Rektifikacijski uređaj za kontinuiranu destilaciju etanola

Đuranović, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:235:497844

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matej Đuranović

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

doc.dr. sc. Nenad Ferdelji Matej Đuranović

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc.dr.sc.Nenadu Ferdeljiju, na ukazanom povjerenju, podršci, pomoći tijekom izrade rada, razumijevanju i rješavanju svih problema koji su se javljali.

Ovom prilikom bih se zahvalio i svojoj obitelji na potpori i razumijevanju tijekom izrade diplomskog rada, kao i tijekom cijelog školovanja.

Matej Đuranović

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: **Matej Đuranović** Mat. br.: 0035190270

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rektifikacijski uređaj za kontinuiranu destilaciju etanola**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Rectification plant for continuous distillation of ethanol**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati postrojenje za rektifikaciju etanola iz smjese etanol-voda sljedećih karakteristika:

- kapacitet uređaja: 2000 kg/h komine
- volumni udio etanola u komini pri 25 °C: 13,5 %
- maseni udio etanola u proizvodu: > 85 %

Na raspolaganju stoji suhozasićena vodena para tlaka 6 bar , električna energija 220/380 V – 50 Hz te dovoljna količina rashladne vode temperature 15 °C.

U okviru rada potrebno je izraditi:

1) Analizu potroška topline u ovisnosti o udjelu etanola u đibri s izborom optimalnog režima rada za različite udjele etanola u konačnom proizvodu

Za odabrani udio etanola u konačnom proizvodu i pripadajući udio etanola u đibri, potrebno je izraditi:

2) Termodinamički proračun svih elemenata uređaja
3) Potrebne proračune čvrstoće aparata
4) Dispozicijski crtež postrojenja
5) Radionički nacrt kotlića kolone za rektifikaciju
6) Shemu spajanja, automatske regulacije i upravljanja

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predvideni datum obrane:
16. studenog 2017.	18. siječnja 2018.	24., 25. i 26. siječnja 2018.

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 TEHNIČKE DOKUMENTACIJE V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK XIII
SUMMARY XIV
1. UVOD 1
2. TEORIJSKE OSNOVE DESTILACIJE SPOJENOM KOLONOM 2
2.1. Sastav dvojne smjese 2
2.2. Kolona za jačanje 3
2.3. Kolona za iscrpljivanje 7
2.4. Spojena kolona 9
2.4.1. Hlađenje deflegmatora kominom 13
2.4.2. Dogrijavanje komine džibrom 15
2.5. Teorijski broj plitica prema postupku McCabea i Thielea 17
2.6. Teorijski broj plitica iz $h\xi$-dijagrama 23
3. REKTIFIKACIJSKA KOLONA SA SITASTIM PLITICAMA 26
3.1. Tipovi plitica 27
4. REZULTATI PRORAČUNA REKTIFIKACIJSKE SPOJENE KOLONE SA SITASTIM PLITICAMA 31
4.1. Rezultati energijske analize spojene kolone za idealan slučaj 31
4.2. Rezultati energijske analize spojene kolone za realan slučaj 38
4.3. Teorijski broj plitica 40
4.4. Dimenzioniranje plitica 43
4.5. Realan broj plitica 52
5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ELEMENATA UREĐAJA 54
5.1. Kondenzator 54
5.2. Deflegmator 58
5.3. Štedna grijalica 62
5.4. Dogrijač komine 72
5.5. Kotlić 75
6. PRORAČUN ČVRSTOĆE KOTLIĆA 82
6.1. Plašt 83
6.2. Cijevna stijena 85
6.3. Podnica 88
6.4. Vijačni spoj 92
7. ZAKLJUČAK 96

LITERATURA 97
PRILOZI 98

POPIS SLIKA

Slika 1. Kolona za jačanje [1] ... 4
Slika 2. Pol za jačanje s presječnicama u $h\xi$-dijagramu [1] ... 6
Slika 3. Toplinski odnosi u koloni za jačanje [1] ... 7
Slika 4. Kolona za iscrpljivanje [1] ... 8
Slika 5. Toplinski odnosi u koloni za iscrpljivanje [1] ... 9
Slika 6. Spojena kolona[1] ... 10
Slika 7. Glavna presječnica spojene kolone[1] ... 12
Slika 8. Shema hlađenja deflegmatora kominom[1] ... 14
Slika 9. $h\xi$-dijagram hlađenja deflegmatora kominom[1] ... 14
Slika 10. Shema dogrijavanja komine džibrom[1] ... 16
Slika 11. $h\xi$-dijagram dogrijavanja komine džibrom[1] ... 16
Slika 12. Prikaz linija vrenja i linija rošenja za smjesu etanol-voda u $h\psi$-dijagramu ... 17
Slika 13. Pravac pojačavanja i pravac iscrpljivanja u $\psi_d\psi_f$ -dijagramu [1] ... 18
Slika 14. $\psi_d\psi_f$ -dijagram s ucrtanim pravcima potrebnim za McCabe-Thieleov postupak 19
Slika 15. Pravac napajanja za različito stanje komine u $\psi_d\psi_f$ -dijagramu ... 20
Slika 16. Minimalni refluks [1] ... 21
Slika 17. Teorijski broj plitica prema McCabe-Thieleu ... 23
Slika 18. Presjeci kolone uz određivanje broja plitica [1] ... 24
Slika 19. Teorijski broj plitica iz $h\xi$-dijagrama [1] ... 25
Slika 20. Plitica sa zvonima i tipovi zvona [7] ... 27
Slika 21. Plitica s ventilima i prikaz kaveznog ventila [7] ... 28
Slika 22. Protok pare kroz pliticu ... 30
Slika 23. Shema spojene kolone ... 33
Slika 24. Ovisnost snage kotlića o masenom udjelu etanola u džibri za različite masene udjele etanola u proizvodu ... 34
Slika 25. Ovisnost dovedene energije potrebne za destilaciju svedene na 1 kg proizvoda o masenom udjelu etanola u džibri za različite masene udjele etanola u proizvodu 35
Slika 26. Teorijski broj plitica prema McCabe-Thieleu za konkretan slučaj ... 42
Slika 27. Tipični raspored sitastih plitica [7] ... 44
Slika 28. Raspored perforacija na plitici [7] ... 46
Slika 29. Proračunski promjer ... 86
Slika 30. Plitka podnica s priključkom [14] ... 88
Slika 31. Sila u vijcima [14] ... 92

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba četiri osnovna tipa plitica [7] 29
Tablica 2. Usporedba potrošnje energije za različito vođenje pogona spojene kolone..... 36
Tablica 3. Teorijski broj plitica za različite masene udjele etanola u proizvodu 43
Tablica 4. Koeficijenti u jednadžbi (47) [7] 45
Tablica 5. Parametri plitica koje pripadaju dijelu za iscrpljivanje 49
Tablica 6. Parametri plitica koje pripadaju dijelu za jačanje 50
Tablica 7. Stupanj djelotvornosti za dio kolone za iscrpljivanje..... 53
Tablica 8. Stupanj djelotvornosti za dio kolone za jačanje 53

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
1-2018	Dispozicijski crtež postrojenja
2-2018	Radionički nacrt kotlića kolone za rektifikaciju
3-2018	Shema spajanja, automatske regulacije i upravljanja

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Latinične oznake		
A_0	m^2	površina izmjenjivača
A_A	m^2	aktivna površina plitice
A_D	m^2	površina preljeva plitice
A_h	m^2	površina otvora na plitici
A_T	m^2	površina plitice
Bo	$-$	značajka isparivanja
C_SB	$\mathrm{m/s}$	Souders-Brownov koeficijent
c_1	m	dodatak za dopušteno odstupanje materijala
c_2	m	dodatak zbog smanjenja korozijom i trošenjem
c_s	$\mathrm{J/(kg\ K)}$	specifični toplinski kapacitet džibre
c_w	$\mathrm{J/(kg\ K)}$	specifični toplinski kapacitet vode
D	$\mathrm{kg/s}$	maseni protok pare
D	m	promjer cijevne zavojnice
D_g	$\mathrm{kg/s}$	maseni protok konačnog proizvoda
D_m	$\mathrm{kg/s}$	maseni protok proizvoda kolone za iscrpljivanje
D_S	m	promjer segmentne pregrade
D_u	m	unutarnji promjer plašta
D_v	m	vanjski promjer plašta
d	m	promjer
d_2	m	proračunski promjer
d_B	m	promjer rupa na segmentim pregradama
d_h	m	promjer otvora na plitici
d_k	m	potreban promjer jezgre navoja
d_T	m	promjer kolone
d_u	m	unutarnji promjer cijevi
d_v	m	vanjski promjer cijevi
E_OC	$-$	stupanj djelotvornosti
e	m	razmak između pojedinih cijevi
e_1	m	razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi
F	$\mathrm{kg/s}$	maseni protok kapljevine
Fr	$-$	Froudeova značajka
F_DB	N	sila u brtvi

F_{FB}	N	sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom
F_{LV}	–	parametar protoka
F_{m}	kg/s	maseni protok komine
F_{pl}	–	faktor plavljenja
F_{RB}	N	sila uslijed djelovanja tlak na gornju površinu
F_{s}	kg/s	maseni protok džibre
F_{SB}	N	najmanja sila u vijcima
f_{A}	–	korekcijski faktor uzima u obzir odstupanja između idealnog i realnog aparata
f_{L}	–	korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja
f_{N}	–	korekcijski faktor
f_{S}	–	korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja
f_{s}	–	korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa
f_{B}	–	korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja
g	$\mathrm{m/s^2}$	ubrzanje Zemljine sile teže
H	m	visina odsječka segmentne pregrade
$h_{\Pi_{\mathrm{i}}}$	J/kg	entalpija pola iscrpljivanja
h_{ct}	m	visina stupca čiste kapljevine u režimu dispergirane kapljevine
h_{d}	J/kg	entalpija pare smjese etanol-voda
h_{f}	J/kg	entalpija kapljevine smjese etanol-voda
h_{g}	J/kg	entalpija konačnog proizvoda
h_{k}	J/kg	entalpija kapljevine konačnog proizvoda nakon kondenzacije
h_{m}	J/kg	entalpija komine
h_{md}	J/kg	entalpija komine nakon deflegmatora
h_{mds}	J/kg	entalpija komine na ulazu u kolonu
h_{s}	J/kg	entalpija džibre
h_{sd}	J/kg	entalpija džibre nakon štedne grijalice
$h_{n\mathrm{d}}$	J/kmol	entalpija pare smjese etanol-voda svedena na 1 kmol smjese
$h_{n\mathrm{f}}$	J/kmol	entalpija kapljevine smjese etanol-voda svedena na 1 kmol smjese
$h_{n\mathrm{mds}}$	J/kmol	entalpija komine na ulazu u kolonu svedena na 1 kmol smjese

h_{Π}	J/kg	entalpija pola jačanja
K	Pa	proračunska čvrstoća materijala za radno stanje
K'	Pa	proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje
k	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prolaza topline
k_{S}	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prolaza topline do vanjskog ruba stijenke
L	m	dužina izmjenjivača
L_{M}	m	razmak između segmentnih pregrada
L_{p}	m	prestrujna duljina cijevi
L_{W}	m	duljina pregrade preljeva
M	kg/kmol	molarna masa
M_{p}	kg/kmol	prividna molarna masa smjese
M'	kg/kmol	molarna masa tvari nižeg vrelišta
M''	kg/kmol	molarna masa višeg vrelišta
m	kg	masa smjese
m	–	karakteristika komine
m'	kg	masa tvari nižeg vrelišta
m''	kg	masa tvari višeg vrelišta
$\dot{m}$	$\mathrm{kg/(m^2\ s)}$	maseni tok koji struji kroz izmjenjivač sveden na površinu presjeka kroz koju struji
N	–	dimenzijski parametar
N_{t}	–	teorijski broj plitica
N_{U}	–	broj cijevi u uzdužnoj zoni
N_{uk}	–	ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača
N_{a}	–	realan broj plitica
Nu_{c}	–	Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijevi
$Nu_{\mathrm{l},2300}$	–	Nuseltova značajka za laminarno strujanje za $Re = 2300$
Nu_{l}	–	Nusseltov broj pri laminarnom strujanju
$Nu_{\mathrm{t},10^4}$	–	Nuseltova značajka za turbulentno strujanje za $Re = 10^4$
Nu_{t}	–	Nusseltov broj pri turbulentnom strujanju
Nu_{u}	–	Nuseltova značajka s unutarnje strane cijevi
Nu_{SG}	–	Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijev
n_{p}	–	broj prolaza izmjenjivača

n'	kmol	količina tvari nižeg vrelišta
n''	kmol	količina tvari višeg vrelišta
Pr_{m}	–	Prandtlova značajka za kominu
Pr_{s}	–	Prandtlova značajka za džibru
Pr_{w}	–	Prandtlova značajka za vodu
p	Pa	tlak
p	Pa	proračunski tlak
p'	Pa	ispitni tlak
p_{h}	m	korak otvora na plitici
Q_{L}	$\mathrm{m^2/s}$	opterećenje plitice kapljevinom
q	$\mathrm{W/m^2}$	toplinski tok sveden na površinu izmjenjivača
q_{g}	J/kg	specifična toplina grijanja kolone za jačanje
q_{i}	J/kg	specifična toplina kotlića
q_{R}	J/kg	specifična toplina deflegmacije
$q_{m\mathrm{d}}$	kg/s	maseni protok pare smjese etanol-voda
$q_{m\mathrm{f}}$	kg/s	maseni protok kapljevine smjese etanol-voda
$q_{m\mathrm{g}}$	kg/s	maseni protok konačnog proizvoda
$q_{m\mathrm{m}}$	kg/s	maseni protok komine
$q_{m\mathrm{p}}$	kg/s	maseni protok pare
$q_{m\mathrm{s}}$	kg/s	maseni protok džibre
$q_{m\mathrm{w}}$	kg/s	maseni protok vode
$q_{n\mathrm{d}}$	kmol/s	molni protok pare smjese etanol-voda
$q_{n\mathrm{di}}$	kmol/s	molni protok pare smjese etanol-voda u dijelu kolone za iscrpljivanje
$q_{n\mathrm{f}}$	kmol/s	molni protok kapljevine smjese etanol-voda
$q_{n\mathrm{fi}}$	kmol/s	molni protok kapljevine smjese etanol-voda u dijelu kolone za iscrpljivanje
$q_{n\mathrm{m}}$	kmol/s	molni protok komine
$q_{n\mathrm{g}}$	kmol/s	molni protok konačnog proizvoda
$q_{n\mathrm{s}}$	kmol/s	molni protok džibre
$q_{v\mathrm{d}}$	$\mathrm{m^3/s}$	volumni protok pare smjese etanol-voda
$q_{v\mathrm{f}}$	$\mathrm{m^3/s}$	volumni protok kapljevine smjese etanol-voda
R	m	unutarnji radijus kalote
R_{C}	–	omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja
R_{L}	–	omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja
Re_{u}	–	Reynoldsova značajka s unutarnje strane cijevi
r	J/kg	specifična toplina isparavanja vodene pare
S	–	stupanj sigurnosti pri radnom stanju

S_0	m^2	slobodni presjek plašta
S_L	m^2	ukupni presjek za lekažno strujanje
S_{LC}	m^2	prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora
S_{LPS}	m^2	presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade
S_M	m^2	najuži presjek strujanja u međuzoni
S_U	m^2	slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni
S'	–	stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju
SF	–	faktor sustava
s	m	potrebna debljina stijenke
s_A	m	potrebna debljina stijenke oko izreza za radno stanje
s_A'	m	potrebna debljina stijenke oko izreza za ispitno stanje
s_e	m	izvedena debljina stijenke
s_S	m	debljina stijenke cijevnog priključka
s'	m	potrebna debljina stijenke za ispitno stanje
T	K	termodinamička temperatura
T_S	m	razmak između plitica
t	m	razmak između izreza
t_g	°C	temperatura konačnog proizvoda
t_m	°C	temperatura komine
t_p	–	normirani poprečni korak cijevi
t_s	°C	temperatura džibre
t_t	m	debljina plitice
t_u	–	normirani uzdužni korak cijevi
u_f	m/s	brzina kapljevine u preljevu
u_{fmax}	m/s	maksimalna brzina kapljevine u preljev
u_{fmaxp}	m/s	maksimalna dopuštena brzina kapljevine u preljevu
v_0	m/s	brzina strujanja u slobodnom presjeku plašta
v_k	m/s	brzina strujanja kondenzata
v_m	m/s	brzina strujanja komine
v_s	m/s	brzina strujanja džibre u cijevima
v_w	m/s	brzina strujanja vode

Grčke oznake

α	$-$	relativna hlapivost između alkohola i vode
α_{cb}	$\mathrm{W/(m^2\ K)}$	koeficijent prijelaza topline konvektivnim isparivanjem
α_{f}	$\mathrm{W/(m^2\ K)}$	koeficijenta prijelaza topline konvekcijom kapljevite faze
α_{nb}	$\mathrm{W/(m^2\ K)}$	koeficijent prijelaza topline mjehurastim isparivanjem
α_{u}	$\mathrm{W/(m^2 K)}$	koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi
α_{v}	$\mathrm{W/(m^2 K)}$	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi
α_{v1}	$\mathrm{W/(m^2 K)}$	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za jednu cijev
β	$-$	koeficijent oblika podnice
γ	$^\circ$	središnji kut segmentne pregrade
$\Delta\vartheta_{\mathrm{m}}$	$^\circ\mathrm{C}$	srednja logaritamska razlika temperatura
$\Delta\vartheta_{\mathrm{ms}}$	$^\circ\mathrm{C}$	srednja logaritamska razlika temperatura za srednju temperaturu stijenke
Δh	$\mathrm{J/kg}$	specifična toplina koju oslobađa 1 kg pare pri kondenzaciji
δ	$\mathrm{kg/kg}$	specifični protok pare u koloni za jačanje
δ_{i}	$\mathrm{kg/kg}$	specifični protok pare u koloni za iscrpljivanje
ϑ_{g}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura konačnog proizvoda
ϑ_{m}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura komine
ϑ_{md}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura komine nakon deflegmatora
ϑ_{mds}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura komine nakon štedne grijalice
ϑ_{mi}	$^\circ\mathrm{C}$	izlazna temperatura komine
ϑ_{mu}	$^\circ\mathrm{C}$	ulazna temperatura komine
ϑ_{s}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura džibre
ϑ_{S}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura stijenke
ϑ_{sd}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura džibre nakon štedne grijalice
ϑ_{wi}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura vode na ulazu u kondenzator
ϑ_{wu}	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura vode na izlazu iz kondenzatora
ϑ'	$^\circ\mathrm{C}$	temperatura pare
λ_{f}	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost kapljevine smjese etanol-voda
λ_{m}	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost komine
λ_{S}	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost materijala stijenke cijevi
λ_{s}	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost džibre
λ_{w}	$\mathrm{W/(m\ K)}$	toplinska provodnost vode
η_{f}	$\mathrm{kg/(m\ s)}$	dinamička žilavost kapljevine smjese etanol-voda

η_m	kg/(m s)	dinamička žilavost komine
η_s	kg/(m s)	dinamička žilavost džibre
η_w	kg/(m s)	dinamička žilavost vode
ξ	kg/kg	maseni udio
ξ_dm	kg/kg	maseni udio etanola u proizvodu kolone za iscrpljivanje
ξ_g	kg/kg	maseni udio etanola u konačnom proizvodu
ξ_m	kg/kg	maseni udio etanola u komini
ξ_s	kg/kg	maseni udio etanola u džibri
ξ_V	$\mathrm{m^3/m^3}$	volumni udio
ρ	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća smjese
ρ'	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća tvari nižeg vrelišta
ρ_f	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća kapljevine smjese etanol-voda
ρ_k	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća kondenzata
ρ_w	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća vode
ρ_m	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća komine
ρ_s	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća džibre
σ	N/m	površinska napetost
υ	–	koeficijent valjanosti zavarenog spoja
υ_A	–	koeficijent oslabljenja izrezom
φ	kg/kg	specifični protok kapljevine u koloni za jačanje
φ	kmol/kmol	refluks
φ_i	kg/kg	specifični protok kapljevine u koloni za iscrpljivanje
φ_min	kmol/kmol	minimalni refluks
Φ	W	toplinski tok
Φ_ds	W	toplinski tok izmijenjen u štednoj grijalici
Φ_i	W	toplinski tok potreban za grijanje kotlića kolone
Φ_K	W	toplinski tok kondenzacije
Φ_R	W	toplinski tok obaranja
Ψ	–	poroznost snopa cijevi
ψ	kmol/kmol	količina tvari smjese
ψ_d	kmol/kmol	molni udio etanola u pari
ψ_f	kmol/kmol	molni udio etanola u kapljevini
ψ_g	kmol/kmol	molni udio etanola u konačnom proizvodu
ψ_m	kmol/kmol	molni udio etanola u komini
ψ_s	kmol/kmol	molni udio etanola u džibri

SAŽETAK

U sklopu diplomskog rada bilo je potrebno projektirati glavne dijelove postrojenja za kontinuiranu rektifikaciju etanola iz smjese etanol-voda. Provedena je analiza potrošnje topline u ovisnosti o udjelu etanola u džibri za različite udjele etanola u proizvodu te odabran optimalni udio etanola u džibri. Nakon provedene analize potrošnje energije, određen je teorijski broj plitica te je odabran optimalni udio etanola u proizvodu. Određene su dimenzije plitica, promjer kolone te iskoristivost plitica čime je određen konačan broj plitica. Uz gore navedeno, rad sadrži termodinamički proračun kondenzatora, deflegmatora, štedne grijalice i kotlića te proračun čvrstoće kotlića. Za grijanje kotlića se koristi suhozasićena vodena para, a za hlađenje kondenzatora rashladna voda.

Ključne riječi: destilacija, plitica, proračun čvrstoće, rektifikacijska kolona, termodinamički proračun.

SUMMARY

In this master's thesis the task was to design main parts of rectification plant for continuous ethanol production from ethanol water mixture. The analysis of optimal regine based on heat consumption was made for different fractions of ethanol in the bottoms. After the energy consumption analysis a theoretical number of stages in the column was found which determined the optimal fraction of ethanol in the final product. After the optimal regime was determined the dimensions of the trayes and the column was found. The real number of stages for both rectifying and stripping section, was determined by calculation of each tray efficiency. This master's thesis work, contains a thermodynamic design calculations of the condenser, reflux drum, heat recovery unit and strength calculation for the boiler. A heat source in the bolier, was saturated steam, and for cooling of the condenser , cooling water was used.

Key words: distillation, trayes , rectification column, strength calculation, thermodynamic design calculation.

1. UVOD

Destilacija je proces razdvajanja smjesa koji je poznat od davnina te je, kao takav, i danas u širokoj upotrebi. Zapisi o destilaciji postoje iz doba starog vijeka. U Aristotelovim zapisima destilacija se prepoznaje pri spominjanju isparivanja morske vode u svrhu dobivanja slatke vode. Destilacijom su se intenzivno bavili i srednjovjekovni alkemičari tako da su temelji suvremenih postupaka destilacije postavljeni vrlo rano. Prvu kolonu za kontinuiranu destilaciju izradio je Cellier-Blumenthal u Francuskoj 1813. godine. Perrier iz Engleske je prvi koristio neku vrstu plitica sa zvonima 1822. godine, a punila se upotrebljavaju od 1820. kada Clement koristi kolonu napunjenu staklenim kuglicama [7].

U suvremenom životu destilacija je važan i najmasovniji tehnološki postupak procesne industrije. Najvažniji proces destilacije je destilacija sirove nafte. Destilacija etilnog alkohola iz fermentiranih šećernih otopina je u domaćinstvima tradicionalni postupak dobivanja rakije, a ima i velik značaj u prehrambenoj industriju pri proizvodnji i drugih alkoholnih pića te medicinskog alkohola. U današnje vrijeme sve više se etilni alkohol koristi kao alternativno gorivo benzinu. Destilacija ima važnu ulogu u kemijskoj i farmaceutskoj industriji, proizvodnji mirisa i proizvodnji kisika i dušika iz ukapljenog zraka.

Razdvajanje smjesa destilacijom temelji se na različitim vrelištima jednostavnih tvari (komponenti) od kojih se sastoji smjesa. Destilacijom kapljevitih smjesa dobiva se para u kojoj je povećana koncentracija komponente nižeg vrelišta dok će u kapljevitom ostatku biti povećana koncentracija komponente višeg vrelišta. Teorijske osnove destilacije temelje se, prije svega, na Raoultovom i Daltonovom zakonu, ali i drugim termodinamičkim zakonitostima ponašanja dvojnih i višekomponentnih smjesa.

Destilacija može biti šaržna (s prekidima) i kontinuirana (neprekidna). Cilj destilacije obično je dobivanje destilata željene koncentracije, ali cilj može biti i osiromašenje džibre na zadanu koncentraciju. Destilacija se može provoditi jednostavnim postupkom kojim se mogu dobiti proizvodi sa sastavom u nekom uskom rasponu ili usavršenim postupcima (spojene rektifikacijske kolone) kojima se mogu dobiti po želji visoke koncentracije destilata ili niske koncentracije džibre uz potrošnju određene količine energije, ali ne i potpuno čiste komponente u slučaju azeotropskih smjesa (čiste komponente se dobivaju kemijskim putem).

2. TEORIJSKE OSNOVE DESTILACIJE SPOJENOM KOLONOM

2.1. Sastav dvojne smjese

Miješanjem jednostavnih (čistih) tvari dobivaju se smjese. Toplinsko stanje neke smjese je jednoznačno određeno temperaturom T i tlakom p uz poznavanje kvantitativnog sastava smjese za razliku od jednostavnih tvari kod kojih je toplinsko stanje neke smjese jednoznačno određeno temperaturom T i tlakom p.

Smjese mogu biti homogene i heterogene. Homogene smjese su one smjese u kojima u svim dijelovima vlada isti sastav, temperatura i gustoća. Tipične homogene smjese su smjese sastavljene od plinova, zato što plinovi međusobnom difuzijom teže jednoličnom sastavu, ali postoje i homogene smjese kapljevitih i krutih tvari. Kad uvjet jednoličnosti za neke od gore navedenih svojstava nije zadovoljen, smjesa je nehomogena. Ako u smjesi postoje takva područja da se prijelazom iz jednog u drugo područja neko svojstvo skokovito mijenja tada je riječ o heterogenoj smjesi.

Sastav neke dvojne smjese može se izraziti kao maseni udio, volumni udio, molni udio, masena koncentracija i molna koncentracija neke od jednostavnih tvari koje čine smjesu. Dvojna smjesa se sastoji od dvije jednostavne tvari različitog vrelišta te, u ovom radu, će se svojstva tvari višeg vrelišta označavati jednom crticom $'$, tvari nižeg vrelišta dvjema crticama $''$, a svojstva smjese bit će bez crtica.

Maseni udio u tvari nižeg vrelišta u smjesi prema [1] glasi:

$$\xi = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{m''}{m}. \qquad \textbf{(1)}$$

ξ je masa tvari nižeg vrelišta koja se nalazi u 1 kg smjese. Čista tvar višeg vrelišta predočuje se sa $\xi = 0$, a čista tvar nižeg vrelišta sa $\xi = 1$.

Molni udio tvari nižeg vrelišta je omjer količine te tvari $n'' = m''/M''$ u kmol prema ukupnoj količini smjese $n = n' + n''$, tako da molni udio tvari nižeg vrelišta prema [1] glasi:

$$\psi = \frac{n''}{n' + n''} = \frac{\frac{m''}{M''}}{\frac{m'}{M'} + \frac{m''}{M''}}. \qquad \textbf{(2)}$$

Volumni udio tvari nižeg vrelišta u smjesi je omjer volumena tvari nižeg vrelišta prema ukupnom volumenu smjese.

$$\xi_V = \frac{V''}{V} \tag{3}$$

Izraz za maseni udio preko volumnog udjela i gustoće tvari nižeg vrelišta u smjesi i gustoće smjese glasi:

$$\xi = \frac{\rho''}{\rho}\xi_V. \tag{4}$$

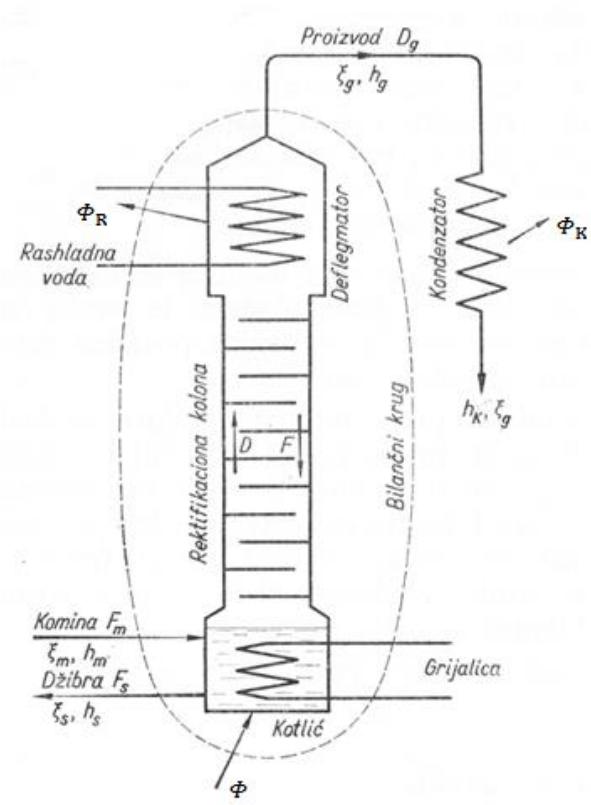
Izraz za molni udio preko masenog udjela i molarnih masa tvari u smjesi glasi:

$$\psi = \frac{\xi}{\frac{M''}{M'}(1-\xi)+\xi}. \tag{5}$$

Etanol (drugi nazivi etilni alkohol, etil-alkohol, špirit ili u narodu jednostavno alkohol) je primarni alkohol s dva ugljikova atoma koji u prirodi ne postoji u čistom obliku i gotovo nikada se ne koristi u čistom obliku u bilo koje svrhe. U praksi se pod pojmom etanola većinom smatra dvojna homogena smjesa etanol-voda s određenim udjelom etanola. U smjesi etanol-voda jednostavna tvar s nižim vrelištem je etanol, a s višim voda. Prema tome svojstva etanola bit će označena jednom crticom $'$, a vode dvjema crticama $''$.

2.2. Kolona za jačanje

Kolona za jačanje je rektifikacijska kolona koja se uobičajeno izvodi ili s punilima različitih oblika ili pomoću plitica (u sljedećim razmatranjima bit će riječ o izvedbi s pliticama). Primarna svrha destilacije kapljevitih smjesa je dobivanje destilata s povećanim udjelom tvari nižeg vrelišta. Svrha rektifikacijskog aparata je da omogući što dulji dodir uzlazne pare sa silaznom kapljevinom na što većoj dodirnoj površini. Kolona se sastoji od kotlića na koju se nastavlja rektifikacijski aparat na čijem se vrhu nalazi deflegmator ili obaralo (shematski prikaz na Slika 1). U kotlić se uvodi komina masenog protoka F_m i koncentracije ξ_m, a odvodi se đibra masenog protoka F_s i koncentracije ξ_s. Na vrhu deflegmatora odvodi se destilat masenog protoka D_g i koncentracije ξ_g koji se dalje odvodi u kondenzator gdje kondenzira odvođenjem toplinskog toka kondenzacije Φ_K. Za pogon destilacijske kolone dovodi se toplinski tok za grijanje kotlića Φ, a u deflegmatoru se odvodi toplinski tok obaranja Φ_R. U nastavku je pretpostavljeno da je kolona toplinski izolirana te da nema izmjene topline kolone s okolišem.



Slika 1. Kolona za jačanje [1]

Dovođenjem topline za grijanje kotlića Φ, đibra u kotliću vrije i odaje ravnotežnu paru masenog protoka D koja putuje kroz rektifikacijski aparat prema obaralu. U obaralu se odvođenjem toplinskog toka obaranja Φ_{R}, djelomično kondenzira para koja dolazi iz vrha rektifikacijske kolone. Oborena kapljevina (refluks) masenog protoka F gravitacijski struji kroz kolonu prema kotliću u protustruji s uzlaznom parom D. U koloni, na pliticama, dolazi do intenzivnog miješanja pare D i silazne oborine F uz izmjenu tvari i topline, što znači da se para obogaćuje tvari nižeg vrelišta, a oborina osiromašuje. Teoretski, uz dovoljno vremena i površine za izmjenu tvari, para i kapljevina bi na svakom mjestu u rektifikacijskom aparatu bile u ravnoteži. U praksi se to ne može postići, a približavanje ravnotežnom stanju ovisi o konstrukciji kolone.

Zakonitosti koje vrijede za bilo koji presjek kolone pri strujanju kapljevine F i pare D prema [1] glase:

$$D - F = D_{\mathrm{g}}, \tag{6}$$

$$D\,\xi_{\mathrm{d}} - F\,\xi_{\mathrm{f}} = D_{\mathrm{g}}\,\xi_{\mathrm{g}}, \tag{7}$$

$$D\,h_\mathrm{d} - F\,h_\mathrm{f} = D_\mathrm{g}\,h_\mathrm{g} + \Phi_\mathrm{R}. \quad \textbf{(8)}$$

Gore navedene veličine moguće je svesti na 1 kg tjemenog proizvoda:

$$\varphi = \frac{F}{D_\mathrm{g}} = \frac{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{d}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}}, \quad \textbf{(9)}$$

$$\delta = \frac{D}{D_\mathrm{g}} = \frac{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{f}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}}, \quad \textbf{(10)}$$

$$q_\mathrm{R} = \frac{\Phi_\mathrm{R}}{D_\mathrm{g}}. \quad \textbf{(11)}$$

δ i φ su oni protoci pare i kapljevine koji su potrebni u koloni za dobavu 1 kg proizvoda, a q_R je toplina obaranja za istu količinu.

Time se pojednostavljuju jednadžbe (6), (7) i (8) te glase:

$$\delta - \varphi = 1, \quad \textbf{(12)}$$

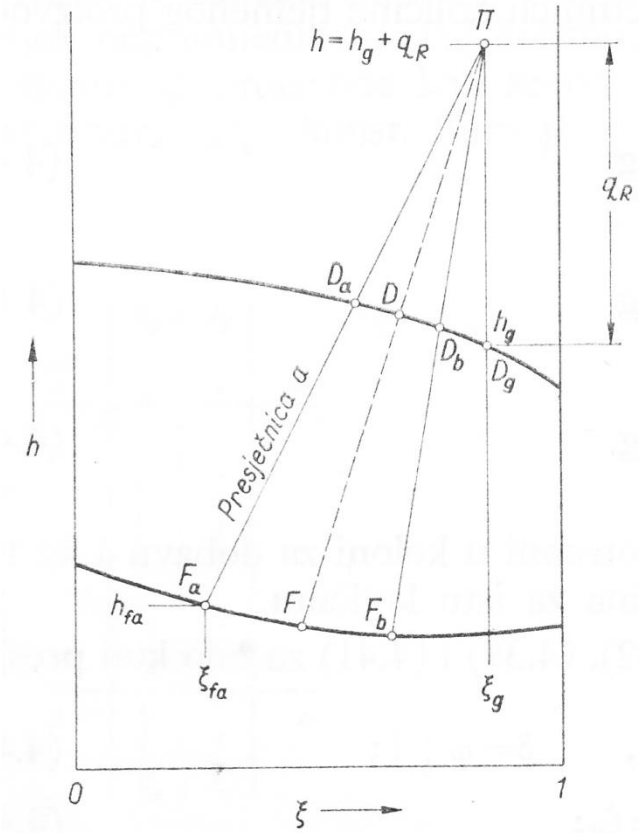
$$\delta\xi_\mathrm{d} - \varphi\xi_\mathrm{f} = \xi_\mathrm{g}, \quad \textbf{(13)}$$

$$\delta\,h_\mathrm{d} - \varphi\,h_\mathrm{f} = h_\mathrm{g} + q_\mathrm{R}. \quad \textbf{(14)}$$

Jednadžba (14) dodatnim preuređivanjem glasi:

$$h_\mathrm{f} + \frac{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{f}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}}(h_\mathrm{d} - h_\mathrm{f}) = h_\mathrm{g} + q_\mathrm{R}. \quad \textbf{(15)}$$

Izraz (15) vrijedi za proizvoljni presjek kolone to jest predstavlja zakonitost koju moraju zadovoljavati uzlazna para i silazna kapljevina na bilo kojem presjeku kolone. On predstavlja jednadžbu ″presječnice″ kolone za jačanje, koja se u $h\xi$-dijagramu pokazuje kao snop pravaca koji prolaze stanjima kapljevine F i pare D promatranog presjeka kolone, a svi se sijeku u točki Π u $h\xi$-dijagramu koja se naziva pol razlučivanja. Koordinate tog pola su sastav tjemenog proizvoda ξ_g i iznos entalpije $h = h_\mathrm{g} + q_\mathrm{R}$. Na Slika 2 prikazane su presječnice kolone za tri susjedne plitice. Stanja kapljevine F i pare D na Slika 2 su radi jednostavnosti prikazana na linijama vrenja odnosno rošenja, no to ne mora nužno biti tako. Para lako može biti mokra ako uslijed pjenjenja ili komešanja sadrži kapljice, a oborina može biti pothlađena, naročito pri vrhu kolone, ako je hlađenje obarala intenzivnije nego što je to potrebno.



