Rekonstrukcija niskotemperaturnog dijela postrojenja za kriogenu separaciju zraka

Vučinić, Borna

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:185813

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Borna Vučinić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing. Borna Vučinić

Zagreb, 2019.

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

Posebno se zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Nenadu Ferdeljiju na ukazanoj podršci i pomoći tijekom izrade ovoga rada.

Borna Vučinić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Borna Vučinić** Mat. br.: 0035192691

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rekonstrukcija niskotemperaturnog dijela postrojenja za kriogenu separaciju zraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **"Cold box" retrofit in cryogen air separation unit**

Opis zadatka:
Dio postrojenja za kriogenu seperaciju zraka koji osigurava rashladni učin potreban za funkcioniranje separacijskih kolona naziva se „niskotemperaturni" dio postrojenja, a sastoji se od sustava izmjenjivača topline te dvije kompresorsko-turbinske stanice. U postojećem postrojenju, radi povećanja kapaciteta, potrebno je izvršiti rekonstrukciju „niskotemperaturnog dijela" vodeći računa da se pri tome ne naruši funkcioniranje separacijskih kolona. U tu svrhu postavljaju se zahtjevi na ulazne i izlazne struje „niskotemperaturnog" dijela postrojenja, koja su sažeto prikazana u sljedećoj tablici.

Ulazne struje	10		4a	6	12b	38	42	44	56
q_n / (m_n^3/h)	26814,2		9409,7	9409,7	6814,2	4000,0	12410,1	3412,8	2309,8
ϑ / °C	20,0		20,0	-87,7	-172,5	-177,5	-178,0	20,0	-172,4
p / bar	50		25	6	6	1,5	1,5	6	15
y_{N2} / y_{O2} (%)	78,1 / 20,9		78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	98,0 / 1,9	1 / 0	1 / 0	0 / 1
Izlazne struje	11	14	5	13		39	43	45	57
q_n / (m_n^3/h)	18391,9	8422,3	9409,7	16223,9		4000,0	12410,1	3412,8	2309,8
ϑ / °C	-95,7	-171,5	-5,0	19,0		18,0	18,0	-176,0	19,0
p / bar	50	50	25	6		1,5	1,5	6	15
y_{N2} / y_{O2} (%)	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9		98,0 / 1,9	1 / 0	1 / 0	0 / 1

Napomena: Struje 6 i 12 dobivene su nakon adijabatske ekspanzije struja 5 i 11 u turbinama (η_{is} = 90 %).

U sklopu rada potrebno je:
a) dati shematski prikaz te napraviti bilance mase i energije idejnog rješenja rekonstrukcije,
b) za potrebe dimenzioniranja izmjenjivača topline dati pregled modela prijelaza topline iz literature,
c) odrediti optimalan raspored i dimenzionirati izmjenjivačke površine sustava izmjenjivača topline,
d) izraditi tehnički crtež sustava izmjenjivačkih površina topline.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 2. svibnja 2019.

Datum predaje rada: 4. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane: 10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
1.1. Kriogena separacija zraka 1
1.2. Izmjenjivači u kriogenoj tehnici 4
1.2.1. Aluminijski pločasto – lamelni izmjenjivač topline (BAHX) 5
1.3. Komponente pločasto-lamelnih izmjenjivača 6
2. PROBLEMATIKA ZADATKA 7
3. ANALIZA MASENIH I TOPLINSKIH TOKOVA 8
3.1. Općenito 8
3.2. Proračun masenih tokova 9
3.3. Proračun toplinskih tokova 11
4. PINCH METODA 14
4.1. Grafička metoda - kompozitne krivulje toplih i hladnih struja 14
4.1.1. Temperaturni intervali i kompozitna krivulja toplih struja 16
4.1.2. Temperaturni intervali i kompozitne krivulje hladnih struja 20
4.2. Tablična metoda 28
4.2.1. Temperaturni intervali toplih i hladnih struja 28
5. KONSTRUKCIJA I OPTIMIZACIJA MREŽE IZMJENJIVAČA 31
5.1. Osnovna pravila pri konstrukciji mreže izmjenjivača 31
5.2. Konstrukcija mreže izmjenjivača 33
5.2.1. Mreža izmjenjivača blizu pincha (poslje račve) 36
5.2.2. Konstrukcija mreže dalje od pincha (prije račve) 39
5.2.3. Kružno uparivanje 43
6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE IZMJENJIVAČA TOPLINE 45
6.1. OSNOVNI KONSTRUKCIJSKI PARAMETRI 45
6.2. DIMENZIONIRANJE IZMJENJIVAČKIH POVRŠINA 48
6.2.1. Izmjenjivač topline 1 48
6.2.2. Izmjenjivač topline 2 56
6.2.3. Izmjenjivač topline 3 62
6.2.3.1. Izmjena topline plin (10-14-3) – kapljevina (56-57) 62
6.2.3.2. Izmjena toplike plin (10-14-3) – mokra para (56-57) 68
6.2.4. Izmjenjivač topline 4 73

6.2.5. Izmjenjivač topline 5 79
6.2.5.1. Izmjena topline plin (10-14-6) – mokra para (56-57) 79
6.2.5.2. Izmjena topline plin (10-14-6) – plin (56-57) 85
6.2.6. Izmjenjivač topline 6 91
6.2.6.1. Izmjena topline prije pritoka 91
6.2.6.2. Izmjena topline poslje pritoka 96
6.2.7. Izmjenjivač topline 7 102
6.2.8. Izmjenjivač topline 8 108
6.2.9. Izmjenjivač topline 9 114
6.2.10. Izmjenjivač topline 10 120
7. ZAKLJUČAK 126
LITERATURA 127
PRILOZI 128

POPIS SLIKA

Slika 1: Postrojenje za kriogenu separaciju zraka (Linde AG) 3
Slika 2: Shell and tube izmjenjivač [9] 4
Slika 3: Spiralni izmjenjivač topline [članak] 5
Slika 4: Aluminijski pločasto – lamelni izmjenjivač topline [1] 6
Slika 5: Ulazni i izlazni paramatri struja 7
Slika 6: Shematski prikaz struja 8
Slika 7: Procesni paramatri struja 9
Slika 8: *T-h* dijagram 13
Slika 9: Kompozitna krivulja toplih struja 19
Slika 10: Kompozitna krivulja hladnih struja 25
Slika 11: Kompoztne krivulje toplih i hladnih struja 26
Slika 12: Kaskadni dijagrami 29
Slika 13: Kompozitna krivulja intervalskih temperatura 31
Slika 14: Prijenos topline preko pincha [7] 32
Slika 15: Rešetkasti dijagram struja 33
Slika 16: Prikaz podjeljenog sustava 35
Slika 17: Shematski prikaz sustava izmjenjivačkih površina u blizini pincha 38
Slika 18: Sustav mreže izmjenjivača 42
Slika 19: Kružno uparivanje struja 44
Slika 20: Slojevi BAHX-a u portustrujnom režimu strujanja [4] 45
Slika 21: Primarna i sekundarna površina [1] 46
Slika 22: Prikaz profila brzina u Knudsenovom sloju [5] 50

POPIS TABLICA

Tablica 1: Stanje zasićenja struje 56-57 12
Tablica 2: Temperaturni rasponi toplih struja 14
Tablica 3: Temperaturni intervali toplih struja 15
Tablica 4: Temperaturni rasponi hladnih struja 15
Tablica 5: Temperaturni intervali hladnih struja 15
Tablica 6: Toplinski tokovi intervala toplih struja 18
Tablica 7: Toplinski tokovi intervala hladnih struja 24
Tablica 8: Intervali toplih i hladnih struja 29
Tablica 9: Prikaz tablične metode 30
Tablica 10: Toplinski kapaciteti ogranaka prije račve 35
Tablica 11: Toplinski kapaciteti ogranaka poslje račve 36
Tablica 12: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 1 48
Tablica 13: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 2 56
Tablica 14: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 3.1 62
Tablica 15: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 3.2 68
Tablica 16: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 4 73
Tablica 17: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 5.1 79
Tablica 18: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 5.2 85
Tablica 19: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 6 91
Tablica 20: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 7 102
Tablica 21: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 8 108
Tablica 22: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 9 114
Tablica 23: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 10 120

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Latinične oznake		
A	m^2	primarna površina sloja
$A_{\mathrm{j,izmj}}$	m^2	površina izmjenjivača (j= 1-10)
A_n	m^2	nastruja površina prolaza
A_1	m^2	primarna površina prolaza
A_2	m^2	sekundarna površina prolaza
CP	W	toplinski kapacitet struje
CP_{i}	W	toplinski kapacitet ogranka
CP_{T}	W	toplinski kapacitet tople struje
CP_{H}	W	toplinski kapacitet hladne struje
c_p	$\mathrm{J/(kg\ K)}$	specifični toplinski kapacitet
c_v	$\mathrm{J/(kg\ K)}$	specifični toplinski kapacitet
d_{ekv}	m	ekvivalenti promjer prolaza
H_{j}	m	visina izmjenjivača
ΔH	kW	razlika ulaznih i izlaznih entaplija struje u sustavu
ΔH_{n}	kW	razlika ulaznih i izlaznih entaplija struje unutar intervala
h_l	m	visina lamele
h_{ul}	J/kg	specifična entaplija na ulazu
h_{iz}	J/kg	specifična entaplija na izlazu
h_{szp}	J/kg	specifična entaplija suhozasićene pare
h_{vk}	J/kg	specifična entaplija vrele kapljevine
Kn	–	Knudsenov broj
k	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prolaza topline
L	m	dužina izmjenjivača
M	kg/kmol	molarna masa
m	–	broj prolaza izmjenjivača
N	–	broj struja
Nu	–	Nusseltov broj
n_{l}	$\mathrm{lamela/m^2}$	gustoća lamela
Pr	–	Prandtlova značajka
p	Pa	tlak
p_{l}	m	razmak između lamela
q_m	kg/s	maseni protok struje

q_v	$\mathrm{m^3/s}$	molni volumni protok struje
Re	$-$	Reynoldsova značajka
s	m	potrebna debljina stijenke
T	K	termodinamička temperatura
t_l	m	debljina lamele
W	m	širina izmjenjivača
w	$\mathrm{m/s}$	brzina strujanja

Grčke oznake

α	$\mathrm{W/(m^2\ K)}$	koeficijent prijelaza topline
β	$-$	pomoći koeficijent kod jednostrukog slaganja
β_u	$-$	pomoći koeficijent kod kliznog strujanja
β_T	$-$	pomoći koeficijent kod temperturnog skoka
γ_j	$-$	omjer specifičnih toplinskih kapaciteta
$\Delta\vartheta_\mathrm{log}$	°C	srednja logaritamska razlika temperatura
ϑ_ul	°C	ulazna temperatura
ϑ_i	°C	izlazna temperatura
$\vartheta_\mathrm{ul,s}$	°C	ulazna intervalska temperatura
$\vartheta_\mathrm{i,s}$	°C	izlazna intervalska temperatura
ϑ_zas	°C	temperatura zasićenja
ζ_h^*	$-$	koeficijent temperaturnog skoka
η	$\mathrm{Pa\cdot s}$	dinamička viskoznost tekućine
η_1	$-$	učinkovitost lamela kod jednostrukog slaganja
λ	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost tekućine
λ_m	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost aluminija
ξ_h^*	$-$	koeficijent klizanja
ρ	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća tekućine
σ	$-$	akomodacijski koeficijent tangencijalnog momenta
σ_T	$-$	akomodacijski koeficijent energije
Φ	W	toplinski tok
Φ_zas	W	latentni toplinski tok

SAŽETAK

Tema ovoga rada je rekonstrukcija niskotemperatunog dijela postrojenja za kriogenu separaciju zraka. Na početku rada opisani su dijelovi spomenutog postrojenja i osnovni procesi pomoću kojih se separacija zraka odvija. Objašnjena je uloga niskotemperatunog dijela i njenih komponenti, a to su truboekspanderi i sustav izmjenjivača topline. S obzirom da rekonstrukcija podrazumjeva optimizaciju i dimenzioniranje izmjenjivačkih površina posebice su opisani razvoj, vrsta i značaj izmjenjivača topline u kriogenoj separaciji zraka.

Nakon toga je opisana problematika zadatka i uvjeti koje je potrebno zadovoljiti rekonstrukcijom.

Potom je dan shematski prikaz izmjenjivača topline s mrežom struja te je provedena analiza masenih i toplinskih tokova. Na osnovu toga, koristeći se Pinch analizom, određena je maksimalna iskoristivost topline te je određena potreba za vanjskim spremnicima topline.

U cilju postizanja maksimalne iskoristivosti topline izvršena je optimizacija mreže struja i izmjenjivačkih površina. Na kraju je izvršeno dimenzioniranje izmjenjivačkih površina pomoću termodinamičkog proračuna.

Ključne riječi: kriogena separacija zraka, niskotemperaturni dio, izmjenjivači topline, Pinch metoda, optimizacija

SUMMARY

The topic of this thesis is the reconstruction of the low-temperature part of the cryogenic separation plant. At the beginning of the work the parts of the mentioned plant and the basic processes by which air separation takes place are described. The role of the low-temperature part of the plant and its components has been explained, namely turboexpanders and heat exchanger systems. Since reconstruction implies optimization and dimensioning of the exchange surfaces, the development, type and importance of the heat exchangers in the cryogenic separation of air processes is described.

After that, the task problem and the conditions that need to be met by reconstruction are described.

Then a schematic illustration of the heat exchanger with the current grid was given and an analysis of mass and heat flows was performed. Based on this, using the Pinch method, maximum heat utilization is determined and possible need for external heat utilities.

In order to achieve maximum heat utilization, the optimization of the network and the exchanging surfaces was carried out. At the end, dimensioning of the exchange surfaces was done by means of a thermodynamic calculation.

Key words: cryogenic air separation, Cold box, heat exchangers, Pinch method, optimization

1. UVOD

U svrhu što boljeg shvaćanja problematike zadatka u ovome poglavlju dan je uvid u postrojenja za kriogenu separaciju zraka i njenih komponenti.

1.1. Kriogena separacija zraka

Pred kraj 19. stoljeća Europa je bila zahvaćena industrijskom revolucijom što je rezultiralo većom potražnjom osnovnih proizvoda ključnih za industrijsku proizvodnju, primjer toga bili su čelik i ugljen. Zbog tolike potražanje za čelikom počelo se razmatrati kako bi se proizvodnja čelika mogla ubrzati, rješenje se nalazilo u bržem izgaranju goriva u pećima. Bolje i brže izgaranje zahtjevalo je velike količine kisika. Nažalost, raspoloživi kisik se nalazio u zraku u svega 23% masenog udjela. Stoga, bilo je nužno osmisliti proces kojim bi se taj zrak mogao izdovojiti iz zraka na ekonomičan način. Izdvojeni kisik se koristio u plinovitom i ukapljenom stanju. Kisik u plinovitom agregatnom stanju koristio se u svrhu boljeg izgaranja goriva prilikom taljenja željezne rude. Ukapljeni kisik mješao se sa ugljikom i koristio kao eksploziv u rudarenju ugljena. [6]

U početcima zamišljeni i izvedeni sustavi nisu rezultirali prihvatljivim rezultatima. Prvi postupak razdvajanja zraka osmislio je Carl Von Linde 1902. godine. Taj je sustav služio za izdvajanje kisika iz zraka. Kasnije su osmišljeni sustavi sa dvije separacijske kolone čime je omogućena istodobna separacija kisika i dušika. Izdvajanje argona uvedeno je 1913. godine primjenom dodatnih kolona.

U današnje vrijeme kriogeni sustavi separacije zraka predstavljaju najdjelotvorniju i najekonomičniju tehnologiju za proizvodnju velikih količina kisika, dušika i argona kao kapljevitih i plinovitih proizvoda.

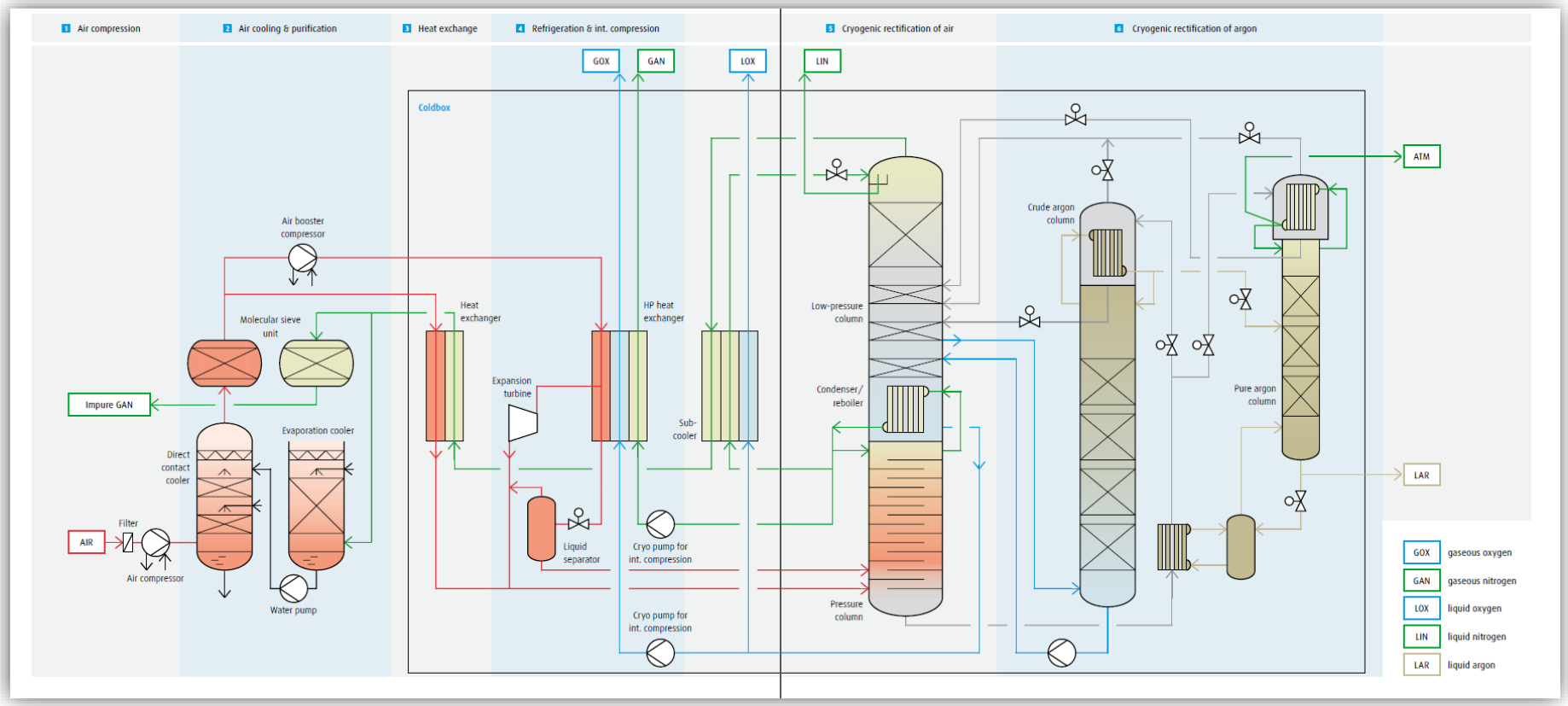
Separacija se odvija u kolonama pri vrlo niskim temperaturama, osnova razdvajanja je razlika u vrelištima komponenti zraka. Kriogeno razdvajanje zraka zasniva se na šest jediničnih operacija.

1) Kompresija zraka
2) Hlađenje i pročišćivanje zraka
3) Izmjena topline zrak/ otpadni dušik
4) Kriogeno hlađenje zraka i grijanje produkata rektifikacije
5) Kriogeno hlađenje zraka u turboekspanderu
6) Kriogena protostrujna rektifikacija zraka
7) Kriogena rektifikacija argona

Postrojenje se sastoji od kompresora, direktnog hladnjaka zraka, izmjenjivača za pripremu rashladne vode, sita za pročišćivanje zraka, *air booster* kompresora, izmjenjivača topline za kriogeno hlađenje zraka, turboekspandera, separatora i kolona za separaciju kisika, dušika i argona [8].

Dio postrojenja koji je zadužen za osiguravanje dostatnog rashladnog učina u svrhu kriogenog hlađenja zraka naziva se niskotemperaturnim dijelom,a sastoji se od turboekspandera i sustava izmjenjivača topline. S obzirom da izmjenjivači topline i turboekspanderi rade pri vrlo niskim temperaturama potrebno ih je smjestiti unutar kućišta ("Cold Box"). Kućišta mogu biti cilindričnog ili kvadratičnog oblika i često su visoka, ponekad i preko 5 m. Zbog niskih temperatura nužno je da su izolirana. Današnja postrojenja koriste laganu izolaciju od ekspandiranog perlita koju je lako montirati i demontirati ako je to potrebno. [Ranch Cyrogenics, Inc.]

Postrojenje za kriogenu separaciju zraka prikazano je slikom 1.



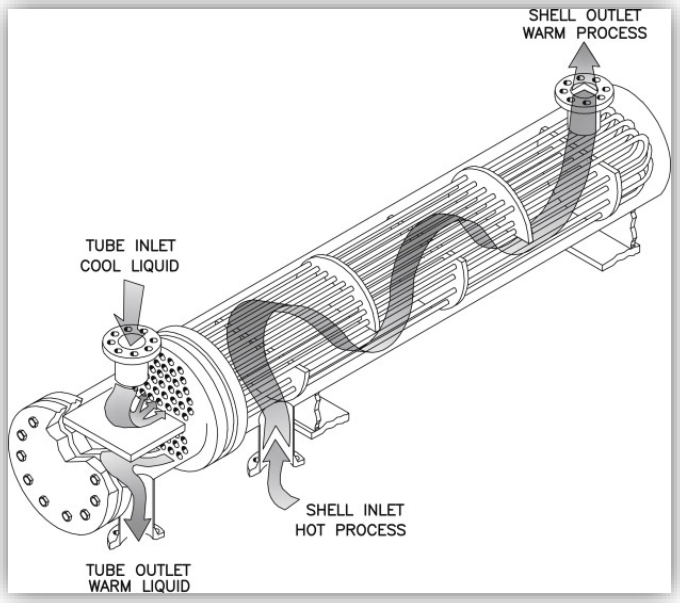
Slika 1: Postrojenje za kriogenu separaciju zraka [2]

1.2. Izmjenjivači u kriogenoj tehnici

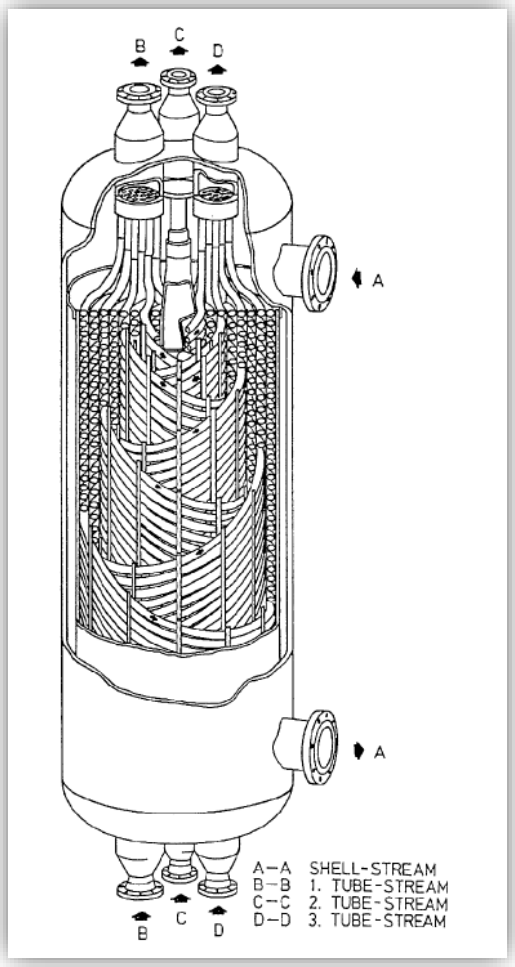
U začetcima kriogene industrije glavni problem je bio proces ukapljivanja zraka i ostalih plinova. Prvotni izmjenjivači koji su služili toj svrsi bili su neefikasni i bili su kočnica daljnjem razvoju kriogene tehnike. Ti izmjenjivači topline bili su *shell and tube* tipa, izrađeni od bakra i olova. Tek kada je osmišljen i predstavljen prvi spiralni izmjenjivač topline ostvaren je znatan pomak u kriogenoj tehnici.

Spiralni izmjenjivači građeni su od velikog broja malih bakrenih cjevčica spiralno zavijenih unutar cilindrične ljuske, također izrađene od bakra. Takav dizajn je omogučio kompaktnu konfiguraciju i vrlo efikasan način prijenosa topline. Topli zrak struji kroz cilindričnu ljusku tako grijući plinove unutar spiralno zavijenih cjevćica. Ovim dizajnom bilo je moguće uklopiti veliku izmjenjivačku površinu u relativno mali volumen aparata uz povećanje efikasnosti izmjenjivačkih površina. Razvoj ovoga izmjenjivača je omogučio Lindeu da 1896.godine napravi prvu napravu za ukapljivanje zraka.

Iako se spiralni izmjenjivači koriste se i danas u širokom rasponu primjene, posebice za ukaplivanje plinova u LNG industriji (Liquid Natural Gas), većinom su ih zamjenili aluminijski pločasto – lamelni izmjenjivači topline (BAHX – Brazed Aluminium Plate – Fin Heat Exchnager). [6]



Slika 2: Shell and tube izmjenjivač [9]



Slika 3: Spiralni izmjenjivač topline

1.2.1. Aluminijski pločasto – lamelni izmjenjivač topline (BAHX)

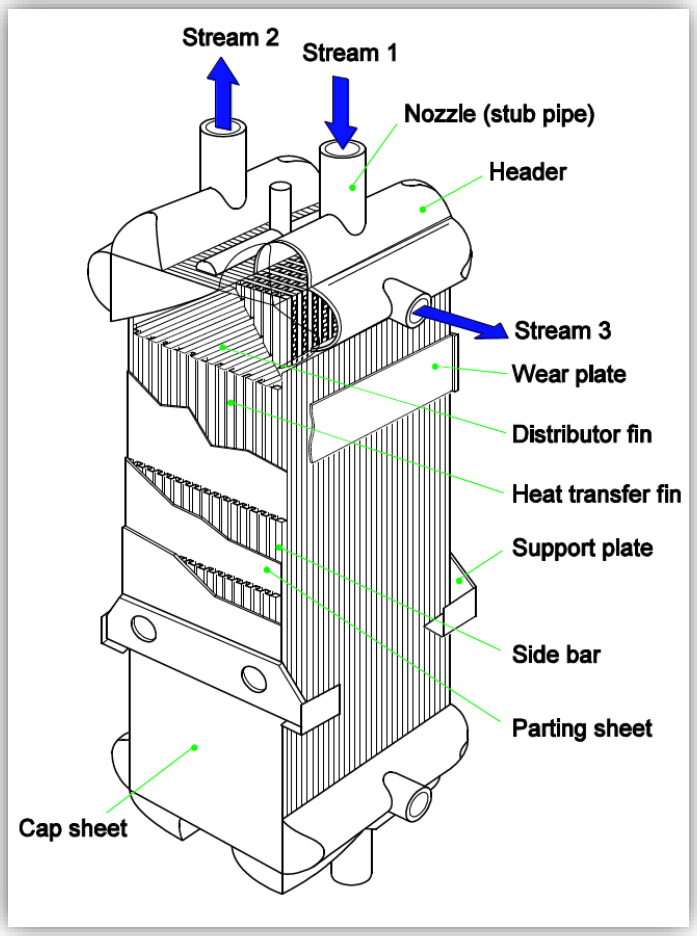
Pločasto- lamelni izmjenjivači topline su izrazito kompaktni i djelotovorni. Imaju široki spektar primjene, kako u kriogenoj tako i drugim područjima tehnike, ponajviše zbog visoke toplinske učinkovitosti, kompaktnosti, relativno male mase i niske razine zahtjeva za održavanjem. Omogućuju niske kapitalne, montažne i pogonske troškove. Omjer izmjenjivačkih površina u odnosu na volumen uređaja u prosjeku iznosi 1000-1200 m^2/m^3, dok usporedno, shell-and-tube izmjenjivači imaju odnos od 40-70 m^2/m^3. Visoki iznos omjera posebno je koristan kod malih temperaturnih razlika struja. Izmenjivači od 2000 m^2/m^3 ponekad su korišteni u procesnoj industriji (zrakoplovnoj, automobilskoj, željezničkoj itd.). Najviše se koriste u tretiranju prirodnih plinova, petrokemijkoj i rashladnoj industriji. U mogućnosti su nositi do 12 ili više struja što ih čini poželjnima u procesima separacije zraka. [1]

1.3. Komponente pločasto-lamelnih izmjenjivača

Pločasto-lamelni izmjenjivači topline građeni su od skupa paralelno poslaganih slojeva. Svaki sloj sastoji se od dvije pregradne ploče i mikroprolaza koji su oblikovani pomoću usko naslaganih lamela. Slojevi su pregrađeni pomoću pregradnih ploča dok se rubno brtvljenje postiže bočnim šipkama. Blok je izvana obložen vanjskim pločama.

Blok s tako poslaganim elementima zavaruje se u vakumskim pećima. Dobavne glave sa sapnicama naknadno se zavaruju na bočne šipke.

Ograničenje im je da radni medij mora biti bez nečistoća što je u slučaju kriogenih postrojenja ispunjeno. [1]



Slika 4: Aluminijski pločasto – lamelni izmjenjivač topline [1]

Optimizacija i termodinamički proračun aluminijskih pločasto – lamenih izmjenjivača bit će detaljno razrađeni i opisani u dalnjim poglavljima ovoga rada.

2. PROBLEMATIKA ZADATKA

Postojećem postrojenju za kriogenu separaciju zraka potrebno je povećati kapacitet, a to podrazumjeva veće količine dobavljenog zraka. Osim što je taj zrak potrebno pročistiti i komprimirati nužno ga je prije rektifikacije i kriogeno ohladiti. Kriogeno hlađanje zraka odvija se u izmjenjivačima topline i truboekspanderima. Veća količina zraka zahtjeva veći rashladni učin, a s time dolazi i do povećanja izmjenjivačkih površina. S obzirom da je to postojeće postrojenje rekonstrukcjiom se ne smije narušiti operabilnost preostalih procesa. Zbog toga su zadani ulazni i izlazni parametri struja koje je nužno zadovoljiti. Ulazni parametri prikazani su na slici 5.

