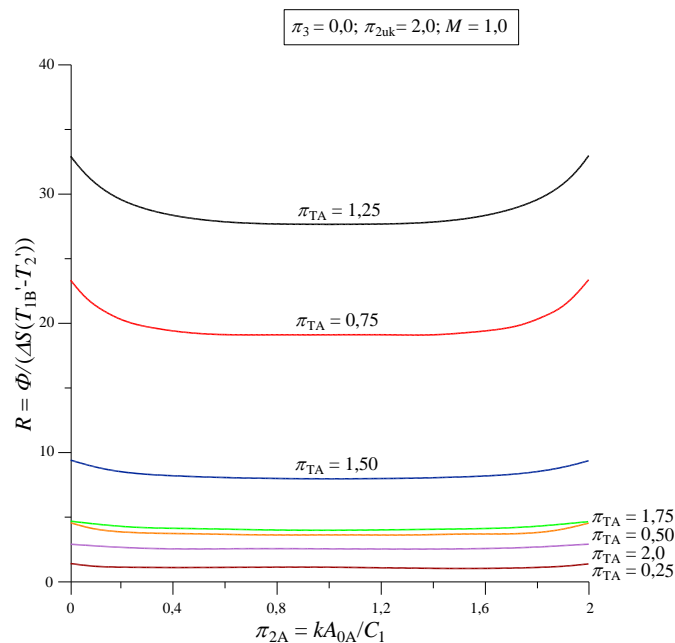
Slika 102. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Nasuprot tome, sve ostale parametarske krivulje  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  za  $\pi_{2Aopt} = 0,65$  pokazuju minimume kao lokalne ekstreme čije se vrijednosti  $R_{min}$  smanjuju s porastom  $\pi_{TA}$ . Iz gornjeg se dijagrama također iščitava da se apsolutno najveću vrijednost veličine  $R$  dobiva za  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 2,0$ , dakle za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A. Također se iz

dijagrama na slici 102 vidi da se omjer  $R$  jako malo mijenja u širokom intervalu veličine  $\pi_{2A}$ . Usporedbom vrijednosti sa dijagrama na slici 102 s vrijednostima prikazanim slikom 90, za zaključiti je da se sa smanjenjem veličine  $\pi_{2uk}$  dobivaju i niže, ali ne bitno niže, vrijednosti omjera  $R$ .

### 3.5.4.2. Omjer za $M = 1,0$

Za ovaj slučaj zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuje dijagram na slici 103, iz koje je razvidno da su sve vrijednosti na parametarskim krivuljama  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  simetrične u odnosu na  $\pi_{2Aopt} = 1,0$  te da se apsolutno najveće i jednake vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ . I u ovom se slučaju vidi da je za promatrani  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  relativno mali utjecaj varijable  $\pi_{2A}$  na iznos veličine  $R$ .



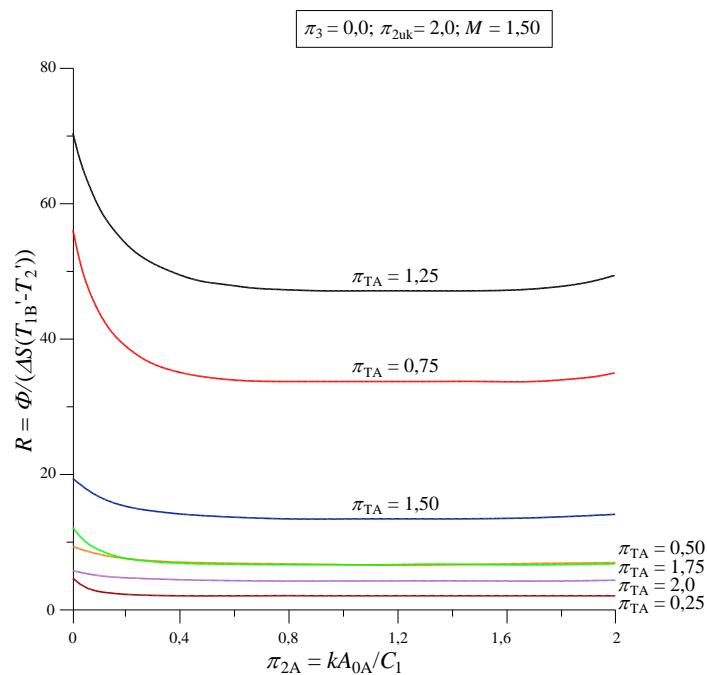
Slika 103. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

Zanimljivo je malo detaljnije pojasniti tijek linija  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ovisno o iznosu dotične veličine. Naime iz ispisa rezultata je vidljivo da za  $\pi_{TA} = 0,25$  postoje dva minimuma i jedan maksimum kao lokalni ekstremi, pri čemu je maksimum pri  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ , a minimumi se javljaju pri  $\pi_{2Aopt} = 0,45$  i  $1,55$ . Za  $\pi_{TA} = 0,50$ , lokalni maksimum je također na  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ , dok su lokalni minimumi na  $\pi_{2Aopt} = 0,65$  i  $1,35$ . No za  $\pi_{TA} \geq 0,75$  postoji samo jedan ekstrem

i to minimum pri  $\pi_{2Aopt} = 1,0$ . Usporedbom ovih rezultata s rezultatima prikazanim dijagramom na slici 102, za zaključiti je da se za slučaj  $M = 0,5$  dobivaju niže vrijednosti veličine  $R$ .

### 3.5.4.3. Omjer za $M = 1,5$

Za naznačene uvjete dijagram na slici 104 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  koji također pokazuje da za  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  iznos veličine  $R$  relativno slabo ovisi o ovisi o  $\pi_{2A}$ , osim za vrijednosti  $0 \leq \pi_{2A} \leq 0,40$ . Ako se i u ovom slučaju detaljnije pogledaju ispisi dobivenih rezultata, onda se može vidjeti da sve parametarske krivulje u intervalu  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 1,25$  imaju dva lokalna minimuma i jedan maksimum. Maksimum veličine  $R$  javlja se za  $\pi_{2Aopt} = 1,203$  koji se dobiva iz jednadžbe (94).



Slika 104. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0; \pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,50$

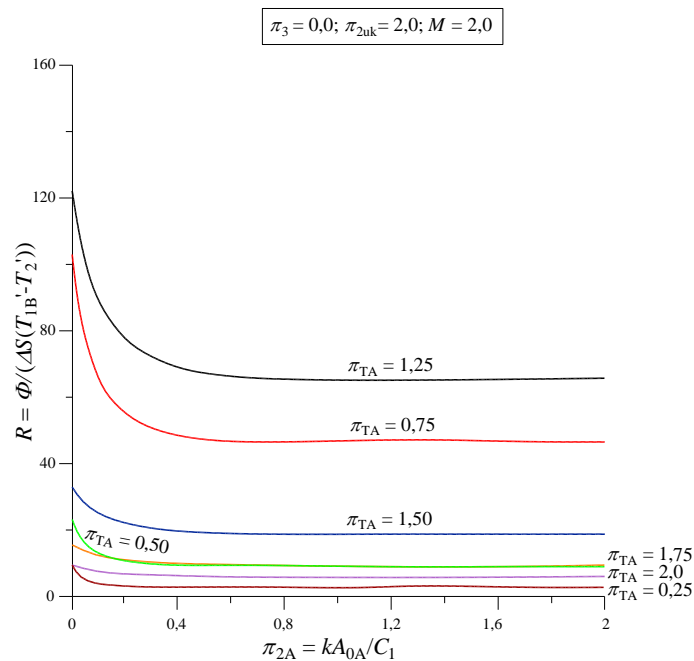
Evidentno je, nadalje, da se najveće apsolutne vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$ , tj. za slučaj neumreženog protusmjernog rekuperatora sa strujama 2 i 1B.

Međutim, usporede li se ovi rezultati s rezultatima danim u prethodnom primjeru, slika 103, primjećuju se dvije stvari, od kojih je prva da se u slučaju sa slike 104 dobiju više vrijednosti

veliĉine  $R$ . Drugo jest ĉinjenica da se vrijednosti  $R_{\max}$  dobivaju za veći broj parametarskih vrijednosti  $\pi_{TA} = \text{konst.}$

#### 3.5.4.4. Omjer za $M = 2,0$

Za  $M = 2,0$  i ostale naznaĉene konstantne uvjete, vrijednosti veliĉine  $R$  u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuje dijagram na slici 105.



Slika 105. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,0$ ;  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Iz dijagramskog prikaza je razvidno da veliĉina  $R$  jako malo ovisi o veliĉini  $\pi_{2A}$ , a dominantna je zavisnost o veliĉini  $\pi_{TA}$ . Detaljnijim uvidom u ispis dobivenih rezultata išĉitava se da za  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 1,50$ , svaka parametarska vrijednost  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima dva lokalna minimuma i jedan lokalni maksimum. Optimalna vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  pri kojoj se javlja maksimum  $R_{\max}$  iznosi 1,347. Za vrijednosti  $1,50 < \pi_{TA} \leq 2,0$  za  $\pi_{2Aopt} = 1,347$  dobiva se samo jedan lokalni ekstrem i to minimum. To znaĉi da se s povećavanjem vrijednosti  $M$  povećava i interval  $\pi_{TA}$  unutar kojeg se javlja željeni lokalni ekstrem i to maksimum. I u ovom se sluĉaju najveća apsolutna vrijednost veliĉine  $R$  javlja pri  $\pi_{2A} = 0,0$ . Usporedbom ovih rezultata s rezultatima prikazanim slikom 93, vidi se da se u ovom sluĉaju dobivaju niže vrijednosti veliĉine  $R$ , a



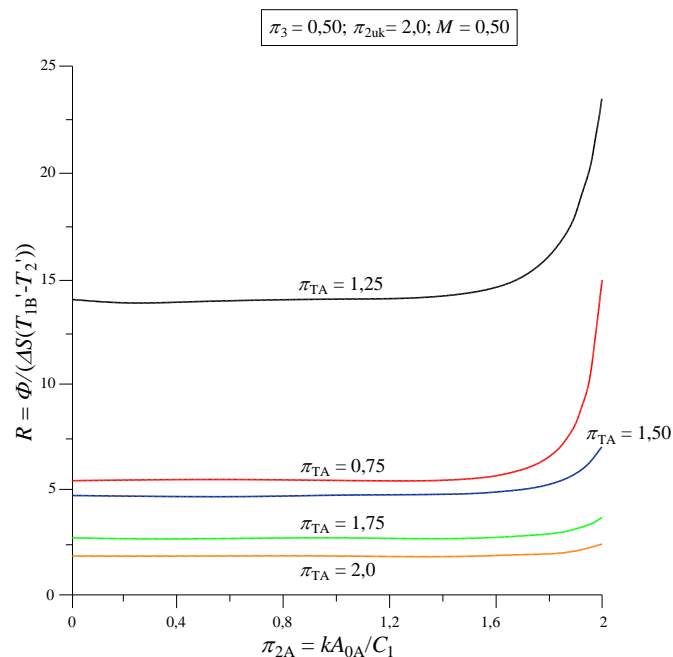
usporedba ovih rezultata s rezultatima na slici 104, daje za zaključiti da se u potonjem slučaju dobivaju bitno više vrijednosti veličine  $R$ .

### 3.5.5. Slučajevi za $\pi_3 = 0,5$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$

U okviru ovog poglavlja, uz  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $\pi_3 = 0,5$ , mijenjaju se vrijednosti  $M$  od 0,50 do 2,0 s korakom od 0,5.

#### 3.5.5.1. Omjer za $M = 0,5$

Dijagram na slici 106 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,50$  pa je iz dijagrama vidljivo da je relativno mala zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i značajniji je utjecaj veličine  $\pi_{TA}$ . Utjecaj veličine  $\pi_{2A}$  postaje snažniji s njezinim približavanjem vrijednosti  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 2,0$ .



Slika 106. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,50$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,50$

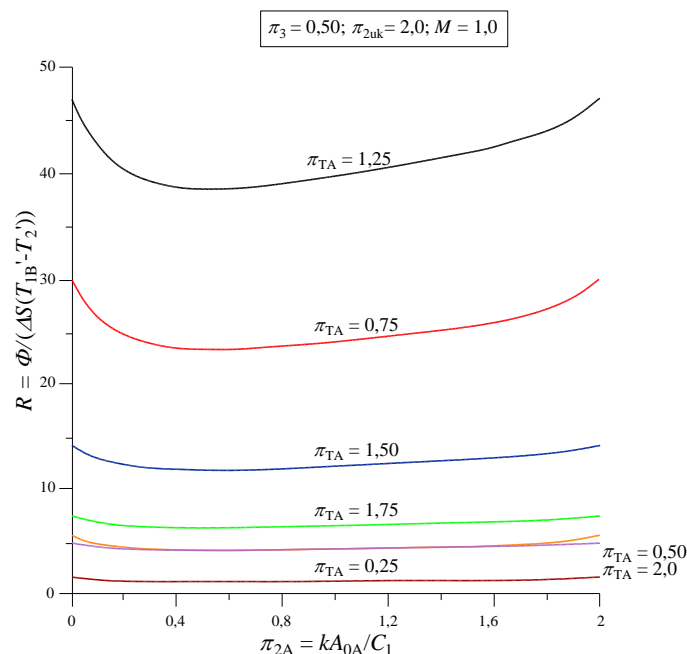
Ako se i u ovom slučaju na temelju ispisa razmotre tijekom veličina  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  tada se može vidjeti da sve parametarske vrijednosti imaju po jedan minimum, a samo parametarska vrijednost  $\pi_{TA} = 2,0$  ima pored minimuma i jedan maksimum  $R_{\text{maks}} = 1,84$  za  $\pi_{2A\text{opt}} = 1,1$ , tako

da se u ovom slučaju apsolutno najveće vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = \pi_{2Auk} = 2,0$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A.

Usporedbom ovih rezultata s rezultatima na slici 94, vidi se da se u ovom slučaju dobivaju niže vrijednosti generirane entropije, ali i sami tijekovi krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$ , u smislu postojanja lokalnih ekstrema, su bitno različiti za ova dva slučaja.

### 3.5.5.2. Omjer za $M = 1,0$

Za  $M = 1,0$ ,  $\pi_3 = 0,50$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$  vrijednost veličine  $R$  u zavisnosti o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuje dijagram na slici 107. Iz dijagrama je razvidno da se u promatranom slučaju dobivaju jednake vrijednosti veličine  $R$  na krajevima intervala  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , a što je i fizikalno opravdano budući je  $M = 1,0$ . Isto tako je za primijetiti da je zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  jače izražena u odnosu na prethodni slučaj, te da se dobivaju i bitno veće vrijednosti veličine  $R$ .



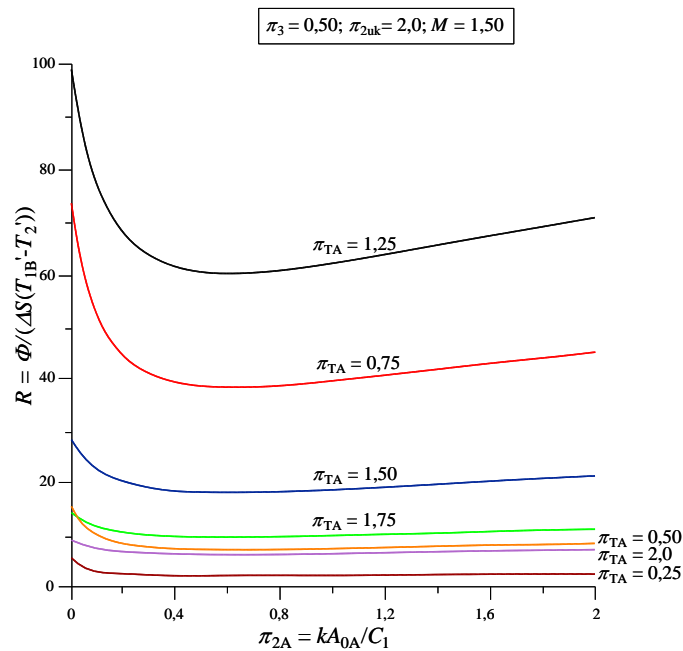
Slika 107. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,50$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

Usporedbom ovih vrijednosti s vrijednostima prikazanim na slici 95 vidi se da se u ovom slučaju dobivaju niže vrijednosti veličine  $R$ . Nadalje, iz ispisa rezultata može se vidjeti da sve parametarske krivulje na slici 107 imaju jedan lokalni ekstrem i to minimum, koji se javlja na  $\pi_{2Aopt} = 0,50$ , što znači da se apsolutno najveće maksimalne vrijednosti veličine  $R$  dobivaju za

$\pi_{2A} = 0,0$  odnosno  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 2,0$ , tj u slučaju neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A ili 2 i 1B.

### 3.5.5.3. Omjer za $M = 1,5$

Rezultate proračuna za ovaj slučaj prikazuje slika 108. Detaljniji uvid u ispis ovih rezultata pokazuje da u ovom slučaju svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  ima samo jedan lokalni ekstrem i to minimum, a koji se za sve krivulje javlja na  $\pi_{2Aopt} = 0,60$ . Apsolutno najveće vrijednosti veličine  $R$  javljaju se za  $\pi_{2A} = 0,0$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1B. Usporedbom ovih rezultata s rezultatima na slici 107, vidi se da se u ovom slučaju dobivaju veće vrijednosti veličine  $R$ .

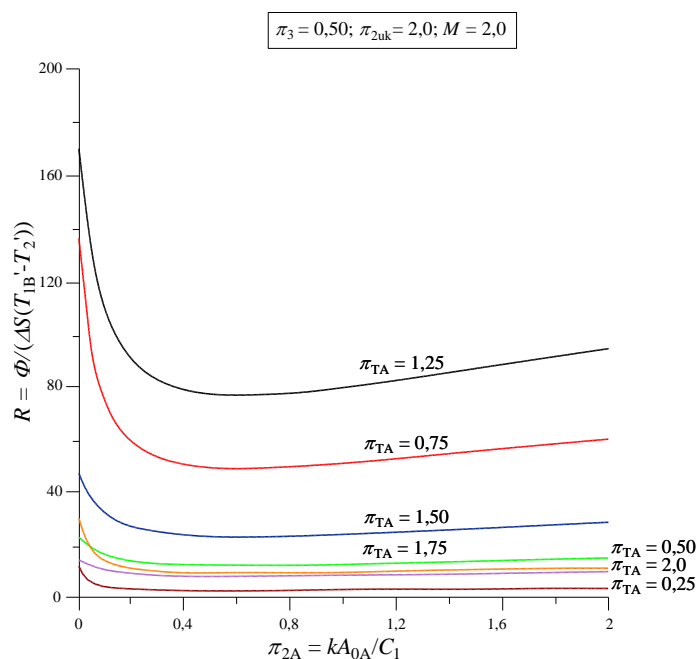


Slika 108. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,50$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,50$

No usporedbom rezultata sa slike 108 s rezultatima prikazanim na slici 96, za zaključiti je da slika 108 daje bitno niže vrijednosti veličine  $R$ , što znači da veličina  $\pi_{2uk}$  ima signifikantan utjecaj na iznos veličine  $R$ .

### 3.5.5.4. Omjer za $M = 2,0$

Za  $M = 2,0$ ,  $\pi_3 = 0,50$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$  dijagram na slici 109 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$ . Tijek krivulja je vrlo sličan tijeku krivulja na slici 108, ali s primjetno višim vrijednostima, što i ovdje potvrđuje činjenicu da veličina  $M$  ima signifikantan utjecaj na vrijednost veličine  $R$ . Vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se dobivaju minimalne vrijednosti  $R_{min}$ , za naznačene  $\pi_{TA}$  redom iznose: 0,541; 0,601; 0,602; 0,601; 0,603; 0,603 i 0,601.



Slika 109. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 0,50$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Usporedbom ovih rezultata s rezultatima danim slikom 97 razvidno je da se u ovom slučaju dobivaju niže vrijednosti veličine  $R$ , što znači da se sa smanjenjem  $\pi_{2uk}$  (površine umreženog rekuperatora), smanjuje i iznos veličine  $R$ .

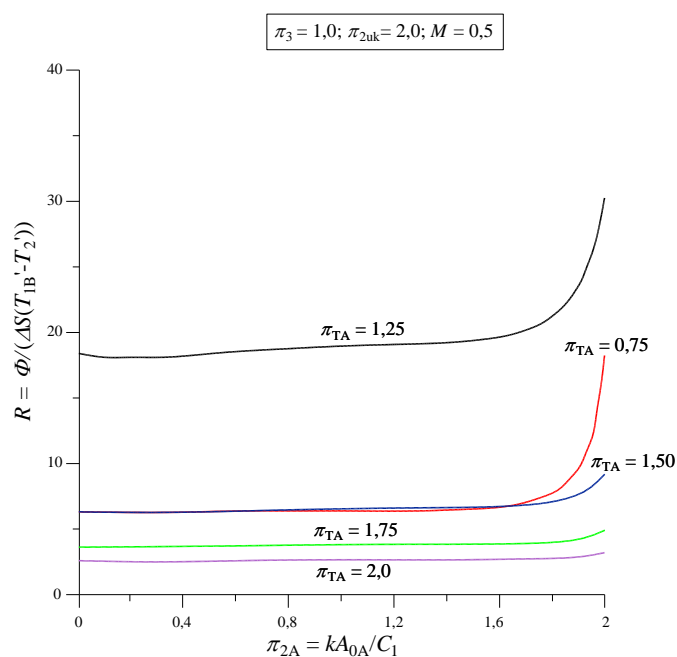
I u ovom se slučaju najveće vrijednosti omjera  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$ .

### 3.5.6. Slučajevi za $\pi_3 = 1,0$ ; $\pi_{2uk} = 2,0$

Konačno se u ovom poglavlju želi ispitati utjecaj veličine  $M = 0,5$ ; 1,0; 1,0 i 2,0, uz  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $\pi_3 = 0,50$  na iznos omjera  $R$ .

3.5.6.1. Omjer za  $M = 0,5$ 

Dijagram na slici 110 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  za  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_2 = 2,0$  i  $M = 0,50$  iz kojeg je razvidno da veličina  $R$  relativno slabo ovisi o  $\pi_{2A}$ , i utjecaj veličine  $\pi_{2A}$  postaje relevantniji njezinim približavanjem vrijednosti  $\pi_{2uk} = 2,0$ . Usporedbom ovih rezultata s rezultatima prikazanim slikom 109 vidi se da se u ovom slučaju dobiju niže vrijednosti veličine  $R$ , a i usporedba tih rezultata sa slikom 98, također ukazuje na niže vrijednosti veličine  $R$ .