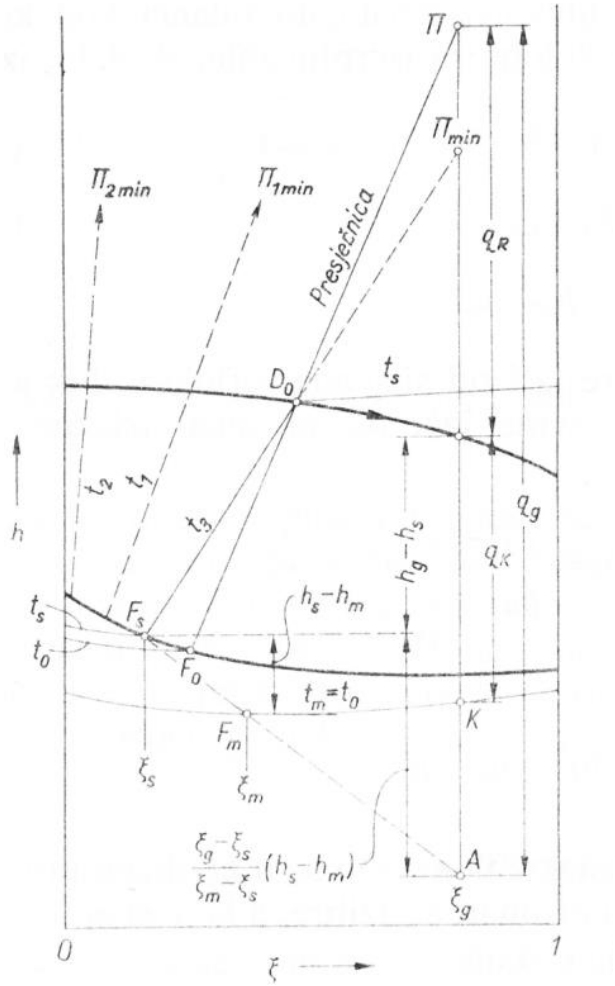
Slika 2. Pol za jačanje s presječnicama u *hξ*-dijagramu [1]

Na pojedinoj plitici (presjeku) kolone teorijski bi se mogla postići ravnoteža uzlazne parne i silazne kapljevite faze, pod uvjetom da za to ima dovoljno vremena i površine za izmjenu topline i tvari među fazama. U realnosti se to nikada neće postići. Zbog toga pol razlučivanja Π ne može ležati niže od presjecišta s linijom ξ_g koje daje bilo koja izoterma u području rektifikacije omeđenog koncentracijom džibre ξ_s i koncentracijom destilata ξ_g. Gore navedeno se može formulirati kao: razdvajanje smjese u bilo kako visokoj koloni provedivo je samo unutar onog područja sastava u kojem svaka presječnica leži strmije od presijecanih izoterma zasićenja. To će biti kriterij za određivanje položaja točke pola razlučivanja pri projektiranju kolone. Pri tome će biti potrebno kontrolirati polje izotermi između stanja vrele džibre i vrelog destilata te će položaj pola razlučivanja morati biti iznad točke minimalnog pola razlučivanja Π_min.

Toplina potrebna za pogon kolone za jačanje svedena na 1 kg proizvoda prema [1] glasi:

$$q_\mathrm{g} = h_\mathrm{g} - h_\mathrm{s} + q_\mathrm{R} + \frac{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{s}}{\xi_\mathrm{m} - \xi_\mathrm{s}}(h_\mathrm{s} - h_\mathrm{m}). \qquad \textbf{(16)}$$

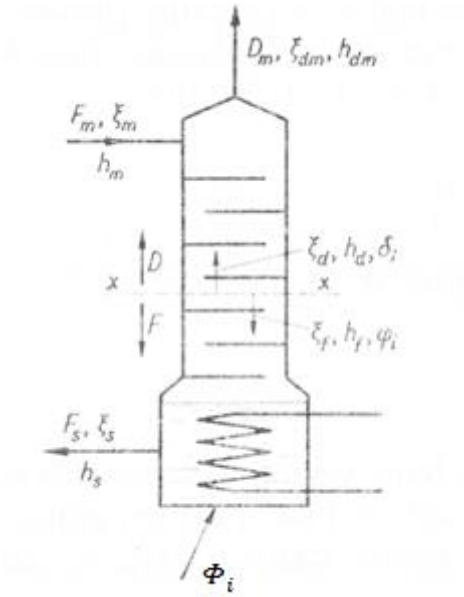
Grafički prikaz gornje jednadžbe dan je na Slika 3. Odabrani pol Π određuje toplinu grijanja q_g i toplinu deflegmatora q_R. Kolona za jačanje prvenstveno služi dobivanju destilata što veće koncentracije te pri tome će biti potrebno trošiti sve više energije za njezin pogon kako vrijednost ξ_g bude rasla (vidljivo sa Slika 3). U koloni za jačanje veliko povećanje potrošnje energije izaziva zahtjev za što manjom koncentracijom etanola u džibri.



Slika 3. Toplinski odnosi u koloni za jačanje [1]

2.3. Kolona za iscrpljivanje

Kolona za iscrpljivanje služi za što jače izdvajanje tvari nižeg vrelišta iz džibre. Na vrhu kolone za iscrpljivanje dovodi se svježa komina masenog protoka F_m i stanja ξ_m, h_m koja prelijevajući se preko plitica teče prema dolje u protustruji uzlaznoj pari. Na vrhu kolone odvodi se obogaćena para masenog protoka D_m i stanja ξ_{dm}, h_{dm}. U kotliću jedan dio kapljevine ispari, a iscrpljeni se ostatak odvodi kao džibra masenog protoka F_s sa stanjem ξ_s, h_s .



Slika 4. Kolona za iscrpljivanje [1]

Izrazi koji vrijedi za bilo koji presjek kolone za iscrpljivanje (veličine su svedene na 1 kg džibre) prema [1] glase:

$$\varphi_\mathrm{i} = \frac{F}{F_\mathrm{s}} = \frac{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{s}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}}, \tag{17}$$

$$\delta_\mathrm{i} = \frac{D}{F_\mathrm{s}} = \frac{\xi_\mathrm{f} - \xi_\mathrm{s}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}}, \tag{18}$$

$$q_\mathrm{i} = \frac{\Phi_\mathrm{i}}{F_\mathrm{s}}, \tag{19}$$

$$\varphi_\mathrm{i} - \delta_\mathrm{i} = 1, \tag{20}$$

$$\varphi_\mathrm{i}\, \xi_\mathrm{f} - \delta_\mathrm{i}\, \xi_\mathrm{d} = \xi_\mathrm{s}, \tag{21}$$

$$\varphi_\mathrm{i}\, h_\mathrm{f} - \delta_\mathrm{i}\, h_\mathrm{d} = h_\mathrm{s} - q_\mathrm{i}. \tag{22}$$

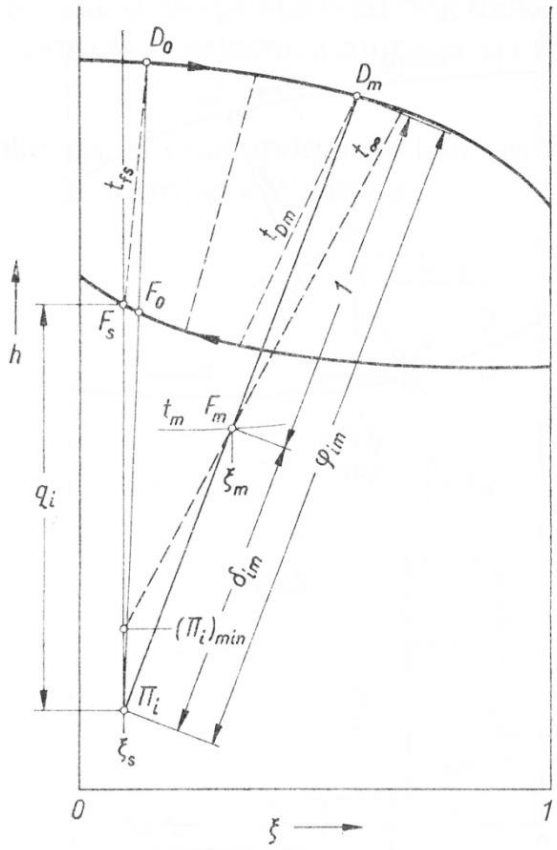
Izraz (22) preoblikovanjem glasi:

$$h_\mathrm{d} - \frac{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{s}}{\xi_\mathrm{d} - \xi_\mathrm{f}} (h_\mathrm{f} - h_\mathrm{d}) = h_\mathrm{s} - q_\mathrm{i}. \tag{23}$$

Gornji izraz predočuje se u $h\xi$-dijagramu kao pramen zraka s polom Π_i na ordinati ξ_s džibre, a koji je za q_i leže niže od točke stanja džibre F_s (ξ_s, h_s).

Stanje kotlića podudara se sa stanjem F_s odvedene džibre te prema tome će para D_0, isparena u kotliću , biti donekle u ravnoteži sa stanje džibre pa F_s i D_0 leže na istoj izotermi zasićenja

t_{fs} (Slika 5). U kotlić se s najdonje plitice prelijeva kapljevina F_0 čije stanje mora ležati na istoj presječnici s točkom D_0 proizvedene uzlazne pare. Na Slika 5 prikazan je slučaj da se komina F_{m} dovodi u kolonu u pothlađenom stanju. Pol iscrpljivanja Π_{i} treba odabrati što bliže točki F_{s}, čime se smanjuje ogrjevna toplina kotlića q_{i}. Najviši dopustivi položaj pola iscrpljivanja $(\Pi_{\mathrm{i}})_{\mathrm{min}}$ dobiva se produženjem izoterme zasićenog područja koja cilja na točku komine F_{m}. Na Slika 5 ta izoterma označena je sa t_{∞} da se istakne kako bi se takav pogon mogao ostvariti samo u koloni s beskonačno mnogo plitica te stoga za realne kolone pol iscrpljivanja mora biti niže od $(\Pi_{\mathrm{i}})_{\mathrm{min}}$. U koloni za iscrpljivanje može se rektificirati samo u području gdje je svaka presječnica strmija od izoterma zasićenja koje ona siječe.



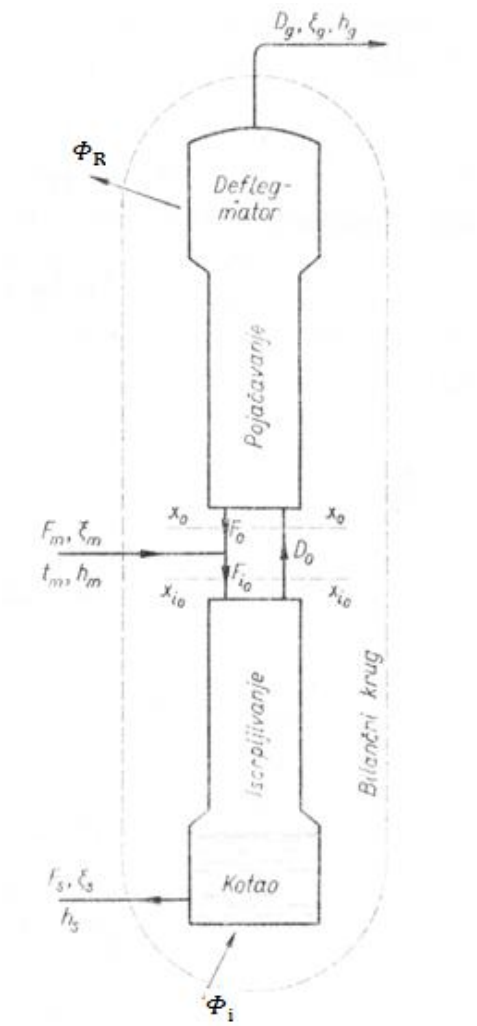
Slika 5. Toplinski odnosi u koloni za iscrpljivanje [1]

2.4. Spojena kolona

Koloni za jačanje raste potrošnja topline za pogon kako se smanjuje tražena koncentracija džibre, dok je kod kolone za iscrpljivanje koncentracija destilata ograničena nagibom izotermi zasićenog područja u rasponu ξ_{s}-ξ_{dm}. Zato će se u svim situacijama koje zahtijevaju što potpunije razdvajanje dvojne smjese na njezine sastojke primjenjivati spojena kolona.

Spojena kolona se sastoji od kolone za iscrpljivanje na koju je nadograđena kolona za jačanje bez kotlića (shematski prikaz Slika 6.)

Komina F_m dovodi se u rektifikacijski aparat na mjestu gdje prestaje dio za iscrpljivanje a počinje dio za jačanje. Kod kolone s pliticama će to biti najviša plitica dijela za iscrpljivanje iznad koje je najniža plitica dijela za jačanje. Na Slika 6 to je prikazano, zbog jasnoće, kao da su kolone razdvojene iako to u praksi većinom nije tako. Na mjestu dovoda komine ona se miješa s refluksom kolone za jačanje F_0 koji dolazi odozgo te ta mješavina predstavlja početnu oborinu F_{i0} na najgornjoj plitici kolone za iscrpljivanje. Iz dijela za iscrpljivanje dolazi para D_0 kojom se napaja dio kolone za jačanje. Procesi koji se odvijaju u gornjem i donjem dijelu spojene kolone analogni su onima opisanim kod kolone za jačanje i kolone za iscrpljivanje.



Slika 6. Spojena kolona[1]

Bilance mase i energije spojene kolone prema [1] glase:

$$F_\mathrm{m} = D_\mathrm{g} + F_\mathrm{s}, \tag{24}$$

$$F_\mathrm{m}\,\xi_\mathrm{m} = D_\mathrm{g}\,\xi_\mathrm{g} + F_\mathrm{s}\,\xi_\mathrm{s}, \tag{25}$$

$$F_\mathrm{m}\,h_\mathrm{m} + \Phi_\mathrm{i} = D_\mathrm{g}\,h_\mathrm{g} + F_\mathrm{s}\,h_\mathrm{s} + \Phi_\mathrm{R}. \tag{26}$$

Prema jednadžbama (11) i (19) slijedi:

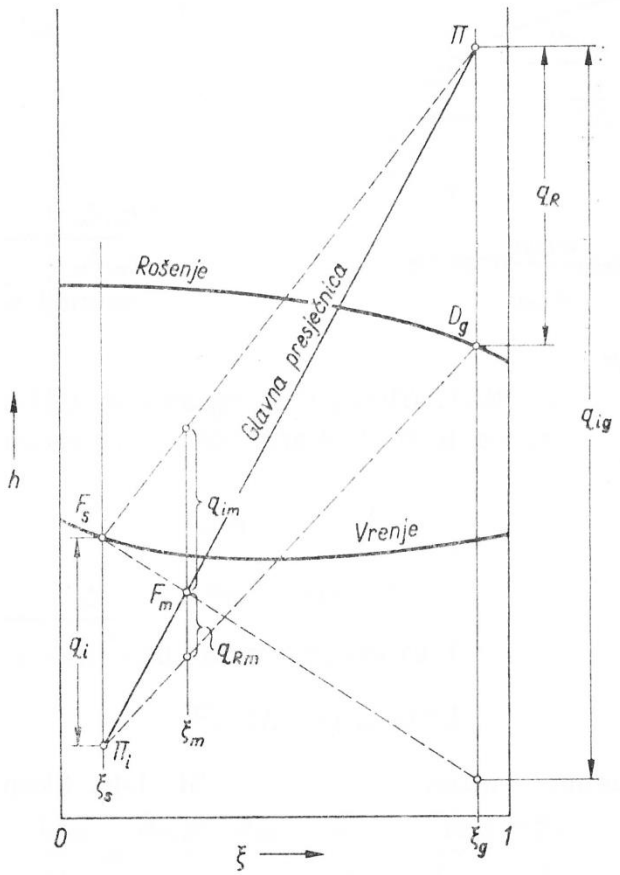
$$\Phi_\mathrm{R} = q_\mathrm{R}\,D_\mathrm{g}, \tag{27}$$

$$\Phi_\mathrm{i} = q_\mathrm{i}\,F_\mathrm{s}. \tag{28}$$

Izraz (26) sveden na 1 kg proizvoda i preuređen prema [1] glasi:

$$\frac{(h_\mathrm{g} + q_\mathrm{R}) - h_\mathrm{m}}{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{m}} = \frac{h_\mathrm{m} - (h_\mathrm{s} - q_\mathrm{i})}{\xi_\mathrm{m} - \xi_\mathrm{s}}. \tag{29}$$

U gornjem izrazu su h_m i ξ_m koordinate stanja F_m komine, $(h_\mathrm{g} + q_\mathrm{R})$ i ξ_g su koordinate pola Π kolone za jačanje, a $(h_\mathrm{s} - q_\mathrm{i})$ i ξ_s su koordinate pola Π_i kolone za iscrpljivanje. Zbog linearnosti izraza (29) tri točke F_m, Π i Π_i moraju u $h\xi$-dijagramu ležati na istom pravcu (Slika 7) koji se naziva glavna presječnica spojene kolone.



Slika 7. Glavna presječnica spojene kolone[1]

Zahtjev da sve presječnice spojene kolone moraju biti strmije od izotermi zasićenja koje te presječnice sijeku određuje minimalne topline q_i grijanja u kotliću i q_R hlađenja u deflegmatoru za postizanje sastava ξ_g i ξ_s pri zadanom stanju komine F_m. Te minimalne topline određene su polovima Π_min i $(\Pi_\mathrm{i})_\mathrm{min}$. Polovi Π_min i $(\Pi_\mathrm{i})_\mathrm{min}$ su određeni onom izotermom koja produljena izvan područja zasićenja prolazi stanjem komine F_m i siječe ordinate ξ_g i ξ_s. Kada se odrede polovi Π_min i $(\Pi_\mathrm{i})_\mathrm{min}$ potrebno je provjeriti da li koja od izotermi zasićenja u području jačanja siječe ordinatu ξ_g iznad pola Π_min. Ako koja od izoterma siječe ordinatu ξ_g iznad pola Π_min tada točka sjecišta te izoterme i pravca $\xi = \xi_\mathrm{g}$ postaje pol Π_min, a pol $(\Pi_\mathrm{i})_\mathrm{min}$ mora se nalaziti na pravcu koji je određen točkama F_m i Π_min. Pri ovim razmatranjima nije uzeta u obzir izmjena topline na oplošju kolone s okolišem.

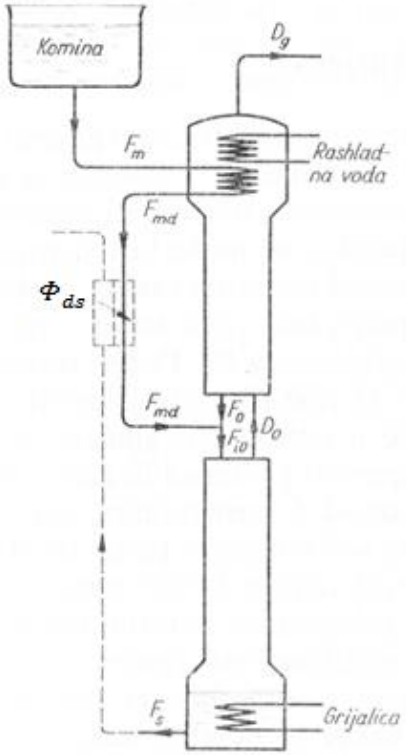
Temperatura komine na ulazu u kolonu utječe na potrošnju pogonske topline. Jasno da će biti povoljno da komina ima što višu temperaturu. To se vidi u $h\xi$-dijagramu (Slika 7) u kojem će toplina za grijanje kotlića biti manja što će stanje komine F_m biti bliže liniji vrenja. Iz kolone se džibra redovito odvoditi s temperaturom vrenja, koja je viša od temperature komine. Stoga

je za energetsku učinkovitost pri rektifikaciji svakako dobro da se džibra iskoristi za predgrijavanje komine. Istodobno se u spojenoj koloni jedan dio topline doveden u kotliću odvodi u deflegmatoru. Hlađenje deflegmatora također je moguće jednim dijelom obaviti svježom kominom. Kako je temperatura deflegmacije t_g niža od temperature odlazne džibre t_s bit će potrebno prvo kominu dovesti u deflegmator, gdje se ona teorijski može predgrijati do temperature $t_\mathrm{md} = t_\mathrm{g}$, a nakon toga još i u protustrujnu štednu grijalicu, gdje će izmjenom topline s džibrom postići najvišu moguću temperaturu.

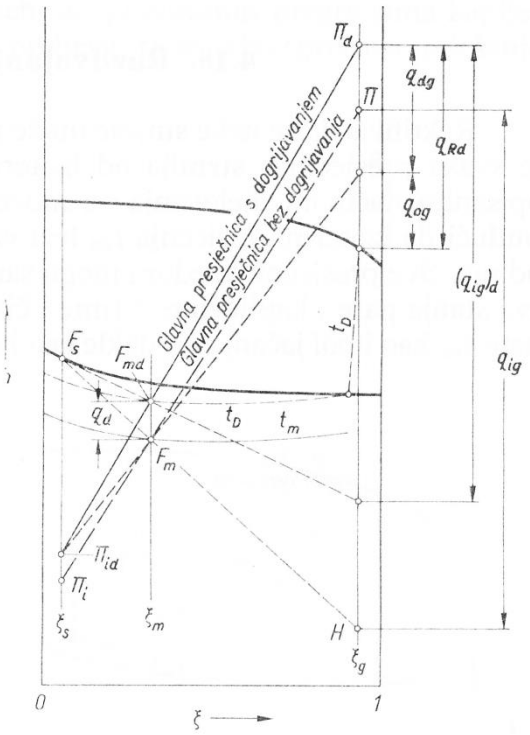
2.4.1. Hlađenje deflegmatora kominom

Na Slika 8 dan je prikaz sheme spojen kolone gdje se dogrijavanje komine provodi iskorištavanjem dijela topline koju je potrebno odvesti pri hlađenju deflegmatora te je na shemi crtkano naznačena mogućnost dodatne uštede topline za grijanje kotlića dogrijavanjem komine otpadnom džibrom. Hladna komina vodi se kroz deflegmator, gdje ima ulogu odvođenja topline pri čemu se zagrijava do stanja F_md (Slika 9). Temperatura predgrijane komine ne može biti veća od temperature deflegmatora te je najviši položaj F_md komine koji je moguće postići određen izotermom deflegmacije t_d, pri čemu 1 kg komine preuzima toplinu dogrijavanja prema [1]:

$$q_\mathrm{dg} = h_\mathrm{md} - h_\mathrm{m}. \qquad \textbf{(30)}$$



Slika 8. Shema hlađenja deflegmatora kominom[1]



Slika 9. $h\xi$-dijagram hlađenja deflegmatora kominom[1]

Toplinski tok Φ_d preračunat na 1 kg proizvoda je q_dg te je nanesen na ordinatu ξ_g (Slika 9). Kako je $q_\mathrm{dg} < q_\mathrm{Rd}$, toplina odvedena kominom nije dostatna za hlađenje defegmatora (u prikazanom slučaju) te ga treba dodatno hladiti rashladnom vodom koja će deflegmatoru odvoditi još toplinu q_0g. Toplina q_dg ne predočuje stvarnu uštedu topline jer se shodno tome premješta i pol Π. Stvarna ušteda topline dobiva se uspoređivanjem toplina $\left(q_\mathrm{ig}\right)_\mathrm{d}$ i q_ig.

2.4.2. Dogrijavanje komine džibrom

Sljedeća razmatranja, shema i $h\xi$-dijagram odnose se na kolonu za iscrpljivanje, ali kako je kolona za iscrpljivanje dio spojene kolone ona su primjenjiva u sklopu energijske analize spojene kolone. Prema Slika 10 otpadna džibra grije u protustrujnom dogrijaču (štedna grijalica) sirovu kominu, pri čemu džibra odaje upravo toliko topline koliko je komina prima. Promjene entalpija u dogrijaču prema [1]:

$$\Delta h_\mathrm{s} = h_\mathrm{s} - h_\mathrm{sd}, \tag{31}$$

$$\Delta h_\mathrm{m} = h_\mathrm{md} - h_\mathrm{m}. \tag{32}$$

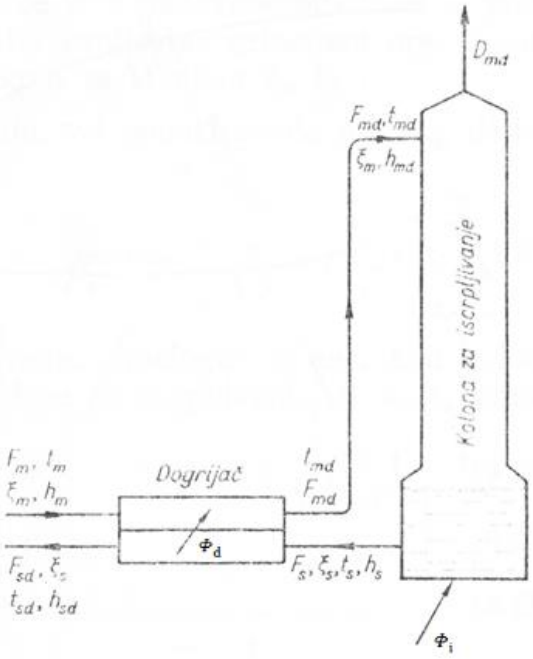
Toplinska bilanca dogrijača:

$$F_\mathrm{s}\,\Delta h_\mathrm{s} = F_\mathrm{m}\,\Delta h_\mathrm{m}. \tag{33}$$

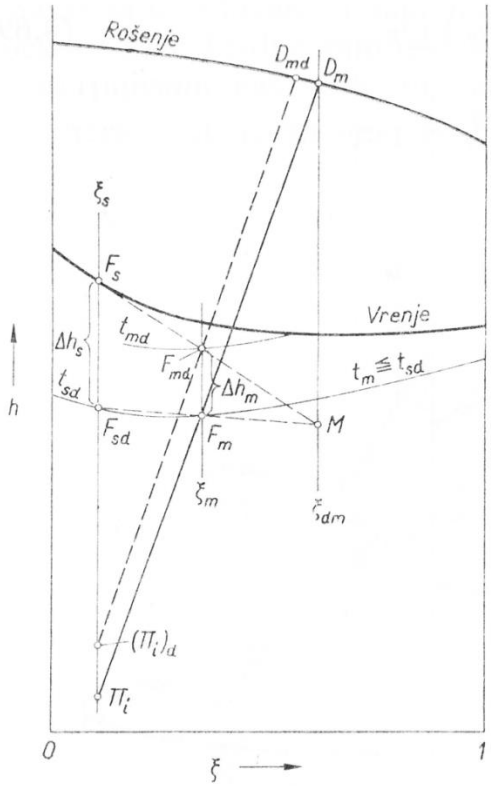
Iz gornjih jednadžbi slijedi:

$$\frac{\Delta h_\mathrm{m}}{\Delta h_\mathrm{s}} = \frac{h_\mathrm{md} - h_\mathrm{m}}{h_\mathrm{s} - h_\mathrm{sd}} = \frac{F_\mathrm{s}}{F_\mathrm{m}} = \frac{\xi_\mathrm{dmd} - \xi_\mathrm{m}}{\xi_\mathrm{dmd} - \xi_\mathrm{s}}. \tag{34}$$

Ovdje je ξ_dmd sastav pare na vrhu kolone pri pogonu s dogrijavanjem komine (kod spojene kolone to će biti ξ_g). Budući da je količina komine veća od količine džibre, bit će promjena temperature komine u dogrijaču manja od one za džibru. U krajnjem slučaju temperatura svježe komine na ulazu u izmjenjivač i temperatura džibre na izlazu iz izmjenjivača mogu izjednačiti, $t_\mathrm{sd} \approx t_\mathrm{m}$. Takav slučaj prikaza je na Slika 11. Premještanjem točke F_m u F_md premješta se i točka D_m u D_md, a i točka pola iscrpljivanja Π_i u $(\Pi_\mathrm{i})_\mathrm{d}$ čime je smanjena razlika entalpija džibre i pola iscrpljivanja odnosno smanjena potrebna energija za pogon kolone.



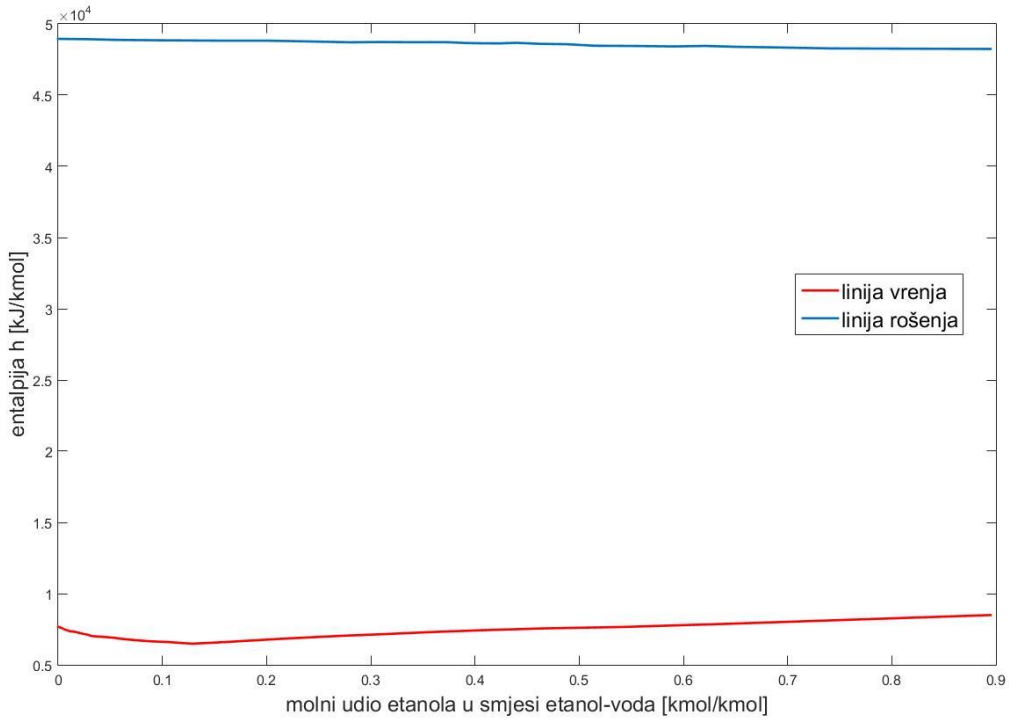
Slika 10. Shema dogrijavanja komine džibrom[1]



Slika 11. $h\xi$-dijagram dogrijavanja komine džibrom[1]

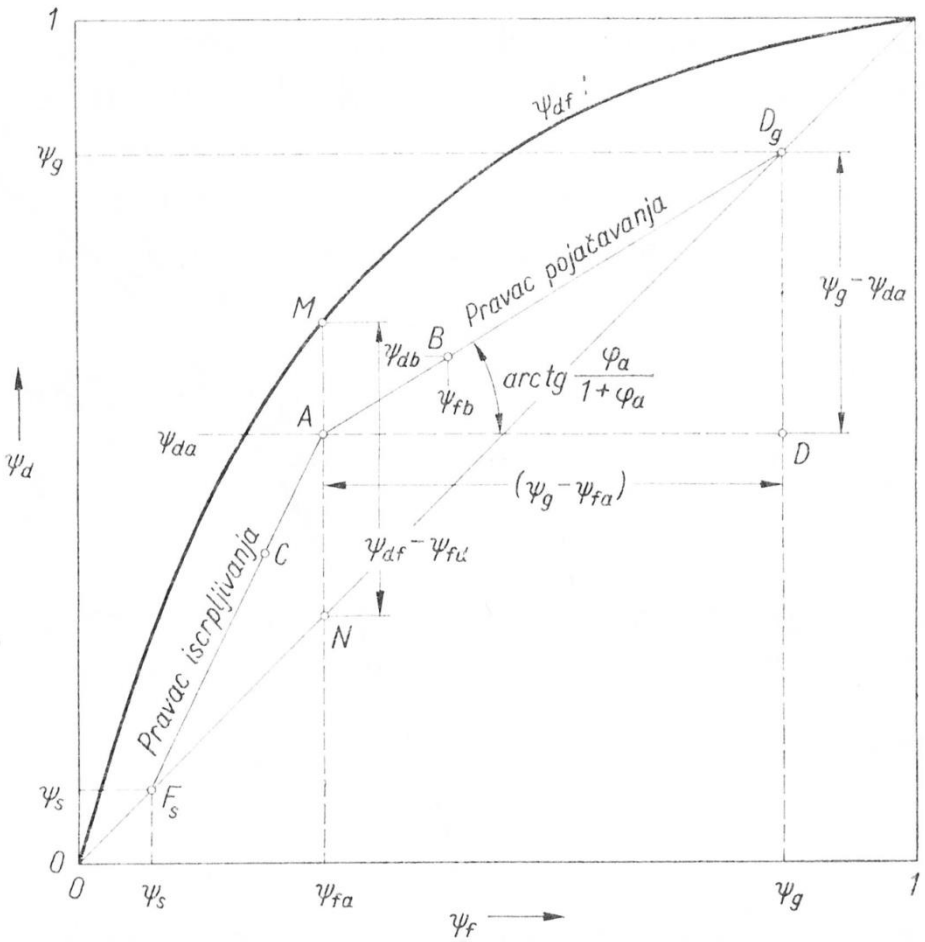
2.5. Teorijski broj plitica prema postupku McCabea i Thielea

Ovaj postupak najtočnije rezultate postiže sa smjesama jednakih toplina isparivanja obiju komponenti i usporednim linijama vrenja i rošenja (vrijednosti entalpija na liniji vrenja i liniji rošenja te topline isparavanja svedene su na množinu), ali se s dovoljnom točnošću može primijeniti na smjese koje od toga ne odstupaju previše. Na Slika 12 dan je kvantitativan prikaz linije vrenja i linije rošenja (entalpije na linijama su izražene u kJ/mol) u ovisnosti o molnom udjelu etanola u smjesi (vrijednosti molnog udjela se kreću od 0 do 0,8947 kmol/kmol koliko iznosi azeotropski sastav smjese etanol-voda). Kako je vidljivo sa Slika 12 linija vrenja i linija rošenja imaju gotovo paralelan tijek što dovodi do zaključka da je moguće primijeniti postupak McCabea i Thielea te će rezultati biti dovoljno točni.



Slika 12. Prikaz linija vrenja i linija rošenja za smjesu etanol-voda u *hψ*-dijagramu

U dijagramu sastava, Slika 13, nanesen je molni sastav pare ψ_{d} iznad molnog sastava kapljevine ψ_{f}. Kada su para i kapljevina u ravnoteži, dobiva se ravnotežna linija ψ_{df} pomoću koje se mogu očitati pripadni ravnotežni sastavi ψ_{df} i ψ_{fd}. Ako se ucrta dijagonala kao na Slika 13, duljina $\overline{\mathrm{MN}}$ daje razliku ravnotežnih sastava $(\psi_{\mathrm{df}} - \psi_{\mathrm{fd}})$. U taj dijagram mogu se unijeti i sastavi takve pare i kapljevine koji nisu u ravnoteži npr. točka A.



Slika 13. Pravac pojačavanja i pravac iscrpljivanja u $\psi_d\psi_f$-dijagramu [1]

Osnovna pretpostavka McCabe-Theileovog postupka je konstantan molni protok kapljevine i pare na svim pliticama kolone te prema tome jednadžba pravca pojačavanja (jačanja) prema [1] glasi:

$$\frac{\varphi}{1+\varphi} = \frac{\psi_g - \psi_d}{\psi_g - \psi_f}. \tag{35}$$

U gornjoj jednadžbi φ je refluks odnosno molni protok kapljevine kroz dio za jačanje spojene kolone sveden na 1 kmol proizvoda.

$$\varphi = \frac{\psi_g - \psi_d}{\psi_d - \psi_f} = \text{konst.} \tag{36}$$

Ako se u dijagram na Slika 13 unese točka D_g na dijagonali pri sastavu proizvoda ψ_g, vidi se da točka A leži na pravcu $\overline{D_g A}$ koji prolazi točkom D_g, a koeficijent nagiba je $\frac{\varphi}{1+\varphi} < 1$.

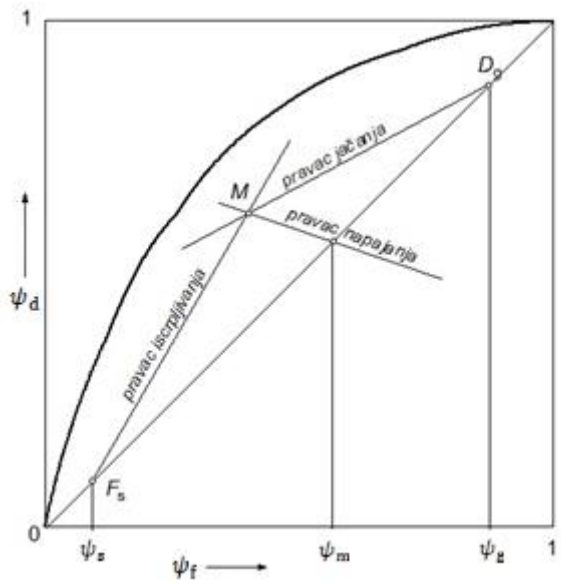
Jednadžba pravca iscrpljivanja glasi:

$$\frac{\delta_\mathrm{i}+1}{\delta_\mathrm{i}} = \frac{\psi_\mathrm{d}-\psi_\mathrm{s}}{\psi_\mathrm{f}-\psi_\mathrm{s}}. \tag{37}$$

U gornjoj jednadžbi δ_i je molni protok pare kroz dio za iscrpljivanje spojene kolone sveden na 1 kmol džibre.

$$\delta_\mathrm{i} = \frac{\psi_\mathrm{f}-\psi_\mathrm{s}}{\psi_\mathrm{d}-\psi_\mathrm{f}} = \text{konst.} \tag{38}$$

Točka F_s unesena je na dijagonalu pri ψ_s (Slika 13). Prava iscrpljivanja $\overline{F_\mathrm{s}A}$ ima koeficijent nagiba $\frac{\delta_\mathrm{i}+1}{\delta_\mathrm{i}} > 1$.



