

# Eksergijska analiza istosmjernih i protusmjernih rekuperatora

---

**Polarecki, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*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:235:322244>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matija Polarecki**

Zagreb, 2015

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Antun Galović

Student:

Matija Polarecki

Zagreb, 2015



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Polarecki**

Mat. br.:0035187065

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksergijska analiza istosmjernih i protusmjernih rekuperatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Exergy Analysis of Parallel and Counter Flow Recuperative Heat Exchangers**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je razviti algoritam bezdimenzijske eksergijske destrukcije kod istosmjernih i protusmjernih rekuperatora, pri čemu relevantne bezdimenzijske veličine  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$  treba preuzeti iz modela energijskog proračuna dotičnih izmjenjivača. Za dodatnu bezdimenzijsku varijablu uzeti varijablu  $\pi_T$  kao omjer termodinamičkih temperatura jače i slabije struje na ulazu u rekuperator, tako da se i za istosmjerni i za protusmjerni rekuperator iznađu analitički oblici sljedećih funkcijskih veza:

a)  $\Delta Ex / (C_1 T_0) = f_1(\pi_2; \pi_3; \pi_T)$

b)  $\frac{\Delta Ex / (C_1 T_0)}{\pi_1} = f_2(\pi_2; \pi_3; \pi_T)$

c) eksergijski stupanj djelovanja izmjenjivača koji se definira sljedećom jednadžbom

$$\varepsilon_{ex} = \frac{Ex_{iz}}{Ex_{ul}} = f_3(\pi_2; \pi_3; \pi_T)$$

Dobivene funkcijske zavisnosti prikazati u odgovarajući dijagramima, te iz tih dijagramskih prikaza izvesti relevantne zaključke glede međusobnog ponašanja dotičnih rekuperatora obzirom na definirane veličine a) – c). U okviru razrade modela uzeti pretpostavku da obje struje zajedno čine adijabatski sustav!

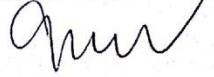
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu kao i eventualnu pomoć mentora!

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.


Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Antun Galović

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

## Zahvala

Tijekom same razrade zadatka nailazio sam na niz problema pa bih s toga posebno zahvalio svom mentoru prof. dr. sc. Antunu Galoviću na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima.

Matija Polarecki

|   |    |
|---|----|
| POPIS OZNAKA  | 3  |
| POPIS SLIKA   | 5  |
| SAŽETAK   | 6  |
| SUMMARY   | 7  |
| 1. UVOD   | 8  |
| 2. OPĆENITO O IZMJENJIVAČIMA TOPLINE  | 9  |
| 2.1. Podjela izmjenjivača topline   | 9  |
| 2.2. Bezdimenzijske značajke  | 10 |
| 3. ISTOSMJERNI REKUPERATOR  | 13 |
| 3.1. Općenito   | 13 |
| 3.2. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora   | 14 |
| 3.2.1. <i>Dijagramski prikazi bezdimenzijske eksergijske destrukcije za istosmjerni rekuperator</i>                                 | 19 |
| 3.3. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline za istosmjerni rekuperator  | 23 |
| 3.3.1. <i>Dijagramski prikazi omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora</i>  | 24 |
| 3.4. Eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog rekuperatora   | 33 |
| 3.4.1. <i>Dijagramski prikazi eksergijskog stupnja djelovanja istosmjernog rekuperatora</i>   | 35 |
| 4. PROTUSMJERNI REKUPERATOR   | 40 |
| 4.1. Općenito   | 40 |
| 4.2. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora  | 41 |
| 4.2.1. <i>Dijagramski prikazi bezdimenzijske eksergijske destrukcije za protusmjerni rekuperator</i>                                | 42 |
| 4.3. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline za protusmjerni rekuperator   | 46 |
| 4.3.1. <i>Dijagramski prikazi omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora</i> | 46 |
| 4.4. Eksergijski stupanj djelovanja protusmjernog rekuperatora  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4.1. <i>Dijagramski prikazi eksergijskog stupnja djelovanja protusmjernog rekuperatora</i> | 50 |
| 5. USPOREDBA ISTOSMJERNIH I PROTUSMJERNIH REKUPERATORA                                       | 55 |
| 6. ZAKLJUČAK   | 57 |
| LITERATURA   | 58 |
| PRILOZI  | 59 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka        | Opis   | Mjerna jedinica      |
|---------------|--|----------------------|
| $\Delta E_x$  | eksergijska destrukcija                                  | W                    |
| $E_{x_{UL}}$  | ukupna eksergijska destrukcija na ulazu u rekuperator    | W                    |
| $E_{x_{IZ}}$  | ukupna eksergijska destrukcija na izlazu iz rekuperatora | W                    |
| $E_{x_{UL1}}$ | eksergijska destrukcija na ulazu slabije struje          | W                    |
| $E_{x_{UL2}}$ | eksergijska destrukcija na ulazu jače struje             | W                    |
| $E_{x_{IZ1}}$ | eksergijska destrukcija na izlazu slabije struje         | W                    |
| $E_{x_{IZ2}}$ | eksergijska destrukcija na izlazu jače struje            | W                    |
| $c_{p1}$      | specifični toplinski kapacitet slabije struje            | J/(kg K)             |
| $c_{p2}$      | specifični toplinski kapacitet jače struje               | J/(kg K)             |
| $C_1$         | toplinski kapacitet slabije struje                       | W/K                  |
| $C_2$         | toplinski kapacitet jače struje                          | W/K                  |
| $k$           | koeficijent prolaza topline                              | W/(m <sup>2</sup> K) |
| $A$           | površina izmjenjivača topline                            | m <sup>2</sup>       |
| $T_1'$        | ulazna temperatura slabije struje                        | K                    |
| $T_1''$       | izlazna temperatura slabije struje                       | K                    |
| $T_2'$        | ulazna temperatura jače struje                           | K                    |
| $T_2''$       | izlazna temperatura jače struje                          | K                    |
| $T_{ok}$      | temperatura okoliša                                      | K                    |
| $\pi_1$       | bezdimenzijska temperaturna značajka                     | -/-                  |
| $\pi_2$       | bezdimenzijska značajka broja prijenosnih jedinica       | -/-                  |
| $\pi_3$       | bezdimenzijska značajka omjera toplinskih kapaciteta     | -/-                  |
| $\pi_T$       | bezdimenzijska značajka omjera ulaznih temperatura       | -/-                  |



| Oznaka             | Opis   | Mjerna jedinica |
|--------------------|--|-----------------|
| $\pi_{ok}$         | bezdimenzijska značajka omjera okolišne i ulazne temperature | -/-             |
| $\mathcal{E}_{ex}$ | eksergijski stupanj djelovanja izmjenjivača topline          | -/-             |
| $\Phi$             | toplinski tok  | W               |
| $\mathcal{E}$      | iskoristivost topline  | -/-             |
| $H_1'$             | entalpija slabije struje na ulazu                            | W               |
| $H_1''$            | entalpija slabije struje na izlazu                           | W               |
| $H_2'$             | entalpija jače struje na ulazu                               | W               |
| $H_2''$            | entalpija jače struje na izlazu                              | W               |
| $H_0$              | entalpija radne tvari na temperaturi okoliša                 | W               |
| $S_1'$             | entropija slabije struje na ulazu                            | W/K             |
| $S_1''$            | entropija slabije struje na izlazu                           | W/K             |
| $S_2'$             | entropija jače struje na ulazu                               | W/K             |
| $S_2''$            | entropija jače struje na izlazu                              | W/K             |
| $S_0$              | entropija radne tvari na temperaturi okoliša                 | W/K             |
| $\mathcal{G}_{m1}$ | maseni protok slabije struje                                 | kg/s            |
| $\mathcal{G}_{m2}$ | maseni protok jače struje                                    | kg/s            |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Dijagramski prikaz značajke $\pi_1$ za istosmjerni rekuperator  | 11 |
| Slika 2. Dijagramski prikaz značajke $\pi_1$ za protusmjerni rekuperator   | 11 |
| Slika 3. Dijagramski prikaz temperaturne raspodjele struja u ovisnosti o površini istosmjernog rekuperatora        | 13 |
| Slika 4. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.25$                          | 19 |
| Slika 5. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$                           | 21 |
| Slika 6. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$                             | 22 |
| Slika 7. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.25$          | 25 |
| Slika 8. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.25$ (uvećan) | 27 |
| Slika 9. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$           | 29 |
| Slika 10. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$            | 30 |
| Slika 11. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$ (uvećan)   | 31 |
| Slika 12. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$ i $\pi_{ok}=0.5$                | 35 |
| Slika 13. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$ i $\pi_{ok}=2$                  | 37 |
| Slika 14. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$ i $\pi_{ok}=2$                    | 38 |
| Slika 15. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$ i $\pi_{ok}=0.5$                  | 39 |
| Slika 16. Dijagramski prikaz temperaturne raspodjele struja u ovisnosti o površini protusmjernog rekuperatora      | 40 |
| Slika 17. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.25$                        | 42 |
| Slika 18. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$                         | 44 |
| Slika 19. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$                           | 45 |
| Slika 20. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.25$        | 47 |
| Slika 21. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$         | 49 |
| Slika 22. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$           | 49 |
| Slika 23. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$ i $\pi_{ok}=0.5$               | 51 |
| Slika 24. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=0.5$ i $\pi_{ok}=2$                 | 52 |
| Slika 25. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$ i $\pi_{ok}=0.5$                 | 53 |
| Slika 26. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$ i $\pi_{ok}=2$                   | 54 |
| Slika 27. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog i protusmjernog rekuperatora za $\pi_T = 2$          | 55 |
| Slika 28. Eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog i protusmjernog rekuperatora za $\pi_T=2$                    | 56 |

**SAŽETAK**

Tema završnog rada je "Eksergijska analiza istosmjernih i protusmjernih rekuperatora". To znači da se završni rad sastoji od iznalaženja funkcijskih zavisnosti koje se nakon toga prikazuju u odgovarajućim dijagramima. Glavni cilj zadatka je utvrđivanje matematičkih oblika bezdimenzijske eksergijske destrukcije i eksergijskog stupnja djelovanja rekuperatora kako bi se na osnovu njih mogli izvesti relevantni zaključci glede međusobnog ponašanja dotičnih rekuperatora obzirom na definirane veličine.

Ključne riječi : eksergija, destrukcija, rekuperator, značajka, istosmjerni, protusmjerni

**SUMMARY**

The theme of the final paper is " Exergy analysis of parallel and counter flow recuperative heat exchangers ". This means that the final paper is consisted on finding a functional dependency which is displayed in the corresponding diagrams. The main objective of the task is to determine the mathematical form of the dimensionless exergy destruction and exergy efficiency recuperator to rely on to perform relevant conclusions regarding the disclosure of the behavior of the respective recuperator given to the defined size.

Key word: Exergy, destruction, recuperator, meaning, direct, conversely

## 1. UVOD

U okviru dodiplomske nastave iz kolegija Termodinamike I upoznao sam se s nepovratnim (ireverzibilnim) procesima a kroz kolegij Termodinamika II stekao sam određena znanja iz područja toplinskih aparata, nazvanih izmjenjivačima topline. To su vrlo značajni toplinski aparati koji svoju praktičnu primjenu nalaze u širokom području ljudske djelatnosti kao što su: termoelektrane, nuklearne elektrane, rafinerije nafte, prehrambena i kemijska industrija, zagrijavanje odnosno hlađenje kao i klimatizacija različitih prostora. U osnovi kod svakog tipa izmjenjivača, bilo da se radi o rekuperatorima, regenerativima ili izravnim izmjenjivačima (mješalima) dolazi do jednosmjernog prijenosa topline od toplije ka hladnijoj struji, te se na taj način hladnija struja zagrijava a toplija ohlađuje.

Kroz kolegij Termodinamika II obuhvatno su razrađeni osnovni tipovi rekuperatora, istosmjerni protusmjerni i križni po kriteriju dvaju zakona održanja: zakona o održanju mase i zakona o održanju energije. Na toj razini napravljena je i međusobna usporedba tih rekuperatora prema kriteriju stupnja iskoristivosti odnosno efikasnosti izmjenjivača  $\varepsilon$ . Po tom je kriteriju najbolji protusmjerni, zatim križni dok je najlošiji istosmjerni rekuperator.

Kako se kod ovih izmjenjivača istovremeno nužno javljaju dva oblika nepovratnosti i to zbog prijenosa topline između dviju struja pri njihovim konačnim temperaturnim razlikama, kao i zbog pada tlaka (trenje) struja u rekuperatoru, to nužno dovodi do njihove eksergijske destrukcije. A eksergijska destrukcija počiva na I. i II. zakonu termodinamike.

Upravo mi je to bio motiv izbora ovakve teme za svoj završni rad. Detaljnije razraditi postojeće ireverzibilnosti u rekuperatorima, s ciljem iznalaženja kriterija, za njihovu međusobnu usporedbu, koji bi uključivao upravo nastalu eksergijsku destrukciju struja. Ta će eksergijska destrukcija uključivati samu ireverzibilnost zbog prijenosa topline između struja, dok će se trenje zanemariti.

Analiza će u radu obuhvatiti samo istosmjerni i protusmjerni rekuperator iz prostog razloga što za njih postoje naznačena analitička bezdimenzijska rješenja dana u okviru kolegija Termodinamika II.

## 2. OPĆENITO O IZMJENJIVAČIMA TOPLINE

Izmjenjivači topline su ogrjevna tijela u kojima se prenosi toplina između dva ili više fluida radi zagrijavanja, odnosno ohlađivanja jednog fluida drugim. Njihova upotreba je vrlo rasprostranjena, od kućanskih grijača, hladnjaka, postrojenja centralnog grijanja, radijatora, bojlera pa sve do postrojenja koja se primjenjuju u rashladnoj tehnici, prehrambenoj industriji te u području termoenergetskih postrojenja.

### 2.1 Podjela izmjenjivača topline

Načelno se izmjenjivači topline dijele na

- 1) rekuperatore
- 2) regeneratore
- 3) direktne(izravne) aparate

Tijekom daljnje izrade završnog zadatka ne razmatraju se niti regeneratori niti direktni aparati.

Ovom eksergijskom analizom obuhvatiti će se samo rekuperatori.

Rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih su struje međusobno razdvojene čvrstom stijenkom. Razdjelna stijenka je većinom cijevnog oblika, iako može biti i pločastog oblika. Rekuperator funkcionira na način da se jedna struja koja je toplija hladi prolaskom kroz najčešće cijev te na taj način zagrijava drugu struju koja je hladnija. Iz prethodne konstatacije jasno je da je toplinski tok koji se od toplije struje odvodi jednak toplinskom toku koji se hladnijoj struji dovodi.

Osnovna podjela rekuperatora vezana je na međusobni smjer strujanja medija :

- 1) istosmjerni rekuperator,
- 2) protusmjerni rekuperator,
- 3) križni(unakrsni) rekuperator,

Križne rekuperatore ne razmatra se tijekom izrade zadatka.

Izmjenjivači topline mogu se još podijeliti na lamelne, spiralne, pločaste, izmjenjivače s promjenom agregatnog stanja, izmjenjivače sa profiliranom pločom, i tako dalje. Međutim

navedene podjele ne koriste i nisu bitne za daljnji tijek izrade zadatka već su dane u informativne svrhe.

## 2.2 Bezdimenzijske značajke

Prilikom označavanja struja s indeksom 2 označava se jača struja, odnosno ona struja koja ima veći toplinski kapacitet, dok se s indeksom 1 označava slabija struja, odnosno ona struja koja ima manji toplinski kapacitet.

$$C_2 = g_{m2}c_{p2} > C_1 = g_{m1}c_{p1} \quad (1)$$

Za toplinski tok u rekuperatoru postoji matematička veza koja glasi :

$$\Phi = f(k, A, T_1', T_1'', T_2', T_2'', C_1, C_2) \quad (2)$$

Ako se u jednadžbi (2) provede dimenzijska analiza, dobiva se implicitno rješenje rekuperatora,

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (3)$$

Bezdimenzijska temperaturna značajka  $\pi_1$  može se izraziti kao

$$\pi_1 = \frac{T_1' - T_1''}{T_1' - T_2'} \quad (4)$$

Značajka  $\pi_1$  može se zapisati i u formalnom eksplicitnom obliku kao funkcija

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3) \quad (5)$$

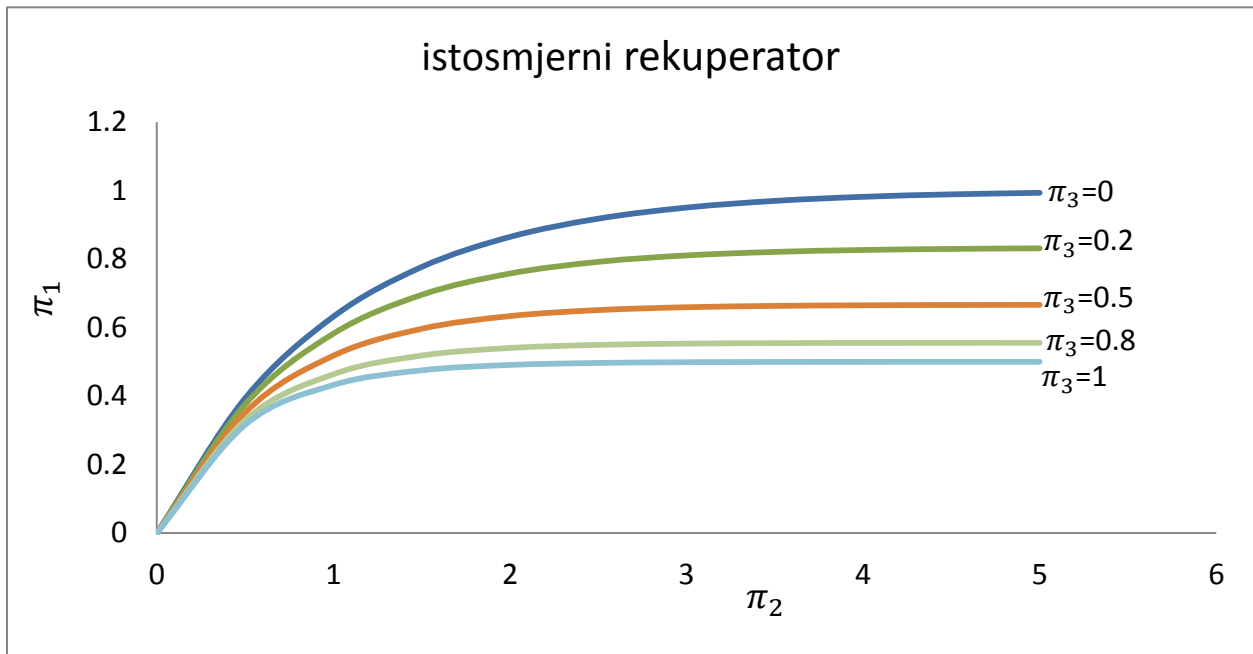
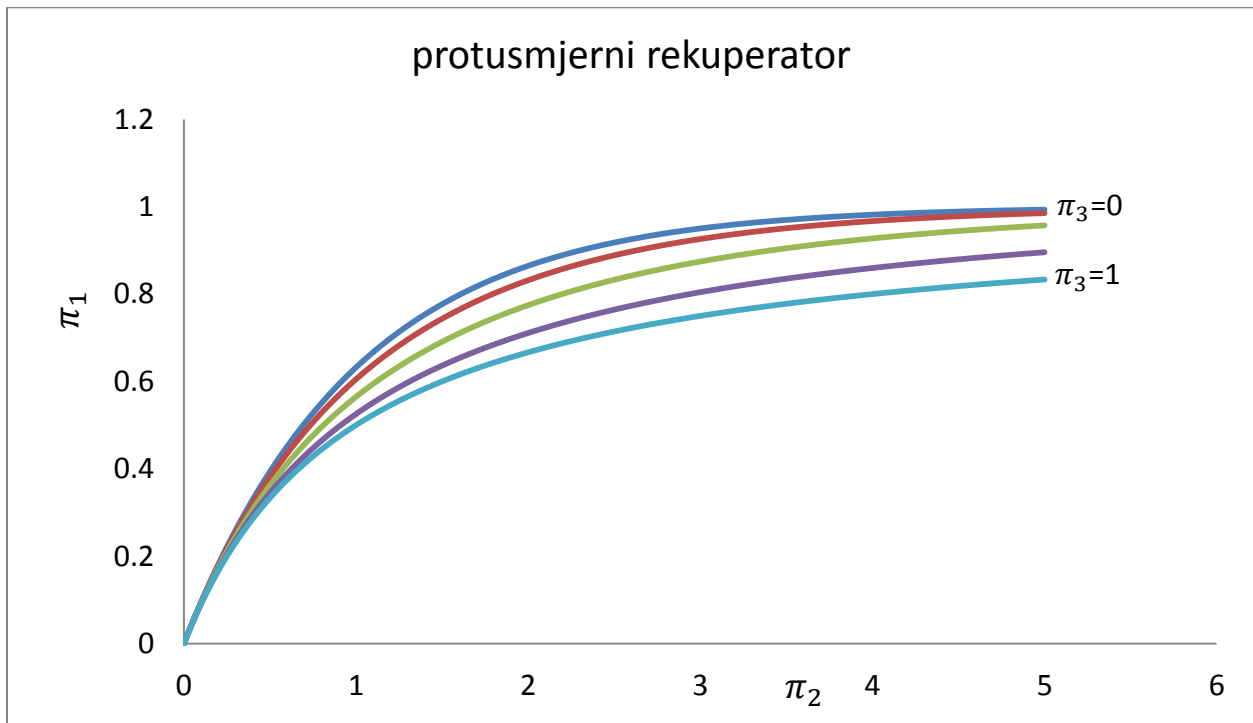
Za istosmjerni rekuperator jednadžba (5) ima oblik

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \quad (6)$$

Dok za protusmjerni vrijedi jednadžba

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \quad (7)$$

Uspoređujući rješenja za istosmjerni i protusmjerni rekuperator vidljivo je kako rješenja nisu ista, što potvrđuje da međusobni smjer strujanja fluida bitno utječe na rezultate izračuna relevantnih veličina rekuperatora. Dijagrami na slikama 1 i 2 prikazuju jednadžbe (6) i (7).