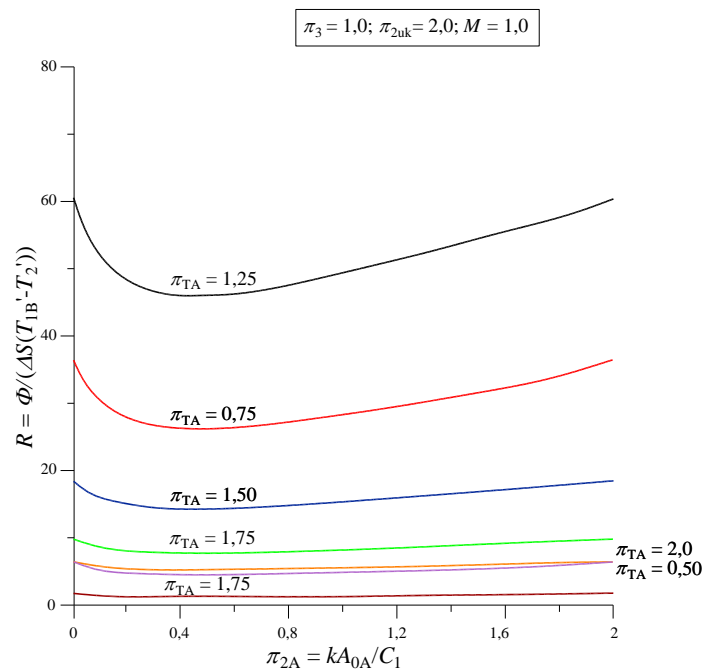
Slika 110. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,00$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 0,5$

Ako se u ispisu rezultata detaljnije pogledaju vrijednosti  $R$  za  $\pi_{TA} = \text{konst.}$ , tada se može vidjeti da krivulja  $\pi_{TA} = 0,75$  ima dva minimuma, na  $\pi_{2Aopt} = 0,15$  i  $1,1$  te jedan maksimum za  $\pi_{2Aopt} = 0,95$ . No vrijednosti i minimuma i maksimuma su vrlo bliske vrijednosti  $6,0$  pa se na dijagramu na slici 110 jasno niti ne vide. Nasuprot tome sve ostale parametarske linije pokazuju minimum kao lokalni ekstrem, osim krivulje  $\pi_{TA} = 2,0$ , i to za  $\pi_{2Aopt} = 0,20$ . Krivulja  $\pi_{TA} = 2,0$  pokazuje dva minimuma na  $\pi_{2Aopt} = 0,2$  i  $1,5$  i jedan maksimum na  $\pi_{2Aopt} = 1,3$ . No i vrijednosti minimuma i maksimuma kreću se oko  $2,50$  pa se također jasno ne vide u dijagramskom prikazu. Mora se naglasiti da su ovi lokalni ekstremi dobiveni, zbog složenosti funkcije  $R$ , numeričkim putem pa je njihova pojavnost moguća i kao posljedica približnog numeričkog izračuna. Dijagram 110 pokazuje da se apsolutno najveća vrijednost

veličine  $R$  dobiva za slučaj  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1A.

### 3.5.6.2. Omjer za $M = 1,0$

Dijagram na slici 111 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$ , iz kojeg se vidi da se dobivaju jednake vrijednosti veličine  $R$  za  $\pi_{2A} = 0,0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk} = 2,0$ , a što su ujedno i apsolutno najveće vrijednosti veličine  $R$ . Također se vidi da u ovom slučaju ne postoji simetrija krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  u odnosu na  $\pi_{2uk}/2$ , nego svaka parametarska krivulja pokazuje jedan lokalni ekstrem i to minimum. Detaljnijim uvidom u ispis dobivenih rezultata može se vidjeti da dotični minimumi su na  $\pi_{2Aopt}$ , shodno redosljedu veličina  $\pi_{TA}$ , kako slijedi: 0,46; 0,46; 0,46; 0,46; 0,45; 0,45 i 0,44.



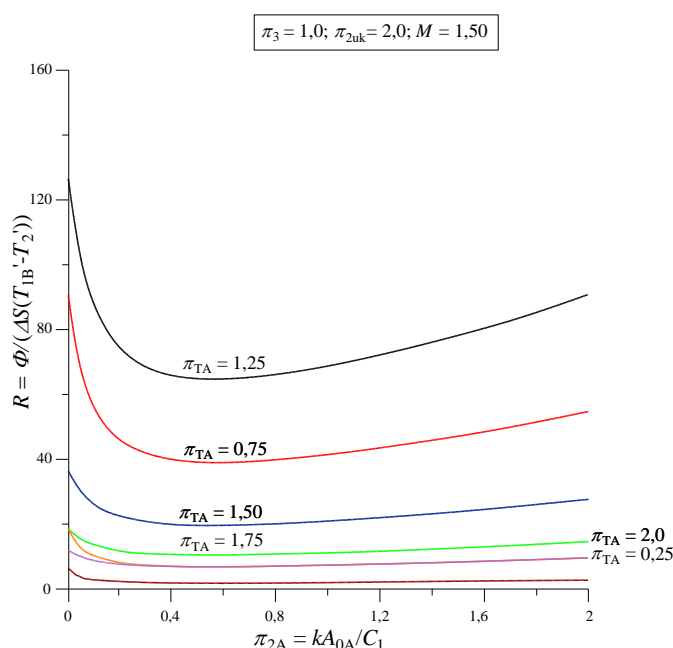
Slika 111. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,0$

Treba i ovdje napomenuti da su i ove vrijednosti dobivene numeričkim postupkom, što svakako, glede dobivenih rezultata, treba akceptirati. Dakako da rad umreženog rekuperatora s ovim vrijednostima treba izbjegavati, budući da za te vrijednosti, shodno jednadžbi (109), prevladava iznos nepoželjne bezdimenzijske entropije nad vrijednošću bezdimenzijskog toplinskog toka. Usporedbom ovih vrijednosti s vrijednostima danih slikom 110, vidi se da su

bitno veće vrijednosti veličine  $R$  u potonjem slučaju. Slika 111 pokazuje bitno niže vrijednosti generirane entropije u usporedbi sa slikom 99.

### 3.5.6.3. Omjer za $M = 1,5$

Dijagram na slici 112 prikazuje zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$ , iz kojeg se vidi da se dobivaju veće vrijednosti dotične veličine negoli u slučaju prikazanim na slici 111, što upućuje na zaključak da veličina  $M$  ima snažan utjecaj na iznos veličine  $R$ .

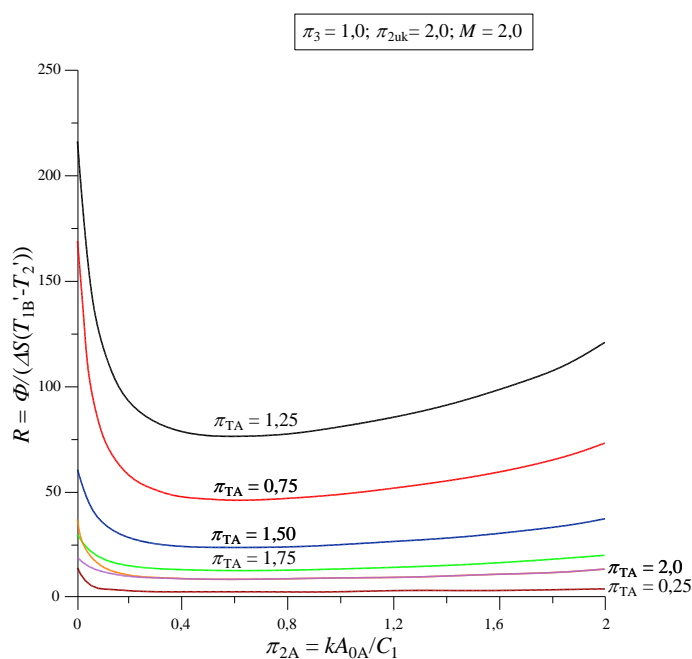


Slika 112. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 1,5$

I u ovom slučaju se apsolutno najveće vrijednosti  $R$  dobivaju za  $\pi_{2A} = 0,0$ , tj. za slučaj neumreženog rekuperatora sa strujama 2 i 1B. U dijagramu na slici 112 svaka parametarska krivulja pokazuje lokalni ekstrem i to minimum, a pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  dotičnih minimuma iščitavaju se iz ispisa i redom iznose: 0,56; 0,58; 0,58; 0,56; 0,56; 0,55; i 0,54. Te su vrijednosti u odnosu na prethodni slučaj nešto više, ali usporedba s rezultatima danim slikom 100 ukazuje na bitno niže vrijednosti veličine  $R$  u ovom slučaju.

3.5.6.4. Omjer za  $M = 2,0$ 

Za  $M = 2,0$ ,  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ , zavisnost veličine  $R$  o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  prikazuje dijagram na slici 113, iz kojeg je razvidno slično ponašanje dobivenih vrijednosti  $R$  kao i u dijagramu na slici 112, samo što se u ovom slučaju radi o bitno većim vrijednostima, dok usporedba s rezultatima proračuna danim slikom 101, ukazuje na niže vrijednosti. Time se pokazuje, uzevši u obzir sve razmatrane slučajeve 3.5.4.1 – 3.5.4.4, da i veličine  $M$  i  $\pi_{2uk}$  imaju bitni utjecaj na vrijednost veličine  $R$ , u smislu da s njihovim porastom bitno raste i vrijednost  $R$ .



Slika 113. Zavisnost omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije o  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{TA}$  uz  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 2,0$  i  $M = 2,0$

Također ovaj dijagram pokazuje da svaka parametarska krivulja  $\pi_{TA} = \text{konst.}$  pokazuje neželjeni minimum, kao lokalni ekstrem. Pripadajuće vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se postižu dotični minimumi iščitavaju se iz ispisa rezultata i redom iznose: 0,56; 0,59; 0,60; 0,59; 0,59; 0,58 i 0,57.



## 4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

U ovom poglavlju bit će opisan provedeni eksperiment s ciljem potvrde izvedenog matematičkog modela za postizanje maksimalnog toplinskog toka umreženog izmjenjivača topline. Formirani kriterij prikazan u jednadžbi (67) jasno pokazuje pri kojim se uvjetima pojavljuje maksimalni toplinski tok, kao lokalni ekstrem, za sve parametarske krivulje  $\pi_3 = \text{konst.}$  i taj se teorijski kriterij također trebalo eksperimentalno verificirati. Cilj eksperimenta je prikazati omjer ( $\omega$ ) maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora. Rezultati matematičkog modela bit će uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima kojima će biti pridružene izračunate mjerne nesigurnosti.

### 4.1. Opis mjerne linije i postupak mjerenja

Eksperimentalna linija, prikazana slikama 114 i 115, sastoji se od dva spiralna izmjenjivača topline (tip 1A-I-NIRO, proizvođač Pireko d.o.o.), toplovodnog kotla, ionskog umekšivača ulazne vode za kotao i vode iz vodovodne mreže, cirkulacijske pumpe, mjerne opreme za mjerenje temperature i protoka, spojnih cjevovoda i pripadajuće armature te sustava za prikupljanje mjerenih podataka.



Slika 114. Eksperimentalna linija



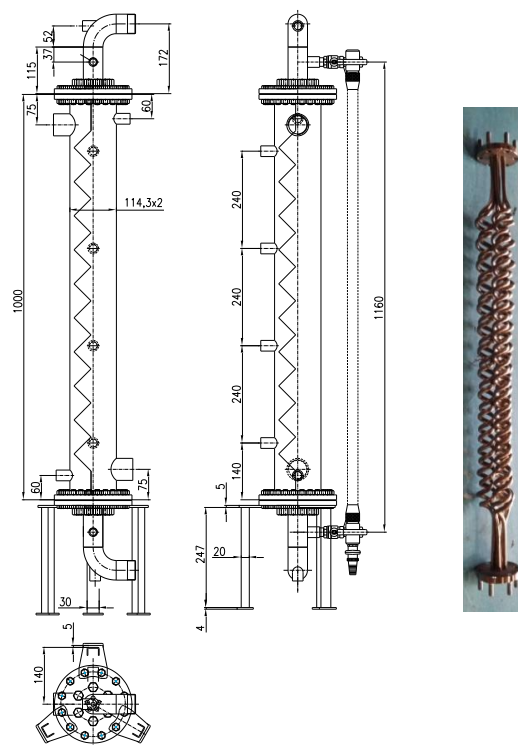
Slika 115. Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline sa spiralnim cijevima izvedeni su sa šest spiralnih cijevi kao što je pokazano na slici 116. Izmjenjivači topline, uključujući spojne cjevovode, izolirani su 19 mm debelim slojem Armaflexa.

Osnovni podaci o izmjenjivaču topline prikazani su Tablicom 1.

Tablica 1. Podaci o izmjenjivaču topline

0,01	m	vanjski promjer cijevi
0,008	m	unutarnji promjer cijevi
6	-	ukupni broj cijevi
0,032	m	promjer spirale
16,5	W/(m·K)	toplinska provodnost materijala cijevi (AISI 304)
0,000302	m <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka strujanja vode u cijevima
0,008686	m <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka strujanja vode u plaštu
0,27143	m <sup>2</sup>	ukupna izmjenjivačka površina (svedena na unutarnji promjer cijevi)
0,3393	m <sup>2</sup>	ukupna izmjenjivačka površina (svedena na vanjski promjer cijevi)

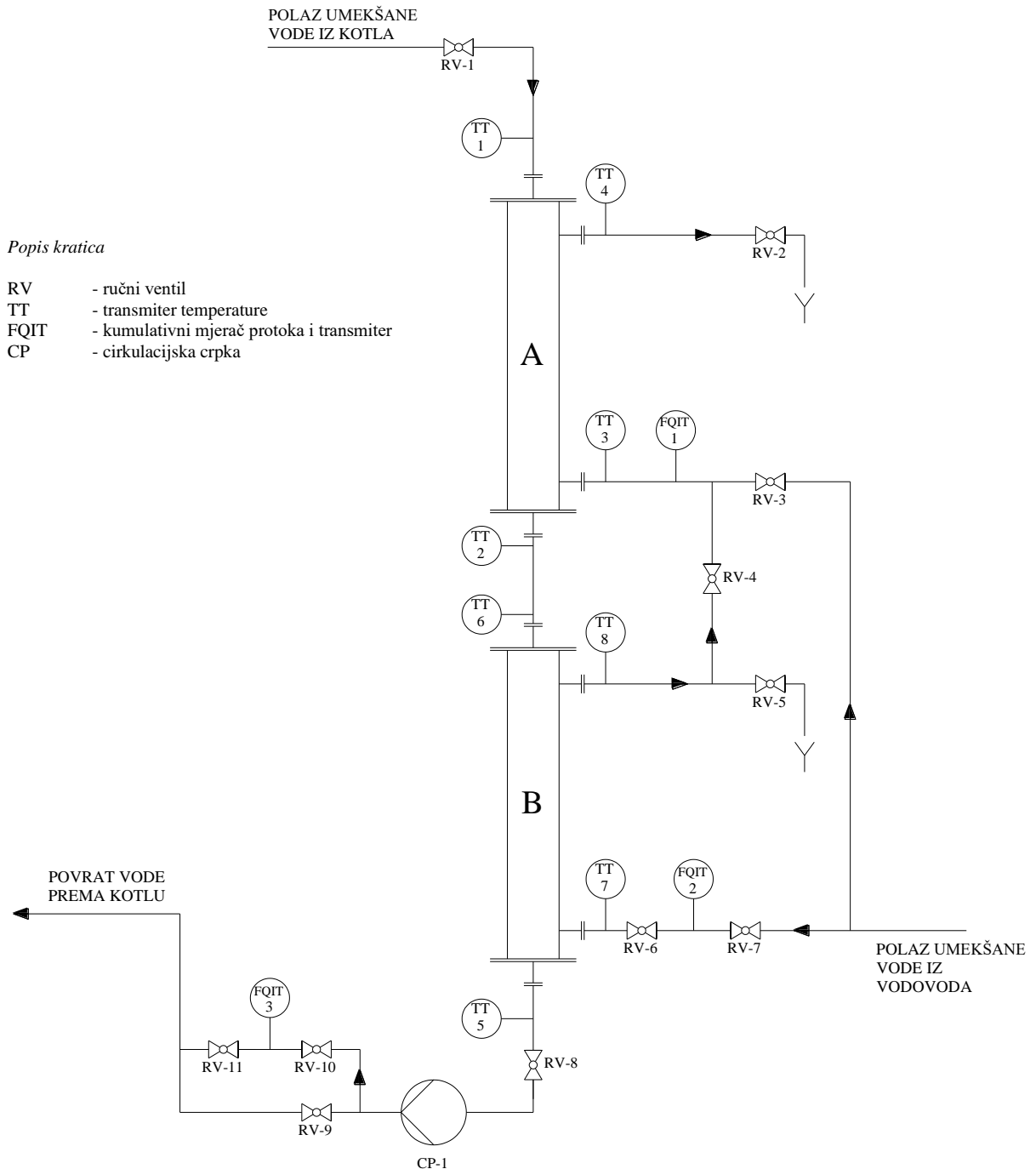


Slika 116. Izmjenjivač topline sa spiralnim cijevima

Temperature se mjere platinskim otporničkim termometrom s PT100 osjetnicima klase A prema EN 60751 na osam mjesta (slika 117) koji su umetnuti u zaštitnu cijev ispunjenu termopastom. Osjetnici su trožilno spojeni s akvizicijskim sustavom (National instruments). Vrijednosti i promjene temperature se numerički i grafički prate tijekom perioda mjerenja na

računalu koje je spojeno s akvizicijskim sustavom. Volumenski protoci vode se mjere turbinskim protokomjerima s impulsnim izlaznim signalom koji su spojeni na akvizicijski sustav. U ovisnosti o broju primljenih impulsa akvizicijski sustav u određenom vremenu daje vrijednost volumenskog protoka.

Svi termometri su umjereni u Laboratoriju za procesna mjerenja, a protokomjeri u Laboratoriju za toplinsku energiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 117. Dijagram toka struja tople i hladne vode

- 1 - mjerenje temperature jače struje na ulazu u spiralne cijevi izmjenjivača A,  $\vartheta_1$
- 2 - mjerenje temperature jače struje na izlazu iz spiralnih cijevi izmjenjivača A,  $\vartheta_2$
- 3 - mjerenje temperature slabije struje na ulazu u plašt izmjenjivača A,  $\vartheta_3$
- 4 - mjerenje temperature slabije struje na izlazu iz plašta izmjenjivača A,  $\vartheta_4$
- 5 - mjerenje temperature jače struje na izlazu iz spiralnih cijevi izmjenjivača B,  $\vartheta_5$
- 6 - mjerenje temperature jače struje na ulazu u spiralne cijevi izmjenjivača B,  $\vartheta_6$
- 7 - mjerenje temperature slabije struje na ulazu u plašt izmjenjivača B,  $\vartheta_7$
- 8 - mjerenje temperature slabije struje na izlazu iz plašta izmjenjivača B,  $\vartheta_8$

Dijagram toka struja na slici 117 prikazuje kako je osmišljen i proveden eksperiment. U svrhu izračuna omjera maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora i toplinskog toka neumreženog rekuperatora bilo je potrebno provesti mjerenja na dva načina. Za prvi slučaj neumreženog rekuperatora koji se sastoji od dva jednaka izmjenjivača topline (podaci dani u Tablici 1) u cijevi ulazi topla voda iz kotla te predaje toplinski tok hladnoj vodi iz vodovodne mreže koja struji protusmjerno u plaštu izmjenjivača topline. Temperatura kotlovske vode se mjeri na ulazu u spiralne cijevi izmjenjivača topline A te na izlazu vode iz cijevi izmjenjivača topline B. Spoj dva izmjenjivača topline je također toplinski izoliran čime su zanemarivi gubici toplinskog toka prema okolišu na spojnom cjevovodu između cijevi na izlazu iz izmjenjivača A i ulazu u cijevi u izmjenjivač B. Volumenski protok vode kroz cijevi mjeri se na izlazu vode iz cijevi izmjenjivača B. Temperature na strani vode iz vodovodne mreže se mjere na ulazu u plašt izmjenjivača B te na izlazu iz plašta izmjenjivača A. Volumenski protok vode iz vodovoda se mjeri na ulazu u plašt izmjenjivača B.

Za drugi slučaj umreženog rekuperatora cilj je ostvariti maksimalni toplinski tok priključenjem dodatne struje na optimalno mjesto. U ovom eksperimentu je priključak dodatne hladnije struje već određen omjerom površina oba izmjenjivača topline. Dodatna struja koja se priključuje na polovici ukupne zadane izmjenjivačke površine, prema matematičkom modelu, mora zadovoljiti osnovne pretpostavke modela. Jedna od njih je da obje slabije struje koje se priključuju na plašt moraju biti jednakog toplinskog kapaciteta  $C_1$ . Također, da bi se postigao maksimalni izmijenjeni toplinski tok, za slučaj bilo koje vrijednosti bezdimenzijske značajke  $\pi_3$ , vrijednost značajke  $M$  za mjesto priključka na polovici ukupne izmjenjivačke površine iznosi 1 (jednadžba (34)). To znači da obje slabije struje koje se priključuju na plašt izmjenjivača A i B trebaju imati jednaku ulaznu temperaturu, a što je

upravo ostvareno dobavom vode iz vodovodne mreže. Za ovakav slučaj umreženog rekuperatora koji se sastoji od dva izmjenjivača jednake površine, temperature su mjerene na osam mjesta – ulaz i izlaz jače toplije struje vode iz kotla u cijevi izmjenjivača A i izmjenjivača B te ulaz i izlaz hladnije struje vode iz vodovodne mreže izmjenjivača A i B. Volumenski protok vode je mjeran za svaku od tri navedene struje.

Prema navedenom, na raspolaganju su rekuperatori A i B jednakih površina što znači da je priključno mjesto dodatne struje A na zadanoj ukupnoj izmjenjivačkoj površini upravo na polovini. Kako bi se za zadano priključno mjesto postigao maksimalni toplinski tok umreženog rekuperatora, potrebno je odrediti vrijednost veličine  $M$ . Iz matematičkog modela, jednadžbe (34), (37), (48) i (52) – (61), pokazuje se da je za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke optimalno mjesto priključka dodatne struje A na polovini ukupne izmjenjivačke površine za slučaj kada je vrijednost veličine  $M$  jednaka 1,0.