Slika 14. $\psi_\mathrm{d}\psi_\mathrm{f}$ -dijagram s ucrtanim pravcima potrebnim za McCabe-Thieleov postupak

Pravcem jačanja i pravcem iscrpljivanja su u načelu pokrivene sve promjene uzduž plitica kolone, te bi se nakon njihovog ucrtavanja u $\psi_\mathrm{d}\psi_\mathrm{f}$-dijagram moglo pristupiti određivanju teorijskog broja plitica. Pri tome bi sjecište pravca iscrpljivanja s pravcem jačanja (stanje *M* na Slika 14) bilo određeno dodatnim pravcem koji se naziva pravac napajanja čiji parametri proizlaze iz bilanci mase i energije za pliticu na koju se dovodi komina. Jednadžba pravca napajanja glasi [7]:

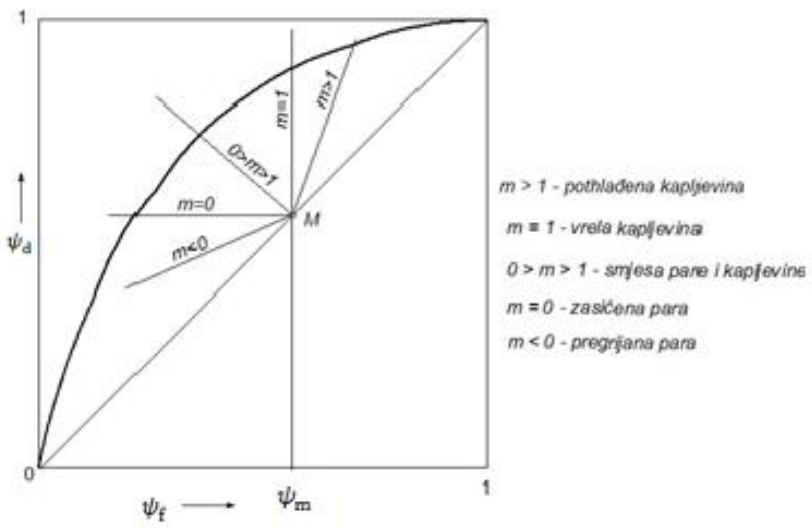
$$\psi_\mathrm{d} = \frac{m}{m-1}\,\psi_\mathrm{f} - \frac{1}{m-1}\,\psi_\mathrm{m}. \tag{39}$$

U gornjoj jednadžbi m je karakteristika komine te se računa prema [7]:

$$m = \frac{h_{n\mathrm{d}} - h_{n\mathrm{mds}}}{h_{n\mathrm{d}} - h_{n\mathrm{f}}}. \tag{40}$$

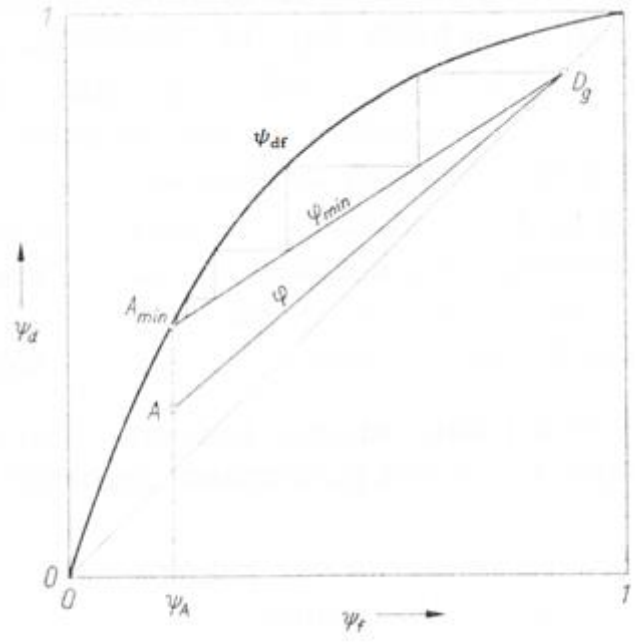
Karakteristika komine se računa pomoću entalpije koju su svedene na 1 kmol smjese te su to entalpija komine na ulazu u kolonu $h_{n\mathrm{mds}}$, entalpija vrele kapljevine $h_{n\mathrm{f}}$ za sastav komine ψ_{m} i entalpija zasićene pare $h_{n\mathrm{d}}$ za sastav komine ψ_{m}.

Komina se u kolonu obično uvodi u kapljevitom stanju, pri čemu se može raditi o pothlađenoj ili vreloj kapljevini, no u nekim slučajevima će vrela kapljevina dolaziti s povišenim tlakom tako da će pri ulasku u kolonu dijelom ispariti, što znači da će se sastojati od pare i kapljevine. U nekim će postupcima biti smisleno kominu uvoditi u kolonu kao zasićenu ili čak pregrijanu paru. Za sve navedene slučajeve će karakteristika komine poprimati različite vrijednosti, a o tome će ovisiti nagib pravca napajanja u $\psi_{\mathrm{d}}\psi_{\mathrm{f}}$-dijagramu (Slika 15).



Slika 15. Pravac napajanja za različito stanje komine u $\psi_{\mathrm{d}}\psi_{\mathrm{f}}$-dijagramu

Kako bi bilo moguće odrediti točno sjecište pravca jačanja i pravca napajanja, čime je određen i pravac iscrpljivanja, potrebno je poznavati vrijednost refluksa φ u koloni za jačanje. Pogon s najmanjim (minimalnim) refluksom φ_{min} pri zadanom proizvodu D_{g} i pri zadanom sastavu džibre ψ_{s} bit će onda kada se pravac jačanja položi kroz A_{min} na ravnotežnoj liniji iznad A (Slika 16). No tada broj plitica postaje beskonačno velik. Praktički se refluks uzima 30% -50% [1] veći od minimalnog, da bi se smanjio potreban broj plitica.



Slika 16. Minimalni refluks [1]

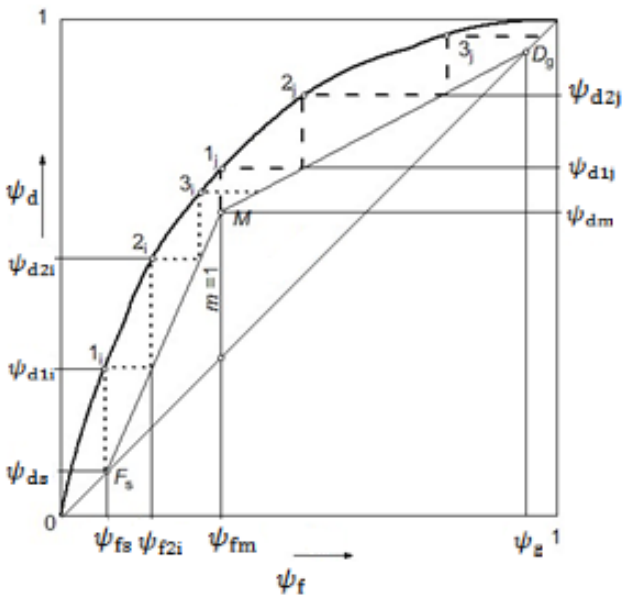
Ako je poznat pravac napajanja onda je minimalni refluks $\varphi_{\min}$ određen sjecištem pravca napajanja i linije ψ_{df} pri čemu se koordinate sjecišta uvrste u jednadžbu pravca jačanja. Tada se minimalni refluks $\varphi_{\min}$ poveća za 30% -50% i ucrta se pravac jačanja i odredi se sjecište pravca napajanja i pravca jačanja. Kroz točku sjecišta prolazi i pravac iscrpljivanja.

Određivanje teorijskog broja plitica prema McCabe-Thieleu za spojenu kolonu prikazan je na Slika 17. Najprije je potrebno u $\psi_{\mathrm{d}}\psi_{\mathrm{f}}$-dijagramu ucrtati pravce jačanja, iscrpljivanja i napajanja u skladu sa zadanim ulaznim parametrima rada kolone. Na Slika 17 ucrtan je pravac napajanja za m = 1, što odgovara napajanju vrelom kominom. Uz to je pretpostavljeno da komina ima sastav jednak sastavu oborine iz kolone za jačanje. Tada je naime točka M zajednička za sva tri pravca. Najjednostavnije je teorijski broj plitica određivati posebno za donji (iscrpljivanje) i gornji dio kolone (jačanje).

Stanje silazne oborine i uzlazne pare ispod prve plitice kolone za iscrpljivanje nalazi se na pravcu iscrpljivanja u točci F_{s}. Ovdje treba upozoriti na to da smještaj točke F_{s} na dijagonali $\psi_{\mathrm{d}}\psi_{\mathrm{f}}$-dijagrama podrazumijeva jednakost koncentracija uzlazne pare i kapljevine u kotliću kolone. To će vrijediti točnije što je sadržaj kotlića bliži čistoj tvari 1 jer u $h\,\xi$-dijagramu ravnotežne izoterme postaju sve okomitije, a to je upravo i smisao uporabe kolone za iscrpljivanje. Uzlazna para koju odaje vrela džibra u kotliću ima tada koncentraciju ψ_{ds} . Ta će para na prvoj plitici u idealnom slučaju doći u ravnotežu s kapljevinom koja silazi s te

plitice s koncentracijom ψ_{fs}. Pri tome će postići koncentraciju ψ_{D1i} (stanje 1_{i}) te će se s njom krenuti prema sljedećoj plitici. U susret će joj s te sljedeće plitice dolaziti kapljevina koncentracije ψ_{f1i} pa će na sljedećoj plitici para postići stanje 2_{i} koncentraciju ψ_{D2i}. Jednake će se promjene događati i na svim daljnjim presjecima i pliticama kolone za iscrpljivanje. Stoga svaka stepenica iscrtana na $\psi_{\mathrm{d}}\psi_{\mathrm{f}}$-dijagramu između ravnotežne krivulje ψ_{df} i pravca iscrpljivanja predstavlja po jednu pliticu idealne kolone za iscrpljivanje. Ucrtavanje takvih stepenica započinje dakle točkom F_{s}, a završava onom stepenicom koja pogađa ili premašuje točku *M*. U skladu s time bi dio kolone koji pripada iscrpljivanju prema Slika 17 imao 3 plitice. Pri tome treća plitica ovdje teorijski premašuje potrebnu koncentraciju, ali to nema bitnog značaja s obzirom na to da će realni broj plitica uvijek biti veći od teorijskog u skladu s odgovarajućim stupnjem djelovanja plitica. Ovakav bi se postupak određivanja teorijskog broja plitica proveo i kada bi se radilo o koloni za iscrpljivanje na čiji se vrh dovodi komina stanja *M*.

Analogno postupku za kolonu iscrpljivanja određuje se i teorijski broj potrebnih plitica dijela za jačanje. Počinje se stanjem *M* na pravcu jačanja koji ovdje predstavlja stanje na presjeku spojene kolone između najgornje plitice dijela za iscrpljivanje i najdonje plitice dijela za jačanje (kod obične kolone za jačanje bi to bilo stanje iznad kotlića kolone). Uz navedenu pretpostavku da oborina s najdonje plitice dijela za jačanje ima istu koncentraciju ψ_{fm} kao i komina, bit će koncentracija uzlazne pare prema prvoj plitici dijela za jačanje ψ_{dm} koja će na prvoj plitici u najboljem slučaju moći doći u ravnotežu s oborinom koncentracije $\psi_{\mathrm{fm}} = \psi_{\mathrm{f1j}}$ (stanje 1_{j}) i pri tome postići koncentraciju ψ_{D1j}. Na jednak način postizat će se ravnotežna stanja 2_{j}, 3_{j} itd. pri čemu svaka stepenica na tom dijelu dijagrama na Slika 17 predstavlja jednu pliticu kolone za jačanje. Konstrukcija se ponavlja dok koncentracija pare plitice ne dostigne ili premaši traženu koncentraciju destilata ψ_{g}. Na Slika 17 to se dogodilo na trećoj plitici koja daje ravnotežnu paru koncentracije $\psi_{\mathrm{D3j}} > \psi_{\mathrm{g}}$ te će u ovom slučaju za dio za jačanje biti dovoljno predvidjeti najmanje 3 plitice, tj. taj će teorijski broj plitica biti potrebno uvećati s obzirom na stupanj djelovanja plitice.



Slika 17. Teorijski broj plitica prema McCabe-Thieleu

Jednadžbom (2) određen je odnos između molnih i masenih udjela, a u nastavku bit će prikazani izraz za preračunavanje entalpija h izraženih u J/kg u entalpije h_n izražene u J/kmol.

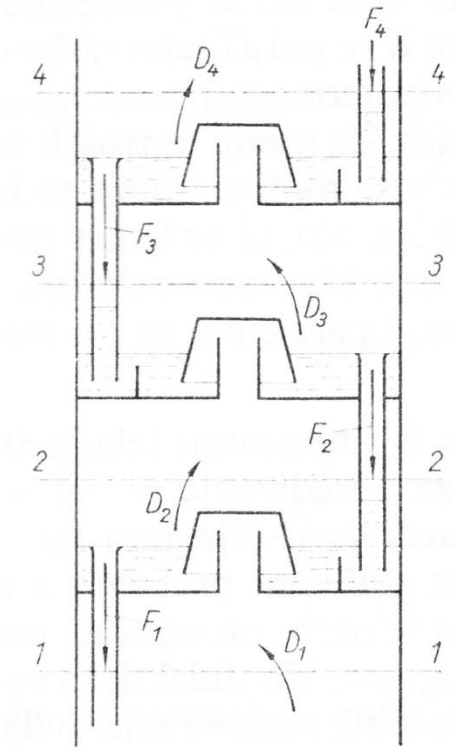
$$h_n = h\, M_\mathrm{p}, \tag{41}$$

$$M_\mathrm{p} = \psi\, M' + (1 - \psi)\, M''. \tag{42}$$

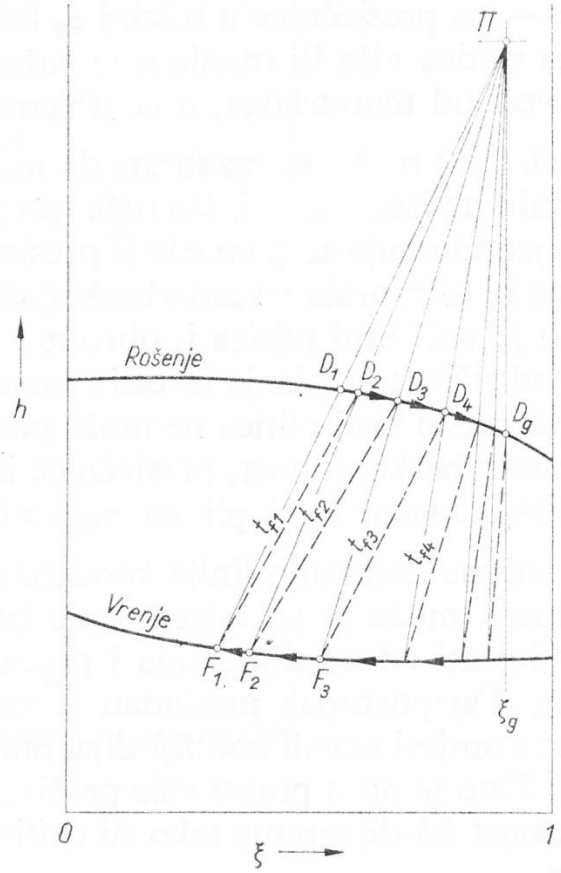
2.6. Teorijski broj plitica iz $h\xi$-dijagrama

Osim postupkom McCabe-Thielea, teorijski broj plitica može se odrediti i iz $h\xi$-dijagrama. Slika 19 prikazuje načelo određivanja teorijskog broja plitica neke kolone za jačanje za koju su zadane potrebne koncentracije džibre ξ_s i destilata ξ_g. Polazi se od pretpostavke da sa svake plitice (uključujući i kotlić) odlazi para D koja je u ravnoteži s pripadnom kapljevinom F. To znači da će para D_2, koja dolazi s donje plitice i koja prolazi presjekom 2 – 2 biti u ravnoteži s kapljevinom F_1 prve plitice koja odlazi prema presjeku 1 – 1 itd. Konstrukcija u $h\xi$-dijagramu započinje pregledom nagiba izotermi u području ξ_s- ξ_g pri čemu će produžetak one izoterme koji siječe ordinatu ξ_g na najvišem mjestu određivati minimalni pol razlučivanja Π_min. Realni pol Π se mora položiti nešto više od minimalnog. Vrela džibra iz kotlića proizvodi paru D_1 koja prolazi presjekom 1 – 1 prema prvoj plitici. Stanje refluksa prve plitice

F_1 koji se slijeva u kotlić dobiva se povlačenjem prve presječnice kroz D_1. Izoterma t_{f1} daje tada ravnotežnu paru D_2 koja odlazi prema sljedećoj (drugoj) plitici itd. Postupak se ponavlja dok posljednja izoterma ne postigne (ili ne premaši) traženu koncentraciju ξ_g. Broj povučenih presječnica dat će tako i teorijski broj potrebnih plitica kolone za jačanje. Analognim postupkom dolazi se i do teorijskog broja plitica kolone za iscrpljivanje ili spojene kolone. Taj će broj osim o obično unaprijed zadanim stanjima komine, džibre i destilata ovisiti i o izabranim položajima polova razlučivanja, tj. o njihovom odmaku od njihovih minimalnih vrijednosti.



Slika 18. Presjeci kolone uz određivanje broja plitica [1]



Slika 19. Teorijski broj plitica iz $h\xi$-dijagrama [1]

U ovom dijelu rada oznake za maseni protok džibre F_s, komine F_m, proizvoda D_g, kapljevine F i pare D i oznake za temperaturu t korištene su prema [1], a u nastavku su korištene oznake za maseni protok q_m s pripadajućim indeksima te oznaka ϑ za temperaturu s pripadajućim indeksima.

3. REKTIFIKACIJSKA KOLONA SA SITASTIM PLITICAMA

Skora svaka destilacija može se provesti i u koloni s pliticama i u koloni s punilima. Punila mogu biti najrazličitijih oblika, od metalne, drvene strugotine od nekog trećeg materijala pa do metalnih, staklenih ili plastičnih granulata. Osnovna je zadaća punila kolone da silazni tok kapljevine razlije na što veću površinu, a da za uzlaznu paru ostavi dovoljno velike presjeke za strujanje da time pospješi izmjenu topline i tvari među njima. Plitice imaju jednaku funkciju kao punila te se ugrađuju kao horizontalne prepreke strujanju kapljevite i parne faze kroz rektifikacijski aparat sa zadaćom da ostvare što bolji i dugotrajniji kontakt tih faza u svrhu izmjene topline i tvari.

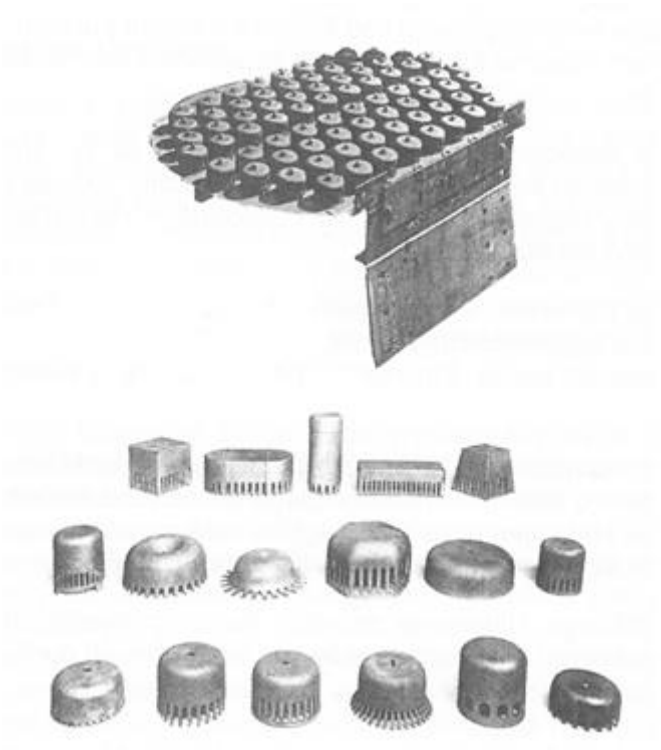
Prednosti plitica pred punilima:

- Uporabom plitica u spojenoj koloni puno lakše se ugrađuju elementi kolone nego prilikom uporabe punila.
- Pri velikim promjerima kolone punila su izložena velikim problemima nejednolike raspodjele kapljevine za razliku od plitica gdje su ti problemi puno manji.
- Procjena svojstava punila puno je nesigurnija od proračuna učinkovitosti plitice.
- Kolone s punilom su većinom teže od kolona s pliticama što uzrokuje veće troškove za izgradnju temelja, nosača, plašta.
- Prilikom diskontinuiranog rada dolazi do promjene temperature punila odnosno toplinskih dilatacija što može dovesti do mrvljenja punila dok se kod kolona s pliticama ti problemi lako rješavaju.
- Ventilske plitice i plitice sa zvonima imaju bolja svojstava pri smanjenju kapaciteta od kolona s punilom. Ako se upotrebljavaju raspodjelnici kapljevine, smanjenje kapaciteta je ograničeno minimalnim kapacitetom raspodjelnika kapljevine.
- Uklanjanje zaostalih tekućina upotrebljenih za čišćenje i ispiranje prije puštanja u rad puno je teže kod kolona s punilom nego kod kolona s pliticama.
- Plitice su puno manje osjetljive na krute čestice u kapljevini od punila.

3.1. Tipovi plitica

Postoje četiri osnovna tipa plitica i to plitice sa zvonima, sitaste plitice, plitice s ventilima i ″dual-flow″ plitice.

Plitice sa zvonima su bile glavni tip plitica do 1960. kada započinje upotreba sitastih plitica i plitica s ventilima. Plitica je perforirana ploča s kratkim cijevima ugrađenim u perforacije na koje su učvršćena zvona s prorezima na rubu ili bez njih (Slika 20). Visina kapljevine i pjene na plitici je najmanje jednaka visini pregrade kod preljeva što omogućuje plitici rad pri malim protocima pare i kapljevine.

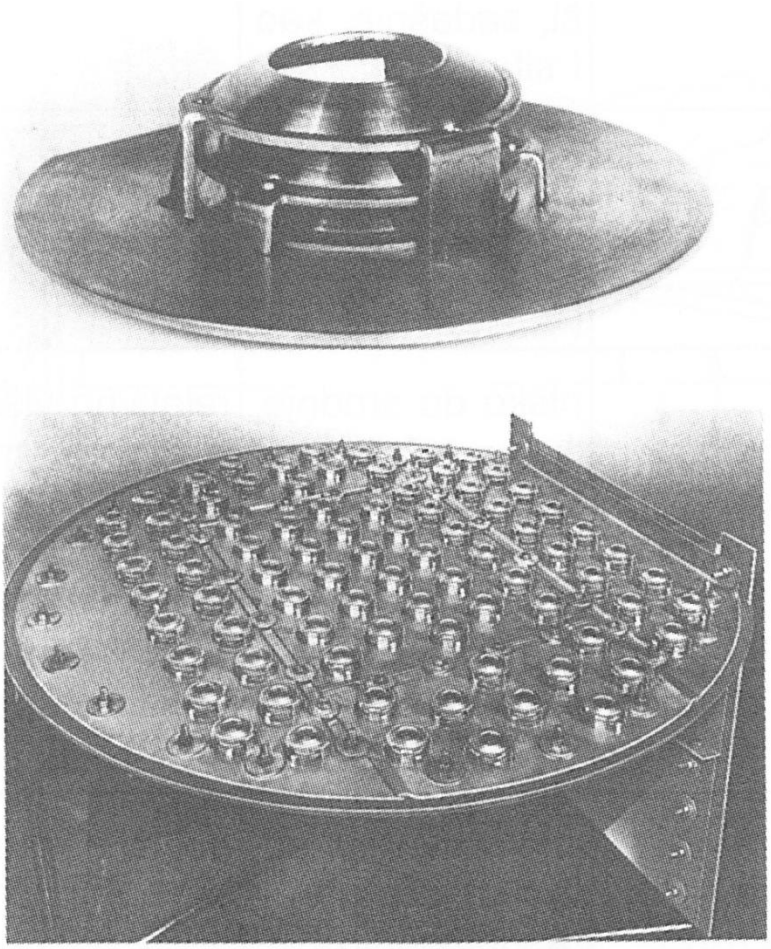


Slika 20. Plitica sa zvonima i tipovi zvona [7]

Sitaste plitice su ravne perforirane ploče. Para prolazi kroz perforacije i onemogućava otjecanje kapljevine. Pri malim brzinama pare dio kapljevine otječe kroz perforacije i time se smanjuje učinkovitost plitice što dovodi do zaključka da sitaste plitice nisi najbolje riješene za uređaje kod kojih je moguće veće smanjenje kapaciteta.

″Dual-flow″ plitice su varijanta sitastih plitice bez preljeva. Para i kapljevina zajedno protječu kroz perforacije što ima za posljedicu nisku učinkovitost, nestabilnosti u radu te su osjetljive od odstupanja od vodoravnog položaja. Prednost ovog tipa plitica je veći kapacitet te su prikladne za rekonstrukcije gdje se želi povećati kapacitet uz smanjenje učinkovitosti.

Ventilske plitice su plitice kod kojih su u otvore perforirane ploče ugrađeni ventili (mogu biti okruglog i kvadratičnog oblika) te ovisno o brzini pare oni se više ili manje podižu. Maksimalna visina podizanja ventila ograničena je visinom kaveza u kojem se nalazi ili duljinom nožice ventila. Sa smanjivanjem protoka pare pločica ventila se spušta te se otvor za protok pare smanjuje sve dok se pločica ventila ne spusti na pliticu i pokrije otvor. Na takav način se sprječava oticanje kapljevine kroz perforacije što omogućuje veliko smanjenje kapaciteta što predstavlja najveću prednost ovog tipa plitica (Slika 21).



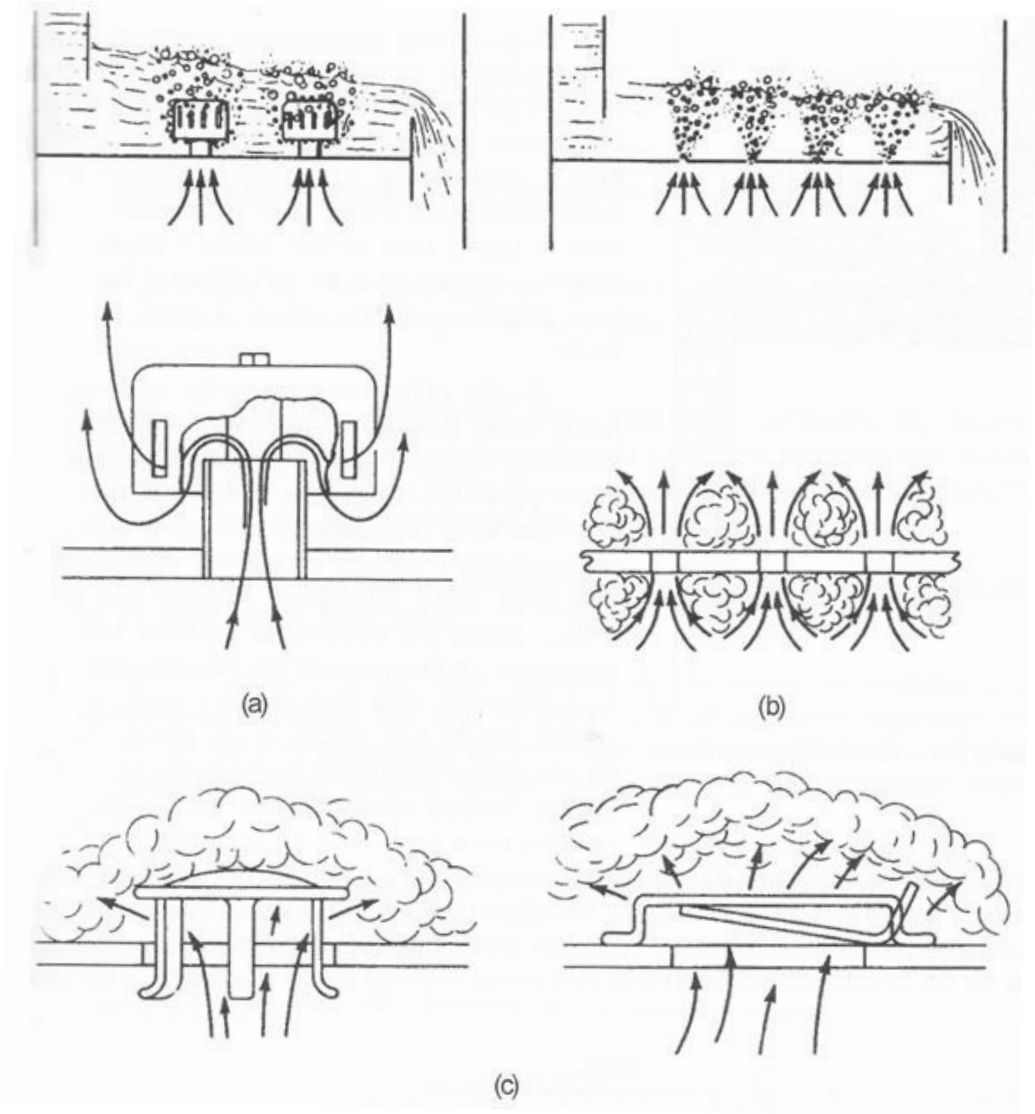
Slika 21. Plitica s ventilima i prikaz kaveznog ventila [7]

Tablica 1 prikazuje usporedbu četiri osnovna tipa plitica. Protok pare kroz različite tipove plitica prikazan je na Slika 22.

Tablica 1. Usporedba četiri osnovna tipa plitica [7]

	Sitaste	Ventilske	Sa zvonima	″Dual-flow″
kapacitet	velik	velik do veoma velik	srednje velik	veoma velik
učinkovitost	visoka	visoka	srednje velika	niža od ostalih
smanjenje kapaciteta	oko 2:1, u pravilu nisu prikladne za rad s promjenjivim kapacitetom	oko 4:1, neke specijalne izvedbe postižu i 10:1	izvanredno, bolje od ventilnih plitica, dobre kod ekstremno malih protoka kapljevine	malo, manje od sitastih, nisu prikladne za rad s promjenjivim kapacitetom
odnošenje	srednje	srednje	veliko, oko 3 puta veće od ventilnih plitica	malo do srednje
pad tlaka	srednji	srednji; ranije izvedbe: nešto više , sadašnje: kao sitaste	visok	mali do srednji
cijena	niska	oko 20% viša od sitastih	visoka, oko 2 do 3 puta viša od cijene sitastih plitica	niska
održavanje	nisko	nisko do srednje	relativno visoko	nisko
sklonost prljanju	mala	mala do srednja	visoka; tendencija sakupljanja krutih čestica	veoma niska; prikladne za rad sa suspenzijama
utjecaj korozije	mali	mali do srednji	visok	veoma mali
raspoloživost podataka za	dobro poznata	vlasništvo, ali su informacije na	dobro poznato	na raspolaganju je nešto podataka

proračun		raspolaganju		
glavna primjena	najviše za kolone gdje smanjenje kapaciteta nije kritično	sve kolone, destilacije gdje je moguće smanjenje kapaciteta važno	za ekstremno male protoke kapljevine; gdje curenje mora biti minimalno	rekonstrukcija radi povećanja kapaciteta gdje se može žrtvovati djelotvornost; kod uvjeta velikog prljanja i velike korozije



Slika 22. Protok pare kroz pliticu

(a) plitica sa zvonima, (b) sitasta plitica, (c) plitica s ventilima [7]

4. REZULTATI PRORAČUNA REKTIFIKACIJSKE SPOJENE KOLONE SA SITASTIM PLITICAMA

Zadane vrijednosti:

- kapacitet uređaja: 2000 kg/h komine,
- volumni udio etanola u komini pri 25°C: 13,5%,
- maseni udio etanola u proizvodu: >85%.

U zadatku dana je vrijednost volumnog udjela etanola u komini pri 25 °C te će u nastavku biti prikazan proračun masenog i molnog udjela komine.

Poznate vrijednosti:

- volumni udio etanola u komini pri 25°C: $\xi_V = 0{,}135\ \mathrm{m^3/m^3}$,
- gustoća smjese etanol-voda pri 25°C: $\rho = 979{,}25\ \mathrm{kg/m^3}$ [5],
- gustoća etanola pri 25°C: $\rho'' = 784{,}96\ \mathrm{kg/m^3}$ [5],
- molarna masa vode: $M' = 18{,}02\ \mathrm{kg/kmol}$ [4],
- molarna masa etanola: $M'' = 46{,}07\ \mathrm{kg/kmol}$ [4].

Maseni i molni udio etanola u komini iznose:

$$\xi = \frac{\rho''}{\rho}\xi_V = 0{,}1082\ \mathrm{kg/kg},$$

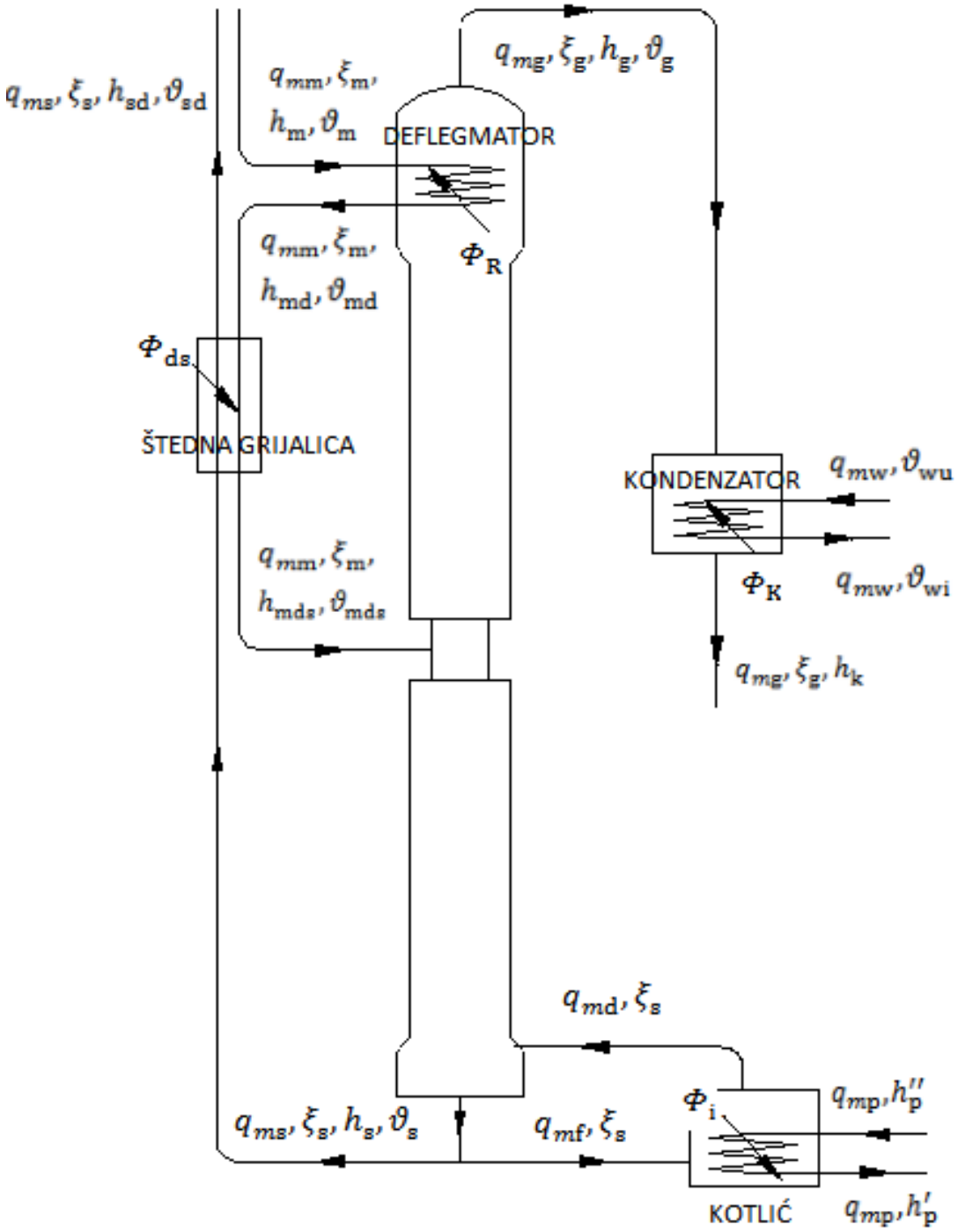
$$\psi = \frac{\xi}{\frac{M''}{M'}(1-\xi)+\xi} = 0{,}0453\ \mathrm{kmol/kmol}.$$

4.1. Rezultati energijske analize spojene kolone za idealan slučaj

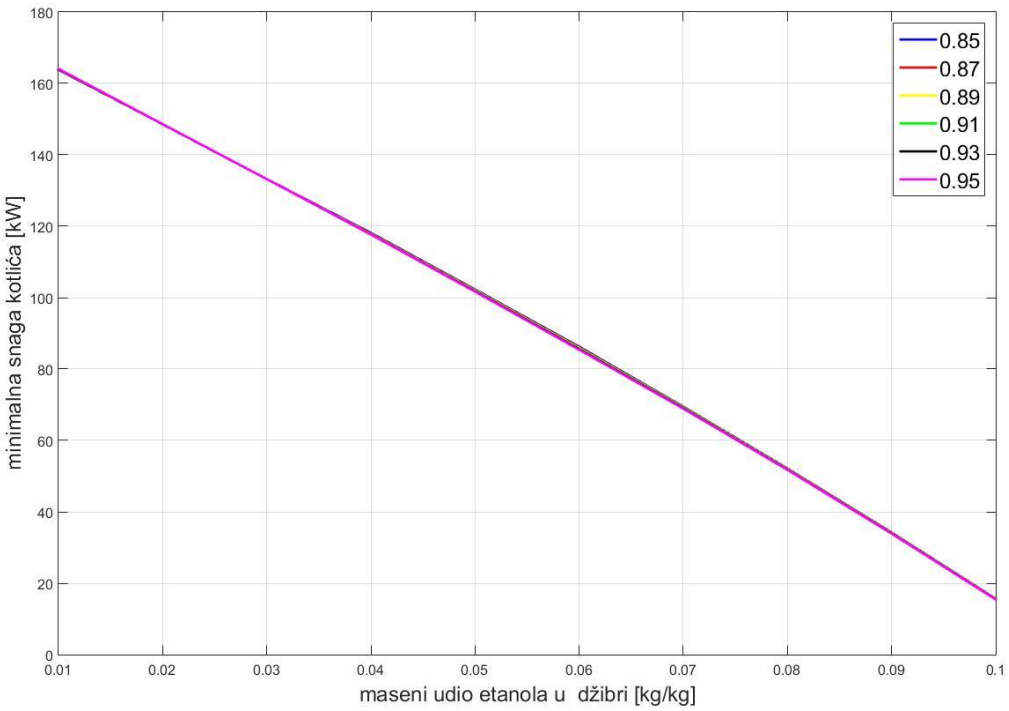
Energijska analiza spojene kolone proveden je prema gore navedenim izrazima. U proračun je uključeno hlađenje deflegmatora kominom i dogrijavanje komine džibrom (shema uređaja prema Slika 23). Proračun kolone proveden je u programu MATLAB. Prije samog proračuna generirana je baza podataka za smjesu etanol-voda iz $h\xi$-dijagrama [1] pomoću programa ICY. U programu ICY su sa skeniranog $h\xi$-dijagrama očitane vrijednosti entalpije, sastava i temperature za pojedinu točku u dijagramu.