Ulazne struje	10		4a	6	12b	38	42	44	56
q_n / (m_n^3/h)	26814,2		9409,7	9409,7	6814,2	4000,0	12410,1	3412,8	2309,8
ϑ / °C	20,0		20,0	-87,7	-172,5	-177,5	-178,0	20,0	-172,4
p / bar	50		25	6	6	1,5	1,5	6	15
y_{N2} / y_{O2} (%)	78,1 / 20,9		78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	98,0 / 1,9	1 / 0	1 / 0	0 / 1
Izlazne struje	11	14	5	13		39	43	45	57
q_n / (m_n^3/h)	18391,9	8422,3	9409,7	16223,9		4000,0	12410,1	3412,8	2309,8
ϑ / °C	-95,7	-171,5	-5,0	19,0		18,0	18,0	-176,0	19,0
p / bar	50	50	25	6		1,5	1,5	6	15
y_{N2} / y_{O2} (%)	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9	78,1 / 20,9		98,0 / 1,9	1 / 0	1 / 0	0 / 1

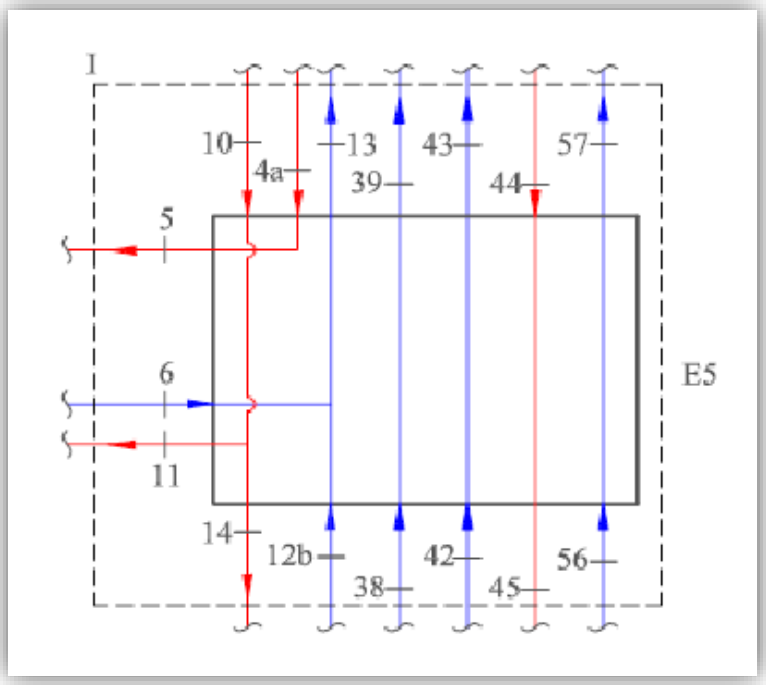
Slika 5: Ulazni i izlazni paramatri struja

Energija potrebna za hlađenje zraka na vrlo niske temperature predstavlja najveći dio troškova proizvodnje, pa su učinkovitost kompresije i izmjene topline vrlo važni. Kako bi učinkovitost izmjene topline bila što veća tijekom rekonstrukcije je potrebno optimalno spariti struje, odnosno iskoristiti što više raspoložive topline toplih struja u svrhu zagrijavanja hladnih. Takvim postupkom ostvarila bi se manja potreba za vanjskim spremnicima topline, a time i troškovi proizvodnje.

3. ANALIZA MASENIH I TOPLINSKIH TOKOVA

3.1. Općenito

Postrojenje sadrži tri tople i četiri hladne struje. Struje koje predaju toplinski tok nazivamo toplima, a struje koje ga primaju hladnima. Shematski prikaz struja dan je slikom 6, a iz njega se može vidjeti kako se neke od struja račvaju ili imaju pritoke.



Slika 6: Shematski prikaz struja

Svaka od struja, osim temperturnim intervalom, određena je i toplinskim kapacitetom. Radni mediji koji su korišteni mješavine su dušika i kisika ili kisik i dušik kao čiste tvari.

Svojstva tvari, uz danu temperaturu i tlak, očitani su pomoću programa Refprop. Vrijednosti termodinamičkih svojstava struja uzete su za temperaturu koja je jednaka aritmetičkoj sredini graničnih temperatura pojedinog temperaturnog raspona.

Poznavanjem temperaturnih raspona i svojstava radnih tvari moguće je odrediti toplinska opterećenja struja. Struje koje se račvaju ili imaju pritok podjeljene su na dva dijela, prije i poslje račve, odnosno pritoka.

Sve struje osim struje 56-57 ne mjenjaju agregatno stanje odnosno ulaze i izlaze iz sustava u plinovitom agregatnom stanju.

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
		ϑ [°C]	ϑ_s [°C]	h [kJ/kgl]	ΔT [K]	Δh_m [kJ/kg]	$\Delta T/\Delta h_m$ [kgK/kJ]	q_v [m_n^3/h]	q_n [kmol/h]	M [kg/kmol]
Struja 10-14 prije	Ulaz	20,0	19,0	409,830	-115,700	-139,490	0,829	26814	1196,528	28,855
	Izlaz	-95,7	-96,7	270,340						
Struja 10-14 poslje	Ulaz	-95,7	-96,7	270,340	-75,800	-222,391	0,341	8422	375,828	28,855
	Izlaz	-171,500	-172,5	47,949						
Struja 4a-5	Ulaz	20,0	19,0	415,450	-25,000	-26,460	0,945	9410	419,888	28,855
	Izlaz	-5,000	-6,0	388,990						
Struja 12b-13 prije	Ulaz	-172,5	-171,5	211,540	84,800	97,650	0,868	6814	304,070	28,855
	Izlaz	-87,700	-86,7	309,190						
Struja 12b-13 poslje	Ulaz	-87,7	-86,7	309,190	106,700	110,140	0,969	16223,900	723,958	28,855
	Izlaz	19,000	20,0	419,330						
Struja 38-39	Ulaz	-177,5	-176,5	218,380	195,500	205,020	0,954	4000	178,492	28,013
	Izlaz	18,000	19,0	423,400						
Struja 42-43	Ulaz	-178,0	-177,0	95,730	196,000	206,130	0,951	12410	553,775	28,089
	Izlaz	18,000	19,0	301,860						
Struja 44-45	Ulaz	20,0	19,0	302,910	-196,000	-214,655	0,913	3413	152,289	28,089
	Izlaz	-176,000	-177,0	88,255						
Struja 56-57	Ulaz	-172,4	-171,4	-114,570	191,400	376,470	0,508	2309,800	103,070	31,999
	Izlaz	19,000	20,0	261,900						

Slika 7: Procesni paramatri struja

3.2. Proračun masenih tokova

Protočne mase struja dobivene su umnoškom zadanog molnog volumena i njihovih molarnih masa.

1) Struja 10-14_{pr}:

$$q_{m,10-14\text{pr}} = \left(\frac{q_v}{22,41} \cdot M\right)_{10-14,\text{pr}} = \frac{26814}{22,41} \cdot 28,855 = 34\,525,82\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \qquad \textbf{3.1}$$

2) Struja 10-14_{po}:

$$q_{m10-14,\text{po}} = \left(\frac{q_v}{22,41} \cdot M\right)_{10-14,\text{po}} = \frac{8422}{22,41} \cdot 28,855 = 10\,844,51\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \qquad \textbf{3.2}$$

3) Struja 4a-5:

$$q_{m,4a-5} = \left(\frac{q_v}{22,41} \cdot M\right)_{4a-5} = \frac{9410}{22,41} \cdot 28,855 = 12\,115,88\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \qquad \textbf{3.3}$$

4) Struja 12b-13$_{pr}$:

$$q_{m,12\mathrm{b}-13,,\mathrm{pr}} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}} = \frac{6814}{22{,}41}\cdot 28{,}855 = 8773{,}92\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.4}$$

5) Struja 12b-13$_{po}$:

$$q_{m,12\mathrm{b}-13,\mathrm{po}} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{12-13,po} = \frac{16223{,}90}{22{,}41}\cdot 28{,}855 = 20\,889{,}81\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.5}$$

6) Struja 38-39:

$$q_{m,38-39} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{38-39} = \frac{4000}{22{,}41}\cdot 28{,}013 = 5000{,}09\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.6}$$

7) Struja 42-43:

$$q_{m,42-43} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{42-43} = \frac{12410}{22{,}41}\cdot 28{,}089 = 15\,554{,}98\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.7}$$

8) Struja 44-45:

$$q_{m,44-45} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{44-45} = \frac{3413}{22{,}41}\cdot 28{,}089 = 4\,277{,}65\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.8}$$

9) Struja 56-57:

$$q_{m,56-57} = \left(\frac{q_v}{22{,}41}\cdot M\right)_{56-57} = \frac{2309{,}80}{22{,}41}\cdot 31{,}99 = 3298{,}14\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \qquad \textbf{3.9}$$

3.3. Proračun toplinskih tokova

Umnoškom masenih tokova struja i razlike ulaznih i izlaznih specifičnih entalpija dobiveni su toplinski tokovi struja.

1) Struja 10-14$_{pr}$:

$$\Phi_{10-14,\mathrm{pr}} = \frac{q_{m,10-14,\mathrm{pr}}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{10-14,\mathrm{pr}} = \frac{34525{,}83}{3600} \cdot (-95{,}7 - 20) \quad \textbf{3.10}$$
$$= -1\,337{,}78\ \mathrm{kW}$$

2) Struja 10-14$_{po}$:

$$\Phi_{10-14,\mathrm{po}} = \frac{q_{m,10-14,\mathrm{po}}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{10-14,\mathrm{po}} = \frac{10844{,}51}{3600} \cdot (-171{,}5 - 95{,}7) \quad \textbf{3.11}$$
$$= -669{,}92\ \mathrm{kW}$$

3) Struja 4a-5:

$$\Phi_{4a-5} = \frac{q_{m,4a-5}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{4a-5} = \frac{12115{,}82}{3600} \cdot (-5 - 20) = -89{,}052\ \mathrm{kW} \quad \textbf{3.12}$$

4) Struja 12b-13$_{pr}$:

$$\Phi_{12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}} = \frac{q_{m,12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}} = \frac{8773{,}93}{3600} \cdot (-87{,}7 - 172{,}5) \quad \textbf{3.13}$$
$$= 237{,}99\ \mathrm{kW}$$

5) Struja 12b-13$_{po}$:

$$\Phi_{12b-13,\mathrm{po}} = \frac{q_{m,12\mathrm{b}-13,\mathrm{po}}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{12\mathrm{b}-13,\mathrm{po}} = \frac{20889{,}81}{3600} \cdot (19 - 87{,}7) \quad \textbf{3.14}$$
$$= 639{,}11\ \mathrm{kW}$$

6) Struja 38-39:

$$\Phi_{38-39} = \frac{q_{m,38-39}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{38-39} = \frac{5000{,}09}{3600} \cdot (18 - 177{,}5) = 284{,}75\ \mathrm{kW} \quad \textbf{3.15}$$

7) Struja 42-43:

$$\Phi_{42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{42-43} = \frac{15554{,}98}{3600} \cdot (18 - 178) = 890{,}65\ \mathrm{kW} \quad \textbf{3.16}$$

8) Struja 44-45:

$$\Phi_{44-45} = \frac{q_{m,44-45}}{3600} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{44-45} = \frac{4277,65}{3600} \cdot (20 - 176) = -255,06 \text{ kW} \quad \textbf{3.17}$$

9) Struja 56-57:

$$\Phi_{56-57} = \frac{q_{m,56-57}}{3600} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{56-57} = \frac{3298,14}{3600} \cdot (19 - 172,4) = 344,90 \text{ kW} \quad \textbf{3.18}$$

Struja 56- 57 osim osjetne topline izmjenjuje i latentnu toplinu. Za zadani tlak u iznosu od 15 bara temperatura zasićenja iznosi -146,17 °C.

Isparavanje			ϑ_{zas} [°C]	h [kJ/kg]	M [kg/kmol]	Δh [kJ/kg]	q_m [kg/h]	ΔH [kW]
Struja 56-57	1,5 MPa	Stanje kaplj.	-146,170	-65,980	32,000	159,92	3298,139	146,511
		Stanje pare		93,940				

Tablica 1: Stanje zasićenja struje 56-57

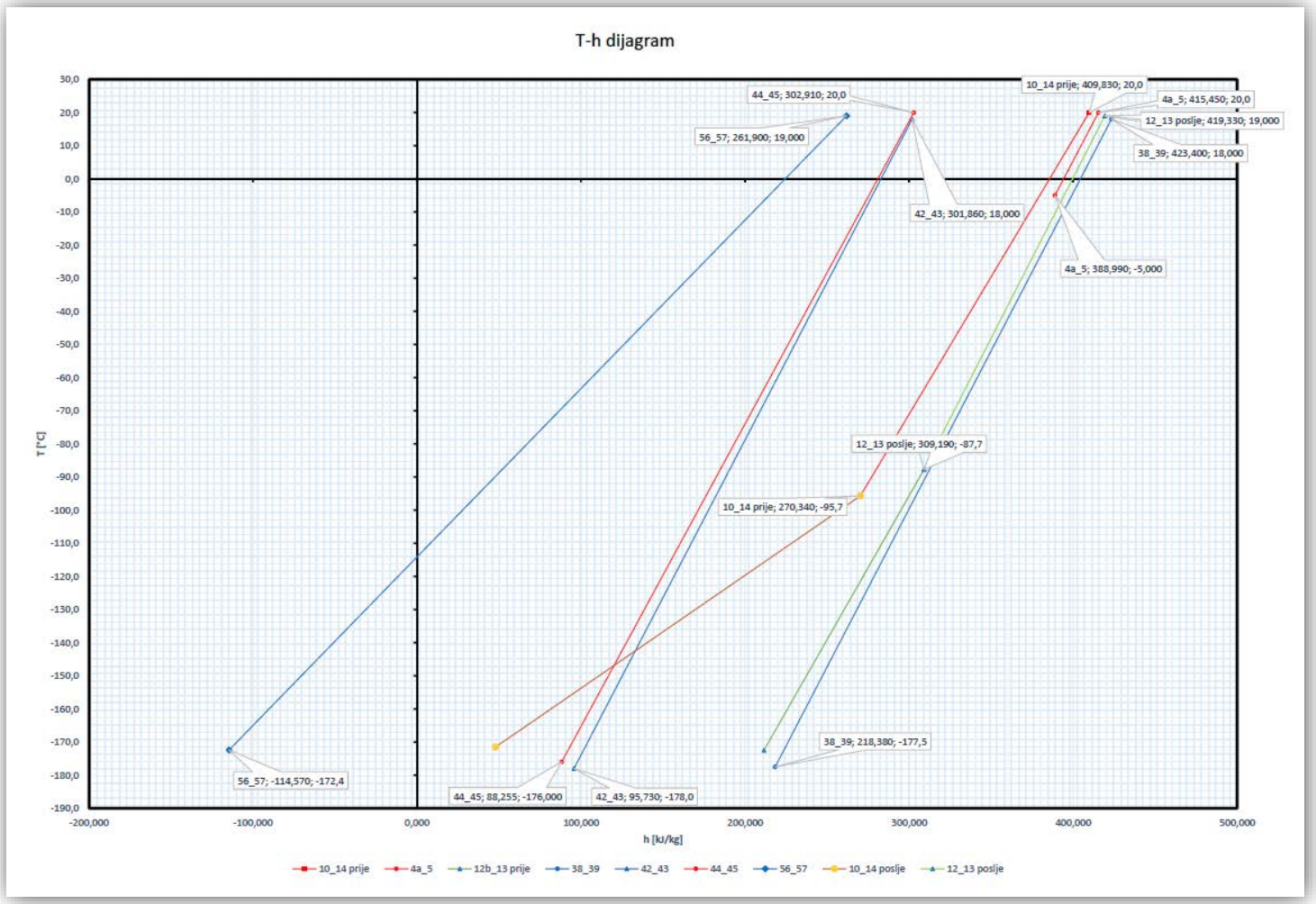
10) Struja 56-57 (stanje zasićenja):

$$\Phi_{56-57,zas} = \frac{q_m}{3600} \cdot \left(h_{szp} - h_{vk}\right) = \frac{3298,14}{3600} \cdot (93,94 - 65,98) = 146,51 \text{ kW} \quad \textbf{3.19}$$

Sumiranjem dobivenih toplinskih tokova dolazimo do iznosa od 192,11 kW potrebnog vanjskog grijanja. Drugim riječima, toplina dostupna od toplih struja nije dovoljna kako bi zagrijala sve hladne struje na njihove krajnje temperature.

Dobiveni iznos predstavlja minimalnu potrebu za vanjskim grijanjem. Time smo postavili cilj koji bi bio optimalno rješenje ovoga sustava. Ostvarivost i valjanost takvoga procesa bit će ispitana i utvrđena u sljedećim poglavljima.

Prikaz toplinskih opterećenja struja u odnosu na temperaturu dan je slikom 8.



Slika 8: *T-h* dijagram

4. PINCH METODA

Analizom masenih i toplinskih tokova izračunati su tokovi svih struja i minimalna potreba za dodatnim toplinskim spremnikom. Kako se kroz sustav izmjena topline odvija između velikog broja struja sparivanje struja je provedeno pomoću Pinch analize. Pinch analiza se koristi u optimizaciji sutava grijanja, hlađenja i energetskih postrojenja svih veličina. Optimizacija sustava često nije jednostavna jer zahtjeva balansiranje raznih tipova troškova. Često je slučaj da maksimalna iskoristivost toplinskog potencijala struja vodi većem broju izmjenjivačkih površina (investicijski troškovi) ili u suprotnom slučaju, manjem broju površina ali većim pogonski troškovima (potreba za dodatnim ogrjevnim i rashladnim spremnicima). U kriogenoj separaciji zraka cilj je ostvariti maksimalnu iskoristivost toplinskog potencijala zbog visokih troškova hlađenja zraka na tako niske temperature. Pinch metoda razlikuje dva načina izračuna, grafičkom metodom i pomoću tabličnog proračuna. [7]

4.1. Grafička metoda - kompozitne krivulje toplih i hladnih struja

Prolaskom struja kroz sustav izmjenjivača svaka od struja sposobna je predati ili primiti određeni iznos topline. S obzirom da u ovome sustavu toplinu izmjenjuje sedam struja u različitim tempraturnim rasponima teško je odrediti koliko koja struja u određenoj točki sustava može predati ili primiti topline. Iz toga razloga mreža toplih struja se dijeli na temperaturne intervale koji su određeni ulaznom, izlaznom i u slučaju nekih struja, temperaturom račvanja ili pritoka. U ovome slučaju radi se o tri tople struje čije temperature su dane tablicom 2.

Struja	ϑ_{ul} [°C]	ϑ_{iz} [°C]	ϑ_r ili ϑ_p [°C]
10-14	20	-171,5	-95,7
4a-5	20	-5	-
44-45	20	-176	-

Tablica 2: Temperaturni rasponi toplih struja

Na temelju tih vrijednosti određena su četiri intervala toplih struja, a prikazani su tablicom 3.

Interval(n):	$\vartheta_{ul,int}$ [°C]	$\vartheta_{iz,int}$ [°C]
1	20	-5
2	-5	-95,7
3	-95,7	-171,5
4	-171,5	-176

Tablica 3: Temperaturni intervali toplih struja

Na primjeru toga može se zaključiti kako u intervalu 1 toplinu će predavati sve tri tople struje dok u intervalu 4 samo struja 44- 45. Zbrajanjem svi toplinskih opterećenja toplih struja u rasponu određenog temperaturnog intervala i ucrtavanjem istih u *T/H* dijagram dobiva se takozvana kompozitna krivulje toplih struja.

Na isti način su podjeljene hladne struje i određeni njihovi temperaturni intervali te ucrtana kompozitna krivulja hladnih struja. Temperature hladnih struja dane su tablicom 4.

Struja	ϑ_{ul} [°C]	ϑ_{iz} [°C]	ϑ_r ili ϑ_p [°C]
12b-13	-172,5	19	-87,7
38- 39	-177,5	18	-
42- 43	-178	18	-
56- 57	-172,4	19	-

Tablica 4: Temperaturni rasponi hladnih struja

Na osnovu toga određeno je šest intervala hladnih struja prikazanih tablicom 5.

Interval (n):	$\vartheta_{ul,int}$ [°C]	$\vartheta_{iz,int}$ [°C]
1	-178	-177,5
2	-177,5	-172,5
3	-172,5	-172,4
4	-172,4	-87,7
5	-87,7	18
6	18	19

Tablica 5: Temperaturni intervali hladnih struja

4.1.1. Temperaturni intervali i kompozitna krivulja toplih struja

Umnoškom razlike specifičnih entalpija na ulazu i izlazu iz intervala i protočnih masa struja izračunati su toplinski tokovi struja u danim temperaturnim intervalima.

Interval 1 (ϑ_{ul} =20°C; ϑ_{iz}=-5 °C)

a) Struja 10-14$_{pr}$:

$$\Delta H_{1,10-14} = q_{m,10-14} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{1,10-14} = \frac{q_{m,10,14}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\mathrm{ul}} - \frac{\vartheta_{\mathrm{ul}} - \vartheta_{\mathrm{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\mathrm{ul}}\right]_{1,10-14} \quad \textbf{4.1}$$

$$= \frac{34525{,}82}{3600} \cdot \left[\left(409{,}83 - \frac{20-(-5)}{0{,}829}\right) - 409{,}83\right] = -289{,}06\ \mathrm{kW}$$

U jednadžbi [4.1] gradijent $\frac{\Delta T}{\Delta H}$ predstavlja brzinu promjene temperature struje u odnosu na promjenu entalpije. Gradijent struje izračunat je pomoću razlike ulazne i izlazne temperature i razlike entalpija u istim točkama sustava.

b) Struja 4a-5:

$$\Delta H_{1,4a-5} = q_{m,4a-5} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{4a-5} = \frac{q_{m,4a-5}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\mathrm{ul}} - \frac{\vartheta_{\mathrm{ul}} - \vartheta_{\mathrm{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\mathrm{ul}}\right]_{1,4a-5} \quad \textbf{4.2}$$

$$= \frac{12115{,}81}{3600} \cdot \left[\left(415{,}45 - \frac{20-(-5)}{0{,}945}\right) - 415{,}45\right] = -89{,}05\ \mathrm{kW}$$

c) Struja 44-45:

$$\Delta H_{1,44-45} = q_{m,44-45} \cdot (h_{\mathrm{iz}} - h_{\mathrm{ul}})_{44-45} = \frac{q_{m,44-45}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\mathrm{ul}} - \frac{\vartheta_{\mathrm{ul}} - \vartheta_{\mathrm{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\mathrm{ul}}\right]_{1,44-45} \quad \textbf{4.3}$$

$$= \frac{4277{,}65}{3600} \cdot \left[\left(302{,}91 - \frac{20-(-5)}{0{,}913}\right) - 302{,}91\right] = -32{,}53\ \mathrm{kW}$$

Interval 2 (ϑ_{ul} = -5°C; ϑ_{iz}= -95,7 °C)

d) Struja 10-14$_{pr}$:

$$\Delta H_{2,10-14} = q_{m,10-14} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{10-14} = \frac{q_{m,10,14}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{2,10-14} \quad \textbf{4.4}$$

$$= \frac{34525,82}{3600} \cdot \left[\left(379,69 - \frac{-5-(-95,7)}{0,829}\right) - 379,69\right] = -1048,72 \text{ kW}$$

e) Struja 44-45:

$$\Delta H_{2,44-45} = q_{m,44-45} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{44-45} = \frac{q_{m,44-45}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{2,44-45} \quad \textbf{4.5}$$

$$= \frac{4277,65}{3600} \cdot \left[\left(275,53 - \frac{-5-(-95,7)}{0,913}\right) - 275,53\right] = -118,03 \text{ kW}$$

Interval 3 (ϑ_{ul} = -95,7°C; ϑ_{iz}= -171,5 °C)

f) Struja 10-14$_{pr}$:

$$\Delta H_{3,10-14} = q_{m,10-14} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{10-14} = \frac{q_{m,10-14}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{3,10-14} \quad \textbf{4.6}$$

$$= \frac{10844,51}{3600} \cdot \left[\left(270,34 - \frac{-95,7-(-171,5)}{0,341}\right) - 270,34\right] = -669,92 \text{ kW}$$

g) Struja 44-45:

$$\Delta H_{3,44-45} = q_{m,44-45} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{44-45} = \frac{q_{m,44-45}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{3,44-45} \quad \textbf{4.7}$$

$$= \frac{4277,65}{3600} \cdot \left[\left(176,198 - \frac{-95,7-(-171,5)}{0,913}\right) - 176,198\right] = -98,64 \text{ kW}$$

Interval 4 (ϑ_{ul} = -171,5°C; ϑ_{iz}= -176 °C)

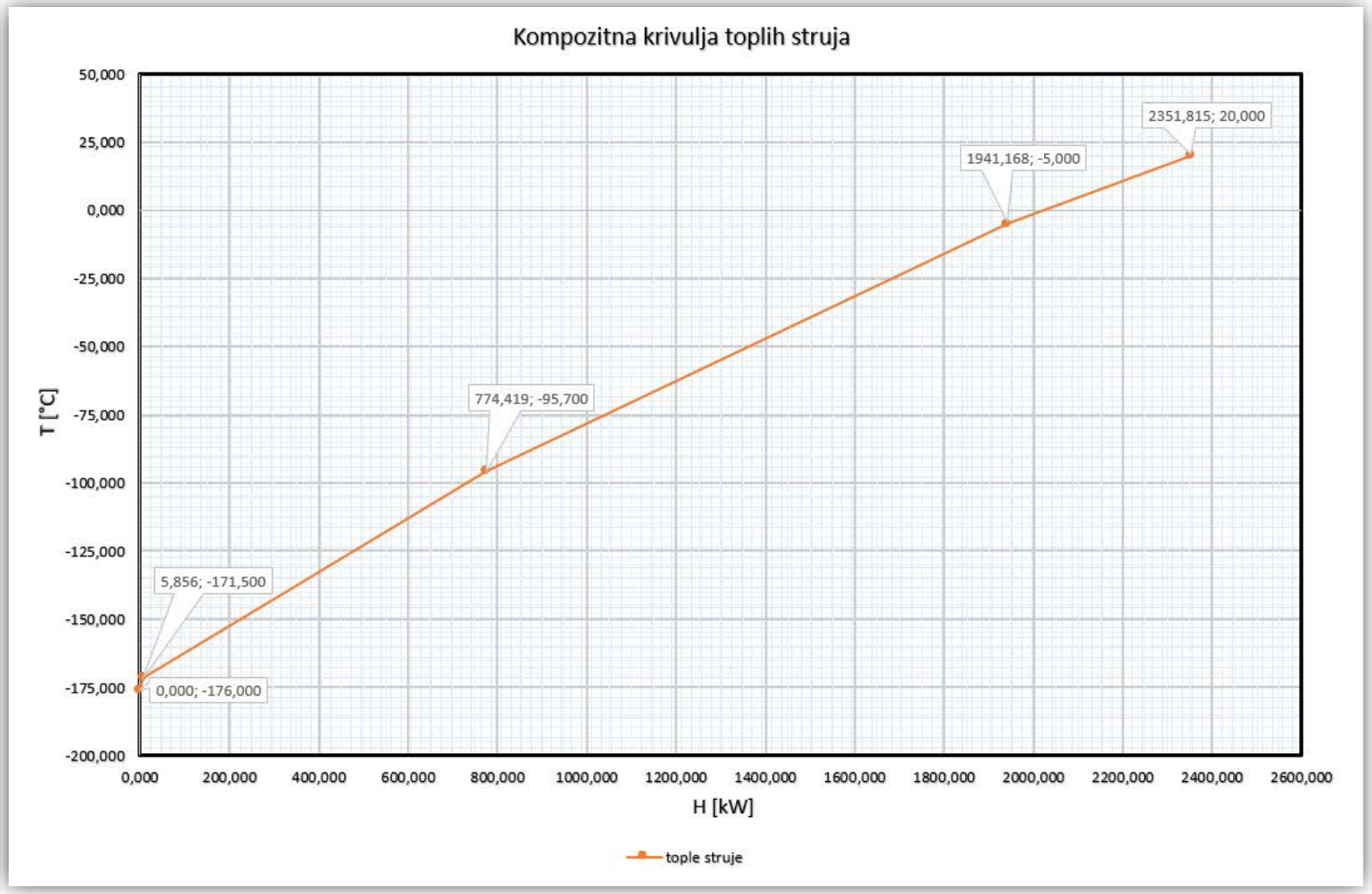
h) Struja 44-45:

$$\Delta H_{4,44-45} = q_{m,44-45} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{44-45} == \frac{q_{m,44-45}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{,44-45} \quad \textbf{4.8}$$

$$= \frac{4277,65}{3600} \cdot \left[\left(93,18 - \frac{-95,7 - (-171,5)}{0,913}\right) - 93,18\right] = -5,86 \text{ kW}$$

Interval (n):	$\vartheta_{ul,int}$ [°C]	$\vartheta_{iz,int}$ [°C]	ΔH_n[kW]
1	20	-5	-410,64
2	-5	-95,7	-1166,75
3	-95,7	-171,5	-886,59
4	-171,5	-176	-5,86

Tablica 6: Toplinski tokovi intervala toplih struja



Slika 9: Kompozitna krivulja toplih struja

4.1.2. Temperaturni intervali i kompozitne krivulje hladnih struja

Interval 1 (ϑ_{ul} = -178 °C; ϑ_{iz}= -177,5 °C)

a) Struja 42-43:

$$\Delta H_{1,42-43} = q_{m,42-43} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{1,42-43} \quad \textbf{4.9}$$

$$= \frac{15554,98}{3600} \cdot \left[\left(95,730 + \frac{-177,5 - (-178)}{0,951}\right) - 95,730\right] = 2,27 \text{ kW}$$

Interval 2 (ϑ_{ul} = -177,5 °C; ϑ_{iz}= -172,5 °C)

b) Struja 38-39:

$$\Delta H_{2,38-39} = q_{m,38-39} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{38-39} = \frac{q_{m,38-39}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{1,38-39} \quad \textbf{4.10}$$

$$= \frac{5000,09}{3600} \cdot \left[\left(218,38 + \frac{-172,5 - (-177,5)}{0,954}\right) - 218,38\right] = 7,28 \text{ kW}$$

d) Struja 42-43:

$$\Delta H_{2,42-43} = q_{m,42-43} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{2,42-43} \quad \textbf{4.11}$$

$$= \frac{15554,98}{3600} \cdot \left[\left(96,256 + \frac{-172,5 - (-177,5)}{0,951}\right) - 96,256\right] = 22,72 \text{ kW}$$

Interval 3 (ϑ_{ul} = -172,5 °C; ϑ_{iz}= -171,4 °C)

e) Struja 12b-13$_{pr}$:

$$\Delta H_{3,12b-13} = q_{m,12b-13} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{12b-13} = \frac{q_{m,12b-13}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{3,12b-13} \quad \textbf{4.12}$$

$$= \frac{8773,929}{3600} \cdot \left[\left(211,54 + \frac{-171,4 - (-171,5)}{0,868}\right) - 211,54\right] = 0,28 \text{ kW}$$

f) Struja 38-39:

$$\Delta H_{3,38-39} = q_{m,38-39} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{38-39} = \frac{q_{m,38-39}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{3,38-39} \quad \textbf{4.13}$$

$$= \frac{5000,09}{3600} \cdot \left[\left(223,62 + \frac{-171,4 - (-172,5)}{0,954}\right) - 223,62\right] = 0,146 \text{ kW}$$

g) Struja 42-43:

$$\Delta H_{3,42-43} = q_{m,42-43} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{3,42-43} \quad \textbf{4.14}$$

$$= \frac{15554,98}{3600} \cdot \left[\left(101,51 + \frac{-171,4 - (-172,5)}{0,951}\right) - 101,54\right] = 0,454 \text{ kW}$$