Definicijski izraz za veličinu  $M$  dan je sljedećom jednadžbom

$$M = \frac{T'_{1A} - T'_2}{T'_{1B} - T'_2} \quad (7)$$

Iz jednadžbe (7) je vidljivo da se  $M = 1,0$  postiže u slučaju jednakih ulaznih temperatura slabijih struja A i B umreženog rekuperatora.

U ovom eksperimentalnom istraživanju, za sve mjerne točke, slabije struje A i B su struje vode iz vodovodne mreže jednakih ulaznih temperatura.

Mjerenje se provodi za dva slučaja:

- Ulazna temperatura vode iz kotla iznosi  $\mathcal{G}'_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ulazna temperatura vode iz kotla iznosi  $\mathcal{G}'_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Za svaku temperaturu odabrane su tri mjerne točke za različite iznose  $\pi_3$  značajke što podrazumijeva ostvarivanje različitih omjera protoka slabije i jače struje za svaku mjernu točku.

## 4.2. Rezultati i diskusija

Za slučaj neumreženog izmjenjivača topline toplinski tok koji topla voda iz kotla predaje hladnoj vodi iz vodovodne mreže na cjelokupnoj izmjenjivačkoj površini koja uključuje oba izmjenjivača topline računa se prema sljedećem izrazu

$$\Phi_{\text{cijev}} = q_{v, \text{cijev}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_5) \quad (120)$$

Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta vode za sve izračune očitane su za tlak i srednju temperaturu vode. Vrijednosti gustoće vode očitane su za tlak i temperaturu vode na mjestu mjerenja volumenskog protoka.

Toplinski tok koji prima hladnija voda računa se prema sljedećoj jednadžbi

$$\Phi_{\text{plast}} = q_{v, \text{plast}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_4 - \mathcal{G}_7) \quad (121)$$

Očekuje se da će izračunati toplinski tok koji hladnija voda prima od toplije vode ( $\Phi_{\text{plast}}$ ) biti nešto manjeg iznosa od toplinskog toka kojeg toplija voda predaje ( $\Phi_{\text{cijev}}$ ) zbog gubitaka toplinskog toka prema okolišu kroz plast izmjenjivača topline kao što to prikazuje jednadžba (122)

$$\Phi_{\text{cijev}} = \Phi_{\text{plast}} + \Phi_{\text{gub},1} \quad (122)$$

Za slučaj umreženog izmjenjivača topline toplinski tok koji topla voda iz kotla predaje hladnoj vodi iz vodovodne mreže u izmjenjivaču topline A računa se prema sljedećem izrazu

$$\Phi_{\text{cijev,A}} = q_{v, \text{cijevA}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2) \quad (123)$$

Toplinski tok koji prima hladnija voda u rekuperatoru A dan je sljedećom jednadžbom

$$\Phi_{\text{plast,A}} = q_{v, \text{plastA}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_4 - \mathcal{G}_3) \quad (124)$$

Toplinski tok koji topla voda predaje hladnoj vodi u izmjenjivaču topline B prikazuje jednadžba (125)

$$\Phi_{\text{cijev,B}} = q_{v, \text{cijevB}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_6 - \mathcal{G}_5) \quad (125)$$

U izmjenjivaču B hladnija voda prima iznos toplinskog toka dan sljedećim izrazom

$$\Phi_{\text{plajt,B}} = q_{v, \text{plajtB}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_8 - \mathcal{G}_7) \quad (126)$$

Također, zbog gubitaka toplinskog toka prema okolišu i u slučaju umreženog izmjenjivača topline vrijedi sljedeći izraz

$$\Phi_{\text{cijev,A}} + \Phi_{\text{cijev,B}} = \Phi_{\text{plajt,A}} + \Phi_{\text{plajt,B}} + \Phi_{\text{gub,2}} \quad (127)$$

Toplinski tok koji je izmijenjen u umreženom rekuperatoru predstavlja maksimalni toplinski tok za dane vrijednosti volumenskog protoka i temperatura struja vode na ulazu u izmjenjivače topline. Stoga će se u nastavku razmatranja ukupni toplinski tok koji je hladna voda primila u izmjenjivačima A i B ( $\Phi_{\text{plajt,A}} + \Phi_{\text{plajt,B}}$ ) označavati kao  $\Phi_{\text{maks}}$ , a toplinski tok koji je hladnija struja primila u neumreženom izmjenjivaču topline ( $\Phi_{\text{plajt}}$ ) označavati kao  $\Phi$ .

Traženi omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora može se izračunati iz sljedećeg izraza

$$\omega = \frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi} \quad (128)$$

Toplinski tok relevantan za proračun spomenutog omjera  $\omega$  je toplinski tok koji je primila hladnija voda iz vodovodne mreže koja struji u plaštu izmjenjivača topline, za umreženi i za neumreženi rekuperator. To je zbog postojanja već spomenutih gubitaka toplinskog toka prema okolišu kroz plašt izmjenjivača topline. Također, dodatni gubici toplinskog toka prema okolišu mogu se pripisati i spojnim cjevovodima u slučaju neumreženog izmjenjivača topline od izlaza hladnije struje iz izmjenjivača B do ulaza te struje u izmjenjivač A.

Iz jednadžbe (67), koja postavlja kriterij na veličinu  $M$  koji mora biti ispunjen kako bi lokalni maksimum bezdimenzijskog toplinskog toka postojao za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke, vidi se

da je za provjeru navedenog kriterija potrebno izračunati  $\pi_{2uk}$  značajku. Postupak izračuna dan je u nastavku.

Toplinski kapaciteti slabije struje i jače struje u umreženom izmjenjivaču topline računaju se kao

$$C_1 = q_{v, \text{plastA}} \cdot \rho_w \cdot c_w \quad (129)$$

$$C_2 = q_{v, \text{cijevA}} \cdot \rho_w \cdot c_w \quad (130)$$

iz čega se jednostavno računa i  $\pi_3$  značajka

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} \quad (131)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika za izmjenjivač A i B računa se prema izrazu [121]

$$\Delta \vartheta_{m,A} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_4) - (\vartheta_2 - \vartheta_3)}{\ln \frac{\vartheta_1 - \vartheta_4}{\vartheta_2 - \vartheta_3}} \quad (132)$$

$$\Delta \vartheta_{m,B} = \frac{(\vartheta_6 - \vartheta_8) - (\vartheta_5 - \vartheta_7)}{\ln \frac{\vartheta_6 - \vartheta_8}{\vartheta_5 - \vartheta_7}} \quad (133)$$

Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi za izmjenjivač A i B, uzimajući u obzir jednakost površina oba izmjenjivača, računa se kao

$$k_{uA} = \frac{\Phi_{\text{plast,A}}}{\Delta \vartheta_{m,A} \cdot A_u} \quad (134)$$

$$k_{uB} = \frac{\Phi_{\text{plast,B}}}{\Delta \vartheta_{m,B} \cdot A_u} \quad (135)$$

Srednja vrijednost koeficijenta prolaza topline svedena na unutarnju površinu cijevi za umreženi izmjenjivač topline dobiva se iz sljedećeg izraza



$$k_u = \frac{k_{uA} + k_{uB}}{2} \quad (136)$$

Jednadžba (136) proizlazi iz matematičkog modela, uz pretpostavku jednakosti toplinskih kapaciteta slabijih struja A i B te jednakosti površine rekuperatora A i B, prema kojem je  $\pi_{2uk}$  definirana kao  $\pi_{2uk} = \pi_{2A} + \pi_{2B}$ .

Bezdimenzijska značajka  $\pi_{2uk}$  se potom jednostavno računa kao

$$\pi_{2uk} = \frac{k_u \cdot A_u}{C_1} \quad (137)$$

Izračunom  $\pi_{2uk}$  značajke može se provjeriti zadovoljava li značajka  $M$ , koja je jednaka 1, interval dan u jednadžbi (67).

Donja i gornja granica intervala računa se prema sljedećem izrazu

$$\frac{1}{\pi_{2uk} + 1} < M < 1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1} \quad (138)$$

Pomoću izračunatih bezdimenzijskih značajki  $\pi_{2uk}$  i  $\pi_3$  moguće je iz matematičkog modela izračunati iznos maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora i iznos toplinskog toka neumreženog rekuperatora te izračunati njihov omjer.

Rezultati mjerenih podataka za ulaznu temperatura vode iz kotla  $\vartheta_2' = 60^\circ\text{C}$  i  $\vartheta_2' = 80^\circ\text{C}$  dani su u tablicama 2 - 7 u nastavku.

Tablica 2. Rezultati mjerenja za neumreženi rekuperator za slučaj  $\vartheta_2' = 60^\circ\text{C}$

CIJEVI						
	$\vartheta_1, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_5, ^\circ\text{C}$	$c_w, \text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w, \text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{cijev}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{cijev}}, \text{kW}$
1.	60,52	53,16	4,191	986,6	4066,42	34,36
2.	60,40	45,80	4,192	989,9	1699,8	28,6
3.	60,30	40,20	4,193	992,2	979,8	22,76

PLAŠT							
	$\vartheta_7, \text{°C}$	$\vartheta_4, \text{°C}$	$c_w, \text{kJ/(kgK)}$	$\rho_w, \text{kg/m}^3$	$q_{v,\text{plast}}, \text{l/h}$	$\Phi, \text{kW}$	$\Phi_{\text{gub},1} = \Phi_{\text{cijev}} - \Phi$ kW
1.	10,33	44,32	4,201	996,8	859,8	34,1	0,27
2.	10,80	39,11	4,202	997,7	859,8	28,4	0,2
3.	10,10	32,6	4,204	999,8	859,8	22,59	0,17

Tablica 3. Rezultati mjerenja za umreženi rekuperator za slučaj  $\vartheta_2' = 60 \text{°C}$ 

CIJEVI, rekuperator A						
	$\vartheta_1, \text{°C}$	$\vartheta_2, \text{°C}$	$c_w, \text{kJ/(kgK)}$	$\rho_w, \text{kg/m}^3$	$q_{v,\text{cijevA}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{cijev,A}}, \text{kW}$
1.	60,98	55,57	4,19	987,2	4066,42	25,29
2.	60,99	51,64	4,191	990,7	1699,8	18,34
3.	60,84	47,41	4,191	992,8	979,8	15,21

CIJEVI, rekuperator B							
	$\vartheta_6, \text{°C}$	$\vartheta_5, \text{°C}$	$c_w, \text{kJ/(kgK)}$	$\rho_w, \text{kg/m}^3$	$q_{v,\text{cijevB}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{cijev,B}}, \text{kW}$	$\Phi_{\text{cijev,A}+}$ $\Phi_{\text{cijev,B}}, \text{kW}$
1.	55,53	51,86	4,191	987,2	4066,2	17,17	42,46
2.	51,6	43,86	4,193	990,7	1699,8	15,19	33,53
3.	47,38	38,56	4,195	992,8	979,8	10,0	25,21

PLAŠT, rekuperator A						
	$\vartheta_3, \text{°C}$	$\vartheta_4, \text{°C}$	$c_w, \text{kJ/(kgK)}$	$\rho_w, \text{kg/m}^3$	$q_{v,\text{plastA}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{plast,A}}, \text{kW}$
1.	10,33	35,38	4,203	999,8	859,8	25,14
2.	10,39	28,51	4,205	999,8	859,8	18,19
3.	10,1	25,09	4,206	999,8	859,8	15,06

PLAŠT, rekuperator B								
	$\vartheta_7, \text{°C}$	$\vartheta_8, \text{°C}$	$c_w, \text{kJ/(kgK)}$	$\rho_w, \text{kg/m}^3$	$q_{v,\text{plastB}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{plast,B}}, \text{kW}$	$\Phi_{\text{maks}}, \text{kW}$	$\Phi_{\text{gub},2}, \text{kW}$
1.	10,33	27,23	4,206	999,8	859,8	16,97	42,11	0,35
2.	10,39	25,33	4,206	999,8	859,8	15,0	33,19	0,34
3.	10,1	18,89	4,208	999,8	859,8	9,84	24,89	0,32

Gubitak toplinskog toka prema okolišu u slučaju umreženog izmjenjivača topline računa se iz

$$\text{izraza } \Phi_{\text{gub},2} = (\Phi_{\text{cijev,A}} + \Phi_{\text{cijev,B}}) - \Phi_{\text{maks}}.$$

Tablica 4. Izračun  $\omega$  za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 60^\circ\text{C}$

$\mathcal{G}'_2 = 60^\circ\text{C}$						
	$\pi_3,$ -	$\Delta\mathcal{G}_{m,A},$ $^\circ\text{C}$	$k_{uA},$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\Delta\mathcal{G}_{m,B},$ $^\circ\text{C}$	$k_{uB},$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$k_u,$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
1.	0,215	34,492	2685,39	34,493	1812,59	2248,99
2.	0,512	36,687	1826,59	29,721	1859,29	1842,94
3.	0,887	36,528	1518,56	27,969	1295,69	1407,13
	$\pi_{2uk},$ -	$\frac{1}{\pi_{2uk} + 1}$	$1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1}$	$M,$ -	$\omega,$ -	
	1,216	0,451	1,329	1,0	1,2351	
	0,996	0,500	1,333	1,0	1,1686	
	0,760	0,568	1,325	1,0	1,1021	

Tablica 5. Rezultati mjerenja za neumreženi rekuperator za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 80^\circ\text{C}$

CIJEVI							
	$\mathcal{G}_1,$ $^\circ\text{C}$	$\mathcal{G}_5, ^\circ\text{C}$	$c_w, \text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w, \text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{cijev}}, \text{l/h}$	$\Phi_{\text{cijev}}, \text{kW}$	
1.	80,05	69,26	4,186	978,2	3815,64	46,83	
2.	80,23	59,52	4,187	983,5	1720,02	40,73	
3.	80,02	51,11	4,188	987,6	1000,02	33,22	
PLAŠT							
	$\mathcal{G}_7,$ $^\circ\text{C}$	$\mathcal{G}_4, ^\circ\text{C}$	$c_w, \text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w, \text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{plašt}}, \text{l/h}$	$\Phi, \text{kW}$	$\Phi_{\text{gub},1} = \Phi_{\text{cijev}} - \Phi$ $\text{kW}$
1.	10,30	56,66	4,198	999,8	859,8	46,48	0,36
2.	10,30	50,59	4,200	999,8	859,8	40,4	0,3
3.	10,30	43,21	4,201	999,8	859,8	33,01	0,2

Tablica 6. Rezultati mjerenja za umreženi rekuperator za slučaj  $\vartheta_2' = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 

CIJEVI, rekuperator A								
	$\vartheta_1,$ $^\circ\text{C}$	$\vartheta_2,$ $^\circ\text{C}$	$c_w,$ $\text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w,$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{cijevA}},$ $\text{l}/\text{h}$	$\Phi_{\text{cijev,A}},$ $\text{kW}$		
1.	79,67	72,8	4,186	980,0	3815,64	29,86		
2.	80,42	67,17	4,187	985,1	1720,02	26,11		
3.	79,97	60,36	4,187	989,2	1000,02	22,56		
CIJEVI, rekuperator B								
	$\vartheta_6,$ $^\circ\text{C}$	$\vartheta_5,$ $^\circ\text{C}$	$c_w,$ $\text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w,$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{cijevB}},$ $\text{l}/\text{h}$	$\Phi_{\text{cijev,B}},$ $\text{kW}$	$\Phi_{\text{cijev,A}} +$ $\Phi_{\text{cijev,B}},$ $\text{kW}$	
1.	72,69	66,06	4,187	980,0	3815,64	28,86	58,72	
2.	67,10	56,30	4,189	985,1	1720,02	21,3	47,41	
3.	60,19	47,49	4,191	989,2	1000,02	14,63	37,19	
PLAŠT, rekuperator A								
	$\vartheta_3,$ $^\circ\text{C}$	$\vartheta_4,$ $^\circ\text{C}$	$c_w,$ $\text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w,$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{plastA}},$ $\text{l}/\text{h}$	$\Phi_{\text{plast,A}},$ $\text{kW}$		
1.	10,23	39,86	4,202	999,8	859,8	29,72		
2.	10,06	35,86	4,203	999,8	859,8	25,9		
3.	10,10	32,40	4,204	999,8	859,8	22,39		
PLAŠT, rekuperator B								
	$\vartheta_7,$ $^\circ\text{C}$	$\vartheta_8,$ $^\circ\text{C}$	$c_w,$ $\text{kJ}/(\text{kgK})$	$\rho_w,$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$q_{v,\text{plastB}},$ $\text{l}/\text{h}$	$\Phi_{\text{plast,B}},$ $\text{kW}$	$\Phi_{\text{maks}},$ $\text{kW}$	$\Phi_{\text{gub,2}},$ $\text{kW}$
1.	10,23	38,82	4,202	999,8	859,8	28,68	58,41	0,31
2.	10,06	31,26	4,204	999,8	859,8	21,28	47,18	0,23
3.	10,10	24,62	4,206	999,8	859,8	14,58	36,98	0,22

Tablica 7. Izračun  $\omega$  za slučaj  $\vartheta_2' = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 

$\vartheta_2' = 80\text{ }^\circ\text{C}$						
	$\pi_3,$ -	$\Delta\vartheta_{m,A},$ $^\circ\text{C}$	$k_{uA},$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\Delta\vartheta_{m,B},$ $^\circ\text{C}$	$k_{uB},$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$k_u,$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
1.	0,231	50,333	2175,57	43,938	2405,23	2290,40
2.	0,509	50,575	1886,53	40,821	1920,85	1903,69
3.	0,873	48,905	1686,79	36,47	1473,37	1580,08

$\pi_{2uk}$ , -	$\frac{1}{\pi_{2uk} + 1}$	$1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1}$	$M$ , -	$\omega$ , -
1,239	0,447	1,328	1,0	1,2567
1,03	0,493	1,333	1,0	1,1678
0,854	0,539	1,331	1,0	1,12

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je za oba slučaja ( $\vartheta_2' = 60\text{ °C}$  i  $\vartheta_2' = 80\text{ °C}$ ) kriterij iz jednadžbe (67) ispunjen te da se maksimalni toplinski tok u umreženom izmjenjivaču postiže za sve vrijednosti ispitivane  $\pi_3$  značajke. Za vrijednost  $M = 1,0$ , maksimum se postiže upravo na polovini raspoložive izmjenjivačke površine, što je bio i razlog zašto su obje temperature slabije struje na ulazu u plašt izmjenjivača A i B bile jednake. Mjerne točke su birane na način da se obuhvati što širi raspon  $\pi_3$  značajki kao što je bilo analizirano u dijagramskim prikazima rezultata matematičkog modela.

Za prvi slučaj, kada je  $\vartheta_2' = 60\text{ °C}$ , vrijednosti  $\pi_3$  značajke su 0,215; 0,512 i 0,888 te se najveće vrijednosti toplinskog toka ostvaraju upravo za  $\pi_3 = 0,215$  kada je maseni protok vode jače struje (vode iz kotla) bio i najveći u odnosu na tri istaknute mjerne točke. Navedeni iznosi  $\pi_3$  značajke u mjerenju su postignuti na način da se maseni protok vode koja struji kroz plašt održavao konstantnim, a protok jače struja (vode iz kotla) se prigušivao od jedne do druge mjerne točke.

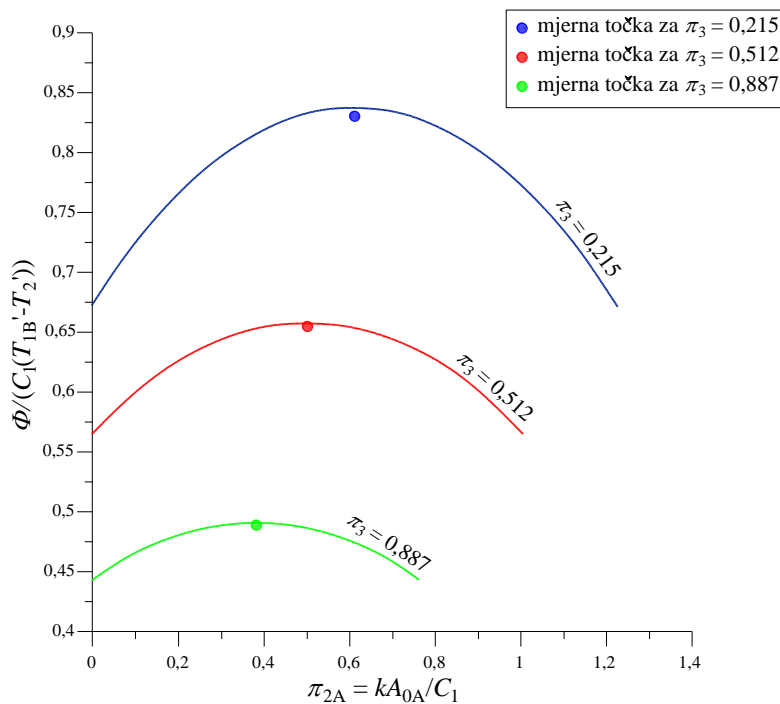
Spomenuti toplinski gubici prema okolišu kroz plašt izmjenjivača topline mogu se zanemariti za sve tri mjerne točke jer su njihovi iznosi oko 1 % izmijenjenog toplinskog toka. Vidljivo je da su toplinski gubici neumreženog izmjenjivača topline manji od toplinskih gubitaka umreženog izmjenjivača. Iako je, zbog specifičnosti provedbe mjerenja, bilo očekivano obrnuto upravo zato što se kod izvedbe umreženog rekuperatora izbjegava spojni cjevovod između dva izmjenjivača topline na strani slabije struje (slika 117). Međutim, ovakvi odnosi gubitaka u umreženom i neumreženom izmjenjivaču mogu se pripisati nesigurnosti mjernih rezultata, a samim time i nesigurnosti izračuna relevantnih toplinskih tokova. U slučaju umreženog rekuperatora toplinski tok na strani plašta računa se koristeći četiri izmjerene temperature i isto toliko na strani jače struje unutar cijevi, dok se u slučaju neumreženog rekuperatora mjere dvije temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača.