Proveden je proračun za kominu masenog udjela etanola $\xi_\mathrm{m} = 0{,}1082\ \mathrm{kg/kg}$, temperature $\vartheta_\mathrm{m} = 25\ °\mathrm{C}$ i protoka $q_{m\mathrm{m}} = 2000\ \mathrm{kg/h}$. Maseni udio etanola u džibri ξ_s variran je od 0,01

do 0,1 kg/kg s korakom 0,01, a maseni udio etanola ξ_{g} u proizvodu variran je od 0,85 do 0,95 kg/kg s korakom 0,01. Pri proračunu je kolona promatrana kao idealno izolirana to jest pretpostavljeno je da nema izmjene topline između kolone i okoliša. Glavna presječnica određena je tako da je pronađen produžetak izoterme koja prolazi stanjem komine h_{mds}, što predstavlja stanje komine nakon hlađenja deflegmatora kominom i dogrijavanja komine džibrom u štednoj grijalici. Nakon određivanja glavne presječnice, to jest pola jačanja Π i pola iscrpljivanja Π_{i}, provjereno je da li koja izoterma siječe ordinatu sastava proizvoda ξ_{g} iznad pola jačanja Π. Kako su protoci proizvoda $q_{m\mathrm{g}}$ mali, tada je i vrijednost toplinskog toka Φ_{R}, koji je potrebno odvesti u deflegmatoru, mala. Protok komine $q_{m\mathrm{m}}$ znatno je veći od protoka proizvoda te je komina dostatna za hlađenje deflegmatora bez rashladne vode. Entalpija komine h_{md} na izlazu iz deflegmatora određena je iz jednakosti toplinskog toka deflegmatora i toplinskog toka koji preuzima komina. Nakon deflegmatora komina odlazi u štednu grijalicu (protustrujni izmjenjivač) gdje se dodatno dogrijava džibrom, a entalpija komine h_{mds} na izlazu iz štedne grijalice određena je iz bilance energije izmjenjivača. Entalpija džibre h_{sd} na izlazu iz izmjenjivača određena je za temperaturu komine na ulazu ϑ_{md} (idealan slučaj kada se izjednače temperatura komine na ulazu i temperatura džibre na izlazu izmjenjivača). Ovaj je proračun iterativan jer se promjenom entalpije komine na ulazu u kolonu h_{mds} mijenja se toplinski tok koji je potrebno odvesti u deflegmatoru.

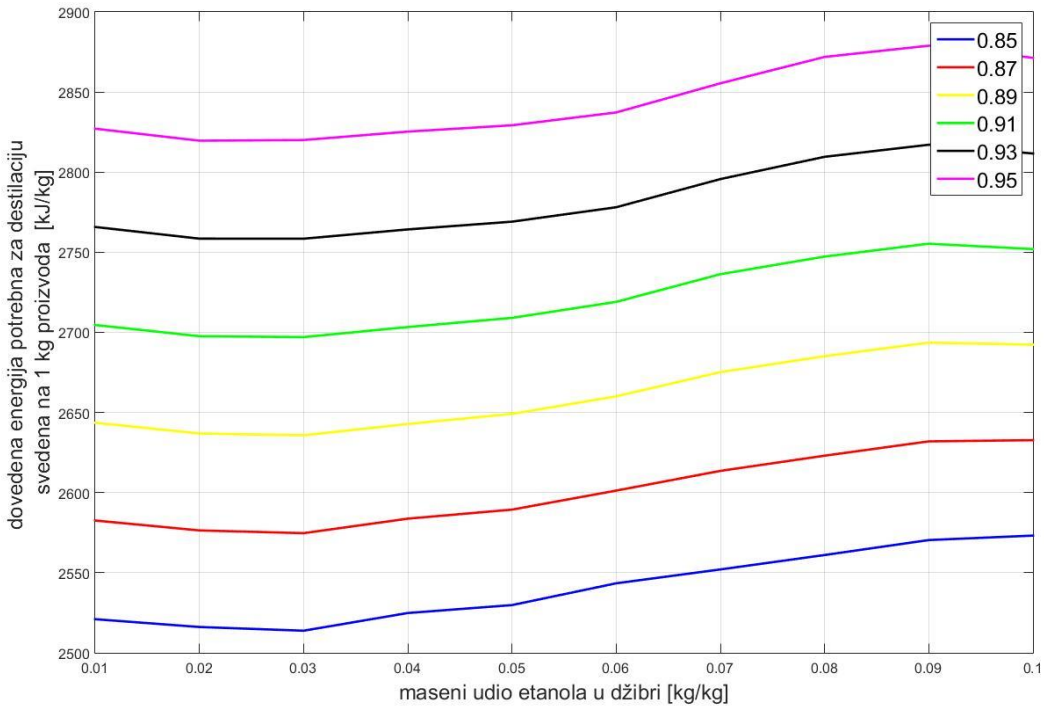


Slika 23. Shema spojene kolone



Slika 24. Ovisnost snage kotlića o masenom udjelu etanola u džibri za različite masene udjele etanola u proizvodu

Na Slika 24 dan je prikaz ovisnosti minimalne snage kotlića potrebne za destilaciju o masenom udjelu etanola u džbri za različite masene udjele etanola u proizvodu (proračun je proveden za vrijednosti od 0,85 do 0,95 kg/kg s korakom 0,01). Vidljivo je kako snaga kotlića naglo opada s povećanjem masenog udjela etanola u džibri što je i za očekivati jer se njegovim povećanjem pol iscrpljivanja pomiče desno i prema gore u $h\xi$-dijagram čime se smanjuje razlika između entalpije džibre h_{s} i entalpije pola iscrpljivanja $h_{\Pi_{\mathrm{i}}}$, što određuje snagu kotlića. Premda snaga kotlića, osim o razlici entalpija, ovisi i o masenom protoku džibre q_{ms}, koji s porastom masenog udjela etanola u džibri raste, smanjenje razlike entalpija ima veći utjecaj od povećanja protoka džibre. Osim što se pol iscrpljivanja pomiče gore i entalpije na liniji vrenja u $h\xi$-dijagramu, čime je određena entalpija džibre, s porastom masenog udjela etanola u džibri poprimaju manje vrijednosti što smanjuje utjecaj protoka. Za različite masene udjele etanola u proizvodu nema veće promjene snage kotlića jer snaga kotlića ne ovisi značajno o sastavu proizvoda. Kako je nagib glavne presječnice određen produžetkom izoterme, s promjenom sastava proizvoda ne mijenjamo nagib izoterme odnosno položaj pola iscrpljivanja čime je određena snaga kotlića.



Slika 25. Ovisnost dovedene energije potrebne za destilaciju svedene na 1 kg proizvoda o masenom udjelu etanola u džibri za različite masene udjele etanola u proizvodu

Na Slika 25 dan je prikaz ovisnost dovedene energije potrebne za destilaciju svedene na 1 kg proizvoda o masenom udjelu etanola u džibri za različite masene udjele etanola u proizvodu. Vidljivo je kako su linije za pojedini sastav etanola u proizvodu gotovo istog oblika samo pomaknute prema gore s porastom udjela. Svaka linija za pojedini sastav etanola u proizvodu ima minimum za vrijednost masenog udjela etanola u džbri od 0,03 kg/kg stoga je termodinamički proračun uređaja proveden s tom vrijednosti. Iz prikazanih grafova nije moguće odrediti optimalni maseni udio etanola u proizvodu, koji će biti određen prema kriteriju najmanjeg broja plitica što je prikazano u nastavku.

Ovisnost odvedenog toplinskog toka u deflegmatoru nije prikazana zato što se kompletan toplinski tok predaje komini te nije potrebno trošiti dodatnu rashladnu energiju u vidu rashladne vode za hlađenje deflegmatora.

U Tablica 2. dan je prikaz snage kotlića i odvedenog toplinskog toka u deflegmatoru rashladnom vodom za spojenu kolonu bez ušteda, spojenu kolonu s hlađenjem deflegmatora kominom i spojenu kolonu s hlađenjem deflegmatora kominom i dogrijavanjem komine džibrom za kominu masenog udjela etanola $\xi_{\mathrm{m}} = 0{,}1082\ \mathrm{kg/kg}$, temperature $\vartheta_{\mathrm{m}} = 25\ °\mathrm{C}$ i protoka $q_{m\mathrm{m}} = 2000\ \mathrm{kg/h}$. Maseni udio etanola u džibri $\xi_{\mathrm{s}} = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$, a maseni udio

etanola u proizvodu $\xi_g = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$. Rezultati iz Tablica 2. potvrđuju gore navedene teorijske zaključke o smanjenju snage kotlića odnosno smanjenju potrošnje energije za pogon kolone s povećanjem entalpije komine na ulazu u kolonu koje se optimalnim vođenjem procesa može ostvariti bez dodatne potrošnje energije.

Tablica 2. Usporedba potrošnje energije za različito vođenje pogona spojene kolone

	snaga kotlića Φ_i , [kW]	odveden toplinski tok u deflegmatoru rashladnom vodom	entalpija komine na ulazu u kolonu h_{mds} , [kJ/kg]	temperatura komine na ulazu u kolonu ϑ_{mds} , °C
spojena kolona	278,29	49,7	71,77	25
spojena kolona s hlađenjem deflegmatora kominom	228,6	0	166,11	45,98
spojena kolona s hlađenjem deflegmatora kominom i dogrijavanjem komine džibrom	133,21	0	362,16	90,1

Rezultati proračuna za idealan slučaj prikazani u nastavku za maseni udio etanola u džibri $\xi_s = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$ i maseni udio etanola u proizvodu $\xi_g = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$. Za idealan slučaj vrijedi da je glavna presječnica određena produženjem izoterme mokrog područja koja prolazi stanjem komine h_{mds}, a da su temperatura komine na ulazu u štednu grijalicu i temperatura džibre na izlazu iz štedne grijalice jednake, odnosno kada vrijedi $\vartheta_{md} = \vartheta_{sd}$. Kako stanje komine na ulazu u rektifikacijsku kolonu ovisi o toplinskom toku predanom komini u deflegmatoru, a toplinski tok predan u deflegmatoru ovisi o stanju komine na ulazu u kolonu, ovaj proračun je iterativnog karaktera te je u nastavku dan prikaz rezultata za

zadnji korak iteracije. Kolona je dobro toplinski izolirana te nema izmjene topline s okolišom. Oznake u nastavku su prema Slika 23.

- maseni udio etanola u komini: $\xi_\mathrm{m} = 0{,}10822\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 2000\ \mathrm{kg/h} = 0{,}5556\ \mathrm{kg/s}$,
- temperatura komine: $\vartheta_\mathrm{m} = 25\ °\mathrm{C}$,
- entalpija komine za ϑ_m iznosi: $h_\mathrm{m} = 71{,}77\ \mathrm{kJ/kg}$,
- maseni udio etanola u džibri: $\xi_\mathrm{s} = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni udio etanola u proizvodu: $\xi_\mathrm{g} = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni protok džibre:

$$q_{ms} = q_{m\mathrm{m}} \frac{\xi_\mathrm{m} - \xi_\mathrm{g}}{\xi_\mathrm{s} - \xi_\mathrm{g}} = 0{,}5032\ \mathrm{kg/s},$$

- maseni protok proizvoda:

$$q_{m\mathrm{g}} = q_{m\mathrm{m}} - q_{ms} = 0{,}0524\ \mathrm{kg/s},$$

- glavna presječnica je određena izotermom 90,09 °C ona prolazi stanjem komine $h_\mathrm{mds} = 362{,}16\ \mathrm{kJ/kg}$,
- temperatura pare proizvoda na izlazu iz kolone: $\vartheta_\mathrm{g} = 77{,}9\ °\mathrm{C}$,
- entalpija pare proizvoda na izlazu iz kolone: $h_\mathrm{g} = 1277{,}57\ \mathrm{kJ/kg}$,
- položaj pola jačanja Π nalazi se na sjecištu glavne presječnice i pravca $\xi = \xi_\mathrm{g}$ te entalpija pola iznosi: $h_\Pi = 2536{,}89\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok odveden kominom u deflegmatoru:

$$\Phi_\mathrm{R} = q_{m\mathrm{g}}\,(h_\Pi - h_\mathrm{g}) = 65{,}93\ \mathrm{kW},$$

- temperatura džibre na izlazu iz kolone: $\vartheta_\mathrm{s} = 96\ °\mathrm{C}$,
- entalpija džibre na izlazu iz kolone: $h_\mathrm{s} = 400{,}6\ \mathrm{kJ/kg}$,
- položaj pola iscrpljivanja Π_i nalazi se na sjecištu glavne presječnice i pravca $\xi = \xi_\mathrm{s}$ te entalpija pola iznosi: $h_{\Pi_\mathrm{i}} = 135{,}88\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok doveden u kotliću:

$$\Phi_\mathrm{i} = q_{ms}\,(h_\mathrm{s} - h_{\Pi_\mathrm{i}}) = 133{,}21\ \mathrm{kW},$$

- specifična toplina kondenzacije vodene pare 6 bar: $r = h''_\mathrm{p} - h'_\mathrm{p} = 2085{,}64\ \mathrm{kJ/kg}$ [4],
- maseni protok vodene pare potreban za pogon kolone:

$$q_{m\mathrm{p}} = \frac{\Phi_\mathrm{i}}{r} = 0{,}06387\ \mathrm{kg/s} = 229{,}93\ \mathrm{kg/h},$$

- entalpija komine na izlazu iz deflegmatora:

$$h_{\mathrm{md}} = \frac{\Phi_{\mathrm{R}}}{q_{m\mathrm{m}}} + h_{\mathrm{m}} = 190{,}45\ \mathrm{kJ/kg},$$

- temperatura komine na ulazu u štednu grijalicu: $\vartheta_{\mathrm{md}} = 51{,}37\ °\mathrm{C}$,
- temperatura džibre na izlazu iz štedne grijalice: $\vartheta_{\mathrm{sd}} = \vartheta_{\mathrm{md}} = 51{,}37\ °\mathrm{C}$,
- entalpija džibre za ϑ_{sd} iznosi: $h_{\mathrm{sd}} = 211{,}03\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok izmijenjen u štednoj grijalici:

$$\Phi_{\mathrm{ds}} = q_{ms}\,(h_{\mathrm{s}} - h_{\mathrm{sd}}) = 95{,}39\ \mathrm{kW},$$

- entalpija komine na izlazi iz štedne grijalice odnosno na ulazu u kolonu iznosi:

$$h_{\mathrm{mds}} = \frac{\Phi_{\mathrm{ds}}}{q_{m\mathrm{m}}} + h_{\mathrm{md}} = 362{,}16\ \mathrm{kJ/kg},$$

- temperatura komine na izlazi iz štedne grijalice odnosno na ulazu u kolonu za h_{mds} iznosi: $\vartheta_{\mathrm{mds}} = 90{,}1\ °\mathrm{C}$.

4.2. Rezultati energijske analize spojene kolone za realan slučaj

Gore prikazani rezultati su dobiveni za idealan slučaj te ta analiza je omogućila pronalaženje masenog udjela etanola u džibri ξ_{s} za koji je specifični potrošak topline minimalan. U stvarnosti takav pogon nije moguć jer je za postizanje iste temperature komine na ulazu u štednu grijalicu ϑ_{md} i temperature džibre na izlazu ϑ_{sd} potrebna beskonačno velika površina. Stoga su u nastavku prikazani rezultati proračuna gdje razlika temperatura džibre na izlazu i komine na ulazu u štednu grijalicu iznosi $\Delta\vartheta_{\mathrm{ds}} = 5\ °C$. Razlika temperatura je odabrana tako da temperatura komine na izlazu iz štedne grijalice bude par stupnjeva ispod linije vrenja. Kao glavna presječnica u gore prikazanim rezultatima korištena je izoterma mokrog područja pomoću koje su određeni minimalni polovi $(\Pi)_{\mathrm{min}}$ i $(\Pi_{\mathrm{i}})_{\mathrm{min}}$, ali u realnom pogonu pol jačanja Π treba odabrati nešto više od minimalnog. Kako pol jačanja Π, stanje komine na ulazu u kolonu h_{mds} i pol iscrpljivanja Π_{i} moraju biti na istom pravcu, tako je i pol iscrpljivanja Π_{i} nešto niže od minimalnog pola iscrpljivanja $(\Pi_{\mathrm{i}})_{\mathrm{min}}$.

Pol jačanja Π je pomaknut za 200 kJ/kg prema gore od pola jačanja određenog izotermom $(\Pi)_{\mathrm{min}}$ te je određena nova glavna presječnica koja prolazi stanjem komine na ulazu u kolonu h_{mds} i polom jačanja Π. Pol iscrpljivanja Π_{i} određen je kao sjecište glavne presječnice i pravaca $\xi = \xi_{\mathrm{s}}$. Pomicanjem pola jačanja prema gore izbjegava se mogućnost poklapanja presječnice i izoterme (beskonačan broj plitica) te se smanjuje teorijski broj plitica, ali dolazi

do porasta snage kotlića. Pomicanjem za 200 kJ/kg smanjujemo teorijski broj plitica i ne povećavamo previše snagu kotlića.

Rezultati proračuna za realan slučaj prikazani su nastavku za maseni udio etanola u džibri $\xi_\mathrm{s} = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$ i maseni udio etanola u proizvodu $\xi_\mathrm{g} = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$. Rezultati u nastavku korišteni su za daljnje proračune. Ovaj proračun je, kao i za idealni slučaj, iterativnog karaktera te je u nastavku dan prikaz rezultata za zadnji korak iteracije. Kolona je dobro toplinski izolirana te nema izmjene topline s okolišom. Oznake u nastavku su prema Slika 23.

- maseni udio etanola u komini: $\xi_\mathrm{m} = 0{,}10822\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 2000\ \mathrm{kg/h} = 0{,}5556\ \mathrm{kg/s}$,,
- temperatura komine: $\vartheta_\mathrm{m} = 25\ °\mathrm{C}$,
- entalpija komine za ϑ_m iznosi: $h_\mathrm{m} = 71{,}77\ \mathrm{kJ/kg}$,
- maseni udio etanola u džibri: $\xi_\mathrm{s} = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni udio etanola u proizvodu: $\xi_\mathrm{g} = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$,
- maseni protok džibre:

$$q_{m\mathrm{s}} = q_{m\mathrm{m}} \frac{\xi_\mathrm{m} - \xi_\mathrm{g}}{\xi_\mathrm{s} - \xi_\mathrm{g}} = 0{,}5032\ \mathrm{kg/s},$$

- maseni protok proizvoda:

$$q_{m\mathrm{g}} = q_{m\mathrm{m}} - q_{m\mathrm{s}} = 0{,}0524\ \mathrm{kg/s},$$

- temperatura pare proizvoda na izlazu iz kolone: $\vartheta_\mathrm{g} = 77{,}9\ °\mathrm{C}$,
- entalpija pare proizvoda na izlazu iz kolone: $h_\mathrm{g} = 1277{,}57\ \mathrm{kJ/kg}$,
- produžetak izoterme mokrog područja 89,79 °C prolazi stanjem komine $h_\mathrm{mds} = 344{,}51\ \mathrm{kJ/kg}$ i određuje s pravcem $\xi = \xi_\mathrm{g}$ minimalni pol jačanja $(\Pi)_\mathrm{min}$,
- položaj pola jačanja Π nalazi se na pravcu $\xi = \xi_\mathrm{g}$ i pomaknut je za 200 kJ/kg od $(\Pi)_\mathrm{min}$ prema gore te entalpija pola iznosi: $h_\Pi = 2704\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok odveden kominom u deflegmatoru:

$$\Phi_\mathrm{R} = q_{m\mathrm{g}}\,(h_\Pi - h_\mathrm{g}) = 74{,}68\ \mathrm{kW},$$

- temperatura džibre na izlazu iz kolone: $\vartheta_\mathrm{s} = 96\ °\mathrm{C}$,
- entalpija džibre na izlazu iz kolone: $h_\mathrm{s} = 400{,}6\ \mathrm{kJ/kg}$,
- položaj pola iscrpljivanja Π_i nalazi se na sjecištu glavne presječnice i pravca $\xi = \xi_\mathrm{s}$ te entalpija pola iznosi: $h_{\Pi_\mathrm{i}} = 99{,}02\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok doveden u kotliću:

$$\Phi_\mathrm{i} = q_{m\mathrm{s}}\,(h_\mathrm{s} - h_{\Pi_\mathrm{i}}) = 151{,}76\ \mathrm{kW},$$

- specifična toplina isparavanja vodene pare 6 bar:
  $r = h''_{\mathrm{p}} - h'_{\mathrm{p}} = 2085{,}64\ \mathrm{kJ/kg}$ [4],
- maseni protok vodene pare potreban za pogon kolone:

$$q_{m\mathrm{p}} = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{r} = 0{,}07276\ \mathrm{kg/s} = 261{,}95\ \mathrm{kg/h},$$

- entalpija komine na izlazu iz deflegmatora:

$$h_{\mathrm{md}} = \frac{\Phi_{\mathrm{R}}}{q_{m\mathrm{m}}} + h_{\mathrm{m}} = 206{,}2\ \mathrm{kJ/kg},$$

- temperatura komine na ulazu u štednu grijalicu: $\vartheta_{\mathrm{md}} = 55{,}27\ °\mathrm{C}$,
- temperatura džibre na izlazu iz štedne grijalice: $\vartheta_{\mathrm{sd}} = \vartheta_{\mathrm{md}} + \Delta\vartheta_{\mathrm{ds}} = 60{,}27\ °\mathrm{C}$,
- entalpija džibre za ϑ_{sd} iznosi: $h_{\mathrm{sd}} = 247{,}89\ \mathrm{kJ/kg}$,
- potrebni toplinski tok izmijenjen u štednoj grijalici:

$$\Phi_{\mathrm{ds}} = q_{ms}\,(h_{\mathrm{s}} - h_{\mathrm{sd}}) = 76{,}84\ \mathrm{kW},$$

- entalpija komine na izlazi iz štedne grijalice odnosno na ulazu u kolonu iznosi:

$$h_{\mathrm{mds}} = \frac{\Phi_{\mathrm{ds}}}{q_{m\mathrm{m}}} + h_{\mathrm{md}} = 344{,}51\ \mathrm{kJ/kg},$$

- temperatura komine na izlazi iz štedne grijalice odnosno na ulazu u kolonu za h_{mds} iznosi: $\vartheta_{\mathrm{mds}} = 86{,}05\ °\mathrm{C}$,
- entalpija kapljevine proizvoda nakon kondenzacije: $h_{\mathrm{k}} = 212{,}41\ \mathrm{kJ/kg}$,
- toplinski tok koji je potrebno odvesti u kondenzatoru rashladnom vodom:

$$\Phi_{\mathrm{K}} = q_{m\mathrm{g}}\,(h_{\mathrm{g}} - h_{\mathrm{k}}) = 55{,}81\ \mathrm{kW},$$

- ulazna temperatura rashladne vode u kondenzator: $\vartheta_{\mathrm{wu}} = 15\ °\mathrm{C}$,
- izlazna temperatura rashladne vode iz kondenzator: $\vartheta_{\mathrm{wi}} = 25\ °\mathrm{C}$,
- specifični toplinski kapacitet vode za 20 °C: $c_{\mathrm{w}} = 4{,}1851\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}$ [4],
- maseni protok rashladne vode potreban za hlađenje kondenzatora:

$$q_{m\mathrm{w}} = \frac{\Phi_{\mathrm{K}}}{c_{\mathrm{w}}\,(\vartheta_{\mathrm{wi}} - \vartheta_{\mathrm{wu}})} = 1{,}334\ \mathrm{kg/s} = 4800{,}7\ \mathrm{kg/h}.$$

4.3. Teorijski broj plitica

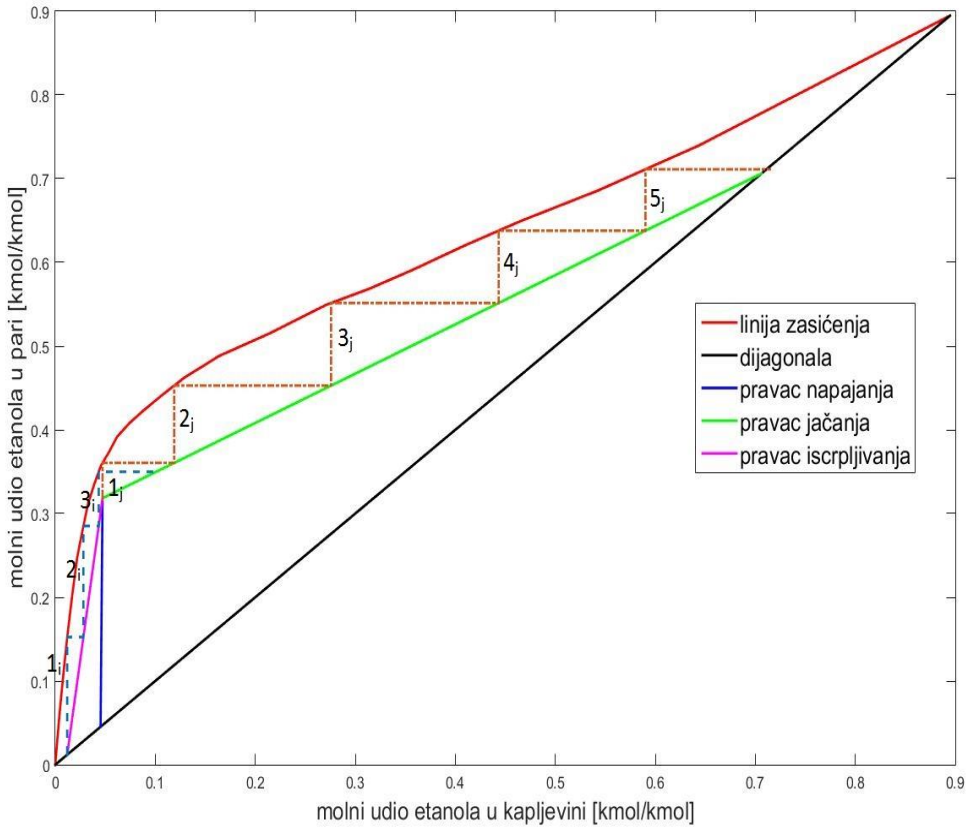
Teorijski broj plitica određen je prema gore navedenom postupku McCabea i Thielea u programu MATLAB. Korišteni podaci za proračun, konstruiranje linije zasićenja ψ_{df} i pravaca su iz stvorene baze podataka samo su svedeni na množinu. Pomoću poznate entalpije komine na ulazu u kolonu $h_{n\mathrm{mds}}$, entalpija suhozasićene pare h_{nd} i vrele kapljevine h_{nf} za

sastav komine ψ_{m} određena je karakteristika komine m. Karakteristikom komine m i sastavom komine ψ_{m} određen je pravac napajanja. Nakon određivanja pravca napajanja određeno je sjecište pravca i linije zasićenja ψ_{df} te je određen minimalni refluks φ_{min}. Minimalan refluks φ_{min} je uvećan za 30% te je određen refluks φ za koji nije potreban beskonačan broj plitica. Refluksom φ i sastavom proizvoda ψ_{g} je određen pravac jačanja. Nakon određivanja pravca jačanja određeno je sjecište tog pravca s pravcem napajanja. To sjecište je ujedno i točka kroz koju prolazi pravaca iscrpljivanja te uz sastav džibre ψ_{s} određuje pravac iscrpljivanja. Nakon određivanja pravca iscrpljivanja određen je odnos protoka pare i protoka džibre δ_{i}. Na Slika 26 ucrtani su linija zasićenja, pravac jačanja, pravac napajanja i pravac iscrpljivanja te prikazane stepenice koje određuju pojedinu pliticu (za $\psi_{\mathrm{m}} = 0{,}0454$ kmol/kmol , $\psi_{\mathrm{s}} = 0{,}012$ kmol/kmol, $\psi_{\mathrm{g}} = 0{,}7061$ kmol/kmol). Na Slika 26 vidljivo je kako za dio za jačanje je potrebno 5 plitica, a za dio za iscrpljivanje 3 plitice. U nastavku bit će prikazani parametri koji određuju pravce na Slika 26.

- molarna masa etanola: $M'' = 46{,}07$ kg/kmol [4],
- molarna masa vode: $M' = 18{,}02$ kg/kmol [4],
- molni udio etanola u komini: $\psi_{\mathrm{m}} = 0{,}0454$ kmol/kmol ($\xi_{\mathrm{m}} = 0{,}10822$ kg/kg),
- molni udio etanola u džibri: $\psi_{\mathrm{s}} = 0{,}012$ kmol/kmol ($\xi_{\mathrm{s}} = 0{,}03$ kg/kg),
- molni udio etanola u proizvodu: $\psi_{\mathrm{g}} = 0{,}7061$ kmol/kmol ($\xi_{\mathrm{g}} = 0{,}86$ kg/kg),
- prividna molarna masa za ψ_{m}: $M_{\mathrm{pm}} = 19{,}29$ kg/kmol,
- entalpija komine na ulazu u kolonu: $h_{n\mathrm{mds}}$=$h_{\mathrm{mds}}\ M_{\mathrm{pm}} = 6645{,}9$ kJ/kmol,
- entalpija vrele kapljevine za sastav komine ψ_{m}: $h_{n\mathrm{f}} = 6950{,}5$ kJ/kmol,
- entalpija zasićene pare za sastav komine ψ_{m}: $h_{n\mathrm{d}} = 48897$ kJ/kmol,
- karakteristika komine: $m = 1{,}0073$,
- minimalni refluks: $\varphi_{\mathrm{min}} = 1{,}1004$ kmol/kmol,
- refluks je povećan za 30%: $\varphi = 1{,}4305$ kmol/kmol,
- $\delta_{\mathrm{i}} = 0{,}1303$ kmol/kmol,
- prividna molarna masa za ψ_{s}: $M_{\mathrm{ps}} = 18{,}36$ kg/kmol,
- prividna molarna masa za ψ_{g}: $M_{\mathrm{pg}} = 37{,}83$ kg/kmol,
- molni protok džibre: $q_{ns} = q_{ms}\ M_{\mathrm{ps}} = 9{,}2364$ kmol/s,
- molni protok proizvoda: $q_{ng} = q_{mg}\ M_{\mathrm{pg}} = 1{,}9821$ kmol/s,
- molni protok kapljevine u dijelu za jačanje: $q_{n\mathrm{f}} = q_{ng}\ \varphi = 2{,}8354$ kmol/s,
- molni protok pare u dijelu za jačanje: $q_{n\mathrm{d}} = q_{ng}\ (\varphi + 1) = 4{,}8175$ kmol/s,

- molni protok kapljevine u dijelu za iscrpljivanje:

  $q_{n\mathrm{fi}} = q_{ns}\,(\delta_{\mathrm{i}} + 1) = 10{,}4399\ \mathrm{kmol/s}$,
- molni protok pare u dijelu za iscrpljivanje: $q_{n\mathrm{di}} = q_{ns}\,\delta_{\mathrm{i}} = 1{,}2036\ \mathrm{kmol/s}$.



Slika 26. Teorijski broj plitica prema McCabe-Thieleu za konkretan slučaj

U Tablica 3. dan je prikaz teorijskog broja plitica za različite masene udjele etanola u proizvodu. Iz energijske analize spojene kolone nije bilo moguće zaključiti koji je optimalan maseni udio etanola u proizvodu ξ_{g} te se određivanje optimalnog provelo prema kriteriju najmanjeg broja plitica. Iz Tablica 3. zaključuje se da za vrijednost masenog udjela etanola u proizvodu od 0,86 kg/kg potrebno je najmanje plitica, a za taj broj plitica vrijednost masenog udjela etanola u proizvodu od 0,86 kg/kg je maksimalna koju je moguće postići.

Tablica 3. Teorijski broj plitica za različite masene udjele etanola u proizvodu

maseni udio etanola u proizvodu, ξ_g	broj plitica u dijelu za iscrpljivanje	broj plitica u dijelu za jačanje
0,85	3	5
0,86	3	5
0,87	3	6
0,88	3	6
0,89	3	7
0,9	3	8
0,91	3	8
0,92	3	8

Dodatno je, teorijski broj plitica određen iz $h\xi$-dijagrama prema gore navedenom postupku, zbog provjere i usporedbe s postupkom McCabea i Thielea. Ucrtavanjem izotermi i presječnica u $h\xi$-dijagram za $\xi_g = 0{,}86\ \mathrm{kg/kg}$ i $\xi_s = 0{,}03\ \mathrm{kg/kg}$ određen je teorijski broj plitica. Za dio kolone za iscrpljivanje potrebno je 3 plitica, a za dio za jačanje 5 plitica. Kako je vidljivo obje metode daju isti rezultate za isti ξ_g i ξ_s .

4.4. Dimenzioniranje plitica

Proračun dimenzioniranja plitica je proveden prema [7]. Ukupna površina plitice je:

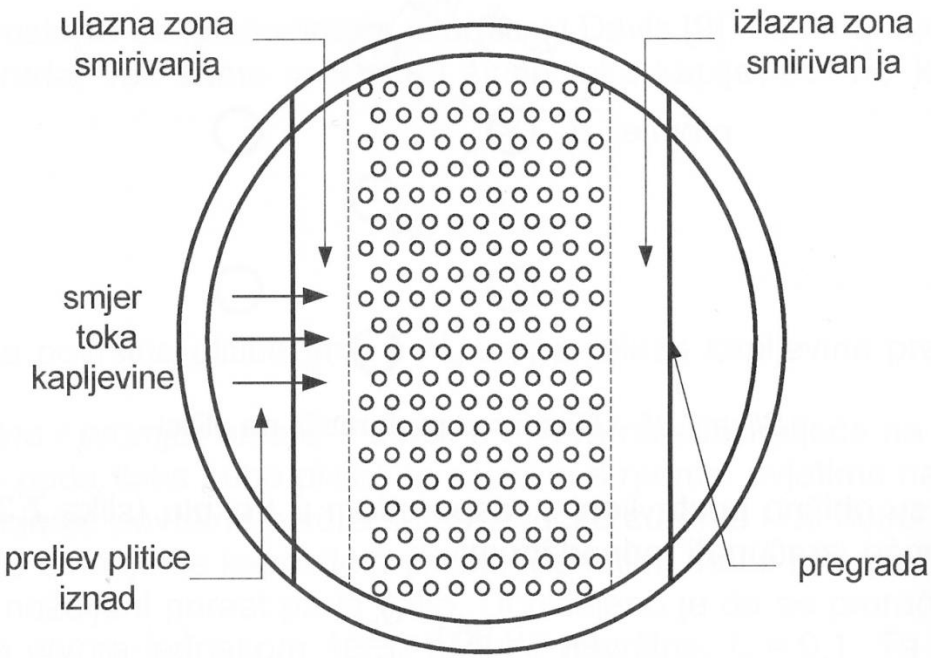
$$A_T = A_A + 2A_D. \tag{43}$$

U gornjoj jednadžbi A_T je zapravo površina unutrašnjeg poprečnog presjeka kolone, A_A je aktivna površina, a A_D je površina preljeva. Iz površine unutrašnjeg poprečnog presjeka A_T može se izračunati promjer kolone:

$$d_T = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}}. \tag{44}$$

Tipični raspored sitastih plitica prikazan je na Slika 27. Ulazna zona smirivanja potrebna je jer kapljevina koja izlazi iz preljeva ima vertikalnu komponentu brzine usmjerenu prema dolje. Ta komponenta uzrokuje poremećaje u radu te se pomoću zone smirivanja smanjuju ti poremećaji, obično širine 100 mm. Izlazna zona smirivanja omogućuje da se para najvećim

dijelom odvoji od kapljevine još na plitici, prije ulaska u preljev, obično širine 100 mm. Na Slika 27 aktivna površina obuhvaća dio plitice s otvorima i zone smirivanja.



Slika 27. Tipični raspored sitastih plitica [7]

Aktivna površina A_T računa se jednadžbom:

$$A_\mathrm{A} = \frac{q_{v\mathrm{d}} \left[\frac{\rho_\mathrm{d}}{\rho_\mathrm{f}-\rho_\mathrm{d}}\right]^{0,5}}{C_\mathrm{SB}\, F_\mathrm{pl}}. \tag{45}$$

Gdje su C_SB, m/s, Souders-Brownov koeficijent koji se računa prema jednadžbi (46), $q_{v\mathrm{d}}$ je volumni protok pare, m^3/s, F_pl je faktor plavljenja koji se kreće od 0,7-0,75 [7], ρ_d i ρ_f su gustoće pare i kapljevine, m^3/kg.

$$C_\mathrm{SB} = a_4\, F_\mathrm{LV}^4 + a_3\, F_\mathrm{LV}^3 + a_2\, F_\mathrm{LV}^2 + a_1\, F_\mathrm{LV} + a_0 \tag{46}$$

U gornjoj jednadžbi F_LV je parametar protoka i računa se pomoću jednadžbe (47), dok se koeficijenti a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 određuju iz Tablica 4.

$$F_\mathrm{LV} = \frac{q_{m\mathrm{f}}}{q_{m\mathrm{d}}} \sqrt{\frac{\rho_\mathrm{d}}{\rho_\mathrm{f}}} \tag{47}$$

Tablica 4. Koeficijenti u jednadžbi (47) [7]

razmak između plitica, T_S	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
150 mm	4,395274x10^{-2}	-2,395377x10^{-2}	-0,031022	4,51447x10^{-2}	-1,380722x10^{-2}
240 mm	5,576345x10^{-2}	-7,811489x10^{-2}	0,080724	-4,717269x10^{-2}	1,050324x10^{-2}
305 mm	7,034415x10^{-2}	-0,1234631	0,1528629	-9,849816x10^{-2}	2,293227x10^{-2}
455 mm	9,077922x10^{-2}	-0,1694514	0,2134496	-0,1366979	3,153812x10^{-2}
610 mm	0,120592	-0,2260974	0,2664767	-0,1617627	3,619984x10^{-2}
915 mm	0,155752	-0,3048682	0,3720557	-0,2328498	5,319764x10^{-2}

Površina preljeva A_D se računa jednadžbom:

$$A_D = \frac{q_{vf}}{u_{fmax}\, F_{pl}}. \tag{48}$$

q_{vf} je volumni protok kapljevine, m^3/s, u_{fmax} je maksimalna brzina kapljevine u preljevu, m/s. Maksimalna brzina kapljevine računa se prema Glitshovom postupku[7]. Glitschov postupak je izbor najmanje brzine izračunate iz tri korelacije:

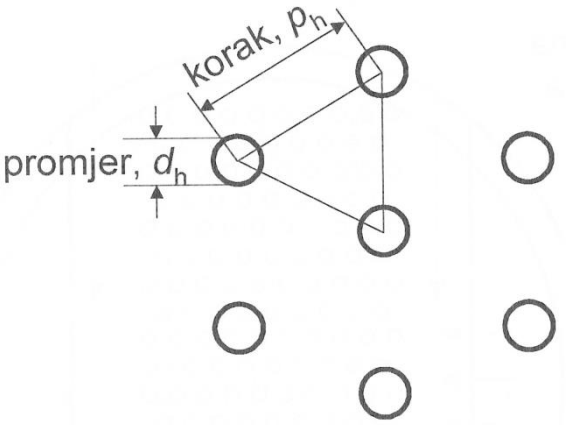
$$u_{fmax1} = 0{,}17\, SF, \tag{49}$$

$$u_{fmax2} = 0{,}007\, (\rho_f - \rho_d)^{0{,}5}\, SF, \tag{50}$$

$$u_{fmax3} = 2{,}56\text{x}10^{-4}\, [T_S\, (\rho_f - \rho_d)]^{0{,}5}\, SF. \tag{51}$$

U gornjim jednadžbama su SF faktor sustava (destilacija alkohola ima malu sklonost pjenjenju pa je faktor sustava $SF = 0{,}9$ [7]) i T_S je razmak između plitica, mm.