Interval 4 (ϑ_{ul} = -171,4 °C; ϑ_{iz}= -87,7 °C)

h) Struja 12b-13$_{pr}$:

$$\Delta H_{4,12b-13} = q_{m,12b-13} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{12b-13} = \frac{q_{m,12b-13}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{4,12b-13} \quad \textbf{4.15}$$

$$= \frac{8773,929}{3600} \cdot \left[\left(211,66 + \frac{-86,7 - (-171,4)}{0,868}\right) - 211,66\right] = 237,71 \text{ kW}$$

i) Struja 38-39:

$$\Delta H_{4,38-39} = q_{m,38-39} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{38-39} = \frac{q_{m,38-39}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{4,38-39} \quad \textbf{4.16}$$

$$= \frac{5000{,}09}{3600} \cdot \left[\left(223{,}73 + \frac{-86{,}7 - (-171{,}4)}{0{,}954}\right) - 223{,}73\right] = 123{,}37 \text{ kW}$$

j) Struja 42-43:

$$\Delta H_{4,42-43} = q_{m,42-43} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{4,42-43} \quad \textbf{4.17}$$

$$= \frac{15554{,}98}{3600} \cdot \left[\left(101{,}70 + \frac{-86{,}7 - (-171{,}4)}{0{,}951}\right) - 101{,}70\right] = 384{,}89 \text{ kW}$$

k) Struja 56-57:

$$\Delta H_{4,56-57} = q_{m,56-57} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{56-57} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{4,56-57} \quad \textbf{4.18}$$

$$= \frac{3298{,}14}{3600} \cdot \left[\left(-114{,}57 + \frac{-86{,}7 - (-171{,}4)}{0{,}508}\right) - (-114{,}57)\right] = 152{,}63 \text{ kW}$$

Interval 5 (ϑ_{ul} = -86,7 °C; ϑ_{iz}= +18,0 °C)

l) Struja 12b-13_{po}:

$$\Delta H_{5,12b-13} = q_{m,12b-13} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{5,12b-13} = \frac{q_{m,12b-13}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{5,12b-13} \quad \textbf{4.19}$$

$$= \frac{20889{,}81}{3600} \cdot \left[\left(309{,}19 + \frac{18 - (-86{,}7)}{0{,}969}\right) - 309{,}19\right] = 633{,}12 \text{ kW}$$

m) Struja 38-39:

$$\Delta H_{5,38-39} = q_{m,38-39} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{5,38-39} = \frac{q_{m,38-39}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{5,38-39} \quad \textbf{4.20}$$

$$= \frac{5000{,}09}{3600} \cdot \left[\left(312{,}55 + \frac{18 - (-86{,}7)}{0{,}954}\right) - 312{,}55\right] = 153{,}96 \text{ kW}$$

n) Struja 42-43:

$$\Delta H_{5,42-43} = q_{m,42-43} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{5,42-43} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{5,42-43} \quad \textbf{4.21}$$

$$= \frac{15554{,}98}{3600} \cdot \left[\left(190{,}70 + \frac{18 - (-86{,}7)}{0{,}951}\right) - 190{,}70\right] = 480{,}32 \text{ kW}$$

o) Struja 56-57:

$$\Delta H_{5,56-57} = q_{m,56-57} \cdot (h_{\text{iz}} - h_{\text{ul}})_{5,56-57} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{\text{ul}} - \frac{\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{\text{ul}}\right]_{5,56-57} \quad \textbf{4.22}$$

$$= \frac{3298{,}14}{3600} \cdot \left[\left(52{,}03 + \frac{18 - (-86{,}7)}{0{,}508}\right) - 52{,}03\right] = 190{,}47 \text{ kW}$$

Interval 6 (ϑ_{ul} = +18 °C; ϑ_{iz}= +19 °C)

p) Struja 12b-13$_{po}$:

$$\Delta H_{6,12b-13} = q_{m,6,12b-13} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{6,12b-13} = \frac{q_{m,12b-13}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{6,12b-13} \quad \textbf{4.23}$$

$$= \frac{20889,81}{3600} \cdot \left[\left(418,30 + \frac{19-18}{0,969}\right) - 418,30\right] = 5,99 \text{ kW}$$

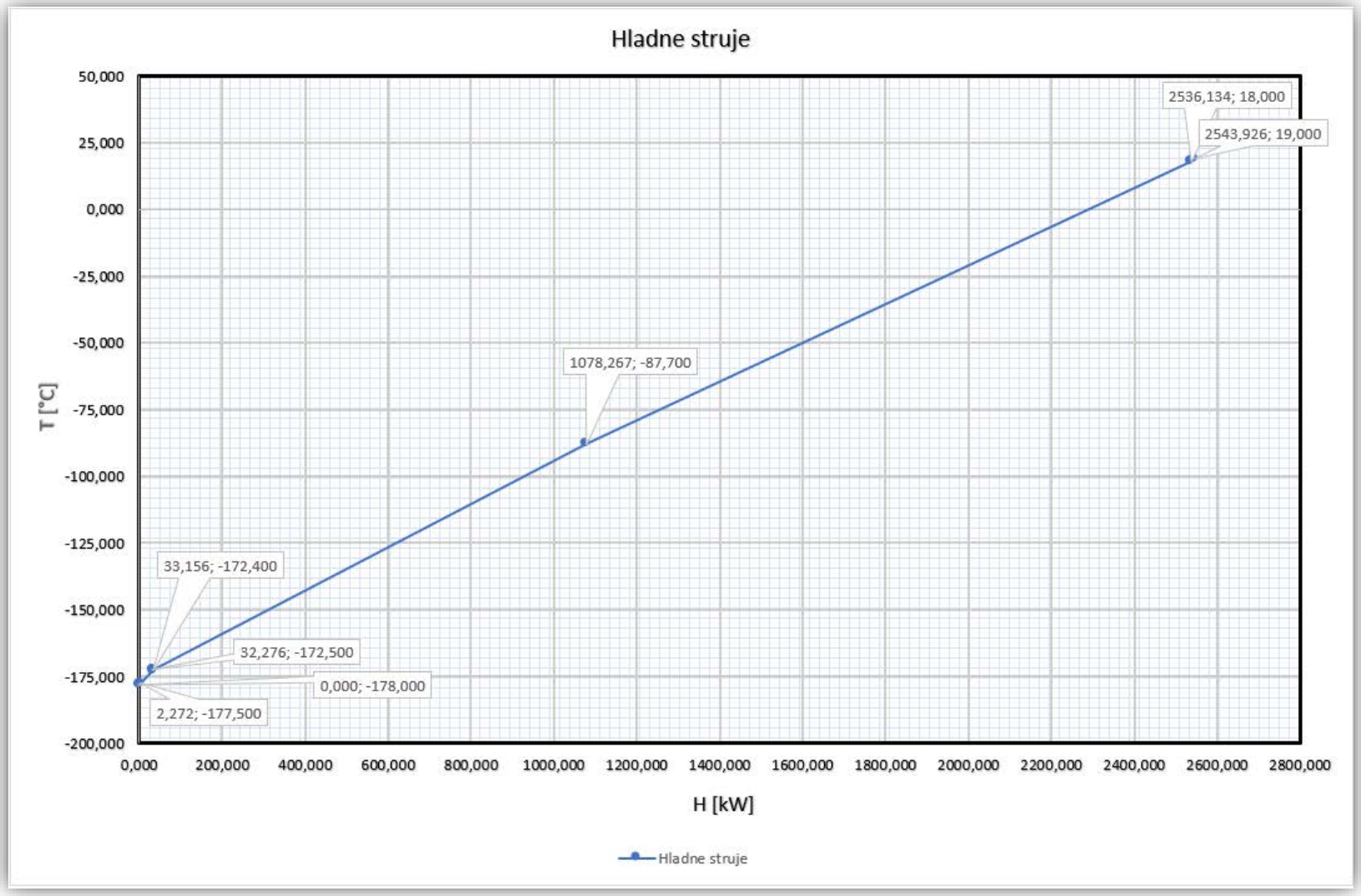
q) Struja 56-57:

$$\Delta H_{6,56-57} = q_{m,56-57} \cdot (h_{iz} - h_{ul})_{6,56-57} = \frac{q_{m,42-43}}{3600} \cdot \left[\left(h_{ul} - \frac{\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz}}{(\frac{\Delta T}{\Delta H})}\right) - h_{ul}\right]_{6,56-57} \quad \textbf{4.24}$$

$$= \frac{3298,14}{3600} \cdot \left[\left(259,93 + \frac{19-18}{0,508}\right) - 259,93\right] = 1,802 \text{ kW}$$

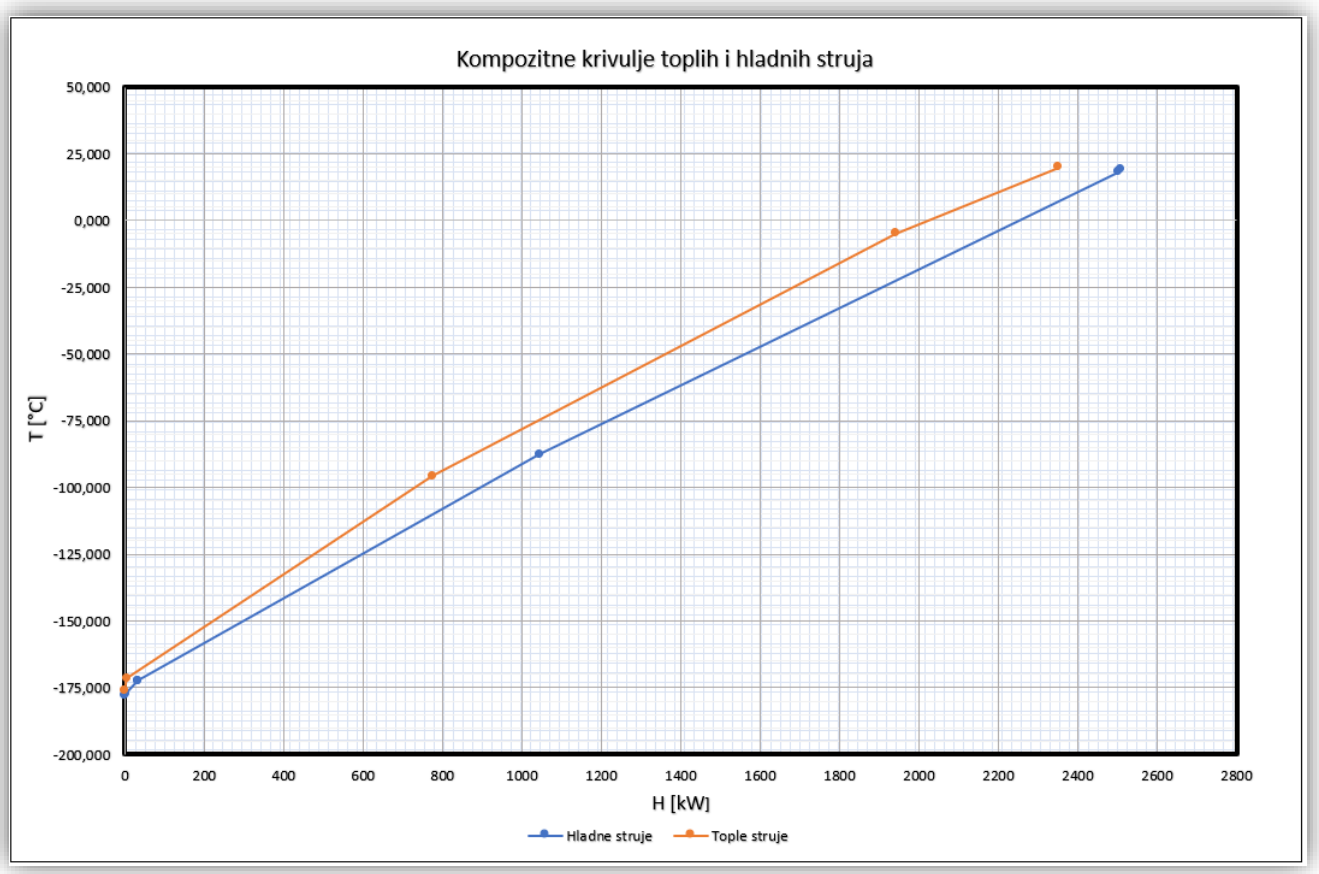
Interval (n):	$\vartheta_{ul,int}$ [°C]	$\vartheta_{iz,int}$ [°C]	ΔH_n[kW]
1	-178	-177,5	+2,27
2	-177,5	-172,5	+30,00
3	-172,5	-172,4	+0,88
4	-172,4	-87,7	+898,60
5	-87,7	18	+1457,87
6	18	19	+7,79

Tablica 7: Toplinski tokovi intervala hladnih struja



Slika 10: Kompozitna krivulja hladnih struja

U svrhu utvrđivanja potrebe za grijanjem i hlađenjem i određivanja pincha, točke u sustavu u kojoj je minimalna temperaturna razlika toplih i hladnih struja, potrebno je preklopiti dobivene kompozitne krivulje, što se vidi na slici 12.



Slika 11: Kompoztne krivulje toplih i hladnih struja

Iz slike 11 vidi se da u donjem dijelu dijagrama dolazi do pojave pincha te nema potrebe za vanjskim hlađenjem ("threshold" problem).

Može se uočiti kako unutar pojedinih temperaturnih intervala egzistiraju tople i hladne struje, a to znači da će se unutar tih intervala sva raspoloživa toplina toplih struja predati hladnim strujama.

Neprekloplјeni dio kompozitne krivulje predstavlja dio intervala u kojima egzistiraju samo hladne struje. U tim intervalima ne postoji izmjena topline između hladnih i toplih struja već se hladne struje moraju grijati pomoću vanjskog spremnika, a iznos potreban za grijanje iznosi oko 190 kW. Gotovo isti iznos smo dobili analizom toplinskih tokova. Uzimajući u obzir nepreciznost dijagrama može se reći da smo potvrdili već dobiveni rezultat.

4.2. Tablična metoda

Konstrukcijom kompozitnih krivulja određena je lokacija pincha i potreba za vanjskim grijanjem. Grafička metoda je odlična za vizualizaciju problema ali isto tako je nepraktična. Iz gore priloženih dijagrama teško možemo ustanoviti pri kojoj točno temperaturi nastupa pinch. Zbog toga je proračun pincha na kraju napravljen korištenjem tablične metode.

4.2.1. Temperaturni intervali toplih i hladnih struja

Kao i kod kompozitnih krivulja prvi korak je odrediti temperaturne intervale. Za razliku od prošle metode kod tablične metode hladne i tople struje imaju zajedničke temperaturne intervale. Unutar svakog intervala zbrajaju se toplinska opterećenja toplih i hladnih struja te zbog toga svaki interval ima toplinski suficit ili deficit, ali nikada oboje. Osim toga potrebno je osigurati da je temperaturna razlika između toplih i hladnih struja unutar intervala minimalno $\Delta T_{\min}$. To je postignuto uvećavanjem temperatura toplih struja za iznos $\frac{\Delta T_{min}}{2}$, odnosno umanjivanjem temperatura hladnih struja za $\frac{\Delta T_{min}}{2}$. Novo dobivene temperature nazivaju se intervalskim temperaturama.

Vrijednost $\Delta T_{\min}$ = + 2 °C prvo je bila pretpostavljena no osnovu literature [7], a kasnije je tabličnim proračunom utvrđeno kako se za taj iznos postiže maksimalna toplinska iskoristivost sustava te je taj iznos prisvojen. Inače, takva niska vrijednost temperaturne razlike je uobičajna u kriogenoj tehnici zbog vrlo visokih proizvodnih troškova [7].

Poznavanjem broja struja unutar svakog intervala omogućuje jednostavan izračun razlike entalpija tj. toplinskih tokova:

$$\Delta H_{\mathrm{n}} = (\vartheta_{s,\mathrm{n}} - \vartheta_{s,n+1})(\sum CP_{\mathrm{T}} - \sum CP_{\mathrm{H}})_n \qquad \textbf{4.25}$$

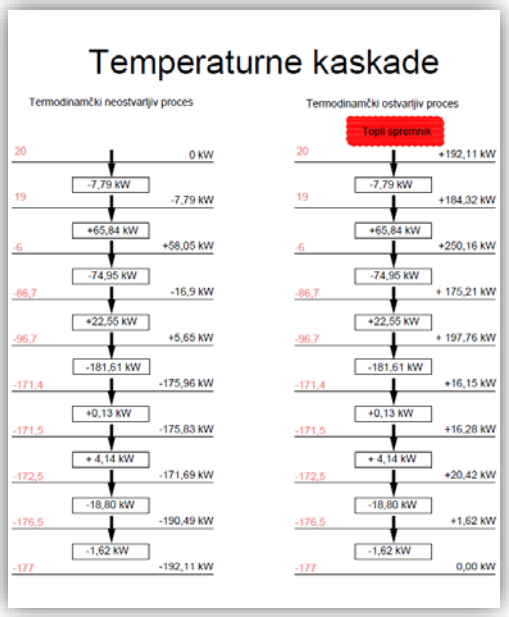
za bilo koji interval *i*.

Interval (n):	$\vartheta_{ul,s}$ [°C]	$\vartheta_{iz,s}$ [°C]	ΔH_n[kW]
1	20	19	-7,79
2	19	-6	+65,84
3	-6	-86,7	-74,95
4	-86,7	-96,7	+22,55
5	-96,7	-171,4	-181,61
6	-171,4	-171,5	+0,133
7	-171,5	-172,5	+4,14
8	-172,5	-176,5	-18,78
9	-176,5	-177	-1,621

Tablica 8: Intervali toplih i hladnih struja

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da je u određenim intervalima potrebno dovoditi a u drugima odvoditi toplinu. Ako bi se izmjena topline odvijala direktno, između svakog intervala i vanjskog spremnika, sustav bi zahtjevao znatan broj spremnika sa različitim temperaturama, a to bi ga činilo nepraktičnim.

Zbog toga se koristi glavna karakteristika temperaturnih intervala, a to je da toplina raspoloživa u intervalu *i* može zadovoljiti potrebu intervala *i+1*. Takav sustav izmjene topline naziva se kaskadni. Prikaz sustava dan je slikom 12.



Slika 12: Kaskadni dijagrami

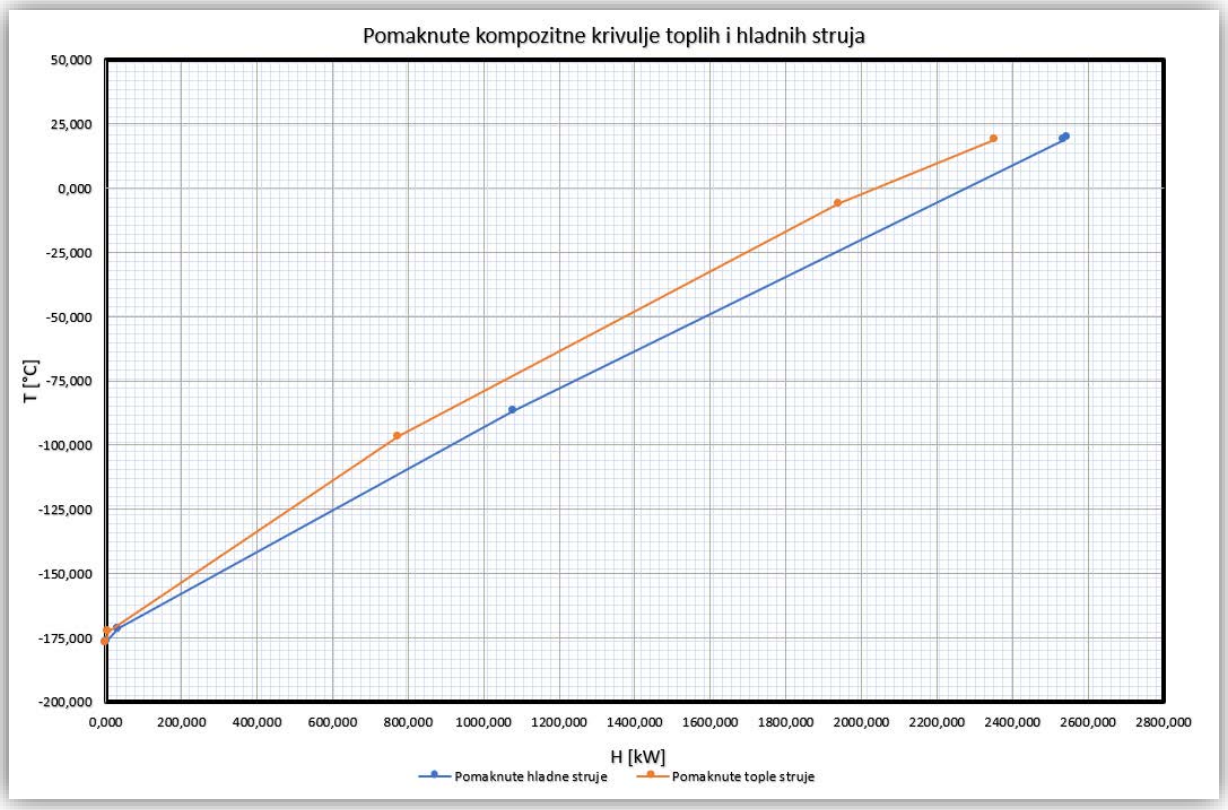
| | | |

5. KONSTRUKCIJA I OPTIMIZACIJA MREŽE IZMJENJIVAČA

5.1. Osnovna pravila pri konstrukciji mreže izmjenjivača

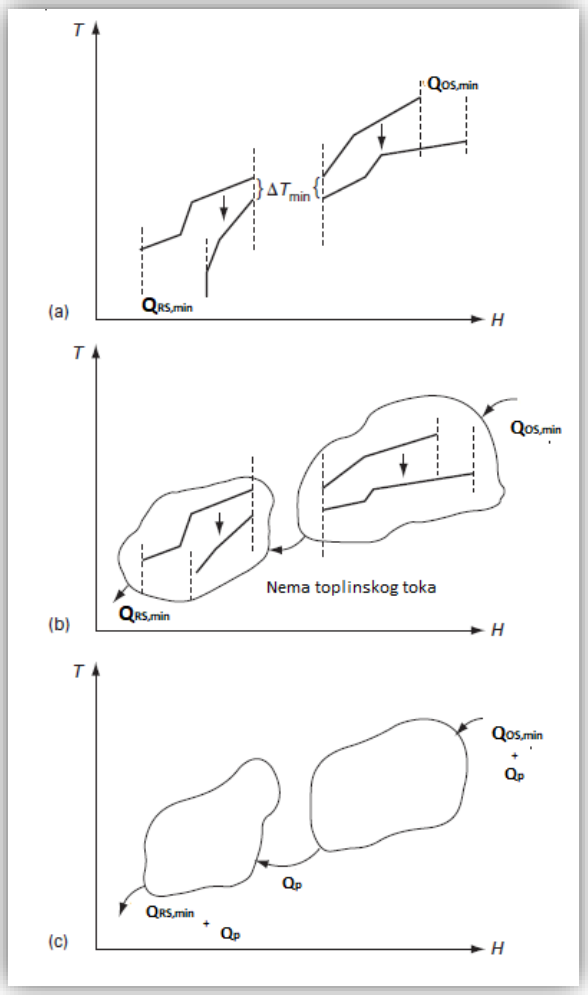
Potvrdivši ostvarivost procesa koji bi imao maksimalnu iskoristivost raspoloživog toplinkog potencijala potrebno je osmisliti sustav izmjenjivačkih površina pomoću kojih bi se takav proces odvijao.

U prethodnom poglavlju pokazano je kako pinch predstavlja točku sustava u kojoj je toplinski tok minimalan. Desno od te točke tople struje predaju sav toplinski tok hladnima, ostavljajući potrebu samo za ogrjevnim spremnikom. To područje se naziva toplinskim ponorom. To se najbolje može prikazati pomoću kompozitnih krivulja intervalskih temperatura. [7]



Slika 13: Kompozitna krivulja intervalskih temperatura

Na osnovu tabličnog proračuna i slike 12 može se zaključiti da u slučaju prijenosa topline preko pincha sustav zahtjeva više vanjskog rashladnog i ogrjevnog učina od minimlanog. Grafički prikaz dan je slikom 14.



Slika 14: Prijenos topline preko pincha [7]

Toplinski tok prenešen kroz pinch Q_p ujedno predstavlja i iznos za koji je uvećana potreba za vanjskim spremnicima.

Kako bi se ostvario optimalan proces bez prekomjernog korištenja vanjskih spremnika postavljena su tri pravila kojih bi se trebalo pridržavati prilikom konstruiranja mreže izmjenjivača.

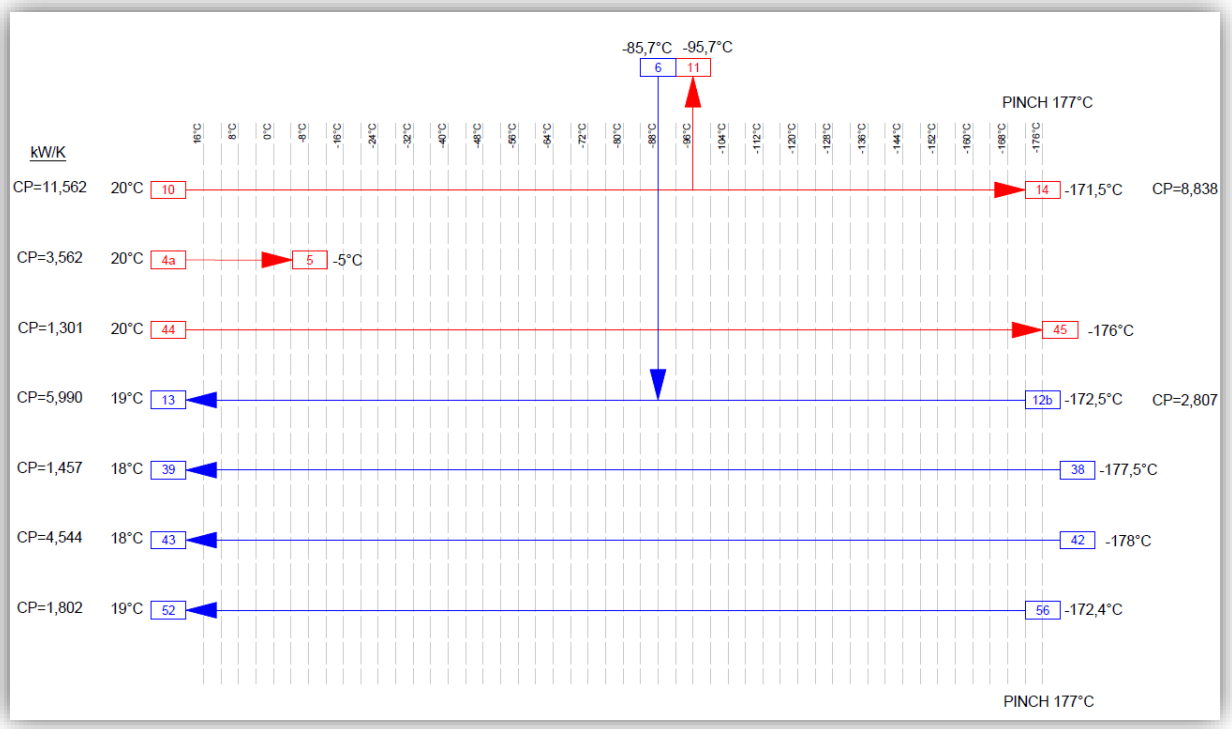
1) Ne prenosi toplinu preko pincha.
2) Ne koristi rashladne spremnike iznad pincha.
3) Ne koristi ogrjevne spremnike ispod pincha.

Ponekad kršenja tih pravila su potrebna, u slučaju da nam minimalni utrošak vanjskih spremnika nije prioritet. [7]

5.2. Konstrukcija mreže izmjenjivača

Sada kada je poznato koja se osnovna pravila moraju poštovati kreće se sa konstrukcijom mreže izmjenjivačkih površina.

Radi što lakše vizualizacije struja i njihovih temperaturnih raspona koristi se rešetkasti dijagram prikazan na slici 15.



Slika 15: Rešetkasti dijagram struja

Konstrukcija mreže izmjenjivača kreće uvijek od najosjetljivije točke, a to je pinch. Razlikujemo područje blizu pincha i dalje od pincha. Prilikom konstrukcije mreže blizu pincha mora se paziti na poštivanje tri glavna pravila. S obzirom da u ovom slučaju postoji granični problem ("treshold"), potreban je samo jedan vanjski spremnik, pa nema opasnosti da će se toplina prenjeti kroz pinch. Time je ispoštovano prvo pravilo.

Tokom konstrukcije mreže iznad pincha uz osnovna pravila nužno je zadovoljiti dva dodatna uvjeta. Prvi od njih se tiče toplinskih kapaciteta struja i glasi:

$$CP_{\text{TOPLIH}} \leq CP_{\text{HLADNIH}} \qquad \textbf{(1)}$$

Poštivanjem postavljenog uvijeta sigurni smo kako neće doći do križanja struja i što čini proces termodinamički ostvarivim.

Uz uvjet za toplinske kapacitete nužno je zadovoljiti i uvjet da je iznad pincha broj hladnih struja veći ili jednak broju toplih struja, tj.:

$$N_{\text{TOPLIH}} \leq N_{\text{HLADNIH}} \qquad \textbf{(2)}$$

Navedeni uvjet osigurava da je svaku od toplih struja moguće ohladiti na temperaturu pincha.

Prema slici 15 uočava se da blizu pincha nalaze dvije tople i četiri hladne struje. Od dvije tople struje samo jedna zadovoljava postavljeni uvijet (1) a to je struja 44 – 45. Struja 44 – 45 uparena je sa strujom 38 – 39 i iskorišten je njezin ukupni toplinski potencijal u cilju zagrijavanja hladne struje. Struja 44 – 45 ohlađena je na svoju izlaznu temperaturu i pri tome je predala toplinski tok:

$$\Phi_4 = CP_{44-45} \cdot (\vartheta_{\text{ul}} - \vartheta_{\text{iz}})_{44-45} = 1{,}301 \cdot [-176 - 20] = -255{,}06\ \text{kW} \qquad \textbf{5.1}$$

Tim toplinskim tokom struja 38 – 39 zagrijana je na temperaturu:

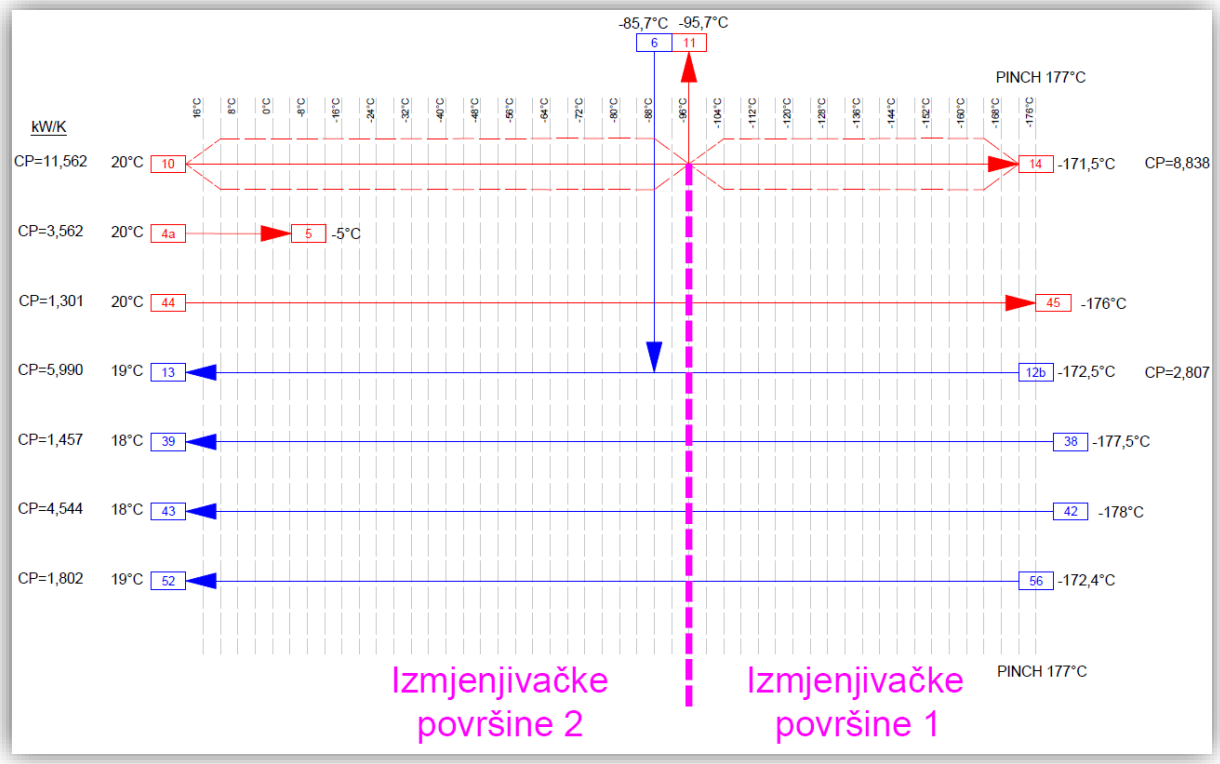
$$\vartheta_{4,38-39,\text{izl}} = \vartheta_{4,38-39,\text{ul}} + \frac{\Phi_4}{CP_{38-39}} = -177{,}5 + \frac{255{,}06}{1{,}457} = -2{,}44\ °\text{C} \qquad \textbf{5.2}$$

Struja 38- 39 zahjeva 29,69 kW preostalog toplinskog toka kako bi se postigla njezina krajnja temperatura.