Slika 1. Dijagramski prikaz značajke  $\pi_1$  za istosmjerni rekuperatorSlika 2. Dijagramski prikaz značajke  $\pi_1$  za protusmjerni rekuperator



Iz dijagrama 1 i 2 se vidi da je vrijednost značajke  $\pi_1$  za iste značajke  $\pi_2$  i  $\pi_3$  veća kod protusmjernog nego kod istosmjernog rekuperatora. Temperaturna značajka može se zapisati još i kao

$$\pi_1 = \frac{\Phi}{C_1(T_1' - T_2')} \quad (8)$$

a s obzirom da nazivnik jednadžbe (8) predstavlja maksimalni toplinski tok uspostavlja se da  $\pi_1$  predstavlja još i *iskoristivost topline*. Shodno tome može se zaključiti da je iskoristivost protusmjernog rekuperatora veća od iskoristivosti istosmjernog rekuperatora za istu vrijednost bezdimenzijskih značajki  $\pi_2$  i  $\pi_3$ .

Bezdimenzijska značajka prijenosnih jedinica  $\pi_2$  glasi

$$\pi_2 = \frac{kA}{C_1} \quad (9)$$

bezdimenzijska značajka omjera toplinskih kapaciteta može se iskazati kao

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} \quad (10)$$

Za eksergijsku analizu pored navedenih veličina  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$ , potrebno je uvesti i omjer ulaznih termodinamičkih temperatura jače i slabije struje, pa se tako uvode sljedeće jednadžbe,

$$\pi_T = \frac{T_2'}{T_1'} \quad (11)$$

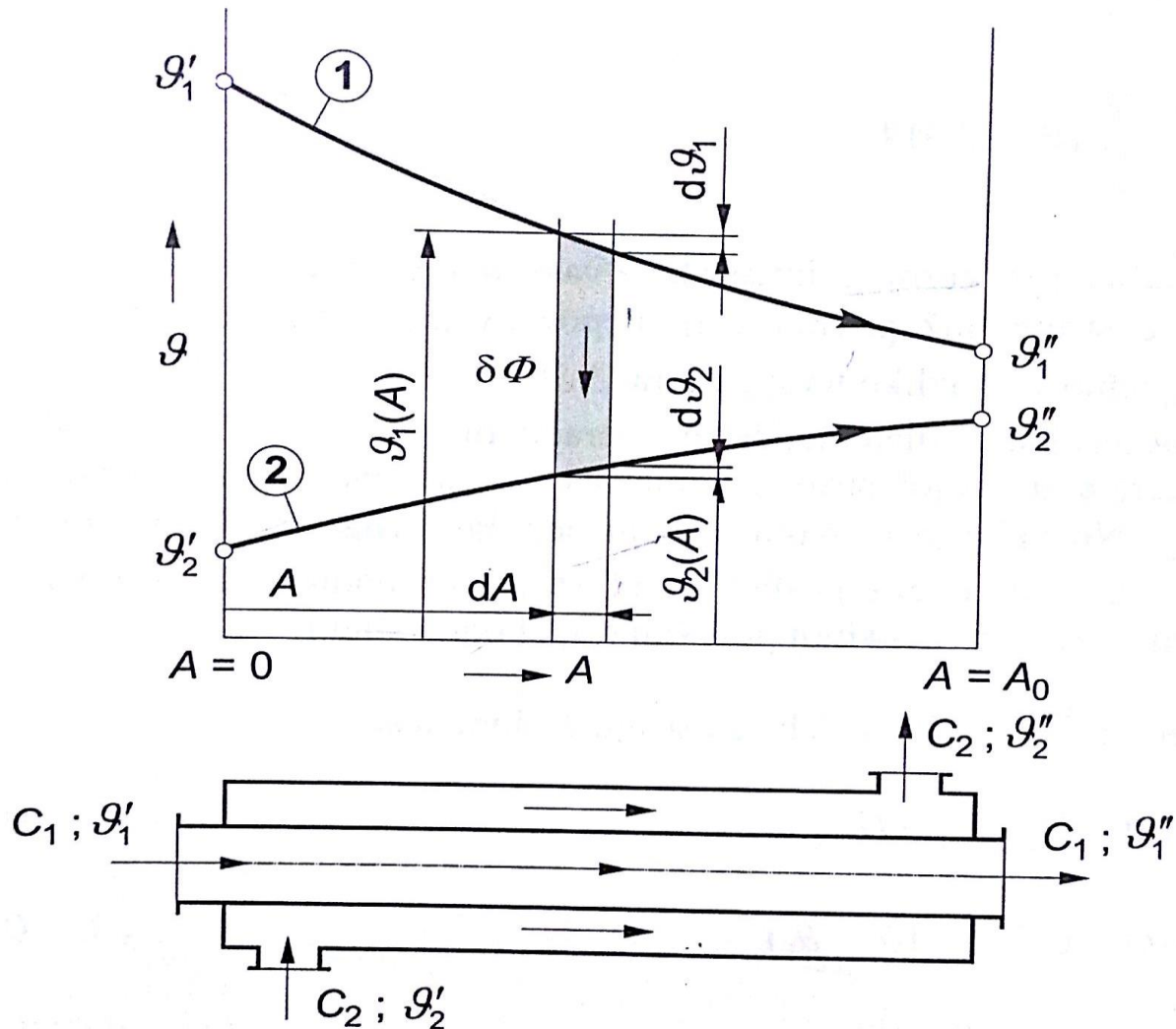
odnosno bezdimenzijska značajka omjera temperature okoliša i ulazne temperature slabije struje

$$\pi_{ok} = \frac{T_{ok}}{T_1'} \quad (12)$$

### 3. ISTOSMJERNI REKUPERATOR

#### 3.1 Općenito

Istosmjerni rekuperatori su takvi aparati kod kojih su struje međusobno paralelne i teku u istom smjeru, pa slika 3 prikazuje jedan takav tip rekuperatora.



Slika 3. Dijagramski prikaz temperaturne raspodjele struja u ovisnosti o površini istosmjernog rekuperatora [2]

### 3.2. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora

Ukupna eksergija sustava na ulazu jednaka je zbroju eksergije slabije struje na ulazu i eksergije jače struje na ulazu, dok je ukupna eksergija sustava na izlazu jednaka zbroju eksergije slabije struje na izlazu i eksergije jače struje na izlazu. Izraz za eksergijsku destrukciju na ulazu u rekuperator glasi

$$Ex_{UL} = Ex_{UL1} + Ex_{UL2} \quad (13)$$

Ukupna eksergija na izlazu iz rekuperatora

$$Ex_{IZ} = Ex_{IZ1} + Ex_{IZ2} \quad (14)$$

Zbog postojanja ireverzibilnosti pri prijenosu topline dolazi do eksergijske destrukcije struje od ulaza do izlaza tako da se može primijeniti jednadžba

$$\Delta Ex = Ex_{UL} - Ex_{IZ} \quad (15)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (13) i (14) u (15) dobivamo izraz za eksergijsku destrukciju :

$$\Delta Ex = Ex_{UL1} + Ex_{UL2} - Ex_{IZ1} - Ex_{IZ2} \quad (16)$$

eksergija slabije struje na ulazu u rekuperator glasi

$$Ex_{UL1} = H_1' - H_0 - T_{ok}(S_1' - S_0) \quad (17)$$

eksergija slabije struje na izlazu iz rekuperatora glasi

$$Ex_{IZ1} = H_1'' - H_0 - T_{ok}(S_1'' - S_0) \quad (18)$$

eksergija jače struje na ulazu u rekuperator glasi

$$Ex_{UL2} = H_2' - H_0 - T_{ok}(S_2' - S_0) \quad (19)$$

eksergija jače struje na izlazu iz rekuperatora glasi

$$Ex_{IZ2} = H_2'' - H_0 - T_{ok}(S_2'' - S_0) \quad (20)$$

Kako bi se mogao provesti daljnji proračun potrebno je poznavati izraze za promjenu entalpije te za promjenu entropije u jednadžbama od (17) do (20). Koristeći već poznati izraz za promjenu entropije sustava

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (21)$$

proizlazi zaključak kako promjena entropije sustava ovisi samo o promjeni temperatura struja, pa se shodno dobivenoj jednadžbi za promjenu entropije mogu odrediti i promjene entropije slabije i jače struje na ulazu, odnosno izlazu iz rekuperatora.

Promjena entropije slabije struje na ulazu u rekuperator glasi

$$\Delta S_1' = S_1' - S_0 = C_1 \ln\left(\frac{T_1'}{T_{ok}}\right) \quad (22)$$

promjena entropije slabije struje na izlazu iz rekuperatora

$$\Delta S_1'' = S_1'' - S_0 = C_1 \ln\left(\frac{T_1''}{T_{ok}}\right) \quad (23)$$

promjena entropije jače struje na ulazu u rekuperator

$$\Delta S_2' = S_2' - S_0 = C_2 \ln\left(\frac{T_2'}{T_{ok}}\right) \quad (24)$$

promjena entropije jače struje na izlazu iz rekuperatora

$$\Delta S_2'' = S_2'' - S_0 = C_2 \ln\left(\frac{T_2''}{T_{ok}}\right) \quad (25)$$

Nakon što su dobiveni matematički oblici za promjenu entropije pojedinog dijela rekuperatora, potrebno je utvrditi i matematičke oblike za entalpiju pojedinih struja.

Diferencijalni oblik za promjenu entalpije nekog sustava glasi

$$dH = CdT \quad (26)$$

Integriranjem jednadžbe (26) od nekog početnog stanja 1 do krajnjeg stanja 2 dobije se

$$\Delta H = H_2 - H_1 = C(T_2 - T_1) \quad (27)$$

Pomoću jednadžbe (27) mogu se odrediti svi matematički oblici za promjenu entalpije pojedinog dijela izmjenjivača.

Promjena entalpije slabije struje na ulazu u rekuperator

$$\Delta H_1' = H_1' - H_0 = C_1(T_1' - T_{ok}) \quad (28)$$

promjena entalpije slabije struje na izlazu iz rekuperatora

$$\Delta H_1'' = H_1'' - H_0 = C_1(T_1'' - T_{ok}) \quad (29)$$

promjena entalpije slabije struje na ulazu u rekuperator

$$\Delta H_2' = H_2' - H_0 = C_2(T_2' - T_{ok}) \quad (30)$$

promjena entalpije slabije struje na izlazu iz rekuperatora

$$\Delta H_2'' = H_2'' - H_0 = C_2(T_2'' - T_{ok}) \quad (31)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (22) i (28) u jednadžbu (17) dobivamo jednadžbu za eksergiju slabije struje na ulazu u rekuperator :

$$Ex_{UL1} = C_1 T_1' - C_1 T_{ok} - T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1'}{T_{ok}} \right) \quad (32)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (23) i (29) u jednadžbu (18) dobivamo jednadžbu za eksergiju slabije struje na izlazu iz rekuperatora :

$$Ex_{IZ1} = C_1 T_1'' - C_1 T_{ok} - T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1''}{T_{ok}} \right) \quad (33)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (24) i (30) u jednadžbu (19) dobivamo jednadžbu za eksergiju jače struje na ulazu u rekuperator :

$$Ex_{UL2} = C_2 T_2' - C_2 T_{ok} - T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2'}{T_{ok}} \right) \quad (34)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (25) i (31) u jednadžbu (20) dobivamo jednadžbu za eksergiju jače struje na izlazu iz rekuperatora :

$$Ex_{IZ2} = C_2 T_2'' - C_2 T_{ok} - T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2''}{T_{ok}} \right) \quad (35)$$

Sada se konačno može izvesti matematički oblik eksergijske destrukcije sustava uvrštavajući jednadžbe od (32) do (35) u jednadžbu (16). Naknadnim skraćivanjem pojedinih članova unutar jednadžbe dolazi se do sljedećeg matematičkog oblika za eksergijsku destrukciju,

$$\begin{aligned} \Delta Ex = & C_1 T_1' - T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1'}{T_{ok}} \right) + C_2 T_2' - T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2'}{T_{ok}} \right) - C_1 T_1'' \\ & + T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1''}{T_{ok}} \right) - C_2 T_2'' + T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2''}{T_{ok}} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Naknadnim sređivanjem jednadžbe (36) dobije se pojednostavljeni izraz a on glasi

$$\Delta Ex = C_1 (T_1' - T_1'') + C_2 (T_2' - T_2'') + T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1''}{T_1'} \right) + T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2''}{T_2'} \right) \quad (37)$$

Uzevši u obzir ranije ustanovljenu činjenicu o jednakosti toplinskih tokova slabije i jače struje, odnosno činjenicu da je toplinski tok koji se od jedne struje odvodi jednak toplinskom toku koji se drugoj struji dovodi, dolazi se do zaključka kako prva dva člana jednadžbe (37) iščezavaju.

$$\Phi = C_1 (T_1' - T_1'') = C_2 (T_2'' - T_2') \quad (38)$$

Shodno tome jednadžba (37) sada glasi

$$\Delta Ex = T_{ok} C_1 \ln \left( \frac{T_1''}{T_1'} \right) + T_{ok} C_2 \ln \left( \frac{T_2''}{T_2'} \right) \quad (39)$$

U jednadžbi (39) temperature  $T_1'$  i  $T_2'$  su ulazne, odnosno referentne veličine, dok je temperature  $T_1''$  i  $T_2''$  potrebno izraziti preko prethodno izvedenih jednadžbi (4) i (38).

Shodno tome slijedi

$$\pi_1 = \frac{T_1' - T_1''}{T_1' - T_2'} \implies T_1'' = T_1' - \pi_1 (T_1' - T_2') \quad (40)$$

Koristeći jednadžbu (38) i (10) dolazi se do izraza za temperaturu jače struje na izlazu

$$T_2'' = T_2' + \pi_1 \pi_3 (T_1' - T_2') \quad (41)$$

Nakon što su dobiveni izrazi za temperature na izlazima iz rekuperatora, dostupni su svi potrebni matematički oblici za određivanje bezdimenzijske eksergijske destrukcije za istosmjerni rekuperator.

Uvrštavanjem jednadžbi (40) i (41) u jednadžbu (39) dobiva se

$$\Delta Ex = T_{\text{ok}} C_1 \ln \left( \frac{T_1' - \pi_1 (T_1' - T_2')}{T_1'} \right) + T_{\text{ok}} C_2 \ln \left( \frac{T_2' + \pi_1 \pi_3 (T_1' - T_2')}{T_2'} \right) \quad (42)$$

Naknadnim sređivanjem dvaju razlomaka te korištenjem jednadžbe (11) prethodna jednadžba sada glasi

$$\Delta Ex = T_{\text{ok}} C_1 \ln(1 - \pi_1(1 - \pi_T)) + T_{\text{ok}} C_2 \ln \left( 1 + \pi_3 \pi_1 \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (43)$$

S obzirom kako se matematički proračun svodi na pronalaženje *bezdimezijske* eksergijske destrukcije jasno je kako je jednadžbu (43) potrebno dovesti u bezdimezijski oblik, odnosno potrebno je poštovati funkcijsku vezu

$$\Delta Ex / (C_1 T_{\text{ok}}) = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_T) \quad (44)$$

Vidljivo je promatrajući jednadžbu (44) da će se traženi oblik jednadžbe postići dijeljenjem jednadžbe (43) sa članom  $C_1 T_{\text{ok}}$ . Stoga slijedi

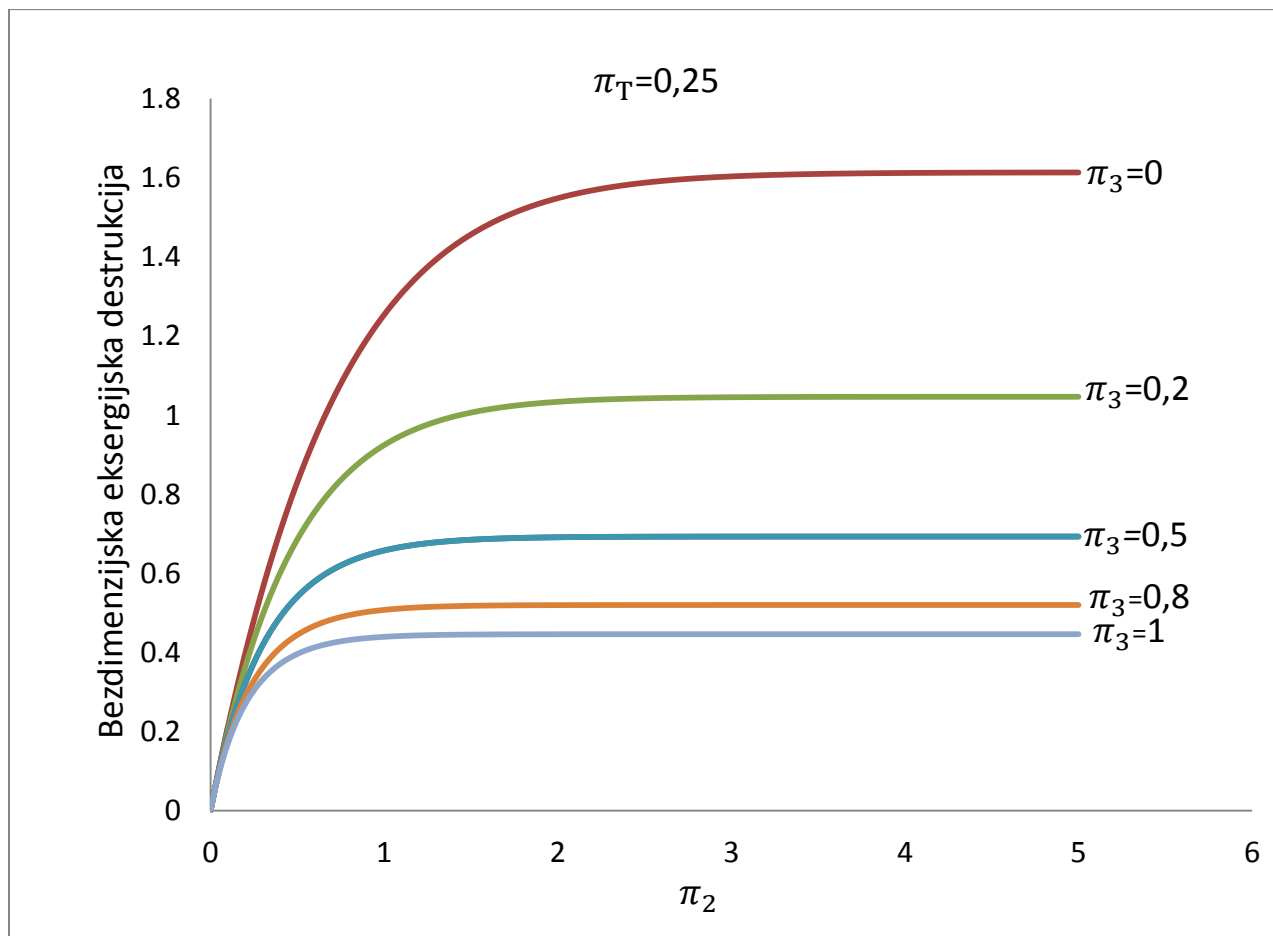
$$\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{\text{ok}}} = \ln(1 - \pi_1(1 - \pi_T)) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \pi_1 \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (45)$$

Kako je već prije naglašeno, odnosno kako to nalaže jednadžba (44), bezdimezijska eksergijska destrukcija mora biti funkcija bezdimezijskih značajki  $\pi_2, \pi_3$  i  $\pi_T$ . To se može lako postići s obzirom da je ranije uspostavljeno da je temperaturna značajka funkcija bezdimezijskih parametara  $\pi_2$  i  $\pi_3$ . Dakle  $\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3)$ , a ona za istosmjerni rekuperator ima oblik prema jednadžbi (6). Konačno, uvrštavanjem jednadžbe (6) u (45) dolazi se do matematičkog oblika za bezdimezijsku destrukciju istosmjernog rekuperatora, a ona glasi

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{\text{ok}}} = & \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) \\ & + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (46)$$

### 3.2.1 Dijagramski prikazi bezdimenzijske eksergijske destrukcije za istosmjerni rekuperator

Dijagramski prikazi bezdimenzijske eksergijske destrukcije daju jasan prikaz ponašanja rekuperatora. Dijagrami prikazuju ovisnost bezdimenzijske eksergijske destrukcije (ordinata) o bezdimenzijskoj značajki broja prijenosnih jedinica  $\pi_2$  (apscisa). Kao parametarske krivulje koriste se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$  koje su stupnjevane po 0,1 nad intervalom od 0 do 1. Bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  stupnjevana je po 0,01 nad intervalom od 0 do 5, dok se bezdimenzijska značajka  $\pi_T$  držala konstantnom za 3 slučaja ( $\pi_T = 0,25; 0,5; 2$ ).