Promjeri otvora na plitici kreću se od 3,2-25,4 mm, a obično se kod "čistih" sustava uzimaju promjeri od 5-12,5 mm, a za "prljave" se uzimaju promjeri otvora od 12,5 mm i veći [7].



Slika 28. Raspored perforacija na plitici [7]

Otvori se obično postavljaju s rasporedom u trokutu (Slika 28). Omjer koraka rasporeda i promjera treba biti između 2,5 i 4, a 3,8 se smatra optimalnim [7]. Omjer manji od 2 može prouzročiti interakciju pare koja struji kroz susjedne otvore i smanjiti površinu kontakta pare i kapljevine ili će dovesti do nestabilnog rada plitica. Omjeri veći od 5 znače "gubitak" aktivne površine i smanjenje površine kontakta pare i kapljevine.

Omjer površina otvora i aktivne površine za rasporeda otvora u trokut:

$$f_{\mathrm{A}} = \frac{A_{\mathrm{h}}}{A_{\mathrm{A}}} = 0{,}905\left(\frac{d_{\mathrm{h}}}{p_{\mathrm{h}}}\right)^2. \tag{52}$$

Opterećenje plitice kapljevinom računa se prema

$$Q_{\mathrm{L}} = \frac{q_{v\mathrm{f}}}{L_{\mathrm{W}}}, \tag{53}$$

gdje je L_{W} duljina pregrade preljeva, m. Opterećenje plitice kapljevinom ne bi trebalo biti veće od $75\ \mathrm{m}^3/(\mathrm{hm})$.

Nakon odabira razmaka između plitica T_{s}, promjera d_{h} i koraka p_{h} otvora i provedenog proračuna površine plitice A_{T} i opterećenja plitice kapljevinom slijedi kontrola plavljenja plitice i preljeva.

Plavljenje preljeva se računa prema:

$$\%\text{plavljenja} = 100\frac{u_{\mathrm{f}}}{u_{\mathrm{fmaxp}}}. \tag{54}$$

U gornjoj jednadžbi u_{f} je brzina kapljevine u preljevu, a u_{fmaxp} je maksimalna dopuštena brzina u preljevu koja se računa prema Economopoulos postupku.

Za $(\rho_\mathrm{f} - \rho_\mathrm{d}) \geq 480\ \mathrm{kg/m^3}$:

$$u_\mathrm{fmaxp} = 1{,}887\mathrm{x}10^{-4}\ T_\mathrm{S}\ SF. \tag{55}$$

Za $(\rho_\mathrm{f} - \rho_\mathrm{d}) < 480\ \mathrm{kg/m^3}$:

$$u_\mathrm{fmaxp} = 1{,}466\mathrm{x}10^{-6}\ T_\mathrm{S}\ SF(\rho_\mathrm{f} - \rho_\mathrm{d})^{0{,}82}. \tag{56}$$

Brzina kapljevine u preljevu:

$$u_\mathrm{f} = \frac{q_{v\mathrm{f}}}{A_\mathrm{D}}. \tag{57}$$

Plavljenje plitice se računa prema:

$$\%\mathrm{plavljenja} = 100\frac{C_\mathrm{S}}{C_\mathrm{SBp}\ SF}, \tag{58}$$

u kojoj se C_S-faktor računa prema:

$$C_\mathrm{S} = \frac{q_{v\mathrm{d}}\sqrt{\frac{\rho_\mathrm{d}}{\rho_\mathrm{f}-\rho_\mathrm{d}}}}{A_\mathrm{A}}. \tag{59}$$

C_SBp-faktor se računa prema korelaciji Kistera i Haasa:

$$C_\mathrm{SBp} = 0{,}04143\left(\frac{\sigma\ \mathrm{d_h^2}}{\rho_\mathrm{f}}\right)^{0{,}125}\left(\frac{\rho_\mathrm{d}}{\rho_\mathrm{f}}\right)^{0{,}1}\left(\frac{T_\mathrm{S}}{h_\mathrm{ct}}\right)^{0{,}1}. \tag{60}$$

U gornjoj jednadžbi h_ct je visina stupca čiste kapljevine u režimu dispergirane kapljevine, σ je površinska napetost, mN/m, d_h promjer otvora, mm. U jednadžbi (62) Q_L je u $\mathrm{m^3/(h\ m)}$.

$$h_\mathrm{ct} = (h_\mathrm{ct})_{\mathrm{H_2O}}\left(\frac{996}{\rho_\mathrm{f}}\right)^{0{,}5(1-n)}, \tag{61}$$

$$(h_\mathrm{ct})_{\mathrm{H_2O}} = \frac{0{,}49774\ f_\mathrm{A}^{-0{,}791}\ d_\mathrm{h}^{0{,}833}}{1 + 0{,}001311\ Q_\mathrm{L}^{-0{,}59}\ f_\mathrm{A}^{-1{,}79}}, \tag{62}$$

$$n = 9{,}0945\mathrm{x}10^{-4}\ \frac{d_\mathrm{h}}{f_\mathrm{A}}. \tag{63}$$

Kada se provede kontrola plavljenja plitice i preljeva rezultati moraju biti oko vrijednosti faktora plavljenja, ako to nije ispunjeno onda se mijenjaju parametri razmak između plitica T_s, promjer d_h i koraka p_h bez ponovnog računanja površine plitice A_T. Ako se promjenom parametara $T_\mathrm{s}, d_\mathrm{h}$ i p_h ne može postići odgovarajuće plavljenje preljeva i plitice onda se vrši korekcija površina A_D i A_A dok se ne dobije odgovarajuće plavljenje.

Prema gore navedenom postupku proveden je proračun površine za svaku pojedinu pliticu. Parametri $T_\mathrm{s}, d_\mathrm{h}$ i p_h su odabrani za dio za iscrpljivanje i za dio za jačanje i dobivene su

površine A_A i A_D za svaku pojedinu pliticu. Proračunom su se dobile površine koje su različite za svaku pliticu, a kako su kolone većinom istog promjera cijelom dužinom odabran je jedan zajednički promjer kolone d_T. Za svaki dio kolone odabrane su površine A_A i A_D tako da u sumi daju površinu plitice koja određena odabranim promjerom kolone d_T, odabrani su parametri $T_\mathrm{s}, d_\mathrm{h}$ i p_h te je provedena kontrola plavljenja. Kontrolom plavljenja se određuje stvarni postotak plavljenja u odnosu na maksimalni. Postotak plavljenje plitice i preljeva bi trebao biti oko 75% što ukazuje da je dobro dimenzionirana plitica. Kako je odabran jedna zajednički promjer kolone to jest plitica, nije moguće postići idealno plavljenje za sve plitice već će na nekim pliticama plavljenje biti manje od idealnog što ukazuje da je plitica predimenzionirana, a na nekim pliticama veće od idealnog što ukazuje da je plitica premala. Površine A_A i A_D i parametri $T_\mathrm{s}, d_\mathrm{h}$ i p_h su iterirani dok se nije postiglo plavljenje plitice i preljeva minimalno 50% na svim pliticama. Rezultati proračuna površina, odabrane površine A_A i A_D i parametri $T_\mathrm{s}, d_\mathrm{h}$ i p_h kojima je postignuto zadovoljavajuće plavljenje prikazani su u Tablica 5. i Tablica 6. Iz rezultata je vidljivo kako su odabrane površine preljeva A_D u dijelu za iscrpljivanje znatno veće od onih u dijelu za jačanje jer je na njima protok kapljevine znatno veći. Samim time su i različite duljine pregrade L_W, ali na svim pliticama opterećenje plitice kapljevinom Q_L ne prelazi 75 $\mathrm{m^3/(h\ m)}$. Kod plitica dijela za jačanje promjer otvora znatno je veći od onog u dijelu za iscrpljivanje jer je protok pare veći. Prilikom proračuna pojedine plitice korišteni su molni sastav pare koja dolazi na pliticu i molni sastav kapljevine koji silazi s plitice. Potrebni molni sastavi dobiveni su prilikom proračuna teorijskog broja plitica prema McCabe-Thieleu, to jest očitani sa Slika 26. Gustoća kapljevine ρ_f za pojedini sastav i temperaturu ϑ, koja vrijedi za tu pliticu, očitani su iz [13]. Gustoća pare ρ_d dobivena je iz jednadžbe idealnog plina.

Tablica 5. Parametri plitica koje pripadaju dijelu za iscrpljivanje

	1_i	2_i	3_i
p, Pa	98000	98000	98000
T_S, mm	305	305	305
d_h, mm	6,35	6,35	6,35
p_h, mm	24,13	24,13	24,13
t_t, mm	3	3	3
F_{pl}	0,75	0,75	0,75
SF	0,9	0,9	0,9
ψ_f, kmol/kmol	0,011953	0,028149	0,043453
ψ_d, kmol/kmol	0,011953	0,15245	0,28519
M_{pf}, kg/kmol	18,35528	18,80958	19,23886
M_{pd}, kg/kmol	18,35528	22,29622	26,01958
ξ_f, kg/kg	0,030001	0,068945	0,104054
ξ_d, kg/kg	0,030001	0,315003	0,504954
ϑ, °C	96	92,839	90,332
ρ_f, kg/m^3	959,1784	953,9952	947,3881
ρ_d, kg/m^3	0,586103	0,718091	0,843788
q_{nf}, kmol/s	10,4399	10,4399	10,4399
q_{nd}, kmol/s	1,2036	1,2036	1,2036
q_{mf}, kg/s	0,568768	0,555031	0,542647
q_{md}, kg/s	0,065572	0,053982	0,046257
q_{vf}, m^3/s	0,000593	0,000582	0,000573
q_{vd}, m^3/s	0,111879	0,075175	0,054821
F_{LV}	0,214413	0,282087	0,350097
C_{SB}, m/s	0,007772	0,004985	0,002943
A_A(izračunata), m^2	0,474582	0,551846	0,741468
u_{fmax}, m/s	0,12458	0,124234	0,123795
A_D(izračunata), m^2	0,006346	0,006244	0,006169
A_T(izračunata), m^2	0,487275	0,564334	0,753806
d_T(izračunat), m	0,787866	0,847878	0,97993

kontrola plavljenja			
A_A(odabrana), m^2	0,17125	0,17125	0,17125
A_D(odabrana), m^2	0,025	0,025	0,025
T_S, mm	200	200	200
d_h, mm	2,5	2,5	2,5
p_h, mm	9,5	9,5	9,5
t_t, mm	3	3	3
u_{fmaxp}, m/s	0,033966	0,033966	0,033966
u_f, m/s	0,023719	0,023272	0,022911
%plavljenja preljev	69,83151	68,51515	67,45354
σ, mN/m	64,66578	55,13229	47,14244
L_W, m	0,126123	0,126123	0,126123
Q_L, m^3/(h m)	16,92564	16,60658	16,34927
f_A	0,062673	0,062673	0,062673
n	0,036278	0,036278	0,036278
$(h_{ct})_{H_2O}$, mm	9,225499	9,221963	9,219033
h_{ct}, mm	9,394487	9,415437	9,44402
C_{SBp}, m/s	0,024089	0,024122	0,02407
C_S, m/s	0,018916	0,014108	0,011192
%plavljenja plitica	87,24864	64,98282	51,664
A_T, m^2	0,19625	0,19625	0,19625
d_T, m	0,5	0,5	0,5

Tablica 6. Parametri plitica koje pripadaju dijelu za jačanje

	1_j	2_j	3_j	4_j	5_j
p, Pa	98000	98000	98000	98000	98000
T_S, mm	305	305	305	305	305
d_h, mm	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
p_h, mm	24,13	24,13	24,13	24,13	24,13
t_t, mm	3	3	3	3	3
F_{pl}	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SF	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

ψ_{f}, kmol/kmol	0,047275	0,11895	0,27581	0,44339	0,59017
ψ_{d}, kmol/kmol	0,31835	0,36053	0,45286	0,55149	0,63788
M_{pf}, kg/kmol	19,34606	21,35655	25,75647	30,45709	34,57427
M_{pd}, kg/kmol	26,94972	28,13287	30,72272	33,48929	35,91253
ξ_{f}, kg/kg	0,112579	0,256597	0,493335	0,670681	0,786398
ξ_{d}, kg/kg	0,544213	0,590399	0,679082	0,758665	0,818297
ϑ, °C	89,392	87,385	83,554	82,684	80,931
ρ_{f}, kg/m^3	942,8331	893,1825	857,779	816,1118	791,7894
ρ_{d}, kg/m^3	0,876218	0,919777	1,015238	1,109365	1,195527
$q_{n\mathrm{f}}$, kmol/s	2,8354	2,8354	2,8354	2,8354	2,8354
$q_{n\mathrm{d}}$, kmol/s	4,8175	4,8175	4,8175	4,8175	4,8175
$q_{m\mathrm{f}}$, kg/s	0,146562	0,132765	0,110085	0,093095	0,082009
$q_{m\mathrm{d}}$, kg/s	0,178759	0,171241	0,156806	0,143852	0,134145
$q_{v\mathrm{f}}$, m^3/s	0,000155	0,000149	0,000128	0,000114	0,000104
$q_{v\mathrm{d}}$, m^3/s	0,204012	0,186177	0,154452	0,12967	0,112206
F_{LV}	0,024994	0,02488	0,024153	0,02386	0,023755
C_{SB}, m/s	0,020564	0,020574	0,020641	0,020667	0,020677
A_{A}(izračunata), m^2	0,403439	0,387375	0,343448	0,308639	0,281365
$\mathrm{u}_{\mathrm{fmax}}$, m/s	0,123495	0,120193	0,117778	0,114871	0,113138
A_{D}(izračunata), m^2	0,001678	0,001649	0,001453	0,001324	0,001221
A_{T}(izračunata), m^2	0,406796	0,390673	0,346354	0,311287	0,283806
d_{T}(izračunat), m	0,719869	0,705459	0,66424	0,629717	0,601279
kontrola plavljenja					
A_{A}(odabrana), m^2	0,19225	0,19225	0,19225	0,19225	0,19225
A_{D}(odabrana), m^2	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
T_{S}, mm	300	300	300	300	300
d_{h}, mm	20	20	20	20	20
p_{h}, mm	50	50	50	50	50
t_{t}, mm	3	3	3	3	3
$\mathrm{u}_{\mathrm{fmaxp}}$, m/s	0,050949	0,050949	0,050949	0,050949	0,050949
u_{f}, m/s	0,038862	0,037161	0,032084	0,028518	0,025894
%plavljenja preljev	76,27658	72,93692	62,97337	55,97326	50,8225

σ, mN/m	46,32745	35,14581	28,10663	25,43131	23,99411
L, m	0,067295	0,067295	0,067295	0,067295	0,067295
Q_{L}, $\mathrm{m^3/(h\ m)}$	8,31583	7,951733	6,865486	6,10232	5,540773
f_{A}	0,1448	0,1448	0,1448	0,1448	0,1448
n	0,125615	0,125615	0,125615	0,125615	0,125615
$(h_{\mathrm{ct}})_{\mathrm{H_2O}}$, mm	27,5066	27,49791	27,46779	27,44172	27,41901
h_{ct}, mm	28,17428	28,83947	29,32179	29,93869	30,31223
C_{SBp}, m/s	0,037892	0,037147	0,036755	0,036957	0,037171
C_{S}, m/s	0,033053	0,031753	0,028243	0,025413	0,023178
%plavljenja plitica	96,92283	94,97643	85,38	76,40562	69,28466
A_{T}, $\mathrm{m^2}$	0,19625	0,19625	0,19625	0,19625	0,19625
d_{T}, m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

4.5. Realan broj plitica

Teorijski broj plitica je svakako manji od realno potrebnog broja jer je dobiven pod pretpostavkom da sa svake plitice odlazi para koja je u ravnoteži s kapljevinom te plitice. To međutim nije moguće postići u stvarnosti jer za to neće biti dovoljno vremena niti razdjelne površine među fazama. Stoga će teorijski broj plitica biti potrebno uvećati koristeći tzv. stupanj djelotvornosti. Stupanj djelotvornosti se računa prema [7]:

$$E_{\mathrm{OC}} = \frac{N_{\mathrm{t}}}{N_{\mathrm{a}}} = 0{,}492\ (\eta_{\mathrm{f}}\,\alpha)^{-0{,}245}. \tag{64}$$

U gornjoj jednadžbi N_{t} je teorijski broj plitica, N_{a} realan broj plitica, η_{f} viskoznost kapljevine, (mkg)/(m s), α relativna hlapivost između alkohola i vode koja se računa prema jednadžbi (65).

$$\alpha = \frac{\frac{\psi_{\mathrm{d}}}{\psi_{\mathrm{f}}}}{\frac{1-\psi_{\mathrm{d}}}{1-\psi_{\mathrm{f}}}} \tag{65}$$

Stupanj djelotvornosti se računa pomoću svojstava smjese koja su različita za pojedinu pliticu stoga će biti izračunati stupnjevi djelotvornosti za svojstava na svakoj pojedinoj plitici (za sastav pare i kapljevine koji su u ravnoteži na toj plitici). Prema preporuci iz [7] najbolje je stupanj djelotvornosti uzeti posebno za dio kolone za iscrpljivanje i posebno za dio kolone za jačanje. U Tablica 7. i Tablica 8. dan je prikaz stupnja djelotvornosti i parametara koji su potrebni za njegovo računanje. Vidljivo je kako se u dijelu kolone za iscrpljivanje stupanj

djelotvornosti kreće oko 0,35. Za vrijednost stupnja djelotvornosti od 0,35 i teorijski broj plitica 3 realan broj plitica je 8,57 odnosno 9 plitica za dio kolone za iscrpljivanje. U dijelu za jačanje stupanj djelotvornosti ima različite vrijednosti te se kao relevantni uzima prosječni čija vrijednost iznosi 0,44. Za vrijednost stupnja djelotvornosti od 0,44 i teorijski broj plitica 5 realan broj plitica je 11,36 odnosno 12 plitica za dio kolone za jačanje. Ukupan broj plitica iznosi 21, a visina kolone bez deflegmatora 5,4 m, promjer kolone s izolacijom 800 mm. Viskoznost kapljevine η_f određena je za temperaturu ϑ i sastav ξ_f iz [13].

Tablica 7. Stupanj djelotvornosti za dio kolone za iscrpljivanje

	1_i	2_i	3_i
ψ_f, kmol/kmol	0,011953	0,028149	0,043453
ψ_d, kmol/kmol	0,15245	0,28519	0,34992
ϑ, °C	96	92,839	90,332
ξ_f, kg/kg	0,030001	0,068945	0,104054
η_f, mkg/(m s)	0,22844	0,270954	0,310893
α	14,86835	13,77464	11,84919
E_OC	0,364638	0,356312	0,357455

Tablica 8. Stupanj djelotvornosti za dio kolone za jačanje

	1_j	2_j	3_j	4_j	5_j
ψ_f, kmol/kmol	0,047275	0,11895	0,27581	0,44339	0,59017
ψ_d, kmol/kmol	0,36053	0,45286	0,55149	0,63788	0,71115
ϑ, °C	89,392	87,385	83,554	82,684	80,931
ξ_f, kg/kg	0,112579	0,256597	0,493335	0,670681	0,786398
η_f, mkg/(m s)	0,324344	0,372116	0,469527	0,478065	0,486051
α	11,36206	6,130581	3,228554	2,21132	1,709682
E_OC	0,357422	0,401986	0,444325	0,485346	0,51483

5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN ELEMENATA UREĐAJA

5.1. Kondenzator

Kondenzator je izveden kao shell and tube izmjenjivač topline. U cijevima izmjenjivača struji rashladna voda, a u plaštu izmjenjivača kondenzira para destilata. Model prijelaza topline s vanjske strane cijevi to jest pri kondenzaciji je filmska kondenzacija na horizontalnim glatkim cijevima uz pretpostavku da je sila teža mjerodavna za oticanje kondenzata koji struji laminarno. Model prijelaza topline unutar cijevi je prijelaz topline pri izobraženom turbulentnom strujanju. Oba modela su preuzeta iz [8].

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za jednu cijev se računa prema:

$$\alpha_{\mathrm{v1}} = 0{,}725 \left(\frac{g\, \rho_{\mathrm{f}}^2\, \lambda_{\mathrm{f}}^3\, \Delta h}{\eta_{\mathrm{f}}\, d_{\mathrm{v}}\, (\vartheta' - \vartheta_{\mathrm{S}})} \right)^{1/4}. \tag{66}$$

U gornjoj jednadžbi pojavljuju se fizikalna svojstva nastalog kondenzata koja se uzimaju za srednju temperaturu $\vartheta_{\mathrm{m}} = (\vartheta' + \vartheta_{\mathrm{S}})/2$. ϑ' je temperatura pare u kondenzatoru, odnosno u ovom slučaju vrijedi $\vartheta' = \vartheta_{\mathrm{g}}$, a Δh je specifična toplina koju oslobađa 1 kg pare pri kondenzaciji.

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za snop cijevi glasi:

$$\alpha_{\mathrm{v}} = f_{\mathrm{N}}\, \alpha_{\mathrm{v1}}, \tag{67}$$

$$f_{\mathrm{N}} = N_{\mathrm{uk}}^{-1/12}. \tag{68}$$

N_{uk} je ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača.

Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{u}} = \frac{Nu_{\mathrm{u}}\, \lambda_{\mathrm{w}}}{d_{\mathrm{u}}}, \tag{69}$$

$$Nu_{\mathrm{u}} = 0{,}023\, Re_{\mathrm{u}}^{0{,}8}\, Pr_{\mathrm{w}}^{0{,}4}, \tag{70}$$

$$Re_{\mathrm{u}} = \frac{\rho_{\mathrm{w}}\, d_{\mathrm{u}}\, v_{\mathrm{w}}}{\eta_{\mathrm{w}}}, \tag{71}$$

$$v_{\mathrm{w}} = \frac{q_{m\mathrm{w}}\, 4\, n_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{w}}\, d_{\mathrm{u}}^2\, \pi\, N_{\mathrm{uk}}}, \tag{72}$$

Gornji izraz za koeficijent prolaza topline vrijedi ako je $Re_{\mathrm{u}} > 10000$ u kojoj je n_{p} je broj prolaza izmjenjivača.

Koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi računa se prema:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\,\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}}. \tag{73}$$

Površina izmjene topline u kondenzatoru:

$$A_0 = \frac{\Phi_\mathrm{K}}{k\, \Delta\vartheta_\mathrm{m}}, \tag{74}$$

$$A_0 = d_\mathrm{v}\, \pi\, L\, N_\mathrm{uk}, \tag{75}$$

$$\Delta\vartheta_\mathrm{m} = \frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\ln \frac{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{wi}}{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{wu}}}. \tag{76}$$

Kako je za proračun koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj cijevi potrebno poznavati temperaturu stijenke ϑ_S, a ona ovisi o izmijenjenom toplinskom toku i površini izmjenjivača, ovaj je proračun iterativnog karaktera. Temperatura stijenke se kontrolira prema sljedećem izrazima:

$$\vartheta_\mathrm{S} = \frac{\vartheta_\mathrm{wi} - \vartheta_\mathrm{wu}\, e^{\frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}{1 - e^{\frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}, \tag{77}$$

$$\Delta\vartheta_\mathrm{ms} = \frac{\Phi_\mathrm{K}}{A_0\, k_\mathrm{S}}, \tag{78}$$

$$k_\mathrm{S} = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}}}. \tag{79}$$

Rezultati termodinamičkog proračuna kondenzatora prikazani su u nastavku za posljednji korak iteracije.

- toplinski tok koji je potrebno odvesti u kondenzatoru rashladnom vodom:

$$\Phi_\mathrm{K} = 55{,}81\ \mathrm{kW},$$

- ulazna temperatura rashladne vode u kondenzator: $\vartheta_\mathrm{wu} = 15\ °\mathrm{C}$,
- izlazna temperatura rashladne vode iz kondenzator: $\vartheta_\mathrm{wi} = 25\ °\mathrm{C}$,
- specifični toplinski kapacitet vode za 20 °C: $c_\mathrm{w} = 4{,}1851\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}$ [4],
- maseni protok rashladne vode potreban za hlađenje kondenzatora:

$$q_{m\mathrm{w}} = \frac{\Phi_\mathrm{K}}{c_\mathrm{w}\,(\vartheta_\mathrm{wi} - \vartheta_\mathrm{wu})} = 1{,}334\ \mathrm{kg/s} = 4800{,}7\ \mathrm{kg/h},$$

- cijevi izmjenjivača DN20: $d_\mathrm{v} = 0{,}025$ m, $d_\mathrm{u} = 0{,}021$ m [10],
- toplinska provodnost materijala stijenke cijevi (čelik): $\lambda_\mathrm{S} = 45{,}4\ \mathrm{W/(m\ K)}$ [4],
- broj prolaza $n_\mathrm{p} = 3$, broj cijevi po prolazu 5,

- ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača: $N_{\mathrm{uk}} = 15$,
- gustoća vode pri 20 °C: $\rho_{\mathrm{w}} = 998{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$ [4] ,
- toplinska provodnost vode pri 20 °C: $\lambda_{\mathrm{w}} = 0{,}5984\ \ \mathrm{W/(m\ K)}$ [4] ,
- dinamička žilavost vode pri 20 °C: $\eta_{\mathrm{w}} = 0{,}001002\ \mathrm{kg/(m\ s)}$ [4],
- brzina strujanja vode u cijevi:

$$v_{\mathrm{w}} = \frac{q_{m\mathrm{w}}\ 4\ n_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{w}}\ d_{\mathrm{u}}^2\ \pi\ N_{\mathrm{uk}}} = 0{,}7719\ \mathrm{m/s},$$

- Prandtlova značajka za vodu pri 20 °C: $Pr_{\mathrm{w}} = 7{,}005$ [4],
- Reynoldsova značajka s unutarnje strane stijenke:

$$Re_{\mathrm{u}} = \frac{\rho_{\mathrm{w}}\ d_{\mathrm{u}}\ v_{\mathrm{w}}}{\eta_{\mathrm{w}}} = 16153,$$

- Nuseltova značajka s unutarnje strane stijenke:

$$Nu_{\mathrm{u}} = 0{,}023\ Re_{\mathrm{u}}^{0{,}8}\ Pr_{\mathrm{w}}^{0{,}4} = 116{,}55,$$

- koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{u}} = \frac{Nu_{\mathrm{u}}\ \lambda_{\mathrm{w}}}{d_{\mathrm{u}}} = 3321{,}18\ \ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- pretpostavljena temperatura stijenke: $\vartheta_{\mathrm{S}} = 44{,}13°C$,
- temperature pare u kondenzatoru: $\vartheta' = 77{,}9\ °C$,
- srednja temperatura: $\vartheta_{\mathrm{m}} = (\vartheta' + \vartheta_{\mathrm{S}})/2 = 61{,}02°C$,
- toplinska provodnost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_{m} i $\xi = 0{,}86$:
  $\lambda_{\mathrm{f}} = 0{,}1903\ \ \mathrm{W/(m\ K)}$ [13],
- dinamička žilavost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_{m} i $\xi = 0{,}86$:
  $\eta_{\mathrm{f}} = 0{,}000713\ \mathrm{kg/(m\ s)}$ [13],
- gustoća kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_{m} i $\xi = 0{,}86$: $\rho_{\mathrm{f}} = 790{,}98\ \mathrm{kg/m^3}$ [13],
- specifična toplina koju oslobađa 1 kg pare pri kondenzaciji:
  $\Delta h = (h_{\mathrm{g}} - h_{\mathrm{k}}) = \ 1065{,}16\ \mathrm{kJ/kg}$,
- ubrzanje Zemljine sile teže: $g = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za jednu cijev:

$$\alpha_{\mathrm{v1}} = 0{,}725\left(\frac{g\ \rho_{\mathrm{f}}^2\ \lambda_{\mathrm{f}}^3\ \Delta h}{\eta_{\mathrm{f}}\ d_{\mathrm{v}}\ (\vartheta' - \vartheta_{\mathrm{S}})}\right)^{1/4} = 2132{,}5\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- korekcijski faktor: $f_{\mathrm{N}} = N_{\mathrm{uk}}^{-1/12} = 0{,}798$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za snop cijevi:
  $\alpha_{\mathrm{v}} = f_{\mathrm{N}}\ \alpha_{\mathrm{v1}} = 1701{,}7\ \mathrm{W/(m^2K)}$,

- koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}} = 1005{,}93\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{m} = \frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\ln \frac{\vartheta\prime - \vartheta_\mathrm{wi}}{\vartheta\prime - \vartheta_\mathrm{wu}}} = 57{,}76°\mathrm{C},$$

- površina kondenzatora:

$$A_0 = \frac{\Phi_\mathrm{K}}{k \Delta\vartheta_\mathrm{m}} = 0{,}96\mathrm{m}^2,$$

- dužina cijevi kondenzatora:

$$L = \frac{A_0}{d_\mathrm{v}\, \pi\, N_\mathrm{uk}} = 0{,}816\ \mathrm{m},$$

- koeficijent prolaza topline do vanjskog ruba stijenke:

$$k_\mathrm{S} = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}}} = 2460{,}3\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura za srednju temperaturu stijenke:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{ms} = \frac{\Phi_\mathrm{K}}{A_0\, k_\mathrm{S}} = 23{,}79\ °\mathrm{C}$$

- kontrola pretpostavljene temperature stijenke:

$$\vartheta_\mathrm{S} = \frac{\vartheta_\mathrm{wi} - \vartheta_\mathrm{wu} e^{\frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}{1 - e^{\frac{\vartheta_\mathrm{wu} - \vartheta_\mathrm{wi}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}} = 44{,}135°\mathrm{C}.$$

Dimenzioniranje priključka za rashladnu vodu:

- brzina strujanja vode: $v_\mathrm{w} = 1\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok vode: $q_{m\mathrm{w}} = 1{,}334\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća vode: $\rho_\mathrm{w} = 998{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{w}}}{\rho_\mathrm{w}\, v_\mathrm{w}\, \pi}} = 0{,}0413\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN40.

Dimenzioniranje priključka za dovod pare proizvoda:

- brzina strujanja pare: $v_\mathrm{d} = 10\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok pare: $q_{m\mathrm{g}} = 0{,}0524\ \mathrm{kg/s}$,

- gustoća pare proizvoda: $\rho_\mathrm{d} = 1{,}2639\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\,q_{mg}}{\rho_\mathrm{d}\,v_\mathrm{d}\,\pi}} = 0{,}0726\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN65.

Dimenzioniranje priključka za odvod kondenzata proizvoda:

- brzina strujanja kondenzata: $v_\mathrm{k} = 1\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok kondenzata: $q_{mg} = 0{,}0524\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća kondenzata: $\rho_\mathrm{k} = 774{,}1\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\,q_{mg}}{\rho_\mathrm{k}\,v_\mathrm{k}\,\pi}} = 0{,}00929\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN15.

Dimenzije kondenzatora:

- cijevi DN 20,
- dužina cijevi kondenzatora 820 mm,
- broj cijevi 15,
- broj prolaza 3,
- plašt kondenzatora cijev DN150.

5.2. Deflegmator

Deflegmator je izveden kao cijevna zavojnica. U cijevi zavojnice struji komina, a oko zavojnice kondenzira para smjese etanol-voda u gornjem dijelu kolone. Model prijelaza topline s vanjske strane cijevi to jest pri kondenzaciji je filmska kondenzacija na horizontalnoj glatkoj cijevi. Model prijelaza topline unutar cijevi je prijelaz topline pri turbulentnom strujanju u cijevnim zavojnicama. Oba modela su preuzeta iz [8].

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi računa prema:

$$\alpha_\mathrm{v} = 0{,}725\left(\frac{g\,\rho_\mathrm{f}^2\,\lambda_\mathrm{f}^3\,\Delta h}{\eta_\mathrm{f}\,d_\mathrm{v}\,(\vartheta' - \vartheta_\mathrm{S})}\right)^{1/4}. \qquad \textbf{(80)}$$

U gornjoj jednadžbi pojavljuju se fizikalna svojstva nastalog kondenzata koja se uzimaju za srednju temperaturu $\vartheta_\mathrm{m} = (\vartheta' + \vartheta_\mathrm{S})/2$. ϑ' je temperatura pare u kondenzatoru, odnosno u

ovom slučaju vrijedi $\vartheta' = \vartheta_\mathrm{g}$, a Δh je specifična toplina koju oslobađa 1 kg pare pri kondenzaciji.

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi računa se prema:

$$\alpha_\mathrm{u} = 0{,}023 \frac{\lambda_\mathrm{m}}{d_\mathrm{u}} \left[1 + 14{,}8 \left(1 + \frac{d_\mathrm{u}}{D}\right) \left(\frac{d_\mathrm{u}}{D}\right)^{1/3}\right] Pr_\mathrm{m}^{1/3} Re_\mathrm{u}^{\,0{,}8-0{,}22(d_\mathrm{u}/D)^{0{,}1}}, \tag{81}$$

$$Re_\mathrm{u} = \frac{\rho_\mathrm{m}\, d_\mathrm{u}\, v_\mathrm{m}}{\eta_\mathrm{m}}, \tag{82}$$

$$v_\mathrm{m} = \frac{4\, q_{m\mathrm{m}}}{\rho_\mathrm{m}\, d_u^2\, \pi}. \tag{83}$$

Gornji izraz vrijedi u području $Re_\mathrm{kr} < Re_\mathrm{u} < 20000$.

$$\mathrm{Re}_\mathrm{kr} = 2300\, [1 + 8{,}6\, (d_\mathrm{u}/D)^{0{,}45}] \tag{84}$$

U gornjoj jednadžbi D je promjer cijevne zavojnice.

Koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi računa se prema:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}}. \tag{85}$$

Površina za izmjenu topline u deflegmatoru:

$$A_0 = \frac{\Phi_\mathrm{R}}{k\, \Delta\vartheta_\mathrm{m}}, \tag{86}$$

$$A_0 = d_\mathrm{v}\, \pi\, L, \tag{87}$$

$$\Delta\vartheta_\mathrm{m} = \frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\ln \frac{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{md}}{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{m}}}. \tag{88}$$

Kako je za proračun koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj cijevi potrebno poznavati temperaturu stijenke ϑ_S, a ona ovisi o izmijenjenom toplinskom toku i površini izmjenjivača, ovaj je proračun iterativnog karaktera. Temperatura stijenke kontrolira se prema sljedećim izrazima :

$$\vartheta_\mathrm{S} = \frac{\vartheta_\mathrm{md} - \vartheta_\mathrm{m} e^{\frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}{1 - e^{\frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}, \tag{89}$$

$$\Delta\vartheta_\mathrm{ms} = \frac{\Phi_\mathrm{R}}{A_0 k_\mathrm{S}}, \tag{90}$$

$$k_\mathrm{S} = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_S} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}}}. \tag{91}$$

Rezultati termodinamičkog proračuna deflegmatora prikazani su u nastavku za posljednji korak iteracije.