Toplinski tok u slučaju umreženog izmjenjivača topline je veći u izmjenjivaču A u odnosu na izmjenjivač B, što je i očekivano jer hladna voda iz vodovoda u izmjenjivaču topline A

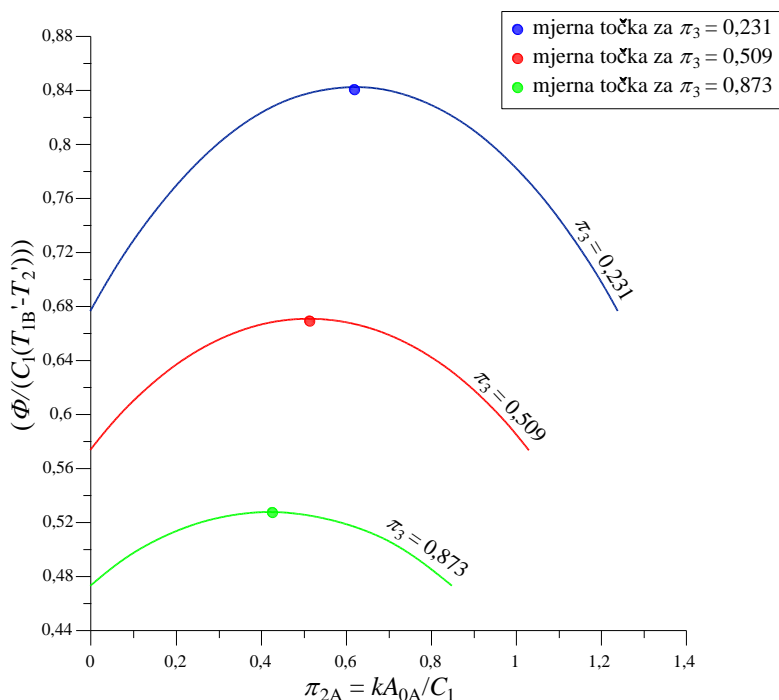
izmjenjuje toplinski tok s toplom vodom iz kotla koja je više temperature na ulazu u rekuperator A u odnosu na ulaz tople vodu u rekuperator B.

Omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora za tri mjerne točke iznosi 1,2351; 1,1686 i 1,1021 (Tablica 4), što znači da je za niže vrijednosti  $\pi_3$  značajke taj omjer veći što potvrđuje i teorijski primjer na slici 12.

Za drugi slučaj, kada je  $\mathcal{G}'_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , vrijednosti  $\pi_3$  značajke su 0,231; 0,509 i 0,873 (Tablica 7) iz čega se može vidjeti da su vrijednosti vrlo slične vrijednostima u prvom slučaju. Očekivano, najveće vrijednosti toplinskog toka ostvaraju se također pri nižim vrijednostima  $\pi_3$  značajke. Gubici toplinskog toka prema okolišu manji su od 1 % izmijenjenog toplinskog toka. Omjeri maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora za tri mjerne točke iznosi 1,2567; 1,1678 i 1,12 (Tablica 7).



Slika 118. Usporedba teorijskog i mjenog bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\mathcal{G}'_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $M = 1,0$  i  $\pi_3 = 0,215; 0,512$  i  $0,887$



Slika 119. Usporedba teorijskog i mjenenog bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $M = 1,0$  i  $\pi_3 = 0,231; 0,509$  i  $0,873$

Dijagrami na slikama 118 i 119 prikazuju usporedbu bezdimenzijskog toplinskog toka izračunatog iz izvedenog matematičkog modela za tri vrijednosti  $\pi_3$  značajke s bezdimenzijskim toplinskim tokom izračunatim pomoću mjerenih podataka. Krivulje dobivene matematičkim modelom jasno pokazuju, za  $M = 1,0$ , da se za sve parametarske krivulje  $\pi_3 = \text{konst.}$  maksimum toplinskog toka pojavljuje na polovini ukupne izmjenjivačke površine, odnosno  $\pi_{2A\text{opt}} = \pi_{2\text{uk}}/2$ . Mjereni podaci, prikazani Tablicama 2 – 7, za pojedine vrijednosti  $\pi_3$  značajke predstavljaju optimalan režim rada umreženog izmjenjivača topline jer se za zadane vrijednosti ukupne izmjenjivačke površine, priključka dodatne struje na polovini ukupne površine, ulazne temperature jače i slabijih struja te toplinske kapacitete struja postiže maksimalni toplinski tok izmjenjen u umreženom rekuperatoru. Vrijednosti maksimalnog bezdimenzijskog toplinskog toka izračunatog pomoću mjerenih podataka prikazane su za svaku  $\pi_3 = \text{konst.}$  krivulju te pokazuju vrlo dobro poklapanje s teorijskim vrijednostima bezdimenzijskog toplinskog toka. Koordinate mjerenih maksimuma bezdimenzijskog toplinskog toka za sliku 118, od manje do veće vrijednosti  $\pi_3$ , su (0,608; 0,8278), (0,498; 0,6531) i (0,38; 0,4882), a za sliku 119 (0,6195; 0,8383), (0,515; 0,668) i (0,427; 0,527).

### 4.3. Mjerna nesigurnost

Za svako provedeno mjere izračunata je sastavljena standardna mjerna nesigurnost kako je prikazano u nastavku. Tražena mjerena veličina je omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora kako prikazuje jednadžba (128)

$$\omega = \frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi} \quad (128)$$

Sastavljena varijanca se za ovaj slučaj računa prema sljedećoj jednadžbi

$$u_c^2(\omega) = \left[ \frac{\partial \omega}{\partial \Phi_{\text{maks}}} u_c(\Phi_{\text{maks}}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \omega}{\partial \Phi} u_c(\Phi) \right]^2 \quad (139)$$

Sastavljena standardna nesigurnost je procjena standardnog odstupanja i opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini [132]. Računa se kao pozitivni drugi korijen sastavljene standardne varijance.

Sastavljene mjerne nesigurnosti u jednadžbi (139) računaju se pomoću standardnih ili sastavljenih standardnih nesigurnosti kako je to prikazano u nastavku.

#### ***4.3.1. Standardna nesigurnost mjerenja temperature platinskim otporničkim termometrima s PT100 osjetnicima***

Određivanje standardne mjerne nesigurnosti mjerenja temperature prikazano je za jedan temperaturni osjetnik Tablicom 8.



Tablica 8. Nesigurnost mjerenja temperature

Nesigurnost mjerenja temperature										
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitanje		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent		Doprinos	
A	Očitanje temperatura	60,05	°C	0,0100	°C	pravokutna	1,0	[ - ]	2,887	mK
B	Umjeravanje termometra	0,00	°C	0,1000	°C	normalna (2σ)	1,0	[ - ]	50,0	mK
	Drift termometra	0,00	°C	0,1000	°C	pravokutna	1,0	[ - ]	57,735	mK
	Rezolucija termometra	0,00	°C	0,0100	°C	pravokutna	1,0	[ - ]	2,887	mK
A&B	Izmjerena temperatura	80,05	°C	Standardna nesigurnost (1σ)				<b>0,0765</b>	°C	

Termometri korišteni u eksperimentalnom dijelu istraživanja su umjereni u temperaturnim točkama 0 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C i 80 °C, a pripadni budžeti mjerne nesigurnosti se u ovom radu ne prikazuju.

Temperatura se mjeri pomoću termometra s osam PT100 osjetnika te je za standardnu nesigurnost svih osjetnika usvojena vrijednost

$$u(\vartheta) = 0,0765^{\circ}\text{C} \quad (140)$$

#### 4.3.2. Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka

Za mjerenje volumenskih protoka pri eksperimentu korišteni su turbinski protokomjeri s impulsnim izlaznim signalom koji su spojeni na akvizicijski sustav. U ovisnosti o broju primljenih impulsa akvizicijski sustav u određenom vremenu daje vrijednost volumenskog protoka. Za procjenu sastavljene mjerne nesigurnosti volumenskog protoka razmatrani su doprinosi zbog nesigurnosti očitavanja vremena početka i završetka mjerenja volumena vode koji je prošao kroz protokomjer, nesigurnosti očitavanja početnog i završnog volumena s akvizicijskog sustava, nesigurnosti umjeravanja mjerila volumena te nesigurnosti vezane uz mogućnost promjene karakteristike protokomjera u periodu od prethodnog umjeravanja (*drift*).

Primjer budžeta mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerila volumena prikazan je Tablicom 9 čiji se pojmovi, zbog opsežnosti rada, ne pojašnjavaju.

Tablica 9. Budžet mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerila volumena

Korištena oprema										
Etalon:		Vaga: MAVAG-01								
Ispitna linija:		MT10_15-40								
Objekt umjeravanja (OU):		Maddalena, CD ONE TRP MID WATER METER								
Nesigurnost određivanja referentnog volumena										
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje		Nesigurnost		Razdioba	Koeffcijent		Doprinos	
A	Očitavanja etalona	59,353	kg	0,002	kg	normalna (1σ)	0,0010	m <sup>3</sup> /kg	0,002	dm <sup>3</sup>
B	Umjeravanje etalona	0,00	kg	0,002	kg	normalna (2σ)	0,0010	m <sup>3</sup> /kg	0,001	dm <sup>3</sup>
	Drift etalona	0,00	kg	0,001	kg	pravokutna	0,0010	m <sup>3</sup> /kg	0,001	dm <sup>3</sup>
	Rezolucija	0,00	kg	0,001	kg	pravokutna	0,0010	m <sup>3</sup> /kg	0,000	dm <sup>3</sup>
	Gustoća vode	0,00	kg/m <sup>3</sup>	7,8	kg/m <sup>3</sup>	pravokutna	0,00006	m <sup>3</sup> /kg/ m <sup>3</sup>	0,268	dm <sup>3</sup>
	Diverter	0,00	dm <sup>3</sup>	0,005	dm <sup>3</sup>	pravokutna	1,0	[ - ]	0,003	dm <sup>3</sup>
	Ishlapljivanje vode	0,00	dm <sup>3</sup>	0,0348	dm <sup>3</sup>	pravokutna	1,0	[ - ]	0,020	dm <sup>3</sup>
A&B	Volumen vode kroz OU	0,0594	m <sup>3</sup>	Sastavljena standardna mjerna nesigurnost (1σ)				0,269	dm <sup>3</sup>	
Nesigurnost objekta umjeravanja		V <sub>cal</sub> :		0,0594		m <sup>3</sup>				
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje		Nesigurnost		Razdioba	Koeffcijent		Doprinos	
A	Očitavanje OU	58,00	dm <sup>3</sup>	0,5774	dm <sup>3</sup>	normalna (1σ)	1,0	[ - ]	0,577	dm <sup>3</sup>
B	Rezolucija OU	0,00	dm <sup>3</sup>	1,0000	dm <sup>3</sup>	Pravokutna	1,0	[ - ]	0,289	dm <sup>3</sup>
	Nesigurnost ref. volumena	0,00	dm <sup>3</sup>	0,2686	dm <sup>3</sup>	normalna (1σ)	1,0	[ - ]	0,269	dm <sup>3</sup>
A&B	Volumen OU	0,0580	m <sup>3</sup>	Sastavljena standardna mjerna nesigurnost (1σ)				<b>0,7</b>	dm <sup>3</sup>	

Volumenski protok je izračunat pomoću sljedeće jednadžbe

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}}}{t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}}} \quad (141)$$

Vremena očitavanja početnog i završnog volumena zabilježena su kamerom mobitela te je pripadna nesigurnost procijenjena na 1 sekundu. Pretpostavljajući pravokutnu razdiobu, doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja vremena početka i završetka mjerenja volumena vode iznosi

$$u_c(t_{\text{kon}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial t_{\text{kon}}} \frac{u(t_{\text{kon}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-(V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (142)$$

$$u_c(t_{\text{poč}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial t_{\text{poč}}} \frac{u(t_{\text{poč}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{(V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (143)$$

Rezolucija protokomjera iznosi 1 dm<sup>3</sup>. Utjecaj nesigurnosti očitavanja početnog i završnog volumena iskazane su, uz pretpostavku pravokutne razdiobe, sljedećim jednadžbama

$$u_c(V_{\text{kon}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial V_{\text{kon}}} \frac{u(V_{\text{kon}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{1}{t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}}} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (144)$$

$$u_c(V_{\text{poč}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial V_{\text{poč}}} \frac{u(V_{\text{poč}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{-1}{t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}}} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (145)$$

*Drift* mjerila protoka procijenjen je na 1 dm<sup>3</sup>. Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog *drifta* mjerila protoka, pretpostavljajući pravokutnu razdiobu, iznosi

$$u_c(V_{\text{dr}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial (V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})} \frac{u(V_{\text{dr}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{1}{t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}}} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (146)$$

Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti umjeravanja protokomjera jednak je

$$u_c(V_{\text{umj}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial q_v}{\partial (V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})} u(V_{\text{umj}}) \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{1}{t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}}} 0,7 \right]^2} \quad (147)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka jednaka je

$$u_c(q_v) = \sqrt{u_c^2(t_{\text{kon}}) + u_c^2(t_{\text{poč}}) + u_c^2(V_{\text{kon}}) + u_c^2(V_{\text{poč}}) + u_c^2(V_{\text{dr}}) + u_c^2(V_{\text{umj}})} \quad (148)$$

### 4.3.3. *Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka*

Toplinski tok koji hladnija voda prima u plaštu načelno se računa kao

$$\Phi = q_v \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_{\text{izlaz}} - \vartheta_{\text{ulaz}}) \quad (149)$$

Standardne nesigurnosti mjerenja temperature i volumenskog protoka prikazane su u prethodnim poglavljima. U nastavku je objašnjen izračun mjerne nesigurnosti gustoće vode i specifičnog toplinskog kapaciteta vode.

#### *Sastavljena mjerna nesigurnost gustoće*

Vrijednost gustoće vode izračunata je za tlak i temperaturu vode na mjestu mjerenja volumenskog protoka. Dva su glavna uzroka nesigurnosti gustoće:

- nesigurnost gustoće kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature
- nesigurnost gustoće kao posljedica nesigurnosti jednadžbe pomoću koje je izračunata gustoća

Nesigurnost gustoće kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(\rho_\vartheta)}{\rho_\vartheta} = \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} u(\vartheta) \quad (150)$$

u kojem je koeficijent osjetljivosti određen prema izrazu

$$\frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} \approx \frac{\Delta \rho}{\Delta \vartheta} = \frac{\rho(\vartheta + 0,001) - \rho(\vartheta - 0,001)}{(\vartheta + 0,001) - (\vartheta - 0,001)} \quad (151)$$

Koeficijent osjetljivosti opisuje kako se procjena vrijednosti gustoće mijenja s promjenama vrijednosti procjene temperature.

Prema [133] nesigurnost jednadžbe u relevantnom području iznosi 0,003 %, stoga pripadna nesigurnost gustoće iznosi

$$\frac{u(\rho_{\text{jedn}})}{\rho_{\text{jedn}}} = \frac{0,003\rho}{100} \quad (152)$$

Sastavljena standardna nesigurnost gustoće jednaka je

$$u_c(\rho_w) = \sqrt{\left[ u_c(\rho_g) \right]^2 + \left[ \frac{u(\rho_{\text{jedn}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} u(\vartheta) \right]^2 + \left[ \frac{0,00003\rho}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (153)$$

Gustoća vode se računala, kao što je već navedeno, uzimajući u obzir temperaturu na mjestu mjerenja volumenskog protoka. Međutim, pozicija protokomjera i mjesto mjerenja temperature na cjevovodu nije isto te se pretpostavlja da postoji razlika u temperaturama vode na ta dva mjesta. Analizom mjerenih rezultata zaključuje se da na tom dijelu cjevovoda, između mjesta mjerenja protoka i temperature, razlika temperature nije veća od 0,1 °C. Taj utjecaj temperaturne razlike pri izračunu nesigurnosti gustoće kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperatura je vrlo malen te se može zanemariti.

#### *Sastavljena mjerna nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta*

Specifični toplinski kapacitet vode izračunat je za tlak i srednju temperature vode koja se zagrijava u plaštu izmjenjivača topline. Kao i u slučaju gustoće, za nesigurnost određivanja specifičnog toplinskog kapaciteta u obzir su uzeti utjecaji:

- nesigurnost mjerenja temperature
- nesigurnost jednadžbe pomoću koje je izračunat specifični toplinski kapacitet

Nesigurnost određivanja specifičnog toplinskog kapaciteta kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(c_g)}{c_g} = \frac{\partial c_w}{\partial \vartheta_{\text{sr}}} u_c(\vartheta_{\text{sr}}) \quad (154)$$

u kojem je koeficijent osjetljivosti određen prema izrazu

$$\frac{\partial c_w}{\partial \vartheta_{sr}} \approx \frac{\Delta c_w}{\Delta \vartheta_{sr}} = \frac{c_w(\vartheta_{sr} + 0,001) - c_w(\vartheta_{sr} - 0,001)}{(\vartheta_{sr} + 0,001) - (\vartheta_{sr} - 0,001)} \quad (155)$$

Srednja temperatura vode određena je prema izrazu

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{izlaz} + \vartheta_{ulaz}}{2} \quad (156)$$

Iz prethodnog izraza, uz jednake nesigurnosti mjerenja temperature upotrebom dvaju osjetnika, proizlazi da je

$$u_c(\vartheta_{sr}) = \frac{u(\vartheta)}{\sqrt{2}} \quad (157)$$

Prema [133] nesigurnost jednadžbe u relevantnom području iznosi 0,2 %, stoga nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta vode zbog nesigurnosti jednadžbe iznosi

$$\frac{u(c_{jedn})}{c_{jedn}} = \frac{0,2c_w}{100} \quad (158)$$

Sastavljena standardna nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta jednaka je

$$u_c(c_w) = \sqrt{\left[ u_c(c_\vartheta) \right]^2 + \left[ \frac{u(c_{jedn})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[ \frac{\partial c_w}{\partial \vartheta_{sr}} \frac{u(\vartheta)}{\sqrt{2}} \right]^2 + \left[ \frac{0,002c_w}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (159)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned} u_c(\Phi) &= \sqrt{\left[ \frac{\partial \Phi}{\partial q_v} u_c(q_v) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta_{ulaz}} u(\vartheta_{ulaz}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta_{izlaz}} u(\vartheta_{izlaz}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_w} u_c(\rho_w) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial c_w} u_c(c_w) \right]^2} \\ &= \sqrt{\left[ \rho_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_{izlaz} - \vartheta_{ulaz}) u_c(q_v) \right]^2 + \left[ -q_v \cdot \rho_w \cdot c_w u(\vartheta_{ulaz}) \right]^2 + \left[ q_v \cdot \rho_w \cdot c_w u(\vartheta_{izlaz}) \right]^2} \\ &\quad + \sqrt{\left[ q_v \cdot c_w \cdot (\vartheta_{izlaz} - \vartheta_{ulaz}) u_c(\rho_w) \right]^2 + \left[ q_v \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_{izlaz} - \vartheta_{ulaz}) u_c(c_w) \right]^2} \end{aligned} \quad (160)$$

#### 4.3.4. Sastavljena mjerna nesigurnost omjera maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora

Tražena mjerena veličina je omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora kako prikazuje jednadžba (128)

$$\omega = \frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi} \quad (128)$$

gdje je

$$\Phi_{\text{maks}} = \Phi_{\text{pláš, A}} + \Phi_{\text{pláš, B}} \quad (161)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost  $\Phi_{\text{maks}}$  računa se prema izrazu

$$u_c(\Phi_{\text{maks}}) = \sqrt{[u_c(\Phi_{\text{pláš, A}})]^2 + [u_c(\Phi_{\text{pláš, B}})]^2} \quad (162)$$

Konačno, izračun sastavljene mjerne nesigurnosti omjera maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora prikazan je sljedećom jednadžbom

$$u_c(\omega) = \sqrt{\left[\frac{\partial \omega}{\partial \Phi_{\text{maks}}} u_c(\Phi_{\text{maks}})\right]^2 + \left[\frac{\partial \omega}{\partial \Phi} u_c(\Phi)\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{\Phi} u_c(\Phi_{\text{maks}})\right]^2 + \left[-\frac{\Phi_{\text{maks}}}{\Phi^2} u_c(\Phi)\right]^2} \quad (163)$$

Vrijednosti sastavljene mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  prikazane su Tablicama 10 i 11.

Tablica 10. Sastavljene mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  za slučaj  $\mathcal{S}_2^i = 60^\circ\text{C}$

	$\pi_3$	$\omega$	$u_c(\omega)$
1.	0,215	1,2351	0,00995
2.	0,512	1,1686	0,01028
3.	0,887	1,1021	0,01122

Tablica 11. Sastavljene mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 

	$\pi_3$	$\omega$	$u_c(\omega)$
1.	0,231	1,2567	0,02523
2.	0,509	1,1678	0,01494
3.	0,873	1,12	0,01818

Proširena sastavljena mjerna nesigurnost omjera  $\omega$  s faktorom prekrivanja  $k = 2$  prikazana je Tablicama 12 i 13 te se računa prema sljedećem izrazu

$$U(\omega) = k \cdot u_c(\omega) = 2 \cdot u_c(\omega) \quad (164)$$

Tablica 12. Proširene mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ 

	$\pi_3$	$\omega$	$U(\omega)$
1.	0,215	1,2351	0,0199
2.	0,512	1,1686	0,02056
3.	0,887	1,1021	0,02244

Tablica 13. Proširene mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 

	$\pi_3$	$\omega$	$U(\omega)$
1.	0,231	1,2567	0,05046
2.	0,509	1,1678	0,02988
3.	0,873	1,12	0,03636

Najveći doprinos sastavljenoj mjernoj nesigurnosti toplinskog toka dolazi od sastavljene mjerne nesigurnosti volumenskog protoka, što je i očekivano. Sastavljena mjerna nesigurnost volumenskog protoka je veća što je kraće vrijeme mjerenja volumena vode koji je prošao kroz protokomjer. Zbog same rezolucije protokomjera ( $1\text{ dm}^3$ ) veća se greška akumulira na manjim protocima te je pri manjim protocima (kraće vrijeme mjerenja) mjerna nesigurnost volumenskog protoka stoga i veća.

Najveći iznos mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  je određen za prvu mjernu točku za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$  i iznosi 0,05046 (Tablica 13). Mjerenje protoka za tu mjernu točku je bilo najkraće u odnosu na ostale mjerne točke što ima za posljedicu najveću vrijednost sastavljane mjerne nesigurnosti volumenskog protoka te omjera  $\omega$ .