Slika 4. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 0,25$

Slika 4. prikazuje naznačenu funkcijsku ovisnost za 5 parametarskih krivulja ( $\pi_3 = 0; 0,2; 0,5; 0,8; 1$ ) uz konstantnu vrijednost značajke  $\pi_T$  u iznosu od 0,25. Navedena vrijednost bezdimenzijske značajke govori kako je ulazna temperatura jače struje 4 puta manja od ulazne temperature slabije struje.



Svaka od prethodnih parametarskih krivulja  $\pi_3$  ima svoju *horizontalnu asimptotu* a njezin se iznos dobije sljedećim postupkom

$$\begin{aligned} \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} &= \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) \\ &+ \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (47)$$

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \ln \left( 1 - \frac{1}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (48)$$

Kada bezdimenzijska značajka prijenosnih jedinica  $\pi_2$  teži u beskonačno riječ je o rekuperatorima neizmjereno velikih površina, što je dakako hipotetički slučaj. Sljedeći korak je određivanje vrijednosti bezdimenzijske eksbergijske destrukcije za svih 5 parametarskih krivulja uz konstantnu bezdimenzijsku značajku  $\pi_T$  (Slika 4.).

Za  $\pi_3=0$  jednadžba (48) ima oblik,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \ln(\pi_T) + \frac{0}{0} \quad (49)$$

S obzirom da je desni član jednadžbe (49) neodređeni oblik potrebno je za jednadžbu prijemiti L'Hospitalovo pravilo.

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\frac{d}{d\pi_3} \ln \left( 1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{d}{d\pi_3} \pi_3} = \frac{1}{\pi_T} - 1 \quad (50)$$

Shodno tome jednadžba (49) sada glasi

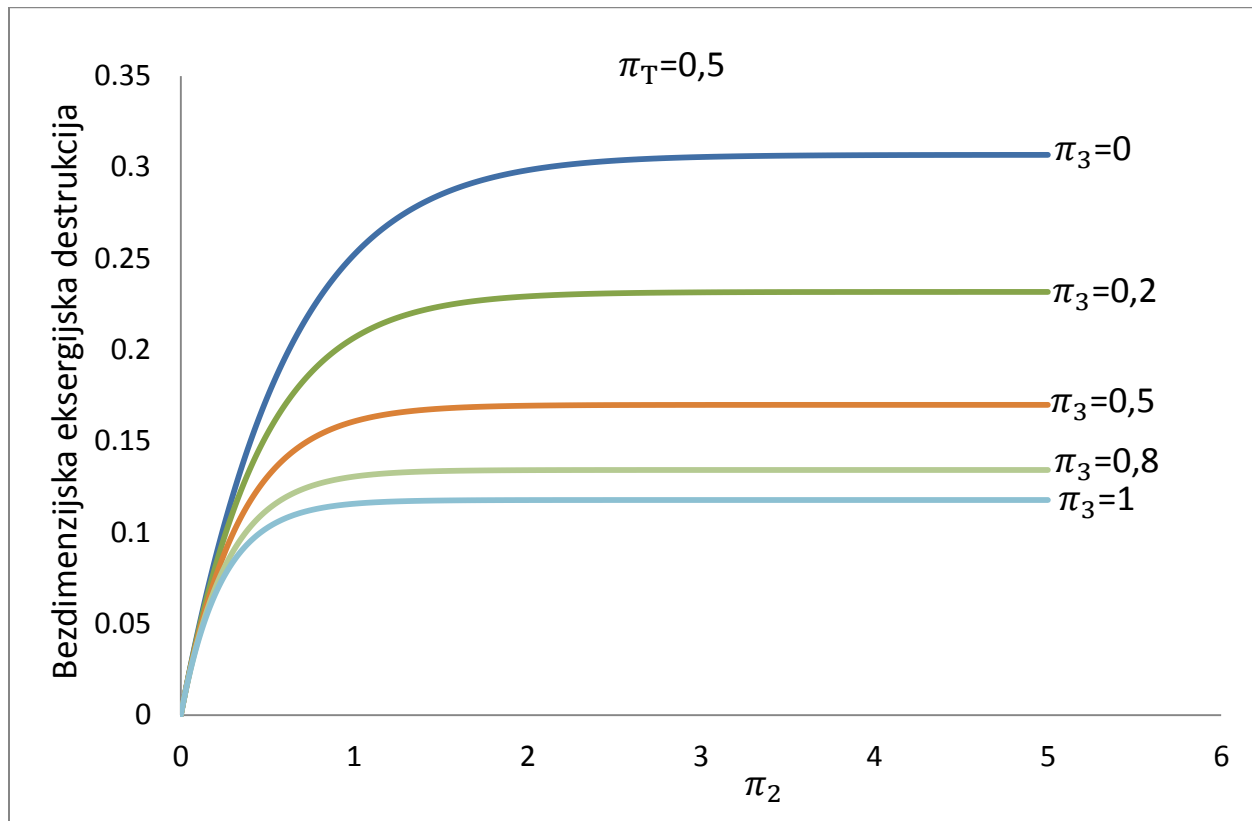
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_T} - 1 \quad (51)$$

Uvrštavajući  $\pi_T=0,25$  i  $\pi_3=0$  u jednadžbu (51) dobiva se sljedeća vrijednost bezdimenzijske eksbergijske destrukcije kada  $\pi_2$  teži u beskonačno,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = 1,6137 \quad (52)$$

Istim postupkom dobiju se vrijednosti bezdimenzijske eksergijske destrukcije i za ostale parametarske krivulje uvrštavajući  $\pi_T=0,25$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (48). Shodno tome dobiju se redom sljedeći rezultati

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = [1,046496; 0,693147; 0,52012; 0,446287] \quad (53)$$



Slika 5. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$

Za matematičku analizu i definiranje horizontalnih asimptoti vrijedi prethodno izvedeni izraz za promjenu bezdimenzijske eksergijske destrukcije kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ .

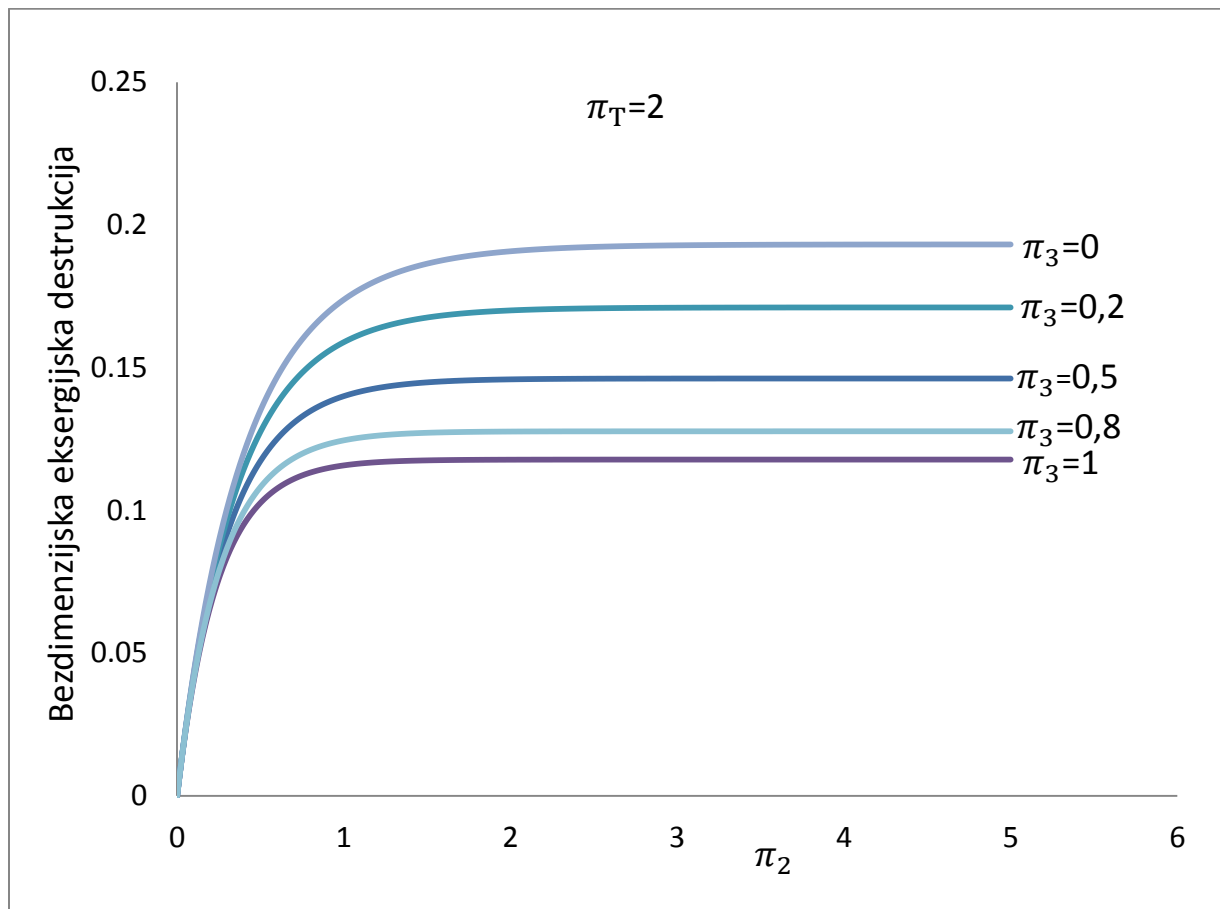
Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=0,5$  u jednadžbu (51) slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = 0,30685 \quad (54)$$

Uvrštavajući  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (48) kao i u prethodnom slučaju slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = [0,23175; 0,16989; 0,13423; 0,11778] \quad (55)$$

Iz dobivenih rezultata lako je zaključiti da je eksergijska destrukcija veća ukoliko je veća i razlika ulaznih temperatura jače i slabije struje, odnosno manja ukoliko je manja razlika ulaznih temperatura jače i slabije struje. Razmatra se još i slučaj bezdimenzijske eksergijske destrukcije istosmjernog rekuperatora kada je  $\pi_T=2$ , odnosno slučaj kada je ulazna temperatura jače struje dvostruko veća od ulazne temperature slabije struje.



Slika 6. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=2$  u jednadžbu (51) slijedi :

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = 0,19313 \quad (56)$$

Uvrštavajući  $\pi_T=2$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (48) slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = [0,17107; 0,1461; 0,12768; 0,11778] \quad (57)$$

Ako se iz sva tri prethodna dijagrama uzme vrijednost bezdimenzijske eksergijske destrukcije za istu značajku  $\pi_3$  mogu se ustanoviti bitni zaključci u vezi utjecaja omjera ulaznih temperatura jače i slabije struje na eksergijsku destrukciju.

Uzevši eksergijsku destrukciju za  $\pi_3=0$  vidljivo je kako je ona za  $\pi_T=0,25$  jednaka 1,6137, za  $\pi_T=0,5$  0,30685, a za  $\pi_T=2$  0,19313. Iz toga se mogu izvući dva bitna zaključka. Jedan od njih je već ranije izrečen i govori nam o tome da što je veća razlika temperatura jače i slabije struje na ulazu u rekuperator to je bezdimenzijska eksergijska destrukcija veća što se jasno vidi i iz dijagrama i iz dobivenih brožanih vrijednosti. Druga bitna činjenica koju je potrebno istaknuti je i utjecaj koja je struja hladnija a koja je toplija. Uočljivo je da u slučaju kada je jača struja toplija dolazi do manje bezdimenzijske eksergijske destrukcije, odnosno kad je jača struja hladnija dolazi do veće bezdimenzijske eksergijske destrukcije. Isto tako bitno je uočiti kako je vrijednost eksergijske destrukcije za  $\pi_3=1$  i  $\pi_T=2$  jednaka vrijednosti eksergijske destrukcije za  $\pi_3=1$  i  $\pi_T=0,5$ , te iznosi 0,11778. To pokazuje da u slučaju ako su vrijednosti toplinskih kapaciteta jače i slabije struje jednaki postaje nebitno koja je struja toplija a koja je hladnija, odnosno u tom slučaju položaj struja ne utječe na eksergijsku destrukciju. Bitno je naglasiti da to vrijedi samo u slučaju kada je  $\pi_3=1$ !

### **3.3. Omjer bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora**

U ovom poglavlju razmatra se omjer bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora, te će se shodno tome prikazati njihovo ponašanje ovisno o omjeru ulaznih temperatura jače i slabije struje. Prvotno je potrebno odrediti matematički oblik navedenog omjera. S obzirom da je matematički oblik bezdimenzijske eksergijske destrukcije za istosmjerni rekuperator prethodno dan jednadžbom (46), te je temperaturna značajka  $\pi_1$  koja predstavlja iskoristivost topline rekuperatora dana jednadžbom (6), jednostavnim putem može se doći do traženog omjera dijeljenjem navedenih dviju jednadžbi.

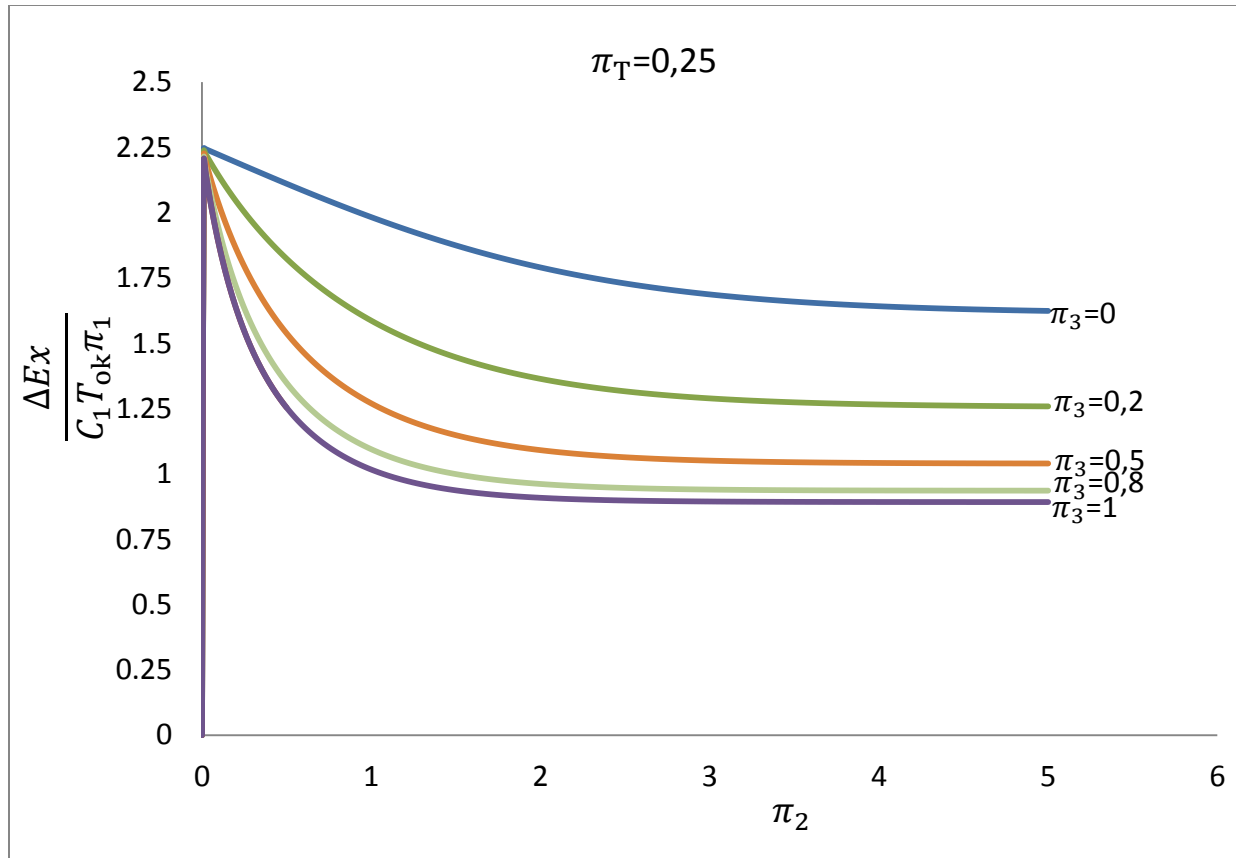
Prema tome dijeljenjem jednadžbe (46) sa jednadžbom (6) dobiva se traženi omjer

$$\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \frac{\ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} + \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} \quad (58)$$

Nakon određivanja matematičkog oblika slijedi prikazivanje ponašanja istosmjernih rekuperatora u pripadajućim dijagramima. Detaljnije o toj temi u poglavlju 3.3.1.

### ***3.3.1 Dijagramski prikazi omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora***

Dijagrami prikazuju ovisnost omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline rekuperatora (ordinata) o bezdimenzijskoj značajki broja prijenosnih jedinica  $\pi_2$  (apscisa). Kao parametarske krivulje koriste se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$  koje su stupnjevane po 0,1 nad intervalom od 0 do 1. Bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  stupnjevana je po 0,01 na intervalom od 0 do 5, dok se bezdimenzijska značajka  $\pi_T$  držala konstantnom za 3 slučaja ( $\pi_T = 0,25; 0,5; 2$ ).



Slika 7. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,25$

Iz slike 7. odmah se može zaključiti kako sve parametarske krivulje teže u istu točku kada  $\pi_2$  teži u 0. To se može lako dokazati sljedećim postupkom

$$\begin{aligned} \lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} &= \lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} \\ &+ \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} \end{aligned} \quad (59)$$

Rješenje jednadžbe poprima neodređen oblik,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \frac{0}{0} \quad (60)$$

Jednadžbu (72) potrebno je podvrgnuti L'Hospitalovom pravilu kao što slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) \right]}{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \right]} + \frac{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \right]}{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \right]} \quad (61)$$

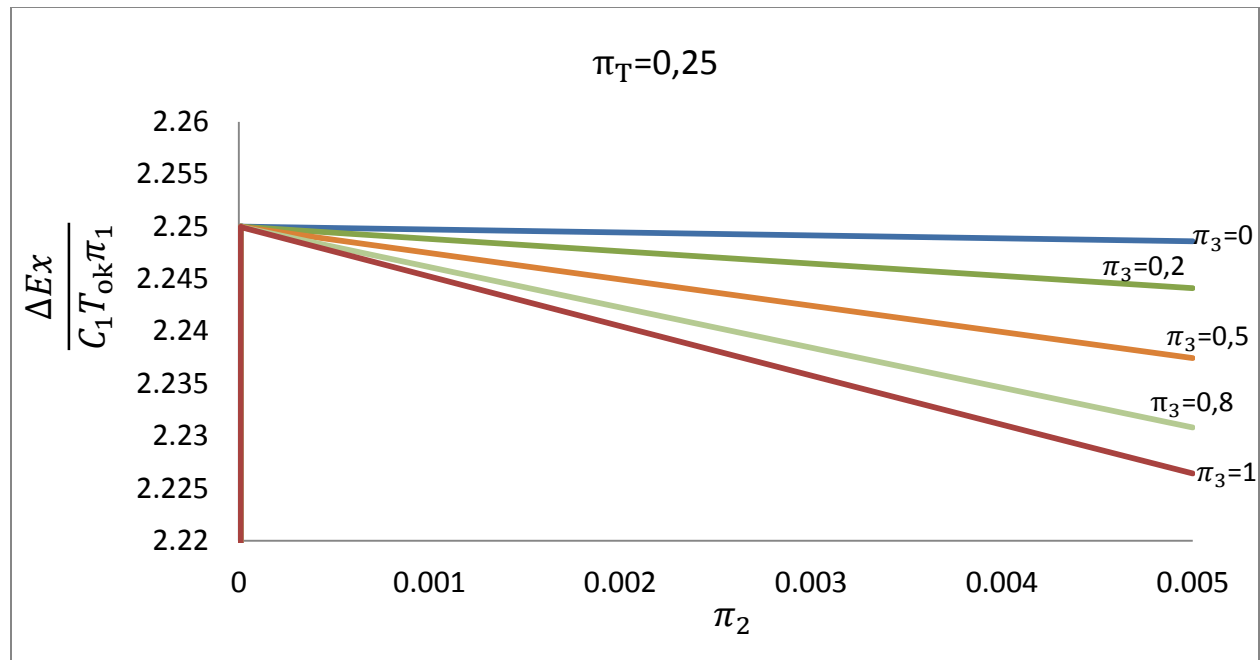
Daljnjim deriviranjem brojnika i nazivnika po  $\pi_2$  dobiva se sljedeći oblik jednadžbe,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \pi_T + \frac{1}{\pi_T} - 2 \quad (62)$$

Uvrštavanjem bezdimenzijske značajke  $\pi_T = 0.25$  u jednadžbu (62) dobiva se rješenje

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = 2,25 \quad (63)$$

Uspoređujući dobiveni rezultat u jednadžbi (63) sa slikom 7 evidentno je kako se u potpunosti slažu. Iz jednadžbe (62) može se zaključiti da u slučaju kada  $\pi_2 \rightarrow 0$  omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline rekuperatora ovisi samo o omjeru ulaznih temperatura jače i slabije struje  $\pi_T$ . Odnosno za istu vrijednost značajke  $\pi_T$ , ima isti iznos neovisno o kojoj je parametarskoj krivulji riječ.