- cijev deflegmatora DN50: $d_\mathrm{v} = 0{,}057$ m, $d_\mathrm{u} = 0{,}0512$ m [10],
- promjer cijevne zavojnice: $D = 0{,}4$ m,
- toplinska provodnost materijala stijenke cijevi (čelik): $\lambda_\mathrm{S} = 45{,}4$ W/(m K) [4],
- toplinski tok odveden kominom u deflegmatoru: $\Phi_\mathrm{R} = 74{,}68$ kW,
- ulazna temperatura komine u deflegmator: $\vartheta_\mathrm{m} = 25$ °C,
- izlazna temperatura komine iz deflegmatora: $\vartheta_\mathrm{md} = 55{,}27$ °C,
- srednja temperatura komine u deflegmatoru je 40,135 °C,
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556$ kg/s,
- specifični toplinski kapacitet komine za 40,135 °C i ξ_m:
  $c_\mathrm{m} = 4{,}2854$ kJ/(kg K) [13],
- gustoća komine za 40,135 °C i ξ_m: $\rho_\mathrm{m} = 969{,}17$ kg/m^3 [13] ,
- toplinska provodnost komine za 40,135 °C i ξ_m : $\lambda_\mathrm{m} = 0{,}5604$ W/(m K) [13] ,
- dinamička žilavost komine za 40,135 °C i ξ_m : $\eta_\mathrm{m} = 0{,}000914$ kg/(m s) [13],
- brzina strujanja komine u cijevi:

$$v_\mathrm{m} = \frac{q_{m\mathrm{m}}\,4}{\rho_\mathrm{m} d_\mathrm{u}^2\,\pi} = 0{,}2786 \text{ m/s},$$

- Prandtlova značajka za kominu za 40,135 °C i ξ_m : $Pr_\mathrm{m} = \frac{c_\mathrm{m}\eta_\mathrm{m}}{\lambda_\mathrm{m}} = 6{,}99$,
- Reynoldsova značajka s unutarnje strane stijenke:

$$Re_\mathrm{u} = \frac{\rho_\mathrm{m}\, d_\mathrm{u}\, v_\mathrm{m}}{\eta_\mathrm{m}} = 15123{,}37,$$

- koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi:

$$\alpha_\mathrm{u} = 0{,}023\frac{\lambda_\mathrm{m}}{d_\mathrm{u}}\left[1 + 14{,}8\left(1 + \frac{d_\mathrm{u}}{D}\right)\left(\frac{d_\mathrm{u}}{D}\right)^{1/3}\right] Pr_\mathrm{m}^{1/3} Re_\mathrm{u}{}^{0{,}8-0{,}22(d_\mathrm{u}/D)^{0{,}1}}$$
$$= 1783{,}32 \text{ W/(m}^2\text{K)},$$

- pretpostavljena temperatura stijenke: $\vartheta_\mathrm{S} = 67{,}71°C$,
- temperature pare u deflegmatoru: $\vartheta' = 77{,}9\ °C$,
- srednja temperatura: $\vartheta_\mathrm{m} = (\vartheta' + \vartheta_\mathrm{S})/2 = 72{,}81°C$,
- toplinska provodnost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_m i $\xi = 0{,}86$:
  $\lambda_\mathrm{f} = 0{,}2615$ W/(m K) [13],
- dinamička žilavost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_m i $\xi = 0{,}86$:
  $\eta_\mathrm{f} = 0{,}000518$ kg/(m s) [13],

- gustoća kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_m i $\xi = 0{,}86$: $\rho_\mathrm{f} = 779{,}19\ \mathrm{kg/m^3}$ [13],
- specifična toplina koju oslobađa 1 kg pare pri kondenzaciji:

  $\Delta h = (h_\mathrm{g} - h_\mathrm{k}) = 1065{,}16\ \mathrm{kJ/kg}$,
- ubrzanje Zemljine sile teže: $g = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi:

$$\alpha_\mathrm{v} = 0{,}725\left(\frac{g\,\rho_\mathrm{f}^2\,\lambda_\mathrm{f}^3\,\Delta h}{\eta_\mathrm{f}\,d_\mathrm{v}\,(\vartheta' - \vartheta_\mathrm{S})}\right)^{1/4} = 3194{,}53\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\,d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}}\ln\frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}} = 995{,}35\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{m} = \frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\ln\frac{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{md}}{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{m}}} = 35{,}65°\mathrm{C},$$

- površina deflegmatora:

$$A_0 = \frac{\Phi_\mathrm{R}}{k\,\Delta\vartheta_\mathrm{m}} = 2{,}1\mathrm{m}^2,$$

- dužina cijevi deflegmatora:

$$L = \frac{A_0}{d_\mathrm{v}\,\pi} = 11{,}76\ \mathrm{m},$$

- koeficijent prolaza topline do vanjskog ruba stijenke:

$$k_\mathrm{S} = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\,d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}}\ln\frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}}} = 1445{,}84\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura za srednju temperaturu stijenke:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{ms} = \frac{\Phi_\mathrm{R}}{A_0\,k_\mathrm{S}} = 24{,}54\ °\mathrm{C},$$

- kontrola pretpostavljene temperature stijenke:

$$\vartheta_\mathrm{S} = \frac{\vartheta_\mathrm{md} - \vartheta_\mathrm{m} e^{\frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}}{1 - e^{\frac{\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_\mathrm{md}}{\Delta\vartheta_\mathrm{ms}}}} = 67{,}711°\mathrm{C}.$$

Dimenzioniranje priključka za kominu:

- brzina strujanja komine: $v_\mathrm{m} = 1\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća komine: $\rho_\mathrm{m} = 969{,}17\ \mathrm{kg/m^3}$,

- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{m}}}{\rho_\mathrm{m}\, v_\mathrm{m}\, \pi}} = 0{,}027\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN32,

Dimenzije deflegmatora

- cijev DN50,
- dužina cijevi deflegmatora 12 m,
- promjer cijevne zavojnice 400 mm,
- visina cijevne zavojnice 1,1 m.

Ukupna visina kolone 6,5 m.

5.3. Štedna grijalica

Prilikom energijske analize rektifikacijske kolone za realan slučaj određen je toplinski tok koji se izmijeni u štednoj grijalici ako je razlika temperatura komine na ulazu i đibre na izlazu 5°C, što je vrlo povoljno za vođenje procesa rektifikacije. Toplinskim proračunom realnog shell and tube izmjenjivača utvrđeno je da bi takav izmjenjivač bio nerealnih dimenzija, pa je određen maksimalni toplinski tok koji džibra može predati komini u realnom izmjenjivaču te je dodan dodatni dogrijač komine koji dodatno zagrijava kominu do temperature s kojom je provedena energijska analiza kolone za realan slučaj.

Štedna grijalica je izveden kao shell and tube izmjenjivač topline sa segmentnim pregradama. U cijevima izmjenjivača struji džibra, a u plaštu komina. Dodatni dogrijač komine je isto shell and tube izmjenjivač. U cijevima struji komina, a u plaštu kondenzira vodena para. Proračun dodatnog dogrijača proveden je prema izrazima navedenim u poglavlju za termodinamičkog proračuna kondenzatora, a izrazi za proračun štedne grijalice prikazani su u nastavku.

Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi za prijelazno strujanje računa se prema [11]:

$$\alpha_\mathrm{u} = \frac{Nu_\mathrm{u} \lambda_\mathrm{s}}{d_\mathrm{u}}, \tag{92}$$

$$Nu_\mathrm{u} = (1 - \gamma_\mathrm{Nu})\, Nu_{\mathrm{l},2300} + \gamma_\mathrm{Nu} Nu_{\mathrm{t},10^4}, \tag{93}$$

$$Re_\mathrm{u} = \frac{\rho_\mathrm{s}\, d_\mathrm{u}\, v_\mathrm{s}}{\eta_\mathrm{s}}, \tag{94}$$

$$\gamma_{\mathrm{Nu}} = \frac{Re_{\mathrm{u}} - 2300}{10^4 - 2300}, \tag{95}$$

$$v_{\mathrm{s}} = \frac{4\, q_{ms}\, n_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{s}}\, d_{\mathrm{u}}^2\, \pi\, N_{\mathrm{uk}}}. \tag{96}$$

U gornjoj jednadžbi $Nu_{\mathrm{l},2300}$ je Nuseltova značajka za laminarno strujanje za $Re = 2300$, $Nu_{\mathrm{t},10^4}$ je Nuseltova značajka za turbulentno strujanje za $Re = 10^4$. Oba se računaju prema:

$$Nu_{\mathrm{t},10^4} = \frac{(\zeta/8)\, Re\, Pr_{\mathrm{s}}}{1 + 12{,}7\sqrt{(\zeta/8)}\left(Pr_{\mathrm{s}}^{2/3} - 1\right)}\left[1 + (d_{\mathrm{u}}/L)^{2/3}\right], \tag{97}$$

$$\zeta = (1{,}8\ \log_{10} Re - 1{,}5)^{-2}, \tag{98}$$

$$Nu_{\mathrm{l},2300} = [Nu_1^3 + 0{,}6^3 + (Nu_2 - 0{,}6)^3 + Nu_3^3]^{1/3}, \tag{99}$$

$$Nu_{1\mathrm{l}} = 4{,}364, \tag{100}$$

$$Nu_{2\mathrm{l}} = 1{,}953\sqrt[3]{Re\, Pr_{\mathrm{s}}\, d_{\mathrm{u}}/L}, \tag{101}$$

$$Nu_{3\mathrm{l}} = 0{,}924\sqrt[3]{Pr_{\mathrm{s}}}\,\sqrt{Re\, d_{\mathrm{u}}/L}. \tag{102}$$

n_{p} je broj prolaza izmjenjivača. N_{uk} je ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača.

Prijelaz topline u plaštu izmjenjivača prema [11] računa se pomoću izraza navedenih u nastavku.

Najuži presjek strujanja u međuzoni (poprečno nastrujane cijevi) računa se prema:

$$S_{\mathrm{M}} = \left(2e_1 + \sum e\right) L_{\mathrm{M}}, \tag{103}$$

gdje je e_1 razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi, e razmak između pojedinih cijevi, L_{M} razmak između segmentnih pregrada.

Slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni računa se prema:

$$S_{\mathrm{U}} = \frac{D_{\mathrm{u}}^2}{8}\left(\frac{\gamma\, \pi}{180} - \sin\gamma\right) - N_{\mathrm{U}}\frac{d_{\mathrm{v}}^2 \pi}{4}, \tag{104}$$

gdje je D_{u} unutarnji promjer plašta, γ središnji kut segmentne pregrade, N_{U} broj cijevi u uzdužnoj zoni, d_{v} vanjski promjer cijevi izmjenjivača.

Središnji kut segmente pregrade:

$$\gamma = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2H}{D_{\mathrm{S}}}\right), \tag{105}$$

gdje je H visina odsječka segmentne pregrade, D_{S} promjer segmentne pregrade.

Za izračunavanje bezdimenzijskih veličina, prema Gnielinskom, potrebno je izračunati prestrujnu duljinu cijevi koja s brzinom strujanja u slobodnoj simetrali definira izraz za Reynoldsov broj.

$$L_\mathrm{p} = \frac{d_\mathrm{v}\pi}{2}, \tag{106}$$

$$S_0 = D_\mathrm{u}\, L_\mathrm{M}, \tag{107}$$

$$v_0 = \frac{q_{m\mathrm{m}}}{\rho_\mathrm{m}\, S_0}, \tag{108}$$

gdje je $q_{m\mathrm{m}}$ maseni protok komine, ρ_m gustoća komine, S_0 slobodni presjek plašta, v_0 brzina strujanja u slobodnom presjeku plašta.

Prema Gnielinskom jednadžba za izračunavanje Nusseltovog broja kod plašta s pregradama vrijedi u području $10 < Re < 10^6, 0{,}6 < Pr < 10^3,\ f_\mathrm{A} > 0{,}3$.

$$Re_\mathrm{v} = \frac{v_0\, L_\mathrm{p}\, \rho_\mathrm{m}}{\Psi\, \eta_\mathrm{m}}, \tag{109}$$

$$Pr_\mathrm{m} = \frac{\eta_\mathrm{m}\, c_m}{\lambda_m}, \tag{110}$$

$$Nu_\mathrm{v} = f_\mathrm{A}\, Nu_\mathrm{SG}, \tag{111}$$

gdje je ρ_m gustoća komine, Ψ poroznost snopa cijevi, η_m dinamička žilavost komine, λ_m toplinska provodnost komine, c_m specifični toplinski kapacitet komine, f_A korekcijski faktor koji uzima u obzir odstupanje između idealnog i realnog aparata, Nu_SG Nusseltov broj za poprečno nastrujani snop glatkih cijevi.

Korekcijski faktor f_A koji uzima u obzir odstupanja između idealnog i realnog aparata računa se prema:

$$f_\mathrm{A} = f_\mathrm{S}\, f_\mathrm{B}\, f_\mathrm{L}, \tag{112}$$

gdje je f_S korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja, f_B korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja, f_L korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja.

Korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja računa se prema:

$$f_\mathrm{S} = 1 - 2\frac{N_\mathrm{U}}{N_\mathrm{uk}} + 0{,}654\left(\frac{N_\mathrm{U}}{N_\mathrm{uk}}\right)^{0{,}32}. \tag{113}$$

U slučaju kad je broj brtvenih traka jednak broju poprečnih nastrujanih redova cijevi u krajnjoj zoni onda je korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja $f_\mathrm{B} = 1$.

Korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja računa se prema:

$$f_\mathrm{L} = 0{,}4\, R_\mathrm{C} + (1 - 0{,}4\, R_\mathrm{C}) \exp(-1{,}5\, R_\mathrm{L}), \tag{114}$$

$$R_\mathrm{C} = \frac{S_\mathrm{LC}}{S_\mathrm{L}}, \tag{115}$$

$$S_\mathrm{LC} = (N_\mathrm{uk} - N_\mathrm{U}) \frac{(d_\mathrm{B}^2 - d_\mathrm{v}^2)\pi}{4}, \tag{116}$$

$$S_L = S_\mathrm{LC} + S_\mathrm{LPS}, \tag{117}$$

$$S_\mathrm{LPS} = \frac{(D_\mathrm{U}^2 - D_\mathrm{S}^2)\pi}{4} \frac{360 - \gamma}{360}, \tag{118}$$

$$R_\mathrm{L} = \frac{S_\mathrm{L}}{S_\mathrm{M}}, \tag{119}$$

gdje je R_C omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja, S_LC prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora, S_L ukupni presjek za lekažno strujanje, S_LPS presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade, R_L omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja.

Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijev računa se

za $z_\mathrm{p} \geq 10$:

$$Nu_\mathrm{SG} = f_\mathrm{s}\, Nu_\mathrm{c}, \tag{120}$$

za $z_\mathrm{p} < 10$:

$$Nu_\mathrm{SG} = \frac{1 + (z_\mathrm{p} - 1) f_\mathrm{s}}{z_\mathrm{p}}\, Nu_\mathrm{c}, \tag{121}$$

gdje je f_s korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa, Nu_c Nusseltov broj za poprečno nastrujanu glatku cijev, z_p broj redova poprečno nastrujanih cijevi.

Za paralelan smještaj cijevi korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa:

$$f_\mathrm{s} = 1 + \frac{0{,}7}{\Psi^{1{,}5}} \frac{t_\mathrm{p}/t_\mathrm{u} - 0{,}3}{\left(t_\mathrm{u}/t_\mathrm{p} + 0{,}7\right)^2}, \tag{122}$$

gdje je t_p normirani poprečni korak cijevi, t_u normirani uzdužni korak cijevi, Ψ poroznost snopa cijevi.

Poroznost snopa cijevi računa se

za $t_\mathrm{u} \geq 1$ prema:

$$\Psi = 1 - \frac{\pi}{4\, t_\mathrm{p}}, \tag{123}$$

za $t_\mathrm{u} < 1$ prema:

$$\Psi = 1 - \frac{\pi}{4\, t_\mathrm{p}\, t_\mathrm{u}}. \tag{124}$$

Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijevi računa se prema:

$$Nu_\mathrm{c} = \left[0{,}3 + \left(Nu_\mathrm{l}^2 + Nu_\mathrm{t}^2\right)^{0{,}5}\right] f_\mathrm{Q}, \tag{125}$$

$$Nu_\mathrm{l} = 0{,}664\, Re_\mathrm{v}^{0{,}5} Pr_\mathrm{m}^{1/3}, \tag{126}$$

$$Nu_\mathrm{t} = \frac{0{,}037\, Re_\mathrm{v}^{0{,}8} Pr_\mathrm{m}}{1 + \frac{2{,}443}{Re_\mathrm{v}^{0{,}1}}\left(Pr_\mathrm{m}^{2/3} - 1\right)}, \tag{127}$$

gdje je Nu_l Nusseltov broj pri laminarnom strujanju, Nu_t Nusseltov broj pri turbulentnom strujanju, f_Q faktor koji uzima u obzir smjer izmjene topline, približno je jednak 1.

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi računa se prema:

$$\alpha_\mathrm{v} = \frac{Nu_\mathrm{v}\, \lambda_\mathrm{m}}{d_\mathrm{v}}. \tag{128}$$

Koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi računa se prema:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\, d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln\frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}}. \tag{129}$$

Bezdimenzijske značajke realnog izmjenjivača za kominu:

$$\pi_{2\mathrm{m}} = \frac{k\, A_0}{q_{m\mathrm{m}}\, c_\mathrm{m}}, \tag{130}$$

$$\pi_{3\mathrm{m}} = \frac{q_{m\mathrm{m}}\, c_\mathrm{m}}{q_{ms}\, c_\mathrm{s}}, \tag{131}$$

$$\pi_{1\mathrm{m}} = \frac{\vartheta_\mathrm{md} - \vartheta_\mathrm{m}''}{\vartheta_\mathrm{md} - \vartheta_\mathrm{s}}, \tag{132}$$

$$\frac{1}{\pi_{1\mathrm{m}}} = \frac{\sqrt{1 + (\pi_{3\mathrm{m}}/m)^2}}{1 - \exp(-\pi_{2\mathrm{m}}\sqrt{1 + (\pi_{3\mathrm{m}}/m)^2})} + \frac{\pi_{3\mathrm{m}}}{1 - \exp(-\pi_{3\mathrm{m}}\, \pi_{2\mathrm{m}})} - \frac{\pi_{3\mathrm{m}}/m}{1 - \exp(-\pi_{3\mathrm{m}}\, \pi_{2\mathrm{m}}/m)} + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{\pi_{3\mathrm{m}}}{m} - \sqrt{1 + \left(\frac{\pi_{3\mathrm{m}}}{m}\right)^2}\right). \tag{133}$$

U gornjoj jednadžbi ϑ_{m}'' je temperatura komine na izlazu iz realnog izmjenjivača, m je pomoćni faktor koji uzima u obzir broj prolaza izmjenjivača.

Izlazna temperature komine i džibre ovise o dužini cijevi izmjenjivača. Duljina izmjenjivača je odabrana tako da je postignut maksimalni iznos temperature komine i minimalni iznos temperature đibre, a pri tome da se dimenzije aparate zadrže u realnim gabaritima.

Rezultati termodinamičkog proračuna štedne grijalice prikazani su u nastavku.

- optimalna dužina cijevi izmjenjivača: $L = 1{,}5$ m,
- cijevi izmjenjivača DN 15: $d_{\mathrm{v}} = 0{,}02$ m, $d_{\mathrm{u}} = 0{,}016$ m [10],
- toplinska provodnost materijala stijenke cijevi (čelik): $\lambda_S = 45{,}4$ W/(m K) [4],
- broj prolaza: $n_{\mathrm{p}} = 8$, broj cijevi po prolazu 22,
- ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača: $N_{\mathrm{uk}} = 176$,
- cijev plašt DN400: $D_{\mathrm{v}} = 0{,}419$ m, $D_{\mathrm{u}} = 0{,}399$ m,
- ulazna temperatura džibre u štednu grijalicu: $\vartheta_{\mathrm{s}} = 96$ °C,
- maseni protok džibre: $q_{ms} = 0{,}5032$ kg/s,
- specifični toplinski kapacitet džibre: $c_{\mathrm{s}} = 4{,}208$ kJ/(kg K) [13],
- gustoća džibre: $\rho_{\mathrm{s}} = 968{,}26$ kg/m^3 [13] ,
- toplinska provodnost džibre: $\lambda_{\mathrm{s}} = 0{,}6575$ W/(m K) [13] ,
- dinamička žilavost džibre: $\eta_{\mathrm{s}} = 0{,}000368$ kg/(m s) [13],
- brzina strujanja džibre u cijevima:

$$v_{\mathrm{s}} = \frac{4\, q_{ms}\, n_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{s}}\, d_{\mathrm{u}}^2\, \pi\, N_{\mathrm{uk}}} = 0{,}118 \text{ m/s},$$

- Prandtlova značajka za džibru: $Pr_{\mathrm{s}} = \frac{c_{\mathrm{s}}\, \eta_{\mathrm{s}}}{\lambda_{\mathrm{s}}} = 2{,}358$,
- Reynoldsova značajka s unutarnje strane stijenke cijevi:

$$Re_{\mathrm{u}} = \frac{\rho_{\mathrm{s}}\, d_{\mathrm{u}}\, v_{\mathrm{s}}}{\eta_{\mathrm{s}}} = 4942{,}25\ ,$$

- Nuseltova značajka s unutarnje strane stijenke cijevi za laminarno strujanje za $Re = 2300$:

$$Nu_{1\mathrm{l}} = 4{,}364,$$

$$Nu_{2\mathrm{l}} = 1{,}953\sqrt[3]{Re\, Pr_{\mathrm{s}}\, d_{\mathrm{u}}/L} = 7{,}554,$$

$$Nu_{3\mathrm{l}} = 0{,}924\sqrt[3]{Pr_{\mathrm{s}}}\,\sqrt{Re\, d_{\mathrm{u}}/L} = 6{,}092,$$

$$Nu_{\mathrm{l},2300} = [Nu_1^3 + 0{,}6^3 + (Nu_2 - 0{,}6)^3 + Nu_3^3]^{1/3} = 8{,}64,$$

- Nuseltova značajka s unutarnje strane stijenke cijevi za turbulentno strujanje za $Re = 10^4$:

$$\zeta = (1{,}8\ \log_{10} Re - 1{,}5)^{-2} = 0{,}031,$$

$$Nu_{\mathrm{t},10^4} = \frac{(\zeta/8)\ Re\ Pr_{\mathrm{s}}}{1 + 12{,}7\sqrt{(\zeta/8)}\left(Pr_{\mathrm{s}}^{2/3} - 1\right)}\left[1 + (d_{\mathrm{u}}/L)^{2/3}\right] = 59{,}16,$$

- Nuseltova značajka s unutarnje strane stijenke cijevi :

$$\gamma_{\mathrm{Nu}} = \frac{Re_{\mathrm{u}} - 2300}{10^4 - 2300} = 0{,}34,$$

$$Nu_{\mathrm{u}} = (1 - \gamma_{\mathrm{Nu}})\ Nu_{\mathrm{l},2300} + \gamma_{\mathrm{Nu}}\ Nu_{\mathrm{t},10^4} = 25{,}98,$$

- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane stijenke cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{u}} = \frac{Nu_{\mathrm{u}}\ \lambda_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{u}}} = 1067{,}57\ \ \mathrm{W/(m^2\ K)}$$

- ulazna temperatura komine u štednu grijalicu: $\vartheta_{\mathrm{md}} = 55{,}27\ °\mathrm{C}$,
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556\ \mathrm{kg/s}$,
- specifični toplinski kapacitet komine: $c_{\mathrm{m}} = 3{,}99\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}$ [13],
- gustoća komine: $\rho_{\mathrm{m}} = 956{,}31\ \ \mathrm{kg/m^3}$ [13] ,
- toplinska provodnost komine: $\lambda_{\mathrm{m}} = 0{,}525\ \ \mathrm{W/(m\ K)}$ [13] ,
- dinamička žilavost komine: $\eta_{\mathrm{m}} = 0{,}00051\ \mathrm{kg/(m\ s)}$ [13],
- Prandtlova značajka za kominu: $Pr_{\mathrm{m}} = \frac{c_{\mathrm{m}}\,\eta_{\mathrm{m}}}{\lambda_{\mathrm{m}}} = 3{,}88$,
- razmak između segmentnih pregrada: $L_{\mathrm{M}} = 0{,}45\ \mathrm{m}$,
- razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi: $e_1 = 0{,}002\ \mathrm{m}$,
- razmak između pojedinih cijevi: $e = 0{,}0075\ \mathrm{m}$,
- najuži presjek strujanja u međuzoni: $S_{\mathrm{M}} = (2e_1 + 13e)\ L_{\mathrm{M}} = 0{,}0326\ \mathrm{m^2}$,
- broj cijevi u uzdužnoj zoni: $N_{\mathrm{U}} = 44$,
- promjer segmentne pregrade: $D_{\mathrm{S}} = 0{,}397\ \mathrm{m}$,
- visina odsječka segmentne pregrade: $H = 0{,}0795\ \mathrm{m}$,
- središnji kut segmentne pregrade:

$$\gamma = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2H}{D_{\mathrm{S}}}\right) = 106{,}33°,$$

- slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni:

$$S_{\mathrm{U}} = \frac{D_{\mathrm{u}}^2}{8}\left(\frac{\gamma\ \pi}{180} - \sin\gamma\right) - N_{\mathrm{U}}\frac{d_{\mathrm{v}}^2\pi}{4} = 0{,}004\ \mathrm{m^2},$$

- prestrujna duljina cijevi: $L_{\mathrm{p}} = \frac{d_{\mathrm{v}}\pi}{2} = 0{,}0314\ \mathrm{m}$,

- slobodni presjek plašta: $S_0 = D_\mathrm{u}\, L_\mathrm{M} = 0{,}1796\ \mathrm{m}^2$,
- brzina strujanja u slobodnom presjeku plašta:

$$v_0 = \frac{q_{m\mathrm{m}}}{\rho_\mathrm{m}\, S_0} = 0{,}003236\ \mathrm{m/s},$$

- korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja:

$$f_\mathrm{S} = 1 - 2\frac{N_\mathrm{U}}{N_\mathrm{uk}} + 0{,}654\left(\frac{N_\mathrm{U}}{N_\mathrm{uk}}\right)^{0{,}32} = 0{,}928,$$

- broj poprečnih nastrujanih redova cijevi u krajnjoj zoni je 13, a broj brtvenih traka je 13 stoga $f_\mathrm{B} = 1$,
- promjer rupa na segmentnim pregradama: $d_\mathrm{B} = 0{,}022\ \mathrm{m}$,
- prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora:

$$S_\mathrm{LC} = (N_\mathrm{uk} - N_\mathrm{U})\frac{(d_\mathrm{B}^2 - d_\mathrm{v}^2)\pi}{4} = 0{,}00897\ \mathrm{m}^2,$$

- presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade:

$$S_\mathrm{LPS} = \frac{(D_\mathrm{U}^2 - D_\mathrm{S}^2)\pi}{4}\,\frac{360 - \gamma}{360} = 0{,}000881\ \mathrm{m}^2,$$

- ukupni presjek za lekažno strujanje: $S_\mathrm{L} = S_\mathrm{LC} + S_\mathrm{LPS} = 0{,}009851\ \mathrm{m}^2$,
- omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja:

$$R_\mathrm{C} = \frac{S_\mathrm{LC}}{S_\mathrm{L}} = 0{,}911,$$

- omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja:

$$R_\mathrm{L} = \frac{S_\mathrm{L}}{S_\mathrm{M}} = 0{,}324,$$

- korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja:

$$f_\mathrm{L} = 0{,}4R_\mathrm{C} + (1 - 0{,}4R_\mathrm{C})\exp(-1{,}5R_\mathrm{L}) = 0{,}755,$$

- korekcijski faktor uzima u obzir odstupanja između idealnog i realnog aparata: $f_\mathrm{A} = f_\mathrm{S}\, f_\mathrm{B}\, f_\mathrm{L} = 0{,}7$,
- normirani poprečni korak cijevi: $t_\mathrm{p} = 1{,}3$,
- normirani uzdužni korak cijevi: $t_\mathrm{u} = 1{,}2$,
- poroznost snopa cijevi:

$$\Psi = 1 - \frac{\pi}{4\, t_\mathrm{p}} = 0{,}3958,$$

- Reynoldsova značajka s vanjske strane stijenke cijevi:

$$Re_{\mathrm{v}} = \frac{v_0\, L_{\mathrm{p}}\, \rho_{\mathrm{m}}}{\Psi\, \eta_{\mathrm{m}}} = 481{,}62,$$

- korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa:

$$f_{\mathrm{s}} = 1 + \frac{0{,}7}{\Psi^{1{,}5}} \frac{t_{\mathrm{p}}/t_{\mathrm{u}} - 0{,}3}{\left(t_{\mathrm{u}}/t_{\mathrm{p}} + 0{,}7\right)^2} = 1{,}836,$$

- Nusseltov broj pri laminarnom strujanju:

$$Nu_{\mathrm{l}} = 0{,}664\, Re_{\mathrm{v}}^{0{,}5} Pr_{\mathrm{m}}^{1/3} = 22{,}89,$$

- Nusseltov broj pri turbulentnom strujanju:

$$Nu_{\mathrm{t}} = \frac{0{,}037\, Re_{\mathrm{v}}^{0{,}8} Pr_{\mathrm{m}}}{1 + \frac{2{,}443}{Re_{\mathrm{v}}^{0{,}1}}\left(Pr_{\mathrm{m}}^{2/3} - 1\right)} = 6{,}846,$$

- Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijevi:

$$Nu_{\mathrm{c}} = \left[0{,}3 + \left(Nu_{\mathrm{l}}^2 + Nu_{\mathrm{t}}^2\right)^{0{,}5}\right] f_{\mathrm{Q}} = 24{,}19,$$

- Nusseltov broj kod poprečno nastrujanih glatkih cijev $z_{\mathrm{p}} \geq 10$:

$$Nu_{\mathrm{SG}} = f_{\mathrm{s}}\, Nu_{\mathrm{c}} = 44{,}41,$$

- Nuseltova značajka s vanjske strane stijenke cijevi:

  $Nu_{\mathrm{v}} = f_{\mathrm{A}} Nu_{\mathrm{SG}} = 31{,}09,$

- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{v}} = \frac{Nu_{\mathrm{v}}\, \lambda_{\mathrm{m}}}{d_{\mathrm{v}}} = 815{,}54\ \mathrm{W/(m^2\ K)}\ ,$$

- koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}}\, d_{\mathrm{u}}} + \frac{d_{\mathrm{v}}}{2\lambda_{\mathrm{S}}} \ln \frac{d_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{u}}} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{v}}}} = 408{,}79\ \mathrm{W/(m^2\ K)}$$

- bezdimenzijske značajke realnog izmjenjivača za kominu:

$$\pi_{2\mathrm{m}} = \frac{k\, A_0}{q_{m\mathrm{m}}\, c_{\mathrm{m}}} = 3{,}057,$$

$$\pi_{3\mathrm{m}} = \frac{q_{m\mathrm{m}}\, c_{\mathrm{m}}}{q_{ms}\, c_{\mathrm{s}}} = 1{,}047,$$

$$\pi_{1\mathrm{m}} = 0{,}553,$$

- temperatura komine na izlazu iz štedne grijalice:

$$\vartheta_{\mathrm{m}}'' = \vartheta_{\mathrm{md}} - (\vartheta_{\mathrm{md}} - \vartheta_{\mathrm{s}})\pi_{1\mathrm{m}} = 77{,}77\ °C,$$

- izmijenjeni toplinski tok u štednoj grijalici:

$$\Phi_1 = q_{m\mathrm{m}}\, c_{\mathrm{m}}(\vartheta_{\mathrm{m}}'' - \vartheta_{\mathrm{md}}) = 49{,}89\ \mathrm{kW}$$

- temperatura džibre na izlazu iz štedne grijalice:

$$\vartheta_{\mathrm{s}}'' = \vartheta_{\mathrm{s}} - \frac{\Phi_1}{q_{ms}\, c_{\mathrm{s}}} = 72{,}43\ °C,$$

- toplinski tok koji je potrebno izmijeniti u dogrijaču:

$$\Phi_2 = \Phi_{\mathrm{ds}} - \Phi_1 = 26{,}95\ \mathrm{kW}.$$

Dimenzioniranje priključka za kominu:

- brzina strujanja komine: $v_{\mathrm{m}} = 1\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća komine: $\rho_{\mathrm{m}} = 956{,}32\ \ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{m}}}{\rho_{\mathrm{m}}\, v_{\mathrm{m}}\, \pi}} = 0{,}027\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN32.

Dimenzioniranje priključka za džibru:

- brzina strujanja komine: $v_{\mathrm{s}} = 1\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok komine: $q_{ms} = 0{,}5032\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća komine: $\rho_{\mathrm{s}} = 968{,}26\ \ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{ms}}{\rho_{\mathrm{s}}\, v_{\mathrm{s}}\, \pi}} = 0{,}0257\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN32.

Dimenzije štedne grijalice:

- cijev plašta DN400,
- dužina cijevi grijalice 1,5 m,
- cijevi grijalice DN15,
- broj cijevi 176,
- broj prolaza 8,
- razmak između segmentnih pregrada 450 mm,
- broj segmentnih pregrada 3.

5.4. Dogrijač komine

Dogrijač komine je shell and tube izmjenjivač. U cijevima struji komina, a u plaštu kondenzira vodena para. Proračun dodatnog dogrijača proveden je prema izrazima navedenim u poglavlju za termodinamičkog proračuna kondenzatora.

Rezultati termodinamičkog proračuna dogrijača prikazani su u nastavku za posljednji korak iteracije.

toplinski tok koji je potrebno dovesti u dogrijaču parom: $\Phi_2 = 26{,}95$ kW,

- ulazna temperatura komine: $\vartheta_\mathrm{m}'' = 77{,}77°\mathrm{C}$,
- izlazna temperatura komine: $\vartheta_\mathrm{mds} = 86{,}05$ °C,
- specifični toplinski kapacitet komine: $c_\mathrm{m} = 3{,}99$ kJ/(kg K) [13],
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556$ kg/s,
- cijevi izmjenjivača DN 20: $d_\mathrm{v} = 0{,}025$ m, $d_\mathrm{u} = 0{,}021$ m [10],
- toplinska provodnost materijala stijenke cijevi (čelik): $\lambda_\mathrm{S} = 45{,}4$ W/(m K) [4] ,
- broj prolaza $n_\mathrm{p} = 2$, broj cijevi po prolazu 6,
- ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača: $N_\mathrm{uk} = 12$,
- gustoća komine: $\rho_\mathrm{m} = 956{,}31$ kg/m^3 [13] ,
- toplinska provodnost komine: $\lambda_\mathrm{m} = 0{,}5245$ W/(m K) [13] ,
- dinamička žilavost komine: $\eta_\mathrm{m} = 0{,}00050967$ kg/(m s) [13],
- brzina strujanja komine u cijevi:

$$v_\mathrm{m} = \frac{4\, q_{m\mathrm{m}}\, n_\mathrm{p}}{\rho_\mathrm{m}\, d_\mathrm{u}^2\, \pi\, N_\mathrm{uk}} = 0{,}28 \text{ m/s},$$

- Prandtlova značajka za kominu: $Pr_\mathrm{m} = 3{,}877$,
- Reynoldsova značajka s unutarnje strane stijenke:

$$Re_\mathrm{u} = \frac{\rho_\mathrm{m}\, d_\mathrm{u}\, v_\mathrm{m}}{\eta_\mathrm{m}} = 11021,$$

- Nuseltova značajka s unutarnje strane stijenke:

$$Nu_\mathrm{u} = 0{,}023\, Re_\mathrm{u}^{0{,}8}\, Pr_\mathrm{m}^{0{,}4} = 67{,}75,$$

- koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi:

$$\alpha_\mathrm{u} = \frac{Nu_\mathrm{u}\, \lambda_\mathrm{m}}{d_\mathrm{u}} = 1692{,}18 \text{ W/(m}^2\text{K)},$$

- pretpostavljena temperatura stijenke: $\vartheta_\mathrm{S} = 138{,}8°\mathrm{C}$,
- temperature pare u dogrijaču: $\vartheta' = 158{,}83$ °C,
- srednja temperatura: $\vartheta_\mathrm{m} = (\vartheta' + \vartheta_\mathrm{S})/2 = 148{,}86$ °C,

- toplinska provodnost vode za ϑ_m: $\lambda_w = 0{,}6823\ \mathrm{W/(m\ K)}$ [4],
- dinamička žilavost vode za ϑ_m: $\eta_w = 0{,}0001839\ \mathrm{kg/(m\ s)}$ [4],
- gustoća vode za ϑ_m: $\rho_\mathrm{w} = 918{,}18\ \mathrm{kg/m^3}$ [4],
- specifična toplina koju oslobađa 1 kg vodene pare 6 bar-a pri kondenzaciji: $\Delta h = r = 2085{,}64\ \mathrm{kJ/kg}$ [4],
- ubrzanje Zemljine sile teže: $g = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za jednu cijev umanjen za 60% zbog nekondenzirajućih plinova:

$$\alpha_\mathrm{v1} = 0{,}4 * 0{,}725 \left(\frac{g\ \rho_\mathrm{w}^2\ \lambda_\mathrm{w}^3\ \Delta h}{\eta_\mathrm{w}\ d_\mathrm{v}\ (\vartheta' - \vartheta_\mathrm{S})} \right)^{1/4} = 4534{,}06\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- korekcijski faktor: $f_\mathrm{N} = N_\mathrm{uk}^{-1/12} = 0{,}813$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi za snop cijevi: $\alpha_\mathrm{v} = f_\mathrm{N}\ \alpha_\mathrm{v1} = 3686\ \mathrm{W/(m^2K)}$,
- koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\ d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{v}}} = 977{,}69\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{m} = \frac{\vartheta_m'' - \vartheta_\mathrm{msd}}{\ln \frac{\vartheta' - \vartheta_\mathrm{msd}}{\vartheta' - \vartheta_m''}} = 76{,}84°\mathrm{C},$$

- površina dogrijača:

$$A_0 = \frac{\Phi_2}{k\ \Delta\vartheta_\mathrm{m}} = 0{,}359\mathrm{m}^2,$$

- dužina cijevi dogrijača:

$$L = \frac{A_0}{d_\mathrm{v}\ \pi\ N_\mathrm{uk}} = 0{,}38\ \mathrm{m},$$

- koeficijent prolaza topline do vanjskog ruba stijenke:

$$k_\mathrm{S} = \frac{1}{\frac{d_\mathrm{v}}{\alpha_\mathrm{u}\ d_\mathrm{u}} + \frac{d_\mathrm{v}}{2\lambda_\mathrm{S}} \ln \frac{d_\mathrm{v}}{d_\mathrm{u}}} = 1330{,}6\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- srednja logaritamska razlika temperatura za srednju temperaturu stijenke:

$$\Delta\vartheta_\mathrm{ms} = \frac{\Phi_2}{A_0\ k_\mathrm{S}} = 56{,}88\ °\mathrm{C}$$

- kontrola pretpostavljene temperature stijenke:

$$\vartheta_{\mathrm{S}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{mds}} - \vartheta_{\mathrm{m}}'' \, e^{\frac{\vartheta_{\mathrm{m}}'' - \vartheta_{\mathrm{mds}}}{\Delta\vartheta_{\mathrm{ms}}}}}{1 - e^{\frac{\vartheta_{\mathrm{m}}'' - \vartheta_{mds}}{\Delta\vartheta_{\mathrm{ms}}}}} = 138{,}89°\mathrm{C}.$$

- potrošnja pare:

$$q_{m\mathrm{p}} = \frac{\Phi_2}{r} = 0{,}0129 \text{ kg/s} = 46{,}44 \text{ kg/h}.$$

Dimenzioniranje priključka za kominu:

- brzina strujanja komine: $v_{\mathrm{m}} = 1 \text{ m/s}$ [16],
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{m}} = 0{,}5556 \text{ kg/s}$,
- gustoća komine: $\rho_{\mathrm{m}} = 956{,}32 \text{ kg/m}^3$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{m}}}{\rho_{\mathrm{m}}\, v_{\mathrm{m}}\, \pi}} = 0{,}027 \text{ m},$$

- odabrani priključak DN32.

Dimenzioniranje priključka za dovod pare:

- brzina strujanja pare: $v_{\mathrm{p}} = 10 \text{ m/s}$ [16],
- maseni protok komine: $q_{m\mathrm{p}} = 0{,}0129 \text{ kg/s}$,
- gustoća komine: $\rho_{\mathrm{p}} = 3{,}169 \text{ kg/m}^3$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{p}}\, v_{\mathrm{p}}\, \pi}} = 0{,}02277 \text{ m},$$

- odabrani priključak DN20.