Najmanji doprinos sastavljenoj mjernoj nesigurnosti toplinskog toka proizlazi iz mjerne nesigurnosti gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta vode kao posljedica nesigurnosti

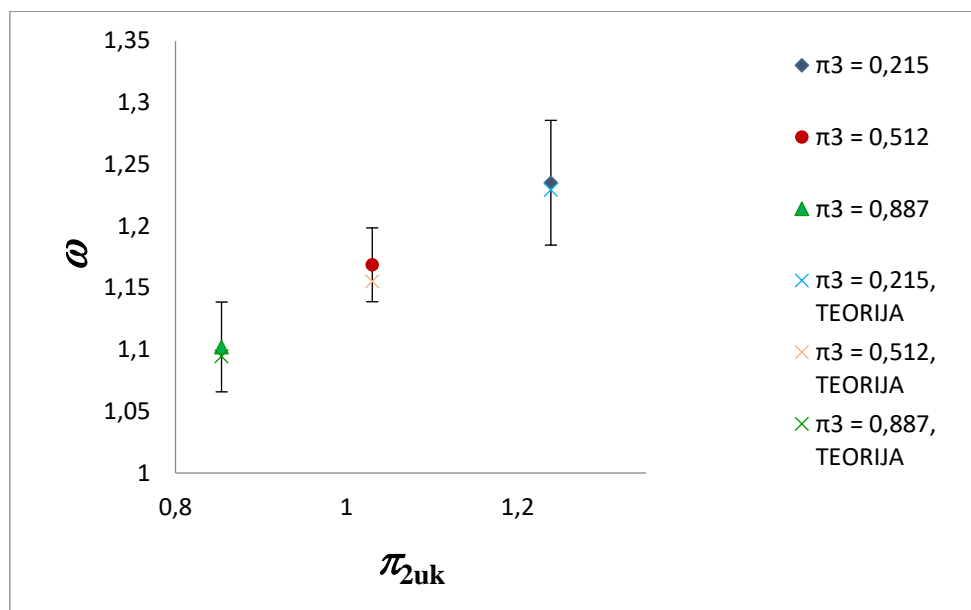


mjerenja temperature. Razlog tome je vrlo mala vrijednost koeficijenta osjetljivosti u jednadžbama (150) i (154).

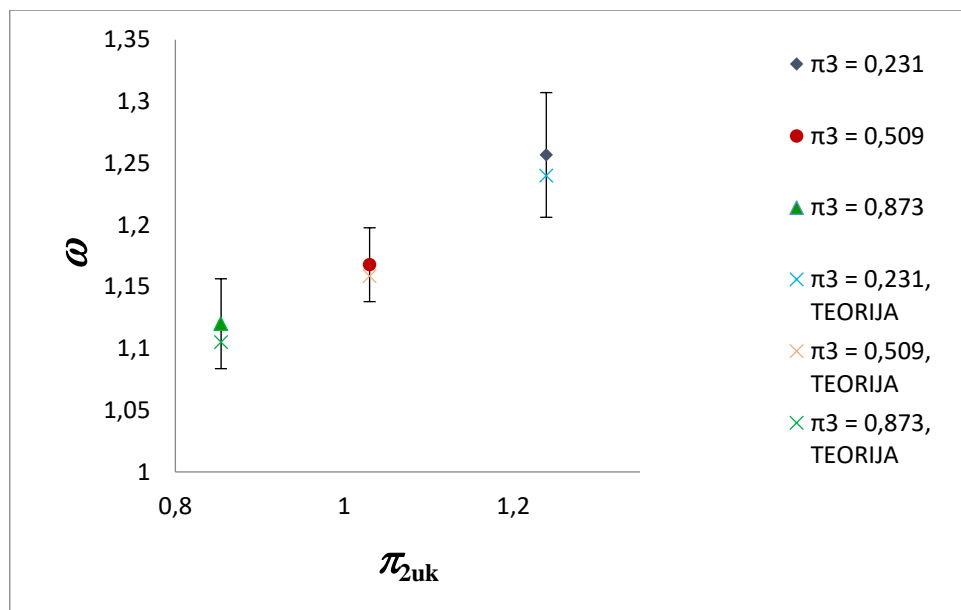
Rezultati mjerne nesigurnosti (Tablica 12 i 13) pokazuju da se ne može primijetiti veza između vrijednosti  $\pi_3$  značajke i mjerne nesigurnosti.

Da bi, općenito, mjerne nesigurnosti omjera  $\omega$  bile manje potrebno je, kako je već navedeno, vrijeme mjerenja protoka što više povećati.

#### 4.4. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata



Slika 120. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj  $\mathcal{G}'_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$



Slika 121. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj  $g_2' = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Slike 120 i 121 prikazuju usporedbu rezultata matematičkog modela i eksperimentalnih rezultata kojima su pridodane proširene mjerne nesigurnosti ( $k = 2$ ). Opaža se dobro poklapanje teorijskih rezultata s eksperimentalnim vrijednostima u granicama proširenih mjernih nesigurnosti za sve prikazane mjerne točke. Vidljivo je iz prikazanog da rezultati eksperimenta za najmanju i najveću vrijednost  $\pi_3$  pokazuju bolje poklapanje s teorijskim vrijednostima za slučaj  $g_2' = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Moguće objašnjenje toga leži u samoj provedbi eksperimenta. Duža stabilnost temperature za vrijeme mjerenja bila je ostvarena pri nižim temperaturama u cijelom sustavu, tj. manjim temperaturnim razlikama između tople i hladne struje u zadanom umreženom i neumreženom rekuperatoru.

#### 4.5. Eksperimentalna analiza proširenog matematičkog modela za $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$

Matematički model verificiran u prethodnim poglavljima u sebi je sadržavao ograničenje koje se odnosilo na jednakost toplinskih kapaciteta slabijih priključnih struja A i B za slučaj umreženog izmjenjivača topline. U praktičnoj primjeni to ne mora biti slučaj te dodatne struje iz mreže izmjenjivača mogu imati različiti toplinski kapacitet odnosno različiti protok, što ima za posljedicu, na bezdimenzijskoj razini, različite vrijednosti  $\pi_3$  značajke.

Prošireni matematički model prikazan je u 2.1.6, a izvedeni izraz za bezdimenzijski toplinski tok dan je jednadžbom (73).

$$\frac{\Phi}{C_2(T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_{3A} \pi_{1A} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B} \quad (73)$$

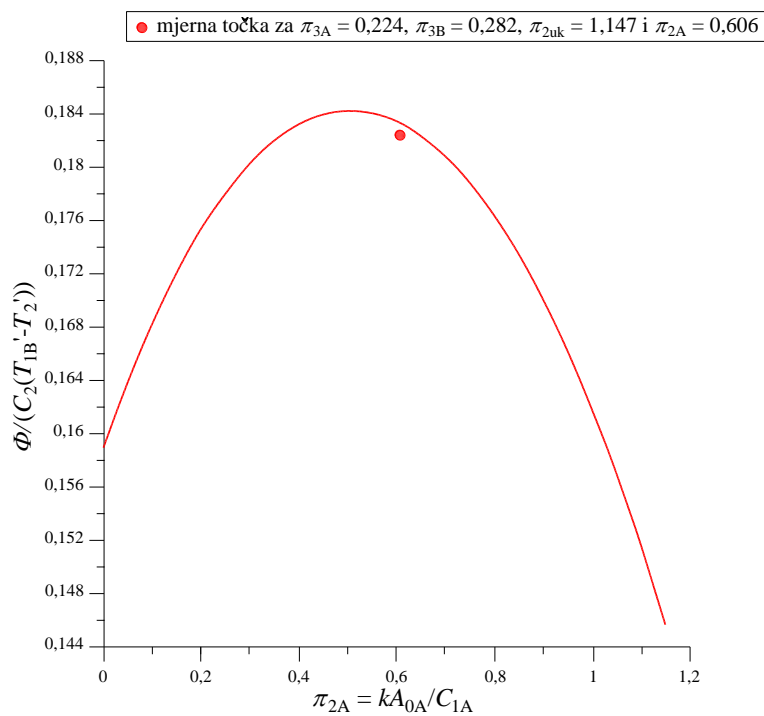
Eksperimentalno istraživanje s ciljem potvrde izvedenog proširenog matematičkog modela je obavljeno na mjernoj liniji koja je opisana u prethodnim poglavljima. Odabrane su tri mjerne točke koje su ostvarene različitim omjerima volumenskih protoka tople vode koja struji kroz spiralne cijevi te volumenskih protoka priključnih struja vode iz vodovoda. Bitno je istaknuti da su u ovom slučaju volumenski protoci slabijih struja međusobno različiti. Također, vrijednost bezdimenzijske značajke  $M$ , prema jednadžbi (7), iznosi 1 jer su ulazne temperature obje slabije struje bile jednake.

Rezultati mjerenja, koji uključuju i relevantne bezdimenzijske značajke, prikazani su za tri odabrane radne točke umreženog rekuperatora Tablicom 14.

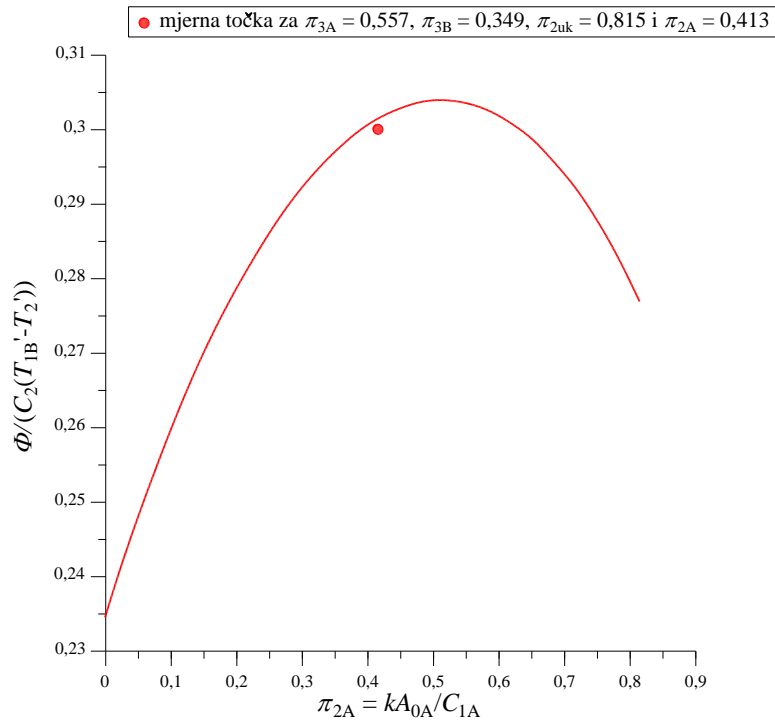
Tablica 14. Mjereni podaci za prošireni matematički model  $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$

CIJEVI, rekuperator A							
	$\vartheta_1,$ °C	$\vartheta_2,$ °C	$c_w,$ kJ/(kgK)	$\rho_w,$ kg/m <sup>3</sup>	$q_{v,cijevA},$ l/h	$\Phi_{cijev,A},$ kW	
1.	61,05	56,10	4,190	987,3	3095,78	17,63	
2.	61,34	52,55	4,191	989,85	1672,8	16,95	
3.	61,51	49,34	4,191	992,28	1020,0	14,333	
CIJEVI, rekuperator B							
	$\vartheta_6,$ °C	$\vartheta_5,$ °C	$c_w,$ kJ/(kgK)	$\rho_w,$ kg/m <sup>3</sup>	$q_{v,cijevB},$ l/h	$\Phi_{cijev,B},$ kW	$\Phi_{cijev,A}$ + $\Phi_{cijev,B},$ kW
1.	55,93	51,58	4,191	987,3	3095,78	15,461	33,09
2.	52,43	45,92	4,193	989,8	1672,8	12,55	29,5
3.	49,22	38,89	4,194	992,2	1020,0	11,00	25,34
PLAŠT, rekuperator A							
	$\vartheta_3,$ °C	$\vartheta_4,$ °C	$c_w,$ kJ/(kgK)	$\rho_w,$ kg/m <sup>3</sup>	$q_{v,plaštA},$ l/h	$\Phi_{plašt,A},$ kW	
1.	10,49	32,43	4,204	999,8	684,0	17,52	
2.	10,82	26,49	4,206	999,7	919,8	16,83	
3.	10,79	28,69	4,205	999,7	679,8	14,21	

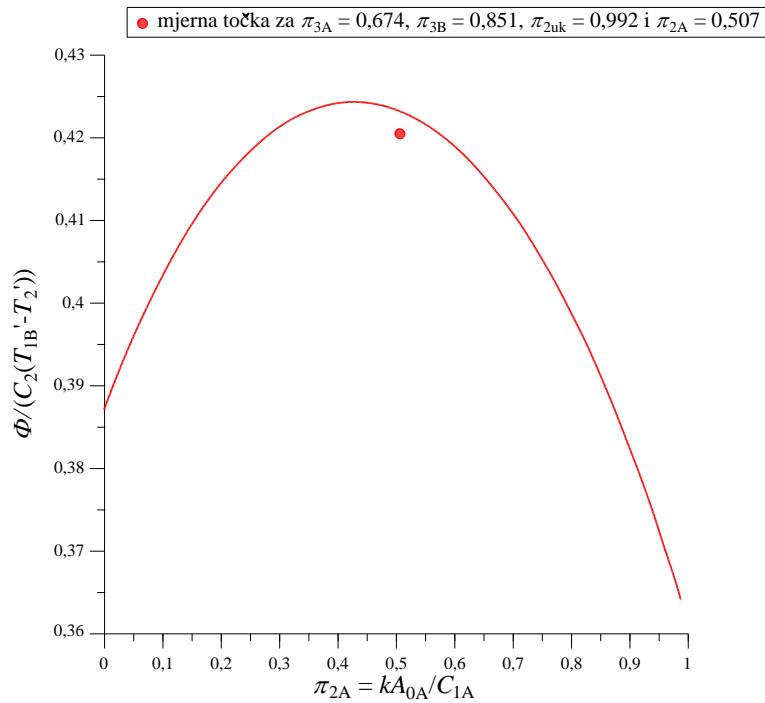
PLAŠT, rekuperator B								
	$\vartheta_7$ , °C	$\vartheta_8$ , °C	$c_w$ , kJ/(kgK)	$\rho_w$ , kg/m <sup>3</sup>	$q_{v,plasztB}$ , l/h	$\Phi_{plaszt,B}$ , kW	$\Phi_{plaszt,A}$ + $\Phi_{plaszt,B}$ , kW	$\Phi_{gub,2}$ , kW
1.	10,49	25,71	4,206	999,9	859,8	15,28	32,8	0,29
2.	10,84	29,26	4,205	999,8	576,0	12,39	29,22	0,28
3.	10,78	21,66	4,207	999,8	858,0	10,9	25,11	0,22
	$\pi_{3A}$ , -	$\pi_{3B}$ , -	$k_u$ , W/(m <sup>2</sup> K)	$\pi_{2uk}$ , -	$\pi_{2A}$ , -	$\pi_{1A}$ , -	$\pi_{1B}$ , -	$\frac{\Phi_{plaszt}}{C_2(T_1 - T_7)}$
1.	0,224	0,282	1686,65	1,147	0,606	0,436	0,335	0,1824
2.	0,557	0,349	1612,34	0,815	0,413	0,312	0,443	0,3002
3.	0,674	0,851	1450,04	0,992	0,507	0,355	0,283	0,4202



Slika 122. Usporedba teorijskog i mjenenog bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\pi_{3A} = 0,224$ ,  $\pi_{3B} = 0,282$ ,  $\pi_{2uk} = 1,147$ ,  $\pi_{2A} = 0,606$  i  $M = 1,0$



Slika 123. Usporedba teorijskog i mjenog bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\pi_{3A} = 0,557$ ,  $\pi_{3B} = 0,349$ ,  $\pi_{2uk} = 0,815$ ,  $\pi_{2A} = 0,413$  i  $M = 1,0$



Slika 124. Usporedba teorijskog i mjenog bezdimenzijskog toplinskog toka za  $\pi_{3A} = 0,674$ ,  $\pi_{3B} = 0,851$ ,  $\pi_{2uk} = 0,992$ ,  $\pi_{2A} = 0,507$  i  $M = 1,0$

Dijagrami na slikama 122, 123 i 124 prikazuju usporedbu teorijskog i mjenog bezdimenzijskog toplinskog toka za zadane vrijednosti bezdimenzijskih veličina  $\pi_{3A}$ ,  $\pi_{3B}$ ,  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{2A}$  i  $M$ , koje se mogu očitati iz Tablice 14. Koordinate maksimalnih vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka za sva tri teorijska slučaja su (0,51; 0,1842), (0,51; 0,3041) i (0,43; 0,424), dok su koordinate mjernih točaka dane u Tablici 14 i iznose (0,606; 0,1824), (0,413; 0,3002) i (0,507; 0,4202). Vidljivo je da režim rada umreženog rekuperatora za prikazane mjerne točke nije omogućavao postizanje maksimalnog toplinskog toka za zadane ulazne veličine, što je posljedica ograničenja mjerne linije. Mjerne točke pokazuju određeno odstupanje vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka od teorijskih vrijednosti, a za procjenu odstupanja mjerenih rezultata u nastavku se provodi izračun sastavljene standardne mjerne nesigurnosti.

Za svako provedeno mjerenje izračunata je sastavljena standardna mjerna nesigurnost kako je prikazano u nastavku. Tražena mjerena veličina je bezdimenzijski toplinski tok koji se računa prema sljedećoj jednadžbi

$$\Phi_{\text{BEZD}} = \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{C_2(\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)} = \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{q_{v,\text{cijev}} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)} \quad (165)$$

Sastavljena standardna nesigurnost se za ovaj slučaj računa prema sljedećoj jednadžbi

$$u_c(\Phi_{\text{BEZD}}) = \sqrt{\left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \Phi_{\text{pláš}}} u_c(\Phi_{\text{pláš}}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial q_{v,\text{cijev}}} u_c(q_{v,\text{cijev}}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial c_w} u_c(c_w) \right]^2} \\ + \sqrt{\left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \rho_w} u_c(\rho_w) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \mathcal{G}_1} u(\mathcal{G}_1) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \mathcal{G}_7} u(\mathcal{G}_7) \right]^2} \quad (166)$$

U kojoj su koeficijenti osjetljivosti definirani kako slijedi

$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \Phi_{\text{pláš}}} = \frac{1}{q_{v,\text{cijev}} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)} \quad (167)$$

$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial q_{v,\text{cijev}}} = - \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{c_w \cdot \rho_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7) \cdot q_{v,\text{cijev}}^2} \quad (168)$$

$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial c_w} = - \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{q_{v,\text{cijev}} \cdot \rho_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7) \cdot c_w^2} \quad (169)$$

$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \rho_w} = - \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{q_{v,\text{cijev}} \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7) \cdot \rho_w^2} \quad (170)$$

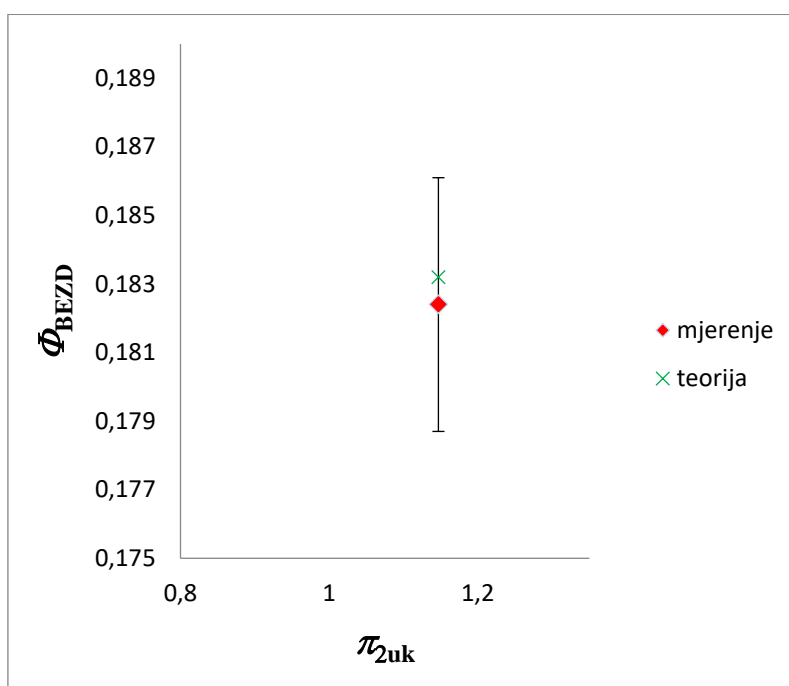
$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \mathcal{G}_1} = - \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{q_{v,\text{cijev}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)^2} \quad (171)$$

$$\frac{\partial \Phi_{\text{BEZD}}}{\partial \mathcal{G}_7} = \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{q_{v,\text{cijev}} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)^2} \quad (172)$$

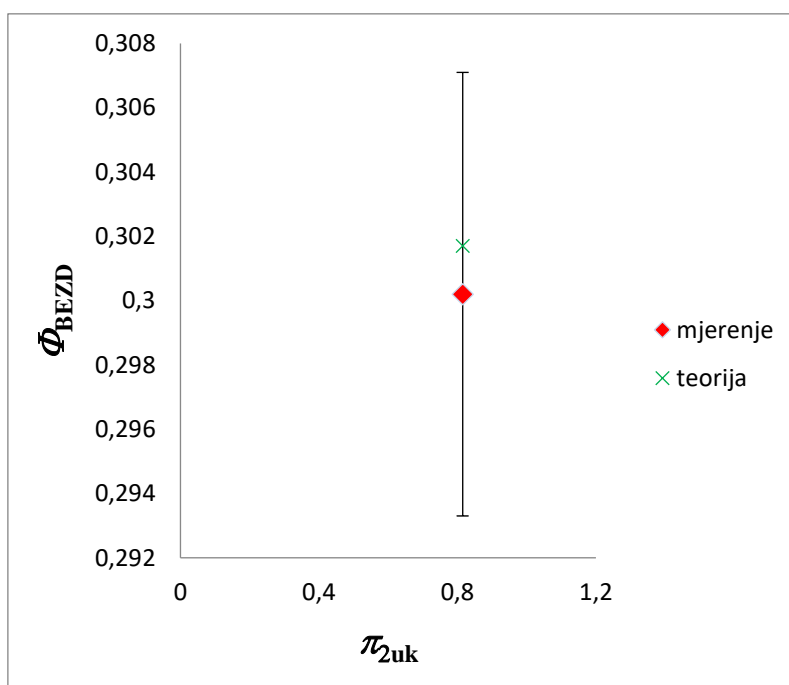
Postupak određivanja standardnih i sastavljenih mjernih nesigurnosti pojedinih članova u jednadžbi (166) prikazan je u **4.3** stoga se u nastavku tablično (Tablica 15) prikazuje određena proširena mjerna nesigurnost bezdimenzijskog toplinskog toka ( $\Phi_{\text{BEZD}}$ ) s rezultatima eksperimentalnog i teorijskog istraživanja.