Slika 8. Omjer eksbergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,25$  (uvećan)

Slika 8. je predočena iz razloga kako bi se jasnije vidjelo kako se sve parametarske krivulje spajaju u jednoj točki, te je konstruiran sa korakom od 0,001 kako bi se napravio jasniji prikaz.

Sljedeći korak je analizirati horizontalne asimptote svake parametarske krivulje kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ . Shodno tome slijedi,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{0k} \pi_1} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} + \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3}} \quad (64)$$

Daljnijim rješavanjem jednadžbe dobivamo sljedeći matematički oblik

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{0k} \pi_1} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\ln \left( 1 - \frac{1}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1}{1 + \pi_3}} \quad (65)$$



Nazivnik jednadžbe (65) određen je u poglavlju 3.2.1 za sva tri slučaja ( $\pi_T=0,25$ ; 0,5; 2) te se pri daljnjem proračunu mogu koristiti već izračunate vrijednosti.

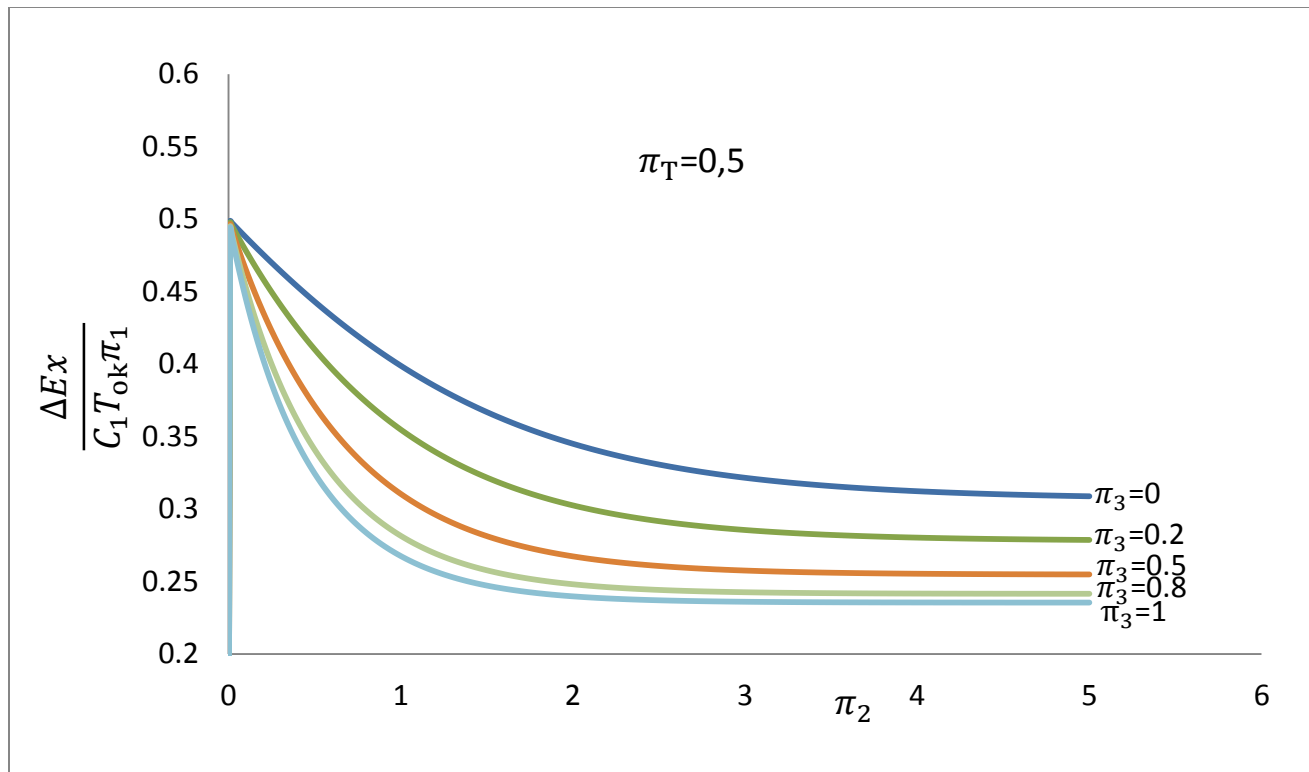
Za slučaj kada je  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=0,25$  brojnik jednadžbe (65) poprima neodređeni oblik koji je preko L'Hospitalovog pravila prethodno određen u jednadžbi (51). Prema tome koristeći rješenje jednadžbe (51) i primjenjujući je u jednadžbi (65) dolazi se do izraza

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \frac{\ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_T} - 1}{\frac{1}{1 + \pi_3}} = 1,6137 \quad (66)$$

Uvrštavanjem  $\pi_T=0,25$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (65) dobivamo redom sljedeće vrijednosti omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,25$ .

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = [1,255; 1,0397; 0,93618; 0,8982] \quad (67)$$

Nakon što su određene sve horizontalne asimptote za slučaj kada je  $\pi_T=0,25$ , sada se razmatra slučaj omjera bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za slučaj kada je omjer ulaznih temperatura jače i slabije struje  $\pi_T=0,5$ .



Slika 9. Omjer eksbergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$

Na slici 9 može se zaključiti, isto kao i na slici 7, kako se sve parametarske krivulje spajaju u jednoj točki kada  $\pi_2 \rightarrow 0$ , odnosno omjer bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline jednak je u toj točki za sve parametarske krivulje. U ovom slučaju već je i iz dijagrama lako utvrditi da kada  $\pi_2$  teži u 0 navedeni omjer iznosi 0,5.

Ovu tvrdnju lako se može matematički dokazati koristeći prethodno izvedeni izraz za slučaj kada je  $\pi_T=0,25$ . Dakle, uvrštavajući  $\pi_T=0,5$  u jednadžbu (62) dobiva se

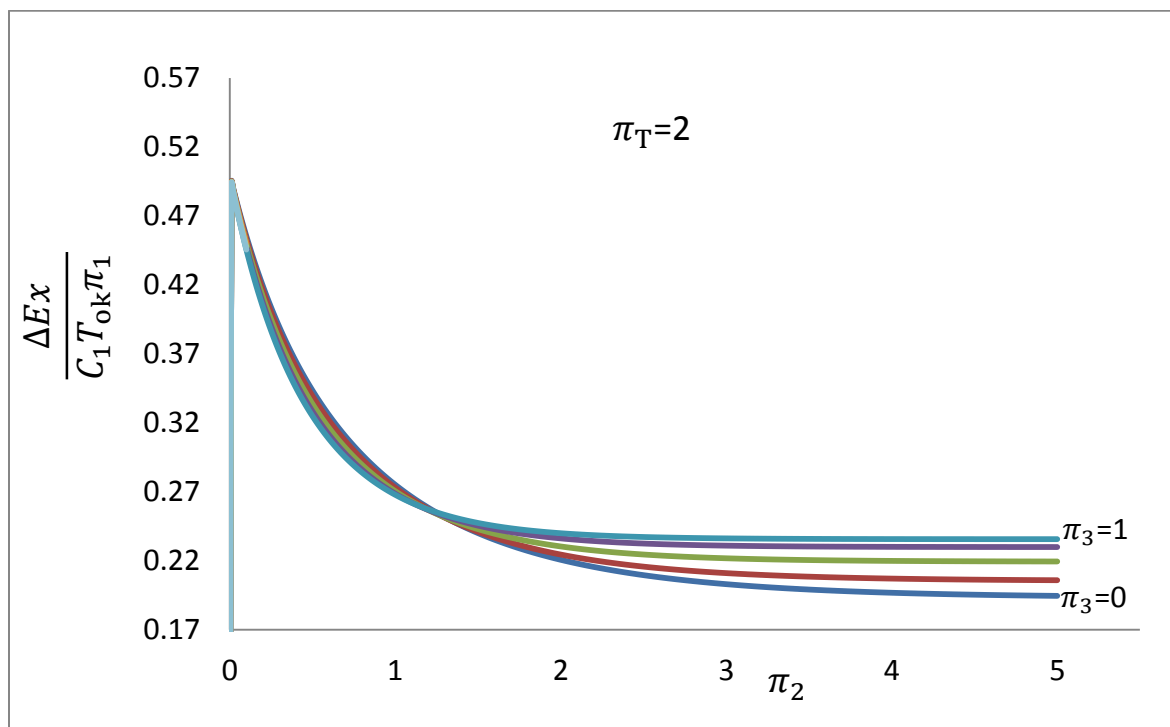
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \pi_T + \frac{1}{\pi_T} - 2 = 0,5 \quad (68)$$

Dobivena vrijednost iz jednadžbe (68) podudara se s dijagramskim prikazom što daje dobar analitički i grafički prikaz omjera bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora. Sljedeći korak zahtijeva određivanje horizontalnih asimptota za svih 5 parametarskih krivulja kada  $\pi_2$  teži u  $\infty$ .

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=0,5$  u jednadžbu (66) i  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (65) dobivamo redom sljedeće vrijednosti omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$ .

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = [0,30685; 0,2781; 0,2548; 0,2416; 0,2355] \quad (69)$$

Uspoređujući dobivene rezultate za  $\pi_T=0,25$  i  $\pi_T=0,5$  vidljivo je kako su omjeri bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline veći što je veći omjer ulaznih temperatura jače i slabije struje i obrnuto. Sljedeći dijagram koji je prikazan je dijagram za slučaj kada je  $\pi_T=2$ .



Slika 10. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$

Jednako kao i u prošla dva slučaja potrebno je odrediti vrijednost omjera bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline rekuperatora kada  $\pi_2 \rightarrow 0$ . Shodno tome, koristeći jednadžbu (68) te uvrštavajući u jednadžbu  $\pi_T=2$  dobivamo

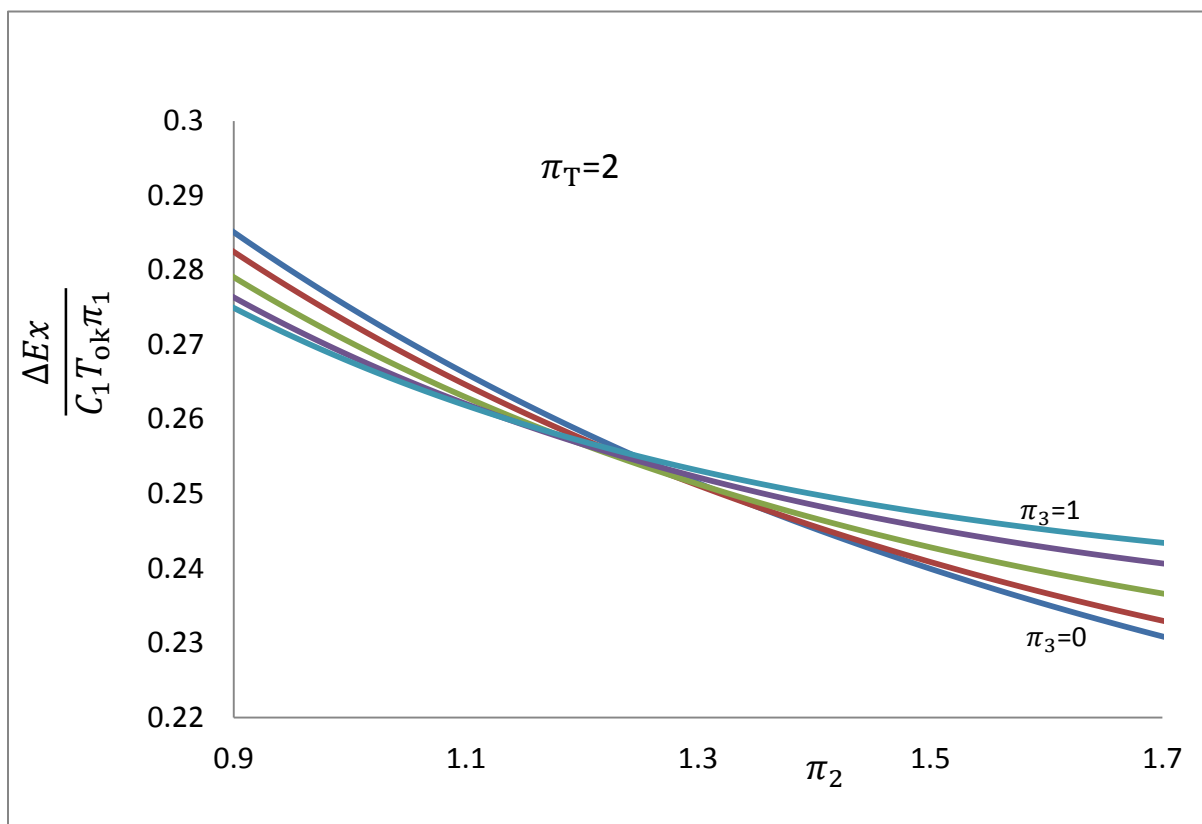
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \pi_T + \frac{1}{\pi_T} - 2 = 0,5 \quad (70)$$

Iz jednadžbe (70), kao i iz jednadžbe (62) i (68) može se zaključiti kako u slučaju kada  $\pi_2 \rightarrow 0$  omjer bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora ovisi samo o omjeru ulaznih temperatura jače i slabije struje.

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=2$  u jednadžbu (66) i  $\pi_T=2$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (65) dobivamo redom sljedeće vrijednosti omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$ .

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = [0,19313; 0,20528; 0,21915; 0,2298; 0,2355] \quad (71)$$

Slika 10 je specifična jer se može zaključiti kako se sve krivulje sijeku u jednoj točki u intervalu od  $\pi_2=1$  do  $\pi_2=2$ . Međutim slika 11 koja zapravo predstavlja uvećanu sliku 10 pokazuje kako se sve parametarske krivulje *ne sijeku* u istoj točki. Razlike u rezultatima su zanemarive ali ipak postoje.



Slika 11. Omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$  (uvećan)

S obzirom da se samo grafičkom analizom ne može sigurno utvrditi kako se sve parametarske krivulje ne sijeku u istoj točki napraviti će se i matematička analiza.

Izjednačavanjem jednadžbe (58) za proizvoljno odabrane parametarske krivulje  $\pi_3=1$   $\pi_T=2$  i  $\pi_3=0,5$   $\pi_T=2$  dobivamo sljedeću jednadžbu,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} &= \frac{\ln\left(1 + \frac{1 - \exp(-2\pi_2)}{2}\right) + \ln\left(1 - \frac{1 - \exp(-2\pi_2)}{4}\right)}{\frac{1 - \exp(-2\pi_2)}{2}} \\ &= \frac{\ln\left(1 + \frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{1.5}\right) + 2 \ln\left(1 - \frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{6}\right)}{\frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{1.5}} \end{aligned} \quad (72)$$

Daljnijim iterativnim postupkom dolazi se do rješenja jednadžbe (72) pri čemu bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  iznosi 1,213.

Kako bi se dokazalo da se sve krivulje ne sijeku u istoj točki napraviti će se još jedna analiza i to za slučaj kada je  $\pi_3=0,8$   $\pi_T=2$  i  $\pi_3=0,5$   $\pi_T=2$ . Uvrštavajući navedene parametre u jednadžbu (58) dobiva se sljedeća jednadžba,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} &= \frac{\ln\left(1 + \frac{1 - \exp(-1.8\pi_2)}{1.8}\right) + \ln\left(1 - 0.4 \frac{1 - \exp(-1.8\pi_2)}{1.8}\right)}{\frac{1 - \exp(-1.8\pi_2)}{1.8}} \\ &= \frac{\ln\left(1 + \frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{1.5}\right) + 2 \ln\left(1 - \frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{6}\right)}{\frac{1 - \exp(-1.5\pi_2)}{1.5}} \end{aligned} \quad (73)$$

Iterativnim postupkom dolazimo do rješenja jednadžbe, te bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  shodno tome iznosi 1,24728. Uspoređujući dvije dobivene vrijednosti dokazano je kako se parametarske krivulje ne sijeku u istoj točki. Ako se uzmu za primjer parametarske krivulje  $\pi_3=0,5$  i  $\pi_3=0,8$  vidljivo je kako je lijevo od njihove točke sjecišta omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline veći za  $\pi_3=0,5$  dok je desno od točke sjecišta krivulja navedeni omjer veći za  $\pi_3=0,8$ .

### 3.4 Eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog rekuperatora

Eksergijski stupanj djelovanja definiran je kao omjer ukupne izlazne i ukupne ulazne eksergije.

$$\varepsilon_{\text{ex}} = \frac{Ex_{\text{IZ}}}{Ex_{\text{UL}}} = f_3(\pi_2, \pi_3, \pi_T, \pi_{\text{ok}}) \quad (74)$$

Izraz (74) može se napisati u još jednom obliku,

$$\varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\Delta Ex}{Ex_{\text{UL}}} = 1 - \frac{\Delta Ex}{Ex_{\text{UL1}} + Ex_{\text{UL2}}} \quad (75)$$

Dijeljenjem i brojnika i nazivnika jednadžbe (75) sa  $C_1 T_{\text{ok}}$  dobiva se sljedeći oblik jednadžbe

$$\varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{\text{ok}}}}{\frac{Ex_{\text{UL1}}}{C_1 T_{\text{ok}}} + \frac{Ex_{\text{UL2}}}{C_1 T_{\text{ok}}}} \quad (76)$$

S obzirom kako je brojnik jednadžbe (76) prethodno određen preostaje jedino odrediti bezdimenzijsku eksergiju na ulazu u rekuperator jače i slabije struje.

Shodno tome dijeleći jednadžbu (32) sa  $C_1 T_{\text{ok}}$  dobivamo izraz za bezdimenzijsku eksergiju slabije struje na ulazu u rekuperator

$$\frac{Ex_{\text{UL1}}}{C_1 T_{\text{ok}}} = \frac{T_1'}{T_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{T_1'}{T_{\text{ok}}}\right) \quad (77)$$

Poznato je da bezdimenzijska značajka  $\pi_{\text{ok}}$  predstavlja omjer okolišne temperature i temperature slabije struje na ulazu u rekuperator, te stoga jednadžbu (77) možemo zapisati u konačnom obliku kao

$$\frac{Ex_{\text{UL1}}}{C_1 T_{\text{ok}}} = \frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right) \quad (78)$$

Bezdimenzijsku eksergiju jače struje na ulazu u rekuperator određujemo dijeleći jednadžbu (34) sa  $C_1 T_{\text{ok}}$ , odnosno

$$\frac{Ex_{\text{UL2}}}{C_1 T_{\text{ok}}} = \frac{C_2 T_2'}{C_1 T_{\text{ok}}} - \frac{C_2}{C_1} - \frac{C_2}{C_1} \ln\left(\frac{T_2'}{T_{\text{ok}}}\right) \quad (79)$$

Dijeljenjem prvog i trećeg člana jednadžbe (79) s ulaznom temperaturom slabije struje  $T_1'$  dobivamo,

$$\frac{Ex_{UL2}}{C_1 T_{ok}} = \frac{C_2 \frac{T_2'}{T_1'}}{C_1 \frac{T_{ok}}{T_1'}} - \frac{C_2}{C_1} - \frac{C_2}{C_1} \ln \left( \frac{\frac{T_2'}{T_1'}}{\frac{T_{ok}}{T_1'}} \right) \quad (80)$$

Poznavajući bezdimenzijske značajke  $\pi_T$ ,  $\pi_{ok}$  i  $\pi_3$  lako oblikujemo jednadžbu (80) u oblik

$$\frac{Ex_{UL2}}{C_1 T_{ok}} = \frac{\pi_T}{\pi_{ok} \pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln \left( \frac{\pi_T}{\pi_{ok}} \right) \quad (81)$$

Konačno kada su određeni matematički oblici za bezdimenzijske eksergije na ulazima u rekuperator može se doći do traženog matematičkog oblika za eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog rekuperatora.