Druga struja, struja 10 -14, ima znatno veći toplinski kapacitet od bilo koje raspoložive hladne struje. Uparivanjem struje toga kapaciteta uvjet 1] bio bi prekršen. Kako do toga ne bi došlo struju 10-14 nužno je podjeliti na više ogranaka.

Uzimajući u obzir oba uvjeta struja 10-14 podjeljena je na tri ogranka.

Moguće je primjetiti kako struja 10-14 osim ogranaka ima i račvu, odnosno jedan dio struje se izvodi van sustava izmjenjivačkih površina nakon što je ohlađen na temperaturu od -95,7 °C. Radi jednostavnije i optimalne konstrukcije mreže sustav izmjenjivačkih površina podjeljen je na dva dijela, prije i poslje račvanja struje 10 – 14 (Slika 16). Pod optimalnom konstrukcijom podrazumjeva se zadovoljavanje uvjeta [1] i [2].



Slika 16: Prikaz podjeljenog sustava

Toplinski kapaciteti ogranaka prije račavanja iznose:

Ogranak (i):	$CP_{i,prije}$ **[kW/K]**
1	5,832
2	4,270
3	1,461

Tablica 10: Toplinski kapaciteti ogranaka prije račve

Dok njihov iznos poslje račve je:

Ogranak (i):	$CP_{i,poslje}$ **[kW/K]**
4	2,670
5	4,450
6	1,718

Tablica 11: Toplinski kapaciteti ogranaka poslje račve

Nakon definiranja toplinskih kapaciteta provedeno je uparivanje struja prije i poslje račve, odnosno u blizini i dalje od pincha.

5.2.1. Mreža izmjenjivača blizu pincha (poslje račve)

Jedna od toplih struja, struja 44 – 45, prethodno je uparena sa hladnom strujom. Preostali ogranci tople struje 10 – 14 uparene su na sljedeći način.

Ogranak 4 uparen je sa strujom 12b – 13. Izmjenjeni toplinski tok iznosi:

$$\Phi_1 = CP_{1,10-14.4} \cdot (\vartheta_{\text{izl}} - \vartheta_{\text{r}})_{10-14} = 2{,}67 \cdot \left(-171{,}5 - (95{,}7)\right) = 202{,}39 \text{ kW} \quad \textbf{5.3}$$

Time je temperatura struje 12b-13 posrasla na iznos od:

$$\vartheta_{1,12b-13,\text{izl}} = \vartheta_{1,12b-13,\text{ul}} + \frac{\Phi_1}{CP_{12b-13}} = -172{,}5 + \frac{202{,}39}{2{,}807} = -100{,}4\ ^{\circ}\text{C} \quad \textbf{5.4}$$

Isti postupak je napravljen i za **ogranak 5**. Toplinski tok i temperatura dionice 5:

$$\Phi_2 = CP_{2,10-14.5} \cdot (\vartheta_{\text{izl}} - \vartheta_{\text{r}})_{10-14} = 4{,}45 \cdot \left(-171{,}5 - (95{,}7)\right) = 337{,}1 \text{ kW} \quad \textbf{5.5}$$

$$\vartheta_{2,42-43,\text{izl}} = \vartheta_{2,42\text{b}-43,\text{ul}} + \frac{\Phi_2}{CP_{42b-43}} = -178 + \frac{337{,}1}{103{,}77} = -103{,}8^{\circ}\text{C} \quad \textbf{5.6}$$

Ogranak 6 uparen je sa strujom 56-57 za koju je utvđeno kako mijenja agregatno stanje unutar zadanog temperaturnog raspona. Raspoloživi toplinski tok od strane tople struje iznosi:

$$\Phi_{3,10-14.6} = CP_{3,10-14.6} \cdot (\vartheta_{\text{izl}} - \vartheta_r)_{10-14.6} = 1{,}718 \cdot \big(-171{,}5 - (95{,}7)\big) = 130{,}23 \text{ kW} \quad \textbf{5.7}$$

Toplinski tok potreban struji 56-57 da uđe u zasićeno područje iznosi:

$$\Phi_{3,56-57,\text{os}} = CP_{3,10-14,\text{os}} \cdot (\vartheta_{\text{zas}} - \vartheta_{\text{ul}}) = 1{,}457 \cdot \big(-146{,}51 - (-172{,}4)\big) = 47{,}3 \text{ kW} \quad \textbf{5.8}$$

Preostali raspoloživi toplinski tok zagrijava struju 56 – 57 unutar zasićenog područja.

$$\Phi_{3,56-57,\text{lat}} = \Phi_{3,10-14,\text{po}} - \Phi_{3,56-57,\text{os}} = 130{,}23 - 47{,}3 = 82{,}96 \text{ kW} \quad \textbf{5.9}$$

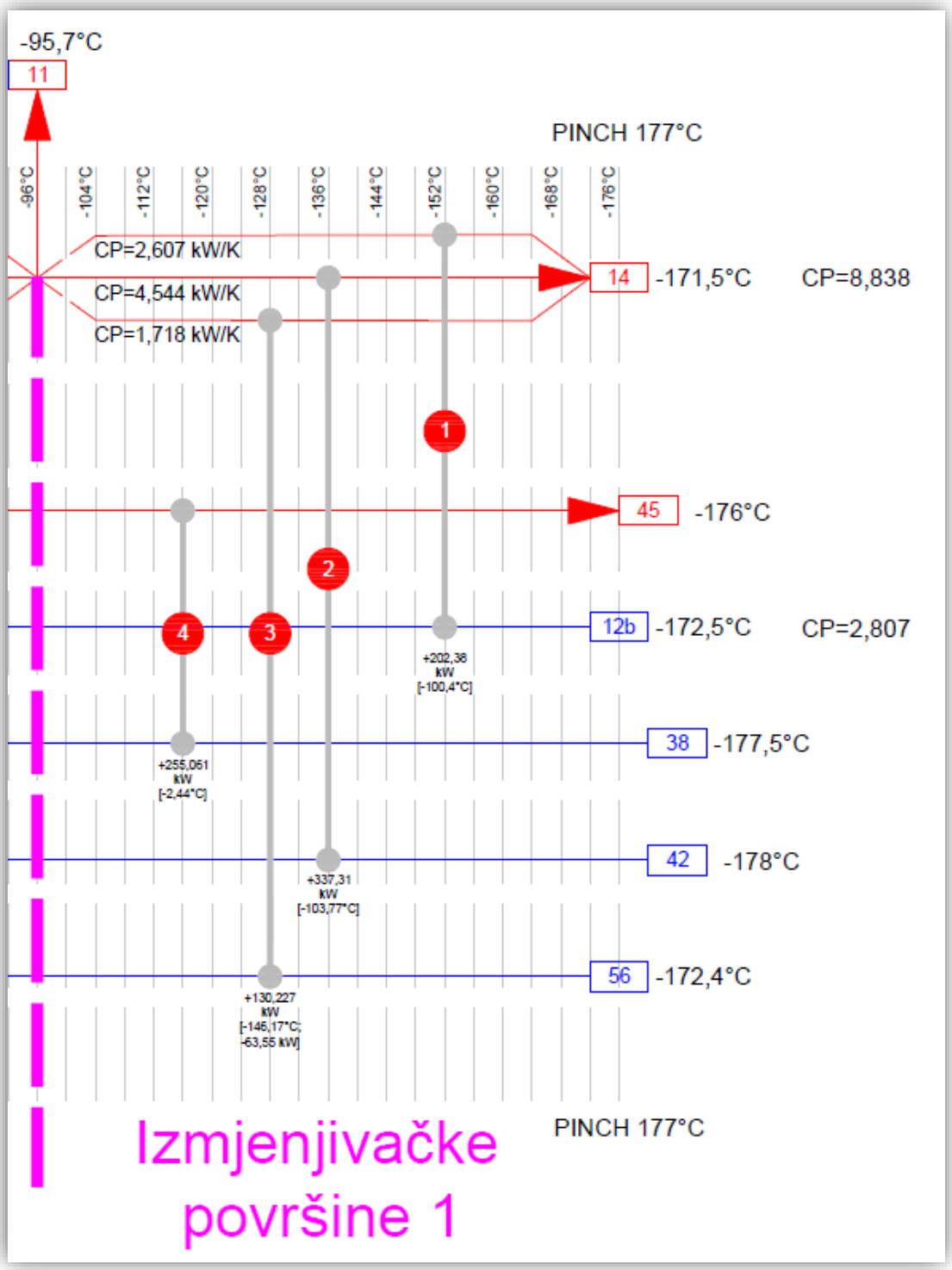
Potrebni toplinski tok za potpuno isparavanje struje 56-57 je:

$$\Phi_{56-57,\text{zas}} = \frac{q_{m,56-57}}{3600} \cdot \big(h_{\text{szp}} - h_{\text{vk}}\big)_{56-57} = \frac{3298{,}14}{3600} \cdot (93{,}94 - 65{,}98) = 146{,}51 \text{ kW} \quad \textbf{5.10}$$

Iz čega proizlazi da ostajemo u zasićenom području i pri temperaturi od -146,2 °C.

Ovim postupkom maksimalno smo opteretili tople struje i iskoristili njihov toplinski potnecijal. Svaku od njih smo ohladili od temperature račavanja do temperature pincha.

Mreža u blizini pincha je shematski prikazana na slici 17. Na shemi su navedeni toplinski kapaciteti, broj izmjenjivačkih površina, izmjenjeni toplinski tokovi i krajnje temperature hladnih struja.



Slika 17: Shematski prikaz sustava izmjenjivačkih površina u blizini pincha

5.2.2. Konstrukcija mreže dalje od pincha (prije račve)

Na kraju, sljedeći ista pravila kao i u području blizu pincha vrši se uparivanje i proračun izmjenjivačih površina u području dalje od pincha. Prema shematskom prikazu (Slika 15) uočljivo je da iznad pincha postoje tri tople i četiri hladne struje. Topla struja 44-45 predala je sav svoj raspoloživi toplinski tok u području blizu pincha te ju se više ne uzima u obzir. Preostale su dvije tople struje, struje 10 – 14 i 4a – 5. Struja 10-14 podjeljena je na tri dionice prije račve, kako je pokazano u prethodnim koracima (Tablica 10: Toplinski kapaciteti ogranaka prije račve).

Ogranak 1 u ovome području uparen je sa strujom 12b – 13. Raspoloživi toplinski tok je dan sljedećom jedandžbom.

$$\Phi_{5,10-14,\mathrm{pr}} = CP_{5,10-14,\mathrm{pr}} \cdot (\vartheta_{\mathrm{r}} - \vartheta_{\mathrm{ul}})_{10-14,\mathrm{pr}} = 5{,}832 \cdot (-95{,}7 - 20) = -\,674{,}7\ \mathrm{kW} \qquad \textbf{5.11}$$

Na osnovi shematskog prikaza struja (Slika 15) može se vidjeti kako struja 12b – 13 ima pritok. Pritok koji se dovodi unutar sustava izmjenjivačkih površina ima temperaturu od -87,7 °C. Zbog toga je proces zagrijavanja struje 12b – 13 u ovome području podjeljen na dva dijela. Prije i poslje pritoka.

Toplinski tok potreban prije pritoka:

$$\Phi_{5,12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}} = CP_{5,12\mathrm{b}-13,\mathrm{pr}} \cdot \left(\vartheta_{\mathrm{p}} - \vartheta_{\mathrm{ul}}\right)_{12\mathrm{b}-13} = 2{,}807 \cdot (-87{,}7 + 100{,}4) = 35{,}65\ \mathrm{kW} \qquad \textbf{5.12}$$

Toplinski tok potreban nakon pritoka:

$$\Phi_{5,12\mathrm{b}-13,\mathrm{po}} = CP_{5,12-13,\mathrm{po}} \cdot \left(\vartheta_{\mathrm{iz}} - \vartheta_{\mathrm{p}}\right)_{12\mathrm{b}-13} = 5{,}990 \cdot (19 + 100{,}4) = \ 639{,}05\ \mathrm{kW} \qquad \textbf{5.13}$$

Struja 12b -13 zagrijana je na temperaturu koja iznosi:

$$\vartheta_{5,12\mathrm{b}-13,\mathrm{izl}} = \vartheta_{5,12\mathrm{b}-13,\mathrm{ul}} + \frac{\Phi_{5,12-13,\mathrm{po}}}{CP_{12b-13,\mathrm{po}}} = -100{,}4 + \frac{639{,}05}{5{,}990} = \ +19\ ^{\circ}\mathrm{C} \qquad \textbf{5.14}$$

Dobivena temperatura je tražena izlazna temperatura struje 12b – 13.

Uparivanjem ovih struja zadovoljili smo potrebu hlađenja dionice 1 i potrebu grijanja struje 12b-13.

Indentičan postupak proveden je za dionice 2 i 3.

Ogranak 2 uparen je sa strujom 42 -43 te toplinski tok koji je moguće predati iznosi:

$$\Phi_6 = CP_{6,10-14,\text{pr}} \cdot (\vartheta_\text{r} - \vartheta_\text{ul})_{10-14,\text{pr}} = 4{,}270 \cdot (-95{,}7 - 20) = -493{,}99 \text{ kW} \quad \textbf{5.15}$$

Primanjem toplinskog toka temperatura hladne struje porasla je na:

$$\vartheta_{6,42-43,\text{izl}} = \vartheta_{6,42-43,\text{ul}} + \frac{\Phi_6}{CP_{42-43}} = -103{,}8 + \frac{493{,}99}{4{,}544} = +4{,}95\ ^\circ\text{C} \quad \textbf{5.16}$$

Kako bi struja 42- 43 postigla traženu izlaznu temperaturu potrebno je dovesti još:

$$\Phi_{42-43,\text{p}} = \Phi_{42-43} - \Phi_2 - \Phi_6 = 890{,}65 - 337{,}31 - 493{,}99 = +59{,}35 \text{ kW} \quad \textbf{5.17}$$

Ogranak 3 predaje toplinu struji 56-57 prilikom čega ona izlazi iz zasićenog područja i postiže temperaturu od -87,61 °C.

$$\Phi_7 = CP_{7,10-14,\text{pr}} \cdot (\vartheta_\text{r} - \vartheta_\text{ul})_{10-14,} = 1{,}461 \cdot (-95{,}7 - 20) = -169{,}07 \text{ kW} \quad \textbf{5.18}$$

Toplinski tok nužan za potpuno isparavanje:

$$\Phi_{56-57,\text{zas}} - \Phi_{7,56-57,\text{lat}} = 146{,}51 - 82{,}96 = 63{,}55\ kW \quad \textbf{5.19}$$

Ostatak toplinskog toka (105,5 kW) iskorištava se za daljnje zagrijavanje struje 56-57. Zagrijavajući ju do iznosa od:

$$\vartheta_{7,56-57,\text{izl}} = \vartheta_{7,56-57,\text{lat}} + \frac{\Phi_7}{CP_{56-57}} = -146{,}17 + \frac{105{,}5}{1{,}802} = -87{,}6\ ^\circ\text{C} \quad \textbf{5.20}$$

Toplinski tok nužan za daljnje zagrijavanje struje je 192,11 kW. Upravo taj iznos smo pretpostavili kao potrebu za vanjskim grijanjem. Izmjenivši navedeni iznos toplinskog toka struja je zagrijana na svoju traženu izlaznu temepraturu od +19 °C.

Struja 4a – 5 predaje svoj tok struji 38-39. Uparivanjem tih dviju struja prekršili smo uvjet broj (1). S obzirom da smo prekršili uvjet moramo provjeriti koje su posljedice takvoga postupka i da li je on uopće moguć u stvarnosti.

Iskoristivi toplinski tok od strane 4a – 5 je - 89,052 kW.

$$\Phi_{9,\text{raspoloživo}} = CP_{9,4a-5,\text{pr}} \cdot (\vartheta_{\text{izl}} - \vartheta_{\text{ul}})_{4a-5,} = 3{,}562 \cdot (-5-20) = -89{,}05 \text{ kW} \quad \textbf{5.21}$$

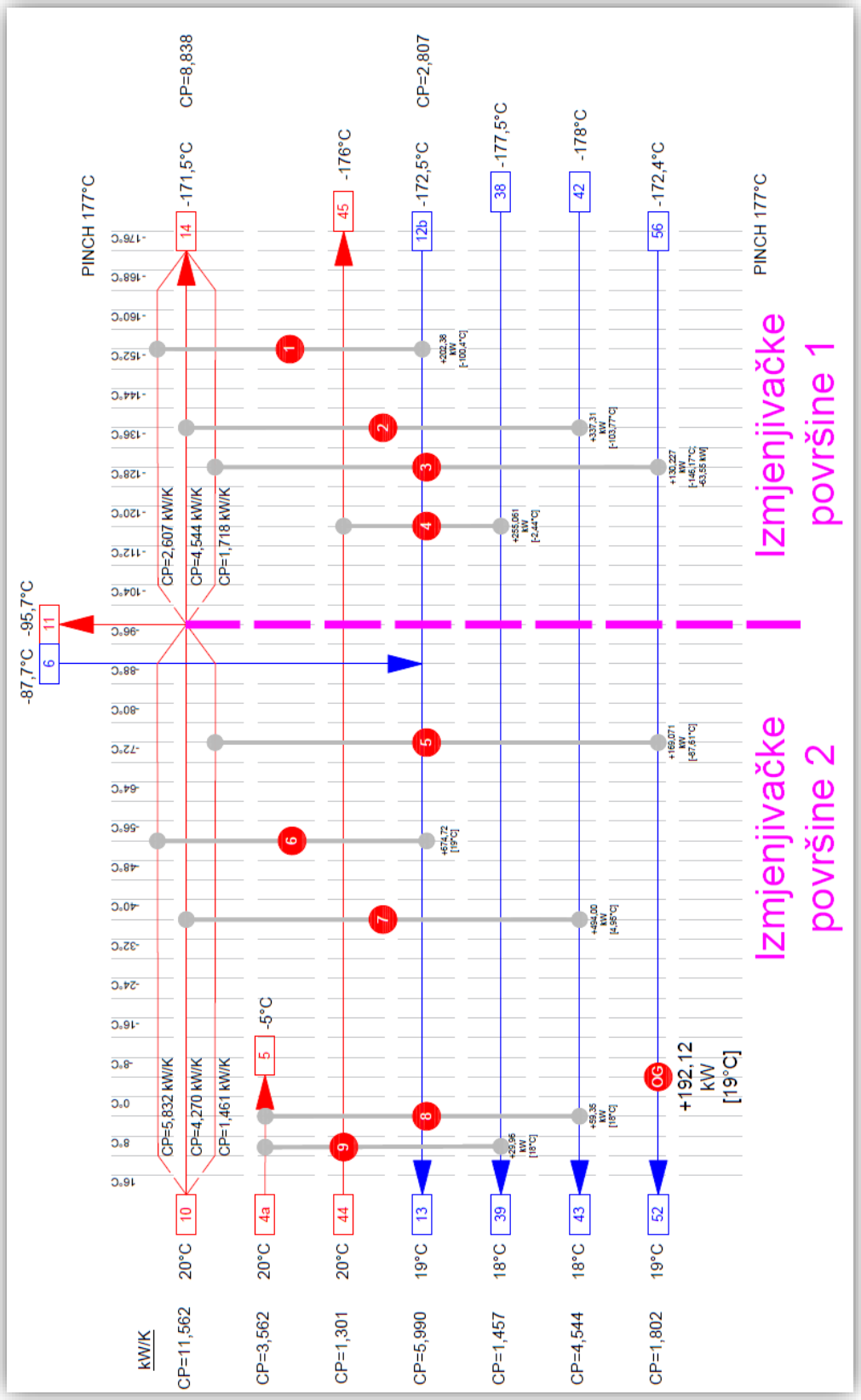
Dok struja 38- 39 treba samo + 29, 69 kW grijanja.

$$\Phi_{9,\text{potrebno}} = CP_{9,38-39,\text{pr}} \cdot \left(\vartheta_{\text{izl,pr}} - \vartheta_{\text{ul,pr}}\right)_{38-39,} = 1{,}457 \cdot (18 + 2{,}44) = +29{,}69 \text{ kW} \quad \textbf{5.22}$$

$$\vartheta_{7,56-57,\text{izl}} = \vartheta_{7,56-57,\text{lat}} + \frac{\Phi_7}{CP_{56-57}} = -146{,}17 + \frac{105{,}5}{1{,}802} = -87{,}6\ ^\circ\text{C} \quad \textbf{5.23}$$

Suma jednadžbi rezultira suficitom toplinskog potencijala od 59,35 kW. Ako pogledamo proračun dionice 2 prije račvanja zaključujemo kako bi se upravo taj suficit mogao iskoristiti za preostalu potrebu grijanja.

Prikaz čitavog sustava dan je slikom 18.



Slika 18: Sustav mreže izmjenjivača

Nažalost, jednostavnim proračunom uočeno je kako taj iznos nije moguće iskoristiti koristeći pretpostavljenu mrežu izmjenjivača. Razlog tomu je taj što bi strujom 4a – 5, kojoj bi ulazna temperatura u izmjenjivač 8 bila:

$$\vartheta_{9,4a-5,izl} = \vartheta_{9,4a-5,ul} + \frac{\Phi_{9,potrebno}}{CP_{4a-5}} = 20 - \frac{29,69}{3,562} = +11,66\ °C \quad \textbf{5.24}$$

Trebali zagrijati hladnu struju 42 – 43 na izlaznu temperaturu od + 18 °C. Takav proces je termodinamički neostvariv jer toplinu nije moguće prenositi sa hladnijeg na topliji medij.

Pošto je pinch pokazao da se maksimalna iskoristivost može postići postavlja se pitanje zašto taj rezltat nije postignut i što učiniti kao bi se taj problem rješio.

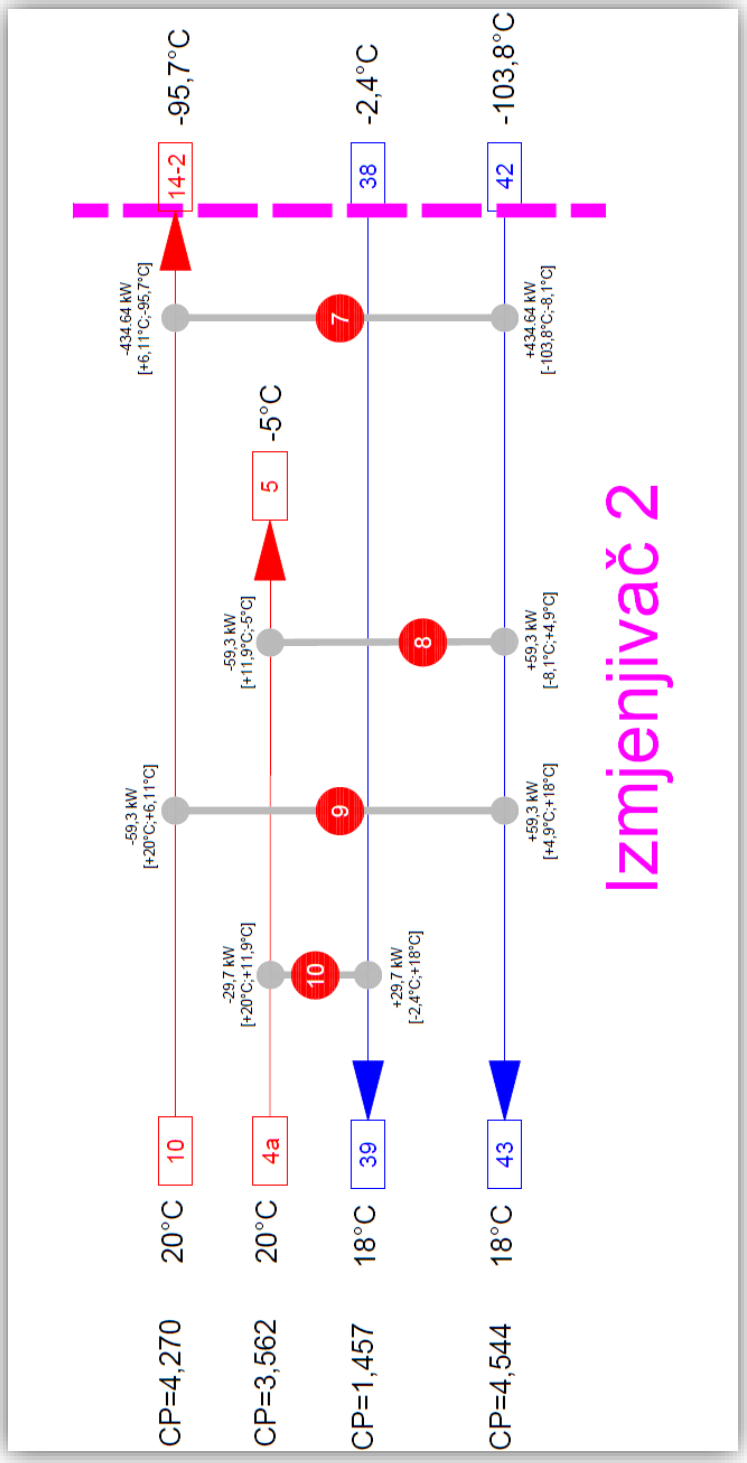
Odgovor leži u kružnom uparivanju struja. Princip je uvesti veći broj izmjenjivačkih površina s manjim toplinskim opterećenjima pritom pazeći na međuodnos toplih i hladnih struja tj. njihovih temperatura. Izmjenjivačke površine koje nisu bile zahvaćene reorganizacijom i ponovnim uparivanjem su 5 i 6.

5.2.3. Kružno uparivanje

Kružnim uparivanjem struja određene su četiri izmjenjivačke površine. Slika 19 prikazuje shematski prikaz sustava.

U prvom koraku struja 4a – 5 uparena je sa 38 – 39 te je izmjenjen toplinski tok od 29,7 kW. Temperatura tople struje snizila se na +11,9 °C dok se hladna struja 38 – 39 zagrijala sa -2,4 °C na +18 °C. Paralelno tom procesu izmjena topline odvija se između struje 10 – 14 – 2 i struje 42 – 43. Topla struja je spuštena s + 20 °C na +6,11 °C a hladna struja zagrijana s +4,9 °C na +18 °C. Nakon toga struju 10 – 14 – 2 odvodimo van izmjenjivačkih površina, a hladnoj struji 42 – 43 dovodimo struju 4a – 5. Na ovaj način smo iskoristili sav raspoloživi ogrjevni učin struje 4a – 5 i ohladili ju na njezinu traženu izlaznu temperaturu. Temperature ulaza i izlaza struje 42 – 43 u sekciji 8 su – 8,1°C i +4,9 °C
Na posljetku, struja 10 – 14 – 2 vraća se u sustav i ponovno uparuje sa strujom 42 – 43 hladeći se na izlazu temperaturu račvanja (-95,7 °C).

Konstrukcjiom ovakvoga sutava osigurali smo da su tople struje u svim točkama izmjenjivačkih površina toplije od hladnih.



Slika 19: Kružno uparivanje struja

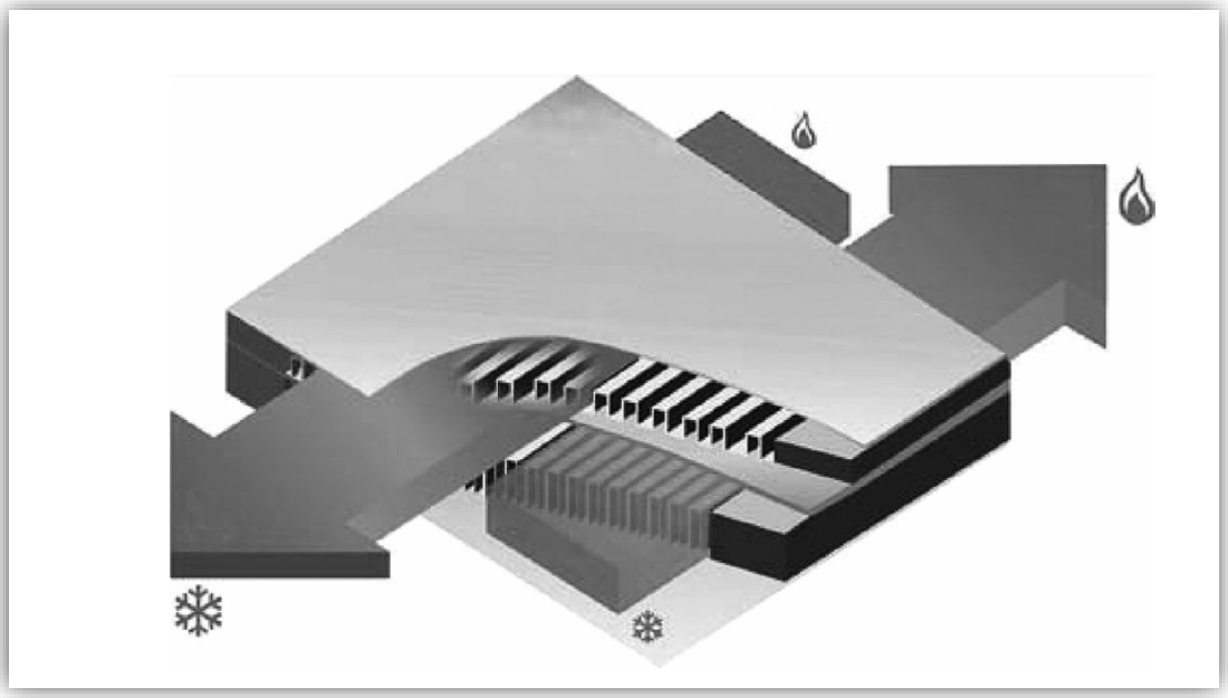
Definiranjem svih izmjenjivačkih površina sustava završena je konstrukcija mreže izmjenjivača i pri tome je zadovoljen uvjet namanje potrošnje vanjskih spremnika.

6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE IZMJENJIVAČA TOPLINE

6.1. OSNOVNI KONSTRUKCIJSKI PARAMETRI

Prethodnom konstrukcjiom mreže izmjenjivača određeno je sveukupno deset teorijskih izmjenjivača, podjeljenih u dva područja (Slika 18). Odabrani tip izmjenjivača je aluminijski pločasto – lamelni čije su osnovne krakateristike bile opisane u uvodu ovoga rada.

Izmjenjivači su konstruirani na osnovi literature [1]. Izmjenjivači su sastavljeni su velikog broja slojeva kroz koje u protustrujnom režimu struje zrak i produkti rektifikacije. Unutar slojeva nalaze se usko naslagane lamele. Visina lamela je od 2 do 12 mm, širina lima lamele je od 0,15 do 0,7 mm a razmak između lamela od 1,0 do 4,5 mm. Svaki od slojeva odjeljeni su pregradama debljine od 0,8 do 2 mm. Tako poslagani slojevi čine jezgu izmjenjivača. Svaka od struja na svome ulazu ili izlazu ima dobavne glave s cjevnim priključcima koji služe za dobavu radnog medija. Struje se usmjeravaju i pravilno distribuiraju u jezgri pomoću strujnih distributora.



Slika 20: Slojevi BAHX-a u portustrujnom režimu strujanja [4]

Slojevi usko poslaganaih lamela mogu se slagati u jednostruko i dvostruko pakiranje. Za sve izmjenjivače odabran je jednostruki način pakiranja. Raspored takvog pakiranja je T – H – T – H. Unutar svakog od tih slojeva poslagane su lamele dimenzija:

- h_l = 10 mm (visina)
- t_l = 0,15 mm (širina)
- n_l = 500 m^{-1}
- p_l = 2 mm

Debljina pregrade između slojeva je s= 1,2 mm.

Korišteni materijal u izradi je legura aluminija oznake EN – AW- 3003 čija toplinska provodnost materijala iznosi λ_m =172 W/ (mK).

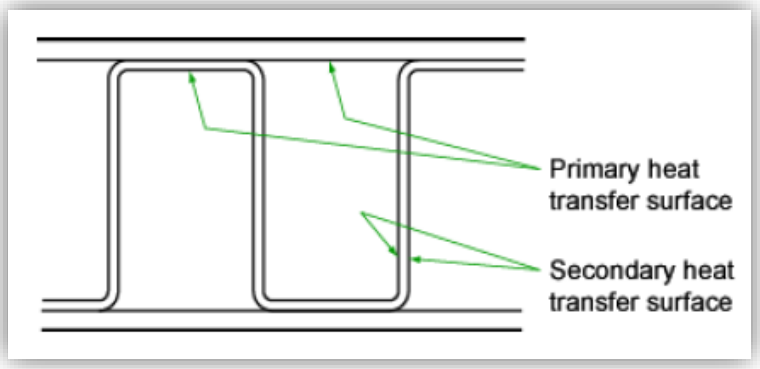
Tako usko naslagane lamele značajno povećavaju izmjenjivačku površinu preko koje se strujama dovodi ili odvodi toplina. Svaki od slojeva ima dvije izmjenjivačke površine, primarnu i sekundarnu. Primarna površina se sastoji od pregradne ploče i baze lamele koja je na nju nalemljena. Sekundarna površina određena je rasporedom i visinom lamela.

Primarna površina:

$$A_1 = 2(1 - nt)_l = 2 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 1{,}85 \ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.1}$$

Sekundarna površina:

$$A_2 = 2n_l(h - t)_l = 2 \cdot 500 \cdot (0{,}01 - 0{,}00015) = 9{,}85 \ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.2}$$



Slika 21: Primarna i sekundarna površina [1]

Zajedno, te dvije površine čine efektivnu površinu. Kod jednostrukog slaganja njezin izraz je:

$$A = A_1 + \eta_1 \phi A_2 \quad \textbf{6.3}$$

Gdje je η_1 učinkovitost prolaza lamela kod jednostrukog slaganja:

$$\eta_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \quad \textbf{6.4}$$

A β:

$$\beta = h_l \cdot \left(\frac{2\alpha_i}{\lambda_m \cdot t_l}\right) \quad \textbf{6.5}$$

6.2. DIMENZIONIRANJE IZMJENJIVAČKIH POVRŠINA

Radi jednostavnijeg zapisa i klasifikacije struja prvi broj u indeksu veličine predstavlja broj izmjenjivača a druga oznaka toplu (iT) ili hladnu struju (iH).

6.2.1. Izmjenjivač topline 1

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 1 su ogranak 10 – 14 – 1 i hladna struja 12b – 13 (Slika 18). Određeno je 40 prolaza tople i 40 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 1,2 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10 – 14 – 1	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6
12b – 13	10,748	13,3	18,617	0,92	0,9	1,040	0,730	0,74	278,84

Tablica 12: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 1

Nastrujna površina struje **10-14-1 (1T)** uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n1\mathrm{T}} = m_1 \cdot h_l \cdot W_1(1 - nt) = 40 \cdot 0{,}01 \cdot 1{,}2 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}44\ \mathrm{m}^2 \qquad \textbf{6.6}$$

Brzina strujanja struje 10-14-1:

$$w_{1.T} = \frac{q_{m,1\mathrm{T}}}{\rho_{1\mathrm{T}} \cdot A_{n,1\mathrm{T}}} = \frac{0{,}910}{99{,}34 \cdot 0{,}44} = 0{,}021\ \frac{m}{s}$$

Prijenos topline između struja izračunat je prema modelu za izmjenu topline u mikrokanalima [5].

Prilikom strujanja plinova kroz mikrokanale, pri niskim vrijednostima tlaka, moguća je pojava prorjeđivanja plina. Prorjeđivanje plina negativno utječe na izmjenu topline. Kako bi se ta pojava opisala i mogla klasificirati uveden je bezidmenzijski Knudsenov broj. U modelima strujanja kroz konvencionale kanale (D > 3mm) strujanje je obilježeno profilom brzina, temperatura i stlačivošću tekućine. Strujanja su klasificirana na osnovu Reynoldsovog i Machovog broja. Suprotno tome tipovi strujanja u mikrokanalima uvjetovani su iznosom Knudsenovog broja. Knudsenov broj je omjer slobodnog puta molekule i geometrijske veličine kontrolnog volumena (najčešće se radi o ekvivaletnom promjeru kanala). Što je omjer veći to je promatrani plin rjeđi [5]. Razlikujemo četiri područja strujanja:

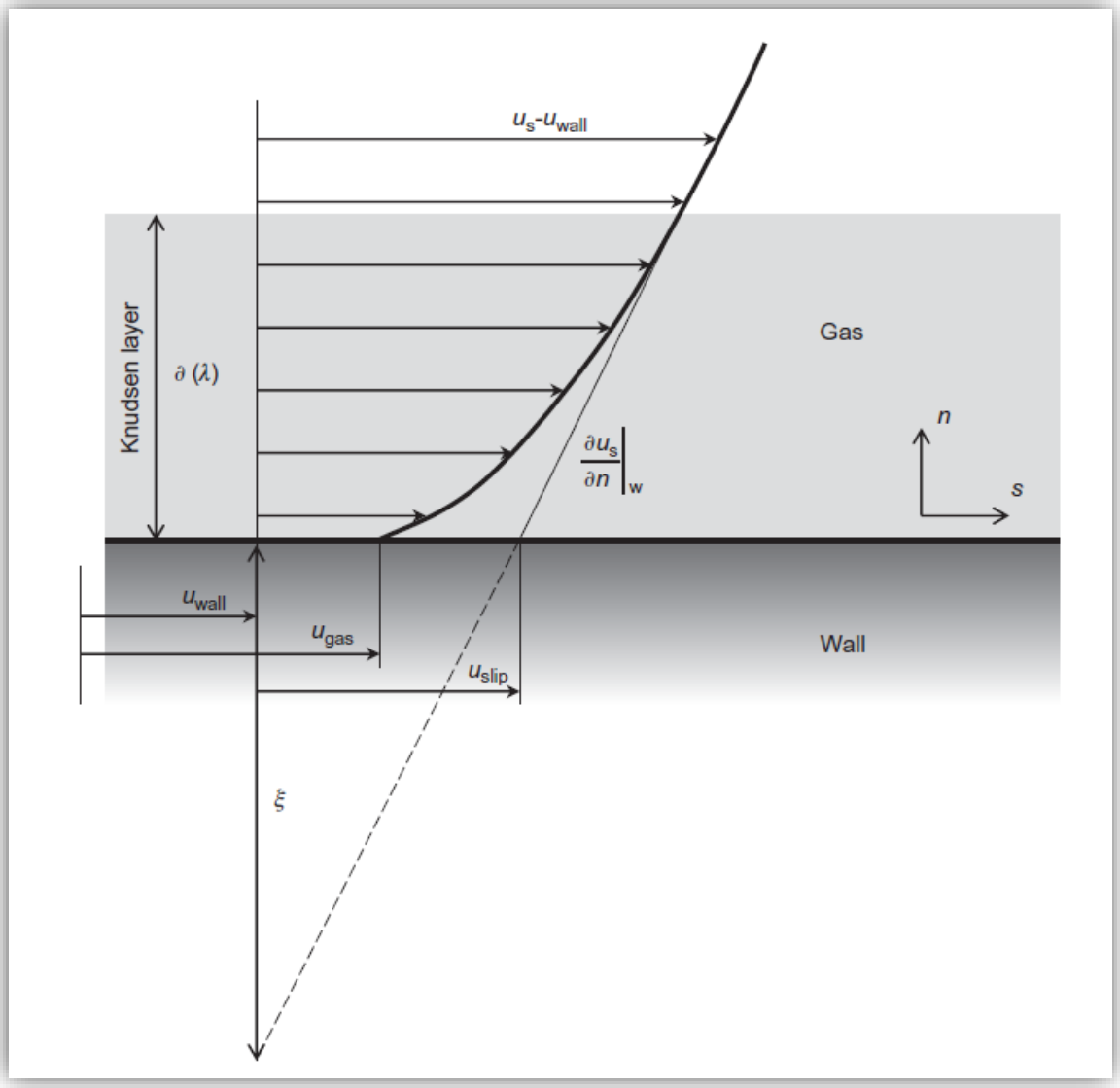
- **Kontinuirano strujanje** – $Kn < 10^{-3}$ – strujanje se smatra kontinuiranim i opisuje se pomoću Navier – Stokesovih jednadžbi.
- **Klizno strujanje** - $10^{-3} < Kn < 10^{-1}$ – strujanje u kojem Knudsenov sloj više nije zanemariv ali strujanje se i dalje može opisati Navier – Stokesovim jednadžbama. Ipak, temperaturni skok * i brzina proklizavanja** molekula moraju se uzeti u obzir
- **Prijelazno strujanje** – $10^{-1} < Kn < 10$ – Navier – Stokesove jednadžbe više nisu primjenjive ali međumolekularna interakcija još uvijek postoji.
- **Molekularno strujanje** – $Kn > 10$ – Međumolekularne interakcije mogu se zanemariti u odnosu na sudare između stijenki kanala i pojednih molekula.

Osim Knudsenovog broja utjecaj na strujanje imaju akomodacijski koeficijent tangencijalnog momenta σ i akomodacijski koeficijent energije σ_T. Koeficijenti su određeni tipom materijala izmjenjivačke površine i radog medija. Za kombinaciju zrak – aluminij oni iznose:

- σ (0,87 – 0,97)
- σ_T (0,85 – 0,95)

** Temperaturni skok – razlika u temperaturi čestica u nesporednoj blizini zida. Jedan dio molekula dulje biva u kontaktu sa zidom te poprima njegovu temperaturu, dok drugi dio molekula nakon sudara sa zidom se odmah odbija i tako zadržava svoju toplinu. (Maxwell, 1879. god.)*

*** Brzina proklizavanja – razlika brzina molekula u neposrednoj blizini zida. Jedan dio molekula zabija se u zid i time biva usporen gubeći na svojoj brzini, drugi dio molekula nakon sudara se savršeno reflektira bez gubitka kinetičke energije. (Maxwell, 1879. god.)*



Slika 22: Prikaz profila brzina u Knudsenovom sloju [5]

Pretpostavljeno je nestlačivo, hidrodinamički i temperaturno razvijeno strujanje uz konstantna fizikalna svojstva.

Struja 10-14-1 ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{1T,ul}$ = -95,7 °C a izlazi sa $\vartheta_{1T,iz}$ = -171,5 °C

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \qquad \textbf{6.7}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{1T} = \frac{\rho_{1T}\, w_{1T} d_{ekv}}{\eta_{1T}} = \frac{99{,}34 \cdot 0{,}021 \cdot 0{,}003}{0{,}0000144} = 475,778 \qquad \textbf{6.8}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{1T} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}46}{0{,}760} = 1{,}921 \qquad \textbf{6.9}$$

Machov broj za struju *1T*:

$$Ma_{1T} = \frac{w_{1T}}{w_s} = \frac{0{,}021}{277{,}6} = 0{,}0007 \qquad \textbf{6.10}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{1T} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{1T}} \cdot \frac{Ma_{1T}}{Re_{1T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}00007}{475{,}778} = 17\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.11}$$

Vrijednost Knudsenovog broja izrazito je mala, strujanje se gleda kao kontinuum. Dobiveni rezultat Knudsenovog broja je očekivan pošto struja 10-14-1 struji pod 50 bara, nema opasnosti od prorjeđivanja.

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,1\mathrm{T}} = 4\,\beta_{u,\mathrm{T}1}\,Kn_{1\mathrm{T}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4\cdot 1\cdot 17\ \cdot 10^{-8}\cdot\frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 8\cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.12}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,1\mathrm{T}} = 8\,\beta_{T,\mathrm{T}1}\left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right)\left(\frac{\gamma_{1\mathrm{T}}}{\gamma_{1\mathrm{T}}+1}\right)\left(\frac{Kn_{1\mathrm{T}}}{Pr_{1\mathrm{T}}}\right) = 8\cdot 1\cdot\left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right)\left(\frac{1{,}921}{1{,}921+1}\right)\left(\frac{17\cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) \qquad \textbf{6.13}$$
$$= 13\cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{1\mathrm{T}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,1\mathrm{T}}}{4} + \frac{17+84\xi^*_{h,1\mathrm{T}}+105\xi^{*2}_{h,1\mathrm{T}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,1\mathrm{T}}\right)^2}\right)^{-1}$$
$$= \left(\frac{13\cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17+84\cdot 13\cdot 10^{-7}+105\cdot 13\cdot 10^{-7^2}}{140\cdot(1+3\cdot 13\cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.14}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *1T*:

$$\alpha_{1\mathrm{T}} = \frac{Nu_{1\mathrm{T}}\,\lambda_{1\mathrm{T}}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 22\cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 54{,}43\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.15}$$

Struja 12b-13 (1H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{1\mathrm{H,ul}}$ = -172,5 °C a izlazi sa $\vartheta_{1\mathrm{T,iz}}$ = -100,4 °C

Nastrujna površina struje 12b- 13 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n1\mathrm{H}} = m_1\cdot h_l\cdot W_1(1-nt) = 40\cdot 0{,}01\cdot 1{,}2\cdot(1-500\cdot 0{,}00) = 0{,}44\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.16}$$

Brzina strujanja struje 12b -13:

$$w_{1.\mathrm{H}} = \frac{q_{m,1\mathrm{H}}}{\rho_{1\mathrm{H}}.A_{n,1\mathrm{H}}} = \frac{2{,}437}{10{,}748\cdot 0{,}44} = 0{,}511\ \frac{m}{s} \qquad \textbf{6.17}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.18}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{1\text{H}} = \frac{\rho_{1\text{H}}\, w_{1\text{H}} d_{ekv}}{\eta_{1\text{H}}} = \frac{10{,}748 \cdot 0{,}511 \cdot 0{,}003}{0{,}0000133} = 1378{,}33 \quad \textbf{6.19}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{1\text{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}730} = 1{,}425 \quad \textbf{6.20}$$

Machov broj za struju *1H*:

$$Ma_{1\text{H}} = \frac{w_{1\text{H}}}{w_s} = \frac{0{,}511}{278{,}84} = 0{,}02 \quad \textbf{6.21}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{1\text{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{1\text{H}}} \cdot \frac{Ma_{1\text{H}}}{Re_{1\text{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}425 \cdot \frac{0{,}002}{1378{,}33} = 12{,}7\ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.22}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,1\text{H}} = 4\, \beta_{u,1\text{H}}\, Kn_{1\text{H}}\, \frac{2 - \sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 12{,}7\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 - 0{,}92}{0{,}92} = 5{,}9 \cdot 10^{-7} \quad \textbf{6.23}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned} \zeta^*_{h,1\text{H}} &= 8\, \beta_{T,1\text{H}} \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{1\text{H}}}{\gamma_{1\text{H}} + 1}\right) \left(\frac{Kn_{1\text{H}}}{Pr_{1\text{H}}}\right) \\ &= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2 - 0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}425}{1{,}425 + 1}\right) \left(\frac{12{,}7 \cdot 10^{-8}}{0{,}74}\right) = 9{,}8 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad \textbf{6.24}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{1\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,1\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,1\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,1\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,1\mathrm{H}}\right)^2} \right)^{-1}$$
$$= \left(\frac{9{,}8 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 5{,}9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 5{,}9 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 5{,}9 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24 \quad \textbf{6.25}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *1H*:

$$\alpha_{1H} = \frac{Nu_{1H}\,\lambda_{1H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 18{,}62 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 54{,}43 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.26}$$

Koeficijent prolaza topline uzet je za slučaj ravnih paralelnih ploča. Osim debljine pregradne ploče uzet je u obzir i utjecaj lamela. Na debljinu pregrade dodana je polovica debljine lamele, toplina se mjestimično prenosi samo preko pregrade, a na ostalim mjestima preko pregrade i lamele.

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{1\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{54{,}43} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{45{,}99}} = 21{,}04 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \quad \textbf{6.27}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 1:

$$\Delta\vartheta_{log,1} = \frac{\left(\vartheta_{1\mathrm{T},iz} - \vartheta_{1\mathrm{H},ul}\right) - \left(\vartheta_{1T,ul} - \vartheta_{1H,iz}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{1T,iz} - \vartheta_{1H,ul}}{\vartheta_{1T,ul} - \vartheta_{1H,iz}}\right)}$$
$$= \frac{(-171{,}5 + 172{,}5) - (-95{,}7 + 100{,}4)}{\ln(\frac{-171{,}5 + 172{,}5}{-95{,}7 + 100{,}4})} = 2{,}391\ ^\circ\mathrm{C} \quad \textbf{6.28}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{1,\mathrm{izmj}} = \frac{\Phi_1}{k_1\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{202\,390}{21{,}04 \cdot 2{,}391} = 4023{,}41\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.29}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *1T* i *1H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{1\mathrm{T}} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{1T}}{\lambda_m\, t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 54{,}43}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}65 \qquad \textbf{6.30}$$

$$\eta_{1\mathrm{T}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}966 \qquad \textbf{6.31}$$

Efektivna površina sloja struje *1T*:

$$A_{1\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{1T}\,\phi\,A_2 = 1{,}85 + 0{,}966 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}36\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.32}$$

Koeficijneti struje *1H*:

$$\beta_{1\mathrm{H}} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{1\mathrm{H}}}{\lambda_m\, t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}99}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}597 \qquad \textbf{6.33}$$

$$\eta_{1\mathrm{H}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}597}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}597}{2}\right)} = 0{,}971 \qquad \textbf{6.34}$$

Efektivna površina sloja struje *1H*:

$$A_{1\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{1\mathrm{H}}\,\phi\,A_2 = 1{,}85 + 0{,}971 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.35}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_1 = \frac{A_{1,izmj}}{W_{1\mathrm{T}}\,(40\,A_{1\mathrm{T}} + 40\,A_{1H})} = \frac{4023{,}42}{1{,}2\ \cdot (40 \cdot 11{,}368 + 40 \cdot 11{,}417)} = 3{,}67\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.36}$$

6.2.2. Izmjenjivač topline 2

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 2 su ogranak 10-14-2 i hladna struja 42-43 (Slika 18). Određeno je 42 prolaza tople i 42 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10 – 14 – 2	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6
42 – 43	2,63	12,6	18,139	0,92	0,9	1,050	0,740	0,724	282,98

Tablica 13: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 2

Struja 10-14-2 (2T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{2T,ul}$ = -95,7 °C a izlazi sa $\vartheta_{2T,iz}$ = -171,5 °C

Nastrujna površina struje 10-14-2 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n2T} = m_1 \cdot h_l \cdot W_1(1 - nt) = 42 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}258 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.37}$$

Brzina strujanja struje 10-14-2:

$$w_{2.T} = \frac{q_{m,2T}}{\rho_{2T}.A_{n,2T}} = \frac{1{,}517}{99{,}34 \cdot 0{,}44} = 0{,}059 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.38}$$

Ekvivalentni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.39}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{2\mathrm{T}} = \frac{\rho_{2\mathrm{T}}\, w_{2\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{2\mathrm{T}}} = \frac{99{,}34 \cdot 0{,}056 \cdot 0{,}003}{0{,}0000144} = 1362{,}77 \qquad \textbf{6.40}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{2\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}46}{0{,}760} = 1{,}921 \qquad \textbf{6.41}$$

Machov broj za struju *1T*:

$$Ma_{2\mathrm{T}} = \frac{w_{2\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}059}{282{,}98} = 0{,}021 \qquad \textbf{6.42}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{2\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{2\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{2\mathrm{T}}}{Re_{2\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}021}{1362{,}773} = 17\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.43}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,2\mathrm{T}} = 4\ \beta_{u,2T}\ Kn_{2T}\ \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 17\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 8 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.44}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,2T} = 8\ \beta_{T,2\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{2\mathrm{T}}}{\gamma_{2\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{2\mathrm{T}}}{Pr_{2\mathrm{T}}}\right) \qquad \textbf{6.45}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}921}{1{,}921+1}\right) \left(\frac{17 \cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 13 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{2T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,2\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,2\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,2\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,2\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1} \quad \textbf{6.46}$$

$$= \left(\frac{13 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 8 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 8 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 8 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje *1T*:

$$\alpha_{2T} = \frac{Nu_{2T}\,\lambda_{2T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 22 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 54{,}43 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.47}$$

Struja 42-43 (2H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{2\mathrm{H,ul}}$ = - 178 °C a izlazi sa $\vartheta_{2\mathrm{H,iz}}$ = -103,8 °C.

Nastrujna površina struje 42- 43 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n2\mathrm{H}} = m_1 \cdot h_l \cdot W_1(1 - nt) = 42 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}258\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.48}$$

Brzina strujanja struje 42 -43:

$$w_{2.H} = \frac{q_{m,2\mathrm{H}}}{\rho_{2\mathrm{H}} \cdot A_{n,2\mathrm{H}}} = \frac{4{,}321}{2{,}626 \cdot 0{,}258} = 6{,}37\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.49}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.50}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{2\mathrm{H}} = \frac{\rho_{2\mathrm{H}}\,w_{2\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{2\mathrm{H}}} = \frac{2{,}626 \cdot 6{,}37 \cdot 0{,}003}{0{,}000012{,}6} = 4438{,}57 \quad \textbf{6.51}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{2\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}050}{0{,}740} = 1{,}419 \tag{6.52}$$

Machov broj za struju *1H*:

$$Ma_{1\mathrm{H}} = \frac{w_{1\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{0{,}511}{278{,}84} = 0{,}023 \tag{6.53}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{2\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{2\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{2\mathrm{H}}}{Re_{2\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}419 \cdot \frac{0{,}023}{4438{,}57} = 482\ \cdot 10^{-8} \tag{6.54}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,2\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,2\mathrm{H}}\,Kn_{2\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 482\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 226 \cdot 10^{-7} \tag{6.55}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,2\mathrm{H}} = 8\,\beta_{T,2\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{2\mathrm{H}}}{\gamma_{2\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{2\mathrm{H}}}{Pr_{2\mathrm{H}}}\right) \tag{6.56}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}419}{1{,}419+1}\right) \left(\frac{482 \cdot 10^{-8}}{0{,}74}\right) = 382 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{2\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,2\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,2\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,2\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,2\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \tag{6.57}$$

$$= \left(\frac{382 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 226 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 226 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 226 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}23$$

Koeficijent prijelaza topline struje *1H*:

$$\alpha_{2H} = \frac{Nu_{2H}\,\lambda_{2H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}23\ \cdot 18{,}139 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 44{,}81\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.58}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 2:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{2\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{54{,}43} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{44{,}81}} = 20{,}79\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.59}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 2:

$$\Delta\vartheta_{log,2} = \frac{\left(\vartheta_{2T,iz} - \vartheta_{2H,ul}\right) - \left(\vartheta_{2T,ul} - \vartheta_{2H,iz}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{2T,iz} - \vartheta_{2H,ul}}{\vartheta_{2T,ul} - \vartheta_{2H,iz}}\right)} = \frac{(-171{,}5 + 178) - (-95{,}7 + 103{,}8)}{\ln(\frac{-171{,}5 + 178}{-95{,}7 + 103{,}8})} \qquad \textbf{6.60}$$

$$= 7{,}26\ ^\circ\mathrm{C}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{2,izmj} = \frac{\Phi_2}{k_2\ \Delta\vartheta_{log}} = \frac{337\ 310}{20{,}79 \cdot 7{,}26} = 2236{,}08\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.61}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *2T* i *2H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{2T} = h_l\left(\frac{2\ \alpha_{2T}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 54{,}43}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}65 \qquad \textbf{6.62}$$

$$\eta_{2T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}966 \qquad \textbf{6.63}$$

Efektivna površina sloja struje *2T*:

$$A_{2\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{2T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}966 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}37\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.64}$$

Koeficijneti struje *2H*:

$$\beta_{2H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{2H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 44{,}81}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}59 \quad \textbf{6.65}$$

$$\eta_{2H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}59}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}59}{2}\right)} = 0{,}972 \quad \textbf{6.66}$$

Efektivna površina sloja struje *1H*:

$$A_{2\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{2\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}972 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.67}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_2 = \frac{A_{2,izmj}}{W_{2\mathrm{T}}\ (42\ A_{2\mathrm{T}} + 42\ A_{2H})} = \frac{2236{,}08}{0{,}665 \cdot (42 \cdot 11{,}37 + 42 \cdot 11{,}42)} = 3{,}5\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.68}$$

6.2.3. Izmjenjivač topline 3

Izmjena topline u izmjenjuvaču 3 odvija se između ogranka 10-14-3 i hladne struje 56-57 (Slika 18). Određeno je 29 prolaza tople i 29 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja 56- 57 strujanje kroz izmjenjivač 3 prelazi iz kapljevitog u zasićeno područje. Zbog toga su primjenjena dva tipa modela za izračun prijelaza topline. Proračun je podjeljen na dva dijela:

6.2.3.1. Izmjena topline plin (10-14-3) – kapljevina (56-57)

Za proračun prijelaza topline u struji 10-14-3 korisiti se prethodno korišteni model za plinove, dok za struju 56- 57 vrijedi model za laminarno strujanje kapljevine (Dharaiya i Kandlikar, [Heat Trans. In Micro]). Model pretpostavlja konstantan toplinski tok sa dvije nasuprotno grijane strane kanala.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10 – 14 – 2	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6
56-57	1022,8	93,1	100,4	0,92	0,9	0,990	0,664	0,79	596,76

Tablica 14: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 3.1

Struja 10-14-3 (3.1T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{3.1T,ul}$ = -144 °C a izlazi sa $\vartheta_{3.1T,iz}$ = -171,5 °C

Nastrujna površina struje 10-14-3 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n3.1T} = m_3 \cdot h_l \cdot W_3(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}178 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.69}$$

Brzina strujanja struje 10-14-2:

$$w_{3.1,T} = \frac{q_{m,3T}}{\rho_{3.1T}.A_{n,3.1T}} = \frac{0{,}586}{99{,}34 \cdot 0{,}178} = 0{,}033 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.70}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l \ p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.71}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{3.1T} = \frac{\rho_{3.1T} \, w_{3.1T} d_{ekv}}{\eta_{3.1T}} = \frac{99{,}34 \cdot 0{,}033 \cdot 0{,}003}{0{,}0000144} = 761{,}98 \quad \textbf{6.72}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{3.1T} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}46}{0{,}760} = 1{,}921 \quad \textbf{6.73}$$

Machov broj za struju *3T*:

$$Ma_{3.1T} = \frac{w_{3.1T}}{w_s} = \frac{0{,}033}{277{,}6} = 0{,}00012 \quad \textbf{6.74}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{3.1T} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{3.1T}} \cdot \frac{Ma_{3.1T}}{Re_{3.1T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}021}{761{,}98} = 17 \ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.75}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,3.1\mathrm{T}} = 4\,\beta_{u,3.1\mathrm{T}}\,Kn_{3.1\mathrm{T}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4\cdot 1\cdot 17\ \cdot 10^{-8}\cdot\frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 8\cdot 10^{-7} \tag{6.76}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned}\zeta^*_{h,3.1T} &= 8\,\beta_{T,3.1\mathrm{T}}\left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right)\left(\frac{\gamma_{3.1T}}{\gamma_{3.1\mathrm{T}}+1}\right)\left(\frac{Kn_{3.1\mathrm{T}}}{Pr_{3.1\mathrm{T}}}\right)\\ &= 8\cdot 1\cdot\left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right)\left(\frac{1{,}921}{1{,}921+1}\right)\left(\frac{17\cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 13\cdot 10^{-7}\end{aligned} \tag{6.77}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$\begin{aligned}Nu_{3.1T} &= \left(\frac{\zeta^*_{h,3.1\mathrm{T}}}{4}+\frac{17+84\xi^*_{h,3.1\mathrm{T}}+105\xi^{*2}_{h,3.1\mathrm{T}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,3.1\mathrm{T}}\right)^2}\right)^{-1}\\ &= \left(\frac{13\cdot 10^{-7}}{4}+\frac{17+848\cdot 10^{-7}+105\cdot 8\cdot 10^{-7^2}}{140\cdot(1+3\cdot 8\cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24\end{aligned} \tag{6.78}$$

Koeficijent prijelaza topline struje 3*T*:

$$\alpha_{3.1T} = \frac{Nu_{3.1T}\,\lambda_{3.1T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 22\cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 54{,}43\ \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \tag{6.79}$$

Struja 56-57 (3.1H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{3.1H,ul}$ = - 172,4 °C a izlazi sa $\vartheta_{3.1H,iz}$ = - 146,51 °C (temperatura zasićenja).

Nastrujna površina struje 56- 57 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n3.1\mathrm{H}} = m_{3.1} \cdot h_l \cdot W_{3.1}(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}178 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.80}$$

Brzina strujanja struje 56 -57:

$$w_{3.1,H} = \frac{q_{m,3.1\mathrm{H}}}{\rho_{3.1\mathrm{H}} \cdot A_{n,3.1\mathrm{H}}} = \frac{0{,}916}{1022{,}8 \cdot 0{,}178} = 0{,}005 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.81}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l \, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.82}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{3.1\mathrm{H}} = \frac{\rho_{3.1\mathrm{H}} \, w_{3.1\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{3.1\mathrm{H}}} = \frac{1022{,}8 \cdot 0{,}005 \cdot 0{,}003}{0{,}0000931} = 183{,}93 \quad \textbf{6.83}$$

Omjer stranica prevokutnog kanala:

$$b = \frac{h_c}{w_c} = \frac{10}{2} = 5 \quad \textbf{6.84}$$

Nusseltov broj za *3.1H*:

$$\begin{aligned} Nu_{3,1\mathrm{H}} &= 8{,}464 \cdot 10^{-3} \cdot b^4 - 0{,}1689 \ \cdot \ b^3 + 1{,}145 \cdot b^2 - 3{,}627 \cdot b + 7{,}121 \\ &= 8{,}364 \cdot 10^{-3} 5^4 - 0{,}1689 \ \cdot \ 5^3 + 1{,}145 \cdot 5^2 - 3{,}627 \cdot 5 + 7{,}121 \\ &= 1{,}789 \end{aligned} \quad \textbf{6.85}$$

Koeficijnet prijelaza topline:

$$\alpha_{3.1H} = \frac{Nu_{3.1H} \, \lambda_{3.1H}}{d_{ekv}} = \frac{1{,}789 \ \cdot 100{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 53{,}87 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.86}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 3.1:

$$k_{3.1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{3.1\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{3.1\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{54{,}43} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{53{,}87}} = 22{,}54 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.87}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 3.1:

$$\Delta\vartheta_{log,3.1} = \frac{\left(\vartheta_{3.1T,iz} - \vartheta_{3.1H,ul}\right) - \left(\vartheta_{3.1T,ul} - \vartheta_{3.1H,iz}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{3.1T,iz} - \vartheta_{3.1H,ul}}{\vartheta_{3.1T,ul} - \vartheta_{3.1H,iz}}\right)} = \frac{(-171{,}5 + 172{,}4) - (-95{,}7 + 146{,}51)}{\ln(\frac{-171{,}5 + 172{,}4}{-95{,}7 + 146{,}51})} = 1{,}57\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.88}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{3.1,izmj} = \frac{\Phi_{3.1}}{k_{3.1}\ \Delta\vartheta_{log}} = \frac{47226}{22{,}54 \cdot 1{,}57} = 1334{,}21\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.89}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *3.1T* i *3.1H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{3.1T} = h_l\left(\frac{2\ \alpha_{3.1T}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 54{,}43}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}65 \qquad \textbf{6.90}$$

$$\eta_{3.1T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}966 \qquad \textbf{6.91}$$

Efektivna površina sloja struje *3.1T*:

$$A_{3.1\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{3.1T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}966 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}37\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.92}$$

Koeficijneti struje *3.1H*:

$$\beta_{3.1H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{3.1H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 54{,}43}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}65 \quad \textbf{6.93}$$

$$\eta_{2H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}967 \quad \textbf{6.94}$$

Efektivna površina sloja struje *1H*:

$$A_{3.1\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{3.1\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}967 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}37\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.95}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{3.1} = \frac{A_{3.1,izmj}}{W_{3.1\mathrm{T}}\ (29\ A_{3.1\mathrm{T}} + 29\ A_{3.1H})} = \frac{1334{,}21}{0{,}665 \cdot (29 \cdot 11{,}37 + 29 \cdot 11{,}37)} = 3{,}04\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.96}$$

6.2.3.2. Izmjena toplike plin (10-14-3) – mokra para (56-57)

Za proračun prijelaza topline u struji 10-14-3 korisiti se prethodno korišteni model za plinove, dok za struju 56- 57 vrijedi model za mokru paru (Kandlikar i Steinke), [Heat Trans. In Micro].

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]	h [kJ/kg]
10 – 14 – 2	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6	-
56-57 vrela kapljevina	925,37	89,4	96,75	0,92	0,9	2,070	0,832	1,909	571,45	-65,98
56-57 suhozasićena para	58,09	113	13,99	0,92	0,9	1,478	0,781	1,193	188,57	24,57

Tablica 15: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 3.2

Struja 10-14-3 (3.2T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{3.2T,ul}$ = -95,7°C a izlazi sa $\vartheta_{3.2T,iz}$ = -144°C

Nastrujna površina struje 10-14-3 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n3.1T} = m_3 \cdot h_l \cdot W_3(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}178 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.97}$$

Brzina strujanja struje 10-14-2:

$$w_{3.2,T} = \frac{q_{m,3.2T}}{\rho_{3.2T} \cdot A_{n,3.2T}} = \frac{0{,}586}{99{,}34 \cdot 0{,}178} = 0{,}033 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.98}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.99}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{3.2\text{T}} = \frac{\rho_{3.2\text{T}}\, w_{3.2\text{T}} d_{ekv}}{\eta_{3.2\text{T}}} = \frac{99{,}34 \cdot 0{,}033 \cdot 0{,}003}{0{,}0000144} = 761{,}98 \quad \textbf{6.100}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{3.2\text{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}46}{0{,}760} = 1{,}921 \quad \textbf{6.101}$$

Machov broj za struju *3T*:

$$Ma_{3.2\text{T}} = \frac{w_{3.2\text{T}}}{w_s} = \frac{0{,}033}{277{,}6} = 0{,}00012 \quad \textbf{6.102}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{3.2\text{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{3.2\text{T}}} \cdot \frac{Ma_{3.2\text{T}}}{Re_{3.2\text{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}021}{761{,}98} = 17\ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.103}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,3.2\text{T}} = 4\, \beta_{u,3.2\text{T}}\, Kn_{3.2\text{T}}\, \frac{2 - \sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 17\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 - 0{,}92}{0{,}92} = 8 \cdot 10^{-7} \quad \textbf{6.104}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,3.2T} = 8\, \beta_{T,3.2\text{T}} \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{3.2T}}{\gamma_{3.2\text{T}} + 1}\right) \left(\frac{Kn_{3.2\text{T}}}{Pr_{3.2\text{T}}}\right)$$
$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2 - 0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}921}{1{,}921 + 1}\right) \left(\frac{17 \cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 13 \cdot 10^{-7} \quad \textbf{6.105}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{3.2T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,3.2\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,3.2\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,3.2\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,3.2\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1} \quad \textbf{6.106}$$

$$= \left(\frac{13 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 8 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 8 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 8 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje 3*T*:

$$\alpha_{3.2T} = \frac{Nu_{3.2T}\,\lambda_{3.2T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 22 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 54{,}43 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.107}$$

Struja 56-57 (3.2H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{3.2\mathrm{H,ul}}$ = - 146 °C a izlazi sa $\vartheta_{3.1\mathrm{H,iz}}$ = - 146,51 °C (temperatura zasićenja).

Nastrujna površina struje 56- 57 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n3.2\mathrm{H}} = m_{3.2} \cdot h_l \cdot W_{3.2}(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}178\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.108}$$

Brzina strujanja struje 56 -57:

$$w_{3.1,H,\mathrm{kaplj.}} = \left(\frac{q_{m,3.1\mathrm{H}}}{\rho_{3.1\mathrm{H}} \cdot A_{n,3.1\mathrm{H}}} \right)_{kaplj.} = \frac{0{,}916}{925{,}37 \cdot 0{,}178} = 0{,}006\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.109}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.110}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{3.2\mathrm{H,kaplj.}} = \left(\frac{\rho_{3.2\mathrm{H}}\, w_{3.2\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{3.2\mathrm{H}}} \right)_{kaplj.} = \frac{925{,}37 \cdot 0{,}006 \cdot 0{,}003}{0{,}0000894} = 191{,}554 \quad \textbf{6.111}$$

Za vrijednosti 100 < Re < 1600 preporuča se izračun prijelaza topline kao i za kapljevinu.

Omjer stranica prevokutnog kanala:

$$b = \frac{h_c}{w_c} = \frac{10}{2} = 5 \qquad \textbf{6.112}$$

Nusseltov broj za *3.1H*:

$$\begin{aligned} Nu_{3,2\mathrm{H}} &= 8{,}464 \cdot 10^{-3} \cdot b^4 - 0{,}1689 \cdot b^3 + 1{,}145 \cdot b^2 - 3{,}627 \cdot b + 7{,}121 \\ &= 8{,}364 \cdot 10^{-3} 5^4 - 0{,}1689 \cdot 5^3 + 1{,}145 \cdot 5^2 - 3{,}627 \cdot 5 + 7{,}121 \\ &= 1{,}789 \end{aligned} \qquad \textbf{6.113}$$

Koeficijnet prijelaza topline:

$$\alpha_{3.2H} = \frac{Nu_{3.1H}\,\lambda_{3.1H}}{d_{ekv}} = \frac{1{,}789 \cdot 96{,}75 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 51{,}911 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.114}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača *3.2H*:

$$k_{3.2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{3.2\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{3.2\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{54{,}43} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{51{,}911}} = 22{,}19 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.115}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 3.1:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{log,3.2} &= \frac{\left(\vartheta_{3.2T,iz} - \vartheta_{3.2H,ul}\right) - \left(\vartheta_{3.2T,ul} - \vartheta_{3.2H,iz}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{3.2T,iz} - \vartheta_{3.2H,ul}}{\vartheta_{3.2T,ul} - \vartheta_{3.2H,iz}}\right)} \\ &= \frac{(-144 + 146{,}51) - (-95{,}7 + 146{,}51)}{\ln(\frac{-144 + 146{,}51}{-95{,}7 + 146{,}51})} = 16{,}1\ ^\circ\mathrm{C} \end{aligned} \qquad \textbf{6.116}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{3.2,izmj} = \frac{\Phi_{3.2}}{k_{3.2}\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{82960}{22{,}19 \cdot 16{,}06} = 232{,}73\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.117}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *3.2T* i *3.2H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{3.2T} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{3.2T}}{\lambda_m\, t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 54{,}43}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}65 \qquad \textbf{6.118}$$

$$\eta_{3.2T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}966 \qquad \textbf{6.119}$$

Efektivna površina sloja struje *3.2T*:

$$A_{3.2\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{3.2T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}966 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}37\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.120}$$

Koeficijneti struje *3.1H*:

$$\beta_{3.2H} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{3.2H}}{\lambda_m\, t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 51{,}91}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}634 \qquad \textbf{6.121}$$

$$\eta_{3.2H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}65}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}65}{2}\right)} = 0{,}968 \qquad \textbf{6.122}$$

Efektivna površina sloja struje *1H*:

$$A_{3.2\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{3.2\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}968 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}382\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.123}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{3.2} = \frac{A_{3.2,izmj}}{W_{3.2}\ (29\ A_{3.2\mathrm{T}} + 29\ A_{3.2H})} = \frac{232{,}73}{0{,}665 \cdot (29 \cdot 11{,}37 + 29 \cdot 11{,}382)} = 0{,}51\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.124}$$

6.2.4. Izmjenjivač topline 4

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 4 su topla 44-45 i hladna struja 38-39 (Slika 18). Određeno je 32 prolaza tople i 32 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
44- 45	10,51	12,8	18,5	0,92	0,9	1,070	0,750	0,73	283,67
38- 39	2,61	12,6	18,4	0,92	0,9	1,040	0,740	0,715	282,96

Tablica 16: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 4

Struja 44- 45 (4T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{4T,ul}$ = 20 °C a izlazi sa $\vartheta_{4T,iz}$ = -176 °C

Nastrujna površina struje 44- 45 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n4T} = m_4 \cdot h_l \cdot W_4(1 - nt) = 32 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}197 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.125}$$

Brzina strujanja struje 44- 45:

$$w_{4,T} = \frac{q_{m,4T}}{\rho_{4T}.A_{n,4T}} = \frac{1{,}188}{10{,}51 \cdot 0{,}197} = 0{,}58 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.126}$$

Ekvivalentni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.127}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{4\mathrm{T}} = \frac{\rho_{4\mathrm{T}}\, w_{4\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{4\mathrm{T}}} = \frac{10{,}507 \cdot 0{,}58 \cdot 0{,}003}{0{,}0000128} = 1573{,}25 \qquad \textbf{6.128}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{2\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}070}{0{,}750} = 1{,}427 \qquad \textbf{6.129}$$

Machov broj za struju *4T*:

$$Ma_{4\mathrm{T}} = \frac{w_{4\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}58}{283{,}67} = 0{,}002 \qquad \textbf{6.130}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{4\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{4\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{4\mathrm{T}}}{Re_{4\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}002}{1573{,}25} = 123\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.131}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,4\mathrm{T}} = 4\, \beta_{u,4T}\, Kn_{4T}\, \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 123\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 58 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.132}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,4T} = 8\, \beta_{T,4\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{4\mathrm{T}}}{\gamma_{4\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{4\mathrm{T}}}{Pr_{4\mathrm{T}}}\right) \qquad \textbf{6.133}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}921}{1{,}921+1}\right) \left(\frac{123 \cdot 10^{-8}}{0{,}73}\right) = 97 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{4T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,4\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,4\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,4\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,4\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1} \quad \textbf{6.134}$$

$$= \left(\frac{97 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 58 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 58 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 58 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje *4T*:

$$\alpha_{4T} = \frac{Nu_{4T}\,\lambda_{4T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 18{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 45{,}71 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.135}$$

Struja 38-39 (4H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{4\mathrm{H,ul}}$ = - 177,5 °C a izlazi sa $\vartheta_{4\mathrm{H,iz}}$ = -2,44 °C.

Nastrujna površina struje 38- 39 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n4\mathrm{H}} = m_4 \cdot h_l \cdot W_4(1 - nt) = 32 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}196\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.136}$$

Brzina strujanja struje 38 -39:

$$w_{4.H} = \frac{q_{m,4\mathrm{H}}}{\rho_{4\mathrm{H}} \cdot A_{n,4\mathrm{H}}} = \frac{1{,}389}{2{,}61 \cdot 0{,}196} = 2{,}703\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.137}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.138}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{4\mathrm{H}} = \frac{\rho_{4\mathrm{H}}\, w_{4\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{4\mathrm{H}}} = \frac{2{,}61 \cdot 2{,}703 \cdot 0{,}003}{0{,}0000126} = 1863{,}72 \quad \textbf{6.139}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{4\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}715} = 1{,}405 \qquad \textbf{6.140}$$

Machov broj za struju 4*H*:

$$Ma_{4\mathrm{H}} = \frac{w_{4\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{2{,}703}{282{,}96} = 0{,}01 \qquad \textbf{6.141}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{4\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{4\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{4\mathrm{H}}}{Re_{4\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}405 \cdot \frac{0{,}01}{1863{,}72} = 485\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.142}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,4\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,4\mathrm{H}}\,Kn_{4\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 485\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 228 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.143}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,4\mathrm{H}} = 8\,\beta_{T,4\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{4\mathrm{H}}}{\gamma_{4\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{4\mathrm{H}}}{Pr_{4\mathrm{H}}}\right) \qquad \textbf{6.144}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}427}{1{,}427+1}\right) \left(\frac{485 \cdot 10^{-8}}{0{,}715}\right) = 387 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{4\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,4\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,4\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,4\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,4\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \qquad \textbf{6.145}$$

$$= \left(\frac{387 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 228 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 228 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 228 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}23$$

Koeficijent prijelaza topline struje *4H*:

$$\alpha_{4H} = \frac{Nu_{4H}\,\lambda_{4H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}23 \cdot 18{,}3 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 45{,}45 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.146}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 4:

$$k_4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{4\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{4\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{45{,}71} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{45{,}45}} = 19{,}49 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.147}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 2:

$$\Delta\vartheta_{log,4} = \frac{(\vartheta_{4T,iz} - \vartheta_{4H,ul}) - (\vartheta_{4T,ul} - \vartheta_{4H,iz})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{4T,iz} - \vartheta_{4H,ul}}{\vartheta_{4T,ul} - \vartheta_{4H,iz}}\right)} = \frac{(-176 + 177{,}5) - (20 + 2{,}44)}{\ln(\frac{-176 + 177{,}5}{20 + 2{,}44})} \qquad \textbf{6.148}$$

$$= 7{,}74\ ^\circ\mathrm{C}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{4,izmj} = \frac{\Phi_4}{k_4\ \Delta\vartheta_{log}} = \frac{255061}{19{,}49 \cdot 7{,}74} = 1690{,}15\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.149}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *4T* i *4H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{4T} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{4T}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}71}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}595 \qquad \textbf{6.150}$$

$$\eta_{4T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\,(\frac{0{,}595}{2})}{\left(\frac{0{,}595}{2}\right)} = 0{,}971 \qquad \textbf{6.151}$$

Efektivna površina sloja struje *4T*:

$$A_{4\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{4T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}971 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.152}$$

Koeficijneti struje *4H*:

$$\beta_{4H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{4H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}45}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}594 \qquad \textbf{6.153}$$

$$\eta_{4H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}594}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}594}{2}\right)} = 0{,}972 \qquad \textbf{6.154}$$

Efektivna površina sloja struje 4*H*:

$$A_{4\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{4\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}972 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.155}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_4 = \frac{A_{4,izmj}}{W_4\ (32\ A_{2\mathrm{T}} + 32\ 42\ A_{2H})} = \frac{4023{,}42}{0{,}665 \cdot (32 \cdot 11{,}42 + 32 \cdot 11{,}42)} = 3{,}47\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.156}$$

6.2.5. Izmjenjivač topline 5

Izmjena topline u izmjenjuvaču 5 odvija se između ogranka 10-14-6 i hladne struje 56-57 (Slika 18). Određeno je 26 prolaza tople i 26 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,210 m.

Struja 56- 57 strujanje kroz izmjenjivač 5 prelazi iz zasićenog u plinovtio područje. Zbog toga su primjenjena dva tipa modela za izračun prijelaza topline. Proračun je podjeljen na dva dijela:

6.2.5.1. Izmjena topline plin (10-14-6) – mokra para (56-57)

Model košiten za moku paru je isti kako i u poglavlju 5.2.3.2. Za 10-14-6 korišten je model za strujanje plina.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]	h [kJ/kg]
10 – 14 – 6	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6	-
56-57 vrela kapljevina	925,37	89,4	96,75	0,92	0,9	2,070	0,832	1,909	571,45	-65,98
56-57 suhozasićena para	58,09	113	13,99	0,92	0,9	1,478	0,781	1,193	188,57	24,57

Tablica 17: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 5.1

Struja 10-14-6 (5.1T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{5.1T,ul}$ = -58,71 °C a izlazi sa $\vartheta_{5.1T,iz}$ = -95,7 °C.

Nastrujna površina struje 10-14-6 uz širinu izmjenjivača od 0,210 m iznosi:

$$A_{n5.1\mathrm{T}} = m_5 \cdot h_l \cdot W_5(1 - nt) = 26 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}210 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}051\ \mathrm{m}^2 \quad \textbf{6.157}$$

Brzina strujanja struje 10-14-6:

$$w_{5.1,T} = \frac{q_{m,5.1\mathrm{T}}}{\rho_{5.1\mathrm{T}} \cdot A_{n,5.1\mathrm{T}}} = \frac{1{,}212}{82{,}27 \cdot 0{,}059} = 0{,}259\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.158}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.159}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{5.1\mathrm{T}} = \frac{\rho_{5.1\mathrm{T}}\, w_{5.1\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{5.1\mathrm{T}}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}259 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 4405{,}61 \quad \textbf{6.160}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{5.1\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \quad \textbf{6.161}$$

Machov broj za struju *5.1T*:

$$Ma_{5.1\mathrm{T}} = \frac{w_{5.1\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}259}{302{,}92} = 0{,}00086 \quad \textbf{6.162}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{5.1\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{5.1\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{5.1\mathrm{T}}}{Re_{5.1\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}6 \cdot \frac{0{,}0086}{4405{,}61} = 20\ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.163}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,5.1\mathrm{T}} = 4\,\beta_{u,5.1\mathrm{T}}\,Kn_{5.1\mathrm{T}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4\cdot 1\cdot 20\ \cdot 10^{-8}\cdot\frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 9\cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.164}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,5.1T} = 8\,\beta_{T,5.1\mathrm{T}}\left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right)\left(\frac{\gamma_{5.1T}}{\gamma_{5.1\mathrm{T}}+1}\right)\left(\frac{Kn_{5.1\mathrm{T}}}{Pr_{5.1\mathrm{T}}}\right) = 8\cdot 1\cdot\left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right)\left(\frac{1{,}6}{1{,}6+1}\right)\left(\frac{20\cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 14\cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.165}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{5.1T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,5.1\mathrm{T}}}{4} + \frac{17+84\xi^*_{h,5.1\mathrm{T}}+105\xi^{*2}_{h,5.1\mathrm{T}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,5.1\mathrm{T}}\right)^2}\right)^{-1} = \left(\frac{14\cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17+9\cdot 10^{-7}+105\cdot 9\cdot 10^{-7^2}}{140\cdot(1+3\cdot 9\cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.166}$$

Koeficijent prijelaza topline struje 3*T*:

$$\alpha_{5.1T} = \frac{Nu_{5.1T}\,\lambda_{5.1T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 23{,}84\cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}7\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.167}$$

Struja 56-57 (5.1H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{3.2H,ul}$ = - 146,51 °C, a izlazi sa $\vartheta_{3.1H,iz}$ = - 146,51 °C (temperatura zasićenja).

Nastrujna površina struje 56- 57 uz širinu izmjenjivača od 0,210 m iznosi:

$$A_{n5.2\mathrm{H}} = m_{5.2} \cdot h_l \cdot W_{5.2}(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}212 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}057 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.168}$$

Brzina strujanja struje 56 -57:

$$w_{5.1,H,\mathrm{kaplj.}} = \left(\frac{q_{m,5.1\mathrm{H}}}{\rho_{5.1\mathrm{H}} \cdot A_{n,5.1\mathrm{H}}}\right)_{kaplj.} = \frac{0{,}916}{925{,}37 \cdot 0{,}159} = 0{,}017 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.169}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.170}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{5.1\mathrm{H,kaplj.}} = \left(\frac{\rho_{5.1\mathrm{H}}\, w_{5.1\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{5.1\mathrm{H}}}\right)_{kaplj.} = \frac{925{,}37 \cdot 0{,}019 \cdot 0{,}003}{0{,}0000894} = 600{,}8 \quad \textbf{6.171}$$

Za vrijednosti 100 < Re < 1600 izračun prijelaza topline isti je kao i za kapljevinu.

Omjer stranica pravokutnog kanala:

$$b = \frac{h_c}{w_c} = \frac{10}{2} = 5 \quad \textbf{6.172}$$

Nusseltov broj za *5.1H*:

$$\begin{aligned} Nu_{5,1\mathrm{H}} &= 8{,}464 \cdot 10^{-3} \cdot b^4 - 0{,}1689 \ \cdot \ b^3 + 1{,}145 \cdot b^2 - 3{,}627 \cdot b + 7{,}121 \\ &= 8{,}364 \cdot 10^{-3} 5^4 - 0{,}1689 \ \cdot \ 5^3 + 1{,}145 \cdot 5^2 - 3{,}627 \cdot 5 + 7{,}121 \\ &= 1{,}789 \end{aligned} \quad \textbf{6.173}$$

Koeficijnet prijelaza topline:

$$\alpha_{5.1H} = \frac{Nu_{5.1H}\,\lambda_{5.1H}}{d_{ekv}} = \frac{1{,}789\ \cdot 96{,}75 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 51{,}911\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.174}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača *5.1H*:

$$k_{5.1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{5.1\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{5.1\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}89} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{51{,}911}} = 22{,}91\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.175}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 5.1:

$$\Delta\vartheta_{log,5.1} = \frac{\left(\vartheta_{5.1\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{5.1\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{5.1\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{5.1\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{5.1\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{5.1\mathrm{H,ul}}}{\vartheta_{5.1\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{5.1\mathrm{H,iz}}}\right)} = \frac{(-95{,}7 + 146{,}51) - (-58{,}71 + 146{,}51)}{\ln(\frac{-95{,}7 + 146{,}51}{-58{,}71 + 146{,}51})} = 67{,}62\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.176}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{5.1,izmj} = \frac{\Phi_{5.1}}{k_{5.1}\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{63\,551}{22{,}91 \cdot 67{,}62} = 41{,}02\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.177}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *3.2T* i *3.2H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{5.1T} = h_l\left(\frac{2\,\alpha_{5.1T}}{\lambda_m\,t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}676 \qquad \textbf{6.178}$$

$$\eta_{5.1T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}676}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}676}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.179}$$

Efektivna površina sloja struje *5.1T*:

$$A_{5.1\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{5.1T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}34\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.180}$$

Koeficijneti struje *5.1H*:

$$\beta_{5.1H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{5.1H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 51{,}91}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}634 \qquad \textbf{6.181}$$

$$\eta_{5.1H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}634}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}634}{2}\right)} = 0{,}968 \qquad \textbf{6.182}$$

Efektivna površina sloja struje *5.1H*:

$$A_{5.1\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{5.1\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}968 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}38\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.183}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{5.1} = \frac{A_{5.1,izmj}}{W_{5.1}\ (26\ A_{5.1\mathrm{T}} + 26\ A_{5.1H})} = \frac{41{,}02}{0{,}665 \cdot (29 \cdot 11{,}34 + 29 \cdot 11{,}38)} = 0{,}29\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.184}$$

6.2.5.2. Izmjena topline plin (10-14-6) – plin (56-57)

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10-4-6	99,34	14,4	22,032	0,92	0,9	1,460	0,760	0,86	277,6
38- 39	28,17	16	23,84	0,92	0,9	1,195	0,747	0,86	302,92

Tablica 18: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 5.2

Struja 10-14-6 (5.2T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{5.2T,ul}$ = 20 °C a izlazi sa $\vartheta_{5.2T,iz}$ = -58,71°C.

Nastrujna površina struje 10-14-6 uz širinu izmjenjivača od 0,212 m iznosi:

$$A_{n5.2T} = m_5 \cdot h_l \cdot W_5(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}212 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}057 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.185}$$

Brzina strujanja struje 10-14-6:

$$w_{5.2,T} = \frac{q_{m,5.2T}}{\rho_{5.2T} \cdot A_{n,5.2T}} = \frac{0{,}916}{82{,}27 \cdot 0{,}159} = 0{,}572 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.186}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4 h_l \, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.187}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{5.2T} = \frac{\rho_{5.2T} \, w_{5.2T} d_{ekv}}{\eta_{5.2T}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}572 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 4405{,}3 \quad \textbf{6.188}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{5.2\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \tag{6.189}$$

Machov broj za struju *5.2T*:

$$Ma_{5.2\mathrm{T}} = \frac{w_{5.2\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}572}{302{,}92} = 0{,}00086 \tag{6.190}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{5.2\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{5.2\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{5.2\mathrm{T}}}{Re_{5.2\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}6 \cdot \frac{0{,}00086}{4405{,}3} = 20\ \cdot 10^{-8} \tag{6.191}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,5.2\mathrm{T}} = 4\,\beta_{u,5.2\mathrm{T}}\,Kn_{5.2\mathrm{T}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \tag{6.192}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned} \zeta^*_{h,5.2T} &= 8\,\beta_{T,5.2\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{5.2T}}{\gamma_{5.2\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{5.2\mathrm{T}}}{Pr_{5.2\mathrm{T}}}\right) \\ &= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}6}{1{,}6+1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 14 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \tag{6.193}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$\begin{aligned} Nu_{5.2T} &= \left(\frac{\zeta^*_{h,5.2\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,5.2\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,5.2\mathrm{T}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,5.2\mathrm{T}}\right)^2}\right)^{-1} \\ &= \left(\frac{14 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 9 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1+3 \cdot 9 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \end{aligned} \tag{6.194}$$

Koeficijent prijelaza topline struje 5.2*T*:

$$\alpha_{5.2T} = \frac{Nu_{5.2T}\,\lambda_{5.2T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 23{,}84 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}7\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.195}$$

Struja 56-57 (5.2H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{5.2\mathrm{H,ul}}$ = -146 °C a izlazi sa $\vartheta_{5.2\mathrm{T,iz}}$ = -86,6°C.

Nastrujna površina struje 56-57 uz širinu izmjenjivača od 0,212 m iznosi:

$$A_{n5.2\mathrm{H}} = m_5 \cdot h_l \cdot W_5(1 - nt) = 29 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}212 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}057\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.196}$$

Brzina strujanja struje 10-14-6:

$$w_{5.2,H} = \frac{q_{m,5.2\mathrm{H}}}{\rho_{5.2\mathrm{H}} \cdot A_{n,5.2H}} = \frac{0{,}916}{28{,}17 \cdot 0{,}059} = 0{,}572\ \frac{m}{s} \qquad \textbf{6.197}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.198}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{5.2\mathrm{H}} = \frac{\rho_{5.2\mathrm{H}}\,w_{5.2\mathrm{H}}\,d_{ekv}}{\eta_{5.2\mathrm{H}}} = \frac{28{,}172 \cdot 0{,}572 \cdot 0{,}003}{0{,}000016} = 3356{,}2 \qquad \textbf{6.199}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{5.2\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0{,}970}{0{,}661} = 1{,}47 \qquad \textbf{6.200}$$

Machov broj za struju *5.2H*:

$$Ma_{5.2\mathrm{H}} = \frac{w_{5.2\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{0{,}572}{274{,}36} = 0{,}0021 \qquad \textbf{6.201}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{5.2\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{5.2\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{5.2\mathrm{H}}}{Re_{5.2\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}47 \cdot \frac{0{,}0021}{3356{,}21} = 6\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.202}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,5.2H} = 4\,\beta_{u,5.2H}\,Kn_{5.2H}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 6\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 28 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.203}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,5.2H} = 8\,\beta_{T,5.2\mathrm{H}}\left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right)\left(\frac{\gamma_{5.2H}}{\gamma_{5.2\mathrm{H}}+1}\right)\left(\frac{Kn_{5.2\mathrm{H}}}{Pr_{5.2\mathrm{H}}}\right) = 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right)\left(\frac{1{,}47}{1{,}47+1}\right)\left(\frac{6 \cdot 10^{-8}}{0{,}79}\right) = 44 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.204}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{5.2H} = \left(\frac{\zeta^*_{h,5.2H}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,5.2H} + 105\xi^{*2}_{h,5.2H}}{140\left(1+3\xi^*_{h,5.2H}\right)^2}\right)^{-1} = \left(\frac{44 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 28 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 28 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 28 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.205}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *5.2H*:

$$\alpha_{5.2H} = \frac{Nu_{5.2H}\,\lambda_{5.2H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 20{,}11 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 49{,}68\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.206}$$

Koeficijnet prolaza topline izmjenjivača *5.2*:

$$k_{5.2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{5.2\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{5.2\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}89} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{49{,}681}} = 22{,}46 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.207}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 5.2:

$$\Delta\vartheta_{log,5.2} = \frac{\left(\vartheta_{5.2,\mathrm{H,iz}} - \vartheta_{5.2\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{5.2\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{5.2\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{5.2T,iz} - \vartheta_{5.2H,ul}}{\vartheta_{5.2T,ul} - \vartheta_{5.2H,iz}}\right)} = \frac{(-58{,}71 + 146{,}51) - (20 + 87{,}61)}{\ln(\frac{-58{,}71 + 146{,}51}{20 + 87{,}61})} = 97{,}371\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.208}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{5.2,izmj} = \frac{\Phi_{5.2}}{k_{5.2}\ \Delta\vartheta_{log}} = \frac{105{,}52}{22{,}46 \cdot 97{,}37} = 48{,}24\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.209}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *3.2T* i *3.2H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{5.2T} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{5.2H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}676 \qquad \textbf{6.210}$$

$$\eta_{5.2T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}676}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}676}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.211}$$

Efektivna površina sloja struje *5.2T*:

$$A_{5.2\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{5.2\mathrm{T}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}34\ \frac{\mathrm{m^2}}{\mathrm{m^2}} \qquad \textbf{6.212}$$

Koeficijneti struje *5.2H*:

$$\beta_{5.2H} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{5.2H}}{\lambda_m\, t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 49{,}68}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}621 \qquad \textbf{6.213}$$

$$\eta_{5.2H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}634}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}634}{2}\right)} = 0{,}968 \qquad \textbf{6.214}$$

Efektivna površina sloja struje *5.2H*:

$$A_{5.2\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{5.2\mathrm{H}}\, \phi\, A_2 = 1{,}85 + 0{,}968 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}39\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.215}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{5.2} = \frac{A_{5.2,izmj}}{W_{5.2}\,(26\,A_{5.2\mathrm{T}} + 26\,A_{5.2H})} = \frac{41{,}02}{0{,}212 \cdot (29 \cdot 11{,}37 + 29 \cdot 11{,}39)} = 0{,}35\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.216}$$

6.2.6. Izmjenjivač topline 6

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 6 su ogranak 10- 14- 4 i hladna struja 12b -13 (Slika 18). Određeno je 100 prolaza tople i 100 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 1,2 m.

Proračun izmjenjivača je podjeljen na dva dijela pošto struja 12- 13 ima pritok. Proračun se dijeli na prije i poslje pritoka.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10- 14- 4	82,270	16,1	23,84	0,92	0,9	1,195	0,747	0,86	302,92
12b- 13	10,748	13,3	18,62	0,92	0,9	1,040	0,730	0,74	288,84

Tablica 19: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 6

6.2.6.1. Izmjena topline prije pritoka

Struja 10-14-4 (6.1T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{6.1T,ul}$ = -83,01 °C a izlazi sa $\vartheta_{6.1T,iz}$ = -95,7 °C.

Nastrujna površina struje 10- 14- 4 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n6.1T} = m_6 \cdot h_l \cdot W_6(1 - nt) = 100 \cdot 0{,}01 \cdot 1{,}2 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 1{,}1\ \text{m}^2 \qquad \textbf{6.217}$$

Brzina strujanja struje *6.1T*:

$$w_{6.1,T} = \frac{q_{m,6.1T}}{\rho_{6.1T} \cdot A_{n,6.1T}} = \frac{4{,}837}{82{,}27 \cdot 1{,}1} = 0{,}053\ \frac{m}{s} \qquad \textbf{6.218}$$

Ekvivalentni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.219}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{6.1\text{T}} = \frac{\rho_{6.1\text{T}}\, w_{6.1\text{T}} d_{ekv}}{\eta_{6.1\text{T}}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 900{,}7 \quad \textbf{6.220}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{6,.1\text{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \quad \textbf{6.221}$$

Machov broj za struju 6.1*T*:

$$Ma_{6.1\text{T}} = \frac{w_{6.1T}}{w_s} = \frac{0{,}053}{302{,}92} = 0{,}00017 \quad \textbf{6.222}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{6.1\text{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{6.1\text{T}}} \cdot \frac{Ma_{6.1\text{T}}}{Re_{6.1\text{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}00017}{900{,}7} = 20\ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.223}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,6.1\text{T}} = 4\, \beta_{u,6.1T}\, Kn_{6.1T}\, \frac{2 - \sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 - 0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \quad \textbf{6.224}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,6.1T} = 8\, \beta_{T,6.1\text{T}} \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{6.1\text{T}}}{\gamma_{6.1\text{T}} + 1}\right) \left(\frac{Kn_{6.1\text{T}}}{Pr_{6.1\text{T}}}\right) \quad \textbf{6.225}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2 - 0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}6}{1{,}6 + 1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}73}\right) = 14 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{6.1T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,6.1\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,6.1\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,6.1\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,6.1\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1} \quad \textbf{6.226}$$

$$= \left(\frac{14 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 9 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 9 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje *6.1T*:

$$\alpha_{6.1T} = \frac{Nu_{6.1T}\,\lambda_{\check{z}6.1T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 23{,}84 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}89 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.227}$$

Struja 12b-13 (6.1H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{6.1\mathrm{H,ul}}$ = - 100,4 °C a izlazi sa $\vartheta_{6.1\mathrm{H,iz}}$ = -87,7 °C.

Nastrujna površina struje 12b- 13 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n6.1\mathrm{H}} = m_{6.1} \cdot h_l \cdot W_{6.1}(1 - nt) = 100 \cdot 0{,}01 \cdot 1{,}2 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 1{,}1\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.228}$$

Brzina strujanja struje 12b -13:

$$w_{6,1.H} = \frac{q_{m,6.1\mathrm{H}}}{\rho_{6.1\mathrm{H}} \cdot A_{n,6.1\mathrm{H}}} = \frac{2{,}437}{10{,}75 \cdot 1{,}1} = 0{,}204 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.229}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.230}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{6.1\mathrm{H}} = \frac{\rho_{6.1\mathrm{H}}\,w_{6.1\mathrm{H}}\,d_{ekv}}{\eta_{6.1\mathrm{H}}} = \frac{10{,}748 \cdot 0{,}204 \cdot 0{,}003}{0{,}0000133} = 551{,}33 \quad \textbf{6.231}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{6.1\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}730} = 1{,}425 \qquad \textbf{6.232}$$

Machov broj za struju 6.1*H*:

$$Ma_{6.1\mathrm{H}} = \frac{w_{6.1\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{0{,}204}{278{,}84} = 0{,}001 \qquad \textbf{6.233}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{6.1\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{6.1\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{6.1\mathrm{H}}}{Re_{6.1\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}427 \cdot \frac{0{,}001}{551{,}33} = 127\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.234}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,6.1\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,6.1\mathrm{H}}\,Kn_{6.1\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 127\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 59 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.235}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,6.1\mathrm{H}} = 8\,\beta_{T,6.1\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{6.1\mathrm{H}}}{\gamma_{6.1\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{6.1\mathrm{H}}}{Pr_{6.1\mathrm{H}}}\right) \qquad \textbf{6.236}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}425}{1{,}425+1}\right) \left(\frac{127 \cdot 10^{-8}}{0{,}74}\right) = 98 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{6.1\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,6.1\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,6.1\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,6.1\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,6.1\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \qquad \textbf{6.237}$$

$$= \left(\frac{98 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 59 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 59 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 59 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}23$$

Koeficijent prijelaza topline struje *6.1H*:

$$\alpha_{6.1H} = \frac{Nu_{6.1H}\,\lambda_{6.1H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}23 \cdot 18{,}62 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 45{,}99 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.238}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 6.1:

$$k_{6.1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{6.1\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{6.1\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}896} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{45{,}994}} = 21{,}67 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.239}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 2:

$$\Delta\vartheta_{log,6.1} = \frac{\left(\vartheta_{6.1\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{6.1\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{6.1\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{6.1\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{6.1\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{6.1\mathrm{H,ul}}}{\vartheta_{6.1\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{6.1\mathrm{H,iz}}}\right)} = \frac{(-95{,}7 + 100{,}4) - (-83{,}7 + 87{,}7)}{\ln(\frac{-83{,}01 + 100{,}4}{-95{,}7 + 87{,}7})} = 4{,}69\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.240}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{6.1,izmj} = \frac{\Phi_{6.1}}{k_{6.1}\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{349877}{21{,}67 \cdot 4{,}69} = 349{,}87\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.241}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *6.1T* i *6.1H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{6.1T} = h_l\left(\frac{2\,\alpha_{6.1T}}{\lambda_m\,t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}676 \qquad \textbf{6.242}$$

$$\eta_{6.1T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}676}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}676}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.243}$$

Efektivna površina sloja struje *6.1T*:

$$A_{6.1\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{6.1T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}34\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.244}$$

Koeficijneti struje *6.1H*:

$$\beta_{6.1H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{6.1H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}99}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}597 \quad \textbf{6.245}$$

$$\eta_{6.1H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}597}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}597}{2}\right)} = 0{,}971 \quad \textbf{6.246}$$

Efektivna površina sloja struje *6.1H*:

$$A_{6.1\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{6.1\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}971 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.247}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{6.1} = \frac{A_{6.1,izmj}}{W_6\ (100\ A_{6.1\mathrm{T}} + 100\ A_{6.1H})} = \frac{349{,}9}{1{,}2 \cdot (100 \cdot 11{,}3 + 100 \cdot 11{,}42)} = 0{,}128\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.248}$$

6.2.6.2. Izmjena topline poslje pritoka

Struja 10-14-4 (6.2T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{6.2\mathrm{T,ul}}$ = 20 °C a izlazi sa $\vartheta_{6.2\mathrm{T,iz}}$ = -83,01 °C

Nastrujna površina struje 10- 14- 4 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n6.2\mathrm{T}} = m_6 \cdot h_l \cdot W_6(1 - nt) = 100 \cdot 0{,}01 \cdot 1{,}2 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 1{,}1\ \mathrm{m}^2 \quad \textbf{6.249}$$

Brzina strujanja struje *6.2T*:

$$w_{6.2,T} = \frac{q_{m,6.2\mathrm{T}}}{\rho_{6.2\mathrm{T}} \cdot A_{n,6.2\mathrm{T}}} = \frac{4{,}837}{82{,}27 \cdot 1{,}1} = 0{,}053\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.250}$$

Ekvivalentni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.251}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{6.2\mathrm{T}} = \frac{\rho_{6.2\mathrm{T}}\, w_{6.2\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{6.2\mathrm{T}}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 900{,}7 \quad \textbf{6.252}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{6.2\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \quad \textbf{6.253}$$

Machov broj za struju *6.2T*:

$$Ma_{6.2\mathrm{T}} = \frac{w_{6.2\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}053}{302{,}92} = 0{,}00017 \quad \textbf{6.254}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{6.2\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{6.2\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{6.2\mathrm{T}}}{Re_{6.2\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}00017}{900{,}7} = 20\ \cdot 10^{-8} \quad \textbf{6.255}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,6.2\mathrm{T}} = 4\ \beta_{u,6.2T}\ Kn_{6.2T}\ \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 - 0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \quad \textbf{6.256}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,6.2T} = 8\,\beta_{T,6.2\mathrm{T}}\left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right)\left(\frac{\gamma_{6.2\mathrm{T}}}{\gamma_{6.2\mathrm{T}}+1}\right)\left(\frac{Kn_{6.2\mathrm{T}}}{Pr_{6.2\mathrm{T}}}\right) \quad \textbf{6.257}$$

$$= 8\cdot 1\cdot\left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right)\left(\frac{1{,}6}{1{,}6+1}\right)\left(\frac{20\cdot 10^{-8}}{0{,}73}\right) = 14\cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{6.2T} = \left(\frac{\zeta^*_{h,6.1\mathrm{T}}}{4} + \frac{17+84\xi^*_{h,6.1\mathrm{T}}+105\xi^{*2}_{h,6.1\mathrm{T}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,6.1\mathrm{T}}\right)^2}\right)^{-1} \quad \textbf{6.258}$$

$$= \left(\frac{14\cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17+9\cdot 10^{-7}+105\cdot 9\cdot 10^{-7^2}}{140\cdot(1+3\cdot 9\cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje *6.1T*:

$$\alpha_{6.2T} = \frac{Nu_{6.1T}\,\lambda_{\check{z}6.1T}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 23{,}84\cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}89\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.259}$$

Struja 12b-13 (6.2H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{6.2\mathrm{H,ul}}$ = - 87,7 °C a izlazi sa $\vartheta_{6.2\mathrm{H,iz}}$ = -19 °C.

Nastrujna površina struje 12b- 13 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n6.2\mathrm{H}} = m_6\cdot h_l\cdot W_6(1-nt) = 100\cdot 0{,}01\cdot 1{,}2\cdot(1-500\cdot 0{,}00015) = 1{,}1\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.260}$$

Brzina strujanja struje 12b -13:

$$w_{6.2H} = \frac{q_{m,6.2\mathrm{H}}}{\rho_{6.2\mathrm{H}}\cdot A_{n,6.2\mathrm{H}}} = \frac{5{,}803}{10{,}75\cdot 1{,}1} = 0{,}486\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \quad \textbf{6.261}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l+p)} = \frac{4\cdot 0{,}01\cdot 0{,}002}{2\cdot(0{,}01+0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.262}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{6.2\mathrm{H}} = \frac{\rho_{6.2\mathrm{H}}\, w_{6.2\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{6.2\mathrm{H}}} = \frac{10{,}748 \cdot 0{,}486 \cdot 0{,}003}{0{,}0000133} = 1312{,}7 \qquad \textbf{6.263}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{6.2\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}730} = 1{,}425 \qquad \textbf{6.264}$$

Machov broj za struju 6.2*H*:

$$Ma_{6.2\mathrm{H}} = \frac{w_{6.2\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{0{,}486}{278{,}84} = 0{,}002 \qquad \textbf{6.265}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{6.2\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{6.2\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{6.2\mathrm{H}}}{Re_{6.2\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}427 \cdot \frac{0{,}002}{1312{,}7} = 127\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.266}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,6.2\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,6.2\mathrm{H}}\, Kn_{6.2\mathrm{H}}\, \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 127\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 59 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.267}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,6.2\mathrm{H}} = 8\,\beta_{T,6.2\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{6.2\mathrm{H}}}{\gamma_{6.2\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{6.2\mathrm{H}}}{Pr_{6.2\mathrm{H}}}\right) \qquad \textbf{6.268}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}425}{1{,}425+1}\right) \left(\frac{127 \cdot 10^{-8}}{0{,}74}\right) = 98 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{6.2\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,6.2\mathrm{H}}}{4} \cdot \frac{17 + 84\xi^*_{h,6.2\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,6.2\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,6.2\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \qquad \textbf{6.269}$$

$$= \left(\frac{98 \cdot 10^{-7}}{4} \cdot \frac{17 + 84 \cdot 59 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 59 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 59 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}23$$

Koeficijent prijelaza topline struje *6.2H*:

$$\alpha_{6.2H} = \frac{Nu_{6.2H}\,\lambda_{6.2H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}23 \cdot 18{,}62 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 45{,}99 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.270}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 6.2:

$$k_{6.2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{6.2\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{6.2\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}896} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{45{,}994}} = 21{,}67 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.271}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 2:

$$\Delta\vartheta_{log,6.2} = \frac{\left(\vartheta_{6.2\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{6.2\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{6.2\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{6.2\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{6.2\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{6.2\mathrm{H,ul}}}{\vartheta_{6.2\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{6.2\mathrm{H,iz}}}\right)} = \frac{(-83{,}01 + 87{,}7) - (20 - 19)}{\ln(\frac{-83{,}01 + 87{,}7}{20 - 19})} = 2{,}38\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.272}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{6.2,izmj} = \frac{\Phi_{6.2}}{k_{6.2}\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{674716}{21{,}67 \cdot 2{,}38} = 13034{,}23\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.273}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *6.2T* i *6.2H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{6.2T} = h_l\left(\frac{2\,\alpha_{6.2T}}{\lambda_m\,t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}676 \qquad \textbf{6.274}$$

$$\eta_{6.1T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}676}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}676}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.275}$$

Efektivna površina sloja struje *6.2T*:

$$A_{6.1\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{6.1T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}34\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.276}$$

Koeficijneti struje *6.2H*:

$$\beta_{6.2H} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{6.2H}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}99}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}597 \quad \textbf{6.277}$$

$$\eta_{6.2H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}597}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}597}{2}\right)} = 0{,}971 \quad \textbf{6.278}$$

Efektivna površina sloja struje 6.2*H*:

$$A_{6.2\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{6.2\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}971 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.279}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{6.2} = \frac{A_{6.2,izmj}}{W_6\ (100\ A_{6.2\mathrm{T}} + 100\ A_{6.1H})} = \frac{13034{,}23}{1{,}2 \cdot (100 \cdot 11{,}34 + 100 \cdot 11{,}42)} = 4{,}77\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.280}$$

6.2.7. Izmjenjivač topline 7

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 7 su ogranak 10- 14- 5 i hladna struja 42-43 (Slika 18). Određeno je 33 prolaza tople i 33 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10- 14- 5	82,270	16,1	23,84	0,92	0,9	1,195	0,747	0,86	302,92
42-43	2,626	12,6	18,14	0,92	0,9	1,050	0,740	0,724	282,98

Tablica 20: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 7

Struja 10-14-5 (7T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{7T,ul}$ = 6,1 °C a izlazi sa $\vartheta_{7T,iz}$ = -95,7 °C.

Nastrujna površina struje 10- 14- 4 uz širinu izmjenjivača od 1,2 m iznosi:

$$A_{n7T} = m_7 \cdot h_l \cdot W_7(1 - nt) = 100 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}202 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.281}$$

Brzina strujanja struje *7T*:

$$w_{7T} = \frac{q_{m,7T}}{\rho_{7T} . A_{n,7T}} = \frac{3{,}541}{82{,}27 \cdot 0{,}202} = 0{,}212 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.282}$$

Ekvivalentni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4 h_l \ p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.283}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{7\mathrm{T}} = \frac{\rho_{7\mathrm{T}}\, w_{7\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{7\mathrm{T}}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}202 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 3605{,}99 \qquad \textbf{6.284}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{7\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \qquad \textbf{6.285}$$

Machov broj za struju $7T$:

$$Ma_{7\mathrm{T}} = \frac{w_{7T}}{w_s} = \frac{0{,}203}{302{,}92} = 0{,}0007 \qquad \textbf{6.286}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{7\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{7\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{7\mathrm{T}}}{Re_{7\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}0007}{3605{,}99} = 20\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.287}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,7\mathrm{T}} = 4\ \beta_{u,7T}\ Kn_{7T}\ \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.288}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,7T} = 8\ \beta_{T,7\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{7\mathrm{T}}}{\gamma_{7\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{7\mathrm{T}}}{Pr_{7\mathrm{T}}}\right) \qquad \textbf{6.289}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}6}{1{,}6+1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}73}\right) = 14 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{7\mathrm{T}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,7\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,7\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,7\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,7\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1} \quad \textbf{6.290}$$

$$= \left(\frac{14 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 9 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 9 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24$$

Koeficijent prijelaza topline struje *7T*:

$$\alpha_{7\mathrm{T}} = \frac{Nu_{7\mathrm{T}}\,\lambda_{7\mathrm{T}}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 23{,}84 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}89 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \quad \textbf{6.291}$$

Struja 42-43 (7H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{7\mathrm{H,ul}}$ = - 103,8 °C a izlazi sa $\vartheta_{7\mathrm{H,iz}}$ = -8,1 °C.

Nastrujna površina struje 42-43 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n7\mathrm{H}} = m_7 \cdot h_l \cdot W_7(1 - nt) = 33 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}203\ \mathrm{m^2} \quad \textbf{6.292}$$

Brzina strujanja struje 42 -43:

$$w_{7H} = \frac{q_{m,7\mathrm{H}}}{\rho_{7\mathrm{H}}.A_{n,7\mathrm{H}}} = \frac{4{,}321}{2{,}63 \cdot 0{,}203} = 8{,}105\ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.293}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.294}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{7\mathrm{H}} = \frac{\rho_{7\mathrm{H}}\,w_{7\mathrm{H}}d_{ekv}}{\eta_{7\mathrm{H}}} = \frac{10{,}748 \cdot 0{,}204 \cdot 0{,}003}{0{,}0000133} = 5639{,}1 \quad \textbf{6.295}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{7\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}740} = 1{,}419 \qquad \textbf{6.296}$$

Machov broj za struju 7*H*:

$$Ma_{7\mathrm{H}} = \frac{w_{7\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{8{,}105}{282{,}98} = 0{,}029 \qquad \textbf{6.297}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{7\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{7\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{7\mathrm{H}}}{Re_{7\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}427 \cdot \frac{0{,}029}{5649{,}1} = 482\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.298}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,7\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,7\mathrm{H}}\,Kn_{7\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 482\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 226 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.299}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,7\mathrm{H}} = 8\,\beta_{T,7\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{7\mathrm{H}}}{\gamma_{7\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{7\mathrm{H}}}{Pr_{7\mathrm{H}}}\right) \qquad \textbf{6.300}$$

$$= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}419}{1{,}419+1}\right) \left(\frac{226 \cdot 10^{-8}}{0{,}724}\right) = 382 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{7\mathrm{H}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,7\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,7\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,7\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,7\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \qquad \textbf{6.301}$$

$$= \left(\frac{382 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 226 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 226 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 226 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}23$$

Koeficijent prijelaza topline struje *7H*:

$$\alpha_{7H} = \frac{Nu_{7H}\,\lambda_{7H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}23 \cdot 18{,}14 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 44{,}81 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.302}$$

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača 6.1:

$$k_7 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{7\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{7\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}896} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{44{,}81}} = 21{,}41 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.303}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 7:

$$\Delta\vartheta_{log,7} = \frac{(\vartheta_{7T,iz} - \vartheta_{7H,ul}) - (\vartheta_{7T,ul} - \vartheta_{7H,iz})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{7T,iz} - \vartheta_{7H,ul}}{\vartheta_{7T,ul} - \vartheta_{7H,iz}}\right)} = \frac{(-95{,}7 + 103{,}8) - (6{,}11 + 8{,}1)}{\ln(\frac{-95{,}7 + 103{,}8}{6{,}11 + 8{,}1})} \qquad \textbf{6.304}$$

$$= 10{,}87\ ^\circ\mathrm{C}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{7,izmj} = \frac{\Phi_7}{k_7\ \Delta\vartheta_{log}} = \frac{434\,600}{21{,}41 \cdot 4{,}69} = 1867{,}4\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.305}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *7T* i *7H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{7\mathrm{T}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{7\mathrm{T}}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}676 \qquad \textbf{6.306}$$

$$\eta_{7T} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\,(\frac{0{,}676}{2})}{\left(\frac{0{,}676}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.307}$$

Efektivna površina sloja struje *7T*:

$$A_{7\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{7T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}34\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.308}$$

Koeficijneti struje *7H*:

$$\beta_{7\mathrm{H}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{7\mathrm{H}}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 44{,}812}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}589 \qquad \textbf{6.309}$$

$$\eta_{7H} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}589}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}589}{2}\right)} = 0{,}972 \qquad \textbf{6.310}$$

Efektivna površina sloja struje *7H*:

$$A_{7\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{7\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}972 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.311}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_7 = \frac{A_{7,izmj}}{W_7\ (33\ A_{7\mathrm{T}} + 33\ A_{7H})} = \frac{1867}{0{,}665 \cdot (33 \cdot 11{,}37 + 33 \cdot 11{,}42)} = 3{,}7\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.312}$$

6.2.8. Izmjenjivač topline 8

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 8 su 4a-5 i hladna struja 42-43 (Slika 18). Određeno je 10 prolaza tople i 10 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
4a-5	31,31	18,0	25,57	0,92	0,9	1,058	0,720	0,750	388,9
42-43	2,626	12,6	18,14	0,92	0,9	1,050	0,740	0,724	282,98

Tablica 21: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 8

Struja 4a-5 (8T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{8T,ul}$ = 11,9 °C a izlazi sa $\vartheta_{8T,iz}$ = -5 °C

Nastrujna površina struje 4a-5 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n8T} = m_8 \cdot h_l \cdot W_8(1 - nt) = 10 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}0062 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.313}$$

Brzina strujanja struje *8T*:

$$w_{8T} = \frac{q_{m,8T}}{\rho_{8T} \cdot A_{n,8T}} = \frac{3{,}366}{31{,}305 \cdot 0{,}0062} = 1{,}748 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.314}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\, p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.315}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{8\mathrm{T}} = \frac{\rho_{8\mathrm{T}}\, w_{8\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{\mathrm{T}}} = \frac{31{,}31 \cdot 1{,}748 \cdot 0{,}003}{0{,}000018} = 10132{,}004 \qquad \textbf{6.316}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{8\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}058}{0{,}720} = 1{,}469 \qquad \textbf{6.317}$$

Machov broj za struju *8T*:

$$Ma_{8\mathrm{T}} = \frac{w_{8\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{1{,}748}{388{,}9} = 0{,}0045 \qquad \textbf{6.318}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{8\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{8\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{8\mathrm{T}}}{Re_{8\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}921 \cdot \frac{0{,}0045}{10132} = 43\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.319}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,8\mathrm{T}} = 4\ \beta_{u,\mathrm{T8}}\ Kn_{8\mathrm{T}}\ \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 43\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 20 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.320}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,8\mathrm{T}} = 8\ \beta_{T,8\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{8\mathrm{T}}}{\gamma_{8\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{8\mathrm{T}}}{Pr_{8\mathrm{T}}}\right) = 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}469}{1{,}469+1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}75}\right) \qquad \textbf{6.321}$$
$$= 33 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{8\mathrm{T}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,8\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,8\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,8\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,8\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{33 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 20 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 20 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 20 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.322}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *8T*:

$$\alpha_{8\mathrm{T}} = \frac{Nu_{8\mathrm{T}}\,\lambda_{8\mathrm{T}}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 63{,}183 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.323}$$

Struja 42-43 (8H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{8\mathrm{H,ul}}$ = -8,1 °C a izlazi sa $\vartheta_{8\mathrm{H,iz}}$ = 4,9 °C

Nastrujna površina struje 42-43 uz širinu izmjenjivača od 0,655 m iznosi:

$$A_{n8\mathrm{H}} = m_8 \cdot h_l \cdot W_8(1 - nt) = 10 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}062\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.324}$$

Brzina strujanja struje *8H*:

$$w_{8\mathrm{H}} = \frac{q_{m,8\mathrm{H}}}{\rho_{8\mathrm{H}} \cdot A_{n,8\mathrm{H}}} = \frac{4{,}321}{2{,}626 \cdot 0{,}062} = 26{,}747\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \qquad \textbf{6.325}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.326}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{8\mathrm{H}} = \frac{\rho_{8\mathrm{H}}\,w_{8\mathrm{H}}d_{ekv}}{\eta_{8\mathrm{H}}} = \frac{2{,}626 \cdot 26{,}747 \cdot 0{,}003}{0{,}0000126} = 18642 \qquad \textbf{6.327}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{8\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}050}{0{,}740} = 1{,}419 \qquad \textbf{6.328}$$

Machov broj za struju *8H*:

$$Ma_{8\mathrm{H}} = \frac{w_{8\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{26{,}747}{278{,}84} = 0{,}095 \qquad \textbf{6.329}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{8\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{8\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{8\mathrm{H}}}{Re_{8\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}469 \cdot \frac{0{,}095}{18642} = 482\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.330}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,8\mathrm{H}} = 4\ \beta_{u,8\mathrm{H}}\ Kn_{8\mathrm{H}}\ \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 482\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 226 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.331}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned} \zeta^*_{h,8\mathrm{H}} &= 8\ \beta_{T,8\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{8\mathrm{H}}}{\gamma_{8\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{8\mathrm{H}}}{Pr_{8\mathrm{H}}}\right) \\ &= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}419}{1{,}419+1}\right) \left(\frac{482 \cdot 10^{-8}}{0{,}724}\right) = 382 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \qquad \textbf{6.332}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$\begin{aligned} Nu_{8\mathrm{H}} &= \left(\frac{\zeta^*_{h,8\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,8\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,8\mathrm{H}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,8\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \\ &= \left(\frac{382 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 226 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 226 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 226 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \end{aligned} \qquad \textbf{6.333}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *8H*:

$$\alpha_{8H} = \frac{Nu_{8H}\,\lambda_{8H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 12{,}6 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 44{,}81\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.334}$$

Koeficijent prijelaza topline za izmjenjivač *8T*:

$$k_{8\mathrm{T}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{8\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{8\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{63{,}18} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{44{,}81}} = 21{,}95\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.335}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 8:

$$\Delta\vartheta_{log,8} = \frac{\left(\vartheta_{8\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{8\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{8\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{8\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{8\mathrm{T},iz} - \vartheta_{8\mathrm{H},ul}}{\vartheta_{8\mathrm{T},ul} - \vartheta_{8\mathrm{H},iz}}\right)} = \frac{(-171{,}5 + 172{,}5) - (-95{,}7 + 100{,}4)}{\ln(\frac{-171{,}5 + 172{,}5}{-95{,}7 + 100{,}4})} = 4{,}79\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.336}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{8,\mathrm{izmj}} = \frac{\Phi_8}{k_8\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{59300}{21{,}951 \cdot 4{,}79} = 564{,}19\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.337}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *8T* i *8H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{8\mathrm{T}} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{8\mathrm{T}}}{\lambda_m\,t_l}\right)^{0{,}5} = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 44{,}81}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}7 \qquad \textbf{6.338}$$

$$\eta_{8\mathrm{T}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}7}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}7}{2}\right)} = 0{,}961 \qquad \textbf{6.339}$$

Efektivna površina sloja struje *8T*:

$$A_{8\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{8T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}961 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}32\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.340}$$

Koeficijneti struje *8H*:

$$\beta_{8\mathrm{H}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{8\mathrm{H}}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 44{,}81}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}7 \qquad \textbf{6.341}$$

$$\eta_{8\mathrm{H}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}7}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}7}{2}\right)} = 0{,}972 \qquad \textbf{6.342}$$

Efektivna površina sloja struje *8H*:

$$A_{8\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{1\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}971 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.343}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_8 = \frac{A_{8,\mathrm{izmj}}}{W_{8\mathrm{T}}\ (10\ A_{8\mathrm{T}} + 10\ A_{8H})} = \frac{564{,}19}{0{,}665\ \cdot (10 \cdot 11{,}32 + 10 \cdot 11{,}42)} = 3{,}73\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.344}$$

6.2.9. Izmjenjivač topline 9

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 9 su ogranak 10-14-5 i hladna struja 42-43 (Slika 18). Određeno je 31 prolaza tople i 31 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,665 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10-14-5	82,27	82,270	16,1	23,84	0,92	0,9	1,195	0,747	0,86
42-43	2,626	12,6	18,14	0,92	0,9	1,050	0,740	0,724	282,98

Tablica 22: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 9

Struja 10-14-5 (9T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{9T,ul}$ = 20 °C a izlazi sa $\vartheta_{9T,iz}$ = -6,11 °C

Nastrujna površina struje 10- 14- 5 uz širinu izmjenjivača od 0,665 m iznosi:

$$A_{n9T} = m_9 \cdot h_l \cdot W_9(1 - nt) = 31 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}19 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.345}$$

Brzina strujanja struje 9*T*:

$$w_{9T} = \frac{q_{m,9T}}{\rho_{9T}.A_{n,9T}} = \frac{3{,}541}{82{,}27 \cdot 0{,}0062} = 0{,}23 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.346}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l \ p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.347}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{9\mathrm{T}} = \frac{\rho_{9\mathrm{T}}\, w_{9\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{9\mathrm{T}}} = \frac{82{,}27 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}003}{0{,}0000161} = 3838{,}64 \qquad \textbf{6.348}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{9\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}195}{0{,}747} = 1{,}6 \qquad \textbf{6.349}$$

Machov broj za struju $9T$:

$$Ma_{9\mathrm{T}} = \frac{w_{9\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{0{,}226}{302{,}29} = 0{,}00075 \qquad \textbf{6.350}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{9\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{9\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{9\mathrm{T}}}{Re_{9\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}6 \cdot \frac{0{,}00075}{3838{,}64} = 20\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.351}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,9\mathrm{T}} = 4\, \beta_{u,9\mathrm{T}}\, Kn_{9\mathrm{T}}\, \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.352}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,9\mathrm{T}} = 8\, \beta_{T,9\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{9\mathrm{T}}}{\gamma_{9\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{9\mathrm{T}}}{Pr_{9\mathrm{T}}}\right) = 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}6}{1{,}6+1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) \qquad \textbf{6.353}$$
$$= 14 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{9\mathrm{T}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,9\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,9\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,9\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,9\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{14 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 9 \cdot 10^{-7\,2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 9 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.354}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *9T*:

$$\alpha_{9\mathrm{T}} = \frac{Nu_{9\mathrm{T}}\,\lambda_{9\mathrm{T}}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 23{,}82 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 58{,}89 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.355}$$

Struja 42-43 (9H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{9\mathrm{H,ul}}$ = -8,1 °C a izlazi sa $\vartheta_{9\mathrm{H,iz}}$ = 4,9 °C

Nastrujna površina struje 42-43 uz širinu izmjenjivača od 0,655 m iznosi:

$$A_{n9\mathrm{H}} = m_9 \cdot h_l \cdot W_9(1 - nt) = 31 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}665 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}19\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.356}$$

Brzina strujanja struje *9H*:

$$w_{9\mathrm{H}} = \frac{q_{m,9\mathrm{H}}}{\rho_{9\mathrm{H}} \cdot A_{n,9\mathrm{H}}} = \frac{3{,}541}{2{,}626 \cdot 0{,}19} = 8{,}63 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \qquad \textbf{6.357}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.358}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{9\mathrm{H}} = \frac{\rho_{9\mathrm{H}}\,w_{9\mathrm{H}} d_{ekv}}{\eta_{9\mathrm{H}}} = \frac{2{,}626 \cdot 8{,}63 \cdot 0{,}003}{0{,}0000126} = 6013{,}5 \qquad \textbf{6.359}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{9\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}050}{0{,}740} = 1{,}419 \qquad \textbf{6.360}$$

Machov broj za struju *9H*:

$$Ma_{9\mathrm{H}} = \frac{w_{9\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{8{,}63}{302{,}92} = 0{,}00075 \qquad \textbf{6.361}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{9\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{9\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{9\mathrm{H}}}{Re_{9\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}419 \cdot \frac{0{,}00075}{3838{,}64} = 20\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.362}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,9\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,9\mathrm{H}}\,Kn_{9\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 20\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 9 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.363}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned} \zeta^*_{h,9\mathrm{H}} &= 8\,\beta_{T,9\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{9\mathrm{H}}}{\gamma_{9\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{9\mathrm{H}}}{Pr_{9\mathrm{H}}}\right) \\ &= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}419}{1{,}419+1}\right) \left(\frac{20 \cdot 10^{-8}}{0{,}86}\right) = 14 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \qquad \textbf{6.364}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$\begin{aligned} Nu_{9\mathrm{H}} &= \left(\frac{\zeta^*_{h,9\mathrm{H}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,9\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,9\mathrm{H}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,9\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \\ &= \left(\frac{14 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 9 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 9 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1+3 \cdot 9 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \end{aligned} \qquad \textbf{6.365}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *9H*:

$$\alpha_{9H} = \frac{Nu_{9H}\,\lambda_{9H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 12{,}6 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 44{,}81\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.366}$$

Koeficijent prijelaza topline za struju izmjenjivač 9:

$$k_9 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{9\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{9\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{58{,}89} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{44{,}81}} = 21{,}41\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.367}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 9:

$$\Delta\vartheta_{log,9} = \frac{\left(\vartheta_{9\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{9\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{9\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{9\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{9\mathrm{T},iz} - \vartheta_{9\mathrm{H},ul}}{\vartheta_{9\mathrm{T},ul} - \vartheta_{9\mathrm{H},iz}}\right)} = \frac{(6{,}11 - 4{,}9) - (20 - 18)}{\ln(\frac{6{,}11 - 4{,}9}{20 - 18})} = 1{,}57\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.368}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{9,\mathrm{izmj}} = \frac{\Phi_9}{k_9\,\Delta\vartheta_{log}} = \frac{59300}{21{,}41 \cdot 1{,}57} = 1761{,}8\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.369}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *9T* i *9H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{9\mathrm{T}} = h_l \left(\frac{2\,\alpha_{9\mathrm{T}}}{\lambda_m\,t_l}\right)^{0{,}5} = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 58{,}89}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}67 \qquad \textbf{6.370}$$

$$\eta_{9\mathrm{T}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\,(\frac{0{,}7}{2})}{\left(\frac{0{,}7}{2}\right)} = 0{,}964 \qquad \textbf{6.371}$$

Efektivna površina sloja struje *9T*:

$$A_{9\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{9T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}964 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}32\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.372}$$

Koeficijneti struje *9H*:

$$\beta_{9\mathrm{H}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{9\mathrm{H}}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 44{,}81}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}589 \qquad \textbf{6.373}$$

$$\eta_{9\mathrm{H}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}589}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}589}{2}\right)} = 0{,}972 \qquad \textbf{6.374}$$

Efektivna površina sloja struje *9H*:

$$A_{9\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{9\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}972 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \qquad \textbf{6.375}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_9 = \frac{A_{9,\mathrm{izmj}}}{W_{9\mathrm{T}}\ (10\ A_{9\mathrm{T}} + 10\ A_{9H})} = \frac{1761{,}8}{0{,}665\ \cdot (31 \cdot 11{,}32 + 31 \cdot 11{,}42)} = 3{,}75\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.376}$$

6.2.10. Izmjenjivač topline 10

Struje koje protustrujno izmjenju toplinu u izmjenjivaču 10 su struja 4a-5 i hladna struja 38-39 (Slika 18). Određeno je 20 prolaza tople i 20 prolaza hladne struje uz širinu izmjenjivača od 0,212 m.

Struja	ρ [kg/m^3]	η [μPa·s]	λ [mW/(mK)]	σ [-]	σ_T [-]	c_p [kJ/(kgK)]	c_v [kJ/(kgK)]	Pr [-]	w_s [m/s]
10-14-5	31,31	18,0	25,57	0,92	0,9	1,058	0,720	0,750	388,9
38-39	2,61	18	25,57	0,92	0,9	1,050	0,720	0,750	388,9

Tablica 23: Fizikalna svojstva struja izmjenjivača 10

Struja 4a-5 (10T) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{10T,ul}$ = 20 °C a izlazi sa $\vartheta_{10T,iz}$ = 11,9°C

Nastrujna površina struje 4a-5 uz širinu izmjenjivača od 0,212 m iznosi:

$$A_{n10T} = m_{10} \cdot h_l \cdot W_{10}(1 - nt) = 20 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}212 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00015) = 0{,}039 \text{ m}^2 \quad \textbf{6.377}$$

Brzina strujanja struje 10*T*:

$$w_{10T} = \frac{q_{m,10T}}{\rho_{10T} \cdot A_{n,10T}} = \frac{3{,}37}{31{,}31 \cdot 0{,}039} = 2{,}74 \ \frac{m}{s} \quad \textbf{6.378}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l \ p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003 \text{ m} \quad \textbf{6.379}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{10\mathrm{T}} = \frac{\rho_{10\mathrm{T}}\, w_{10\mathrm{T}} d_{ekv}}{\eta_{10\mathrm{T}}} = \frac{31{,}31 \cdot 2{,}741 \cdot 0{,}003}{0{,}000018} = 15890{,}9 \qquad \textbf{6.380}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{10\mathrm{T}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}058}{0{,}720} = 1{,}47 \qquad \textbf{6.381}$$

Machov broj za struju 10*T*:

$$Ma_{10\mathrm{T}} = \frac{w_{10\mathrm{T}}}{w_s} = \frac{3{,}366}{388{,}9} = 0{,}0071 \qquad \textbf{6.382}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{10\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{10\mathrm{T}}} \cdot \frac{Ma_{10\mathrm{T}}}{Re_{10\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}6 \cdot \frac{0{,}0071}{15890{,}9} = 43\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.383}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,10\mathrm{T}} = 4\, \beta_{u,10\mathrm{T}}\, Kn_{10\mathrm{T}}\, \frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 43\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 20 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.384}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\zeta^*_{h,10\mathrm{T}} = 8\, \beta_{T,10\mathrm{T}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{10\mathrm{T}}}{\gamma_{10\mathrm{T}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{10\mathrm{T}}}{Pr_{10\mathrm{T}}}\right) = 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}47}{1{,}47+1}\right) \left(\frac{43 \cdot 10^{-8}}{0{,}75}\right) \qquad \textbf{6.385}$$
$$= 33 \cdot 10^{-7}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$Nu_{10\mathrm{T}} = \left(\frac{\zeta^*_{h,10\mathrm{T}}}{4} + \frac{17 + 84\xi^*_{h,10\mathrm{T}} + 105\xi^{*2}_{h,10\mathrm{T}}}{140\left(1 + 3\xi^*_{h,10\mathrm{T}}\right)^2} \right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{33 \cdot 10^{-7}}{4} + \frac{17 + 84 \cdot 20 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 20 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 20 \cdot 10^{-7})^2} \right)^{-1} = 8{,}24 \qquad \textbf{6.386}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *10T*:

$$\alpha_{10\mathrm{T}} = \frac{Nu_{10\mathrm{T}}\,\lambda_{10\mathrm{T}}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24 \cdot 25{,}574 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 63{,}18 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.387}$$

Struja 38-39 (10H) ulazi sa temperaturom od $\vartheta_{10\mathrm{H,ul}}$ = 6,25 °C a izlazi sa $\vartheta_{10\mathrm{H,iz}}$ = 18 °C

Nastrujna površina struje 38-39 uz širinu izmjenjivača od 0,212 m iznosi:

$$A_{n10\mathrm{H}} = m_{10} \cdot h_l \cdot W_{10}(1 - nt) = 20 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}212 \cdot (1 - 500 \cdot 0{,}00) = 0{,}039\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.388}$$

Brzina strujanja struje *10H*:

$$w_{10\mathrm{H}} = \frac{q_{m,10\mathrm{H}}}{\rho_{10\mathrm{H}} \cdot A_{n,10\mathrm{H}}} = \frac{1{,}389}{2{,}61 \cdot 0{,}039} = 13{,}57 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \qquad \textbf{6.389}$$

Ekvivalntni promjer kanala je:

$$d_{ekv} = \frac{4h_l\,p}{2(h_l + p)} = \frac{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}002}{2 \cdot (0{,}01 + 0{,}002)} = 0{,}003\ \mathrm{m} \qquad \textbf{6.390}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re_{10\mathrm{H}} = \frac{\rho_{10\mathrm{H}}\,w_{10\mathrm{H}}d_{ekv}}{\eta_{10\mathrm{H}}} = \frac{2{,}61 \cdot 13{,}57 \cdot 0{,}003}{0{,}0000126} = 9353{,}78 \qquad \textbf{6.391}$$

Omjer toplinskih kapaciteta pri konstantom tlaku i volumenu:

$$\gamma_{10\mathrm{H}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1{,}040}{0{,}740} = 1{,}405 \qquad \textbf{6.392}$$

Machov broj za struju *10H*:

$$Ma_{10\mathrm{H}} = \frac{w_{10\mathrm{H}}}{w_s} = \frac{13{,}57}{282{,}96} = 0{,}048 \qquad \textbf{6.393}$$

Iz čega proizlazi Knudsenov broj prema Maxwellu:

$$Kn_{10\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\gamma_{10\mathrm{H}}} \cdot \frac{Ma_{10\mathrm{H}}}{Re_{10\mathrm{H}}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot\ 1{,}405 \cdot \frac{0{,}048}{9353{,}7} = 485\ \cdot 10^{-8} \qquad \textbf{6.394}$$

Koeficijent klizanja:

$$\xi^*_{h,10\mathrm{H}} = 4\,\beta_{u,10\mathrm{H}}\,Kn_{10\mathrm{H}}\,\frac{2-\sigma}{\sigma} = 4 \cdot 1 \cdot 485\ \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2-0{,}92}{0{,}92} = 228 \cdot 10^{-7} \qquad \textbf{6.395}$$

Koeficijent temperaturnog skoka:

$$\begin{aligned} \zeta^*_{h,10\mathrm{H}} &= 8\,\beta_{T,10\mathrm{H}} \left(\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(\frac{\gamma_{10\mathrm{H}}}{\gamma_{10\mathrm{H}}+1}\right) \left(\frac{Kn_{10\mathrm{H}}}{Pr_{10\mathrm{H}}}\right) \\ &= 8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2-0{,}9}{0{,}9}\right) \left(\frac{1{,}405}{1{,}405+1}\right) \left(\frac{485 \cdot 10^{-8}}{0{,}715}\right) = 387 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \qquad \textbf{6.396}$$

Nusseltov broj dan je izrazom:

$$\begin{aligned} Nu_{10\mathrm{H}} &= \left(\frac{\zeta^*_{h,10\mathrm{H}}}{4}\ \cdot \frac{17 + 84\xi^*_{h,10\mathrm{H}} + 105\xi^{*2}_{h,10\mathrm{H}}}{140\left(1+3\xi^*_{h,10\mathrm{H}}\right)^2}\right)^{-1} \\ &= \left(\frac{387 \cdot 10^{-7}}{4} \cdot \frac{17 + 84 \cdot 228 \cdot 10^{-7} + 105 \cdot 228 \cdot 10^{-7^2}}{140 \cdot (1 + 3 \cdot 228 \cdot 10^{-7})^2}\right)^{-1} = 8{,}24 \end{aligned} \qquad \textbf{6.397}$$

Koeficijent prijelaza topline struje *9H*:

$$\alpha_{10H} = \frac{Nu_{10H}\,\lambda_{10H}}{d_{ekv}} = \frac{8{,}24\ \cdot 18{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}003} = 45{,}5\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \qquad \textbf{6.398}$$

Koeficijent prijelaza topline za struju izmjenjivač 9:

$$k_{10} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{10\mathrm{T}}} + \frac{s + 0{,}5t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{10\mathrm{H}}}} = \frac{1}{\frac{1}{63{,}2} + \frac{1{,}2 + 0{,}5 \cdot 0{,}15}{172} + \frac{1}{45{,}45}} = 22{,}11\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \qquad \textbf{6.399}$$

Logaritamska razlika temperatura izmjenjivača 10:

$$\Delta\vartheta_{log,10} = \frac{\left(\vartheta_{10\mathrm{T,iz}} - \vartheta_{10\mathrm{H,ul}}\right) - \left(\vartheta_{10\mathrm{T,ul}} - \vartheta_{10\mathrm{H,iz}}\right)}{\ln\left(\frac{\vartheta_{10\mathrm{T},iz} - \vartheta_{10\mathrm{H},ul}}{\vartheta_{10\mathrm{T},ul} - \vartheta_{10\mathrm{H},iz}}\right)} = \frac{(11{,}9 + 2{,}4) - (20 - 18)}{\ln(\frac{11{,}9 + 2{,}4}{20 - 18})} = 6{,}25\ ^\circ\mathrm{C} \qquad \textbf{6.400}$$

Površina protusmjernog izmjenjivača topline:

$$A_{10,\mathrm{izmj}} = \frac{\Phi_{10}}{k_{10}\ \Delta\vartheta_{log,10}} = \frac{29700}{22{,}11 \cdot 6{,}25} = 214{,}88\ \mathrm{m^2} \qquad \textbf{6.401}$$

Poznavanjem koeficijenta prijelaza topline za struje *10T* i *10H* izračunava se efektivna površina prostrujnog sloja struja.

$$\beta_{10\mathrm{T}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{10\mathrm{T}}}{\lambda_m\ t_l}\right)^{0{,}5} = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 63{,}18}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}594 \qquad \textbf{6.402}$$

$$\eta_{10\mathrm{T}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}594}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}594}{2}\right)} = 0{,}961 \qquad \textbf{6.403}$$

Efektivna površina sloja struje *10T*:

$$A_{10\mathrm{T,ef}} = A_1 + \eta_{10T}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}961 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}32\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.404}$$

Koeficijneti struje *10H*:

$$\beta_{10\mathrm{H}} = h_l \left(\frac{2\ \alpha_{10\mathrm{H}}}{\lambda_m\ t_l}\right) = 0{,}01 \cdot \left(\frac{2 \cdot 45{,}45}{172 \cdot 0{,}00015}\right)^{0{,}5} = 0{,}594 \quad \textbf{6.405}$$

$$\eta_{10\mathrm{H}} = \frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\tanh\left(\frac{0{,}594}{2}\right)}{\left(\frac{0{,}594}{2}\right)} = 0{,}972 \quad \textbf{6.406}$$

Efektivna površina sloja struje *10H*:

$$A_{10\mathrm{H,ef}} = A_1 + \eta_{10\mathrm{H}}\ \phi\ A_2 = 1{,}85 + 0{,}972 \cdot 1 \cdot 9{,}85 = 11{,}42\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}^2} \quad \textbf{6.407}$$

Visina izmjenjivača dobivena je dijeljenjem ukupne površine izmjenjivača sa sumom efektivnih površina hladnih i toplih struja.

$$H_{10} = \frac{A_{10,\mathrm{izmj}}}{W_{10\mathrm{T}}\ (20\ A_{9\mathrm{T}} + 20\ A_{9H})} = \frac{214{,}87}{0{,}212\ \cdot (20 \cdot 11{,}32 + 20 \cdot 11{,}42)} = 2{,}23\ \mathrm{m} \quad \textbf{6.408}$$

7. ZAKLJUČAK

Na početku ovoga rada dan je shematski prikaz struja i izmjenjivača topline u niskotemperaturnom dijelu postrojenja za kriogenu separaciju zraka. S obzirom da kod kriogene separacije zraka najveći dio troškova predstavlja njegovo hlađenje prilikom rekonstrukcije cilj je bio postići maksimalnu iskoristivost topline. Kako bi cilj bio postignut bilo je nužno optimalno upariti struje i zatim dimenzionirati izmjenjivače. Prije uparivanja provedena je analiza masenih i toplinskih tokova te pinch analiza. Tokom pinch analize definirani su temperaturni intervali toplih i hladnih struja na temelju kojih su nacrtane kompozitne krivulje. Osim intervala nužno je bilo i utvrditi minimalnu temperaturnu razliku u pinchu. Konstrukcijom kompozitnih krivulja određena je lokacija pincha i potreba za dodatih 192,11 kW vanjskog grijanja. Osim grafičkom metodom, rezultati pinch analize prikazani su i tabličnom metodom. Pinch analizom je pokazano kako se maksimalna iskoristivost topline može postići, odnosno da se sav toplinski tok toplih struja može iskoristiti u svrhu grijanja hladnih struja. Nakon optimalnog sparivanja struja dan je prikaz sustava izmjenjivačkih površina pomoću kojih se mogao ostvariti cilj rekonstrukcije. Određeno je 10 izmjenjivača topline. Na kraju je proveden temodinamčki proračun izmjenjivača radi njihovog dimenzioniranja. Prilikom termodinamičkog proračuna korišteni su modeli za izmjenu topline u mikrokanalima. Predstavljen je Knudsenov broj i njegov utjecaj na izmjenu topline u plinovima. Usporedbom krajnjih rezultata uočeno je kako vrijednost Nusseltovog broja kod svih plinovitih struja prilikom kontinuiranog strujanja ($Kn < 10^{-3}$) konvergira jednoj vrijednosti a to je 140/17. Također je primjećeno kako Nusseltov broj prilikom kontrinuiranog strujanja plinova ne ovisi o Reynoldsovom ili Machovom broju. Dobiveni rezultati bili su očekivani pošto su struje unutar dotičnog sustava pri visokim tlakovima pa nema opasnosti od prorjeđivanja plinova.

LITERATURA

[1] ALPEMA, Third Edition, 2010.

[2] Linde AG., *Cyrogenic Air Separation*,975.

[3] Ramesh K. Shah., Dušan Sekulić., *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, J. Wiley & Sons, Inc.,2003.

[4] Kappan Thulukkanam., *Heat Exchanger Design Handbook, 2nd Edition*, Taylor and Francis Group, 2013.

[5] Satish G. Kandlikar., *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*, Elsevier Ltd., 2006.

[6] Frank G. Kerry., *Industrial Gas Handbook: Gas Separation and Purification*, Taylor & Francis Group LLC, 2006.

[7] Ian C. Kemp., *Pinch Analysis and Process Integration*, Elsevier Ltd., 2007.

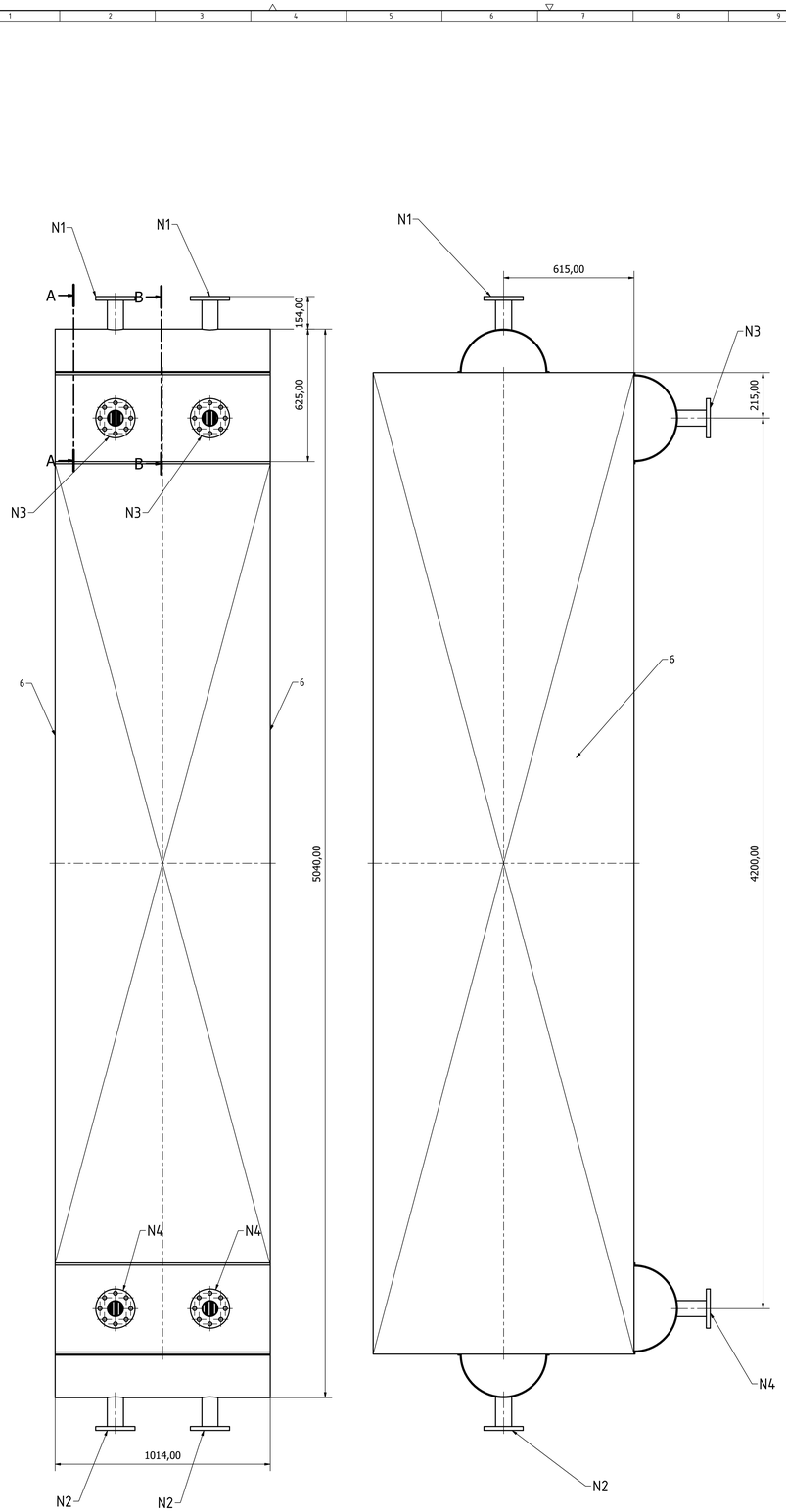
[8] N. Bolf., *Proizvodnja tehničkih plinova procesima separacije zraka*, Fakultet kemijskog inžinjerstva i tehnologije.

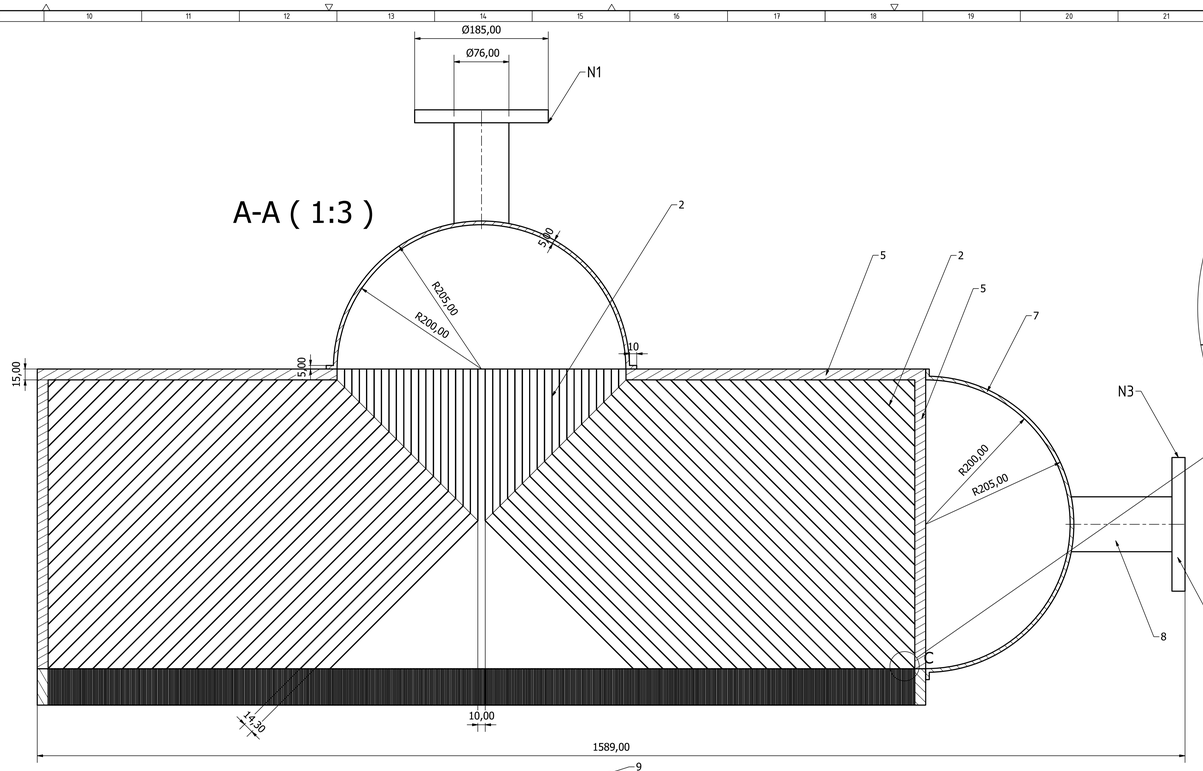
[9] Roy A. Parisher., Robert A. Rhea., *Pipe Drafting and Design, 2nd edition*, Gulf Professional Publishing, 2002.

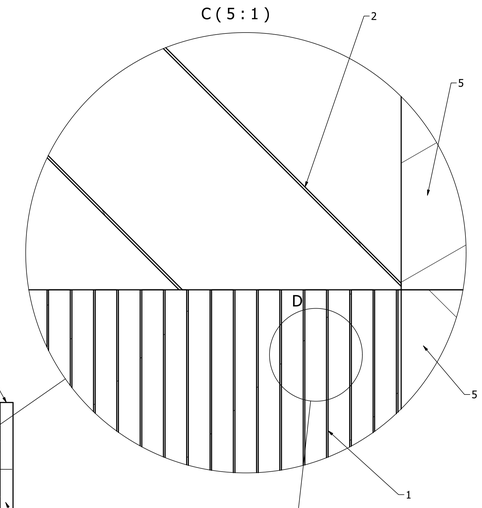
PRILOZI

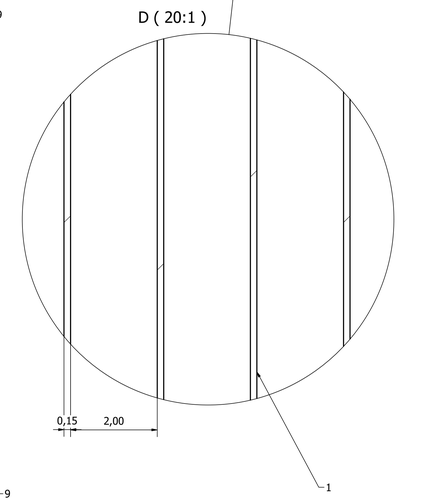
I. CD-R disc

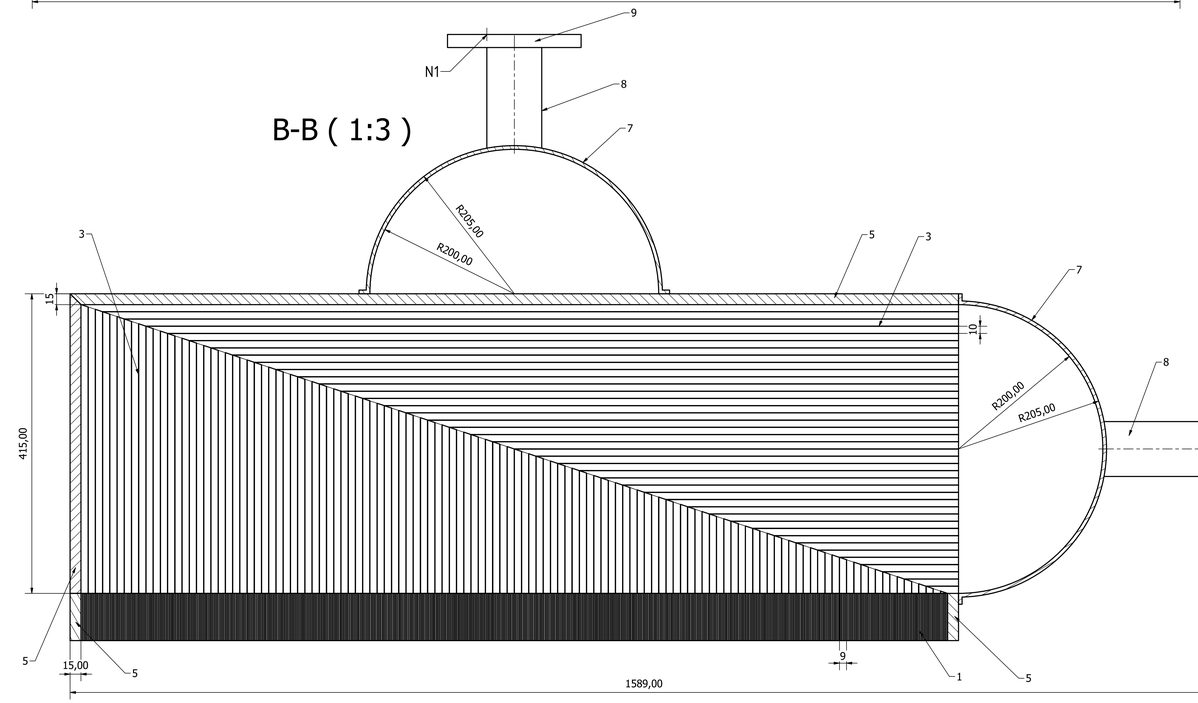
II. Tehnička dokumentacija











Oznaka priključka	Funkcija priključka	Promjer	Duljina
N1	Dovod tople struje	Ø76x3	145
N2	Odvod tople struje	Ø76x3	145
N3	Dovod hladne struje	Ø76x3	145
N4	Odvod hladne struje	Ø76x3	145

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
9	Ravne prirubnice DN65	4	-	EN-AW-5754	-	-
8	Cijevni priključci Ø76x3	4	-	EN-AW-5754	-	-
7	Dobavne glave Ø410x400	4	-	EN-AW-5754	-	-
6	Vanjske oplate	2	-	EN-AW-3003	-	-
5	Bočne grede	160	-	EN-AW-3003	-	-
4	Pregradne ploče	81	-	EN-AW-3003	-	-
3	Lamele radijalnih distributora	4400	-	EN-AW-3003	-	-
2	Lamele centralnih ditributora	3200	-	EN-AW-3003	-	-
1	Lamele jezgre izmjenjivača	80000	-	EN-AW-3003	-	-

Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime / Potpis
	Projektirao		Borna Vučinić
	Razradio		Borna Vučinić
	Crtao		Borna Vučinić
	Pregledao		Nenad Ferdelji
	Mentor		Nenad Ferdelji

FSB Zagreb
Studij strojarstva

ISO - tolerancije	Objekt: Pločasto lamelni izmjenjivač topline	Objekt broj:	
		R. N. broj:	
	Napomena:	Smjer:	Kopija
	Materijal: EN-AW-3003 EN-AW-5754	Masa: DIPLOMSKI RAD	Format: A0
	Mjerilo originala	Naziv: Sklopni nacrt pločasto lamelnog izmjenjivača topline	Pozicija:
		Crtež broj:	Listova: / List:

Design by CADLab