Tablica 15. Proširene mjerne nesigurnosti bezdimenzijskog toplinskog toka  $\Phi_{\text{BEZD}}$

	$\pi_{3A}$ , -	$\pi_{3B}$ , -	$\Phi_{\text{BEZD}} = \frac{\Phi_{\text{pláš}}}{C_2 (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7)}$	$U(\Phi_{\text{BEZD}})$ , -	$M \pi_{3A} \pi_{1A} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B}$ -
1.	0,224	0,282	0,1824	0,0037	0,1832
2.	0,557	0,349	0,3002	0,0069	0,3017
3.	0,674	0,851	0,4202	0,0115	0,4226

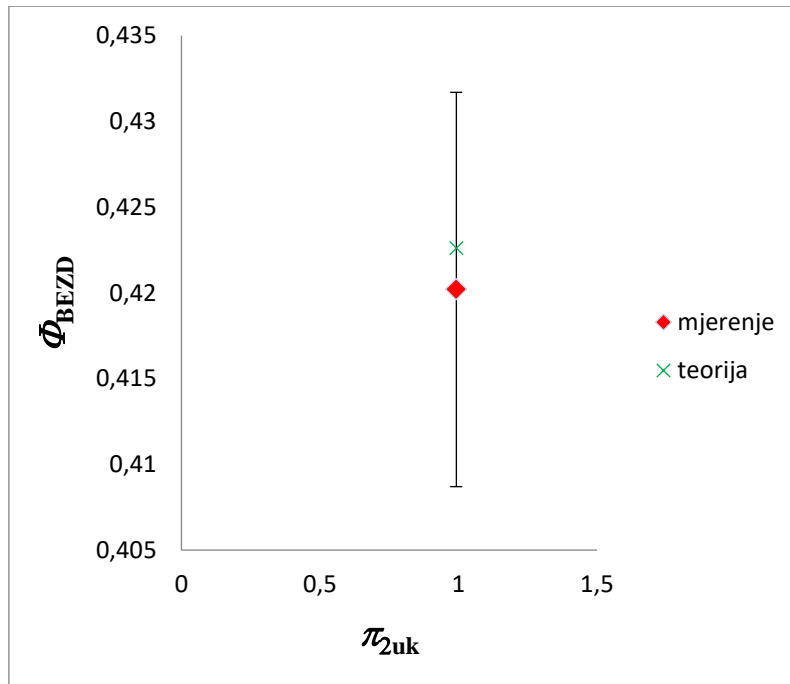


Slika 125. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj  $\pi_{3A} = 0,224$  i  $\pi_{3B} = 0,282$



Slika 126. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj  $\pi_{3A} = 0,557$  i  $\pi_{3B} = 0,349$





Slika 127. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za slučaj  $\pi_{3A} = 0,674$  i  
 $\pi_{3B} = 0,851$

Slike 125, 126 i 127 prikazuju usporedbu rezultata proširenog matematičkog modela i eksperimentalnih rezultata kojima su pridodane proširene mjerne nesigurnosti ( $k = 2$ ). Opaža se dobro poklapanje teorijskih rezultata s eksperimentalnim vrijednostima u granicama proširenih mjernih nesigurnosti za sve prikazane mjerne točke.

Režim rada umreženog rekuperatora za sve tri navedene mjerne točke nije omogućavao postizanje maksimalnog toplinskog toka, no razvijenim računalnim programom se vrlo lako određuje, za kombinacije zadanih ulaznih vrijednosti, pri kojim uvjetima se maksimum toplinskog toka ostvaruje.

## 5. SAŽETA DISKUSIJA PROVEDENE ANALIZE I ZAKLJUČAK

Kao što je vidljivo iz teorijske analize, **Poglavlja 1. – 3.**, eksplicitno je dokazana hipoteza postojanja kako maksimalno prenesenog toka tako i maksimalno generirane entropije u radu umreženog protusmjernog rekuperatora. Provedena analiza je načelno obuhvatila dva slučaja, od kojih se prvi, a dominantno najistraženiji, odnosi na slučaj u kojem oba umrežena rekuperatora imaju međusobno jednaku bezdimenzijsku značajku  $\pi_3$ , dok se drugi slučaj, za koji je istražen samo toplinski tok, odnosi na međusobno različite  $\pi_3$  značajke.

Za slučaj istih bezdimenzijskih značajki  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$  izvedena je općenita jednadžba, jednadžba (13), bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora koja pokazuje da je bezdimenzijski toplinski tok funkcija četiri bezdimenzijskih varijabli:  $M$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{2A}$  i  $\pi_{2uk}$ . Sve su dotične varijable prethodno definirane jednadžbama (7) – (12).

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_{2A})} \left( 1 - \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \right) + \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)(\pi_{2uk} - \pi_{2A}))} \quad (13)$$

Izravan način iznalaženja ekstrema, lokalnog maksimuma, bezdimenzijskog toplinskog toka u radu je prikazan za dva specijalna slučaja i to za vrijednost značajke  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_3 = 1,0$ . Slučaj  $\pi_3 = 0,0$  fizikalno se odnosi na situaciju kada jača struja, struja 2, koja prolazi kroz oba rekuperatora A i B, mijenja svoje agregatno stanje, tj. ili isparava ili kondenzira. Rješenje tog slučaja izravno proizlazi iz jednadžbe (13) ako se u nju uvrsti  $\pi_3 = 0$ , ili kako je pokazano u disertaciji, do iste se jednadžbe došlo integracijom lokalnog toplinskog toka. Za taj je slučaj dobivena jednadžba (37) koja pokazuje kolika mora biti površina rekuperatora  $A_{0Aopt}$ , a ostatak površine tada predstavlja  $A_{0B} = A_{0uk} - A_{0Aopt}$ , da bi se u takvom umreženom rekuperatoru postigao maksimalni toplinski tok. Također je eksplicitno izvedena i jednadžba (38) koja pokazuje i relevantne varijable koje određuju iznos tog maksimalnog toplinskog toka.

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M + 1 - 2\sqrt{M} \exp\left(-\frac{\pi_{2uk}}{2}\right) \quad (38)$$

Za  $\pi_3 = 1,0$ , tj. za slučaj tzv. izbalansiranog umreženog rekuperatora iz jednadžbe (13), ili izravnom integracijom lokalnog toplinskog toka, izvedena je jednadžba (43), za koju je također pokazano da postoji ekstrem (maksimum) za  $\pi_{2Aopt}$  koji je određen jednadžbom (46).

$$\frac{\Phi}{C_1(T'_{1B} - T'_2)} = M \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \left(1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1}\right) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \quad (43)$$

Jednadžbom (49) naznačeno je koje veličine eksplicitno utječu na iznos tog maksimuma kod umreženog izbalansiranog rekuperatora.

U jednadžbi (34) pokazano je da za  $M = 1$  vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  jednaka je  $\pi_{2uk}/2$ , neovisno o vrijednosti  $\pi_3$  značajke. Pozicija  $\pi_{2Aopt}$  se u tom slučaju nalazi na polovici vrijednosti  $\pi_{2uk}$ , odnosno s pozicije izmjenjivačkih površina, površina umreženog rekuperatora  $A_{0A}$  mora biti jednaka površini umreženog rekuperatora  $A_{0B}$ .

Za ostale vrijednosti značajke  $0,1 < \pi_3 < 0,9$ , s korakom 0,1, izrazi za  $\pi_{2Aopt}$  za koje se javljaju maksimalne vrijednosti bezdimenzijskog toplinskog toka umreženog rekuperatora i rezultate tog postupka prikazuju jednadžbe (52) do (61).

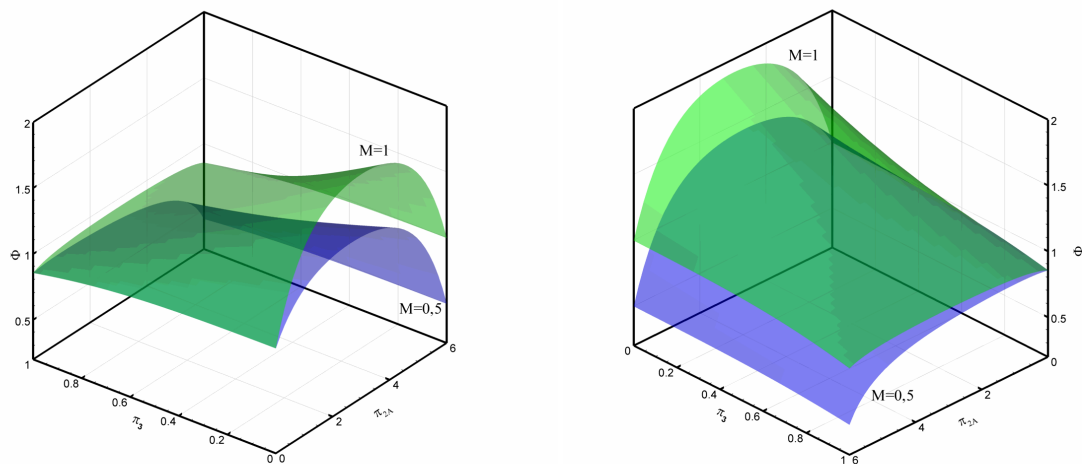
Dakle, jednadžbama (37), (46) i (52) – (61) dokazana je hipoteza rada da se lokalni maksimum bezdimenzijskog toplinskog toka jednog umreženog protusmjernog rekuperatora postiže samo za vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  koje ovise o veličinama  $M$  i  $\pi_{2uk}$ .

Vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  će biti unutar intervala  $0 \leq \pi_{2Aopt} \leq \pi_{2uk}$  za sve vrijednosti  $0 \leq \pi_3 \leq 1,0$ , ako iznos veličine  $M$  udovoljava kriteriju naznačenom izrazom u jednadžbi (67).

$$\frac{1}{\pi_{2uk} + 1} < M < \left(1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1}\right) \quad (67)$$

Prostorni dijagram na slici 128 daje prikaz bezdimenzijskog toplinskog toka u ovisnosti o veličini  $\pi_{2A}$  koja je varirana unutar intervala  $[0,6]$  i o veličini  $\pi_3$  koja je varirana između 0 i 1,0. Pokazuje se da odabrane vrijednosti veličine  $M$  (0,5 i 1,0) ispunjavaju kriterij u jednadžbi

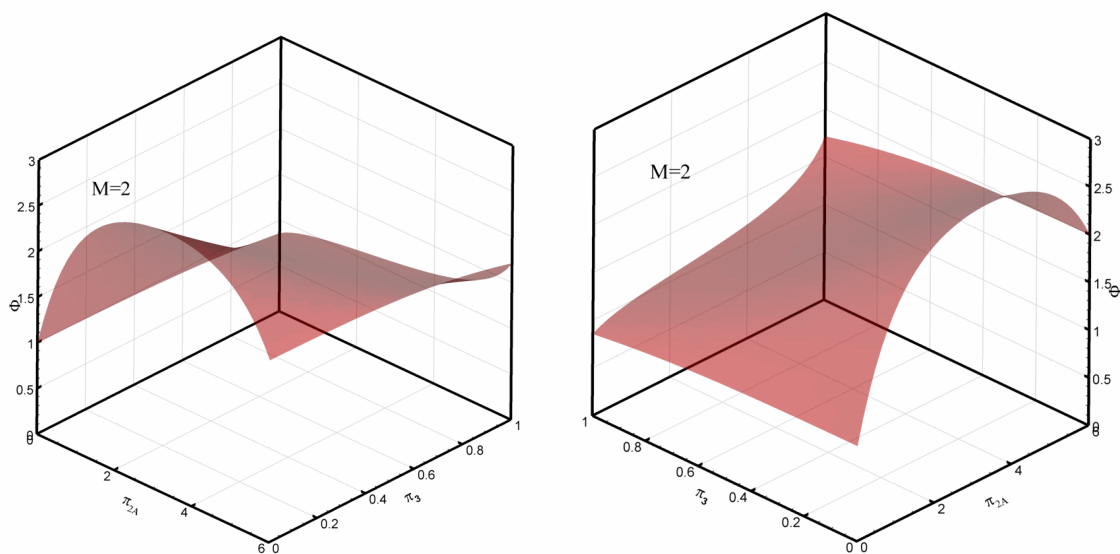
(67), što znači da se za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke pojavljuje lokalni maksimum toplinskog toka. Parametarske krivulje za odabrane iznose veličine  $M$  prikazane su na slikama 11 i 12.



Slika 128. Prostorni prikaz slučaja prikazanih na slikama 11 i 12

Ako se vrijednost veličine  $M$  nalazi unutar intervala danog izrazom u jednadžbi (69) tada se maksimalni toplinski tok javlja samo unutar određenog intervala veličine  $\pi_3$ , kao što je to prikazano dijagramski na slici 14 i 15.

$$\exp(-\pi_{2uk}) \leq M \leq \frac{1}{\pi_{2uk} + 1} \cup \left( 1 + \frac{\pi_{2uk}}{\pi_{2uk}^2 + \pi_{2uk} + 1} \right) \leq M \leq \exp(\pi_{2uk}) \quad (69)$$



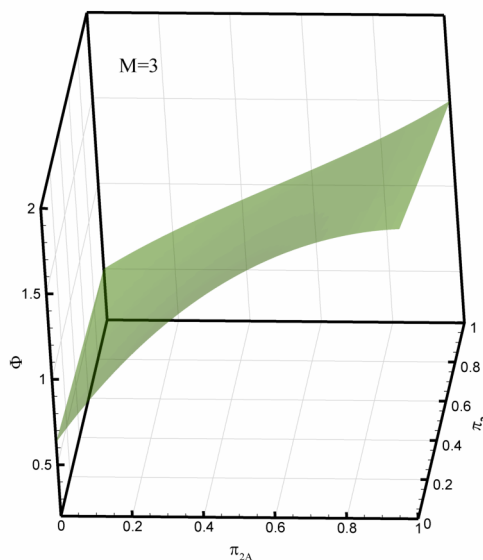
Slika 129. Prostorni prikaz slučaja prikazanog na slici 15

Prostorni dijagram za slučaj  $M = 2,0$  prikazan je slikom 129. Veličina  $\pi_{2A}$  je varirana unutar intervala  $[0,6]$ , a  $\pi_3$  između 0 i 1,0. Iz dijagrama je vidljivo da se lokalni maksimumi toplinskog toka ostvaruju pri nižim vrijednostima  $\pi_3$  značajke, dok se s povećanjem vrijednosti  $\pi_3$  značajke maksimum toplinskog toka postiže na  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ , što znači da bi se za zadane vrijednosti maksimum toplinskog toka ostvarivao u neumreženom rekuperatoru A. Iz dijagrama na slici 15. vidljivo je da je granična vrijednosti  $\pi_3$  značajke jednaka 0,5.

Poprimi li veličina  $M$  vrijednost područja danog izrazima u jednadžbama (50) i (51) tada ne postoji  $\pi_{2Aopt}$  unutar intervala  $0 \leq \pi_{2Aopt} \leq \pi_{2uk}$  i  $0 \leq \pi_3 \leq 1,0$  za koji se javlja iznos maksimalnog toplinskog toka kao lokalnog ekstrema.

$$0 < M < \exp(-\pi_{2uk}) \quad (50)$$

$$M > \exp(\pi_{2uk}) \quad (51)$$



Slika 130. Prostorni prikaz slučaja prikazanog na slici 38

Dijagram za slučaj  $M = 3,0$  na slici 130 prostorni je prikaz slučaja prikazanog na slici 38. Veličine  $\pi_{2A}$  i  $\pi_3$  su varirane između 0 i 1,0. Vidljivo je iz dijagramskog prikaza da se maksimalni toplinski tok kao lokalni ekstrem ne pojavljuje ni za jednu vrijednost  $\pi_3$  značajke što je u skladu s kriterijima u jednadžbama (50) i (51).

Kako je prethodno pokazano da je uz zadovoljavanje navedenih kriterijskih uvjeta moguće ostvariti maksimalni toplinski tok i po iznosu i kao lokalni ekstrem, jednadžbama (70) i (71) definiran je omjer tog maksimalnog toplinskog toka umreženog rekuperatora i

toplinskog toka neumreženog pojedinačnog rekuperatora A i B. Ti su rezultati također prikazani dijagramski, **Pog. 3**, u zavisnosti o  $\pi_{2uk}$ ,  $M$  i  $\pi_3$ . Iz tih dijagramskih prikaza mogu se izravno iščitati vrijednosti dotičnih omjera pa za zadani  $\pi_{2uk}$  može se izravno zaključiti pod kojim radnim parametrima umreženih rekuperatora  $\pi_3$  i  $M$  se postižu najveće vrijednosti tih omjera. No, već i u prethodno prikazanim dijagramima u **Pog. 3**, poput dijagrama na slikama 11 – 14 odnosno 16 – 20, mogu se također registrirati ti omjeri budući da se u njima iščitava maksimalni toplinski tok umreženog rekuperatora i toplinski tokovi neumreženih rekuperatora  $\Phi_B$  i  $\Phi_A$ , koji označavaju vrijednosti na krajevima intervala dotičnih dijagrama  $\pi_{2A} = 0$  i  $\pi_{2A} = \pi_{2uk}$ .

Prethodno opisana zaključna analiza odnosila se na slučaj da je  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$ , tj. u slučaju umreženog rekuperatora radilo se o istim toplinskim kapacitetima slabije struje A i slabije struje B. Međutim, to u praktičnoj primjeni ne mora uvijek biti tako te se mogu pojaviti i slučajevi kod kojih toplinski kapaciteti slabijih struja A i B nisu isti. Razvoj algoritma za bezdimenzijski toplinski tok umreženog rekuperatora kada je  $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$  je složeniji u odnosu na prethodni slučaj, budući se u ovom slučaju u model uvodi dodatna varijabla. Ovaj slučaj je razrađen u poglavlju **2.1.6** s konačnom jednadžbom (73) zajedno s pridruženim joj jednadžbama (74) i (75c).

$$\frac{\Phi}{C_2(T'_{1B} - T'_2)} = M \pi_{3A} \pi_{1A} (1 - \pi_{3B} \pi_{1B}) + \pi_{3B} \pi_{1B} \quad (73)$$

Pokazano je da za  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$  jednadžba (73) prelazi u jednadžbu (6). Eksplicitno iznalaženje ekstrema jednadžbe (73) je komplicirano pa se i ne provodi, nego se eventualni ekstrem iznalazi iz računalnog programa. Dijagrami na slikama 40 – 45 prikazuju rezultate proračuna nekih odabranih slučajeva. Iz dijagrama na slikama 40 – 43 je vidljivo da se, za naznačene slučajeve, pojavljuju maksimumi kao lokalni ekstremi umreženog rekuperatora i prikazane su koordinate tih ekstrema. Dijagrami na slikama 44 – 45 pokazuju slučajeve kada se lokalni maksimumi ne pojavljuju.

Jasno je da za ove slučajeve  $\pi_{3A} \neq \pi_{3B}$  ne vrijede kriteriji dani jednadžbama (67) i (69) odnosno jednadžbama (50) i (51). Iznalaženje kriterija za ovaj prošireni slučaj se ne provodi, ali se može izravno za to koristiti razvijeni računalni program pomoću kojeg se može, za odabrane uvjete, ispitati postojanje ili nepostojanje maksimalnog toplinskog toka kao lokalnog ekstrema kod umreženog rekuperatora.

U okviru poglavlja **2.2** razvijen je matematički bezdimenzijski model generirane entropije umreženog rekuperatora za slučaj da je  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$ . Model obuhvaća generiranu entropiju samo kao posljedicu jednosmjernog prijenosa topline između toplinskih struja različitih temperatura. U potpunosti je izveden analitički model koji se bazira na integraciji generiranih entropija po lokalnim izmjenjivačkim površinama, kao što to pokazuje polazna jednadžba (78) odnosno jednadžba (79). U tom je poglavlju pokazan i način postupnog rješavanja integrala te je konačno rješenje prikazano jednadžbom (85).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1} = \frac{1}{\pi_3} \ln & \left[ 1 + \pi_3 \pi_{1A} (\pi_{TA} - 1) + \pi_3 \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M} - \pi_3 \pi_{1A} (\pi_{TA} - 1) \right) \right] \\ & + \ln \left( 1 - \pi_{1A} \frac{(\pi_{TA} - 1)}{\pi_{TA}} \right) + \ln \left[ 1 - \pi_{1B} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} - \pi_3 \pi_{1A} \frac{M (\pi_{TA} - 1)}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (85)$$

Iz tog se rješenja vidi da je bezdimenzijska generirana entropija zavisna o sljedećim nezavisnim varijablama:  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{2A}$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Ako se ovo rješenje usporedi s jednadžbom (13) vidljivo je da se jednadžba (85) sastoji od jedne varijable više, a to je u ovom slučaju varijabla  $\pi_{TA}$ . Za prikaz tijeka jednadžbe (85) preostaje jedino numerički način, s time da se za parametarske vrijednosti uzimaju veličine  $\pi_3$ ,  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Za daljnju su analizu glede veličine  $\pi_3$  uzete vrijednosti 0,0; 0,50 i 1,0.

Za  $\pi_3 = 0,0$ , poglavlje **2.2.1.1**, tj. za slučaj kada jača struja 2 prolazi kroz faznu promjenu, prvi pribrojnik desne strane jednadžbe (85) poprima oblik dan jednadžbom (91) koristeći pri tome i jednadžbe (89) i (90). U **2.2.1.1** je pokazan i izravan način izvoda jednadžbe (85), na način da se u jednadžbu (78) uvrstilo konstantnu temperaturu zasićenja  $T_2 = T_2'$ . Ekstrem jednadžbe (91) određen je jednadžbom (94) koja pokazuje da je vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  po kriteriju maksimalne generirane entropije identična vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  dobivenoj po kriteriju maksimalnog toplinskog toka. Jednadžba (95) daje maksimalne vrijednosti generirane entropije umreženog rekuperatora kao funkcija  $\pi_{2uk}$ ,  $\pi_{TA}$  i  $M$ .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1} (\pi_3 = 0) = \ln & \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \frac{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2) - 1}{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2)} \right] + (\pi_{TA} - 1) \frac{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2) - 1}{\sqrt{M} \exp(\pi_{2uk} / 2)} \\ & + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} \frac{\exp(\pi_{2uk} / 2) - \sqrt{M}}{\exp(\pi_{2uk} / 2)} \right] + \frac{\pi_{TA} - 1}{M} \frac{\exp(\pi_{2uk} / 2) - \sqrt{M}}{\exp(\pi_{2uk} / 2)} \end{aligned} \quad (95)$$

U poglavlju 2.2.1.2 jednadžbom (102) prikazan je bezdimenzijski izraz za generiranu entropiju za slučaj  $\pi_3 = 1,0$ .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{C_1}(\pi_3 = 1,0) = & \ln \left[ 1 + \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1}(\pi_{TA} - 1) + \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \left( \frac{M + \pi_{TA} - 1}{M} - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1}(\pi_{TA} - 1) - 1 \right) \right] \\ & + \ln \left( 1 - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \frac{\pi_{TA} - 1}{\pi_{TA}} \right) + \ln \left[ 1 - \frac{\pi_{2uk} - \pi_{2A}}{\pi_{2uk} - \pi_{2A} + 1} \left( \frac{\pi_{TA} - 1}{M + \pi_{TA} - 1} - \frac{\pi_{2A}}{\pi_{2A} + 1} \frac{M(\pi_{TA} - 1)}{M + \pi_{TA} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (102)$$

Rezultate proračuna generirane entropije za  $\pi_{2uk} = 6,0$ ;  $\pi_3 = 0,0$ ,  $\pi_{TA} = 0,25 - 2,0$  uz  $\Delta\pi_{TA} = 0,25$  i  $M = 0,50 - 2,0$  uz  $\Delta M = 0,50$  prikazuju dijagrami na slikama 47 – 50. Dijagrami pokazuju da se u svim navedenim slučajevima javlja maksimalna entropija kao lokalni ekstrem, na čiji iznos imaju signifikantan utjecaj kako veličina  $M$  tako i veličina  $\pi_{TA}$ . Kvantitativne utjecaje dotičnih veličina može se iščitati iz naznačenih dijagramskih prikaza. Ono što je također zanimljivo uočiti jest činjenica da je generirana entropija u odnosu na vrijednost dana jednadžbom (95) dobrim dijelom konstantna i vrlo malo zavisna o  $\pi_{2A}$ , sve dok se  $\pi_{2A}$  ne približi vrijednosti 0,0 odnosno vrijednosti  $\pi_{2uk}$ . Dijagram na slici 51 prikazuje zavisnost  $\pi_{2Aopt}$  (lijeva ordinatna os) i bezdimenzijske maksimalne vrijednosti generirane entropije (desna ordinatna os) o  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Vidi se da vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  raste s porastom  $M$ , ali ne ovisi o  $\pi_{TA}$ , a što je u skladu s jednadžbom (94), dok vrijednost maksimalne generirane entropije, shodno jednadžbi (95), ovisi i o  $\pi_{TA}$  i o  $M$ . Nulta vrijednost entropije, koja je ujedno i lokalni minimum, postiže se za  $\pi_{TA} = 1,0$ . Lijevo i desno od te vrijednosti entropija raste, ali s porastom veličine  $M$  dolazi do smanjenja generirane entropije.

Dijagrami na slikama 52 – 59 prikazuju rezultate generirane entropije za  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ , u zavisnosti o  $\pi_{TA}$  i  $M$ . Vidi se da se i u ovim slučajevima postižu maksimumi entropije kao lokalni ekstremi, a koordinate tih ekstrema određene su jednadžbama (94) i (95). Za razliku od prethodnih dijagramskih prikaza danim slikama 47 – 50 vidi se da su u ovim slučajevima promjene entropije osjetljivije na promjenu vrijednosti  $\pi_{2A}$  u odnosu na  $\pi_{2Aopt}$ . Dijagram na slici 60 prikazuje skupni dijagram (52 – 59) glede zavisnosti maksimalnih entropija i pripadajućih  $\pi_{2Aopt}$ , iz kojeg se iščitava da maksimalne entropije za sve vrijednosti  $M$  postižu nultu vrijednost, minimum kao lokalni ekstrem, za  $\pi_{TA} = 1,0$  a vrijednosti im se smanjuju s porastom veličine  $M$ . Nadalje se vidi da s porastom veličine  $M$  razlika generiranih



entropija postaje sve manja. Usporedbom s rezultatima danim slikom 51 zaključuje se da se u potonjem slučaju dobivaju niže vrijednosti kako  $\pi_{2Aopt}$ , tako i vrijednosti maksimalne generirane entropije.

Poglavlje 3.4.3 odnosi se na generiranu entropiju za  $\pi_3 = 0,50$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$  pa tako dijagrami na slikama 61 – 64 prikazuju generiranu entropiju, računatu prema jednadžbi (85), u zavisnosti o  $0 \leq \pi_{2A} \leq 1,0$  i  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$ . Vidi se da se u svim navedenim slučajevima pojavljuju vrijednosti maksimalne generirane entropije kao lokalni ekstremi, a koordinate tih vrijednosti dane su uz svaki pripadajući dijagram. Dijagram na slici 65 pokazuje da se maksimalne vrijednosti generirane entropije smanjuju s porastom  $M$  i imaju minimum kao lokalni ekstrem za  $\pi_{TA} = 1,0$ . No, u ovom je slučaju važno uočiti da vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ovisi o veličini  $\pi_{TA}$  kao i o veličini  $M$  te vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  raste s porastom  $\pi_{TA}$  i s porastom  $M$ . Za veće vrijednosti varijable  $M$  manja je promjena vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  s promjenom  $\pi_{TA}$ .

U poglavlju 3.4.4 u okviru dijagramskih prikaza na slikama 66 – 73 prikazani su slučajevi generirane entropije za  $\pi_3 = 0,5$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ . Te su vrijednosti prikazane u zavisnosti o  $0 \leq \pi_{2A} \leq 1,0$ ;  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 2,0$  za  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$ . Ovi dijagramski prikazi pokazuju da se u svim slučajevima pojavljuju ekstremi kao maksimumi generirane entropije. Uz svaki dijagramski prikaz dane su i koordinate tih maksimuma i te su vrijednosti unesene u zajednički dijagram prikazan slikom 74. Dijagram pokazuje da sve maksimalne vrijednosti imaju nultu vrijednost, kao lokalni minimum, za  $\pi_{TA} = 1,0$  i da se smanjuju s povećanjem vrijednosti veličine  $M$ .

Poglavlje 3.4.5 prikazuje rezultate proračuna generirane entropije umreženog izbalansiranog rekuperatora uz,  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$ , u zavisnosti o  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk} = 6,0$ ;  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 2,0$  za  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$ . Rezultati izračuna prema jednadžbi (102) prikazuju dijagrami na slikama 75 – 79, iz kojih je vidljivo da za svaki promatrani slučaj postoji maksimum generirane entropije kao lokalni ekstrem, a koordinate tih maksimuma,  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , zbog nemogućnosti njihovih analitičkih iznalaženja, su iščitane iz programskog ispisa i uz svaki dijagramski prikaz su dane u tekstu. Iz dijagrama na slici 13 vidljivo je da se za  $\pi_3 = 1,0$ ,  $\pi_{2uk} = 6,0$ , i  $M = 1,1$  vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  za koju se dobiva maksimum toplinskog toka je jednaka 4,25, dok su iščitane vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  za koje su dobivene vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  za sve slučajeve manje ili jednake jedinici. Kada je  $M > 1$ , radna točka umreženog rekuperatora u režimu maksimalnog toplinskog toka dovoljno je daleko, a što jest i poželjno, od radne točke u režimu maksimalne entropije. Dijagram na

slici 80 prikazuje zajedničke rezultate vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  u zavisnosti o  $\pi_{TA}$  i  $M$ , prethodno prikazanih dijagramskih prikaza na slikama 75 – 79. I ovaj dijagram pokazuje da vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  imaju minimum kao lokalni ekstrem za  $\pi_{TA} = 1,0$  te da se te vrijednosti smanjuju s porastom veličine  $M$ . Također je iz tog dijagrama vidljivo da vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ovisi o varijabli  $\pi_{TA}$ , poglavito kod nižih vrijednosti veličine  $M$ . S porastom  $M$  iščezava utjecaj  $\pi_{TA}$  na iznos vrijednosti veličine  $\pi_{2Aopt}$ .

Konačno u poglavlju 3.4.6 u dijagramima na slikama 81 – 88, prikazana je generirana entropija u zavisnosti o  $0 \leq \pi_{2A} \leq \pi_{2uk}$ ,  $0,25 \leq \pi_{TA} \leq 2,0$  i  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ . I ovi dijagramski prikazi pokazuju da se u svim promatranim slučajevima pojavljuje maksimalna entropija kao lokalni ekstrem. Skupne rezultate vrijednosti parova  $\pi_{2Aopt}$ ,  $(\Delta S/C_1)_{maks}$ , prikazuje dijagram na slici 89, koji pokazuje da vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  postižu nultu vrijednost, tj. minimum kao lokalni ekstrem za  $\pi_{TA} = 1,0$  te da se vrijednosti  $(\Delta S/C_1)_{maks}$  smanjuju s povećanjem veličine  $M$ . Također, u ovom slučaju vrijednost  $\pi_{2Aopt}$  ne ovisi o veličini  $\pi_{TA}$ .

Kao treći usvojeni kriterij je omjer bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske generirane entropije označen simbolom  $R$ . Taj je omjer naznačen jednadžbama (107) – (109) u poglavlju 2.3, a rezultati i diskusija izračuna tog omjera dani su u poglavlju 3.5. I ta veličina  $R$  zavisi o već naznačenim varijablama:  $\pi_{2uk}$ ;  $\pi_{2A}$ ;  $\pi_3$ ;  $M$  i  $\pi_{TA}$ , te je i ova analiza provedena za slučaj  $\pi_{3A} = \pi_{3B} = \pi_3$ .

Za  $\pi_3 = 0,0$ ,  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $M = 0,50; 1,0; 1,50$  i  $2,0$  rezultati su prikazani na slikama 90 - 93. Lokalni maksimumi ovog omjera, koji se iščitavaju iz ispisa, pojavljuju se za  $\pi_{2Aopt} = 2,653; 3,0; 3,203$  i  $2,347$  te su dobiveni iz jednadžbe (37) odnosno jednadžbe (94). Naznačeni  $\pi_{2Aopt}$ , po kriteriju  $R$  umreženog rekuperatora, predstavlja prihvatljiv režim rada. Također se iz navedenih dijagrama mogu uočiti i lokalni minimumi, kao nepoželjni režimi rada, i oni se nalaze za  $\pi_{2A}$  bliskim vrijednostima  $0,0$  odnosno  $\pi_{2uk}$ . Rezultati prikazani na slikama 102 – 105 dobiveni su za  $\pi_3 = 0,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$  te pokazuju da se u naznačenim slučajevima pojavljuju lokalni ekstremi (minimumi ili maksimumi). No za sve prikazane slučajeve je uočljivo da postoji relativno široko područje varijable  $\pi_{2A}$  koje ima mali utjecaj na vrijednost veličine  $R$ .

Za  $\pi_3 = 0,5$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$  rezultate proračuna prikazuju dijagrami na slikama 94 – 97, i koje pokazuju da ovdje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se dobivaju  $R_{maks}$  ovise o omjeru  $\pi_{TA}$  i te su vrijednosti veće nego što se dobivaju vrijednosti za  $\pi_{2Aopt}$  prema jednadžbi (56) za izračun

maksimalnog toplinskog toka. Dijagrami na slikama 106 – 109 prikazuju rezultate proračuna veličine  $R$  za  $\pi_3 = 0,5$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$ . Iz tih se dijagramskih prikaza može zaključiti da postoje vrijednosti  $\pi_{2Aopt}$  za koje se javljaju nepoželjni minimumi veličine  $R$  kao lokalni ekstremi. Također je za zaključiti da za oba slučaja  $\pi_{2uk} = 6,0$  i  $2,0$  uz  $\pi_3 = 0,5$  veličina  $\pi_{2A}$  ima, u odnosu na prethodni slučaj  $\pi_3 = 0,0$ , izraženiji utjecaj na iznos  $R$  za svaku vrijednost  $\pi_{TA}$ .

Slučajeve  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 6,0$  prikazuju dijagrami na slikama 98 – 101. Zanimljivo je uočiti da samo dijagram na slici 98 pokazuje  $\pi_{2Aopt}$  za koji se javljaju  $R_{maks}$  kao lokalni ekstremi. Te su vrijednosti navedene uz sliku 98 i iznose 2,28; 3,18; 3,42; 3,58 i 3,70. Ostali dijagramski prikazi pokazuju da veličina  $R$  postiže neželjene minimalne vrijednosti koje leže relativno blizu  $\pi_{2A} = 0,0$ . Ako se uzme da je  $\pi_3 = 1,0$  i  $\pi_{2uk} = 2,0$  tada rezultate proračuna dijagramski prikazuju slike 110 – 113. Praktički sve krivulje pokazuju minimum kao lokalni ekstrem osim slučaja  $\pi_{TA} = 2,0$  koja na slici 110 pokazuje i lokalni maksimum.

Izvedeni matematički model za postizanje maksimalnog toplinskog toka umreženog izmjenjivača topline verificiran je eksperimentom provedenim u ovom radu. Cilj eksperimenta je bio prikazati omjer maksimalnog toplinskog toka umreženog i toplinskog toka neumreženog rekuperatora za šest odabranih mjernih točki različitih vrijednosti  $\pi_3$  značajke. Drugo eksperimentalno istraživanje se odnosilo na potvrdu matematičkog modela za slučaj da su toplinski kapaciteti slabijih struja međusobno različiti. Opaža se dobro poklapanje teorijskih rezultata s eksperimentalnim vrijednostima u granicama proširenih mjernih nesigurnosti za sve prikazane mjerne točke.

Iz izloženog se vidi da je u okviru disertacije potvrđena postavljena teza glede postojanja ili nepostojanja radnih parametara umreženog rekuperatora s ciljem postizanja željenog maksimalnog toplinskog toka, neželjene maksimalne entropije i maksimalnog omjera bezdimenzijskog toplinskog toka i bezdimenzijske entropije. Za zadane raspoložive podatke o protocima i temperaturama struja kao i ukupnoj izmjenjivačkoj površini umreženog rekuperatora, razvijenim računalnim programom moguće je vrlo brzo dati odgovor na postavljene zahtjeve odnosno postavljene kriterije.

## 5.1. Ostvareni znanstveni doprinos

Provedenim istraživanjima ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

- Razvijen je matematički model za izračun maksimalnog toplinskog toka i maksimalne generirane entropije za slučaj umreženog izmjenjivača topline.
- Definirani su kriteriji koji određuju pri kojim uvjetima se lokalni maksimum toplinskog toka postiže za sve vrijednosti  $\pi_3$  značajke, pri kojim uvjetima se pojavljuje za neke vrijednosti te iste značajke te kada se maksimum ne pojavljuje.
- Provedena je analiza omjera maksimalnog toplinskog toka i maksimalno generirane entropije značajna za odabir radnih točaka umreženog rekuperatora.
- Cjelokupna teorijska analiza provedena je u bezdimenzijskom obliku, čime rezultati analize dobivaju na svojoj široj univerzalnosti.
- Matematički model za ostvarenje maksimalnog toplinskog toka za međusobno jednake vrijednosti  $\pi_3$  značajki slabijih struja je eksperimentalno potvrđen.
- Matematički model za ostvarenje maksimalnog toplinskog toka za različite vrijednosti  $\pi_3$  značajki slabijih struja je također eksperimentalno potvrđen.

## 5.2. Mogući smjerovi nastavka istraživačkog rada

Poznavajući optimalno mjesto priključka dodatne struje iz mreže izmjenjivača topline na zadanoj ukupnoj izmjenjivačkoj površini dobiva se vrijednost bezdimenzijske značajke  $\pi_{2Aopt}$  iz koje se može izračunati koeficijent prolaza topline  $k$ . Kako u koeficijentu prolaza topline figuriraju koeficijenti prijelaza topline moguće je iz vrijednosti  $k$  odrediti vrijednost koeficijenta prijelaza topline za čiji izračun ne postoje odgovarajući modeli. U provedenom eksperimentalnom istraživanju se to odnosi na određivanje koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj površini spirale, što predstavlja potencijal za nastavak istraživanja.

Također, izazov predstavlja i proširenje, u disertaciji, izvedenog matematičkog modela, na dva priključna mjesta izmjenjivača iz mreže izmjenjivača topline. Ukupna izmjenjivačka površina bi pri tome sigurno bila jedna od signifikantnih varijabli.

Svršishodno bi bilo eksperimentalno ispitati i dosadašnji matematički model za različite veličine izmjenjivačkih površina te predloženi prošireni matematički model koji bi uključivao dva priključna mjesta na ukupnoj izmjenjivačkoj površini.

## LITERATURA

- [1] W. Roetzel, X. Luo, and D. Chen, *Design and operation of heat exchangers and their networks*. Elsevier, 2019.
- [2] J. J. Klemeš, *Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions*. 2013.
- [3] U. S. E. I. Administration, “International Energy Outlook 2019 with projections to 2050,” *Choice Reviews Online*, 2019.
- [4] M. Mistry and R. Misener, “Optimising heat exchanger network synthesis using convexity properties of the logarithmic mean temperature difference,” *Computers and Chemical Engineering*, 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.07.001.
- [5] Eurostat, *Energy, transport and environment statistics*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [6] Europska komisija, “Strategija EU-a za grijanje i hlađenje.” COM(2016) 51 final, Bruxelles, p. 14, 2016.
- [7] K. C. Furman and N. v. Sahinidis, “A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2002, doi: 10.1021/ie010389e.
- [8] F. Peng and G. Cui, “Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm,” *Applied Thermal Engineering*, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.031.
- [9] M. Escobar, J. O. Trierweiler, and I. E. Grossmann, “A heuristic Lagrangean approach for the synthesis of multiperiod heat exchanger networks,” *Applied Thermal Engineering*, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.064.
- [10] S. A. EL-Temtamy and E. M. Gabr, “Design of optimum flexible heat exchanger networks for multiperiod process,” *Egyptian Journal of Petroleum*, 2012, doi: 10.1016/j.ejpe.2012.11.007.
- [11] T. Gundersen and L. Naess, “The synthesis of cost optimal heat exchanger networks. An industrial review of the state of the art,” *Computers and Chemical Engineering*. 1988, doi: 10.1016/0098-1354(88)87002-9.

- [12] K. F. Lee, A. H. Masso, and D. F. Rudd, "Branch and Bound Synthesis of Integrated Process Designs," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 9, no. 1, pp. 48–58, Feb. 1970, doi: 10.1021/i160033a008.
- [13] H. ten Broeck, "Economic Selection of Exchanger Sizes," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 36, no. 1, pp. 64–67, Jan. 1944, doi: 10.1021/ie50409a013.
- [14] G. T. Westbrook, "Use this method to size each stage for best operation," *Hydrocarbon Process and Petroleum Refinement*, vol. 40, pp. 201–206, 1961.
- [15] L.-T. Fan and C.-S. Wang, *The discrete maximum principle: a study of multistage systems optimization*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1964.
- [16] J. E. Hendry, D. F. Rudd, and J. D. Seader, "Synthesis in the design of chemical processes," *AIChE Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 1–15, 1973, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690190103>.
- [17] C. S. Hwa, "Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming," in *AIChE-ICHEME Symposium Series*, 1965, vol. 4, pp. 101–106.
- [18] M. G. Kesler and R. O. Parker, "Optimal networks of heat exchangers," in *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 1969, vol. 65, no. 92, pp. 111–120.
- [19] C. J. King, D. W. Gantz, and F. J. Barnés, "Systematic Evolutionary Process Synthesis," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1972, doi: 10.1021/i260042a021.
- [20] R. N. S. Rathore, K. A. van Wormer, and G. J. Powers, "Synthesis strategies for multicomponent separation systems with energy integration," *AIChE Journal*, 1974, doi: 10.1002/aic.690200309.
- [21] S. Kobayashi, T. Umeda, and A. Ichikawa, "Synthesis of optimal heat exchange systems-an approach by the optimal assignment problem in linear programming," *Chemical Engineering Science*, 1971, doi: 10.1016/0009-2509(71)80057-X.
- [22] M. J. Box, "A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods," *The Computer Journal*, 1965, doi: 10.1093/comjnl/8.1.42.
- [23] N. Nishida, S. Kobayashi, and A. Ichikawa, "Optimal synthesis of heat exchange systems Necessary conditions for minimum heat transfer area and their application to

- systems synthesis,” *Chemical Engineering Science*, 1971, doi: 10.1016/0009-2509(71)86028-1.
- [24] A. H. Masso and D. F. Rudd, “The synthesis of system designs. II. Heuristic structuring,” *AIChE Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 10–17, 1969, doi: 10.1002/aic.690150108.
- [25] R. L. McGalliard and A. W. Westerberg, “Structural sensitivity analysis in design synthesis,” *The Chemical Engineering Journal*, 1972, doi: 10.1016/0300-9467(72)80005-4.
- [26] T. K. Pho and L. Lapidus, “Topics in computer-aided design: Part II. Synthesis of optimal heat exchanger networks by tree searching algorithms,” *AIChE Journal*, 1973, doi: 10.1002/aic.690190615.
- [27] J. W. Ponton and R. A. B. Donaldson, “A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks,” *Chemical Engineering Science*, 1974, doi: 10.1016/0009-2509(74)80014-X.
- [28] R. N. S. Rathore and G. J. Powers, “A Forward Branching Scheme for the Synthesis of Energy Recovery Systems,” *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1975, doi: 10.1021/i260054a014.
- [29] N. Nishida, Y. A. Liu, and L. Lapidus, “Studies in chemical process design and synthesis: III. A Simple and practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks,” *AIChE Journal*, 1977, doi: 10.1002/aic.690230113.
- [30] A. W. Westerberg, “A retrospective on design and process synthesis,” *Computers and Chemical Engineering*, 2004, doi: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.029.
- [31] J. J. Siirola, “Status of Heat Exchange Network Synthesis. Paper 42a. AIChE Meeting, Tulsa, Oklahoma,” 1974.
- [32] R. S. H. Mah, “Report of conference held at Northwestern University under the aegis of the National Science Foundation, on innovative design techniques for energy-efficient processes, March 13-14, 1975. Final report,” 1975.
- [33] E. C. Hohmann, “Optimum networks for heat exchange. Ph.D. Dissertation, University of Southern California, Los Angeles,” 1971.

- [34] A. M. Whistler, "Heat Exchangers as Money Makers," *Petroleum Refiner*, vol. 27, no. 1, pp. 83–86, 1948.
- [35] B. Linnhoff, D. R. Mason, and I. Wardle, "Understanding heat exchanger networks," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 3, no. 1–4, pp. 295–302, 1979, doi: 10.1016/0098-1354(79)80049-6.
- [36] F. Harary, *Graph theory*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.
- [37] B. Linnhoff and J. R. Flower, "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks," *AIChE Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 633–642, 1978, doi: 10.1002/aic.690240411.
- [38] B. Linnhoff and J. R. Flower, "Synthesis of heat exchanger networks: II. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality," *AIChE Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 642–654, 1978, doi: 10.1002/aic.690240412.
- [39] T. Umeda, J. Itoh, and K. Shiroko, "Heat exchange system synthesis," *Chemical Engineering Progress*, vol. 74, no. 7, pp. 70–76, 1978.
- [40] T. Umeda, K. Niida, and K. Shiroko, "A thermodynamic approach to heat integration in distillation systems," *AIChE Journal*, vol. 25, no. 3, pp. 423–429, 1979, doi: 10.1002/aic.690250306.
- [41] B. Linnhoff and E. Hindmarsh, "The pinch design method for heat exchanger networks," *Chemical Engineering Science*, vol. 38, no. 5, pp. 745–763, 1983, doi: 10.1016/0009-2509(83)80185-7.
- [42] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [43] J. Klemeš, F. Friedler, I. Bulatov, and P. Varbanov, *Sustainability in the Process Industry*. McGraw-Hill, 2011.
- [44] C. A. Floudas, A. R. Ciric, and I. E. Grossmann, "Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations," *AIChE Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 276–290, 1986, doi: 10.1002/aic.690320215.
- [45] S. A. Papoulias and I. E. Grossmann, "A structural optimization approach in process synthesis-II. Heat recovery networks," *Computers and Chemical Engineering*, 1983, doi: 10.1016/0098-1354(83)85023-6.



- [46] A. R. Ciric and C. A. Floudas, "Heat exchanger network synthesis without decomposition," *Computers and Chemical Engineering*, 1991, doi: 10.1016/0098-1354(91)87017-4.
- [47] K. F. Huang and I. A. Karimi, "Simultaneous synthesis approaches for cost-effective heat exchanger networks," *Chemical Engineering Science*, vol. 98, pp. 231–245, 2013, doi: 10.1016/j.ces.2013.05.023.
- [48] J. Na, J. Jung, C. Park, and C. Han, "Simultaneous synthesis of a heat exchanger network with multiple utilities using utility substages," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 79, pp. 70–79, 2015, doi: 10.1016/j.compchemeng.2015.04.005.
- [49] J. M. Zamora and I. E. Grossmann, "A global MINLP optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 367–384, 1998, doi: 10.1016/S0098-1354(96)00346-8.
- [50] M. Bogataj and Z. Kravanja, "An alternative strategy for global optimization of heat exchanger networks," *Applied Thermal Engineering*, vol. 43, pp. 75–90, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.12.015.
- [51] F. Schoen, "Stochastic techniques for global optimization: A survey of recent advances," *Journal of Global Optimization*, vol. 1, no. 3, pp. 207–228, 1991, doi: 10.1007/BF00119932.
- [52] J. Jezowski, R. Bochenek, and G. Poplewski, "On application of stochastic optimization techniques to designing heat exchanger- and water networks," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 46, no. 11, pp. 1160–1174, 2007, doi: 10.1016/j.cep.2007.02.024.
- [53] A. Pariyani, A. Gupta, and P. Ghosh, "Design of heat exchanger networks using randomized algorithm," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 30, no. 6–7, pp. 1046–1053, 2006, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.01.005.
- [54] A. Gupta and P. Ghosh, "A randomized algorithm for the efficient synthesis of heat exchanger networks," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 34, no. 10, pp. 1632–1639, 2010, doi: 10.1016/j.compchemeng.2009.12.003.
- [55] J. M. Ponce-Ortega, M. Serna-González, and A. Jiménez-Gutiérrez, "Synthesis of multipass heat exchanger networks using genetic algorithms," *Computers and*

- Chemical Engineering*, vol. 32, no. 10, pp. 2320–2332, 2008, doi: 10.1016/j.compchemeng.2007.11.012.
- [56] R. Bochenek and J. M. Jezowski, “Genetic algorithms approach for retrofitting heat exchanger network with standard heat exchangers,” *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 21, pp. 871–876, 2006, doi: 10.1016/S1570-7946(06)80155-0.
- [57] G. Athier, P. Floquet, L. Pibouleau, and S. Domenech, “Process optimization by simulated annealing and NLP procedures. Application to heat exchanger network synthesis,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 21, pp. S475–S480, 1997, doi: 10.1016/s0098-1354(97)87547-3.
- [58] B. Wang, J. J. Klemeš, P. S. Varbanov, M. Zeng, and Y. Liang, “Heat exchanger network retrofit using particle swarm optimisation algorithm,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 83, pp. 85–90, 2021, doi: 10.3303/CET2183015.
- [59] P. Shelokar, A. Kulkarni, V. K. Jayaraman, and P. Siarry, “Metaheuristics in process engineering: A historical perspective,” in *Applications of Metaheuristics in Process Engineering*, 2014, pp. 1–38.
- [60] M. C. Aguitoni, L. V. Pavão, P. H. Siqueira, L. Jiménez, and M. A. da S. S. Ravagnani, “Heat exchanger network synthesis using genetic algorithm and differential evolution,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 117, pp. 82–96, 2018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2018.06.005.
- [61] R. M. Khorasany and M. Fesanghary, “A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, no. 8, pp. 1363–1370, 2009, doi: 10.1016/j.compchemeng.2008.12.004.
- [62] Y. P. Wang and R. Smith, “Wastewater minimisation,” *Chemical Engineering Science*, vol. 49, no. 7, pp. 981–1006, 1994, doi: 10.1016/0009-2509(94)80006-5.
- [63] M. M. ElHalwagi and V. Manousiouthakis, “Synthesis of mass exchange networks,” *AIChE Journal*, vol. 35, no. 8, pp. 1233–1244, 1989, doi: 10.1002/aic.690350802.
- [64] J. J. Alves and G. P. Towler, “Analysis of refinery hydrogen distribution systems,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no. 23, pp. 5759–5769, 2002, doi: 10.1021/ie010558v.

- [65] T. K. Zhelev and J. L. Ntlhakana, "Energy-environment closed-loop through oxygen pinch," in *Computers and Chemical Engineering*, 1999, pp. S79–S83, doi: 10.1016/S0098-1354(99)80021-0.
- [66] J. Monod, "The Growth of Bacterial Cultures," *Annual Review of Microbiology*, vol. 3, no. 1, pp. 371–394, 1949, doi: 10.1146/annurev.mi.03.100149.002103.
- [67] T. Zhelev, "The conceptual design approach-A process integration approach on the move," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, no. 2, pp. 143–157, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.06.016.
- [68] M. Bagajewicz, "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 24, no. 9–10, pp. 2093–2113, 2000, doi: 10.1016/S0098-1354(00)00579-2.
- [69] D. C. Y. Foo, "State-of-the-art review of pinch analysis techniques for Water network synthesis," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 11, pp. 5125–5159, 2009, doi: 10.1021/ie801264c.
- [70] J. Jezowski, "Review of water network design methods with literature annotations," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 10, pp. 4475–4516, 2010, doi: 10.1021/ie901632w.
- [71] N. Takama, T. Kuriyama, K. Shiroko, and T. Umeda, "Optimal water allocation in a petroleum refinery," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 251–258, 1980, doi: 10.1016/0098-1354(80)85005-8.
- [72] I. Halim and R. Srinivasan, "Sequential methodology for integrated optimization of energy and water use during batch process scheduling," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, pp. 1575–1597, 2011, doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.05.009.
- [73] L. Savulescu, J. K. Kim, and R. Smith, "Studies on simultaneous energy and water minimisation - Part I: Systems with no water re-use," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 12, pp. 3279–3290, 2005, doi: 10.1016/j.ces.2004.12.037.
- [74] M. Boix, L. Pibouleau, L. Montastruc, C. Azzaro-Pantel, and S. Domenech, "Minimizing water and energy consumptions in water and heat exchange networks," *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, pp. 442–455, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.062.

- [75] E. Ahmetović, N. Ibrić, and Z. Kravanja, "Optimal design for heat-integrated water-using and wastewater treatment networks," *Applied Energy*, vol. 135, pp. 791–808, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.063.
- [76] A. P. R. Koppol and M. J. Bagajewicz, "Financial risk management in the design of water utilization systems in process plants," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 21, pp. 5249–5255, 2003, doi: 10.1021/ie0203882.
- [77] R. R. Tan, D. C. Y. Foo, and Z. A. Manan, "Assessing the sensitivity of water networks to noisy mass loads using Monte Carlo simulation," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1355–1363, 2007, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.11.005.
- [78] I. M. L. Chew and D. C. Y. Foo, "Automated targeting for inter-plant water integration," *Chemical Engineering Journal*, vol. 153, pp. 23–36, 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.05.026.
- [79] I. M. L. Chew, R. R. Tan, D. C. Y. Foo, and A. S. F. Chiu, "Game theory approach to the analysis of inter-plant water integration in an eco-industrial park," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, pp. 1611–1619, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.08.005.
- [80] C. A. Floudas and X. Lin, "Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 2109–2129, 2004, doi: 10.1016/j.compchemeng.2004.05.002.
- [81] T. Majozi, "Heat integration of multipurpose batch plants using a continuous-time framework," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 13, pp. 1369–1377, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.05.027.
- [82] P. Varbanov, S. Perry, J. Klemeš, and R. Smith, "Synthesis of industrial utility systems: Cost-effective de-carbonisation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. (7 SPEC. ISS.), pp. 985–1001, 2005, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.06.023.
- [83] L. Puigjaner, "Process integration with combined heat and power (CHP)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, no. 8–10, pp. 1015–1034, 1997, doi: 10.1016/s1359-4311(97)00018-5.
- [84] H. Axelsson, A. Åsblad, and T. Berntsson, "New methodology for greenhouse gas reduction in industry through improved heat exchanging and/or integration of

- combined heat and power,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 707–731, 1999, doi: 10.1016/S1359-4311(98)00084-2.
- [85] M. El-Halwagi, D. Harell, and H. Dennis Spriggs, “Targeting cogeneration and waste utilization through process integration,” *Applied Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 880–887, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.08.011.
- [86] M. M. El-Halwagi, F. Gabriel, and D. Harell, “Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 19, pp. 4319–4328, 2003, doi: 10.1021/ie030318a.
- [87] J. J. Klemeš, P. S. Varbanov, T. G. Walmsley, and X. Jia, “New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 98, pp. 439–468, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.030.
- [88] V. R. Dhole and B. Linnhoff, “Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 17, pp. S101–S109, 1993, doi: 10.1016/0098-1354(93)80214-8.
- [89] J. J. Klemeš, *Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [90] J. J. Klemeš, P. S. Varbanov, S. R. Wan Alwi, and Z. A. Manan, *Process Integration and Intensification: Saving Energy, Water and Resources*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2014.
- [91] J. Klemeš, V. R. Dhole, K. Raissi, S. J. Perry, and L. Puigjaner, “Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO<sub>2</sub> on total sites,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, no. 8–10, pp. 993–1003, 1997, doi: 10.1016/s1359-4311(96)00087-7.
- [92] S. Perry, J. Klemeš, and I. Bulatov, “Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors,” *Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 1489–1497, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.03.008.
- [93] K. Matsuda, Y. Hirochi, H. Tatsumi, and T. Shire, “Applying heat integration total site based pinch technology to a large industrial area in Japan to further improve performance of highly efficient process plants,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1687–1692, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.05.017.

- [94] H. Kimura and X. X. Zhu, “R-curve concept and its application for industrial energy management,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 7, pp. 2315–2335, 2000, doi: 10.1021/ie9905916.
- [95] R. Hackl, E. Andersson, and S. Harvey, “Targeting for energy efficiency and improved energy collaboration between different companies using total site analysis (TSA),” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4609–4615, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.03.023.
- [96] S. Boldyryev, G. Krajačić, and N. Duić, “Cost effective heat exchangers network of total site heat integration,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 52, pp. 541–546, 2016, doi: 10.3303/CET1652091.
- [97] S. Boldyryev, G. Krajačić, N. Duić, and P. S. Varbanov, “Cost minimisation for total site heat recovery,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 45, pp. 157–162, 2015, doi: 10.3303/CET1545027.
- [98] S. Boldyryev and P. S. Varbanov, “Low potential heat utilization of bromine plant via integration on process and Total Site levels,” *Energy*, vol. 90, pp. 47–55, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.071.
- [99] E. Axelsson, M. R. Olsson, and T. Berntsson, “Heat integration opportunities in average Scandinavian kraft pulp mills: Pinch analyses of model mills,” *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 466–475, 2006, doi: 10.3183/npprj-2006-21-04-p466-475.
- [100] T. G. Walmsley, M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley, M. Philipp, and R. H. Peesel, “Process and utility systems integration and optimisation for ultra-low energy milk powder production,” *Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.142.
- [101] P. Y. Lee, P. Y. Liew, T. G. Walmsley, S. R. Wan Alwi, and J. J. Klemeš, “Total Site Heat and Power Integration for Locally Integrated Energy Sectors,” *Energy*, vol. 204, p. 117959, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117959.
- [102] P. S. Varbanov and J. J. Klemeš, “Integration and management of renewables into Total Sites with variable supply and demand,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 35, no. 9, pp. 1815–1826, 2011, doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.02.009.

- [103] W. N. Yong, P. Y. Liew, S. R. W. Alwi, and J. J. Klemeš, "Combined cooling, heating and power integration for locally integrated energy sector," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 81, pp. 949–954, 2020, doi: 10.3303/CET2081159.
- [104] E. A. Authin, P. Y. Liew, J. J. Klemeš, W. S. Ho, N. W. Che Jusoh, and N. E. Mohammad Rozali, "Integration of combined heat and power energy systems with gas turbine in locally integrated energy sectors," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 83, pp. 37–42, 2021, doi: 10.3303/CET2183007.
- [105] F. S. Liporace, F. L. P. Pessoa, and E. M. Queiroz, "The influence of heat exchanger design on the synthesis of heat exchanger networks," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 735–750, 2000, doi: 10.1590/S0104-66322000000400037.
- [106] W. Xiao *et al.*, "Simultaneous optimization strategies for heat exchanger network synthesis and detailed shell-and-tube heat-exchanger design involving phase changes using GA/SA," *Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.151.
- [107] D. Tarlet, Y. Fan, S. Roux, and L. Luo, "Entropy generation analysis of a mini heat exchanger for heat transfer intensification," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 53, pp. 119–126, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.016.
- [108] K. Manjunath and S. C. Kaushik, "The second law analysis of an unbalanced constructal heat exchanger," *International Journal of Green Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 173–192, 2014, doi: 10.1080/15435075.2013.772515.
- [109] S. Mahjoub, M. R. Salimpour, H. Shokouhmand, and Z. Bahrami, "Entropy generation analysis in an evaporative air-cooled heat exchanger," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2014, doi: 10.1299/jtst.2014jtst0004.
- [110] K. Y. Leong, R. Saidur, M. Khairulmaini, Z. Michael, and A. Kamyar, "Heat transfer and entropy analysis of three different types of heat exchangers operated with nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 6, pp. 838–843, 2012, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.003.
- [111] H. Y. Ye and K. S. Lee, "Refrigerant circuitry design of fin-and-tube condenser based on entropy generation minimization," *International Journal of Refrigeration*, vol. 35, no. 5, pp. 1430–1438, 2012, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.03.013.

- [112] G. Giangaspero and E. Sciubba, "Application of the entropy generation minimization method to a solar heat exchanger: A pseudo-optimization design process based on the analysis of the local entropy generation maps," *Energy*, vol. 58, pp. 52–65, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.01.069.
- [113] G. Xie, Y. Song, M. Asadi, and G. Lorenzini, "Optimization of Pin-Fins for a Heat Exchanger by Entropy Generation Minimization and Constructal Law," *Journal of Heat Transfer*, vol. 137, no. 6, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1115/1.4029851.
- [114] L. X. Xu M., Guo J., "Thermodynamic Analysis and Optimization Design of Heat Exchanger," in *Advances in Transport Phenomena 2011*, Wang L., Ed. 2014.
- [115] M. Babaelahi, S. Sadri, and H. Sayyaadi, "Multi-objective optimization of a cross-flow plate heat exchanger using entropy generation minimization," *Chemical Engineering and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 87–94, 2014, doi: 10.1002/ceat.201300411.
- [116] M. Li and A. C. K. Lai, "Thermodynamic optimization of ground heat exchangers with single U-tube by entropy generation minimization method," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 133–139, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.013.
- [117] A. Bejan, *Entropy Generation Minimisation*, CRC Press, Boca Raton, 1996
- [118] A. Galović, *Termodinamika II*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB – Zagreb, 2019.
- [119] F. Bošnjaković, *Nauka o toplini II*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [120] R. K. Shah, D. P. Sekulić, *Fundamentals of Heat Exchangers*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003
- [121] S. Kakac, H. Lin, *Heat Exchangers; Selection, Rating and Thermal Design*, CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [122] VDI – *Wärmeatlas*, 10. Auflage, 2006.
- [123] F. Bošnjaković, *Kampf den Nichtumkehrbarkeiten*, Arch. Wärmewirtsch. Dampfkesselwesen, 1938.
- [124] A. Galović, Z. Virag, M. Živić, *Analytical Entropy Analysis of Recuperative Heat Exchangers*, *Entropy*, 2003, 5, pp. 482 – 495.



- [125] A. Galović, *Non – dimensional Entropy Analysis of Condenser and/or Evaporator Type Heat Exchangers*, International Journal of Heat Exchangers 1524-5608/VOL V(2004), pp. 337 -346.
- [126] A. Galović, M. Živić, M. Andrassy, *An Entropy Analysis of Parallel – Flow Heat Exchangers*, Strojniški vestnik, 2003., pp. 1 – 11.
- [127] A. Galović, M. Živić, A. Can, *Energy and exergy analysis of a parallel and counter – flow heat exchangers using measured data*, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, 53 (2007)/3 pp. 1 – 7.
- [128] A. Galović, S. Mudrinić, *Analiza eksergijskih gubitaka kod istosmjernih i protusmjernih izmjenjivača topline*, Strojarstvo 47 (5-6), 2005., str. 177 – 184.
- [129] A. Bejan, *General Criterion for Rating Heat Exchangers Performance*, International Journal Heat and Mass Transfer, 21, 1978. pp. 1179 – 1187.
- [130] Z. Y. Guo, I. S. Shou, L. S. Chen, *Theoretical Analysis and Experimental Confirmation of the Uniformity Principle of Temperature Difference Field in Heat Exchanger*, International Journal Heat and Mass Transfer, 45 (10), 2002. pp. 2119 – 2127.
- [131] J. E. Hesselgreaves, *Rationalization of second law analysis of heat Exchangers*, International Journal Heat and Mass Transfer, 43, 2000. pp. 4189 – 4204.
- [132] *Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti*, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, JCGM 100:2008, 2009.
- [133] W. Wagner et al., *The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*, J. Eng. Gas Turbines Power, 122, 150-184, 2000.

## KRATAK ŽIVOTOPIS

Martina Rauch rođena je 1989. godine u Zagrebu, gdje završava osnovnu školu i II. gimnaziju. Akademske godine 2009/2010. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme preddiplomskog studija nagrađena je Rektorovom nagradom za rad iz područja tehničke termodinamike. Diplomirala je 2014. godine na studiju strojarstva, smjer Procesno energetske te je za ostvareni uspjeh na diplomskom djelu studija nagrađena s najvećom pohvalom (SUMMA CUM LAUDE). Od 2015. godine zaposlena je kao asistent na Katedri za tehničku termodinamiku, a poslijediplomski doktorski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu upisuje akademske godine 2015/2016. Tijekom rada na fakultetu aktivno sudjeluje u nastavi kolegija Termodinamika I, Termodinamika II, Uvod u termodinamiku, Osnove termodinamike, Termodinamika materijala i Ispitivanja toplinskih svojstava tvari.

U razdoblju od 2017. do 2018. godine sudjeluje na stručnom projektu „Izvještaj studije termodinamičkog utjecaja na okoliš LNG terminala Omišalj na otoku Krku“, a od 2020. godine na dva IRI projekta: „Razvoj LNG sustava za brodove pogonjene motorima na dvojno gorivo (FO/LNG)“ i „Razvoj LNG spremnika za plovne objekte za skladištenje i regasifikaciju LNG a“.

Kao koautor objavila je više znanstvenih i stručnih radova.

Govori i piše engleski jezik, a služi se njemačkim jezikom.

## KRATAK ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU

Martina Rauch was born in Zagreb in 1989, where she finished primary and secondary school. She enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture of the University of Zagreb in the academic year 2009-2010. During the bachelor degree study she received a Rector's Award for a paper from the field of technical thermodynamics. She finished her master study in Mechanical Engineering (Process and Energy Engineering) in 2014, for which she received the highest (SUMMA CUM LAUDE) praise. Employed in 2015 as an assistant at the Chair of Technical Thermodynamics, Department of Thermodynamics and Thermal and Process Engineering. In the academic year 2015-2016 starts her postgraduate doctoral study at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Currently actively participates in lectures within the subjects: Thermodynamics I, Thermodynamics II, Introduction to Thermodynamics, Fundamentals of Thermodynamics, Thermodynamics of Materials and Testing of thermal properties.

Between 2017 and 2018 she participated as an associate on a professional project „Report of a study on Krk island LNG terminal Omišalj thermodynamics environmental impact“; and since 2020 participates on two IRI projects: „Development of LNG system for ships powered by dual fuel engines (FF/LNG)“ and „Development of LNG tanks for vessels for storage and regasification of LNG“.

She is the co-author of multiple scientific and expert papers.

Speaks and writes English, uses German language.