Dimenzioniranje priključka za odvod kondenzata vodene pare:

- brzina strujanja kondenzata: $v_{\mathrm{w}} = 1 \text{ m/s}$ [16],
- maseni protok kondenzata: $q_{m\mathrm{w}} = q_{m\mathrm{p}} = 0{,}0129 \text{ kg/s}$,
- gustoća kondenzata: $\rho_{\mathrm{w}} = 908{,}6 \text{ kg/m}^3$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{w}}}{\rho_{\mathrm{w}}\, v_{\mathrm{w}}\, \pi}} = 0{,}00425 \text{ m},$$

- odabrani priključak DN15.

Dimenzije dogrijača:

- cijevi DN20,
- dužina cijevi dogrijača 380 mm,
- broj cijevi 12,
- 2 prolaza po 6 cijevi,
- plašt dogrijača cijev DN150.

5.5. Kotlić

Kotlić je izveden kao vertikalni shell and tube izmjenjivač topline. U cijevima izmjenjivača isparava smjesa etanol-voda, a u plaštu izmjenjivača kondenzira suhozasićena para tako da temperatura oba medija ostaje konstantna. Model prijelaza topline s vanjske strane cijevi je Nusseltov model kondenzacije na vertikalnim glatkim cijevima, preuzet iz [3]. Model prijelaza topline s unutarnje strane cijevi je model prijelaza topline pri isparavanju u vertikalnim cijevima, preuzet iz [9].

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi se računa prema:

$$\alpha_{\mathrm{v}} = \frac{4}{3}\left(\frac{g\,\rho_{\mathrm{w}}^{2}\,\lambda_{\mathrm{w}}^{3}\,r}{4\,\eta_{\mathrm{w}}\,L\,(\vartheta' - \vartheta_{\mathrm{S}})}\right)^{1/4}. \qquad \textbf{(134)}$$

U gornjoj jednadžbi pojavljuju se fizikalna svojstva nastalog kondenzata koja se uzimaju za srednju temperaturu $\vartheta_{\mathrm{m}} = (\vartheta' + \vartheta_{\mathrm{S}})/2$, gdje je ϑ' je temperature pare, a r je specifična toplina isparavanja vodene pare.

U kotlić se dovodi maseni protok $q_{m\mathrm{f}}$ kapljevine smjese etanol-voda (vrela kapljevina) koji je jednak masenom protoku pare $q_{m\mathrm{d}}$ na prvoj plitici dijela za iscrpljivanje 1_{i} (suhozasićena para). Strujanje u cijevima je dvofazno.

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi računa se prema Shahovoj korelaciji. Korelacija uključuje dva koeficijenta prijelaza topline i to koeficijent prijelaza topline konvektivnim isparivanjem α_{cb} i koeficijenta prijelaza topline mjehurastim isparivanjem α_{nb}. Za vrijednost koeficijenta prijelaza topline s unutarnje strane cijevi uzima se veći.

Oba koeficijenta se računaju pomoću koeficijenta prijelaza topline konvekcijom kapljevite faze (Dittus-Boelter korelacija):

$$\alpha_{\mathrm{f}} = 0{,}023\,Re_{\mathrm{f}}^{0{,}8}\,Pr_{\mathrm{f}}^{0{,}4}\left(\frac{\lambda_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{u}}}\right), \qquad \textbf{(135)}$$

$$Re_{\mathrm{f}} = \frac{\dot{m}\,(1-x)\,d_{\mathrm{u}}}{\eta_{\mathrm{f}}}, \tag{136}$$

$$Pr_{\mathrm{f}} = \frac{c_{\mathrm{f}}\,\eta_{\mathrm{f}}}{\lambda_{\mathrm{f}}}. \tag{137}$$

U jednadžbi (136) x je prosječni udio pare pri dvofaznom strujanju. Na početku izmjenjivača udio pare pri dvofaznom strujanju iznosi 0, a na kraju 1 stoga prosječni udio pare pri dvofaznom strujanju iznosi $x = 0{,}5$. $\dot{m}$ je maseni protok koji struji kroz izmjenjivač sveden na površinu presjeka kroz koju struji.

$$\dot{m} = \frac{4\,q_{m\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{u}}^2\,\pi\,N_{\mathrm{uk}}} \tag{138}$$

Froudova značajka za kapljevinu se računa prema:

$$Fr_{\mathrm{f}} = \frac{\dot{m}^2}{\rho_{\mathrm{f}}^2\,g\,d_{\mathrm{u}}}. \tag{139}$$

Dimenzijski parametar N se računa prema :

$$N = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0{,}8}\left(\frac{\rho_{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{f}}}\right)^{0{,}5}. \tag{140}$$

Koeficijent prijelaza topline konvektivnim isparivanjem α_{cb} računa se prema :

$$\alpha_{\mathrm{cb}} = \frac{1{,}8\,\alpha_{\mathrm{f}}}{N^{0{,}8}}. \tag{141}$$

Značajka isparavanja:

$$Bo = \frac{q}{\dot{m}\,\Delta h}. \tag{142}$$

U gornjoj jednadžbi Δh je specifična toplina koju je potrebno dovesti da 1 kg vrele kapljevine ispari. q je toplinski tok, izmijenjen u izmjenjivaču, sveden na površinu izmjenjivača te se računa prema:

$$q = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{d_{\mathrm{u}}\,\pi\,L\,N_{\mathrm{uk}}}. \tag{143}$$

Koeficijent prijelaza topline mjehurastim isparivanjem α_{nb} računa se u ovisnosti o N i Bo.

Ako je $N > 1$ i $Bo > 0{,}0003$:

$$\alpha_{\mathrm{nb}} = 230\,\alpha_{\mathrm{f}}\,Bo^{0{,}5}. \tag{144}$$

Ako je $N > 1$ i $Bo < 0{,}0003$:

$$\alpha_{\mathrm{nb}} = \alpha_{\mathrm{f}}\,(1 + 46\,Bo^{0{,}5}). \tag{145}$$

Ako je $1 > N > 0{,}1$:

$$\alpha_{\mathrm{nb}} = \alpha_{\mathrm{f}}\, F_{\mathrm{S}}\, Bo^{0{,}5} \exp(2{,}74\, N - 0{,}1). \tag{146}$$

Ako je $N < 0{,}1$:

$$\alpha_{\mathrm{nb}} = \alpha_{\mathrm{f}}\, F_{\mathrm{S}}\, Bo^{0{,}5} \exp(2{,}74\, N - 0{,}15). \tag{147}$$

U gornjim jednadžbama F_{S} je Shahova konstanta, čija je vrijednost jednaka $F_{\mathrm{S}} = 14{,}7$ kada je $Bo > 0{,}0011$ i $F_{\mathrm{S}} = 15{,}43$ kada je $Bo < 0{,}0011$.

Koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi računa se prema:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}}\, d_{\mathrm{u}}} + \frac{d_{\mathrm{v}}}{2\lambda_{\mathrm{S}}} \ln \frac{d_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{u}}} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{v}}}}. \tag{148}$$

Površina za izmjenu topline u kotliću:

$$A_0 = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{k\,(\vartheta' - \vartheta_{\mathrm{f}})}, \tag{149}$$

$$A_0 = d_{\mathrm{v}}\, \pi\, L\, N_{\mathrm{uk}}, \tag{150}$$

Kako je za proračun koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane cijevi potrebno poznavati temperaturu stijenke ϑ_{S} i dužinu cijevi L, a obje veličine ovisi o koeficijentu prolaza topline, ovaj je proračun iterativnog karaktera. Temperatura stijenke kontrolira se prema:

$$\vartheta_{\mathrm{s}} = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{A_0\, k_{\mathrm{S}}} + \vartheta_{\mathrm{f}}, \tag{151}$$

$$k_{\mathrm{S}} = \frac{1}{\frac{d_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}}\, d_{\mathrm{u}}} + \frac{d_{\mathrm{v}}}{2\,\lambda_S} \ln \frac{d_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{u}}}}. \tag{152}$$

Na početku proračuna je potrebno pretpostaviti temperaturu stijenke ϑ_{S} i dužinu cijevi L. U nastavku su prikazani rezultati za posljednji korak iteracije.

- toplinski tok doveden u kotliću: $\Phi_{\mathrm{i}} = 151{,}76$ kW,
- cijevi izmjenjivača DN15: $d_{\mathrm{v}} = 0{,}02$ m, $d_{\mathrm{u}} = 0{,}016$ m [10],
- toplinska provodnost materijala stijenke cijevi (čelik): $\lambda_S = 45{,}4$ W/(m K) [4] ,
- ukupan broj cijevi u snopu izmjenjivača: $N_{\mathrm{uk}} = 44$,
- pretpostavljena dužina cijevi izmjenjivača: $L = 0{,}81$ m,
- pretpostavljena temperatura stijenke: $\vartheta_{\mathrm{S}} = 128°C$,
- specifična toplina isparavanja vodene pare 6 bar-a: $r = 2085{,}64$ kJ/kg [4],
- temperatura vodene pare: $\vartheta' = 158{,}83\ °C$,
- srednja temperatura: $\vartheta_{\mathrm{m}} = (\vartheta' + \vartheta_{\mathrm{S}})/2 = 143{,}415°C$,

- toplinska provodnost vode za ϑ_m: $\lambda_\mathrm{w} = 0{,}6829\ \mathrm{W/(m\ K)}$ [4],
- dinamička žilavost vode za ϑ_m: $\eta_\mathrm{w} = 0{,}0001917\ \mathrm{kg/(m\ s)}$ [4],
- gustoća vode za ϑ_m: $\rho_\mathrm{w} = 923{,}08\ \mathrm{kg/m^3}$ [4],
- ubrzanje Zemljine sile teže $g = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$,
- koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi umanjen za 60% zbog nekondenzirajućih plinova:

$$\alpha_\mathrm{v} = 0{,}4 * \frac{4}{3}\left(\frac{g\ \rho_\mathrm{w}^2\ \lambda_\mathrm{w}^3\ r}{4\ \eta_\mathrm{w}\ L\ (\vartheta' - \vartheta_\mathrm{S})}\right)^{1/4} = 2200{,}43\ \mathrm{W/(m^2K)},$$

- maseni protok kapljevine smjese etanol-voda: $q_{m\mathrm{f}} = 0{,}06557\ \mathrm{kg/s}$,
- prosječni udio pare pri dvofaznom strujanju: $x = 0{,}5$,
- temperatura smjese etanol-voda: $\vartheta_\mathrm{f} = 96°\mathrm{C}$,
- gustoća pare smjese etanol-voda za ϑ_f i $\psi = 0{,}011953$ iz jednadžbe idealnog plina: $\rho_\mathrm{d} = 0{,}586\ \mathrm{kg/m^3}$,
- gustoća kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_f i $\xi = 0{,}03$: $\rho_\mathrm{f} = 959{,}18\ \mathrm{kg/m^3}$ [13],
- toplinska provodnost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_f i $\xi = 0{,}03$: $\lambda_\mathrm{f} = 0{,}6856\ \mathrm{W/(m\ K)}$ [13],
- dinamička žilavost kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_f i $\xi = 0{,}03$: $\eta_\mathrm{f} = 0{,}000314$ kg/(m s) [13],
- specifični toplinski kapacitet kapljevine smjese etanol-voda za ϑ_f i $\xi = 0{,}03$: $c_\mathrm{f} = 4229{,}94$ J/(kg K) [13],
- Prandtlova značajka za kapljevinu smjese etanol-voda: $Pr_\mathrm{f} = \frac{c_\mathrm{f}\,\eta_\mathrm{f}}{\lambda_\mathrm{f}} = 1{,}9373$,
- maseni tok koji struji kroz izmjenjivač sveden na površinu presjeka kroz koju struji:

$$\dot{m} = \frac{4\ q_{m\mathrm{f}}}{d_\mathrm{u}^2\ \pi\ N_\mathrm{uk}} = 7{,}416\ \ \mathrm{kg/(m^2\ s)},$$

- toplinski tok sveden na površinu izmjenjivača:

$$q = \frac{\Phi_\mathrm{i}}{d_\mathrm{u}\ \pi\ L\ N_\mathrm{uk}} = 84{,}775\ \ \mathrm{kW/m^2},$$

- Froudeova značajka za kapljevinu smjese etanol-voda:

$$Fr_\mathrm{f} = \frac{\dot{m}^2}{\rho_\mathrm{f}^2\ g\ d_\mathrm{u}} = 0{,}000381,$$

- dimenzijski parametar:

$$N = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0{,}8}\left(\frac{\rho_\mathrm{d}}{\rho_\mathrm{f}}\right)^{0{,}5} = 0{,}02472,$$

- $Re_{\mathrm{f}} = \frac{\dot{m}\,(1-x)\,d_{\mathrm{u}}}{\eta_{\mathrm{f}}} = 188{,}94,$
- koeficijent prijelaza topline konvekcijom kapljevite faze:

$$\alpha_{\mathrm{f}} = 0{,}023\, Re_{\mathrm{f}}^{0{,}8}\, Pr_{\mathrm{f}}^{0{,}4} \left(\frac{\lambda_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{u}}}\right) = 85{,}037\ \mathrm{W/(m^2\ K)},$$

- koeficijent prijelaza topline konvektivnim isparivanjem:

$$\alpha_{\mathrm{cb}} = \frac{1{,}8\,\alpha_{\mathrm{f}}}{N^{0{,}8}} = 2954{,}28\ \mathrm{W/(m^2\ K)},$$

- specifična toplina koju je potrebno dovesti da 1 kg vrele kapljevine ispari:

  $\Delta h = 2265\ \mathrm{kJ/kg},$
- značajka isparavanja:

$$Bo = \frac{q}{\dot{m}\,\Delta h} = 0{,}00505,$$

- kako je $N < 0{,}1$ i $Bo > 0{,}0011$ koeficijent prijelaza topline mjehurastim isparivanjem :

$$\alpha_{\mathrm{nb}} = \alpha_{\mathrm{f}}\, 14{,}7\, Bo^{0{,}5} \exp(2{,}74\, N - 0{,}15) = 81{,}78\ \mathrm{W/(m^2\ K)},$$

- kako je α_{cb}>α_{nb} koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{u}} = \alpha_{\mathrm{cb}} = 2954{,}28\ \ \mathrm{W/(m^2\ K)},$$

- koeficijent prolaza topline kroz cijev sveden na vanjsku površinu cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}}\, d_{\mathrm{u}}} + \frac{d_{\mathrm{v}}}{2\lambda_S} \ln\frac{d_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{u}}} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{v}}}} = 1079{,}07\ \mathrm{W/(m^2\ K)},$$

- površina za izmjenu topline u kotliću:

$$A_0 = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{k\,(\vartheta' - \vartheta_{\mathrm{f}})} = 2{,}238\ \mathrm{m^2},$$

- provjera pretpostavljene dužine cijevi kotlića:

$$L = \frac{A_0}{d_{\mathrm{v}}\,\pi\, N_{\mathrm{uk}}} = 0{,}81\ \mathrm{m},$$

- koeficijent prolaza topline do vanjskog ruba stijenke:

$$k_{\mathrm{S}} = \frac{1}{\frac{d_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}}\, d_{\mathrm{u}}} + \frac{d_{\mathrm{v}}}{2\lambda_{\mathrm{S}}} \ln\frac{d_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{u}}}} = 2117{,}45\ \mathrm{W/(m^2 K)},$$

- kontrola pretpostavljene temperature stijenke:

$$\vartheta_{\mathrm{s}} = \frac{\Phi_{\mathrm{i}}}{A_0\, k_{\mathrm{S}}} + \vartheta_{\mathrm{f}} = 128{,}02\ ^{\circ}\mathrm{C}.$$

Dimenzioniranje priključka za dovod kapljevine smjese etanol-voda:

- brzina strujanja kapljevine: $v_\mathrm{f} = 0{,}25\ \mathrm{m/s}$,
- maseni protok kapljevine :$q_{m\mathrm{f}} = 0{,}06557\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća kapljevine: $\rho_\mathrm{f} = 959{,}18\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\ q_{m\mathrm{f}}}{\rho_\mathrm{f}\ v_\mathrm{f}\ \pi}} = 0{,}0187\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN20.

Dimenzioniranje priključka za odvod pare smjese etanol-voda :

- brzina strujanja pare: $v_\mathrm{d} = 10\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok pare: $q_{m\mathrm{d}} = 0{,}06557\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća pare smjese etanol-voda: $\rho_\mathrm{d} = 0{,}586\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\ q_{m\mathrm{d}}}{\rho_\mathrm{d}\ v_\mathrm{d}\ \pi}} = 0{,}119\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN80.

Dimenzioniranje priključka za dovod vodene pare:

- brzina strujanja vodene pare: $v_\mathrm{p} = 10\ \mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok voden pare: $q_{m\mathrm{p}} = 0{,}07276\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća vodene pare: $\rho_\mathrm{p} = 3{,}1686\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\ q_{m\mathrm{p}}}{\rho_\mathrm{p}\ v_\mathrm{p}\ \pi}} = 0{,}054\mathrm{m},$$

- odabrani priključak D50.

Dimenzioniranje priključka za odvod kondenzata vodene pare:

- brzina strujanja kondenzata: $v_w = 1\mathrm{m/s}$ [16],
- maseni protok kondenzat: $q_{m\mathrm{w}} = q_{m\mathrm{p}} = 0{,}07276\ \mathrm{kg/s}$,
- gustoća kondenzata: $\rho_\mathrm{w} = 908{,}6\ \mathrm{kg/m^3}$,
- unutarnji promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4\, q_{m\mathrm{w}}}{\rho_{\mathrm{w}}\, v_{\mathrm{w}}\, \pi}} = 0{,}0101\ \mathrm{m},$$

- odabrani priključak DN15.

Dimenzije kotlića:

- cijevi DN15,
- dužina cijevi kotlića 900 mm,
- broj cijevi 44,
- plašt kotlića cijev DN200.

6. PRORAČUN ČVRSTOĆE KOTLIĆA

Svi dijelovi kotlića su izrađeni iz čelika P265GH. P265GH je čelik koji se većinom upotrebljava u procesnoj industriji za aparate koji rade na visokim tlakovima i temperaturama, a u ovom slučaju materijal zadovoljava sve potrebne uvjete vezane za čvrstoću.

Mehanička svojstva čelika P265GH (St45.8) prema EN 10028-2:2009 [15]:

- $R_{\mathrm{p0,2/20°C}} = 265\ \mathrm{MPa}$,
- $R_{\mathrm{m/20°C}} = 410\ \mathrm{MPa}$,
- $R_{\mathrm{p0,2/150°C}} = 205\ \mathrm{MPa}$.

Proračunski tlak: $p = 6\ \mathrm{bar}$.

Ispitni tlak: $p' = 12\ \mathrm{bar}$.

Proračunska čvrstoća materijala za radno stanje:

$$f_{\mathrm{d}} = min\left(\frac{R_{\mathrm{p0,2/150°C}}}{1{,}5}; \frac{R_{\mathrm{m/20°C}}}{2{,}4}\right) = 136{,}67\ \mathrm{MPa}, \quad \textbf{(153)}$$

$$K = R_{\mathrm{p0,2/150°C}} = 205\ \mathrm{MPa}. \quad \textbf{(154)}$$

Proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje:

$$K' = R_{p0,2/20°\mathrm{C}} = 265\ \ \mathrm{MPa}. \quad \textbf{(155)}$$

Plašt kotlića izrađen je od šavne cijev DN200 debljine stijenke 4 mm te ima na sebi dva priključka DN50 i DN15. Za plašt kotlića potrebno je provesti proračun debljine stijenke prema normi HRN M.E2.253 te proračun debljine stijenke oko izreza prema normi HRN M.E2.256. Cijevne stijene su izrađene od slijepih prirubnica B-200-PN6-DIN2527- St45.8 na kojima su izbušene rupe za bešavne cijevi DN15 duljine 900 mm. Cijevna stijena je navarena na plašt, a cijevi su uvaljane. Proračun čvrstoće cijevnih stijena provodi se prema normi HRN M.E2.259. Za podnice su odabrane plitke podnice DIN28011-219,1x4-St45.8 na koje su navarene ravne prirubnice A 200x219,1 DIN2573- St45.8. Na gornjoj podnici nalazi se priključak DN80, a na donjoj DN20. Proračun čvrstoće podnica to jest potrebne debljine stijenke provodi se prema normi HRN M.E2.252, a proračun debljine stijenke oko izreza prema normi HRN M.E2.256. Između cijevni stijena i ravnih prirubnica, koja su zavarene na podnice, nalazi se brtva od klingerita DN200 unutar kruga rupa (oznaka materijala It200 koji se primjenjuje za tlakove do 40 bar-a i temperature do 400°C [12]). Prema normi HRN

M.E2.258 za standardne prirubnice do otvora 600 mm nije potrebno provesti naknadni proračun. Za vijačni spoj koji povezuje cijevnu stijenu i prirubnicu potrebno je provesti proračun čvrstoće prema normi HRN M.E2.257. Oslonac kotlića izveden pomoću kratke cijevi 4mm s bočnim ojačanjima za koji nije potrebno provesti proračun čvrstoće.

6.1. Plašt

Proračun čvrstoće plašta proveden je prema normi HRN M.E2.253 [14]. Područje primjene norme za ravne cilindrične plašteve kod kojih odnos vanjskog i unutarnjeg promjera plašta iznosi:

$$\frac{D_\mathrm{v}}{D_\mathrm{u}} \leq 1{,}2. \tag{156}$$

Potrebna debljina stijenke cilindričnog plašta za radno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s} = \frac{D_\mathrm{v}\, p}{20\, \frac{K}{S}\, \upsilon + p} + c_1 + c_2. \tag{157}$$

Potrebna debljina stijenke cilindričnog plašta za ispitno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s}' = \frac{D_\mathrm{v}\, p'}{20\, \frac{K'}{S'}\, \upsilon + p'} + c_1 + c_2. \tag{158}$$

Za plašt kotlića je izrađen od šavne cijevi DN 200.

- izvedena debljina stijenke plašta: $s_\mathrm{e} = 4$ mm,
- vanjski promjer plašta: $D_\mathrm{v} = 219{,}1$ mm,
- unutarnji promjer plašta; $D_\mathrm{u} = 211{,}1$ mm,
- uvjet za primjenu norme zadovoljen: $\frac{D_\mathrm{v}}{D_\mathrm{u}} = 1{,}038 \leq 1{,}2$,
- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- koeficijent valjanosti zavarenog spoja: $\upsilon = 1$ [14],
- dodatak za dopušteno odstupanje materijala: $c_1 = 0{,}35$ mm [14],
- dodatak zbog smanjenja korozijom i trošenjem: $c_2 = 1$ mm [14],

- potrebna debljina stijenke plašta za radno stanje:

$$s = \frac{D_v\, p}{20\, \frac{K}{S}\, v + p} + c_1 + c_2 = 1{,}83\text{mm},$$

- potrebna debljina stijenke plašta za ispitno stanje:

$$s' = \frac{D_v\, p'}{20\, \frac{K'}{S'}\, v + p'} + c_{1+}c_2 = 1{,}89 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina stijenke $s_e = 4$ mm je veća i od potrebne za radno stanje i za ispitno stanje stoga se usvaja.

Na plaštu kotlića postoje dva priključka za dovod pare i odvod kondenzata te je potrebno proračunati izrez u plaštu. Proračun izreza u cilindrima izvrgnutim djelovanju unutarnjeg tlaka provodi se prema normi HRN M.E2.256 [14]. Proračunava se samo za veći priključak to jest izrez, a u ovom slučaju je to izrez za priključak dovoda pare. Područje primjene norme:

$$0{,}002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0{,}1. \qquad \textbf{(159)}$$

Potrebna debljina stijenke oko izreza za radno stanje računa se prema:

$$s_A = \frac{D_v\, p}{20\, \frac{K}{S}\, v_A + p} + c_1 + c_2. \qquad \textbf{(160)}$$

Potrebna debljina stijenke oko izreza za ispitno stanje računa se prema:

$$s_A' = \frac{D_v\, p'}{20\, \frac{K'}{S'}\, v_A + p'} + c_1 + c_2. \qquad \textbf{(161)}$$

Priključak za dovod pare je DN50.

- izvedena debljina stijenke plašta: $s_e = 4$ mm,
- vanjski promjer plašta: $D_v = 219{,}1$ mm,
- unutarnji promjer plašta: $D_u = 211{,}1$ mm,
- dodatak za dopušteno odstupanje materijala: $c_1 = 0{,}35$ mm [14],
- dodatak zbog smanjenja korozijom i trošenjem: $c_2 = 1$ mm [14],
- područje primjene norme:

$$0{,}002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_v} = 0{,}0121 \leq 0{,}1,$$

- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,

- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- promjer izreza d_v jednak je vanjskom promjeru cijevi priključka: $d_\mathrm{v} = 57$ mm [10],
- debljina stijenke cijevnog priključka: $s_\mathrm{S} = 2{,}9$ mm [10],
- koeficijent oslabljenja izrezom u cilindru: $\upsilon_\mathrm{A} = 0{,}54$ [14],
- potrebna debljina stijenke oko izreza za radno stanje:

$$s_\mathrm{A} = \frac{D_\mathrm{v}\, p}{20\, \frac{K}{S}\, \upsilon_\mathrm{A} + p} + c_1 + c_2 = 2{,}237 \text{ mm},$$

- potrebna debljina stijenke oko izreza za ispitno stanje:

$$s_\mathrm{A}' = \frac{D_\mathrm{v}\, p'}{20\, \frac{K'}{S'}\, \upsilon_\mathrm{A} + p'} + c_1 + c_2 = 2{,}356 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina stijenke $s_\mathrm{e} = 4$ mm je veća i od potrebne debljine stijenke oko izreza za radno stanje i za ispitno stanje te stoga nema potrebe stavljati nikakva ojačanja oko izreza.

Razmak između izreza kada se može zanemariti međusobni utjecaj izreza za radno stanje:

$$t \geq 2\sqrt{(D_\mathrm{u} - s_\mathrm{A} - c_1 - c_2)(s_\mathrm{A} - c_1 - c_2)} = 27{,}134 \text{ mm}. \quad \textbf{(162)}$$

Razmak između izreza kada se može zanemariti međusobni utjecaj izreza za ispitno stanje:

$$t' \geq 2\sqrt{\left(D_\mathrm{u} - s_\mathrm{A}' - c_1 - c_2\right)(s_\mathrm{A} - c_1 - c_2)} = 28{,}89 \text{ mm}. \quad \textbf{(163)}$$

Razmak između priključaka je 400 mm te se međusobni utjecaj izreza i za radno i za ispitno stanje može zanemariti.

6.2. Cijevna stijena

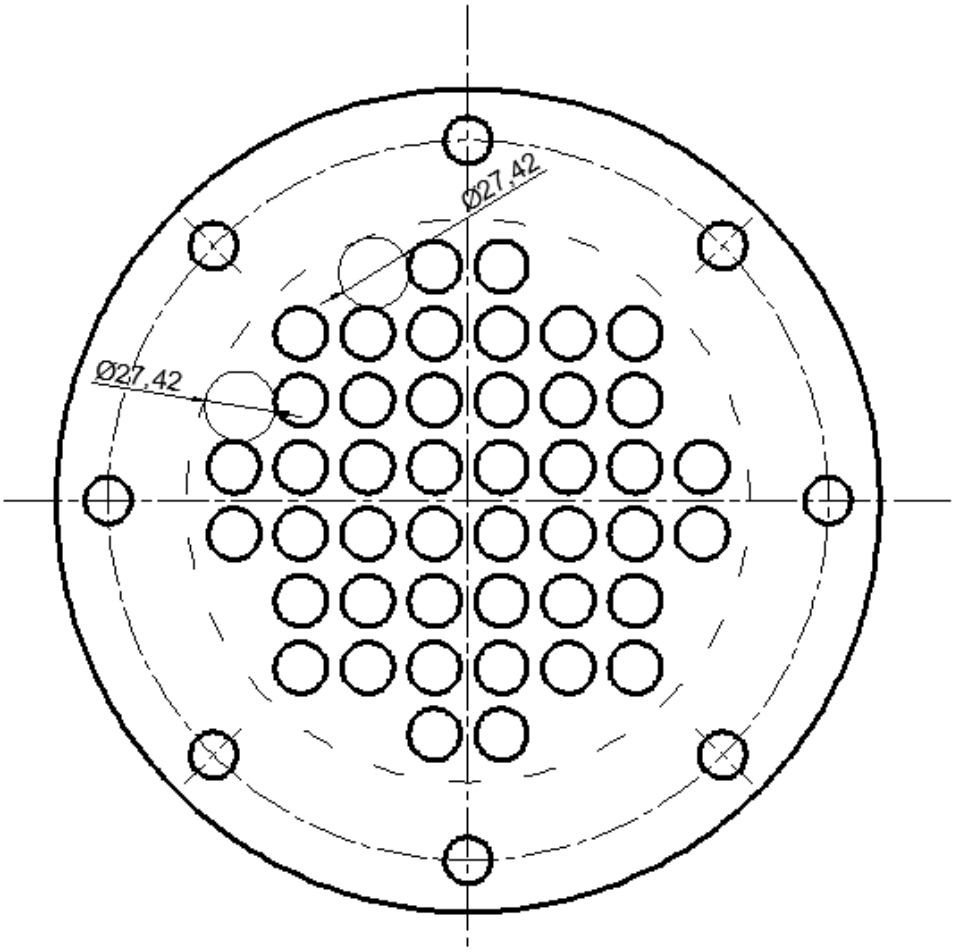
Proračun čvrstoće cijevne stijene se provodi prema normi HRN M.E2.259 [14]. Potrebna debljina cijevne stijene za radno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s} = 0{,}4\, d_2 \sqrt{\frac{p\, S}{10K}}\,. \quad \textbf{(164)}$$

Potrebna debljina cijevne stijene za ispitno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s}' = 0{,}4\, d_2 \sqrt{\frac{p'\, S'}{10\, K'}}\,. \quad \textbf{(165)}$$

Na Slika 29 prikazan je proračunski promjer d_2 to jest najveći promjer upisanog kruga u dio s cijevima.



Slika 29. Proračunski promjer

Cijevna stijena je izrađena od slijepe prirubnica B-200-PN6-DIN2527- St45.8 [12] na kojoj su izbušene rupe za cijevi.

- izvedena debljina cijevne stijene: $s_e = 20$ mm [12],
- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- proračunski promjer: $d_2 = 27{,}42$ mm,

- potrebna debljina cijevne stijene za radno stanje računa se prema:

$$s = 0{,}4\, d_2 \sqrt{\frac{p\, S}{10\, K}} = 0{,}727 \text{ mm},$$

- potrebna debljina cijevne stijene za ispitno stanje:

$$s' = 0{,}4\, d_2 \sqrt{\frac{p'\, S'}{10\, K'}} = 0{,}774 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina cijevne stijene $s_e = 20$ mm je veća i od potrebne za radno i za ispitno stanje stoga se usvaja odabrana.

Potrebno je još proračunati cijevi na izvijanje odnosno potrebnu debljinu stijenke cijevne stijene zbog izvijanja cijevi.

Potrebna debljina stijenke cijevne stijene za radno stanje zbog izvijanja cijevi računa se prema:

$$s = C \sqrt{\frac{D_1^2 - N_{uk}\, d_v^2}{\upsilon} \frac{p\, S}{10\, K}}. \qquad \textbf{(166)}$$

Potrebna debljina cijevne stijene za ispitno stanje zbog izvijanja cijevi računa se prema:

$$s' = C \sqrt{\frac{D_1^2 - N_{uk}\, d_v^2}{\upsilon} \frac{p'\, S'}{10\, K'}}. \qquad \textbf{(167)}$$

Cijevi izmjenjivača DN15.

- izvedena debljina cijevne stijene: $s_e = 20$ mm [12],
- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- broj cijevi: $N_{uk} = 44$,
- vanjski promjer cijevi: $d_v = 20$ mm,
- proračunski promjer: $D_1 = 221$ mm,
- koeficijent: C =0,45 [14],
- koeficijent oslabljenja: $\upsilon = 0{,}3$ [14],

- potrebna debljina stijenke cijevne stijene za radno stanje zbog izvijanja cijevi:

$$s = C\sqrt{\frac{D_1^2 - N_{uk} d_v^2}{\upsilon} \frac{p\,S}{10\,K}} = 9{,}62 \text{ mm},$$

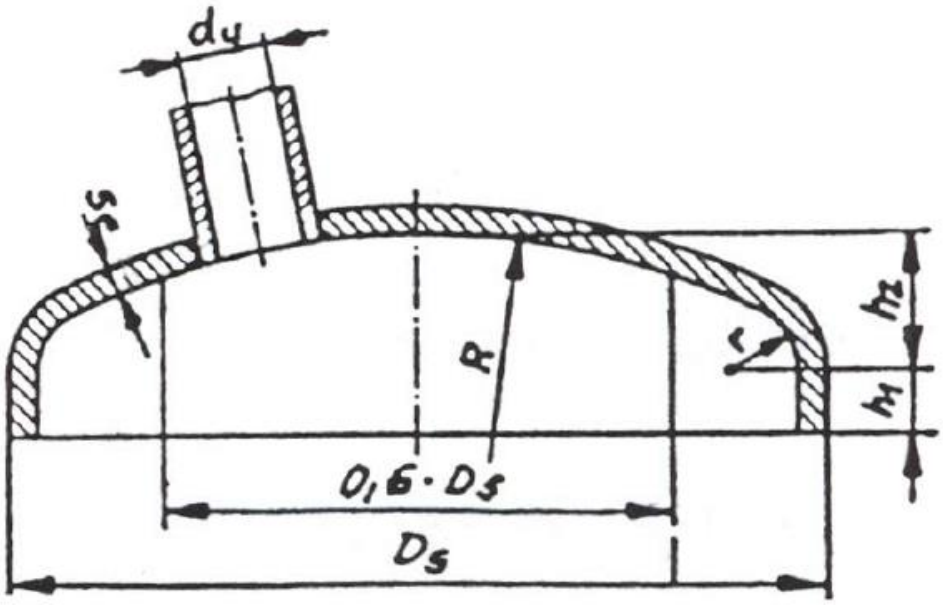
- Potrebna debljina cijevne stijene za ispitno stanje zbog izvijanja cijevi:

$$s' = C\sqrt{\frac{D_1^2 - N_{uk} d_v^2}{\upsilon} \frac{p'\,S'}{10\,K'}} = 10{,}01 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina cijevne stijene $s_e = 20$ mm je veća i od potrebne za radno i za ispitno stanje stoga se usvaja.

6.3. Podnica

Na kotliću postoje dvije iste podnice jedna na dnu gdje se dovodi kapljevina smjese etanol-voda i jedna na vrhu gdje se odvodi para smjese etanol-voda. Obje su plitke podnice DIN 28011-219-1x4- St45.8 izrađene segmentnim prešanjem i obrubljivanjem. Obje imaju izrez za priključak. Kako gornja podnica ima veći izrez za priključak proračunat će se samo gornja, a to će vrijediti i za donju.



Slika 30. Plitka podnica s priključkom [14]

Podnice izvrgnute unutarnjem tlaku računaju se prema normi HRN M.E2.252 [14]. Područje primjene norme za plitke podnice:

$$0{,}001 \leq \frac{s_\mathrm{e} - c_1 - c_2}{D_\mathrm{s}} \leq 0{,}1. \quad \textbf{(168)}$$

Potrebna debljina stijenke kalote za radno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s} = \frac{2\,p\,(R + s_\mathrm{e})}{40\,\frac{K}{S}\upsilon + p} + c_1 + c_2. \quad \textbf{(169)}$$

Potrebna debljina stijenke kalote za ispitno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s}' = \frac{2\,p'\,(R + s_\mathrm{e})}{40\,\frac{K'}{S'}\,\upsilon + p'} + c_1 + c_2 \quad \textbf{(170)}$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela za radno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s} = \frac{p\,D_\mathrm{s}\,\beta}{40\,\frac{K}{S}\,\upsilon} + c_1 + c_2. \quad \textbf{(171)}$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela za ispitno stanje računa se prema:

$$\mathrm{s}' = \frac{p' D_\mathrm{s} \beta}{40\,\frac{K'}{S'}\upsilon} + c_1 + c_2. \quad \textbf{(172)}$$

Plitka podnica DIN 28011-219-1x4- St45.8.

- izvedena debljina podnice: $s_\mathrm{e} = 4$ mm,
- vanjski promjer podnice: $D_\mathrm{s} = 219{,}1$ mm,
- unutarnji promjer podnice: $D_\mathrm{u} = 211{,}1$ mm,
- dodatak za dopušteno odstupanje materijala: $c_1 = 0{,}4$ mm [14],
- dodatak zbog smanjenja korozijom i trošenjem: $c_2 = 1$ mm [14],
- uvjet za primjenu norme zadovoljen:

$$0{,}001 \leq \frac{s_\mathrm{e} - c_1 - c_2}{D_\mathrm{s}} = 0{,}012 \leq 0{,}1,$$

- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- koeficijent valjanosti zavarenog spoja: $\upsilon = 1$ [14],

- koeficijent oblika podnice: $\beta = 5{,}5$ [14],
- unutarnji radijus kalote: $R = 219{,}1$ mm,
- potrebna debljina stijenke kalote za radno stanje:

$$s = \frac{2\,p\,(R + s_e)}{40\,\frac{K}{S}\,v + p} + c_1 + c_2 = 1{,}89 \text{ mm},$$

- potrebna debljina stijenke kalote za ispitno stanje:

$$s' = \frac{2\,p'\,(R + s_e)}{40\,\frac{K'}{S'}\,v + p'} + c_1 + c_2 = 1{,}93 \text{ mm},$$

- potrebna debljina stijenke torusnog dijela za radno stanje:

$$s = \frac{p\,D_s\,\beta}{40\,\frac{K}{S}\,v} + c_1 + c_2 = 2{,}72 \text{ mm},$$

- potrebna debljina stijenke torusnog dijela za ispitno stanje:

$$s' = \frac{p'\,D_s\,\beta}{40\,\frac{K'}{S'}\,v} + c_1 + c_2 = 2{,}83 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina stijenke $s_e = 4$ mm je veća i od potrebne za radno stanje i za ispitno stanje te stoga se usvaja.