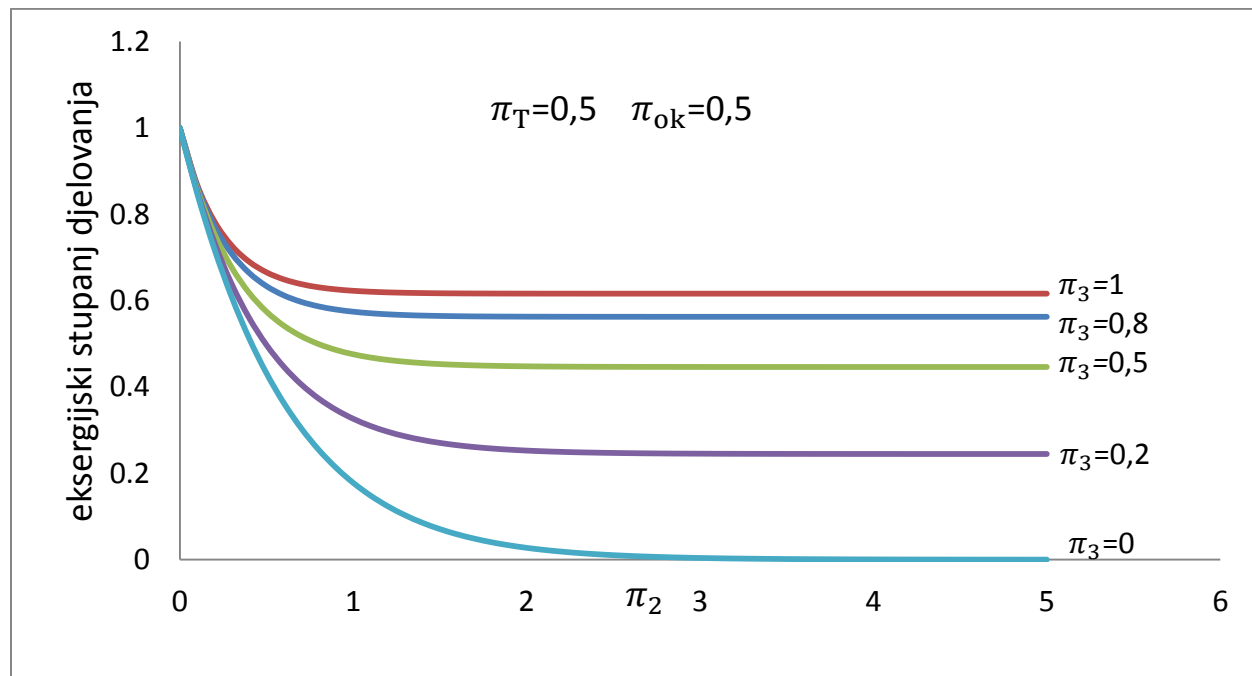
Prema tome uvrštavajući jednadžbe (46), (78) i (81) u jednadžbu (76) dobiva se izraz za eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog rekuperatora, a on glasi

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ex} = 1 - & \left( \frac{\ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right)}{\frac{1}{\pi_{ok}} - 1 - \ln \left( \frac{1}{\pi_{ok}} \right) + \frac{\pi_T}{\pi_{ok} \pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln \left( \frac{\pi_T}{\pi_{ok}} \right)} \right) \\ & + \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1}{\pi_{ok}} - 1 - \ln \left( \frac{1}{\pi_{ok}} \right) + \frac{\pi_T}{\pi_{ok} \pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln \left( \frac{\pi_T}{\pi_{ok}} \right)} \quad (82) \end{aligned}$$

Nakon što je dobiven traženi izraz sljedeći korak je dijagramski prikazati eksergijske stupnjeve djelovanja istosmjernog rekuperatora za različite parametarske krivulje, a o tome detaljnije u poglavlju 3.4.1.

### 3.4.1 Dijagramski prikazi eksergijskog stupnja djelovanja istosmjernog rekuperatora

Dijagrami prikazuju ovisnost eksergijskog stupnja djelovanja istosmjernog rekuperatora o bezdimenzijskoj značajki prijenosnih jedinica  $\pi_2$ . Na ordinati se nalazi eksergijski stupanj djelovanja dok se na apscisi nanosi značajka  $\pi_2$  u intervalu od 0 do 5 sa korakom 0.1. Kao parametarske krivulje uzimaju se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$ , u intervalima od 0 do 1 sa korakom 0.1. Bezdimenzijska značajka omjera ulaznih temperatura jače i slabije struje  $\pi_T$  je držana konstantnom kao i bezdimenzijska značajka omjera okolišne temperature i ulazne temperature slabije struje. U ovom poglavlju razmatra se ponašanje eksergijskog stupnja djelovanja istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T = [0.5, 2]$  i  $\pi_{ok} = [0.5, 2]$ . Za prikazivanje ponašanja eksergijskog stupnja djelovanja ne razmatra se slučaj kada je  $\pi_T = 0.25$  kao što je bio slučaj prilikom prikazivanja eksergijske destrukcije i omjera eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline. Dovoljno je prikazati ponašanje eksergijskog stupnja djelovanja kada je temperatura jače struje na ulazu veća i slučaj kad je manja od ulazne temperature slabije struje. Isto tako razmatra se ponašanje istosmjernog rekuperatora kada je okolišna temperatura veća i kada je manja od temperature slabije struje na ulazu.



Slika 12. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 0,5$  i  $\pi_{ok} = 0,5$



Iz slike 12 se uočava kako je eksergijski stupanj djelovanja najveći kada su toplinski kapaciteti jače i slabije struje jednaki, odnosno najmanji je kada jedna od struja isparava ili kondenzira.

Sada je potrebno odrediti horizontalne asimptote svake parametarske krivulje kada  $\pi_2$  teži u beskonačno. Shodno tome slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\ln\left(1 - \frac{1}{1 + \pi_3}(1 - \pi_T)\right) + \frac{1}{\pi_3} \ln\left(1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3}\left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)\right)}{\frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right) + \frac{\pi_T}{\pi_3 \pi_{\text{ok}}} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln\left(\frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}}\right)} \quad (83)$$

Iz jednadžbe (83) proizlazi jedan važan zaključak, a to je da u slučaju ako je  $\pi_T = \pi_{\text{ok}}$ , nazivnik gornje jednadžbe ne ovisi o bezdimenzijskoj značajki  $\pi_3$ , odnosno jednadžba (83) u tom slučaju glasi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\ln\left(1 - \frac{1}{1 + \pi_3}(1 - \pi_T)\right) + \frac{1}{\pi_3} \ln\left(1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3}\left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)\right)}{\frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right)} \quad (84)$$

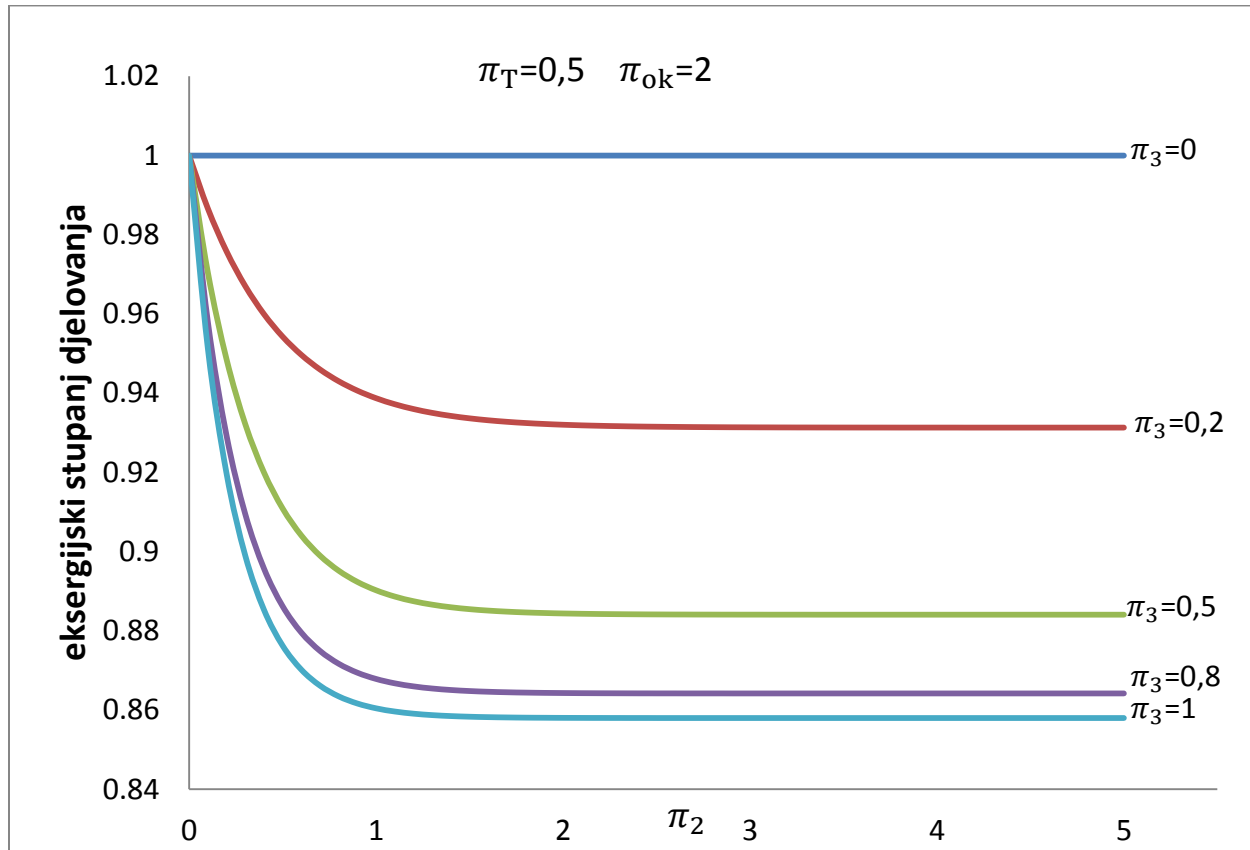
Uvrštavajući u jednadžbu (82) bezdimenzijsku značajku  $\pi_3=0$  dobiva se neodređeni oblik u brojniku. Naknadnom primjenom L'Hospitalovog pravila dobiva se sljedeći izraz kada je  $\pi_3=0$  i  $\pi_T=\pi_{\text{ok}}$ ,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_T} - 1}{\frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right)} \quad (85)$$

Bitno je naglasiti kako izraz (84) vrijedi samo kada je  $\pi_T=\pi_{\text{ok}}$  !!

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (85) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (83) za vrijednosti parametarskih značajki  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=0,5$  dobivaju se redom sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [0,0,2447; 0,4463; 0,5626; 0,61616] \quad (86)$$



Slika 13. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=2$

Uspoređujući sliku 13 sa slikom 12 može se zaključiti kako se postiže znatno veći eksergijski stupanj djelovanja u slučaju kada je okolišna temperatura veća od temperature slabije struje na ulazu u rekuperator. U ovom slučaju je eksergijski stupanj djelovanja najveći kada jedna od struja kondenzira ili isparava.

Tijekom određivanja horizontalnih asimptota može se koristiti prethodno dobiveni izraz (83), dok izraz (85) ne vrijedi kada je  $\pi_T \neq \pi_{ok}$  iz razloga što tada nazivnik jednadžbe (83) ovisi bezdimenzijskoj značajki  $\pi_3$ . To se može lako dokazati množenjem i brojnika i nazivnika jednadžbe (83) sa  $\pi_3$ .

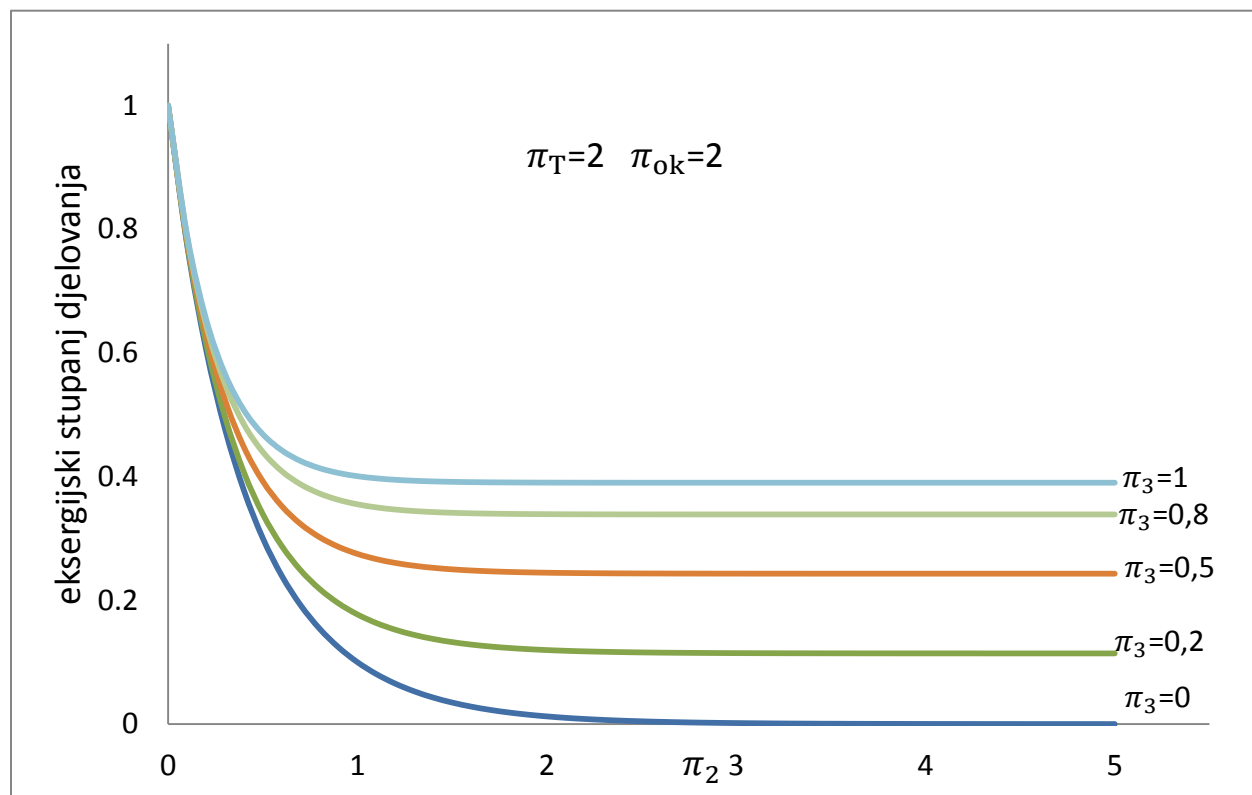
Shodno tome slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\pi_3 \ln \left( 1 - \frac{1}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi_3}{1 + \pi_3} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\pi_3 \left( \frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln \left( \frac{1}{\pi_{\text{ok}}} \right) \right) + \frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln \left( \frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}} \right)} \quad (87)$$

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (87) za  $\pi_T \neq \pi_{\text{ok}}$  vidljivo je da se postiže eksergijski stupanj djelovanja koji iznosi 1, što se jasno vidi i sa slike 13.

Prema tome uvrštavajući  $\pi_3=0$  u jednadžbu (87) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (83) za vrijednosti parametarskih značajki  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{\text{ok}}=2$  dobivaju se redom sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{\text{ex}} = [1; 0,93133; 0,88409; 0,86421; 0,858] \quad (88)$$

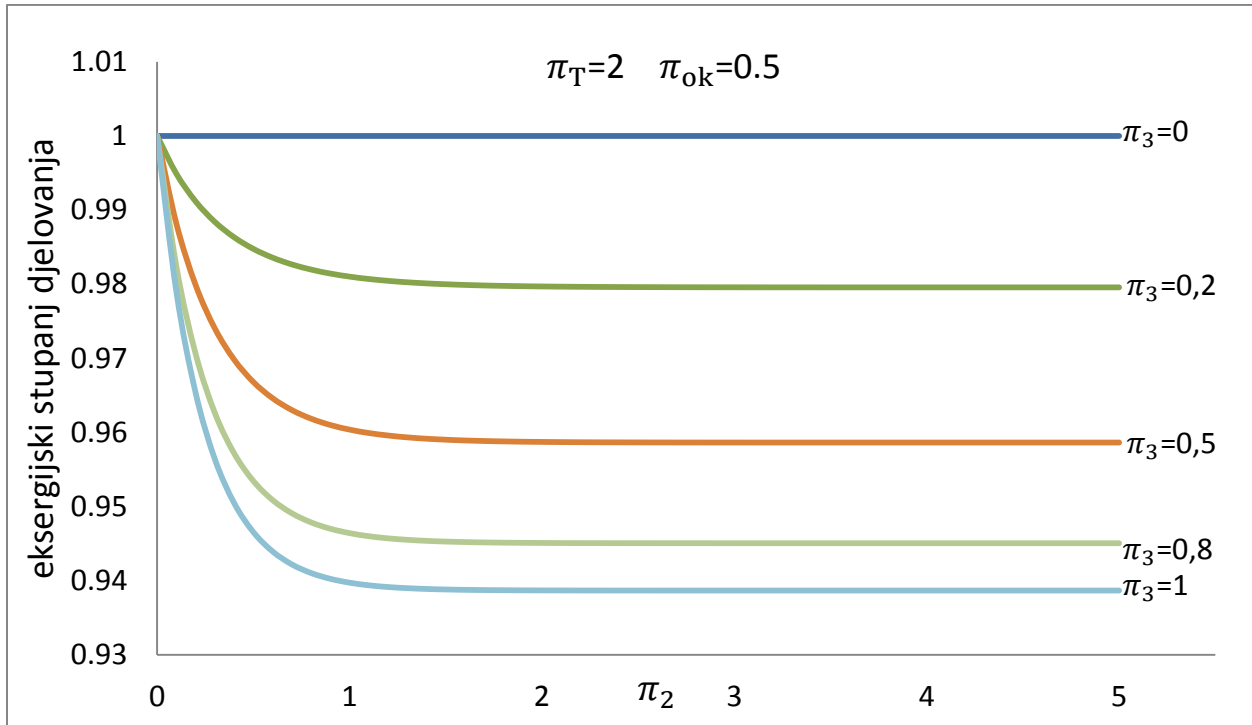


Slika 14. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$  i  $\pi_{\text{ok}}=2$

Ovo je slučaj u kojem se postižu znatno manji stupnjevi djelovanja nego u prva dva slučaja. Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (85) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (83) za vrijednosti

parametarskih značajki  $\pi_T=2$  i  $\pi_{ok}=2$  dobivaju se redom sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ ,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [0; 0,11426; 0,24316; 0,3389; 0,39019] \quad (89)$$



Slika 15. Eksergijski stupanja djelovanja istosmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$  i  $\pi_{ok}=0,5$

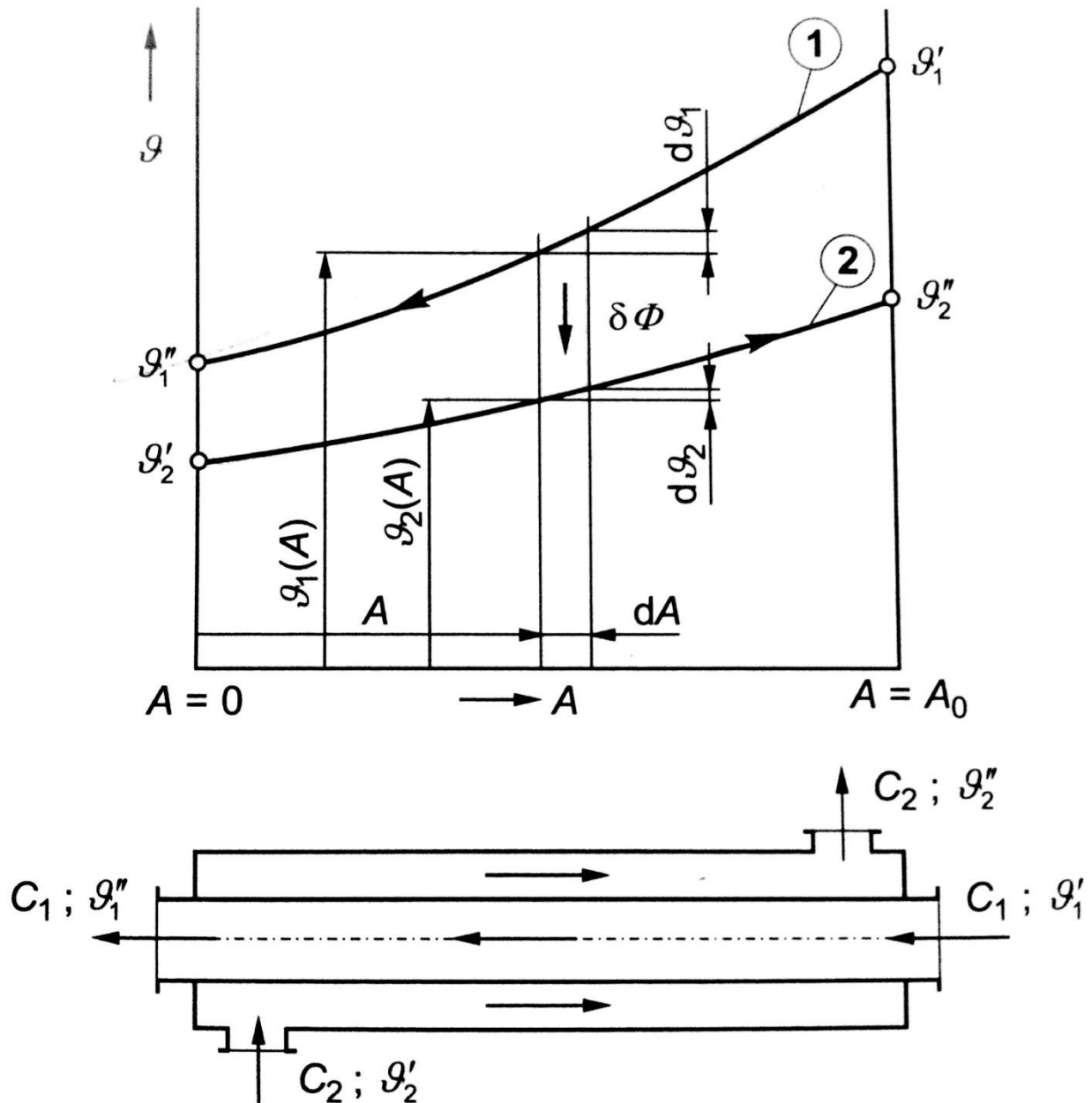
Sa slike 15 vidljivo je kako se u ovom slušaju postižu veliki stupnjevi djelovanja neovisno o kojoj je parametarskoj krivulji riječ. Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (87) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (83) za vrijednosti parametarskih značajki  $\pi_T=2$  i  $\pi_{ok}=0.5$  dobivaju se redom sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ ,

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [1; 0,9795; 0,9586; 0,94506; 0,93867] \quad (90)$$

## 4. PROTUSMJERNI REKUPERATORI

### 4.1 Općenito

Protusmjerni rekuperatori su takvi aparati kod kojih su struje međusobno paralelne ali teku u suprotnim smjerovima. Slika 16. prikazuje jedan takav tip rekuperatora.



Slika 16. Dijagramski prikaz temperaturne raspodjele struja u ovisnosti o površini protusmjernog rekuperatora [2]

#### 4.2 Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora

Kao što je slučaj i kod istosmjernih rekuperatora, ukupna eksergija sustava na ulazu jednaka je zbroju eksergije slabije struje na ulazu i eksergije jače struje na ulazu, dok je ukupna eksergija sustava na izlazu jednaka zbroju eksergije slabije struje na izlazu i eksergije jače struje na izlazu. Za iznalaženje matematičkog oblika bezdimenzijske eksergijske destrukcije može se koristiti jednadžba (45) s obzirom na to da je proračun bezdimenzijske eksergijske destrukcije do tog trenutka jednak i za istosmjerni i za protusmjerni rekuperator. Jednadžba (45) glasi

$$\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = \ln(1 - \pi_1(1 - \pi_T)) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \pi_1 \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (91)$$

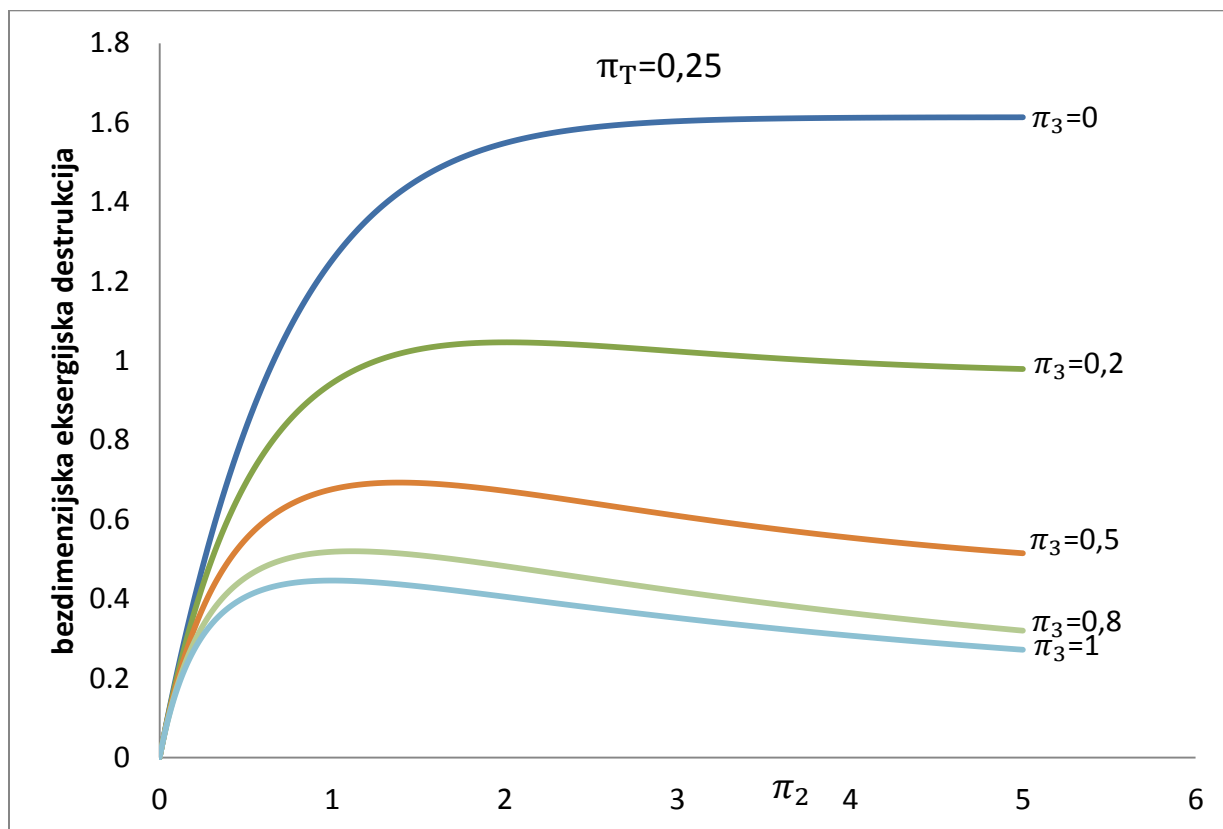
te naknadnim uvrštavanjem značajke  $\pi_1$  za protusmjerni rekuperator, odnosno jednadžbe (7) u jednadžbu (91) proizlazi krajnji izraz za eksergijsku destrukciju protusmjernog rekuperatora

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} (1 - \pi_T) \right) \\ + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (92)$$

koja pokazuje kako se izrazi za eksergijsku destrukciju protusmjernog i istosmjernog rekuperatora razlikuju samo za značajku  $\pi_1$ , a što potvrđuje i već naglašenu činjenicu da međusobni smjer strujanja fluida bitno utječe na rezultate izračuna relevantnih veličina rekuperatora.

#### 4.2.1 Dijagramski prikazi bezdimenzijske eksergijske destrukcije za protusmjerni rekuperator

Dijagrami se prikazuju u svrhu pokazivanja ponašanja dotičnog rekuperatora ovisno o ulaznim parametrima, te u svrhu njihove kasnije usporedbe s istosmjernim rekuperatorima. Dijagrami pokazuju ovisnost bezdimenzijske eksergijske destrukcije u ovisnosti o značajki broja prijenosnih jedinica  $\pi_2$ . Kao parametarske krivulje koriste se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$  koje su stupnjevane po 0,1 nad intervalom od 0 do 1. Bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  stupnjevana je po 0,01 nad intervalom od 0 do 5, dok se bezdimenzijska značajka  $\pi_T$  držala konstantnom za 3 slučaja ( $\pi_T = 0,25; 0,5; 2$ ).



Slika 17. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 0,25$

Sa slike 17 vidljivo je da u trenutku kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$  eksergijska destrukcija i dalje pada do određene vrijednosti dok je kod istosmjernih rekuperatora držala konstantnu vrijednost. Sljedeći korak je određivanje horizontalnih asimptota za slučaj kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ .

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} (1 - \pi_T) \right) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (93)$$

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (94)$$

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (94) dobiva se neodređeni oblik navedene jednadžbe te se naknadnom primjenom L'Hospitalovog pravila dolazi do sljedećeg izraza kada je  $\pi_T=0,25$  i  $\pi_3=0$

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = \lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_T} - 1 = 1,6137 \quad (95)$$

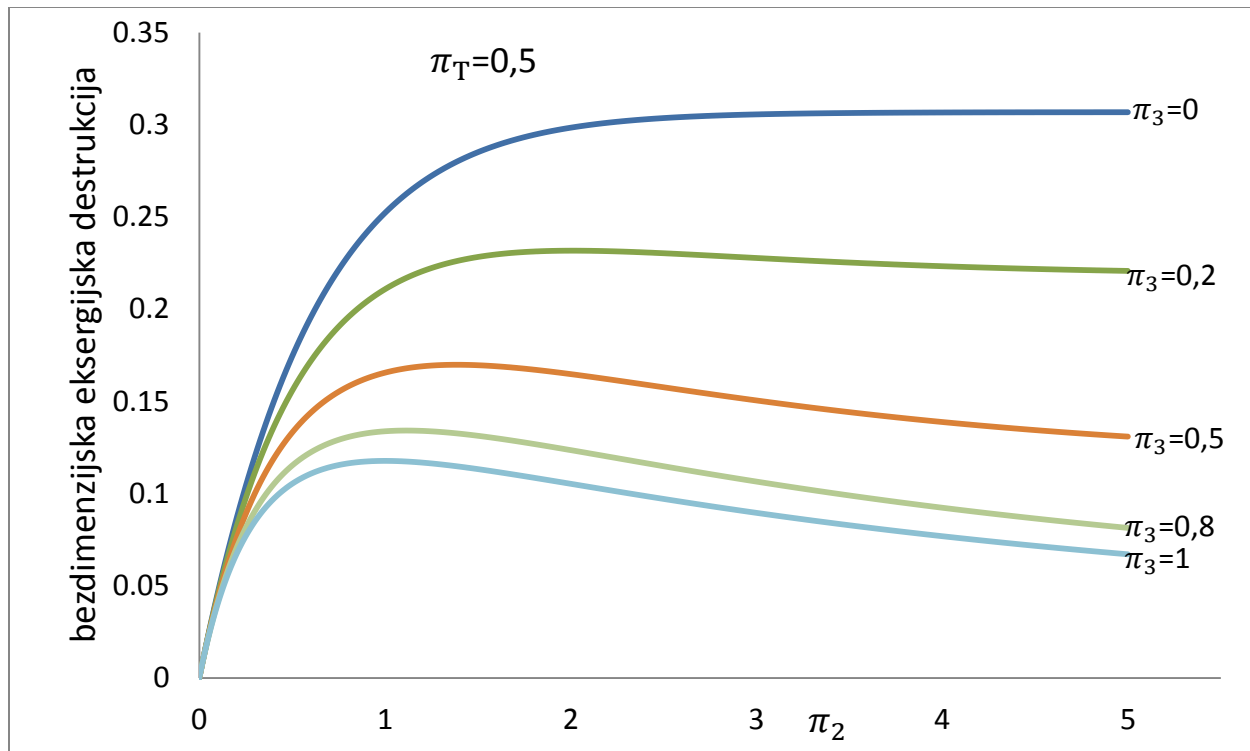
Uspoređujući jednadžbu (95) sa jednadžbom (51) dokazano je kako je iznos eksergijske destrukcije jednak za istosmjerni i protusmjerni rekuperator kada je  $\pi_3=0$ .

Daljnijim uvrštavanjem vrijednosti parametarskih krivulja  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  i  $\pi_T=0,25$  u jednadžbu (94) dobivaju se redom sljedeće vrijednosti

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta E x}{C_1 T_{ok}} = [0,9637; 0,44628; 0,14342; 0] \quad (96)$$

Vidljivo je kako u slučaju kada  $\pi_3$  iznosi 1, odnosno kada su obje struje jednakih toplinskih kapaciteta, eksergijska destrukcija iznosi 0 kada  $\pi_2$  teži u beskonačno. To je specifičan slučaj i takav rekuperator se naziva balansirajući rekuperator.



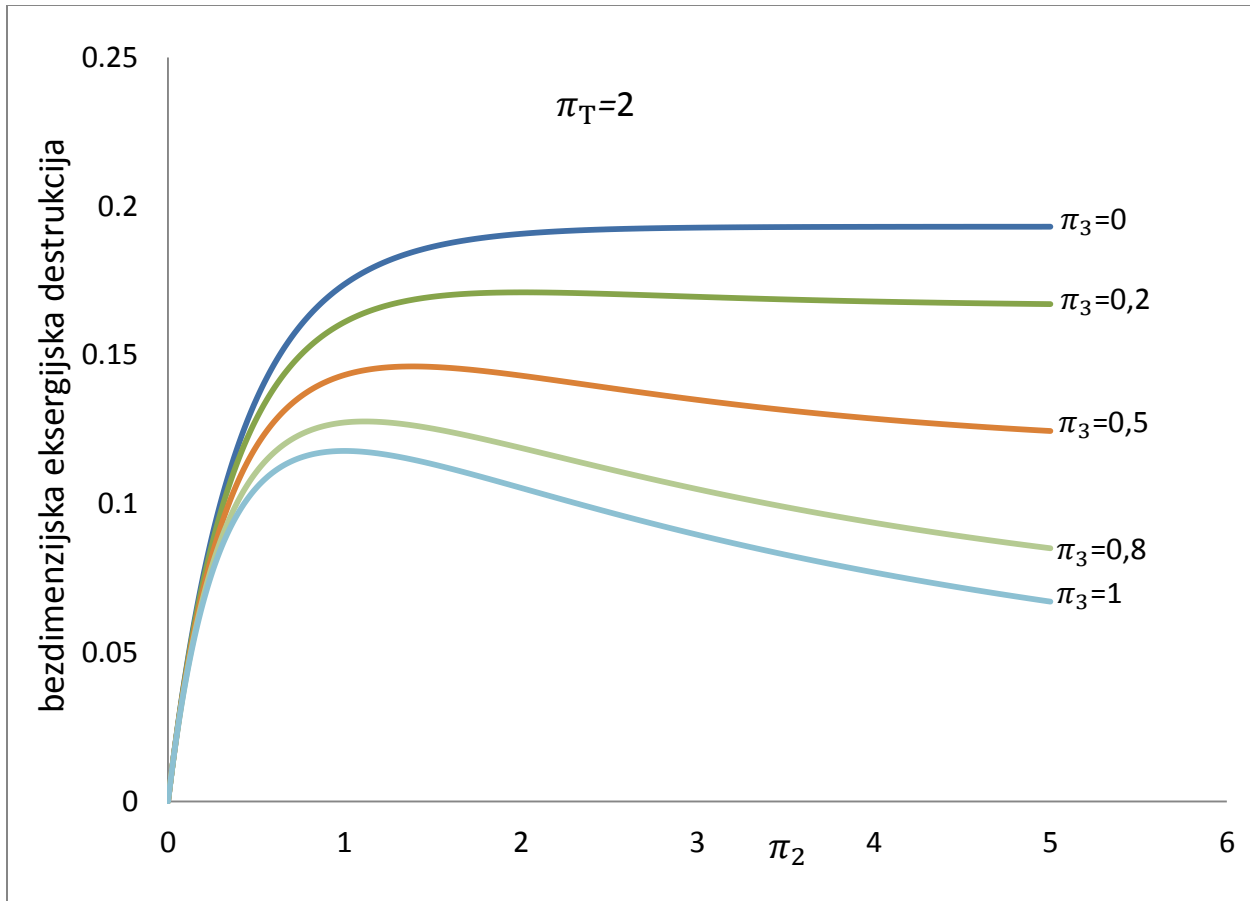


Slika 18. Bezdimezijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$

Kao i u slučaju kod istosmjernog rekuperatora vidljivo je kako je eksergijska destrukcija znatno manja u slučaju kada je manja razlika između temperatura jače i slabije struje na ulazu u rekuperator. Do vrijednosti eksergijske destrukcije za slučaj kada je  $\pi_T=0,5$  dolazi se istim postupkom kao i u prethodnom slučaju.

Shodno tome uvrštavajući  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_3=0$  u jednadžbu (95), te uvrštavajući  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (94) dobiva se

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = [0,30685; 0,21846; 0,11778; 0,04158; 0] \quad (97)$$



Slika 19. Bezdimenzijska eksergijska destrukcija protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$

Uvrštavajući  $\pi_T=2$  i  $\pi_3=0$  u jednadžbu (95), te uvrštavajući  $\pi_T=2$  i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednadžbu (94) dobiva se

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok}} = [0,19314; 0,16634; 0,11778; 0,0546; 0] \quad (98)$$

Rezultati pokazuju zavidno manje eksergijske destrukcije nego što je bio slučaj u prethodna dva slučaja. Međutim usporedbe dotičnih rekuperatora za sve moguće slučajeve detaljnije su obrađene u poglavlju 5.

### 4.3. Omjer bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora

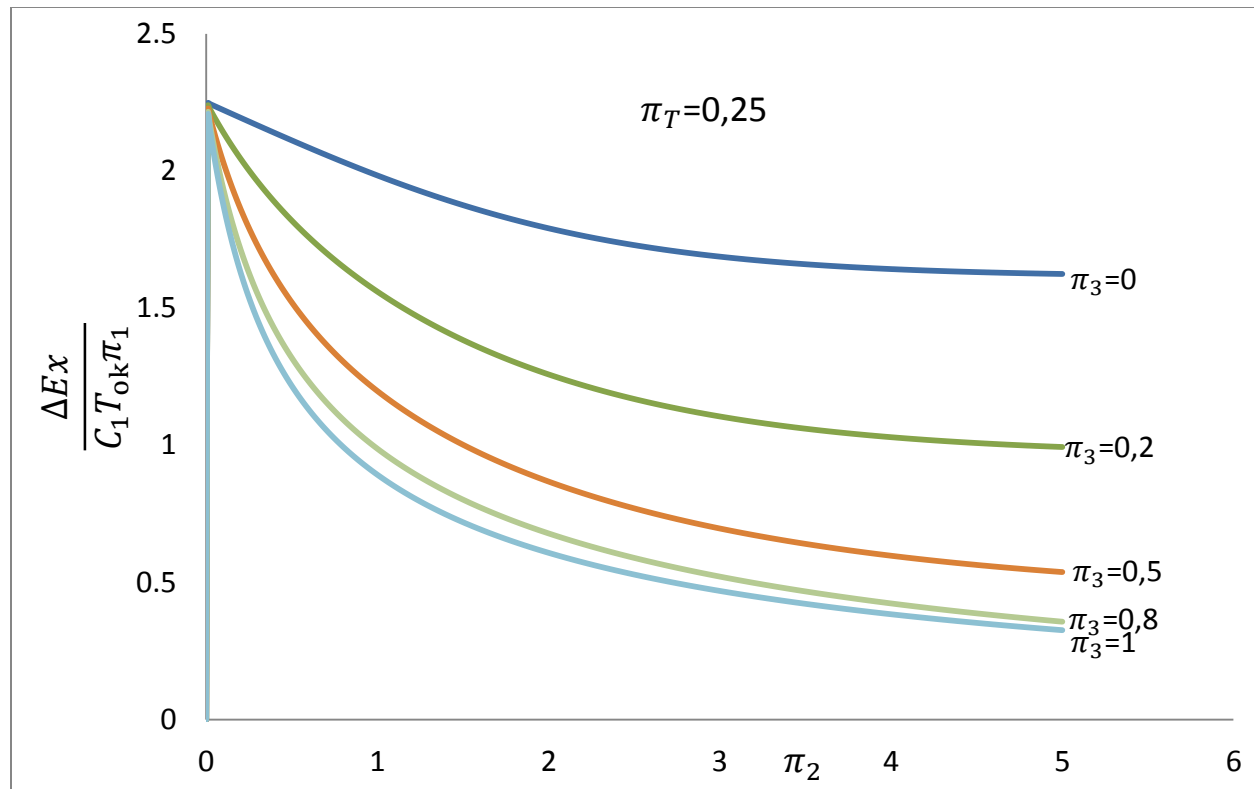
U ovom poglavlju će se razmotriti omjer bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora. Prvotno je potrebno odrediti matematički oblik navedenog omjera. S obzirom da je matematički oblik bezdimenzijske eksergijske destrukcije za protusmjerni rekuperator prethodno dan jednadžbom (92), te je temperaturna značajka  $\pi_1$  koja predstavlja iskoristivost topline rekuperatora dana jednadžbom (7), jednostavnim putem može se doći do traženog omjera dijeljenjem navedenih dviju jednadžbi.

Prema tome dijeljenjem jednadžbe (46) s jednadžbom (7) dobiva se traženi omjer

$$\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \frac{\ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} (1 - \pi_T) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}} + \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right)}{\frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}} \quad (99)$$

#### 4.3.1 Dijagramski prikazi omjera bezdimenzijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora

Dijagrami prikazuju ovisnost omjera bezdimenzijske eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline rekuperatora (ordinata) o bezdimenzijskoj značajki broja prijenosnih jedinica  $\pi_2$  (apscisa). Kao parametarske krivulje koriste se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$  koje su stupnjevane po 0,1 nad intervalom od 0 do 1. Bezdimenzijska značajka  $\pi_2$  stupnjevana je po 0,01 na intervalom od 0 do 5, dok se bezdimenzijska značajka  $\pi_T$  držala konstantnom za 3 slučaja ( $\pi_T = 0,25; 0,5; 2$ ).



Slika 20. Omjer eksbergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,25$

Sve parametarske krivulje  $\pi_3$  spajaju se u jednoj točki kada  $\pi_2 \rightarrow 0$ , te svaka ima i svoju horizontalnu asimptotu kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ . Kako bi se odredila točka u kojoj se spajaju sve parametarske krivulje mora se primijeniti L'Hospitalovo pravilo u jednadžbi (99) s obzirom na to da jednadžba (99) poprima neodređen oblik kada  $\pi_2 \rightarrow 0$ .

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \frac{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \ln \left( 1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} (1 - \pi_T) \right) \right]}{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \right]} + \frac{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \right]}{\frac{d}{d\pi_2} \left[ \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)} \right]} \quad (100)$$

Daljnijm deriviranjem jednadžbe (100) po značajki  $\pi_2$  dolazimo do traženog izraza

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \pi_T + \frac{1}{\pi_T} - 2 \quad (101)$$

Dobivena jednačba (101) jednaka je jednačbi (62) koja je izvedena za istosmjerni rekuperator, a samim time dolazi se do zaključka kako omjer eksergijske destrukcije i iskoristivosti u toj točki ne ovisi o smjeru strujanja radne tvari. Prema tome uvrštavajući  $\pi_T=0,25$  u jednačbu (101) dobiva se tražena vrijednost

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = 2,25 \quad (102)$$

koja odgovara vrijednosti iz dijagrama.

Kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$  izraz (99) prelazi u sljedeći oblik

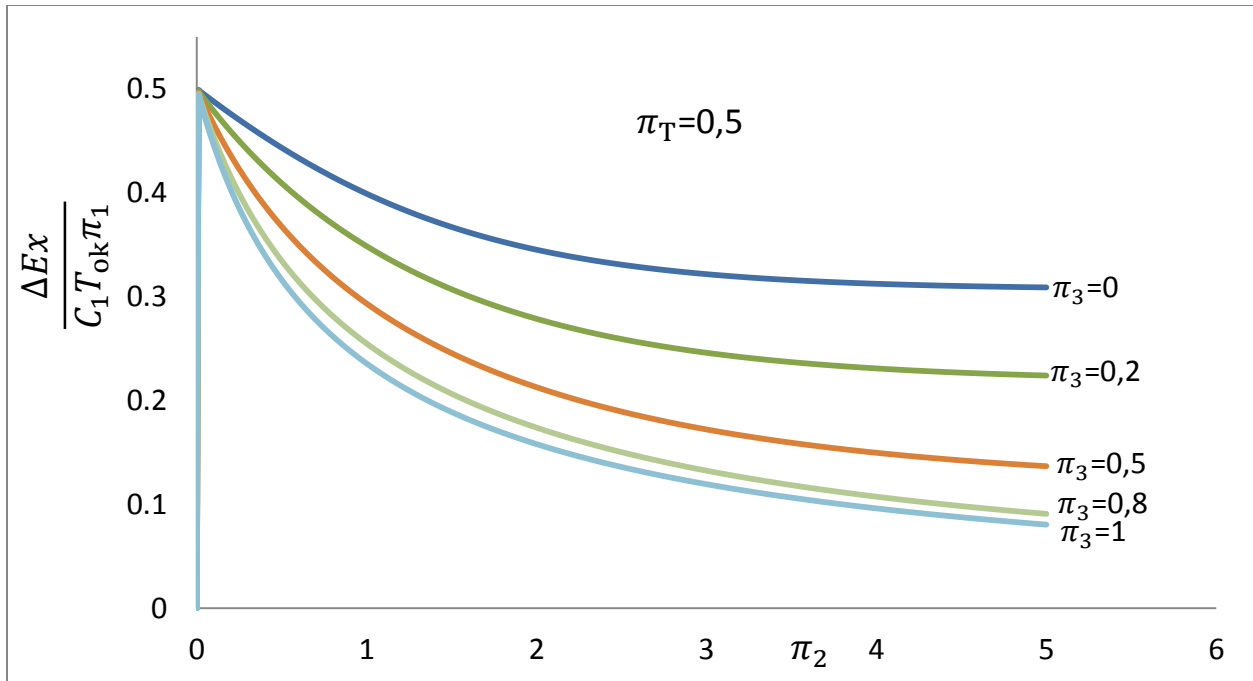
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = \ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_3} \ln \left( 1 + \pi_3 \left( \frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (103)$$

S obzirom na to da temperaturna značajka  $\pi_1$  iznosi 1 kod protusmjernog rekuperatora kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$  jasno je kako će tada iznos omjera eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline zapravo poprimati vrijednost eksergijske destrukcije.

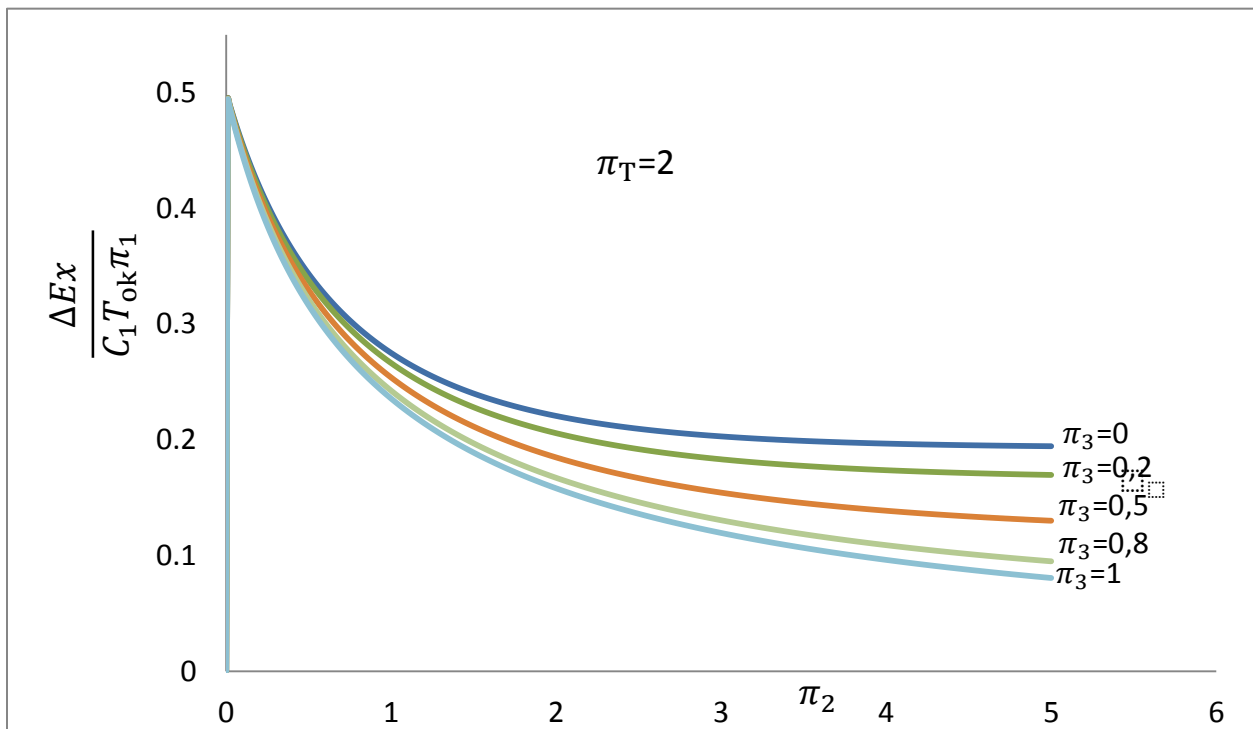
Uvrštavajući  $\pi_3 = [0; 0,2; 0,5; 0,8; 1]$  u jednačbu (103) dobivamo sljedeće vrijednosti

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \frac{\Delta Ex}{C_1 T_{ok} \pi_1} = [1,6137; 0,9637; 0,44628; 0,14342; 0] \quad (104)$$

Prethodna tvrdnja je rješenjem jednačbe (104) dokazana, te se analogno tome mogu odrediti i vrijednosti omjera eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora i za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_T=2$  kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ . Navedene vrijednosti omjera eksergijske destrukcije i iskoristivosti topline za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_T=2$  poprimaju vrijednosti prema jednačbama (97) i (98).



Slika 21. Omjer eksbergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$



Slika 22. Omjer eksbergijske destrukcije i iskoristivosti topline protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=2$

#### 4.4 Eksergijski stupanj djelovanja protusmjernog rekuperatora

Eksergijski stupanj djelovanja definiran je kao omjer ukupne izlazne i ukupne ulazne eksergije.

$$\varepsilon_{\text{ex}} = \frac{Ex_{\text{IZ}}}{Ex_{\text{UL}}} = f_3(\pi_2, \pi_3, \pi_T, \pi_{\text{ok}}) \quad (105)$$

Koristi se prethodno izvedeni polazni oblik jednadžbe koji glasi

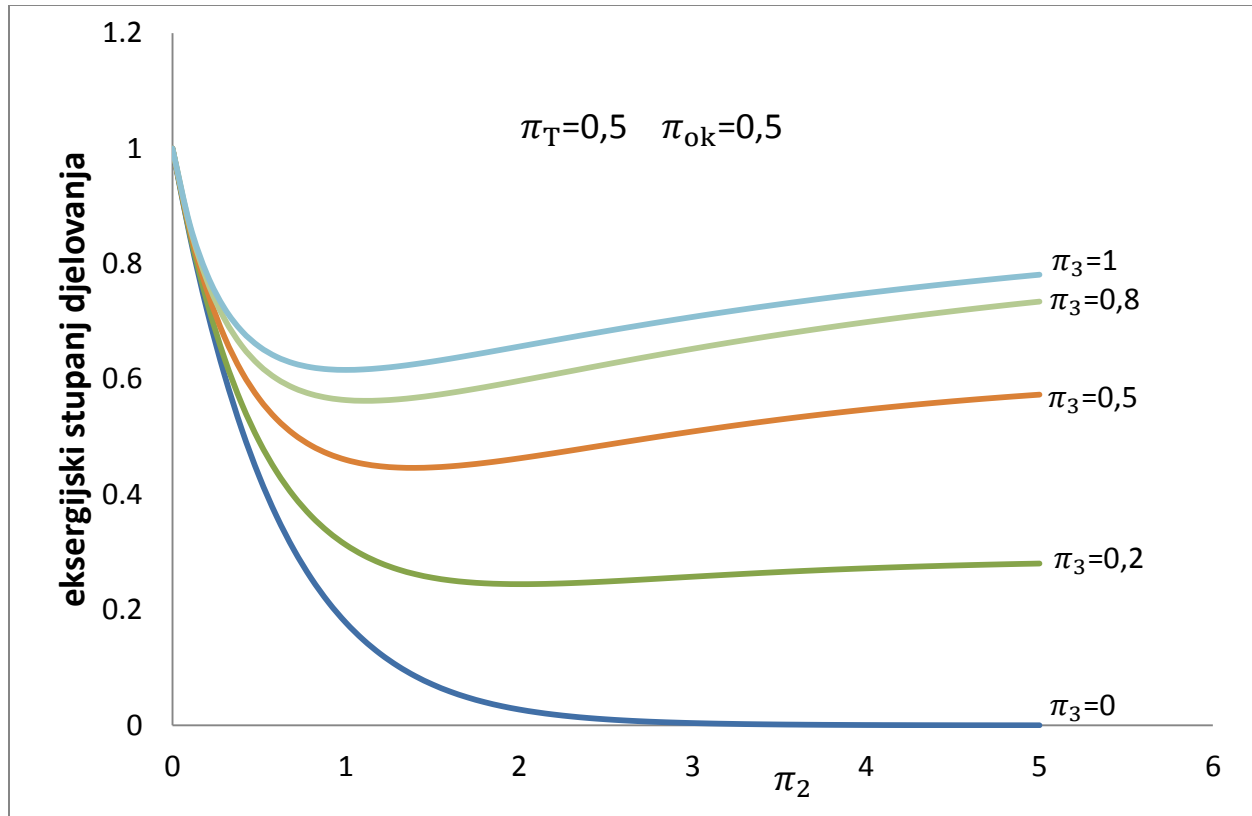
$$\varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\frac{\Delta Ex}{C_1 T_{\text{ok}}}}{\frac{Ex_{\text{UL1}}}{C_1 T_{\text{ok}}} + \frac{Ex_{\text{UL2}}}{C_1 T_{\text{ok}}}} \quad (106)$$

S obzirom na to da su poznati svi članovi jednadžbe (106) jednostavnim uvrštavanjem jednadžbi (78), (81) i (92) u (106) dobiva se izraz za eksergijski stupanj djelovanja protusmjernog rekuperatora

$$\varepsilon_{\text{ex}} = 1 - \frac{\ln\left(1 - \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}(1 - \pi_T)\right)}{\frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right) + \frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln\left(\frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}}\right)} + \frac{\frac{1}{\pi_3} \ln\left(1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}{1 - \pi_3 \exp(-(1 - \pi_3)\pi_2)}\left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)\right)}{\frac{1}{\pi_{\text{ok}}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{\text{ok}}}\right) + \frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln\left(\frac{\pi_T}{\pi_{\text{ok}}}\right)} \quad (107)$$

##### 4.4.1 Dijagramski prikazi eksergijskog stupnja djelovanja protusmjernog rekuperatora

Dijagrami prikazuju ovisnost eksergijskog stupnja djelovanja protusmjernog rekuperatora o bezdimenzijskoj značajki prijenosnih jedinica  $\pi_2$ . Na ordinati se nalazi eksergijski stupanj djelovanja dok se na apscisu nanosi značajka  $\pi_2$  koja je stupnjevana od 0 do 5 s korakom 0,1. Kao parametarske krivulje uzimaju se krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$ , stupnjeване od 0 do 1 s korakom 0,1. Bezdimenzijska značajka omjera ulaznih temperatura jače i slabije struje  $\pi_T$  je držana konstantnom kao i bezdimenzijska značajka omjera okolišne temperature i ulazne temperature slabije struje. U ovom poglavlju razmatra se ponašanje eksergijskog stupnja djelovanja protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = [0,5; 2]$  i  $\pi_{\text{ok}} = [0,5; 2]$ .



Slika 23. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=0,5$

Kao i u prethodnim slučajevima potrebno je odrediti vrijednosti horizontalnih asimptota kada  $\pi_2 \rightarrow \infty$ . Shodno tome slijedi

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = 1 - \frac{\ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_3} \ln\left(1 + \pi_3 \left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)\right)}{\frac{1}{\pi_{ok}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{ok}}\right) + \frac{\pi_T}{\pi_{ok}\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} - \frac{1}{\pi_3} \ln\left(\frac{\pi_T}{\pi_{ok}}\right)} \quad (108)$$

Primjenom L'Hospitalovog pravila kada je  $\pi_3=0$  dobiva se izraz jednak kao i slučaju istosmjernog rekuperatora a on glasi

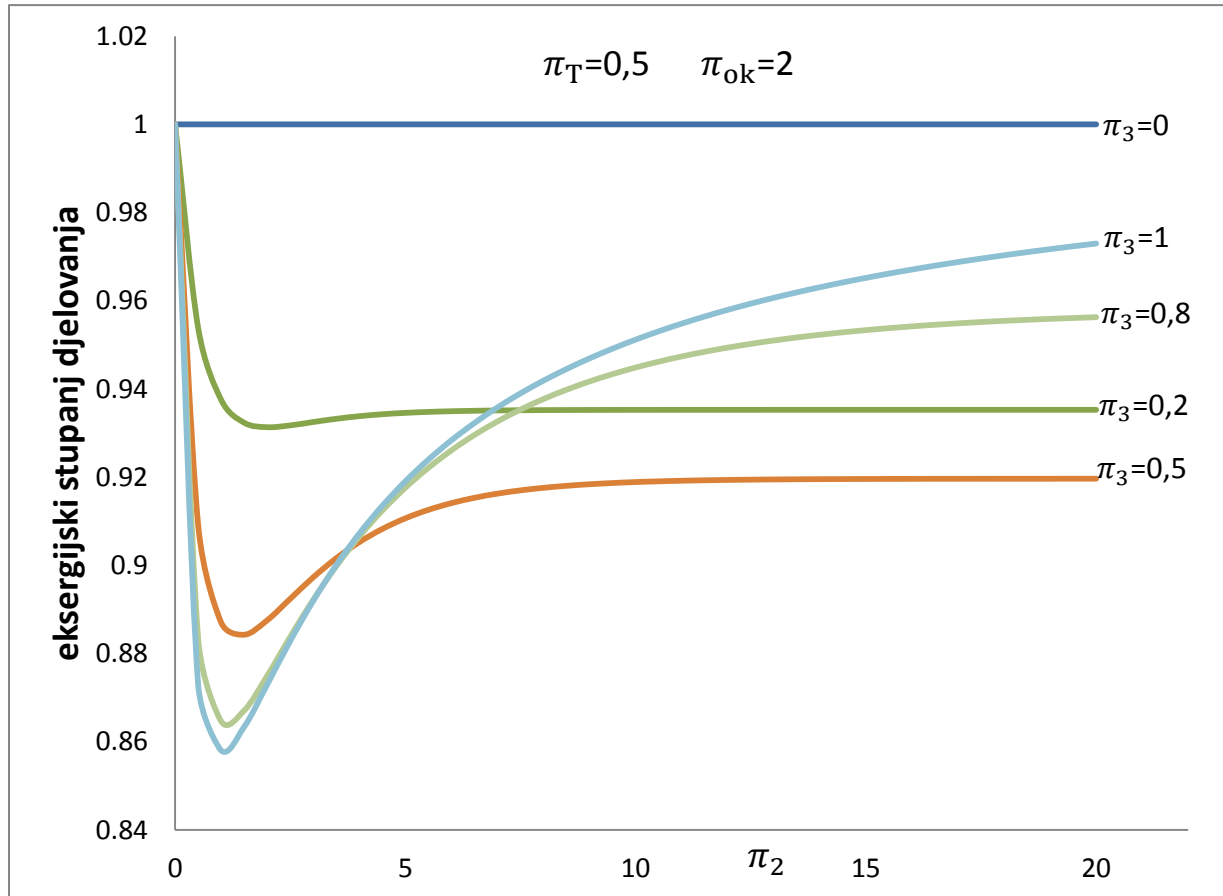
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = 1 - \frac{\ln(\pi_T) + \frac{1}{\pi_T} - 1}{\frac{1}{\pi_{ok}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{ok}}\right)} \quad (109)$$

koja kao i kod istosmjernog rekuperatora vrijedi samo kada je  $\pi_T = \pi_{ok}$ ! Jasno je da istosmjerni i protusmjerni rekuperator poprimaju jednake vrijednosti veličina kada je  $\pi_3=0$ .



Naknadnim uvrštavanjem  $\pi_3=0$ ,  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=0,5$  u jednadžbu (109), te uvrštavanjem  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=0,5$  u jednadžbu (108) dobivaju se sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [0, 0,28806; 0,6161; 0,86448; 1] \quad (110)$$



Slika 24. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 0.5$  i  $\pi_{ok} = 2$

Ni u ovom slučaju ne vrijedi izraz (109) kada je  $\pi_T \neq \pi_{ok}$ . Do željenog izraza dolazi se množenjem brojnika i nazivnika jednadžbe (108) sa  $\pi_3$  kao što slijedi

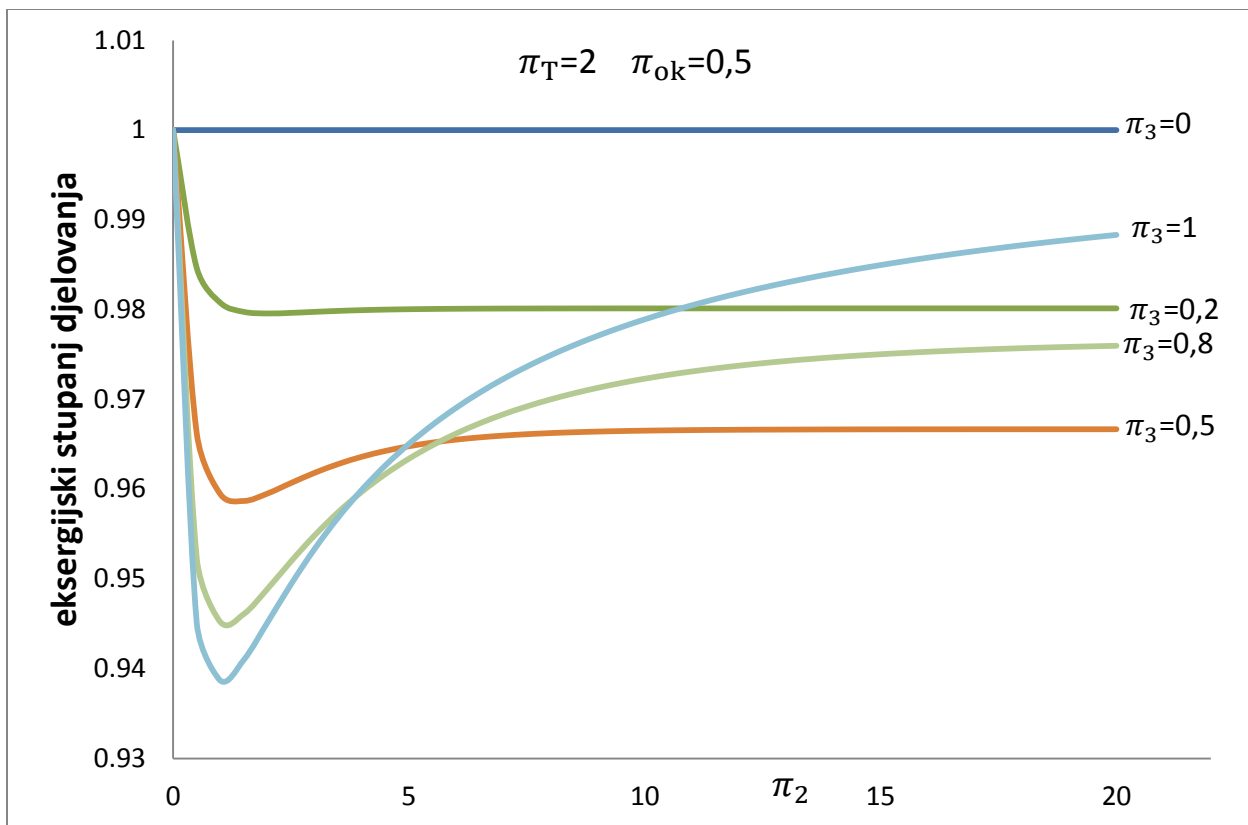
$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = 1 - \frac{\pi_3 \ln(\pi_T) + \ln\left(1 + \pi_3 \left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)\right)}{\pi_3 \left(\frac{1}{\pi_{ok}} - 1 - \ln\left(\frac{1}{\pi_{ok}}\right)\right) + \frac{\pi_T}{\pi_{ok}} - 1 - \ln\left(\frac{\pi_T}{\pi_{ok}}\right)} \quad (111)$$

koji vrijedi kada je  $\pi_T \neq \pi_{ok}$  !

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (111) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  za  $\pi_T=0,5$  i  $\pi_{ok}=2$  u jednadžbu (108) dobivaju se sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [1; 0,93526; 0,91964; 0,95793; 1] \quad (112)$$

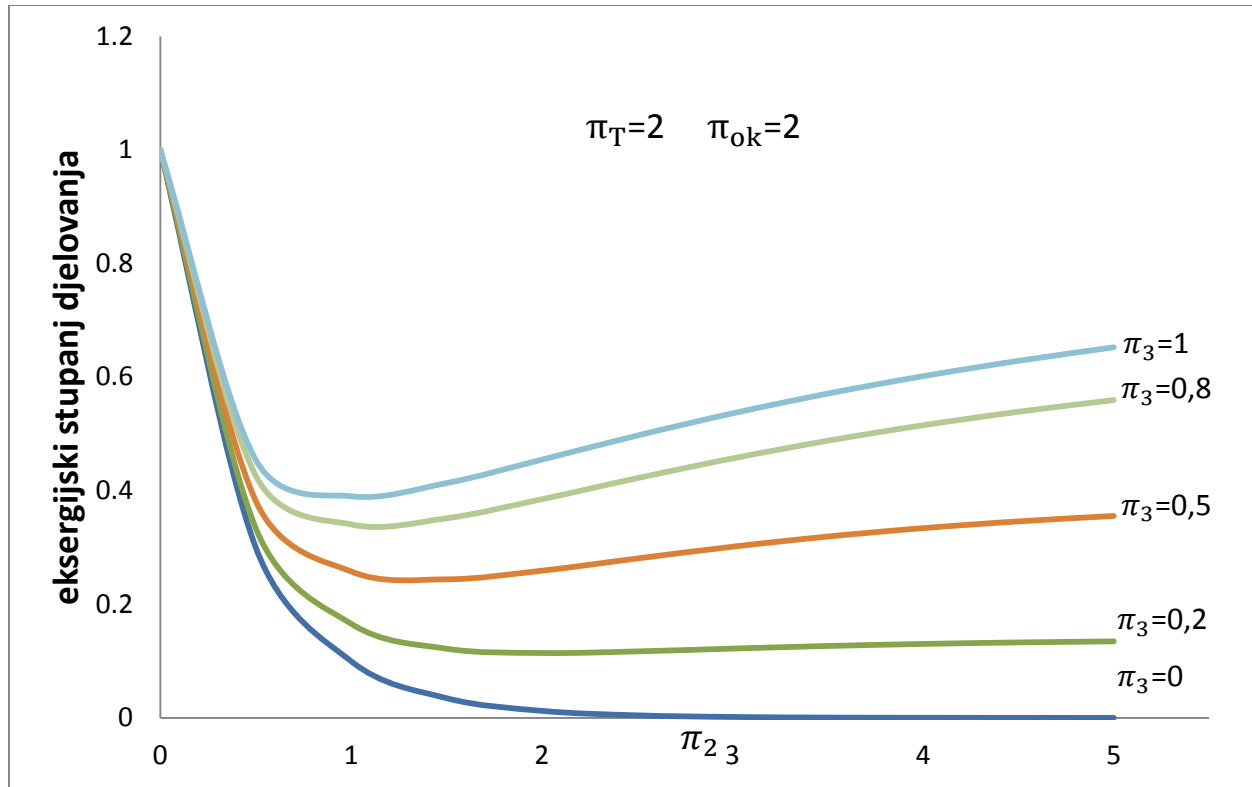
Iz slike 24 vidljivo je kako eksergijski stupanj djelovanja počinje znatno rasti povećanjem površine rekuperatora što je bezdimenzijska značajka  $\pi_3$  veća, odnosno povećanjem omjera toplinskih kapaciteta slabije i jače struje.



Slika 25. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 2$  i  $\pi_{ok} = 0,5$

Uvrštavanjem  $\pi_3=0$  u jednadžbu (111) i  $\pi_3=[0,2; 0,5; 0,8; 1]$  za  $\pi_T=2$  i  $\pi_{ok}=0,5$  u jednadžbu (108) dobivaju se sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \varepsilon_{ex} = [1; 0,98014; 0,9667; 0,9764; 1] \quad (113)$$



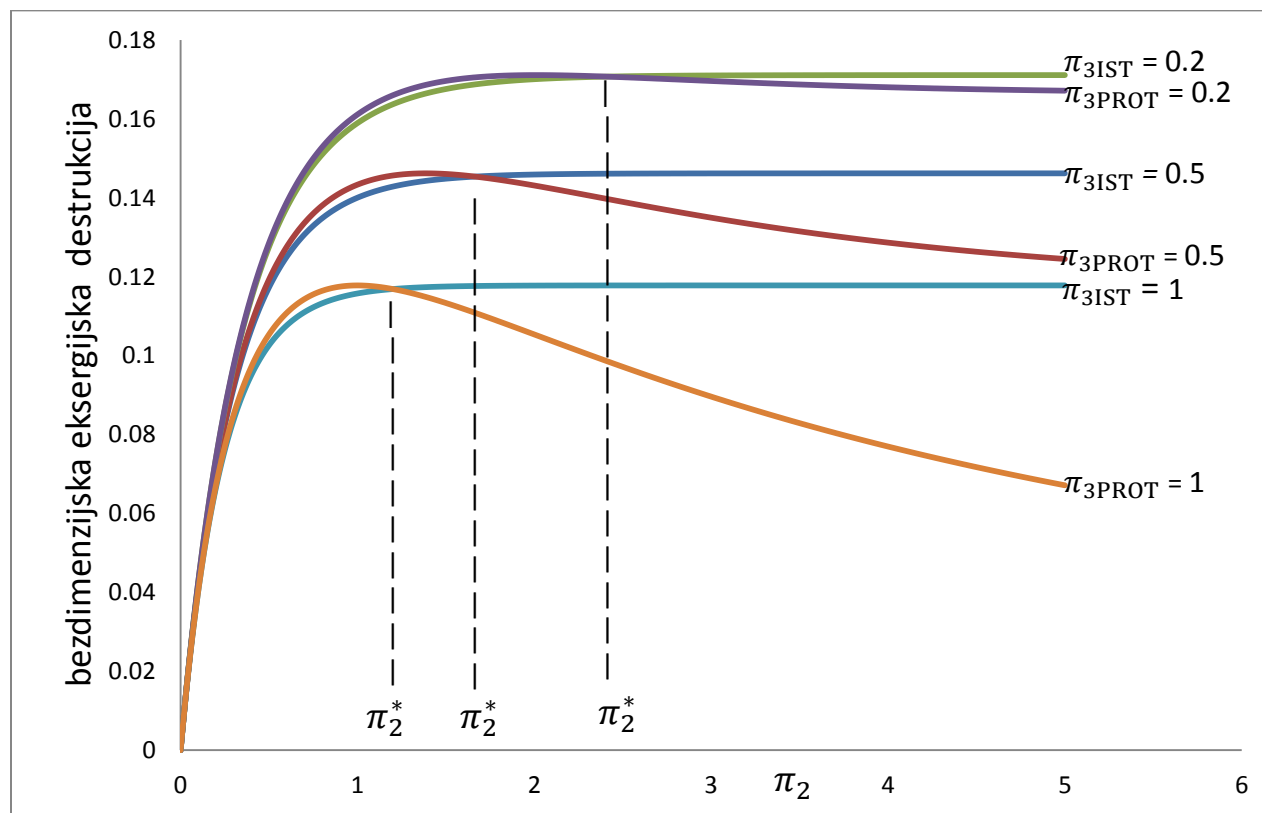
Slika 26. Eksergijski stupanja djelovanja protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 2$  i  $\pi_{ok} = 2$

Uvrštavanjem  $\pi_3 = 0$  u jednadžbu (109) i  $\pi_3 = [0,2; 0,5; 0,8; 1]$  za  $\pi_T = 2$  i  $\pi_{ok} = 2$  u jednadžbu (108) dobivaju se sljedeće vrijednosti eksergijskog stupnja djelovanja

$$\lim_{\pi_2 \rightarrow \infty} \epsilon_{ex} = [1; 0,1387; 0,39019; 0,7172; 1] \quad (114)$$

## 5. USPOREDBA ISTOSMJERNIH I PROTUSMJERNIH REKUPERATORA

Usporedbe dotičnih rekuperatora prikazuju se u svrhu prikazivanja međusobnog ponašanja rekuperatora. Prethodna razmatranja koja su se provodila u svrhu prikazivanja bezdimenzijske eksergijske destrukcije istosmjernih i protusmjernih rekuperatora pokazala su kako istosmjerni rekuperator za istu značajku  $\pi_3$  pokazuje veću eksergijsku destrukciju od protusmjernog, osim u slučaju ako jedna struja isparava ili kondenzira, odnosno ako je značajka  $\pi_3 = 0$ . U tom slučaju istosmjerni i protusmjerni rekuperator pokazuju jednake karakteristike, odnosno tada ponašanje rekuperatora ne ovisi o smjeru strujanja radne tvari i nije bitno o kojem je rekuperatoru riječ. Slika 27 prikazuje eksergijsku destrukciju istosmjernog i protusmjernog rekuperatora za tri različite parametarske krivulje  $\pi_3 = \text{konst}$  pri  $\pi_T = 2$ .

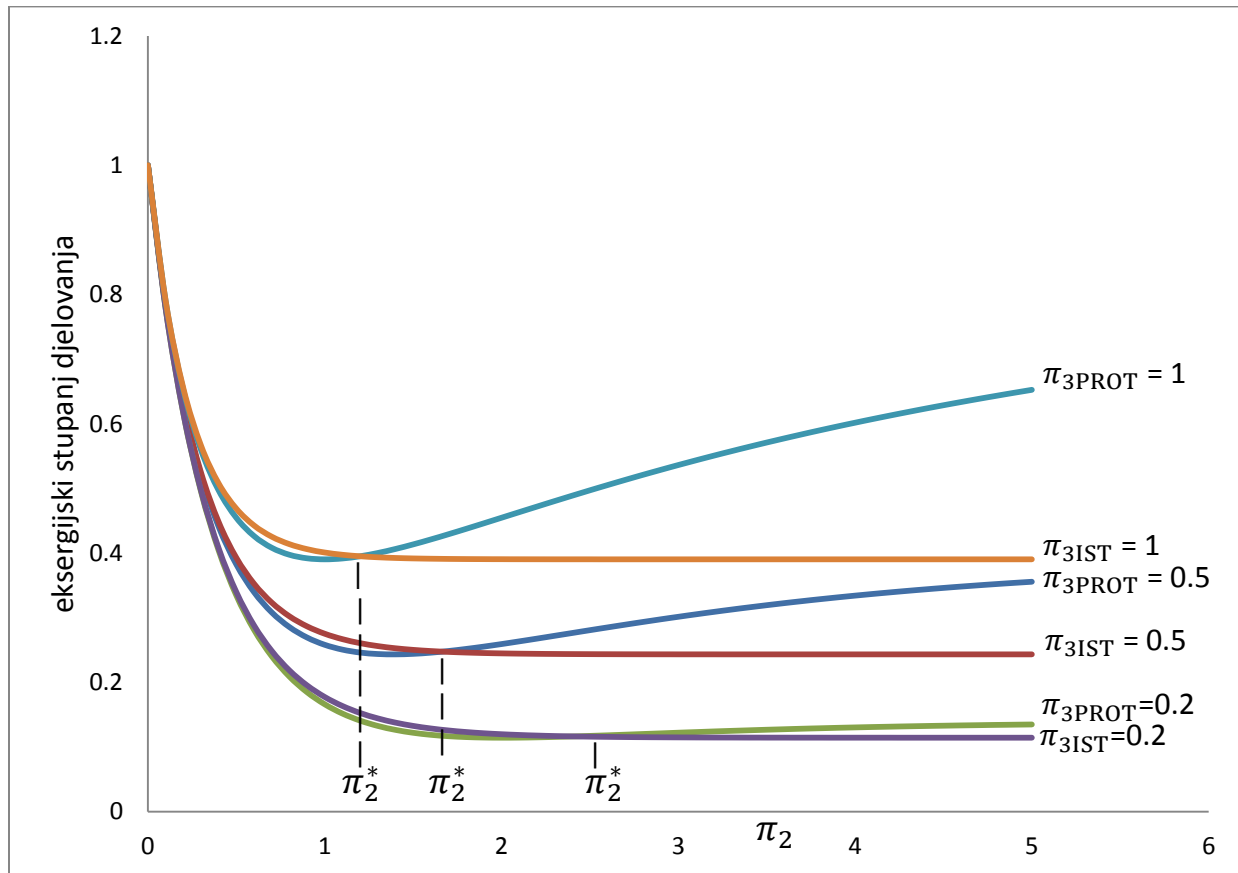


Slika 27. Bezdimezijska eksergijska destrukcija istosmjernog i protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 2$

Iz slike 27 može se zaključiti da što je manja značajka  $\pi_3$ , odnosno što je veća razlika toplinskih kapaciteta slabije i jače struje to je manja razlika između istosmjernih i protusmjernih

rekuperatora glede same eksergijske destrukcije. Vidljivo je da kada značajka  $\pi_3$  iznosi 1 razlika između istosmjernih i protusmjernih rekuperatora postaje osjetna, odnosno istosmjerni rekuperator tada pokazuje znatno veću eksergijsku destrukciju.

Sada se još uspoređuju dotični rekuperatori na osnovu eksergijskog stupnja djelovanja kao što to pokazuje slika 28.



Slika 28. Eksergijski stupanj djelovanja istosmjernog i protusmjernog rekuperatora za  $\pi_T = 2$  i  $\pi_{ok} = 2$

Iz slike 27 vidljivo je kako se postižu manje eksergijske destrukcije kod protusmjernog rekuperatora a samim time se postižu i veći eksergijski stupnjevi djelovanja osim u slučaju kada je  $\pi_3 = 0$  s obzirom na to da je u tom slučaju nebitno o kojem je rekuperatoru riječ.

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata eksergijske analize istosmjernih i protusmjernih rekuperatora može se zaključiti kako na njihovu nepovratnost utječe niz čimbenika. Dokazano je kako velik utjecaj na povećanje eksergijske destrukcije imaju temperature na ulazu u rekuperator, odnosno što se više povećava omjer ulaznih temperatura jače i slabije struje to ima za posljedicu veći prirast eksergijske destrukcije. Veliki značaj imaju i položaji struja, što se može zaključiti vidno većim prirastom eksergijske destrukcije ukoliko je za iste parametarske krivulje jača struja hladnija. Uspoređivanjem istosmjernih i protusmjernih rekuperatora dokazano je kako međusoban smjer strujanja ima značajan utjecaj na eksergijsku destrukciju. Ako se pogledaju dijagrami na slikama 27 i 28 može se zaključiti da protusmjerni rekuperator generira veću eksergijsku destrukciju za isti  $\pi_T$  i  $\pi_3$ , ukoliko vrijedi  $\pi_2^* > \pi_2$ , pri čemu  $\pi_2^*$  raste sa smanjenjem značajke  $\pi_3$ . Nakon  $\pi_2 > \pi_2^*$  eksergijska destrukcija istosmjernog postaje veća od eksergijske destrukcije protusmjernog rekuperatora. Ta je tvrdnja izravno komplementarna s eksergijskim stupnjem djelovanja rekuperatora, koji je dan slikom 28. Iz te slike se jasno vidi da je  $(\mathcal{E}_{ex})_{pr} < (\mathcal{E}_{ex})_{ist}$  ako vrijedi  $\pi_2^* > \pi_2$ . Za  $\pi_2 = \pi_2^*$  je  $(\mathcal{E}_{ex})_{pr} = (\mathcal{E}_{ex})_{ist}$ , a tek za je  $\pi_2 > \pi_2^*$   $(\mathcal{E}_{ex})_{pr} > (\mathcal{E}_{ex})_{ist}$ . U slučaju kada jedna struja isparava ili kondenzira je nebitno o kojem je rekuperatoru riječ. Na temelju dobivenih analitičkih i grafičkih prikaza prethodno navedeni zaključci mogu se lako utvrditi.

## LITERATURA

- [1] Galović, A: Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2011
- [2] Galović, A: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2010

## **PRILOZI**

CD-R disc