Kako se izrezi na obje podnice nalaze unutar $0{,}6D_s$ proračun provest će se prema normi HRN M.E2.256, izrezi na kuglama [14]. Područje primjene norme:

$$0{,}002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} \leq 0{,}1. \qquad \textbf{(173)}$$

Potrebna debljina stijenke oko izreza za radno stanje računa se prema:

$$s_A = \frac{D_s\;p}{40\,\frac{K}{S}\,v_A + p} + c_1 + c_2. \qquad \textbf{(174)}$$

Potrebna debljina stijenke oko izreza za ispitno stanje računa se prema:

$$s_A' = \frac{D_s\,p'}{40\,\frac{K'}{S'}\,v_A + p'} + c_1 + c_2. \qquad \textbf{(175)}$$

Priključak za odvod pare smjese etanol-voda je DN80.

- izvedena debljina stijenke podnice: $s_e = 4$ mm,
- vanjski promjer kalote podnice: $D_s = 446{,}2$mm,
- unutarnji promjer kalote podnice: $D_u = 438{,}2$ mm,
- dodatak za dopušteno odstupanje materijala: $c_1 = 0{,}4$ mm [14],
- dodatak zbog smanjenja korozijom i trošenjem: $c_2 = 1$ mm [14],

- područje primjene norme:

$$0{,}002 \leq \frac{s_\mathrm{e} - c_1 - c_2}{D_\mathrm{s}} = 0{,}0058 \leq 0{,}1,$$

- proračunska čvrstoća materijala za radno stanje: $K = 205$ MPa,
- proračunska čvrstoća materijala za ispitno stanje: $K' = 265$ MPa,
- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- stupanj sigurnosti pri radnom stanju: $S = 1{,}5$ [14],
- stupanj sigurnosti pri ispitnom stanju: $S' = 1{,}1$ [14],
- promjer izreza d_v jednak je vanjskom promjeru cijevi priključka: $d_\mathrm{v} = 88{,}9$ mm [10],
- debljina stijenke cijevnog priključka: $s_\mathrm{S} = 3{,}2$ mm [10],
- koeficijent oslabljenja izrezom u kugli: $\upsilon_\mathrm{A} = 0{,}56$ [14],
- potrebna debljina stijenke oko izreza za radno stanje:

$$s_\mathrm{A} = \frac{D_\mathrm{s}\, p}{40\, \frac{K}{S}\, \upsilon_\mathrm{A} + p} + c_1 + c_2 = 2{,}075 \text{ mm},$$

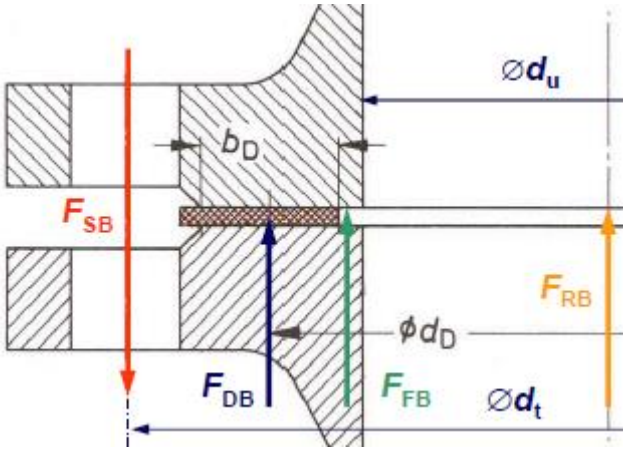
- potrebna debljina stijenke oko izreza:

$$s_\mathrm{A}' = \frac{D_\mathrm{s}\, p'}{40\, \frac{K'}{S'}\, \upsilon_\mathrm{A} + p'} + c_1 + c_2 = 2{,}62 \text{ mm}.$$

Izvedena debljina stijenke $s_\mathrm{e} = 4$ mm je veća i od potrebne debljine stijenke oko izreza za radno stanje i za ispitno stanje te stoga nema potrebe stavljati ojačanja oko izreza.

6.4. Vijačni spoj

Za kružni vijačni spoj s brtvom unutar kruga rupa koji povezuje cijevnu stijenu i prirubnicu potrebno je provesti proračun čvrstoće prema normi HRN M.E2.257 [14].



Slika 31. Sila u vijcima [14]

Na Slika 31 dan je prikaz sila koji djeluju na vijke, oznake sila na gornjoj slici su F_{SB}- najmanja sila u vijcima, F_{RB}- sila uslijed djelovanja tlak na gornju površinu, F_{FB}-sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom, F_{DB}-sila u brtvi.

Sila u vijcima za radno stanje računa se prema:

$$F_{\mathrm{SB}} = F_{\mathrm{RB}} + F_{\mathrm{FB}} + F_{\mathrm{DB}}, \tag{176}$$

$$F_{\mathrm{RB}} = \frac{p\,\pi\,d_{\mathrm{u}}^2}{40}, \tag{177}$$

$$F_{\mathrm{FB}} = \frac{p\,\pi\,(d_{\mathrm{D}}^2 - d_{\mathrm{u}}^2)}{40}, \tag{178}$$

$$F_{\mathrm{DB}} = \frac{1{,}2\,p\,\pi\,d_{\mathrm{D}}\,k_1}{10}. \tag{179}$$

Sila u vijcima za ispitno stanje računa se prema:

$$F'_{\mathrm{SB}} = F'_{\mathrm{RB}} + F'_{\mathrm{FB}} + F'_{\mathrm{DB}}, \tag{180}$$

$$F'_{\mathrm{RB}} = \frac{p'\,\pi\,d_{\mathrm{u}}^2}{40}, \tag{181}$$

$$F'_{\mathrm{FB}} = \frac{p'\,\pi(d_{\mathrm{D}}^2 - d_{\mathrm{u}}^2)}{40}, \tag{182}$$

$$F'_{\mathrm{DB}} = \frac{1{,}2\,p'\,\pi\,d_{\mathrm{D}}\,k_1}{10}. \tag{183}$$

Sila u vijcima za ugradbeno stanje:

$$F_{\mathrm{DV}} = \pi\, d_{\mathrm{D}}\, k_0\, K_{\mathrm{D}}, \tag{184}$$

Ako je $F_{\mathrm{DV}} > F_{\mathrm{SB}}$:

$$F_{\mathrm{DV}} = 0{,}2\, F_{\mathrm{DV}} + 0{,}8\sqrt{F_{\mathrm{SB}}\, F_{\mathrm{DV}}}. \tag{185}$$

Potreban promjer jezgre navoja d_{k} za radno stanje :

$$d_{\mathrm{k}} = Z\sqrt{\frac{F_{\mathrm{SB}}}{K\, n}} + c_5. \tag{186}$$

Potreban promjer jezgre navoja d_{k} za ispitno stanje :

$$d_{\mathrm{k}} = Z'\sqrt{\frac{F'_{\mathrm{FB}}}{K\, n}}. \tag{187}$$

Potreban promjer jezgre navoja d_{k} za ugradbeno stanje:

$$d_{\mathrm{k}} = Z'\sqrt{\frac{F_{\mathrm{DV}}}{K\, n}}. \tag{188}$$

Prirubnica i cijevna stijena su povezane s 8 vijaka M16x70 kvalitete 8.8.

- proračunski tlak: $p = 6$ bar,
- ispitni tlak: $p' = 12$ bar,
- korisna širina brtve: $b_{\mathrm{D}} = 121$ mm [14],
- sredni promjer brtve: $d_{\mathrm{D}} = 241$ mm [14],
- unutrašnji promjer podnice: $d_{\mathrm{u}} = 211{,}1$ mm [14],
- koeficijent brtve za radno stanje: $k_1 = b_{\mathrm{D}} = 21$mm [14],
- broj vijaka: $n = 8$,
- sila uslijed djelovanja tlak na gornju površinu za radno stanje:

$$F_{\mathrm{RB}} = \frac{p\, \pi\, d_{\mathrm{u}}^2}{40} = 20999{,}9 \text{ N},$$

- sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom za radno stanje:

$$F_{\mathrm{FB}} = \frac{p\, \pi (d_{\mathrm{D}}^2 - d_{\mathrm{u}}^2)}{40} = 6370{,}1 \text{ N},$$

- sila u brtvi za radno stanje:

$$F_{\mathrm{DB}} = \frac{1{,}2\, p\, \pi\, d_{\mathrm{D}}\, k_1}{10} = 11447{,}7 \text{ N}$$

- sila u vijcima za radno stanje:

$$F_{\mathrm{SB}} = F_{\mathrm{RB}} + F_{\mathrm{FB}} + F_{\mathrm{DB}} = 38817{,}7 \text{ N},$$

- sila uslijed djelovanja tlak na gornju površinu za ispitno stanje:

$$F'_{\mathrm{RB}} = \frac{p'\,\pi\, d_{\mathrm{u}}^2}{40} = 41999{,}8 \text{ N},$$

- sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom za ispitno stanje:

$$F'_{\mathrm{FB}} = \frac{p'\,\pi\,(d_{\mathrm{D}}^2 - d_{\mathrm{u}}^2)}{40} = 12740{,}2 \text{ N},$$

- sila u brtvi za ispitno stanje:

$$F'_{\mathrm{DB}} = \frac{1{,}2\, p'\,\pi\, d_{\mathrm{D}}\, k_1}{10} = 22895{,}4 \text{ N},$$

- sila u vijcima za ispitno stanje:

$$F'_{\mathrm{SB}} = F'_{\mathrm{RB}} + F'_{\mathrm{FB}} + F'_{\mathrm{DB}} = 77635{,}4 \text{ N},$$

- pomoćna vrijednost: $k_0\, K_{\mathrm{D}} = 15\, b_{\mathrm{d}} = 315 \text{ N/mm}$ [14],
- sila u vijcima za ugradbeno stanje:

$$F_{\mathrm{DV}} = \pi\, d_{\mathrm{D}}\, k_0\, K_{\mathrm{D}} = 238494 \text{ N},$$

- $F_{\mathrm{DV}} > F_{\mathrm{SB}}$:

$$F_{\mathrm{DV}} = 0{,}2\, F_{\mathrm{DV}} + 0{,}8\sqrt{F_{\mathrm{SB}}\, F_{\mathrm{DV}}} = 124672{,}7 \text{ N},$$

- proračunska čvrstoća materijala vijka: $K = 640 \text{ N/mm}^2$,
- pomoćna vrijednost za radno stanje: $Z = 2{,}52$ [14],
- konstrukcijski dodatak: $c_5 = 3$ mm [14],
- pomoćna vrijednost za ispitno i ugradbeno stanje: $Z' = 1{,}95$ [14],
- potreban promjer jezgre navoja d_{k} za radno stanje:

$$d_{\mathrm{k}} = Z\sqrt{\frac{F_{\mathrm{SB}}}{K\, n}} + c_5 = 9{,}94 \text{ mm},$$

- potreban promjer jezgre navoja d_{k} za ispitno stanje:

$$d_{\mathrm{k}} = Z'\sqrt{\frac{F'_{\mathrm{FB}}}{K\, n}} = 7{,}59 \text{ mm},$$

- potreban promjer jezgre navoja d_{k} za ugradbeno stanje:

$$d_{\mathrm{k}} = Z'\sqrt{\frac{F_{\mathrm{DV}}}{K\, n}} = 9{,}62 \text{ mm}.$$

Jezgra navoja M16 ima promjer 13,8 mm što je veće od potrebnih stoga vijak M16x70 kvalitete 8.8. zadovoljava uvjete čvrstoće.

7. ZAKLJUČAK

Provedenom energijskom analizom rektifikacijske spojene kolone utvrđeno je kako je ovaj postupak velik potrošač i rashladne i toplinske energije. Energijskom analizom rektifikacijske kolone za idealan slučaj uz primjenu energetskih ušteda određen je sastav džibre za koji je specifični potrošak energije minimalan dok je optimalan sastav proizvoda određen prema kriteriju minimalnog broja plitica. Uz energijsku analizu spojene kolone uz primjenu energetskih ušteda, analizirane su spojena kolone bez ušteda i spojena kolona s hlađenjem deflegmatora kominom. Usporedbom analiza izveli su se zaključci o smanjenju snage kotlića odnosno smanjenju potrošnje energije za pogon kolone s povećanjem entalpije komine na ulazu u kolonu koje se optimalnim vođenjem procesa može ostvariti bez dodatne potrošnje energije. Provedenom energijskom analizom za realan slučaj određeni su parametri procesa koji su korišteni u nastavku rada.

Teorijski broj plitica određen je prema postupku McCabea i Thielea i iz $h\xi$-dijagrama. Oba postupka daju iste rezultate, stoga oba su primjenjiva za izračun teorijskog broja plitica pri destilaciji smjese etanol-voda.

Odabrana vrsta plitica su sitaste plitice zbog svog velikog kapaciteta, niske cijene, niske cijene održavanja, dobro poznatih modela proračuna i primjene u kolonama kod kojih nema velike promjene kapaciteta. Proračunom dimenzija plitica određene su dimenzije svake pojedine plitice. U praksi, svaka kolona ima isti promjer cijelom dužinom, stoga je za vanjski promjer svih plitica određena ista vrijednost. Za plitice koje pripadaju dijelu za jačanje i za plitice koje pripadaju dijelu za iscrpljivanje određeni su posebno parametri razmaka između plitica, promjer otvora na pliticama, aktivne površine i površine preljeva uz uvjet da plavljenje preljeva i plavljenje plitice bude preko 50% za svaku pliticu. U dijelu kolone za jačanje protoci pare su znatno veći od protoka pare u dijelu za iscrpljivanje pa su aktivna površina i promjer otvora na pliticama veći nego u dijelu za iscrpljivanje. Dok je protok kapljevine u dijelu za iscrpljivanje veći nego u dijelu za jačanje pa su površine preljeva veće u dijelu za iscrpljivanje nego u dijelu za jačanje. Za svojstva na svakoj plitici, određen je stupanj djelotvornosti te je uprosječena za svaki dio kolone. Pomoću uprosječenog stupnja djelotvornosti određen je realan broj plitica za svaki dio kolone.

Uz gore sve navedeno proveden je termodinamički proračun svih elemenata uređaja i proračun čvrstoće kotlića.

LITERATURA

[1] Bošnjaković, F., ***Nauka o toplini III***, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.

[2] Galović, A., ***Termodinamika I***, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[3] Galović, A., ***Termodinamika II***, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[4] Halasz, B.; Galović, A.; Boras, I., ***Toplinske tablice***, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[5] Kadlec, P.; Henke, S.; Bubnik, Z.; ***Properties of ethanol and ethanol-water solutions – Tables and Equations***,SugarIndustry / Zuckerindustrie 135, (2010), No. 10 607-613

[6] Kister, H.Z., ***Distillation-Design,*** McGraw-Hill, New York, 1992.

[7] Beer, E., ***Destilacija***, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 2006.

[8] Slipčević, B., ***Razmjenjivači topline sa primjerima iz rashladne tehnike***, SMEITS, Beograd, 1989.

[9] Thome, J.R., ***Engineering Data Book III***, Lausanne, 2010.

[10] ***Krautov strojarski priručnik***, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.

[11] ***VDI Heat Atlas: Springer-Verlag***, Berlin Heidelberg, 2010.

[12] ***IPIM: Tehnički priručnik za procesnu industriju***, IPIM, Zagreb, 1993.

[13] Tschubik, I.A.; Maslow, A.M.; ***Wärmephysikalische Konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten***, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1973.

[14] Boras, I.; Švaić, S.; ***Podloge za predavanja iz kolegija Gradnja aparata***

[15] http://www.steelnumber.com/

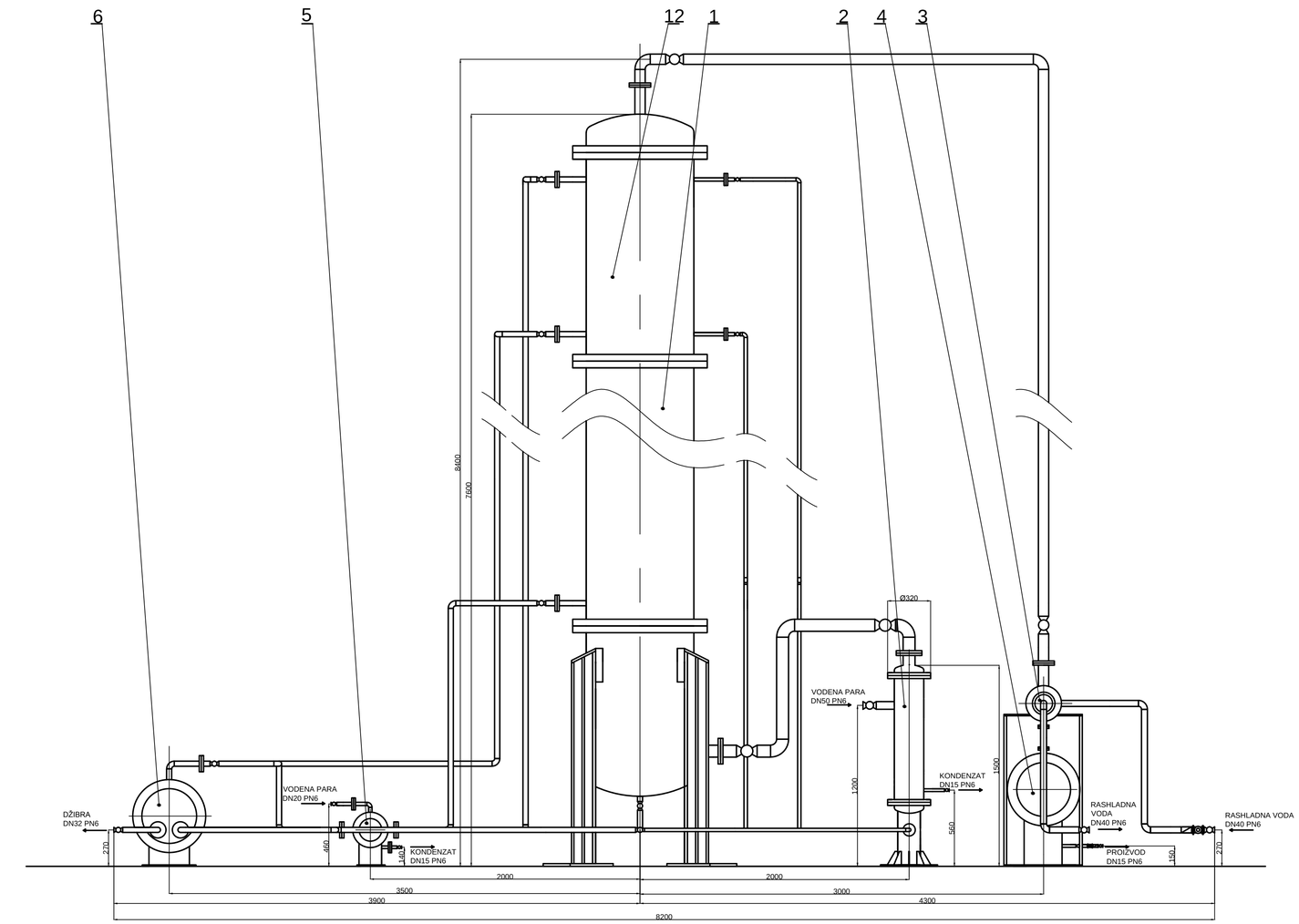
[16] Ruševljan, M., ***Cjevovodi***, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

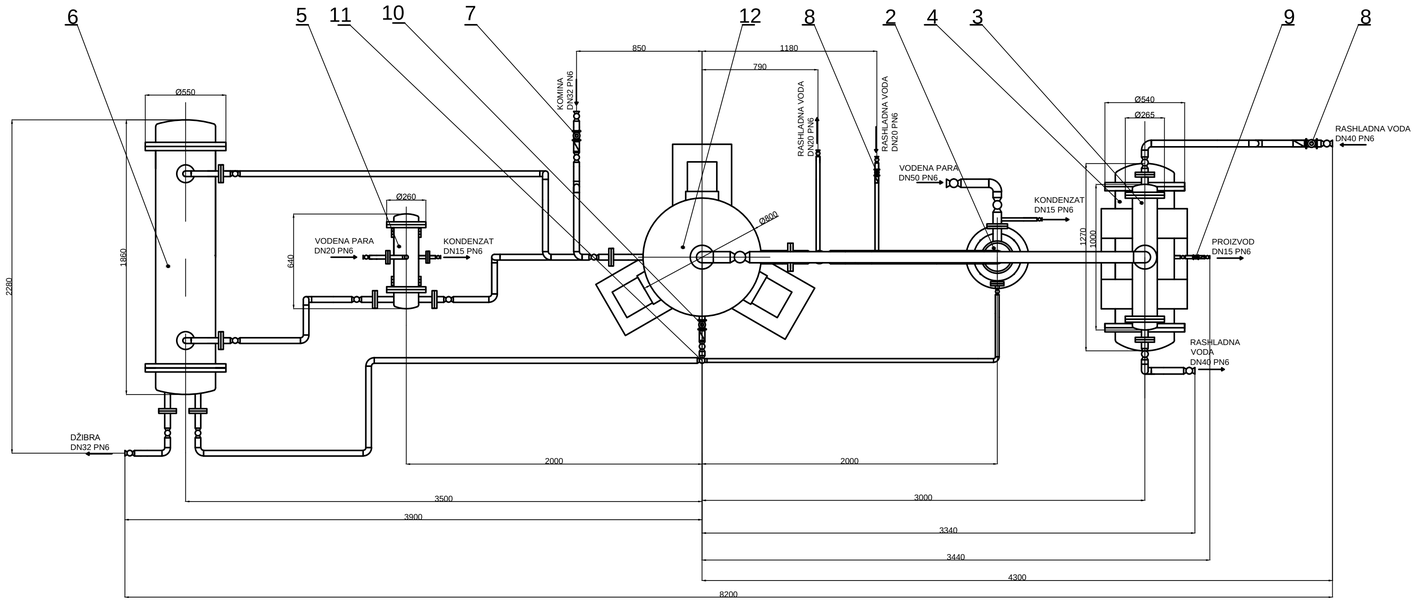
PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT





Poz.	Naziv
12	DEFLEGMATOR
11	TROPUTNI VENTIL
10	PUMPA DŽIBRE
9	PUMPA PROIZVODA
8	PUMPA RASHLADNE VODE
7	PUMPA KOMINE
6	ŠTEDNA GRIJALICA
5	DOGRIJAČ KOMINE
4	SPREMNIK PROIZVODA
3	KONDENZATOR
2	KOTLIĆ
1	KOLONA

	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Razradio	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Crtao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Pregledao	18.1.2018.	doc.dr.sc. Nenad Ferdelji	

FSB Zagreb

Mjerilo originala: M 1:20

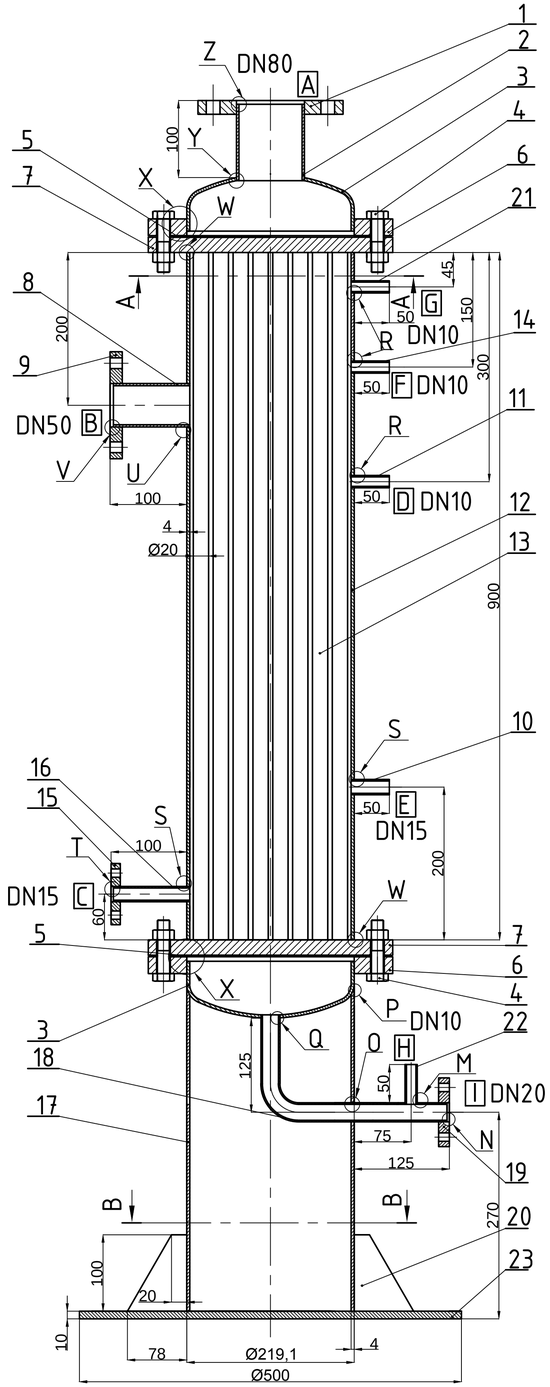
Naziv: Dispozicijski crtež postrojenja

Crtež broj: 1-2018

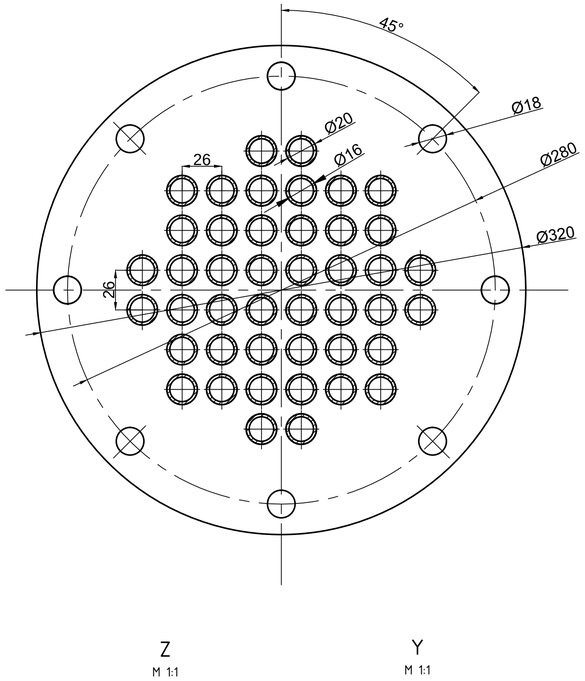
Design by AutoDesk

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

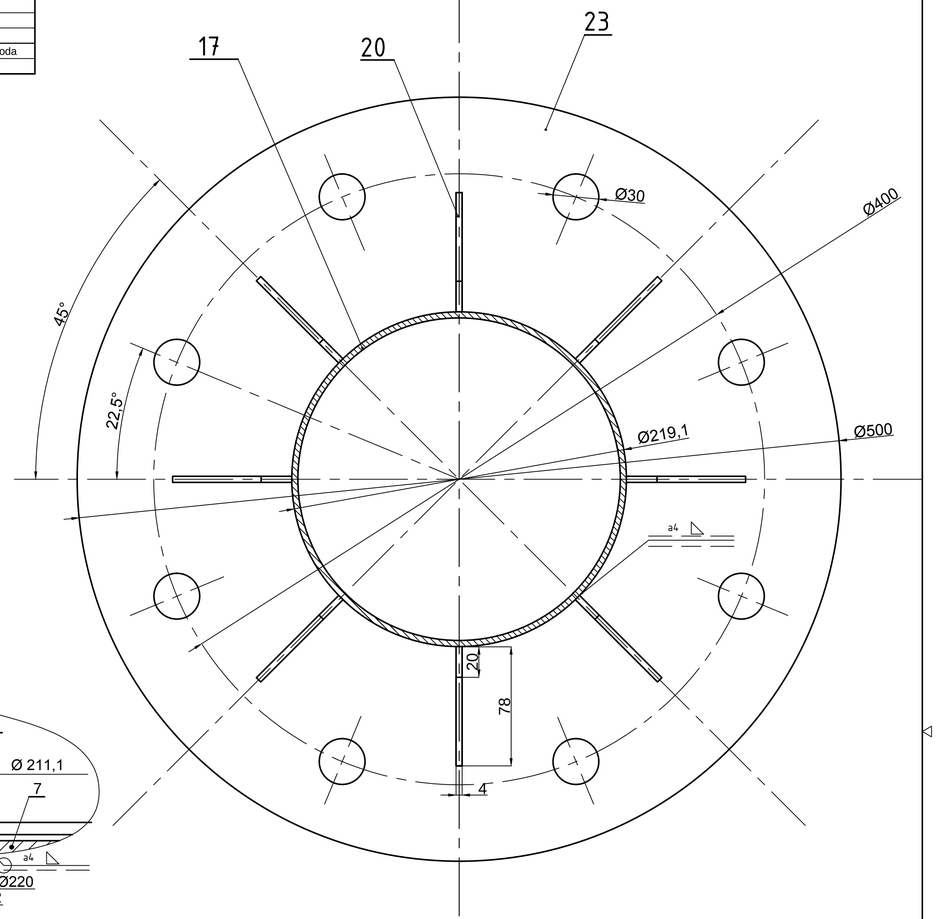


PRESJEK
A-A
M 1:2

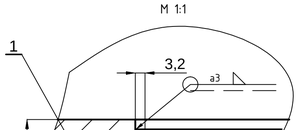


POPIS PRIKLJUČAKA	
A	Odvod pare smjese etanol-voda
B	Dovod vodene pare
C	Odvod kondenzata
D	Manometar
E	Termometar
F	Sigurnosni ventil
G	Odračivanje
I	Dovod kapljevine smjese etanol-voda
H	Nivo sonda

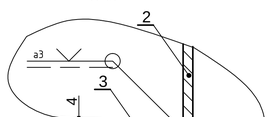
PRESJEK
B-B
M 1:2



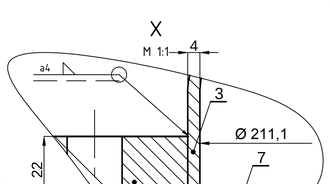
Z
M 1:1



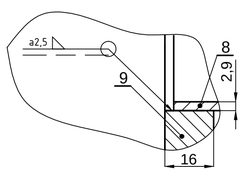
Y
M 1:1



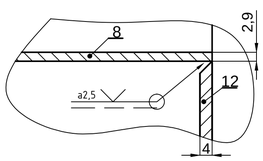
X
M 1:1



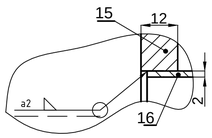
V
M 1:1



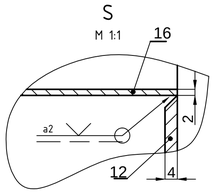
U
M 1:1



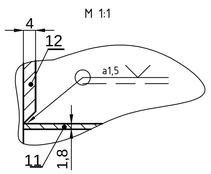
T
M 1:1



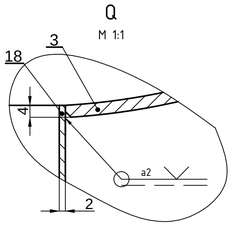
S
M 1:1



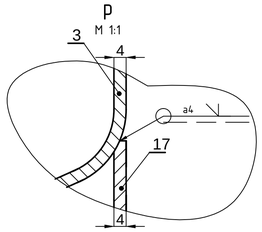
R
M 1:1



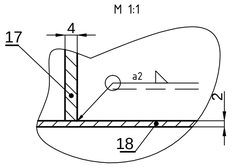
Q
M 1:1



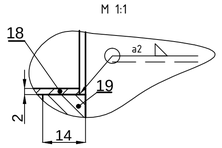
P
M 1:1



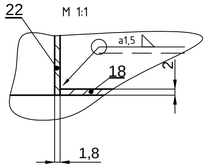
O
M 1:1



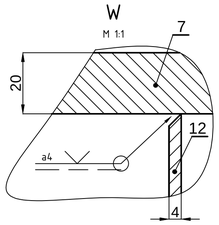
N
M 1:1



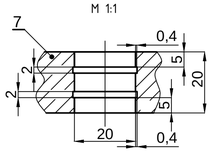
M
M 1:1



W
M 1:1



PRIPREMA ZA
UVALJAVANJE
M 1:1



Poz.	Naziv dijela	Kom.	Materijal	Sirove dimenzije
23	Temeljna ploča	1	P265GH	Ø500x10
22	Priključak za nivo sondu	1	P265GH	DN10 PN6
21	Priključak za odzračivanje	1	P265GH	DN10 PN6
20	Bočna ojačanja	8	P265GH	78x100x4
19	Prirubnica	1	P265GH	A 20x25 DIN 2573-St45.8
18	Priključak za dovod kapljevine smjese etanol-voda	1	P265GH	DN20 PN6
17	Stalak	1	P265GH	DN200 PN6
16	Priključak za odvod kondenzata	1	P265GH	DN15 PN6
15	Prirubnica	1	P265GH	A 15x20 DIN 2573-St45.8
14	Priključak sigurnosnog ventila	1	P265GH	DN10 PN6
13	Cijev izmjenjivača	44	P265GH	DN15 PN6
12	Plašt	1	P265GH	DN200 PN6
11	Priključak manometra	1	P265GH	DN20 PN6
10	Priključak termometra	1	P265GH	DN15 PN6
9	Prirubnica	1	P265GH	A 50x57 DIN 2573-St45.8
8	Priključak za dovod vodene pare	1	P265GH	DN50 PN6
7	Cijevna stijena	2	P265GH	B-200-PN6-DIN 2527-St45.8
6	Prirubnica	2	P265GH	A 200x219,1 DIN 2573-St45.8
5	Brtva	2	It200	DN200 PN6
4	Vijak	16		M16x70 8.8
3	Podnica	2	P265GH	DIN28011-219,1x4-St.45.8
2	Priključak za odvod pare smjese etanol-voda	1	P265GH	DN80 PN6
1	Prirubnica	1	P265GH	A 80x88.9 DIN 2573-St45.8

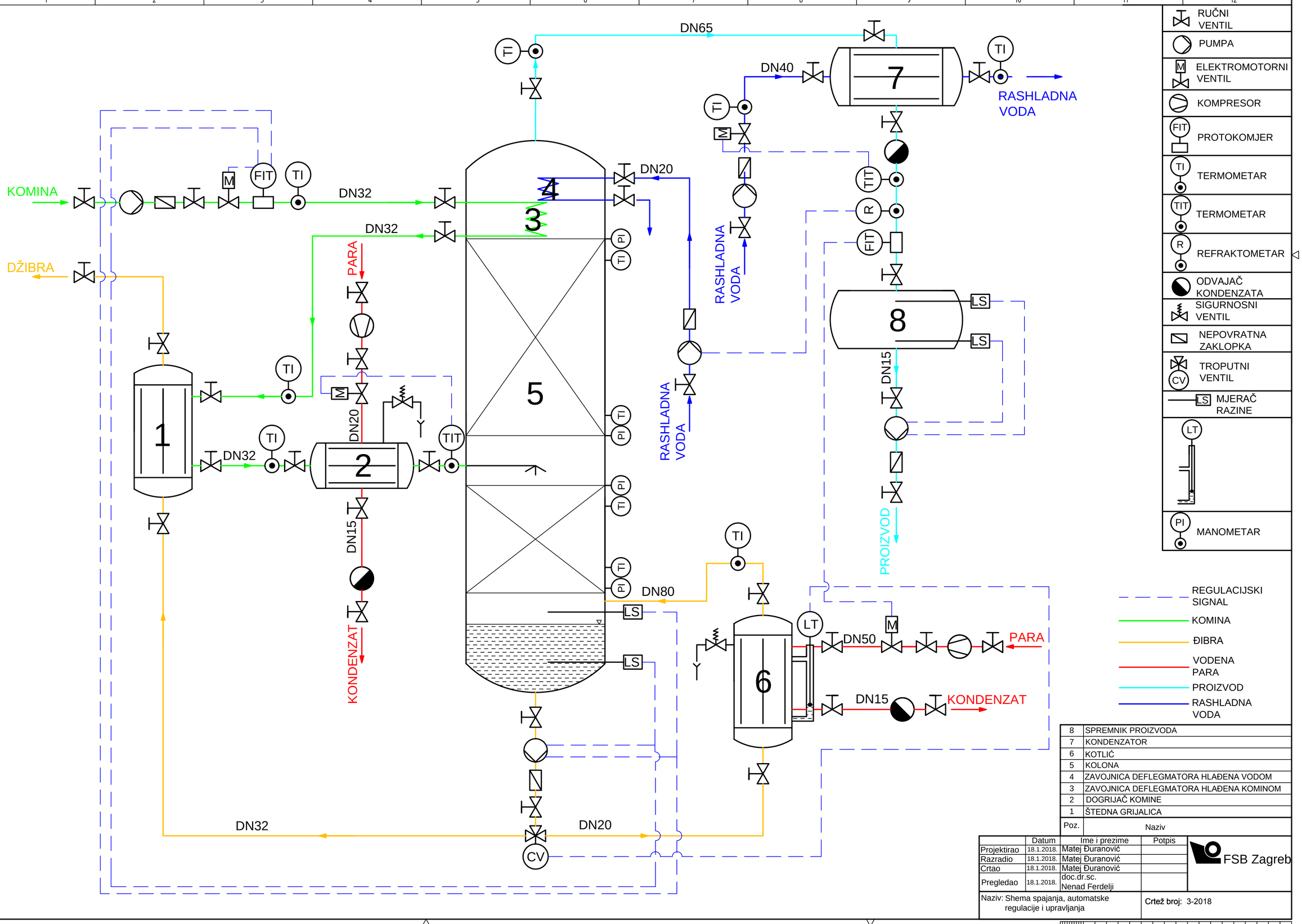
	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Razradio	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Crtao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Pregledao	18.1.2018.	doc.dr.sc Nenad Ferdelji	

FSB Zagreb

Objekt:
Objekt broj:
R. N. broj:
Napomena:
Kopija
Materijal: P265GH(St45.8)
Masa:
Mjerilo originala M 1:4
Naziv: Radionički nacrt kotlića kolone za rektifikaciju
Pozicija:
Format: A1
Listova: 1
List: 1
Crtež broj: 2-2018

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



Poz.	Naziv
8	SPREMNIK PROIZVODA
7	KONDENZATOR
6	KOTLIĆ
5	KOLONA
4	ZAVOJNICA DEFLEGMATORA HLAĐENA VODOM
3	ZAVOJNICA DEFLEGMATORA HLAĐENA KOMINOM
2	DOGRIJAČ KOMINE
1	ŠTEDNA GRIJALICA

	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Razradio	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Crtao	18.1.2018.	Matej Đuranović	
Pregledao	18.1.2018.	doc.dr.sc. Nenad Ferdelji	

FSB Zagreb

Naziv: Shema spajanja, automatske regulacije i upravljanja

Crtež broj: 3-2018

Design by CADLab

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT