

# Konstrukcija uređaja za rektifikaciju etanola

---

Ercegovac, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:790090>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matej Ercegovac**

Zagreb, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Matej Ercegovac

Zagreb, 2016

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

*Zahvaljujem se prof. dr. sc. Damiru Doviću, koji je prihvatio mentorstvo, na uloženom trudu i vremenu prilikom izrade ovog diplomskoga rada te roditeljima na pomoći i strpljenju tijekom cijelog mog studija.*

Matej Ercegovac



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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Matej Ercegovac

Mat. br.: 0035178267

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcija uređaja za rektifikaciju etanola**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of etanol rectification device**

Opis zadatka:

Potrebno je konstruirati uređaj za rektifikaciju etanola iz smjese etanol-voda sljedećih karakteristika:

- kapacitet uređaja: 1500 kg/h komine
- koncentracija komine: 11% vol
- koncentracija proizvoda: 95% vol
- pogonska energija: zasićena vodena para parametara prema izboru, električna energija 220V/380V 50 Hz
- rashladna voda: 15°C

Potrebno je provesti i izraditi:

- analizu utroška topline po 1 kg proizvoda varirajući vrstu rektifikacijske kolone, broj plitica i koncentraciju džibre, primjenjujući mjere za uštedu energije poput predgrijavanja komine
- optimizaciju konstrukcije uređaja i režima rada slijedom provedene analize utroška topline
- potpuni termodinamički proračun svih elemenata uređaja
- potrebne proračune čvrstoće grijalice kolone
- dispozicijski nacrt uređaja
- radionički crtež grijalice kolone
- shemu spajanja, automatske regulacije i upravljanja

Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predviđeni datumi obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

VZ

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. ANALIZA SUSTAVA DESTILACIJE I REKTIFIKACIJE.....	2
2.1. Parametri dvojne smjese .....	2
2.2. Jednostavna kontinuirana destilacija .....	4
2.3. Kontinuirana destilacija s deflegmacijom .....	11
2.3.1. Istosmjerni deflegmator.....	14
2.3.2. Protusmjerni deflegmator .....	20
2.4. Rektifikacija.....	28
2.5. Kolona za jačanje.....	29
2.6. Kolona za iscrpljivanje .....	40
2.7. Spojena kolona .....	49
2.8. Usporedba sustava destilacije i rektifikacije .....	57
2.9. Potrebni broj plitica .....	63
3. UŠTEDA ENERGIJE .....	67
4. PRORAČUN KOLONE S PLITICAMA.....	71
5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	78
5.1. Kondenzator.....	78
5.2. Deflegmator .....	86
5.3. Dogrijač .....	93
5.4. Grijalica .....	100
6. PRORAČUN ČVRSTOĆE GRIJALICE.....	107
6.1. Plašt ulaza i izlaza sekundara .....	107
7. ZAKLJUČAK .....	117
LITERATURA.....	118
PRILOZI.....	119

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Shema i $h - \xi$ dijagram jednostavne kontinuirane destilacije [5].....	4
Slika 2-2. $qm - \xi s$ dijagram za destilat, džibru i suhozasićenu paru .....	9
Slika 2-3. $qm - \xi s$ dijagram za rashladnu vodu .....	9
Slika 2-4. $\Phi - \xi s$ dijagram za grijalicu i kondenzator .....	10
Slika 2-5. Shema i $h - \xi$ dijagram kontinuirane destilacije s deflegmacijom [5] .....	11
Slika 2-6. Shema i $h - \xi$ dijagram istosmjernog deflegmatora [5].....	15
Slika 2-7. Shema i $h - \xi$ dijagram protusmjernog deflegmatora [5].....	20
Slika 2-8. $qm - \xi s$ dijagram za ravnotežnu paru, refluks i suhozasićenu paru za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju.....	25
Slika 2-9. $qm - \xi s$ dijagram za destilat i džibru za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju.....	25
Slika 2-10. $qm - \xi s$ dijagram za rashladnu vodu za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju .....	26
Slika 2-11. $\Phi - \xi s$ dijagram za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju .....	26
Slika 2-12. Usporedba istosmjernog i protusmjernog obaranja [5].....	27
Slika 2-13. Shema i $h - \xi$ dijagram kolone za jačanje [5].....	29
Slika 2-14. Shema plitica uz bilancu plitice [5] .....	30
Slika 2-15. Shema deflegmatora uz bilancu deflegmatora [5].....	31
Slika 2-16. $qm - \xi s$ dijagram za suhozasićenu paru i destilat kolone za jačanje.....	38
Slika 2-17. $qm - \xi s$ dijagram za džibru i rashladnu vodu kolone za jačanje.....	38
Slika 2-18. $\Phi - \xi s$ dijagram za deflegmator, grijalicu i kondenzator kolone za jačanje.....	39
Slika 2-19. Shema i $h - \xi$ dijagram kolone za iscrpljivanje [5] .....	40
Slika 2-20. Pol razlučivanja i presječnice kolone za iscrpljivanje [5] .....	41
Slika 2-21. $qm - \xi s$ dijagram za džibru i rashladnu vodu kolone za iscrpljivanje.....	47
Slika 2-22. $qm - \xi s$ dijagram za destilat i suhozasićenu paru kolone za iscrpljivanje .....	47
Slika 2-23. $\Phi - \xi s$ dijagram za grijalicu i kondenzator kolone za jačanje .....	48
Slika 2-24. Shema i $h - \xi$ dijagram spojene kolone [5] .....	49
Slika 2-25. $qm - \xi s$ dijagram za džibru i rashladnu vodu spojene kolone .....	55
Slika 2-26. $qm - \xi s$ dijagram za destilat i suhozasićenu paru spojene kolone .....	55
Slika 2-27. $\Phi - \xi s$ dijagram za deflegmator, grijalicu i kondenzator spojene kolone .....	56
Slika 2-28. $qm - \xi s$ dijagram za destilat.....	57
Slika 2-29. $\xi d - \xi s$ dijagram za destilat .....	58
Slika 2-30. $qm - \xi s$ dijagram za suhozasićenu paru .....	58
Slika 2-31. $qm - \xi s$ dijagram za rashladnu vodu deflegmatora.....	59
Slika 2-32. $qm - \xi s$ dijagram za rashladnu vodu kondenzatora .....	59
Slika 2-33. $\Phi - \xi s$ dijagram za grijalicu.....	60
Slika 2-34. $\Phi - \xi s$ dijagram za deflegmator.....	60
Slika 2-35. $\Phi - \xi s$ dijagram za kondenzator .....	61
Slika 2-36. Shema Teoretski broj plitica [5] .....	63
Slika 2-37. $qm - nuk$ dijagram za rashladnu vodu i suhozasićenu paru .....	65
Slika 2-38. $\Phi - \xi s$ dijagram za grijalicu, deflegmator i kondenzator .....	65
Slika 3-1. Predgrijavanje komine u deflegmatoru i dogrijaču u $h - \xi$ dijagram [5] .....	67
Slika 4-1. Sitasta plitica [7].....	71
Slika 4-2. Učinkovitost plitica u stvarnim kolonama [7] .....	77

<i>Slika 5-1. <math>\vartheta</math> – A dijagram kondenzatora. ....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 5-2. <math>\vartheta</math> – A dijagram deflegmatora. ....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 5-3. <math>\vartheta</math> – A dijagram dogrijača. ....</i>	<i>93</i>
<i>Slika 5-4. <math>\vartheta</math> – A dijagram grijalice. ....</i>	<i>100</i>



## POPIS TABLICA

<i>Tablica 2-1. Sastav komine i destilata</i> .....	3
<i>Tablica 2-2. Očitani parametri jednostavne kontinuirane destilacije iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	8
<i>Tablica 2-3. Izračunati parametri jednostavne kontinuirane destilacije</i> .....	8
<i>Tablica 2-4. Očitani parametri kontinuirane destilacije s istosmjernim deflegmatorom iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	19
<i>Tablica 2-5. Izračunati parametri kontinuirane destilacije s istosmjernim deflegmatorom</i> .....	19
<i>Tablica 2-6. Očitani parametri kontinuirane destilacije s protusmjernim deflegmatorom iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	24
<i>Tablica 2-7. Izračunati parametri kontinuirane destilacije s protusmjernim deflegmatorom</i> .....	24
<i>Tablica 2-8. Očitani parametri kolone za jačanje iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	36
<i>Tablica 2-9. Izračunati parametri kolone za jačanje za <math>\Pi 200</math></i> .....	37
<i>Tablica 2-10. Izračunati parametri kolone za jačanje za <math>\Pi 400</math></i> .....	37
<i>Tablica 2-11. Očitani parametri kolone za iscrpljivanje iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	45
<i>Tablica 2-12. Izračunati parametri kolone za iscrpljivanje za <math>\Pi i 20</math></i> .....	46
<i>Tablica 2-13. Izračunati parametri kolone za iscrpljivanje za <math>\Pi i 40</math></i> .....	46
<i>Tablica 2-14. Očitani parametri spojene kolone iz <math>h - \xi</math> dijagrama</i> .....	53
<i>Tablica 2-15. Izračunati parametri spojene kolone za <math>\Pi i 20</math></i> .....	54
<i>Tablica 2-16. Izračunati parametri spojene kolone za <math>\Pi i 40</math></i> .....	54
<i>Tablica 2-17. Očitani parametri spojene kolone iz <math>h - \xi</math> dijagrama za različiti broj plitica</i> ...	64
<i>Tablica 2-18. Izračunati parametri spojene kolone za različiti broj plitica</i> .....	64
<i>Tablica 4-1. Ulazni parametri za proračun</i> .....	75
<i>Tablica 4-2. Proračunom dobiveni rezultati</i> .....	76

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

DR 01-12-2016-G – Grijalica

DR 01-12-2016-D – Dispozicijski prikaz uređaja

## POPIS OZNAKA

<i>Oznaka</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Opis</i>
$\xi$	kg/kg	Maseni udio tvari
$\psi$	kmol/kmol	Molni udio tvari
$\zeta$	kg/s	Volumni dio tvari
$h$	J/kgK	Specifična entalpija
$q_m$	kg/s	Maseni tok
$\phi$	kJ/kg	Specifični toplinski tok
$\varphi$	kg/kg	Specifični maseni tok
$p$	Pa	Tlak tvari
$\vartheta$	°C	Temperatura tvari
$\delta$	kg/kg	Specifični maseni tok parne faze
$\Pi$	kJ/kg	Pol razlučivanja
$A$	m <sup>2</sup>	površina
$q_v$	m <sup>3</sup> /s	Volumni tok
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća tvari
$SF$	-	Faktor sustava
$C_{SB}$	-	Souders-Brownova konstanta
$F_{pl}$	-	Faktor plavljenja
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	Napetost površine
$u$	m/s	Brzina kapljevine u koloni
$D, d$	m	Promjer
$N$	-	Broj prijelaza/prolaza
$f$	N/mm <sup>2</sup>	Proračunska čvrstoća
$Q$	m <sup>3</sup>	Opterećenje plitice
$V$	m	Volumno opterećenje parom
$c_p$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$\lambda$	W/mK	Toplinska provodnost
$\mu$	Pas	Dinamička viskoznost
$\Delta\vartheta_m$	°C	Srednja logaritamska razlika temperatura
$s$	mm	Debljina stijenke cijevi
$w$	m/s	Brzina medija
$Re$	-	Reynoldsov broj
$Nu$	-	Nusseltov broj
$Pr$	-	Prandtlov broj

---

$\alpha$	$W/m^2 K$	Koeficijent prijelaza topline
$L$	$m$	Duljina cijevi
$l$	$m$	Širina toka
$q_{1,2}$	$J/kg$	Specifični toplinski tok primara/sekundara
$k$	$W/m^2 K$	Koeficijent prolaza topline
$H$	$m$	Visina cijevi
$D_t$	$m$	Promjer plašta izmjenjivača topline
$Gr$	-	Grashofov broj
$Ra$	-	Rayleighov broj
$r$	$kJ/kg$	Specifična toplota isparavanja
$c$	$m$	Dodaci debljini stijenke
$v$	-	Koeficijent oslabljenja
$F$	$N$	Sila u vijcima
$b$	$m$	Širina prirubnice
$W$	$m^3$	Moment otpora

## **SAŽETAK**

U sklopu diplomskoga rada bilo je potrebno konstruirati uređaj za rektifikaciju etanola koji razdvaja etanol od vode kako bi se postigla određena koncentracija etanola u smjesi. Proces se provodi kontinuirano. Potrebno je bilo prvo odrediti odgovarajući proces te ga optimizirati. Rad sadrži termodinamički proračun svih elemenata uređaja i proračun čvrstoće grijalice. Za pogon grijalice služi suhozasićena para tlaka 5 bara, a za hlađenje destilata u kondenzatoru rashladna voda početne temperature 15°C.

Ključne riječi: destilacija, rektifikacijska kolona, ušteda energije, termodinamički proračun, proračun čvrstoće.

## **SUMMARY**

In this study it was necessary to construct a device for rectification of ethanol from water to achieve a certain concentration of ethanol in the mixture. The process is carried out continuously. It was necessary first, to determine the appropriate process and then optimize it. The study contains thermodynamic calculation of all elements of the device and the strength calculation of boiler. For the operation of the boiler is used saturated steam with pressure of 5 bar, and for cooling of the distillate in the condenser, cooling water initial temperature of 15° C.

Keywords: distillation, rectifying column, energy savings, thermodynamic calculation, calculation of strength.

## 1. UVOD

Po definiciji, destilacija je proces fizičkog razdvajanje smjese u dvije ili više tvari različitih vrelišta. Temelji se na činjenici da se kapljevita smjesa dviju hlapivih komponenti različitog vrelišta zagrije i djelomično ispari, a u pari, koja je u ravnoteži s kapljevitim ostatkom, je povećana koncentracija tvari nižeg vrelišta, dok će se u kapljevitom ostatku povećati koncentracija sastojaka višeg vrelišta.

Različita su stajališta što je destilacija. U Europi se još uvijek pod pojmom destilacija podrazumijeva isključivo jednostupanjska diferencijalna destilacija i njezine varijante, dok se višestupanjska destilacija naziva rektifikacija. U američkoj literaturi pod pojmom destilacija je obuhvaćena i jednostupanjska diferencijalna destilacija i rektifikacija unatoč bitnim razlikama između ta dva procesa – jednostupanjska diferencijalna destilacija ne spada u procese prijenosa tvari difuzijom za razliku od rektifikacije gdje para i kapljevina dolaze u međusobni kontakt i dolazi do izmjene tvari difuzijom da bi se uspostavilo ravnotežno stanje. U ovom radu držati ćemo se europske terminologije.

Bez obzira na niski termodinamički stupanj iskoristivosti, destilacija je i danas najučestaliji proces razdvajanja tvari u prehrambenoj, kemijskoj i farmaceutskoj industriji, a ponekad i jedini mogući proces razdvajanja tvari. Destilacija je općenito najjeftiniji i najbolji proces razdvajanja tvari osim u sljedećim slučajevima:

1. ako je razlika u relativnoj hlapivosti komponenti veoma mala;
2. ako se mala količina tvari s visokim vrelištem treba odvojiti iz smjese jer se sva smjesa mora ispariti kako bi se izdvojila ta mala količina tvari s visokim vrelištem
3. ako je jedna od tvari termički nestabilna
4. ako je smjesa veoma korozivna ili jako prlja uređaj.

Destilacijske postupke može se podijeliti na šaržne (prekidne) i kontinuirane (neprekidne) postupke. Tipični primjeri šaržne destilacije su ekstrakcija mirisa iz biljaka u proizvodnji parfema i seosko pečenje rakije. Kontinuirana destilacija se primjenjuje u industriji. U ovom radu će se razmatrati kontinuirana destilacija.

## 2. ANALIZA SUSTAVA DESTILACIJE I REKTIFIKACIJE

### 2.1. Parametri dvojne smjese

Stanje neke smjese ne može se jednoznačno samo opisati s tlakom  $p$  i temperaturom  $T$  kao kod jednostavnih tvari, već je nužno poznavati i kvantitativni sastav smjese. Dvojnu smjesu tvore dvije čiste tvari različitih vrelišta. Tvar s višim vrelištem nosi indeks 1, a tvar s nižim vrelištem nosi indeks 2. U ovom radu, voda kao tvar s višim vrelištem nositi će indeks 1, a etanol kao tvar s nižim vrelištem nositi će indeks 2.

Masa dvojne smjese  $m$  sadrži tvar 1 mase  $m_1$  i tvar 2 mase  $m_2$ . Maseni udio tvari 2 u dvojnoj smjesi jednak je prema [1]:

$$\xi = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2}{m}. \quad (2-1)$$

Čista tvar 1 predočuje se sa  $\xi = 0$ , a čista tvar 2 sa  $\xi = 1$ .

Sastav dvojne smjese je ponekad praktičnije prikazati molnim udjelom. Molni udio tvari 2 jednak je omjeru količine tvari 2 i ukupne količine tvari dvojne smjese te prema [1] glasi:

$$\psi = \frac{n_2}{n} = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{\frac{m_2}{M_2}}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}}. \quad (2-2)$$

Volumni udio tvari 2 prema [5] jednak je omjeru volumena tvari 2 i ukupnog volumena dvojne smjese:

$$\zeta = \frac{V_2}{V} = \frac{V_2}{V_1 + V_2}. \quad (2-3)$$

Bitno je naglasiti da prilikom miješanja kapljevina  $V_1 + V_2 \neq V$ , ali kako razlika nije veća od 2%, može se utjecaj kapljevina na ukupni volumen zanemariti.

Moguće je uspostaviti vezu između gornjih izraza. Veza između masenog i volumnog udjela uspostavlja se preko gustoće tvari i uz malo preslagivanja se dobiva izraz:

$$\xi = \frac{1}{\left(\frac{1}{\zeta} - 1\right) \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} + 1}. \quad (2-4)$$



Veza između molnog i masenog udjela glasi:

$$\psi = \frac{\xi}{\frac{M_2}{M_1} \cdot (1 - \xi) + \xi} \quad (2-5)$$

Na temelju gornjih jednadžbi, pristupa se proračunu sastava komine i destilata. Zadani su:

- volumni udio tvari 2 u komini:  $\zeta_m = 11\% = 0,11 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,
- volumni udio tvari 2 u destilatu:  $\zeta_d = 95\% = 0,95 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,
- gustoća tvari 1 pri  $20^\circ\text{C}$ :  $\rho_{1/20^\circ} = 999,233 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- gustoća tvari 2 pri  $20^\circ\text{C}$ :  $\rho_{2/20^\circ} = 790,184 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- gustoća tvari 1 pri  $77,7^\circ\text{C}$ :  $\rho_{1/77,7^\circ} = 971,182 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- gustoća tvari 2 pri  $77,7^\circ\text{C}$ :  $\rho_{2/77,7^\circ} = 736,942 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
- molarna masa tvari 1:  $M_1 = 18,02 \text{ kg}/\text{kmol}$ ,
- molarna masa tvari 2:  $M_2 = 46,07 \text{ kg}/\text{kmol}$ .

Maseni udjeli tvari 2 u komini i destilatu iznose:

$$\xi_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{\zeta_m} - 1\right) \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} + 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,11} - 1\right) \cdot \frac{999,233}{790,184} + 1} = 0,089 \text{ kg}/\text{kg} = 8,9\%$$

$$\xi_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\zeta_d} - 1\right) \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} + 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,95} - 1\right) \cdot \frac{971,182}{736,942} + 1} = 0,9351 \text{ kg}/\text{kg} = 93,51\%$$

Molni udjeli tvari 2 u komini i destilatu iznose:

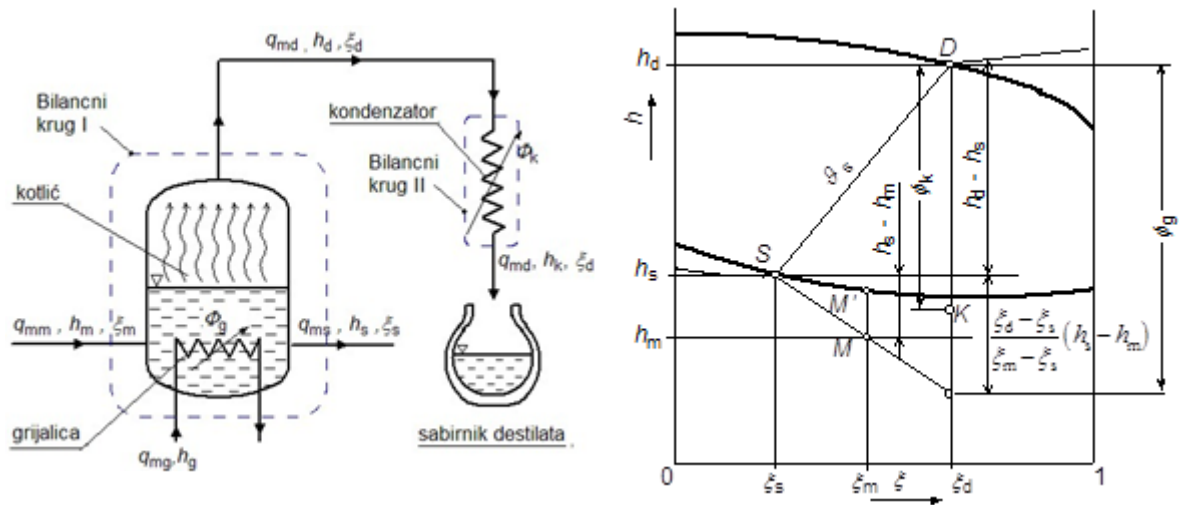
$$\psi_m = \frac{\xi_m}{\frac{M_2}{M_1} \cdot (1 - \xi_m) + \xi_m} = \frac{0,089}{\frac{46,07}{18,02} \cdot (1 - 0,089) + 0,089} = 0,0368 \text{ kg}/\text{kg} = 3,68\%$$

$$\psi_d = \frac{\xi_d}{\frac{M_2}{M_1} \cdot (1 - \xi_d) + \xi_d} = \frac{0,9351}{\frac{46,07}{18,02} \cdot (1 - 0,9351) + 0,9351} = 0,8494 \text{ kg}/\text{kg} = 84,94\%$$

Tablica 2-1. Sastav komine i destilata

Tok	Volumni udio $\zeta$ , %	Maseni udio $\xi$ , %	Molni udio $\psi$ , %
Komina	11	8,9	3,68
Destilat	95	93,51	84,94

## 2.2. Jednostavna kontinuirana destilacija



Slika 2-1. Shema i  $h - \xi$  dijagram jednostavne kontinuirane destilacije [5]

Osnovne tokove mase i energije pri destilaciji najbolje je razmotriti na primjeru jednostavne neprekidne destilacije prema slici 2-1. Ona se provodi u uređaju koji se sastoji od kotlića s ugrađenom grijalicom, kondenzatora i sabirnika destilata. U kotlič se kontinuirano dovodi komina stanja m koncentracije  $\xi_m$ . Ona se u kotliču zagrijava do vrenja (stanje M') ali se istodobno miješa sa sadržajem kotlića tako da stanje mješavine odgovara stanju S vrele džibre s koncentracijom  $\xi_s$ . Zagrijavanje komine i održavanje vrenja namiruje se dovozom toplinskog toka  $\Phi_g$  pomoću nekog ogrjevnog medija. Džibra odaje ravnotežnu paru D čije se stanje nalazi na sjecištu izoterme  $\vartheta_s$  s linijom rošenja. Ta se para odvodi u kondenzator gdje se odvođenjem topline kondenzacije  $\Phi_k$  pomoću rashladnog medija dobiva destilat stanja K koji se odvodi u spremnik destilata. Iz kotlića se kontinuirano odvodi i vrela džibra koncentracije  $\xi_s$ . Destilat ima koncentraciju  $\xi_d$  koja može jedino biti jednaka ravnotežnoj koncentraciji u odnosu na kapljevitu džibru u kotliču. Stoga će koncentracija destilata biti to niža što je niža koncentracija džibre i obrnuto. Jasno je da ovakav način destiliranja ima vrlo ograničene mogućnosti. Za bolju kontrolu postizivih svojstava izlaznih tokova, utroška energije te rashladnog sredstva bit će potrebna usavršenja postupka koja će biti opisana u nastavku.

Na temelju slike 2-1 postavljaju se masene i energijske bilance za proces jednostavne kontinuirane destilacije prema [5].

Bilanca ukupne tvari za bilancni krug I glasi:

$$q_{mm} = q_{ms} + q_{md}, \quad (2-6)$$

dok će bilanca tvari 2 biti:

$$q_{mm} \cdot \xi_m = q_{ms} \cdot \xi_s + q_{md} \cdot \xi_d. \quad (2-7)$$

Bilanca energije kotlića je:

$$\Phi_g + q_{mm} \cdot h_m = q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d. \quad (2-8)$$

Za kondenzaciju destilata treba rashladnom vodom odvoditi toplinu:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k). \quad (2-9)$$

Praktično je masene i energijske tokove svesti na jedinični tok destilata dijeljenjem s  $q_{md}$  pa će tada specifični tokovi biti:

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \frac{q_{mm}}{q_{md}}, \varphi_s = \frac{q_{ms}}{q_{md}}, \\ \phi_g &= \frac{\Phi_g}{q_{md}}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}}. \end{aligned} \quad (2-10)$$

Na temelju izraza iz (2-10), dobivaju se masene bilance:

$$\varphi_m = \varphi_s + 1, \quad (2-11)$$

$$\varphi_m \cdot \xi_m = \varphi_s \cdot \xi_s + \xi_d. \quad (2-12)$$

Iz (2-11) i (2-12) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove komine i džibre:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s}, \varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s}, \quad (2-13)$$

Specifična toplina potrebna za grijanje kotlića glasi:

$$\phi_g = h_d - h_s + \varphi_m \cdot (h_s - h_m). \quad (2-14)$$

Ova jednadžba zadovoljava konstrukciju na slici 2-1 pri čemu se toplina  $\Phi_g$  prikazuje kao visina točke D nad sjecištem produžene spojnice točkaka S i M s koncentracijom  $\xi_d$ .

Specifična toplina kondenzacije destilata jednaka je:

$$\phi_k = h_d - h_k. \quad (2-15)$$

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 37,71\% = 0,3771 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 2069,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 293,3 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 209,67 \text{ kJ/kg}$
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{37,71 - 4}{8,9 - 4} = 6,875 \text{ kg/kg}.$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{37,71 - 8,9}{8,9 - 4} = 5,875 \text{ kg/kg}.$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{6,875} = 218,196 \text{ kg/h} = 0,06061 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 5,875 \cdot 218,196 = 1281,804 \text{ kg/h} = 0,35606 \text{ kg/s} .$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_g &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m = \\ &= 0,35606 \cdot 400 + 0,06061 \cdot 2069,7 - 0,41667 \cdot 50 = 247,034 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_g = \frac{\Phi_g}{q_{md}} = \frac{247,034}{0,06061} = 4075,792 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_g}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{247,034}{(2748,11 - 640,19)} = 0,11719 \text{ kg/s} = 421,896 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,06061 \cdot (2069,7 - 293,3) = 107,668 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{107,668}{0,06061} = 1776,4 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode:

$$q_{mrv} = \frac{\Phi_g}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{107,668}{(209,67 - 63,35)} = 0,73584 \text{ kg/s} = 2649,013 \text{ kg/h} .$$

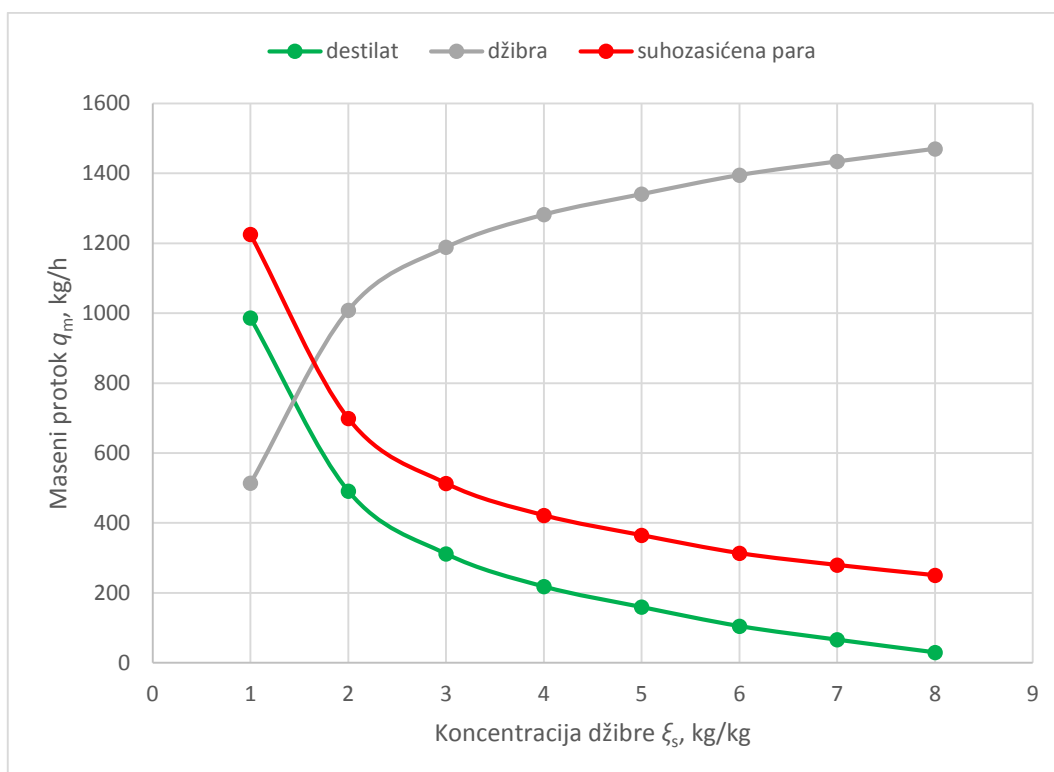
Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-2 i 2-3.

Tablica 2-2. Očitani parametri jednostavne kontinuirane destilacije iz  $h - \xi$  dijagrama

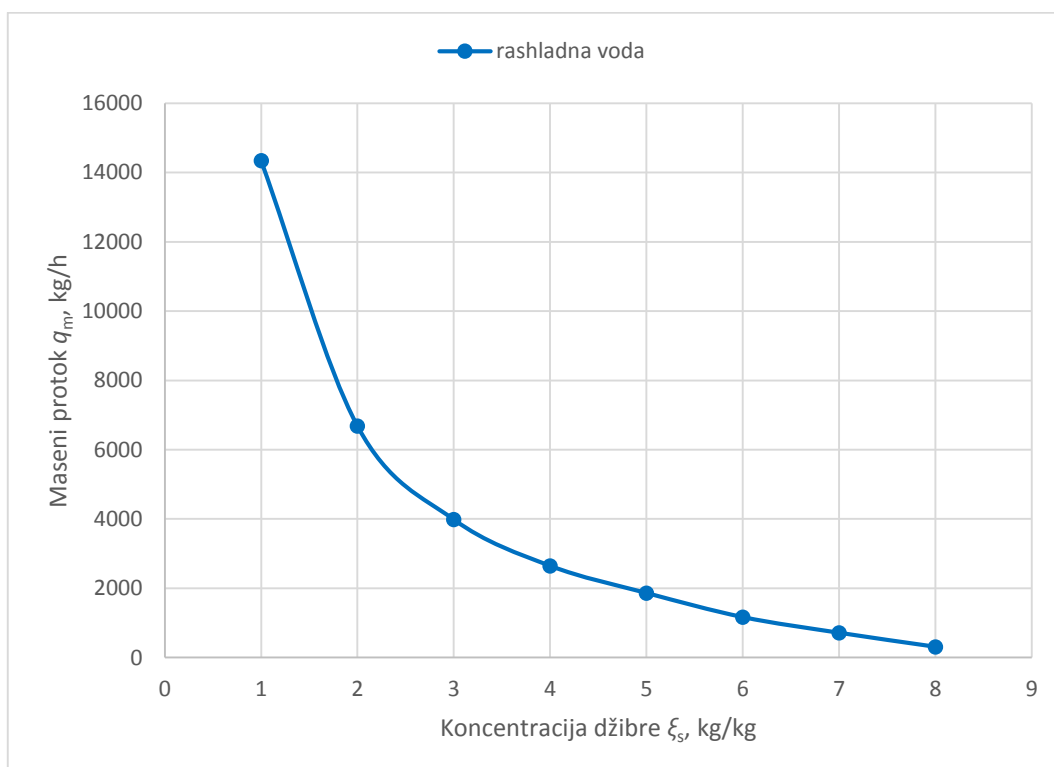
$\xi_s, \%$	$h_s, \text{kJ/kg}$	$\vartheta_s = \vartheta_d, \text{°C}$	$\xi_d, \%$	$h_d, \text{kJ/kg}$	$h_k, \text{kJ/kg}$
8	373,3	92	53,41	1807,2	276,9
7	377,4	92,9	50,2	1866,7	281
6	383,6	93,6	47,46	1911,8	283,1
5	391,8	94,6	41,71	2000	289,2
4	400	95,2	37,71	2069,7	293,3
3	404,1	96	31,41	2170,3	299,5
2	412,3	97,1	23,07	2303,6	313,8
1	418,5	98	13,02	2475,9	348,7

Tablica 2-3. Izračunati parametri jednostavne kontinuirane destilacije

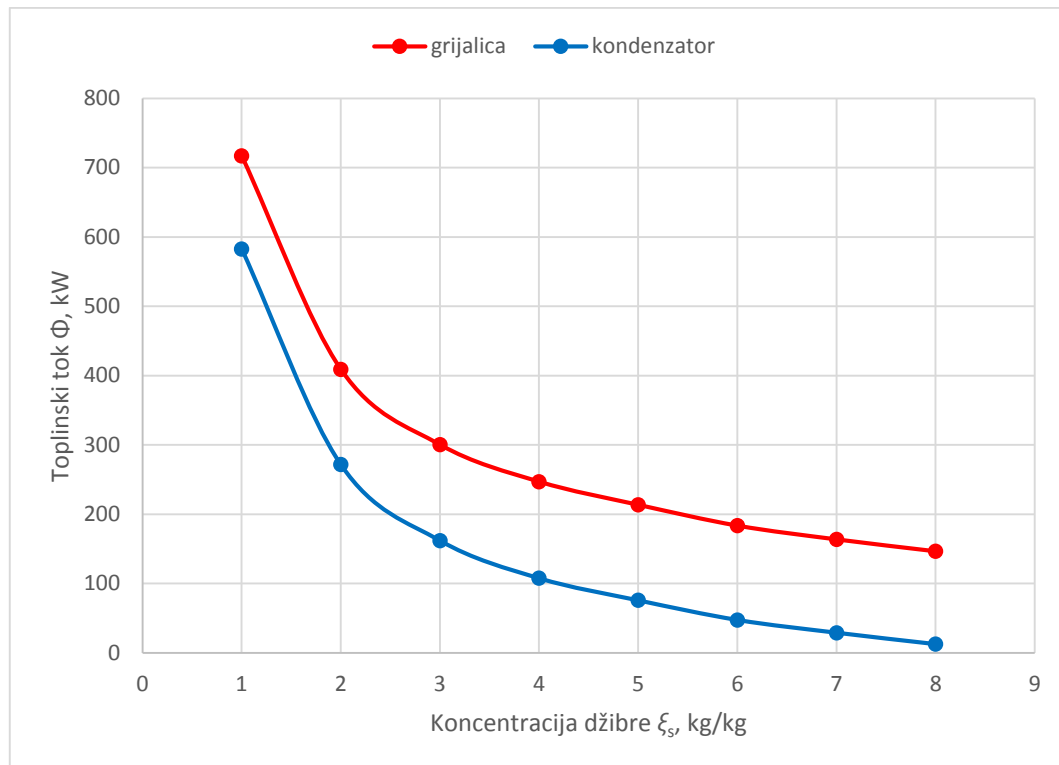
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_m, \text{kg/kg}$	1,521	3,052	4,812	6,875	9,404	14,279	22,694	50,255
$\varphi_s, \text{kg/kg}$	0,521	2,052	3,812	5,875	8,404	13,279	21,694	49,225
$q_{md}, \text{kg/h}$	986,305	491,476	311,7	218,196	159,504	105,05	66,097	29,848
$q_{ms}, \text{kg/h}$	513,695	1008,524	1188,3	1281,804	1340,496	1394,95	1433,903	1470,15
$\Phi, \text{kW}$	717,215	409,161	300,465	247,034	213,671	183,594	163,761	146,597
$\phi, \text{kJ/kg}$	2617,825	2997,052	3470,243	4075,792	4822,539	6291,625	8919,285	17681,287
$q_{mzas}, \text{kg/h}$	1224,892	698,783	513,148	421,896	364,916	313,55	279,678	250,365
$\Phi_k, \text{kW}$	582,797	271,65	161,98	107,668	75,8	47,527	29,114	12,688
$\phi_k, \text{kJ/kg}$	2127	1990	1871	1776	1711	1629	1586	1530
$q_{mrv}, \text{kg/h}$	14338,908	6683,558	3985,293	2649,013	1864,95	1169,325	716,307	312,167



Slika 2-2.  $q_m - \xi_s$  dijagram za destilat, džibru i suhozasićenu paru



Slika 2-3.  $q_m - \xi_s$  dijagram za rashladnu vodu

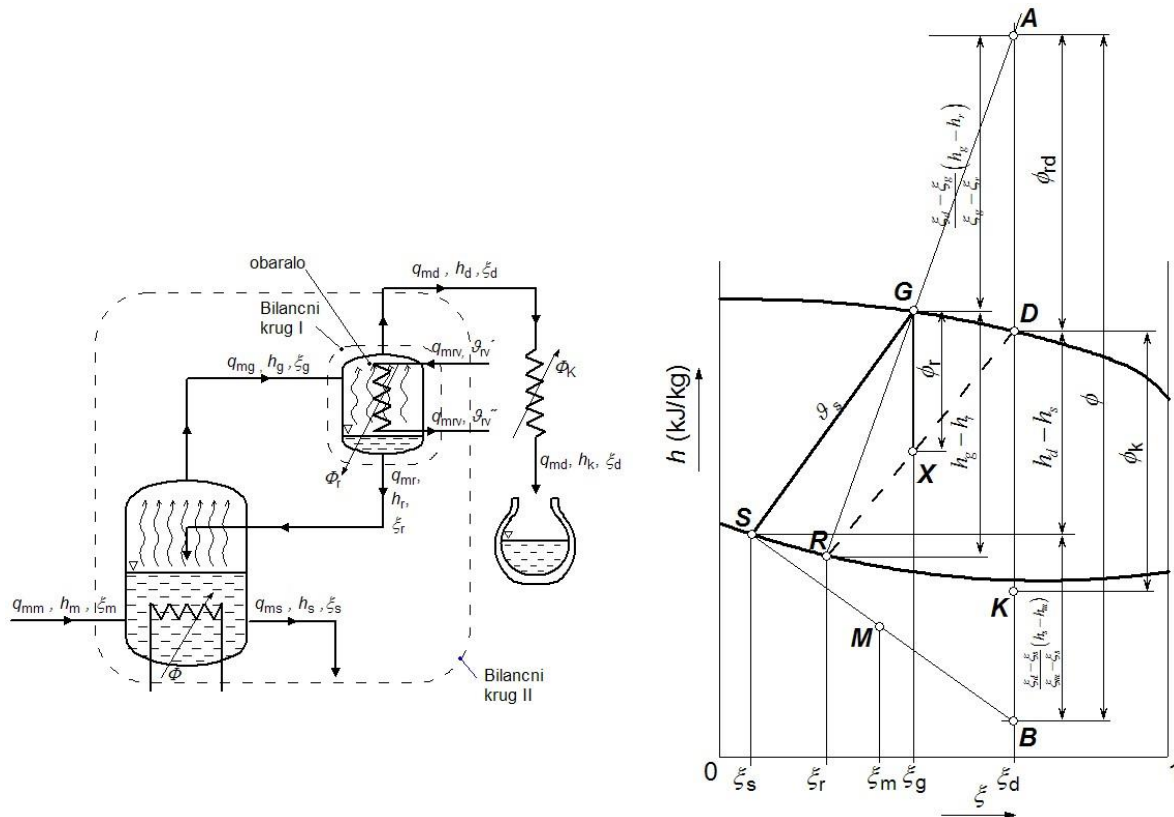


Slika 2-4.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za grijalicu i kondenzator

Opisani proces jednostavne kontinuirane destilacije ima vrlo ograničene mogućnosti primjene zbog jednoznačne ovisnosti koncentracije destilata o koncentraciji džibre. Posebno to dolazi do izražaja kada džibra ima nisku koncentraciju tvari 2. Obzirom na činjenicu da izoterme postaju sve strmije kako se koncentracija približava vrijednosti  $\xi = 0$ , jasno je da će destilacija prema slici 2-1 davati sve manji prirast koncentracije destilata u odnosu na džibru, a može se lako dogoditi da koncentracija destilata bude manja od koncentracije komine, pa takva destilacija tada gubi smisao osim ako joj cilj nije dobivanje što čišće tvari 1, a tvar 2 nije od interesa.



### 2.3. Kontinuirana destilacija s deflegmacijom



Slika 2-5. Shema i  $h - \xi$  dijagram kontinuirane destilacije s deflegmacijom [5]

U svrhu postizavanja većih koncentracija destilata od onih ravnotežnih sa sadržajem kotlića, u uređaj za destilaciju se dodaje deflegmator kako je to prikazano na slici 2-5. Deflegmator je izmjenjivač topline smješten između kotlića i kondenzatora. Ostali dijelovi uređaja odgovaraju onima na slici 2-1. I ovdje u kotliću vrije džibra S s koncentracijom  $\xi_s$  te odaje ravnotežnu paru G koncentracije  $\xi_g$ . Ta se para odvodi u deflegmator u kojem djelomično kondenzira odvođenjem topline deflegmacije  $\Phi_r$ . Pri tome nastaje mokra para stanja X iz koje će se kapljevita faza R gravitacijskim slijeganjem na dno deflegmatora izdvojiti iz parne faze D. Izdvojena kapljevita faza naziva se reflukansom. Razdvajanje će načelno biti neravnotežno, tj. stanja R i D neće ležati na zajedničkoj izotermi, a stanje kapljevite faze može čak biti i u pothlađenom području  $h - \xi$  dijagrama na slici 2-5. Stanja R, D i X leže na pravcu razmješavanja crtkano ucrtanim u dijagramu. Njegov će nagib ovisiti o načinu izmjene topline i vođenja pare i refluksa u deflegmatoru. Na pravcu razmješavanja će udio refluksa u smjesi odgovarati dužini XD, a pare dužini RX. Omjer tih udjela određen je položajem stanja X te će refluksa biti to više što je više odvedene topline  $\Phi_r$ . U skladu s time će se mijenjati i

koncentracije pare  $\xi_d$  i refluksa  $\xi_r$ . I one će biti načelno to veće što je veća toplina obaranja  $\Phi_r$  jer se tada pravac razmješavanja pomiče udesno.

Iz deflegmatora se refluks vodi natrag u kotlić gdje svojim masenim tokom  $q_{mr}$  i koncentracijom  $\xi_r$  zajedno s kominom masenog toka  $q_{mm}$  i koncentracije  $\xi_m$  održava koncentraciju džibre na vrijednosti  $\xi_s$ . Para napušta deflegmator s koncentracijom  $\xi_d$  te predstavlja destilat masenog toka  $q_{md}$  koji kondenzira u kondenzatoru odvođenjem topline  $\Phi_k$ .

Na temelju slike 2-5, nakon uvodnog razmatranja procesa, pristupa se postavljanju masenih i energijskih bilanci procesa kontinuirane destilacije s deflegmacijom prema [5].

Masene i energijske bilance za bilancni krug I oko deflegmatora glase:

$$q_{mg} = q_{mr} + q_{md}, \quad (2-16)$$

$$q_{mg} \cdot \xi_g = q_{mr} \cdot \xi_r + q_{md} \cdot \xi_d, \quad (2-17)$$

$$q_{mg} \cdot h_g = q_{mr} \cdot h_r + q_{md} \cdot h_d + \Phi_r. \quad (2-18)$$

Za bilancni krug II oko cijelog uređaja (bez kondenzatora) vrijede sljedeće masene i energijske bilance:

$$q_{mm} = q_{ms} + q_{md}, \quad (2-19)$$

$$q_{mm} \cdot \xi_m = q_{ms} \cdot \xi_s + q_{md} \cdot \xi_d, \quad (2-20)$$

$$\Phi_g + q_{mm} \cdot h_m = q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d + \Phi_r. \quad (2-21)$$

Za kondenzaciju destilata treba rashladnom vodom odvoditi toplinu:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k). \quad (2-22)$$

Praktično je masene i energijske tokove svesti na jedinični tok destilata dijeljenjem s  $q_{md}$  pa će tada specifični tokovi biti:

$$\varphi_m = \frac{q_{mm}}{q_{md}}, \varphi_s = \frac{q_{ms}}{q_{md}}, \varphi_g = \frac{q_{mg}}{q_{md}}, \varphi_r = \frac{q_{mr}}{q_{md}}, \quad (2-23)$$

$$\phi_g = \frac{\Phi_g}{q_{md}}, \phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}}.$$

Na temelju izraza iz (2-23), dobivaju se masene bilance za bilancni krug I:

$$\varphi_g = \varphi_r + 1, \quad (2-24)$$

$$\varphi_g \cdot \xi_g = \varphi_r \cdot \xi_r + \xi_d. \quad (2-25)$$

Iz (2-23) i (2-24) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove ravnotežne pare i refluksa:

$$\varphi_g = \frac{\xi_d - \xi_r}{\xi_g - \xi_r}, \varphi_r = \frac{\xi_d - \xi_g}{\xi_g - \xi_r}, \quad (2-26)$$

Specifični toplinski tok deflegmatora jednak je:

$$\phi_r = \varphi_g \cdot h_g - h_s + \varphi_g \cdot (h_d - h_m), \quad (2-27)$$

a nakon malog preslagivanja iz izraza (2-23) i (2-25) se dobiva izraz:

$$\phi_r = h_g - h_d + \varphi_r \cdot (h_g - h_r), \quad (2-28)$$

koji odgovara visini od točke D do A u  $h - \xi$  dijagramu na slici 2-2 koja se dobije produljenjem spojnice RG do sjecišta A s koncentracijom  $\xi_d$ .

Na temelju izraza iz (2-23), dobivaju se masene bilance za bilancni krug II:

$$\varphi_m = \varphi_s + 1, \quad (2-29)$$

$$\varphi_m \cdot \xi_m = \varphi_s \cdot \xi_s + \xi_d. \quad (2-30)$$

Iz (2-29) i (2-30) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove komine i džibre:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s}, \varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s}, \quad (2-31)$$

Specifični toplinski tok potreban za grijanje kotlića nakon malog preslagivanja glasi:

$$\phi_g = \phi_r + h_d - h_s + \varphi_m \cdot (h_s - h_m). \quad (2-32)$$

Toplinski tok za pogon destilacije s deflegmacijom prema (2-32) dobiva se u  $h - \xi$  dijagramu kao dužina AB na koncentraciji destilata  $\xi_d$  između sjecišta A produžene spojnice RG i točke B na produženoj spojnici stanja S i M. Za zadana stanja svježije komine M i džibre S postajati će potrebne topline grijanja i obaranja sve veće što bude zahtijevana viša koncentracija destilata  $\xi_d$ .

Specifični toplinski tok kondenzacije destilata jednak je:

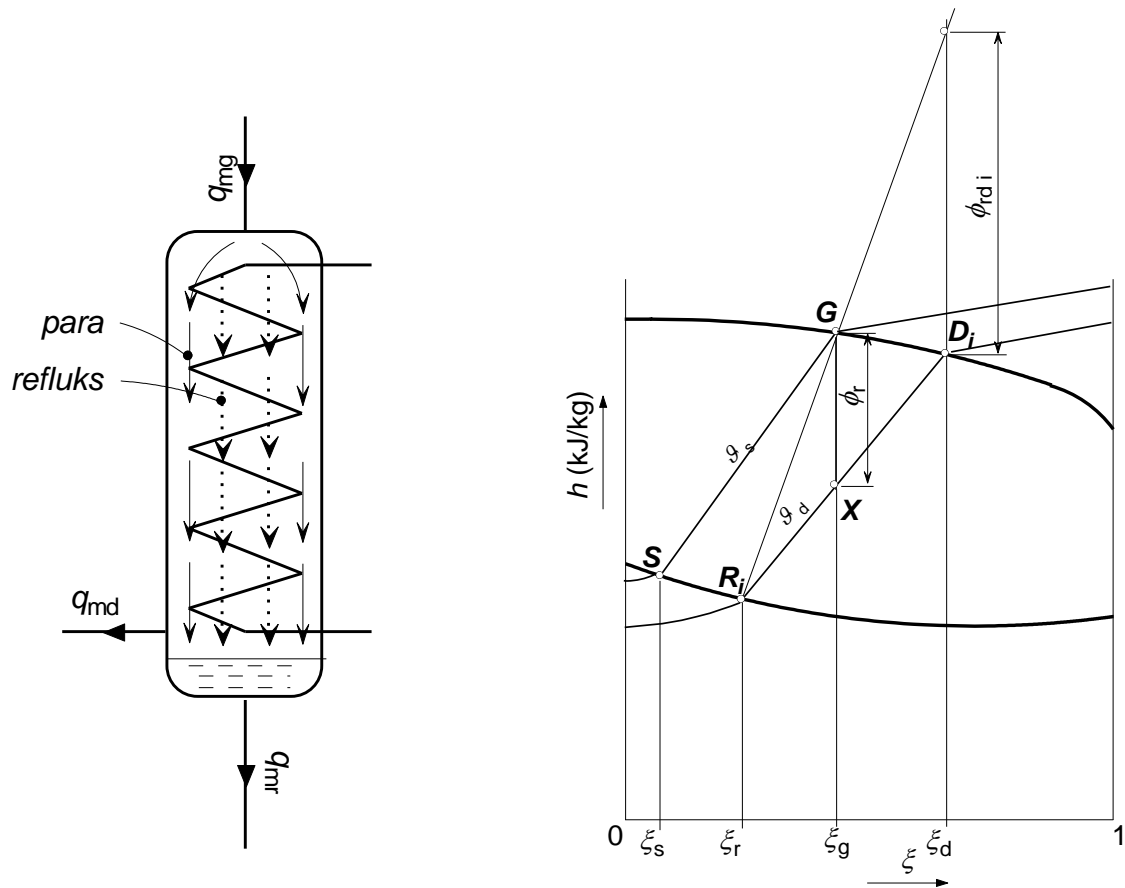
$$\phi_k = h_d - h_k. \quad (2-33)$$

Koncentracija destilata  $\xi_d$  ovisi s jedne strane o intenzitetu deflegmacije, pri čemu će stanje D destilata biti na to višim koncentracijama što bude veća toplina deflegmacije  $\Phi_r$ , tj. što bude stanje X niže u mokrom području  $h - \xi$  dijagrama. S druge strane će stanje pare D, a tada i stanje refleksa R, ovisiti o nagibu pravca razmješavanja RD. Proces razmješavanja ovisi o načinu vođenja tih dviju faza kroz deflegmator i o stupnju postignute ravnoteže između tih faza tijekom razdvajanja.

Deflegmator je izmjenjivač topline, obično izveden kao vertikalni cilindrični bubanj s ugrađenim cijevnim registrima različitih oblika (cijevne zavojnice, snop horizontalnih ili vertikalnih cijevi, itd.) kroz koje struji rashladni medij. Na cijevima kondenzira para iz kotlića te se ukapljena faza gravitacijski slijeva prema dnu deflegmatora kao refleks. Na svakom mjestu u deflegmatoru izdvojena kapljevina će biti u ravnoteži s parom iz koje je proizašla, a to znači da će kapljevina biti niže koncentracije od pare. Miješanjem refleksa nastale na raznim položajima, mijenjat će se koncentracija kapljevine pri tečenju prema dnu obarala, a para koja će biti u bliskom kontaktu s kapljevnom dolazit će s njom u manje ili više dobru ravnotežu, ovisno o raspoloživom vremenu i veličini kontaktne površine. Od interesa je da se uspostavi što veće približenje ravnoteži pare i kapljevine na svim mjestima u obaralu. Zato će se obarala konstrukcijski nastojati oblikovati tako da u njima para i kapljevina i dolaze u što bolji dodir. Vođenje pare i kapljevine u obaralu može se ostvariti na dva načina: istosmjerno i protusmjerno.

### 2.3.1. Istosmjerni deflegmator

Deflegmator u kojem parna i kapljevita faza teku istosmjerno prikazan je na slici 2-6. Kako refleks u deflegmatoru teče gravitacijski odozgo prema dolje, nužno da se i para stanja G iz kotlića dovede na vrh deflegmatora. Tada će para i kapljevina strujati istosmjerno od vrha prema dnu deflegmatora. Pod uvjetom da je ostvaren idealan kontakt, na svakom će mjestu u deflegmatoru refleks i para biti u ravnoteži. Tada će njihova stanja biti na ravnotežnoj izotermi  $\vartheta_d$  pa će se za slučaj istosmjernog deflegmatora pravac razmješavanja u  $h - \xi$  dijagramu poklopiti s tom izotermom zasićenog područja.



Slika 2-6. Shema i  $h - \xi$  dijagram istosmjernog deflegmatora [5]

Koncentracija destilata  $\xi_d$  za zadano stanje džibre  $S$  u kotliću ovisi u prvom redu o toplini deflegmacije  $\Phi_r$  i bit će to viša što je ta toplina veća jer se tada pravac razmješavanja pomiče udesno. Nagibom pravca razmješavanja određena su stanja destilata  $D$  i refluksa  $R$ . Kod idealnog ravnotežnog istosmjernog deflegmatora pravac razmješavanja će biti naj strmiji jer se poklapa s nagibom izoterme, dok će u svim ostalim slučajevima razmješavanje biti neravnotežno kod čega je jedino moguće da mu nagib bude manji. To ujedno znači da istosmjerni deflegmator uvijek daje najmanju moguću koncentraciju destilata  $\xi_d$  jer stanje  $D$  ne može pasti više ulijevo od onoga u istosmjernom deflegmatoru. Najveća moguća koncentracija destilata  $\xi_d$  postigla bi se kada bi stanje smjese u deflegmatoru  $X$  došlo na samu liniju vrenja, što ne bi imalo smisla jer bi u pri tome isčezao udio parne faze, tj. destilata kojemu odgovara dužina  $RX$  na pravcu razmješavanja.

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u ravnotežnoj pari:  $\xi_g = 37,71\% = 0,3771 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura ravnotežne pare:  $\vartheta_g = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija ravnotežne pare:  $h_g = 2069,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- omjer masenih protoka refluxa i pare destilata u deflegmatoru:  $q_{mr}/q_{md} = 1$
- maseni udio tvari 2 u mokroj pari:  $\xi_x = 37,71\% = 0,3771 \text{ kg/kg}$ ,
- specifična entalpija mokre pare:  $h_x = 1021,5 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u refluxu:  $\xi_r = 13,56\% = 0,1356 \text{ kg/kg}$ ,
- specifična entalpija refluxa:  $h_r = 348,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 61,51\% = 0,6151 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 88,3 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1682,1 \text{ kJ/kg}$ ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 88,3 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 256,4 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 209,67 \text{ kJ/kg}$
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{61,51 - 4}{8,9 - 4} = 11,728 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{61,51 - 8,9}{8,9 - 4} = 10,728 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok ravnotežne pare:

$$\varphi_g = \frac{\xi_d - \xi_r}{\xi_g - \xi_r} = \frac{61,51 - 13,56}{37,71 - 13,56} = 1,986 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok refluksa:

$$\varphi_r = \frac{\xi_d - \xi_g}{\xi_g - \xi_r} = \frac{61,51 - 37,71}{37,71 - 13,56} = 0,986 \text{ kg/kg} .$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{11,728} = 127,898 \text{ kg/h} = 0,03553 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 10,728 \cdot 127,898 = 1372,102 \text{ kg/h} = 0,38114 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok ravnotežne pare:

$$q_{mg} = \varphi_g \cdot q_{md} = 1,986 \cdot 127,898 = 253,942 \text{ kg/h} = 0,07054 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok refluksa:

$$q_{mr} = \varphi_r \cdot q_{md} = 0,986 \cdot 127,898 = 126,044 \text{ kg/h} = 0,03501 \text{ kg/s} .$$

Toplinski tok deflegmatora:

$$\begin{aligned} \Phi_r &= q_{mg} \cdot h_g - q_{mr} \cdot h_r - q_{md} \cdot h_d = \\ &= 0,07054 \cdot 2069,7 - 0,03501 \cdot 348,7 - 0,03553 \cdot 1682,1 = 74,026 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok deflegmatora:

$$\phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}} = \frac{74,026}{0,03553} = 2083,658 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u deflegmatoru:

$$q_{mrvr} = \frac{\Phi_r}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{74,026}{(209,67 - 63,35)} = 0,50592 \text{ kg/s} = 1821,316 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_g &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m + \Phi_r = \\ &= 0,38114 \cdot 400 + 0,03553 \cdot 1682,1 - 0,41667 \cdot 50 + 74,026 = 265,409 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_g = \frac{\Phi_g}{q_{md}} = \frac{265,409}{0,03553} = 7470,604 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_g}{(h'_{zas} - h'_{zas})} = \frac{265,409}{(2748,11 - 640,19)} = 0,12591 \text{ kg/s} = 453,277 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,03553 \cdot (1682,1 - 256,4) = 50,651 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{50,651}{0,03553} = 1425,7 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u kondenzatoru:

$$q_{mrvk} = \frac{\Phi_g}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{50,651}{(209,67 - 63,35)} = 0,34617 \text{ kg/s} = 1246,198 \text{ kg/h} .$$

Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-4 i 2-5.



Tablica 2-4. Očitani parametri kontinuirane destilacije s istosmjernim deflegmatorom iz  $h - \xi$  dijagrama

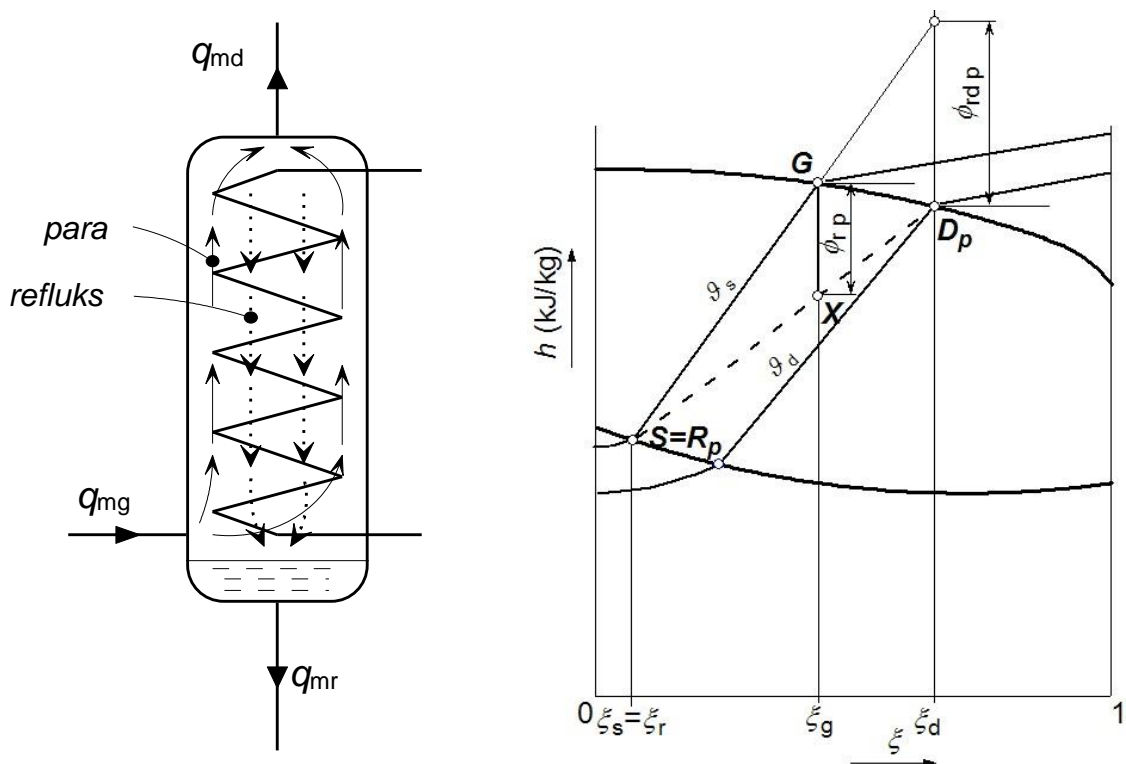
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_s, \text{kJ/kg}$	418,5	412,3	404,1	400	391,8	383,6	377,4	373,3
$\vartheta_s = \vartheta_g, \text{ }^\circ\text{C}$	98	97,1	96	95,2	94,6	93,6	92,9	92
$\xi_g, \%$	13,02	23,07	31,41	37,71	41,71	47,46	50,2	53,41
$h_g, \text{kJ/kg}$	2475,9	2303,6	2170,3	2069,7	2000	1911,8	1866,7	1807,2
$\xi_x, \%$	13,02	23,07	31,41	37,71	41,71	47,46	50,2	53,41
$\vartheta_r = \vartheta_d, \text{ }^\circ\text{C}$	97	94,7	91,7	88,3	86,6	84,3	83,6	82,8
$h_x, \text{kJ/kg}$	1360	1214,4	1091,3	1021,5	990,8	945,6	937,4	916,9
$\xi_r, \%$	2,2	4,59	8,05	13,56	18,4	25,9	31,3	35,22
$h_r, \text{kJ/kg}$	408,2	391,8	371,3	348,7	330,3	307,7	303,6	293,3
$\xi_d, \%$	24,05	41,27	54,39	61,51	64,54	68,34	69,22	71,07
$h_d, \text{kJ/kg}$	2287,2	2012,3	1803,1	1682,1	1634,9	1569,2	1548,7	1513,8
$h_k, \text{kJ/kg}$	311,8	289,2	268,7	256,4	252,3	250,3	248,2	246,2

Tablica 2-5. Izračunati parametri kontinuirane destilacije s istosmjernim deflegmatorom

$\xi_s [\%]$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_m, \text{kg/kg}$	2,916	5,688	8,705	11,728	15,253	21,47	32,686	69,799
$\varphi_s, \text{kg/kg}$	1,916	4,688	7,705	10,728	14,253	20,47	31,686	68,799
$\varphi_g, \text{kg/kg}$	2,019	1,985	1,984	1,986	1,979	1,968	2,006	1,971
$\varphi_r, \text{kg/kg}$	1,019	0,985	0,984	0,986	0,979	0,968	1,006	0,971
$q_{md}, \text{kg/h}$	514,334	263,697	172,317	127,898	98,344	69,865	45,892	21,49
$q_{ms}, \text{kg/h}$	985,666	1236,303	1327,683	1372,102	1401,656	1430,135	1454,108	1478,51
$q_{mg}, \text{kg/h}$	1038,65	523,399	341,832	253,942	194,663	137,527	92,075	42,354
$q_{mr}, \text{kg/h}$	524,316	259,702	169,514	126,044	96,319	67,662	46,183	20,864
$\Phi_r, \text{kW}$	328,106	159,254	102,286	74,026	54,647	36,798	24,106	10,525
$\phi_r, \text{kJ/kg}$	2296,531	2174,133	2136,935	2083,658	2000,418	1896,107	1891,024	1763,19
$q_{mrvr}, \text{kg/h}$	8072,603	3918,214	2516,616	1821,316	1344,51	905,356	593,102	258,963
$\Phi_g, \text{kW}$	748,63	427,411	316,793	265,409	231,022	198,807	175,454	152,042
$\phi_g, \text{kJ/kg}$	5239,922	5835,019	6618,328	7470,604	8456,859	10244,078	13763,566	25469,703
$q_{mzas}, \text{kg/h}$	1278,544	729,951	541,033	453,277	394,55	339,531	299,649	259,664
$\Phi_k, \text{kW}$	282,226	126,216	73,446	50,651	37,769	25,596	16,578	7,567
$\phi_k, \text{kJ/kg}$	1975,4	1723,1	1534,4	1425,7	1382,6	1318,9	1300,5	1267,6
$q_{mrvk}, \text{kg/h}$	6943,786	3105,363	1807,025	1246,198	929,266	629,751	407,889	186,175

### 2.3.2. Protusmjerni deflegmator

Drugi granični slučaj deflegamacije odvija se u idealnom protusmjernom deflegmatoru. Ovdje je potrebno paru iz kotlića dovoditi na dno obarala kako to prikazuje slika 2-7. jer tako para kroz deflegmator struji u suprotnom smjeru od refluxa koji se gravitacijski slijeva prema dnu. U slučaju idealnog kontakta pare i refluxa i dostatnog vremena za izmjenu tvari i topline između tih faza, dolazi do ravnoteže između refluxa i pare na dnu deflegmatora. Kako je na tom mjestu para došla iz kotlića, para je u ravnoteži sa sadržajem kotlića, tj. sa džibrom S, pa je nužno da i reflux na dnu deflegmatora mora imati isti sastav kao i džibra, što znači da je  $\xi_r = \xi_s$ . Posljedica toga je da pravac razmješavanja ima najmanji mogući nagib pa je koncentracija destilata  $\xi_d$  najveća. Štoviše, povećanjem topline deflegmacije  $\Phi_r$  mogu se postići po volji visoke koncentracije destilata bez obzira na koncentraciju džibre. Dakako da će povećanje koncentracije destilata trebati nadoknaditi većim utroškom topline za grijanje kotlića i većom potrošnjom rashladnog medija za deflegmator.



Slika 2-7. Shema i  $h - \xi$  dijagram protusmjernog deflegmatora [5]

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u ravnotežnoj pari:  $\xi_g = 37,71\% = 0,3771 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura ravnotežne pare:  $\vartheta_g = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija ravnotežne pare:  $h_g = 2069,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- omjer masenih protoka refluxa i pare destilata u deflegmatoru:  $q_{mr}/q_{md} = 0,70513$ ,
- maseni udio tvari 2 u mokroj pari:  $\xi_x = 37,71\% = 0,3771 \text{ kg/kg}$ ,
- specifična entalpija mokre pare:  $h_x = 1150,8 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u refluxu:  $\xi_r = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- specifična entalpija refluxa:  $h_r = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 61,51\% = 0,6151 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 88,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1682,1 \text{ kJ/kg}$ ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 88,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 256,4 \text{ kJ/kg}$ ,
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$ ,
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$ ,
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 209,67 \text{ kJ/kg}$ ,
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$ ,
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$ .

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{61,51 - 4}{8,9 - 4} = 11,728 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{61,51 - 8,9}{8,9 - 4} = 10,728 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok ravnotežne pare:

$$\varphi_g = \frac{\xi_d - \xi_r}{\xi_g - \xi_r} = \frac{61,51 - 4}{37,71 - 4} = 1,706 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok refluksa:

$$\varphi_r = \frac{\xi_d - \xi_g}{\xi_g - \xi_r} = \frac{61,51 - 37,71}{37,71 - 4} = 0,706 \text{ kg/kg} .$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{11,728} = 127,898 \text{ kg/h} = 0,03553 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 10,728 \cdot 127,898 = 1372,102 \text{ kg/h} = 0,38114 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok ravnotežne pare:

$$q_{mg} = \varphi_g \cdot q_{md} = 1,706 \cdot 127,898 = 218,196 \text{ kg/h} = 0,06061 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok refluksa:

$$q_{mr} = \varphi_r \cdot q_{md} = 0,706 \cdot 127,898 = 90,299 \text{ kg/h} = 0,02508 \text{ kg/s} .$$

Toplinski tok deflegmatora:

$$\begin{aligned} \Phi_r &= q_{mg} \cdot h_g - q_{mr} \cdot h_r - q_{md} \cdot h_d = \\ &= 0,06061 \cdot 2069,7 - 0,02508 \cdot 400 - 0,03553 \cdot 1682,1 = 55,651 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok deflegmatora:

$$\phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}} = \frac{55,651}{0,03553} = 1566,445 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u deflegmatoru:

$$q_{mrvr} = \frac{\Phi_r}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{55,651}{(209,67 - 63,35)} = 0,38034 \text{ kg/s} = 1369,222 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_g &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m + \Phi_r = \\ &= 0,38114 \cdot 400 + 0,03553 \cdot 1682,1 - 0,41667 \cdot 50 + 55,651 = 247,034 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_g = \frac{\Phi_g}{q_{md}} = \frac{247,034}{0,03553} = 6953,391 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_g}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{247,034}{(2748,11 - 640,19)} = 0,11719 \text{ kg/s} = 421,896 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,03553 \cdot (1682,1 - 256,4) = 50,651 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{50,651}{0,03553} = 1425,7 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode:

$$q_{mrvr} = \frac{\Phi_g}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{50,651}{(209,67 - 63,35)} = 0,34617 \text{ kg/s} = 1246,198 \text{ kg/h} .$$

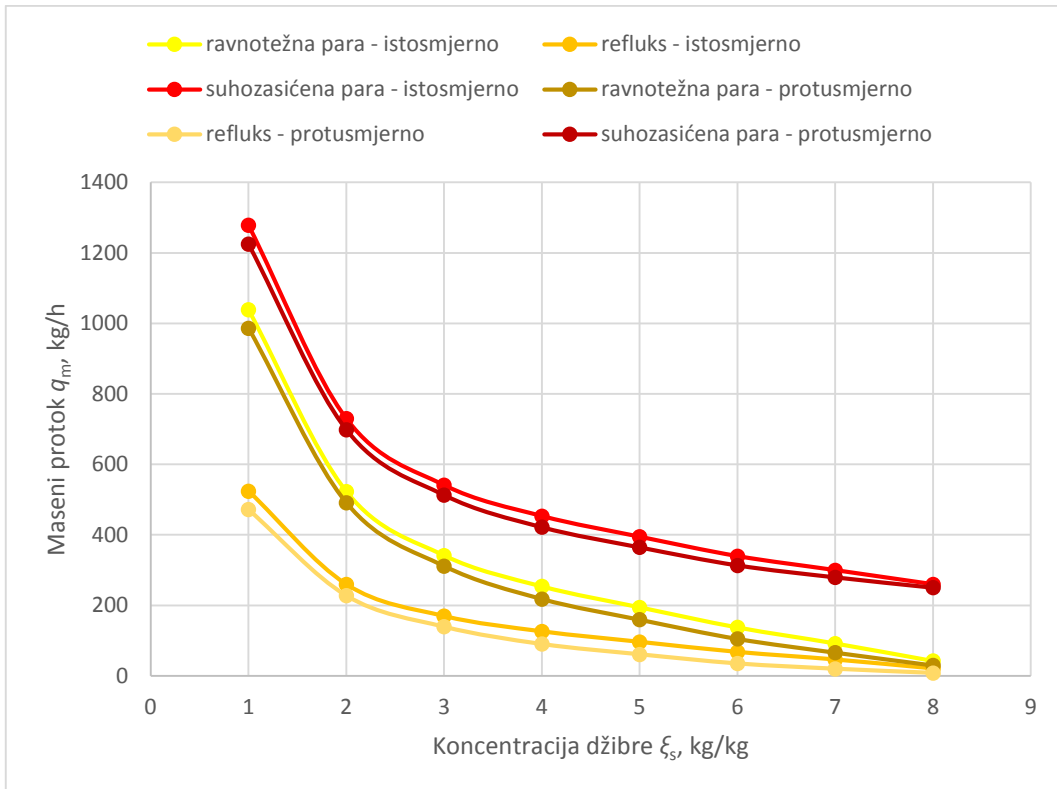
Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-6 i 2-7.

Tablica 2-6. Očitani parametri kontinuirane destilacije s protusmjernim deflegmatorom iz  $h - \xi$  dijagrama

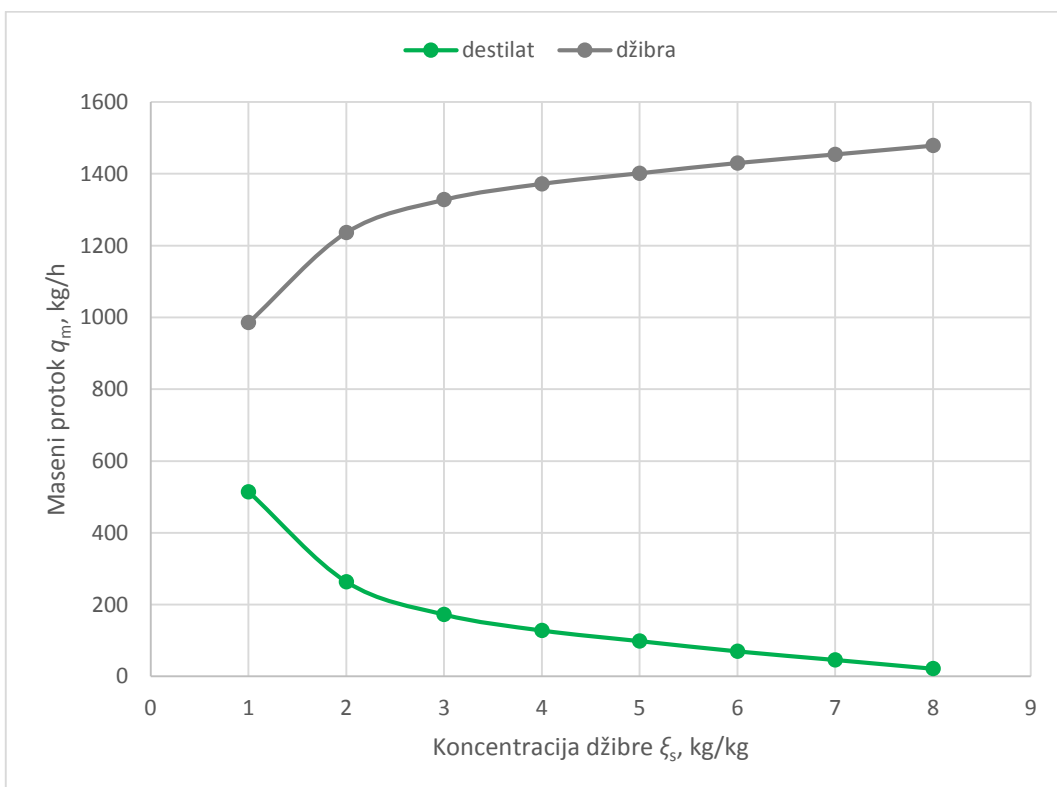
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_s, \text{kJ/kg}$	418,5	412,3	404,1	400	391,5	383,6	377,4	373,3
$\vartheta_s = \vartheta_g, ^\circ\text{C}$	98	97,1	96	95,2	94,6	93,6	92,9	92
$\xi_g, \%$	13,02	23,07	31,41	37,71	41,71	47,46	50,2	53,41
$h_g, \text{kJ/kg}$	2475,9	2303,6	2170,3	2069,7	2000	1911,8	1866,7	1807,2
$\xi_x, \%$	13,02	23,07	31,41	37,71	41,71	47,46	50,2	53,41
$h_x, \text{kJ/kg}$	1407,2	1275,9	1183,6	1150,8	1161	1173,3	1189,7	1200
$q_{mr}/q_{md}$	0,90741	0,85246	0,81295	0,70513	0,6213	0,50538	0,4433	0,39409
$\xi_r, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_r, \text{kJ/kg}$	418,5	412,3	404,1	400	391,5	383,6	377,4	373,3
$\vartheta_d, ^\circ\text{C}$	97	94,7	91,7	88,3	86,6	84,3	83,6	82,8
$\xi_d, \%$	24,05	41,27	54,39	61,51	64,54	68,34	69,22	71,07
$h_d, \text{kJ/kg}$	2287,2	2012,3	1803,1	1682,1	1634,9	1569,2	1548,7	1513,8
$h_k, \text{kJ/kg}$	311,8	289,2	268,7	256,4	252,3	250,3	248,2	246,2

Tablica 2-7. Izračunati parametri kontinuirane destilacije s protusmjernim deflegmatorom

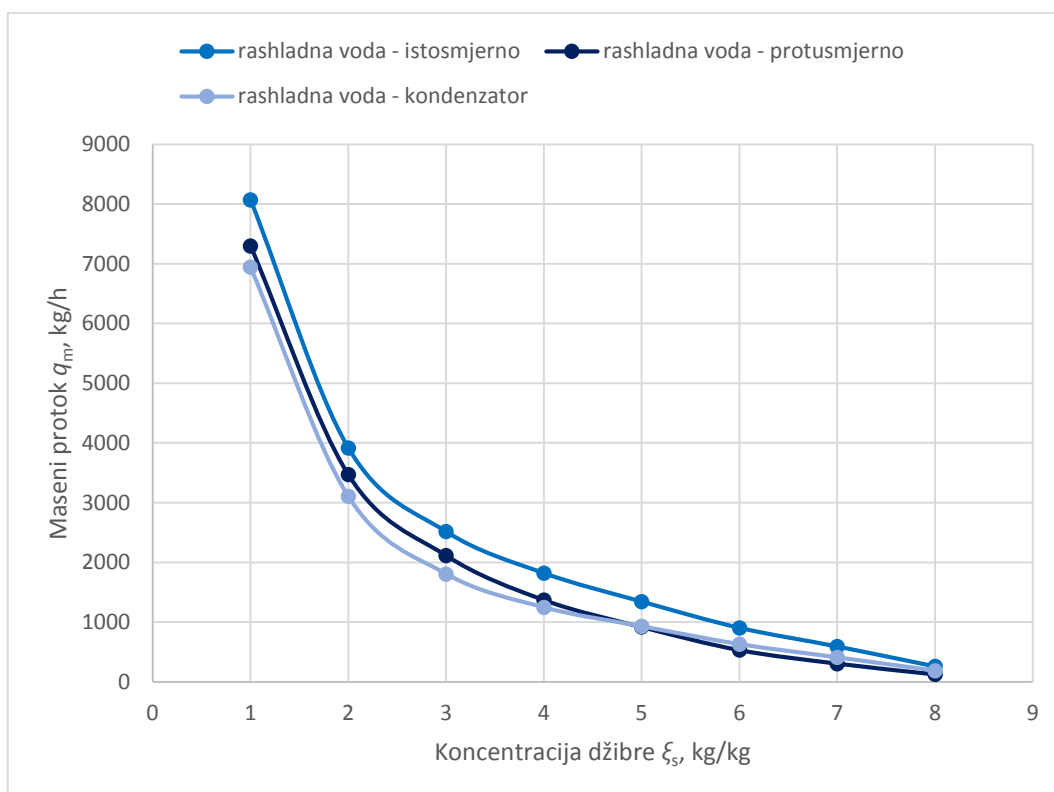
$\xi_s [\%]$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_m, \text{kg/kg}$	2,916	5,688	8,705	11,728	15,253	21,47	32,686	69,799
$\varphi_s, \text{kg/kg}$	1,916	4,688	7,705	10,728	14,253	20,47	31,686	68,799
$\varphi_g, \text{kg/kg}$	1,918	1,864	1,809	1,706	1,622	1,504	1,44	1,389
$\varphi_r, \text{kg/kg}$	0,918	0,864	0,809	0,706	0,622	0,504	0,44	0,389
$q_{md}, \text{kg/h}$	514,334	263,697	172,317	127,898	98,344	69,865	45,892	21,49
$q_{ms}, \text{kg/h}$	985,666	1236,303	1327,683	1372,102	1401,656	1430,135	1454,108	1478,51
$q_{mg}, \text{kg/h}$	986,305	491,476	311,7	218,196	159,504	105,05	66,097	29,848
$q_{mr}, \text{kg/h}$	471,972	227,778	139,382	90,299	61,16	35,185	20,205	8,358
$\Phi_r, \text{kW}$	296,692	141,003	85,959	55,651	37,3	21,585	12,413	5,08
$\phi_r, \text{kJ/kg}$	2076,647	1924,981	1795,826	1566,445	1365,428	1112,229	973,706	851,045
$q_{mrvr}, \text{kg/h}$	7299,682	3469,193	2114,9	1369,222	917,725	531,069	305,393	124,995
$\Phi_g, \text{kW}$	717,215	409,161	300,465	247,034	213,559	183,594	163,761	146,597
$\phi_g, \text{kJ/kg}$	5020,038	5585,867	6277,219	6953,391	7817,594	9460,2	12846,248	24557,559
$q_{mzas}, \text{kg/h}$	1224,892	698,783	513,148	421,896	364,726	313,55	279,678	250,365
$\Phi_k, \text{kW}$	282,226	126,216	73,446	50,651	37,769	25,596	16,578	7,567
$\phi_k, \text{kJ/kg}$	1975,4	1723,1	1534,4	1425,7	1382,6	1318,9	1300,5	1267,6
$q_{mrvk}, \text{kg/h}$	6943,786	3105,363	1807,025	1246,198	929,266	629,751	407,889	186,175



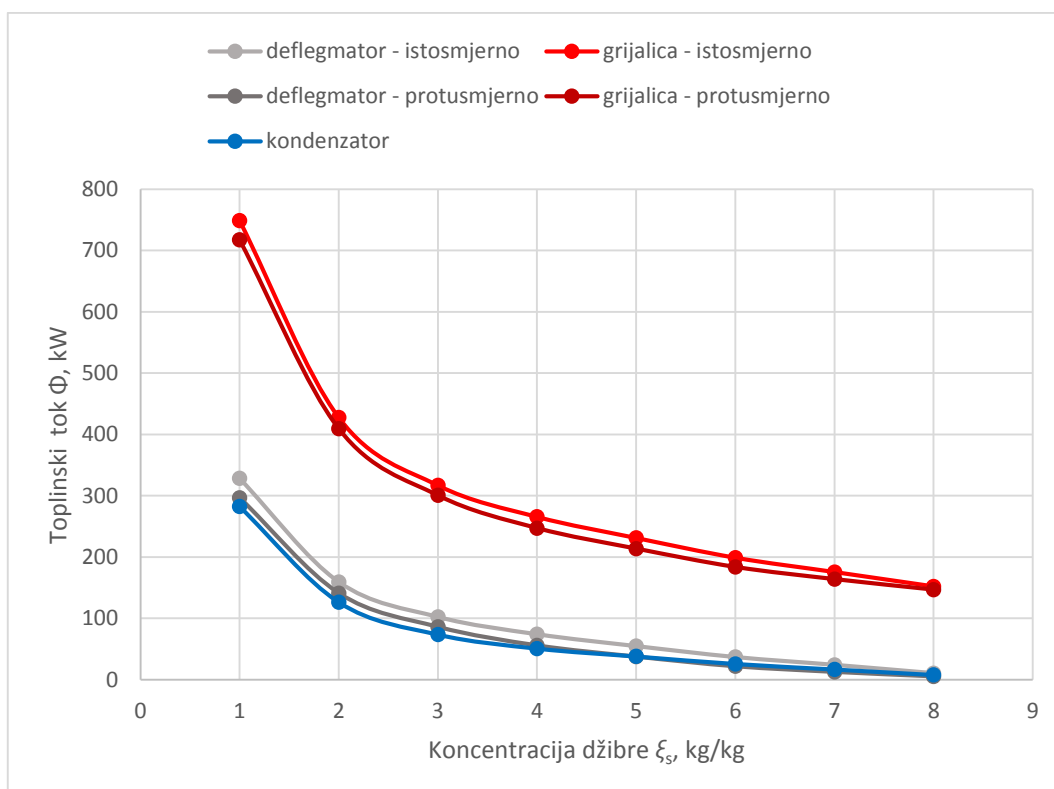
Slika 2-8.  $q_m - \xi_s$  dijagram za ravnotežnu paru, refluks i suhozasićenu paru za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju



Slika 2-9.  $q_m - \xi_s$  dijagram za destilat i džibru za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju



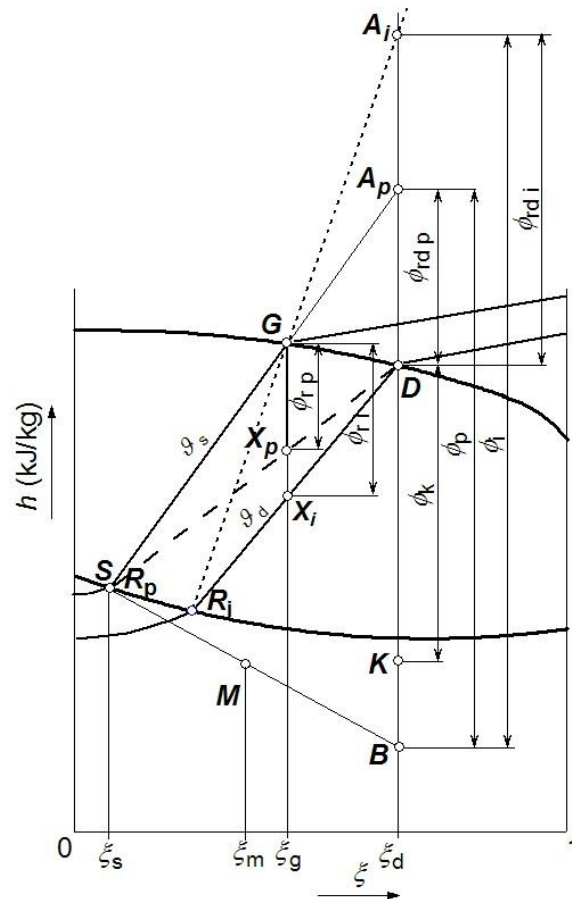
Slika 2-10.  $q_m - \xi_s$  dijagram za rashladnu vodu za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju



Slika 2-11.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za istosmjernu i protusmjernu deflegmaciju



Protusmjerni deflegmator pokazuje bolje osobine od istosmjernog kako u pogledu postizivih koncentracija destilata, tako i u pogledu utroška energije i rashladnog sredstva. To je prikazano na usporedbenom  $h - \xi$  dijagramu na slici 2-12.



Slika 2-12. Usporedba istosmjernog i protusmjernog obaranja [5]

Za zajednička stanja komine  $M$ , džibre  $S$  i destilata  $D$  dobiva se i zajedničko stanje ravnotežne pare iz kotlića  $G$ , a uz jednaku toplinu odvedenu u kondenzatoru  $\Phi_k$  i zajedničko stanje kondenziranog destilata  $K$ . S druge strane, želi li se istosmjernim i protusmjernim deflegmatorom postići istu koncentraciju destilata  $\xi_d$ , bit će potrebna veća toplina deflegmacije pri istosmjernoj deflegmaciji od one za protusmjernu. Isto vrijedi i za specifične toplinske tokove deflegmatora. Upravo za razliku u odvedenim toplinama u deflegmatoru bit će veća i toplina za pogon destilacije s istosmjernim deflegmatorom od one za pogon s protusmjernim deflegmatorom. U praktičnoj provedbi nikad neće biti moguće ostvariti niti idealno istosmjernu, niti idealno protusmjernu deflegmaciju, ali s obzirom na sve prednosti, treba težiti deflegmaciji s protusmjernim tokom pare i refluksa.

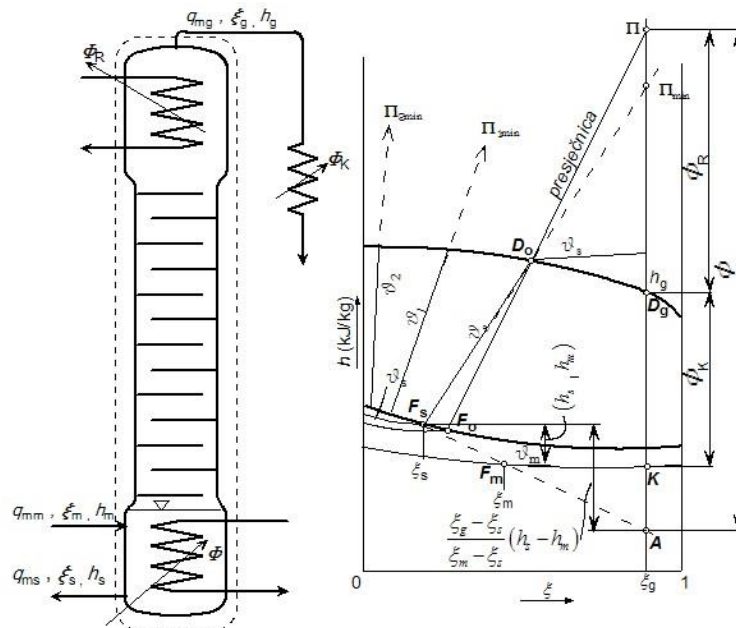
## **2.4. Rektifikacija**

U dosadašnjem izlaganju je pokazano kako se idealnim protusmjernim deflegmatorom postižu najbolji rezultati u pogledu utroška energije i postizivih koncentracija destilata. Takvi rezultati su uvjetovani ostvarenjem ravnoteže između refleksa i iz kotlića nadolazeće pare. Pritom treba naglasiti da se potpuna ravnoteža nikad neće moći ostvariti jer bi u tu svrhu trebalo ostvariti beskonačno veliku dodirnu površinu između faza i beskonačno vrijeme kontakta. To u praksi nije moguće, ali treba težiti što boljem približenju takvim uvjetima. To se postiže ugradnjom rektifikacijskog aparata između deflegmatora i kotlića te se na taj način dobiva uređaj pod nazivom rektifikacijska kolona kakva će u daljnjem razmatranju jednostavnije zvati samo kolonom.

Zadaća rektifikacijskog aparata je da omogući što dulji dodir uzlazne pare sa silaznom kapljevinom na što većoj dodirnoj površini. Stoga se on redovito gradi kao vertikalni cilindar potrebne visine s ugrađenim punilima različitih oblika ili pregradama u obliku preljevnih plitica. Osnovna je zadaća punila kolone i preljevnih plitica 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.

Ovisno o svrsi, rektifikacijske kolone se izvode kao kolone za jačanje, kolone za iscrpljivanje i spojene kolone.

## 2.5. Kolona za jačanje

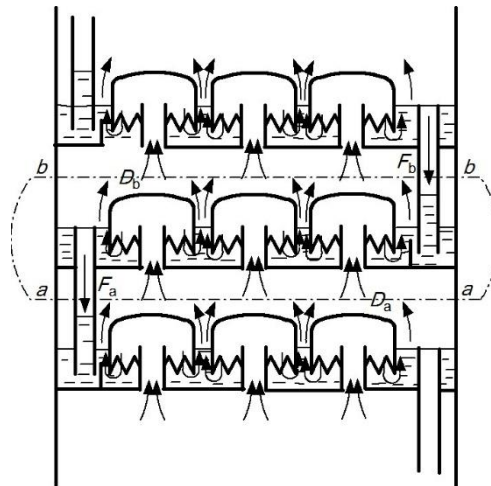


Slika 2-13. Shema i  $h - \xi$  dijagram kolone za jačanje [5]

Kolona za jačanje služi za dobivanje destilata visoke koncentracije, a sastoji se od kotlića ili grijalice na koju se nastavlja rektifikacijski aparat na čijem se vrhu nalazi deflegmator. U kotlič se uvodi komina koncentracije  $\xi_m$  kojom se džibra održava na željenoj koncentraciji  $\xi_s$ . Za pogon kolone dovodi se toplina grijanja kotlića  $\Phi_g$ . Dovodom topline  $\Phi_g$  za pogon kolone, džibra u kotliču vrije i odašilje ravnotežnu paru  $G$  koja putuje kroz rektifikacijski aparat prema deflegmatoru gdje odvođenjem topline deflegmacije  $\Phi_r$  djelomično kondenzira para koja dolazi s vrha rektifikacijskog aparata. Refluks  $F$  gravitacijski teče nadolje prema kotliču u protustruji s parom  $G$ . Pri tome u koloni dolazi do intenzivnog miješanja uzlazne pare i refluksa uz izmjenu tvari i topline, što znači da se para obogaćuje lako hlapivom komponentom 2 smjese, a refluks osiromašuje. Teorijski, uz dovoljno vremena i površine za izmjenu tvari, para i kapljevina bi na svakom mjestu u rektifikacijskom aparatu dolazile u ravnotežu. U praksi se to ne može postići, a približavanje ravnoteži ovisi o učinku kolone.

Događanja u rektifikacijskom aparatu može se pratiti promatranjem dvaju bliskih karakterističnih presjeka  $a - a$  i  $b - b$  prema slici 2-14.

Plitice su potopljene kapljevinom do razine koju određuje visina preljevne cijevi. Na taj je način uzlazna para prisiljena prolaziti kroz zvona i probijati se kroz sloj kapljevine.



Slika 2-14. Shema plitica uz bilancu plitice [5]

Promatra se po volji odabrana srednja plitica kolone smještena između dviju susjednih donje i gornje. Na nju s donje plitice kroz presjek  $a - a$  dopijeva para  $G_a$  masenog toka  $q_{mGa}$  koja prolaskom kroz pliticu dolazi u bliski dodir s kapljevom. Ta je para potekla iz kapljevine na donjoj plitici koja ima manju koncentraciju tvari 2 od ravnotežne koncentracije pare kapljevine na srednjoj plitici. Zato će pari, u nastojanju da dođe u ravnotežu s kapljevom na promatranoj srednjoj plitici, rasti koncentracija, a kapljevini padati. Kapljovina  $F_a$  koja kroz preljev teče s masenim tokom  $q_{mFa}$  prema donjoj plitici bit će osiromašena na tvari 2. Analogno tome, kroz presjek  $b - b$  sa srednje plitice odlazi maseni tok pare  $q_{mGb}$  obogaćene pare  $G_b$  prema gornjoj plitici dok se s gornje plitice slijeva kapljovina  $F_b$  masenog toka  $q_{mFb}$ .

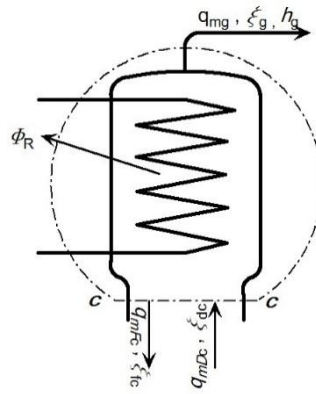
Bilanca ukupne mase tvari za promatranu srednju pliticu glasi:

$$q_{mGa} - q_{mFa} = q_{mGb} - q_{mFb} \quad (2-34)$$

Kako se takva bilanca može postaviti za bilo koji presjek kolone, onda za svaki presjek vrijedi:

$$q_{mG} - q_{mF} = konst, \quad (2-35)$$

a to znači da je svakom presjeku kolone razlika masenih tokova uzlazne pare i silazne kapljevine konstantna. Kod kolone za jačanje će ona biti u korist parne faze koja obogaćena lako hlapivom komponentom 2 dvojne smjese putuje prema vrhu kolone.



Slika 2-15. Shema deflegmatora uz bilancu deflegmatora [5]

Inicijalna kapljevina u koloni za jačanje prema slici 2-15 potječe iz deflegmatora na vrhu kolone, koja nastaje obaranjem dijela pare potekle s najviše plitice. Primjenom izraza (2-35) na bilancni krug oko deflegmatora dobiva se:

$$q_{mG} - q_{mF} = q_{mGc} - q_{mFc} = q_{md} \quad (2-36)$$

Dobiveni izraz pokazuje da je razlika masenih tokova pare i kapljevine na bilo kojem presjeku kolone upravo jednaka masenom protoku pare koja napušta kolonu na vrhu kao destilat  $q_{md}$ .

Analogna to vrijedi i za bilance tvari 2 dvojne smjese, pa se za bilo koji presjek kolone dobiva:

$$q_{mG} \cdot \xi_G - q_{mF} \cdot \xi_F = konst, \quad (2-37)$$

odnosno za vrh kolone:

$$q_{mG} \cdot \xi_G - q_{mF} \cdot \xi_F = konst, \quad (2-38)$$

Slično će biti i s bilancom energije. Ona će za općeniti presjek glasiti:

$$q_{mG} \cdot h_G - q_{mF} \cdot h_F = konst, \quad (2-39)$$

Uzlazna para nosi sa sobom višak topline pa prema slici 2-15 vrijedi:

$$q_{mG} \cdot h_G - q_{mF} \cdot h_F = q_{md} \cdot h_d + \Phi_r \quad (2-40)$$

Praktično je sve masene i toplinske veličine svesti na jedan kilogram destilata pa one glase:

$$\varphi = \frac{q_{mF}}{q_{md}}, \delta = \frac{q_{mG}}{q_{md}}, \phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}}. \quad (2-41)$$

Primjenom izraza (2-41) dobivaju se specifične masene i energijske bilance:

$$\delta - \varphi = 1, \quad (2-42)$$

$$\delta \cdot \xi_G - \varphi \cdot \xi_F = \xi_d. \quad (2-43)$$

$$\delta \cdot h_G - \varphi \cdot h_F = h_d + \phi_r. \quad (2-44)$$

Alternativni izrazi za specifične masene protoke  $\delta$  i  $\varphi$  pomoću gornjih izraza mogu izraziti kao funkcije koncentracija:

$$\delta = \frac{\xi_d - \xi_F}{\xi_G - \xi_F}, \varphi = \frac{\xi_d - \xi_G}{\xi_G - \xi_F}. \quad (2-45)$$

Uz malo preslagivanja, bilanca energije prelazi u:

$$h_F + \frac{\xi_d - \xi_F}{\xi_G - \xi_F} \cdot (h_G - h_F) = h_d + \phi_r, \quad (2-46)$$

Izraz (2-46) izveden je za proizvoljni presjek kolone pa predstavlja zakonitost koju moraju zadovoljavati uzlazna para i silazna kapljevina na bilo kojem mjestu kolone. On predstavlja jednadžbu presječnosti kolone za jačanje, koja se u  $h - \xi$  dijagramu pokazuje kao snop pravaca koji prolaze stanjima kapljevine F i pare G promatranog presjeka kolone, a svi se sijeku u točki  $\Pi$  na koncentraciji destilata  $\xi_d$  koja se naziva pol razlučivanja. Na pojedinoj plitici kolone teorijski bi se mogla postići ravnoteža uzlazne parne i silazne kapljevite faze, pod uvjetom da za to ima dovoljno vremena i razdvojne površine za izmjenu topline i tvari među fazama. U realnosti se to nikada neće postići te zbog toga pol razlučivanja  $\Pi$  ne može ležati niže od presjecišta s linijom  $\xi_d$  koje daje bilo koja izoterma u područja rektifikacije omeđenog koncentracijom džibre  $\xi_s$  i koncentracijom destilata  $\xi_d$ . Položaj pola razlučivanja određivat će utroške energije i rashladnog medija za pogon kolone za jačanje kako će to pokazati bilance mase i energije za bilancni krug oko kolone prema [1].

Za bilancni krug oko kolone vrijede sljedeće masene i energijske bilance:

$$q_{mm} = q_{ms} + q_{md}, \quad (2-47)$$

$$q_{mm} \cdot \xi_m = q_{ms} \cdot \xi_s + q_{md} \cdot \xi_d, \quad (2-48)$$

$$\Phi_g + q_{mm} \cdot h_m = q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d + \Phi_r. \quad (2-49)$$

Za kondenzaciju destilata treba rashladnom vodom odvoditi toplinu:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k). \quad (2-50)$$

Praktično je masene i energijske tokove svesti na jedinični tok destilata dijeljenjem s  $q_{md}$  pa će tada specifični tokovi biti:

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \frac{q_{mm}}{q_{md}}, \varphi_s = \frac{q_{ms}}{q_{md}}, \\ \phi_g &= \frac{\Phi_g}{q_{md}}, \phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}}. \end{aligned} \quad (2-51)$$

Na temelju izraza iz (2-51), dobivaju se masene bilance za bilancni krug oko kolone:

$$\varphi_m = \varphi_s + 1, \quad (2-52)$$

$$\varphi_m \cdot \xi_m = \varphi_s \cdot \xi_s + \xi_d. \quad (2-53)$$

Iz (2-52) i (2-53) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove komine i džibre:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s}, \varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s}, \quad (2-54)$$

Specifični toplinski tok potreban za grijanje kotlića nakon malog preslagivanja glasi:

$$\phi_g = \phi_r + h_d - h_s + \varphi_m \cdot (h_s - h_m). \quad (2-55)$$

Dobiveni izraz grafički se prikazuje u  $h - \xi$  dijagramu na slici 2-13 kao dužina AΠ gdje je točka A sjecište pravca kroz  $F_s$  i  $F_m$  s koncentracijom destilata  $\xi_d$ . Vidi se da će potrebna toplina grijanja kotlića za zadano stanje komine  $F_m$  i zadanu koncentraciju destilata  $\xi_d$  načelno postajati veća sa smanjenjem koncentracije džibre. Položaj pola razlučivanja Π također određuje potrebnu toplinu obaranja  $\Phi_r$ , odnosno specifičnu toplinu obaranja  $\phi_g$  predstavljenu dužinom  $G_d\Pi$  u  $h - \xi$  dijagramu na slici 2-13.

Specifični toplinski tok kondenzacije destilata jednak je:

$$\phi_k = h_d - h_k. \quad (2-56)$$

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 93,51\% = 0,9351 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1148,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 209,2 \text{ kJ/kg}$ ,
- minimalni pol razlučivanja:  $\Pi_{min} = 4839 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja:  $\Pi = 5039 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$ ,
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$ ,
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 209,67 \text{ kJ/kg}$ ,
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$ ,
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$ .

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 4}{8,9 - 4} = 18,255 \text{ kg/kg}.$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 8,9}{8,9 - 4} = 17,255 \text{ kg/kg}.$$



Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{18,255} = 82,170 \text{ kg/h} = 0,02283 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 17,255 \cdot 82,170 = 1417,830 \text{ kg/h} = 0,39384 \text{ kg/s} .$$

Specifični toplinski tok deflegmatora:

$$\phi_r = \Pi - h_d = 5039 - 1148,7 = 3890,3 \text{ kJ/kg} .$$

Toplinski tok deflegmatora:

$$\Phi_r = q_{md} \cdot \phi_r = 0,02283 \cdot 3890,3 = 88,797 \text{ kW}$$

Maseni tok rashladne vode u deflegmatoru:

$$q_{mrvr} = \frac{\Phi_r}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{88,797}{(209,67 - 63,35)} = 0,60687 \text{ kg/s} = 2184,717 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_g &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m + \Phi_r = \\ &= 0,39384 \cdot 400 + 0,02283 \cdot 1148,7 - 0,41667 \cdot 50 + 88,797 = 251,719 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_g = \frac{\Phi_g}{q_{md}} = \frac{251,719}{0,02283} = 11028,156 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_g}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{251,719}{(2748,11 - 640,19)} = 0,11942 \text{ kg/s} = 429,897 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,02283 \cdot (1148,7 - 209,2) = 21,444 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{21,444}{0,02283} = 939,5 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u kondenzatoru:

$$q_{mrv} = \frac{\Phi_k}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{21,444}{(209,67 - 63,35)} = 0,14656 \text{ kg/s} = 527,605 \text{ kg/h} .$$

Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-8, 2-9 i 2-10 .

Tablica 2-8. Očitani parametri kolone za jačanje iz  $h - \xi$  dijagrama

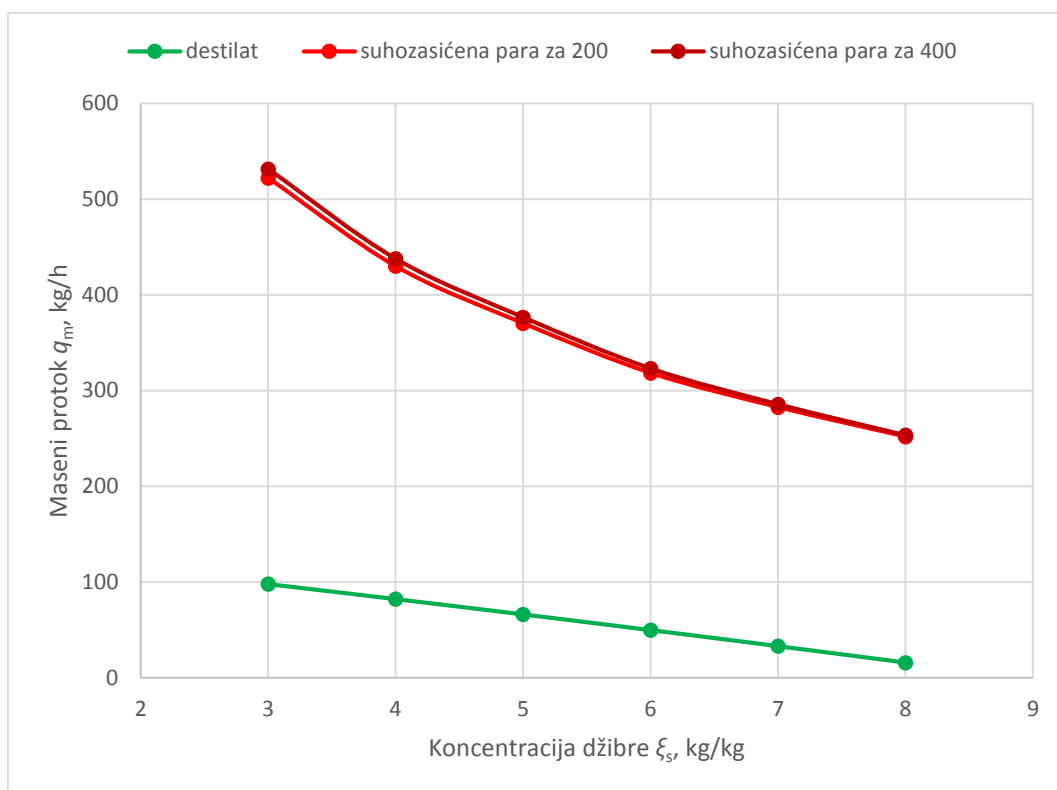
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_s, \text{kJ/kg}$	/	/	404,1	400	391,8	383,6	377,4	373,4
$\vartheta_s, \text{°C}$	/	/	96	95,2	94,6	93,6	92,9	92
$\xi_d, \%$	/	/	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51
$h_d, \text{kJ/kg}$	/	/	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7
$h_k, \text{kJ/kg}$	/	/	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2
$\vartheta_d, \text{°C}$	/	/	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7
$\Pi_{min}, \text{kJ/kg}$	/	/	6024,6	4839	4242,1	3614,4	3347,7	3066,7
$\Pi_{200}, \text{kJ/kg}$	/	/	6224,6	5039	4442,1	3814,4	3547,7	3266,7
$\Pi_{400}, \text{kJ/kg}$	/	/	6424,6	5239	4642,1	4014,4	3747,7	3466,7

Tablica 2-9. Izračunati parametri kolone za jačanje za  $\Pi_{200}$ 

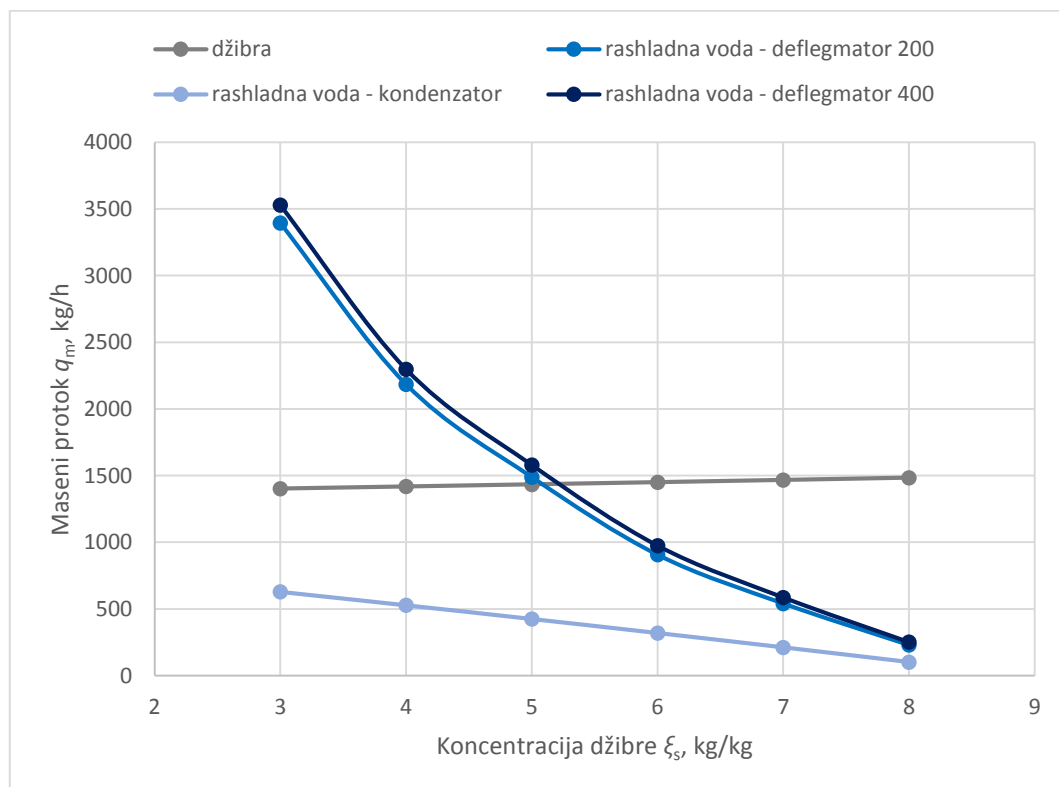
$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_m$ , kg/kg	/	/	15,332	18,255	22,675	30,14	45,448	94,637
$\varphi_s$ , kg/kg	/	/	14,332	17,255	21,675	29,14	44,448	93,637
$q_{md}$ , kg/h	/	/	97,835	82,17	66,152	49,768	33,005	15,85
$q_{ms}$ , kg/h	/	/	1402,165	1417,83	1433,848	1450,232	1466,995	1484,15
$\phi_r$ , kJ/kg	/	/	5075,9	3890,3	3293,4	2665,7	2399	2118
$\Phi_r$ , kW	/	/	137,944	88,797	60,518	36,852	21,994	9,325
$q_{mrvr}$ , kg/h	/	/	3393,926	2184,717	1488,969	906,689	541,137	229,43
$\Phi_g$ , kW	/	/	305,721	251,719	216,844	186,429	165,482	147,447
$\phi_g$ , kJ/kg	/	/	11249,555	11028,156	11800,597	13485,442	18049,843	33489,654
$q_{mzas}$ , kg/h	/	/	522,125	429,897	370,335	318,392	282,618	251,817
$\Phi_k$ , kW	/	/	25,532	21,444	17,264	12,988	8,613	4,136
$\phi_k$ , kJ/kg	/	/	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5
$q_{mrvk}$ , kg/h	/	/	628,183	527,605	424,755	319,554	211,921	101,77

Tablica 2-10. Izračunati parametri kolone za jačanje za  $\Pi_{400}$ 

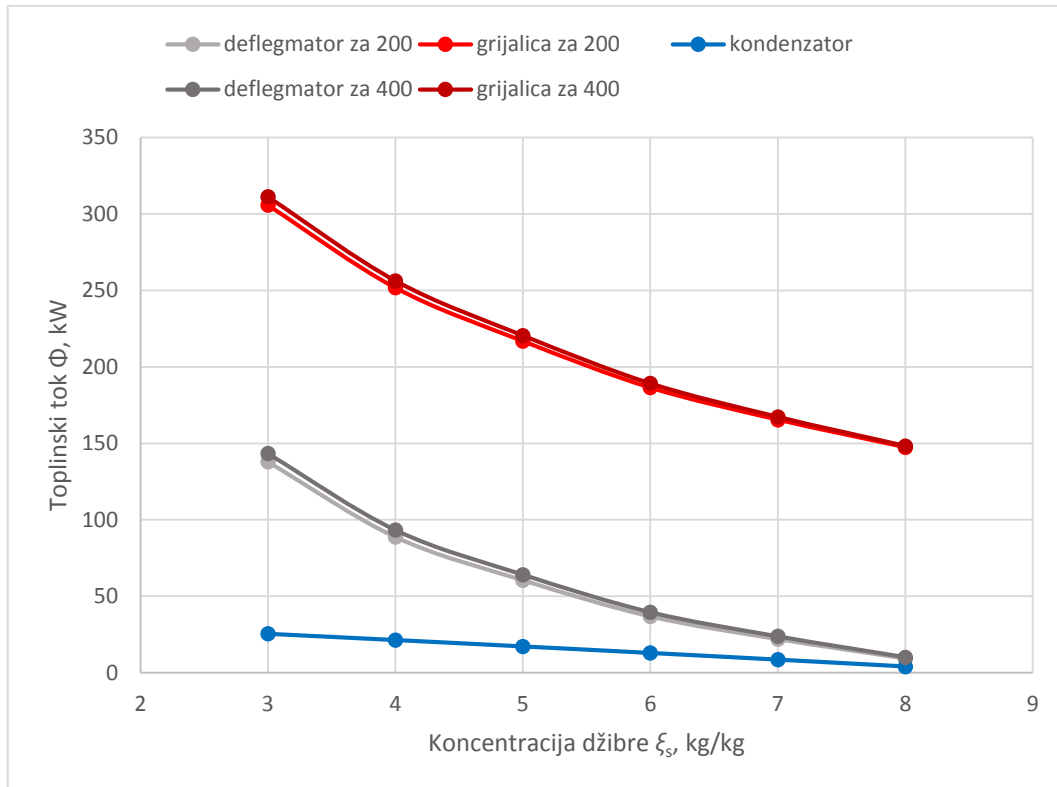
$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_m$ , kg/kg	/	/	15,332	18,255	22,675	30,14	45,448	94,637
$\varphi_s$ , kg/kg	/	/	14,332	17,255	21,675	29,14	44,448	93,637
$q_{md}$ , kg/h	/	/	97,835	82,17	66,152	49,768	33,005	15,85
$q_{ms}$ , kg/h	/	/	1402,165	1417,83	1433,848	1450,232	1466,995	1484,15
$\phi_r$ , kJ/kg	/	/	5275,9	4090,3	3493,4	2865,7	2599	2318
$\Phi_r$ , kW	/	/	143,379	93,362	64,193	39,617	23,828	10,206
$q_{mrvr}$ , kg/h	/	/	3527,653	2297,033	1579,391	974,715	586,25	251,095
$\Phi_g$ , kW	/	/	311,157	256,284	220,519	189,194	167,316	148,328
$\phi_g$ , kJ/kg	/	/	11449,555	11228,156	12000,597	13685,442	18249,843	33689,654
$q_{mzas}$ , kg/h	/	/	531,407	437,694	376,612	323,114	285,749	253,321
$\Phi_k$ , kW	/	/	25,532	21,444	17,264	12,988	8,613	4,136
$\phi_k$ , kJ/kg	/	/	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5
$q_{mrvk}$ , kg/h	/	/	628,183	527,605	424,755	319,554	211,921	101,77



Slika 2-16.  $q_m - \xi_s$  dijagram za suhozasičenu paru i destilat kolone za jačanje



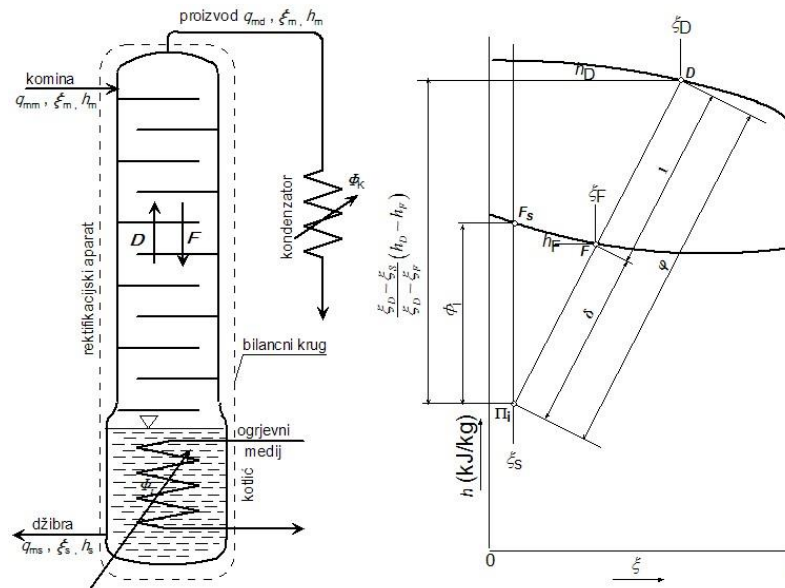
Slika 2-17.  $q_m - \xi_s$  dijagram za džibru i rashladnu vodu kolone za jačanje



Slika 2-18.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za deflegmator, grijalicu i kondenzator kolone za jačanje

Kolona za jačanje prvenstveno služi dobivanju destilata što veće koncentracije. Pri tome će biti potrebno trošiti sve više energije za njezin pogon kako se vrijednost  $\xi_d$  bude približavala čistoj tvari 2. Destilacijskim postupcima ne može se dobiti apsolutno čiste sastojke smjese, a nastojanje dobivanja sve čišćeg destilata ili džibre rezultira sve većom potrošnjom energije i rashladnog sredstva pa se zbog toga smjesa razdvaja do ekonomski prihvatljivih koncentracija, a čiste sastojke se dobiva naknadnim fizikalno-kemijskim postupcima.

## 2.6. Kolona za iscrpljivanje



Slika 2-19. Shema i  $h - \xi$  dijagram kolone za iscrpljivanje [5]

Kolona za iscrpljivanje služi za što bolje izdvajanje tvari 2 iz džibre. Za razliku od kolone za jačanje, ona nema obarala, već se na vrh kolone dovodi komina  $F_m$  s masenim protokom  $q_{mm}$  te time ona predstavlja oborinu koja se kroz rektifikacijski aparat slijeva prema kotliću na dnu kolone. U kotliću vrije džibra  $F_s$  te otpušta ravnotežnu paru prema prvoj plitici. Na toj i svim daljnjim pliticama događaju se izmjene tvari i topline s kapljevitom oborinom kako je to opisano u prethodnom poglavlju. Iz kotlića se izvodi džibra  $F_s$  masenim tokom  $q_{ms}$ . Proizvod vrha kolone za iscrpljivanje je para destilata  $D$  masenog protoka  $q_{md}$  koja je bila u kontaktu s kominom.

U svrhu dobivanja osnovnih zakonitosti promjena u koloni za iscrpljivanje prema [1], sve veličine se svode na jedinični protok džibre  $q_{ms}$  pa će specifični maseni tokovi kapljevite oborine  $\varphi$  i uzlazne pare  $\delta$  i specifična toplina za grijanje kotlića kolone za iscrpljivanje  $\Phi_i$  na proizvoljnom presjeku kolone biti:

$$\varphi = \frac{q_{mF}}{q_{ms}}, \delta = \frac{q_{mG}}{q_{ms}}, \phi_i = \frac{\Phi_i}{q_{md}}. \quad (2-57)$$

Slično kao i kod one za jačanje, za svaki presjek kolone za iscrpljivanje se dobivaju jedinične masene i energijske bilance:

$$\varphi - \delta = 1, \quad (2-58)$$

$$\varphi \cdot \xi_F - \delta \cdot \xi_G = \xi_s. \quad (2-59)$$

$$\varphi \cdot h_F - \delta \cdot h_G = h_s + \phi_i. \quad (2-60)$$

Bilanca ukupne mase pokazuje da u koloni za iscrpljivanje, suprotno od kolone za jačanje, na svakom presjeku postoji višak kapljevite faze F u odnosu na parnu fazu G.

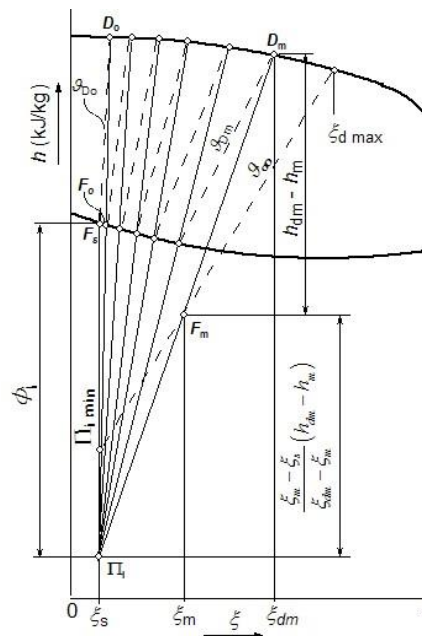
Alternativni izrazi za specifične masene protoke  $\delta$  i  $\varphi$  pomoću gornjih izraza mogu izraziti kao funkcije koncentracija:

$$\varphi = \frac{\xi_G - \xi_s}{\xi_G - \xi_F}, \delta = \frac{\xi_F - \xi_s}{\xi_G - \xi_F}. \quad (2-61)$$

Uz malo preslagivanja, bilanca energije prelazi u:

$$h_G - \frac{\xi_G - \xi_s}{\xi_G - \xi_F} \cdot (h_G - h_F) = h_s + \phi_i, \quad (2-62)$$

Gornji izraz predstavlja jednadžbu presječne za proizvoljni presjek kolone i čini snop pravaca koji prolaze stanjima kapljevine F i pare G na promatranom presjeku, a svi će se sjeći u polu razlučivanja kolone za iscrpljivanje  $\Pi_i$ .



Slika 2-20. Pol razlučivanja i presječne kolone za iscrpljivanje [5]

Postupak određivanja položaja pola razlučivanja  $\Pi_i$  kolone za iscrpljivanje prikazan je na slici 2-20. Za presjek iznad najgornje plitice na koju se dovodi komina, presječna se polaže kroz stanje komine  $F_m$ . Položaj pola  $\Pi_i$  bit će opet ovisan o nagibu izoterme u području rektifikacije  $\xi_s - \xi_{dm}$ . Niti jedna presječna ne smije biti položenija od izoterme zasićenog područja koje se s njom sijeku. Najviši dopušteni položaj pola je  $\Pi_{i \min}$ , a on se nalazi na produžetku izoterme  $\mathcal{G}_\infty$  koja cilja u stanje komine  $F_m$ . U tom slučaju kolona bi bila beskonačno visoka, odnosno imala bi beskonačan broj plitica, a njome bi se postiglo najveću moguću koncentraciju destilata  $\xi_{dm \max}$  za zadano stanje komine  $F_m$ . Za realna pogonska stanja kolone iscrpljivanja stvarni se pol mora postaviti nešto niže.

Za bilancni krug oko kolone vrijede sljedeće masene i energijske bilance:

$$q_{mm} = q_{ms} + q_{md}, \quad (2-63)$$

$$q_{mm} \cdot \xi_m = q_{ms} \cdot \xi_s + q_{md} \cdot \xi_d, \quad (2-64)$$

$$\Phi_i + q_{mm} \cdot h_m = q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d. \quad (2-65)$$

Za kondenzaciju destilata treba rashladnom vodom odvoditi toplinu:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k). \quad (2-66)$$

Praktično je masene i energijske tokove svesti na jedinični tok džibre dijeljenjem s  $q_{ms}$  pa će tada specifični tokovi biti:

$$\varphi_m = \frac{q_{mm}}{q_{ms}}, \delta_d = \frac{q_{md}}{q_{ms}}, \quad (2-67)$$

$$\phi_i = \frac{\Phi_i}{q_{ms}}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}}.$$

Na temelju izraza iz (2-67), dobivaju se masene bilance za bilancni krug oko kolone:

$$\varphi_m = \delta_d + 1, \quad (2-68)$$

$$\varphi_m \cdot \xi_m = \delta_d \cdot \xi_s + \xi_s. \quad (2-69)$$

Iz (2-68) i (2-69) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove komine i džibre:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_d - \xi_m}, \delta_d = \frac{\xi_m - \xi_s}{\xi_d - \xi_m}, \quad (2-70)$$



Specifični toplinski tok potreban za grijanje kotlića nakon malog preslagivanja glasi:

$$\phi_i = h_s - h_m + \delta_d \cdot (h_d - h_m) . \quad (2-71)$$

Dobiveni izraz je u  $h - \xi$  dijagramu na slici 2-19 predstavljen dužinom  $F_s - \Pi_i$ . Ta će toplina biti to manja što će pol razlučivanja  $\Pi_i$  biti bliži stanju džibre  $F_s$ . To će opet ovisiti s jedne strane o tome koliko će biti uputno približiti stvarni pol razlučivanja minimalno, a s druge strane će položaj pola razlučivanja padati sve niže što će biti potrebno jače iscrpljivati džibru.

Specifični toplinski tok kondenzacije destilata jednak je:

$$\phi_k = h_d - h_k . \quad (2-72)$$

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$  ,
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$  ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$  ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$  ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$  ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 58,93\% = 0,5893 \text{ kg/kg}$  ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 86,9 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1729,2 \text{ kJ/kg}$  ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 86,9 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 209,2 \text{ kJ/kg}$  ,
- minimalni pol razlučivanja:  $\Pi_{imin} = -82,1 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja:  $\Pi_i = -102,1 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$  ,
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$  ,
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- izlazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv2} = 209,67 \text{ kJ/kg}$  ,

- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$ ,
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$ .

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_d - \xi_m} = \frac{58,93 - 4}{58,93 - 8,9} = 1,098 \text{ kg/kg}.$$

Specifični maseni tok destilata:

$$\delta_d = \frac{\xi_m - \xi_s}{\xi_d - \xi_m} = \frac{8,9 - 4}{58,93 - 8,9} = 0,098 \text{ kg/kg}.$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{1,098} = 1366,095 \text{ kg/h} = 0,37947 \text{ kg/s}.$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \delta_d \cdot q_{ms} = 0,098 \cdot 1366,095 = 133,905 \text{ kg/h} = 0,03720 \text{ kg/s}.$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m = \\ &= 0,37947 \cdot 400 + 0,03720 \cdot 1729,2 - 0,41667 \cdot 50 = 195,274 \text{ kW}. \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_i = \frac{\Phi_i}{q_{ms}} = \frac{197,274}{0,37947} = 514,595 \text{ kJ/kg}.$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_i}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{195,274}{(2748,11 - 640,19)} = 0,09264 \text{ kg/s} = 333,498 \text{ kg/h}.$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,03720 \cdot (1729,2 - 272,8) = 54,172 \text{ kW}.$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{54,172}{0,03720} = 1456,4 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u kondenzatoru:

$$q_{mrv} = \frac{\Phi_k}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{54,172}{(209,67 - 63,35)} = 0,37023 \text{ kg/s} = 1332,825 \text{ kg/h} .$$

Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-11, 2-12 i 2-13.

Tablica 2-11. Očitani parametri kolone za iscrpljivanje iz  $h - \xi$  dijagrama

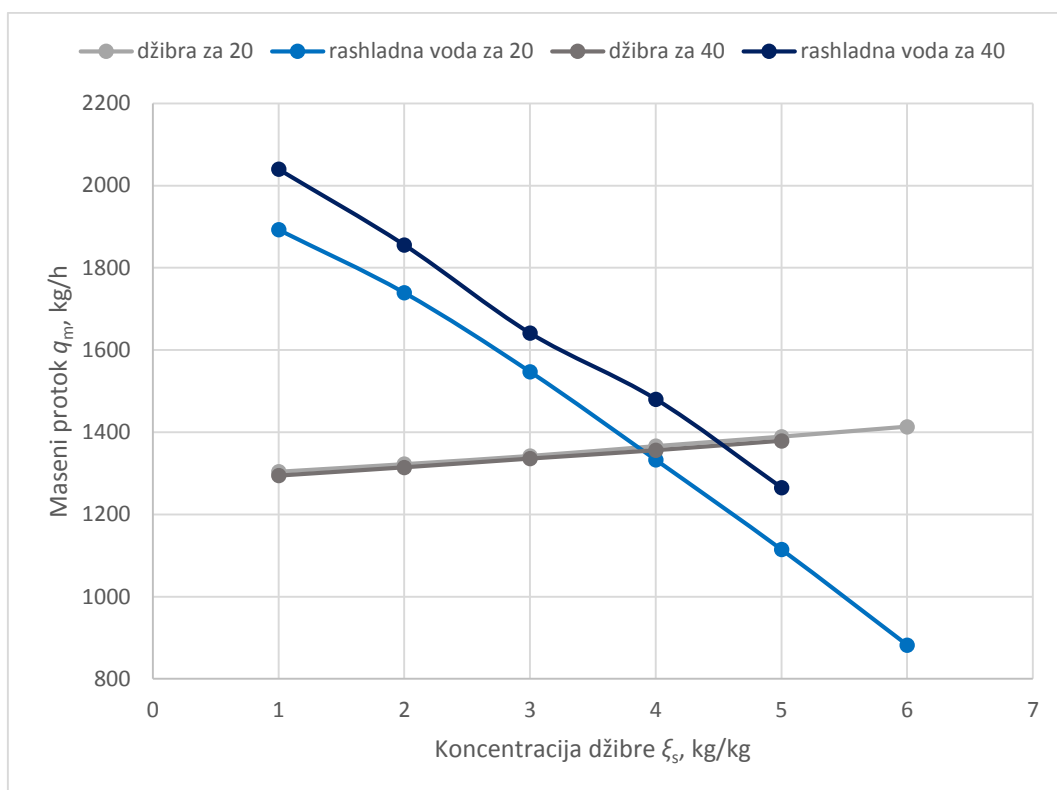
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_s, \text{kJ/kg}$	418,5	412,3	404,1	400	391,8	383,6	/	/
$\vartheta_s, ^\circ\text{C}$	98	97,1	96	95,2	94,6	93,6	/	/
$\Pi_{i\min}, \text{kJ/kg}$	-168,2	-141,5	-106,7	-82,1	-57,4	-22,6	/	/
$\Pi_{i20}, \text{kJ/kg}$	-188,2	-161,5	-126,7	-102,1	-77,4	-42,6	/	/
$\xi_d, \%$	61,51	60,34	59,17	58,93	57,8	56,24	/	/
$h_d, \text{kJ/kg}$	1682,1	1704,6	1727,2	1729,2	1745,6	1766,2	/	/
$h_k, \text{kJ/kg}$	268,7	270,8	272,8	272,8	274,9	276,9	/	/
$\vartheta_d, ^\circ\text{C}$	86,7	86,8	86,9	86,9	87	87,1	/	/
$\Pi_{i40}, \text{kJ/kg}$	-208,2	-181,5	-146,7	-122,1	-97,4	/	/	/
$\xi_d, \%$	58,68	57,85	56,93	55,12	53,46	/	/	/
$h_d, \text{kJ/kg}$	1725,1	1739,5	1755,9	1784,6	1813,3	/	/	/
$h_k, \text{kJ/kg}$	272,8	274,9	276,9	279	281	/	/	/
$\vartheta_d, ^\circ\text{C}$	86,9	87	87,1	87,2	87,3	/	/	/

Tablica 2-12. Izračunati parametri kolone za iscrpljivanje za  $\Pi_{i20}$ 

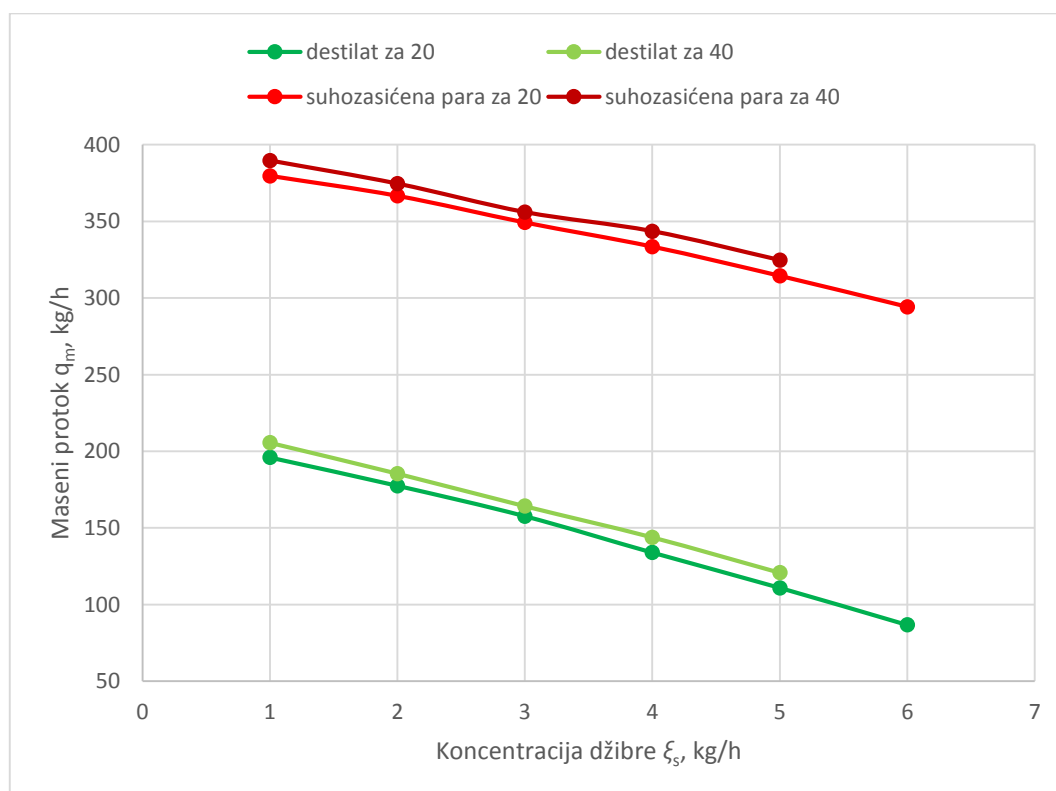
$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_m$ , kg/kg	1,15	1,134	1,117	1,098	1,08	1,061	/	/
$\delta_d$ , kg/kg	0,15	0,134	0,117	0,098	0,08	0,061	/	/
$q_{ms}$ , kg/h	1304,075	1322,499	1342,347	1366,095	1389,102	1413,308	/	/
$q_{md}$ , kg/h	195,925	177,501	157,653	133,905	110,898	86,692	/	/
$\Phi_i$ , kW	222,311	214,676	204,494	195,274	184,12	172,294	/	/
$\phi_i$ , kJ/kg	613,707	584,374	548,426	514,595	477,166	438,871	/	/
$q_{mzas}$ , kg/h	379,673	366,634	349,244	333,498	314,449	294,252	/	/
$\Phi_k$ , kW	76,922	70,695	62,882	54,172	45,305	35,864	/	/
$\phi_k$ , kJ/kg	1413,4	1433,8	1435,9	1456,4	1470,7	1489,3	/	/
$q_{mrvk}$ , kg/h	1892,562	1739,342	1547,12	1332,825	1114,66	882,381	/	/

Tablica 2-13. Izračunati parametri kolone za iscrpljivanje za  $\Pi_{i40}$ 

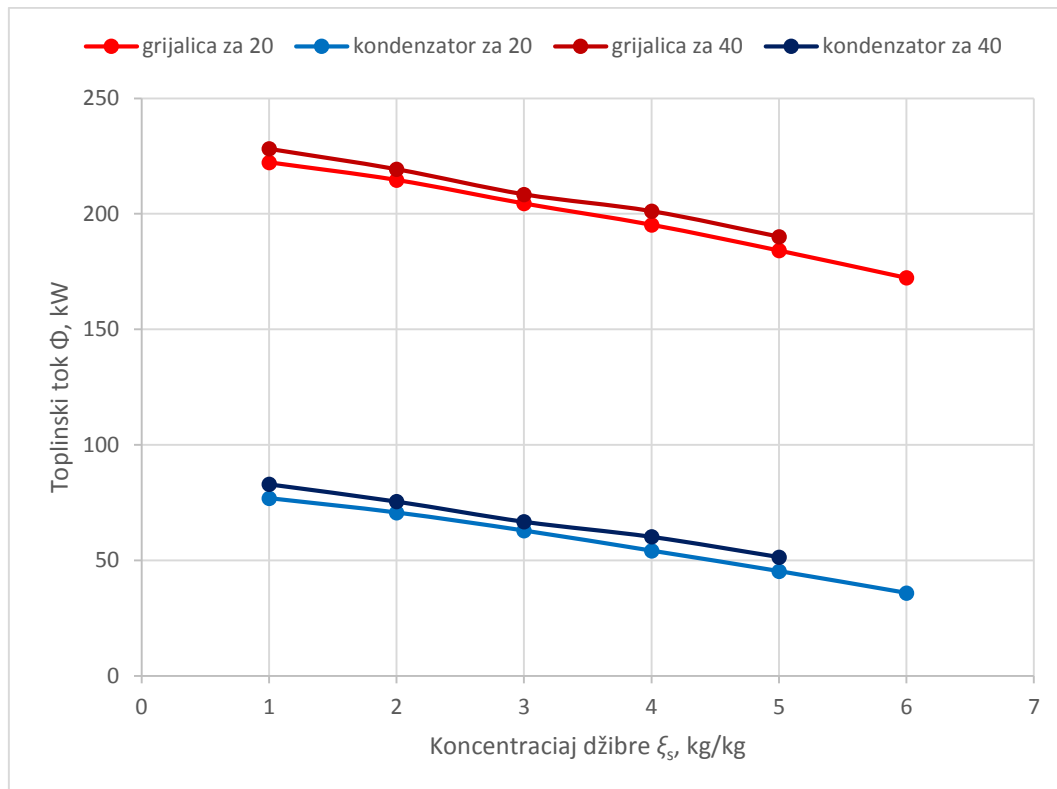
$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_m$ , kg/kg	1,159	1,141	1,123	1,106	1,088	/	/	/
$\delta_d$ , kg/kg	0,159	0,141	0,123	0,106	0,088	/	/	/
$q_{ms}$ , kg/h	1294,463	1314,586	1335,798	1356,115	1379,171	/	/	/
$q_{md}$ , kg/h	205,537	185,414	164,202	143,885	120,829	/	/	/
$\Phi_i$ , kW	228,14	219,314	208,451	201,173	190,127	/	/	/
$\phi_i$ , kJ/kg	634,476	600,594	561,78	534,042	496,283	/	/	/
$q_{mzas}$ , kg/h	389,628	374,555	356,003	343,572	324,708	/	/	/
$\Phi_k$ , kW	82,917	75,433	66,711	60,176	51,43	/	/	/
$\phi_k$ , kJ/kg	1452,3	1464,6	1462,6	1505,6	1532,3	/	/	/
$q_{mrvk}$ , kg/h	2040,062	1855,918	1641,343	1480,543	1265,356	/	/	/



Slika 2-21.  $q_m - \xi_s$  dijagram za džibru i rashladnu vodu kolone za ispljivanje



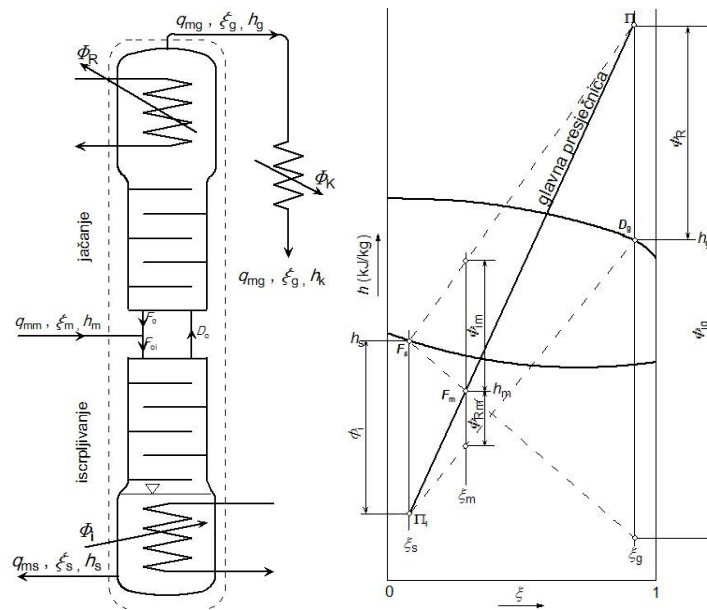
Slika 2-22.  $q_m - \xi_s$  dijagram za destilat i suhozasićenu paru kolone za ispljivanje



Slika 2-23.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za grijalicu i kondenzator kolone za jačanje

Kod kolone za iscrpljivanje je koncentracija destilata  $\xi_{dm}$  određena presječnicom  $\Pi_i - D_m$  položenom kroz stanje komine  $F_m$ . Traženu koncentraciju destilata takvom kolonom nije moguće postići. Kada se želi dobiti destilat visoke koncentracije, a džibru niske koncentracije upotrebljava se spojena kolona.

## 2.7. Spojena kolona



Slika 2-24. Shema i  $h - \xi$  dijagram spojene kolone [5]

Kolona za jačanje traži sve više topline za pogon kako se smanjuje tražena koncentracija džibre, dok je kod kolone za iscrpljivanje koncentracija destilata ograničena nagibom izotermi zasićenog područja. Zato će se u svim onim situacijama koje zahtijevaju što potpunije razdvajanje dvojne smjese primjenjivati spojena kolona. Kako sam naziv uređaja govori, ona se sastoji od kolone za iscrpljivanje na koju je nadograđena kolona za jačanje bez kotlića. Spojena kolona je prikazana shematski na slici 2-24.

Komina  $F_m$  dovodi se s masenim tokom  $q_{mm}$  u rektifikacijski aparat na mjestu gdje prestaje dio za iscrpljivanje a počinje onaj za jačanje. Kod kolone s pliticama će to biti najviša plitica dijela za iscrpljivanje iznad koje je najniža plitica dijela za jačanje. Na mjestu privoda komine ona se miješa s refluksom kolone za jačanje koji dolazi odozgo te ta mješavina predstavlja početni refluks na najgornjoj plitici kolone za iscrpljivanje. Iz dijela za iscrpljivanje dolazi para kojom se napaja dio kolone za jačanje. To znači da kolona za iscrpljivanje zamjenjuje kotlić 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. To znači da se za pogon spojene kolone troši toplina  $\Phi_i$  u kotliću u kojem vrije džibra stanja  $F_s$ . Ona se iz kotlića odvodi masenim tokom  $q_{ms}$  i koncentracijom  $\xi_s$ , a sadržaj kotlića se održava dotokom refluksa iste koncentracije. Vrh kolone odaje destilat stanja  $D_g$  s masenim tokom  $q_{mg}$  i koncentracijom  $\xi_g$

što je rezultat razmješavanja u deflegmatoru spojene kolone. Za deflegmaciju se rashladnim medijem odvodi toplina  $\Phi_r$ . Destilat se ukapljuje u kondenzatoru te uređaj napušta sa stanjem K.

Za bilancni krug oko kolone prema [1] vrijede sljedeće masene i energijske bilance:

$$q_{mm} = q_{ms} + q_{md}, \quad (2-73)$$

$$q_{mm} \cdot \xi_m = q_{ms} \cdot \xi_s + q_{md} \cdot \xi_d, \quad (2-74)$$

$$\Phi_i + q_{mm} \cdot h_m = q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d + \Phi_r. \quad (2-75)$$

Za kondenzaciju destilata treba rashladnom vodom odvoditi toplinu:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k). \quad (2-76)$$

Praktično je masene i energijske tokove svesti na jedinični tok destilata i džibre pa će tada specifični tokovi biti:

$$\varphi_m = \frac{q_{mm}}{q_{md}}, \varphi_s = \frac{q_{ms}}{q_{md}}, \quad (2-77)$$

$$\phi_i = \frac{\Phi_g}{q_{ms}}, \phi_r = \frac{\Phi_r}{q_{md}}, \phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}}.$$

Na temelju izraza iz (2-77), dobivaju se masene bilance za bilancni krug oko kolone:

$$\varphi_m = \varphi_s + 1, \quad (2-78)$$

$$\varphi_m \cdot \xi_m = \varphi_s \cdot \xi_s + \xi_d. \quad (2-79)$$

Iz (2-78) i (2-79) se malim preslagivanjem dobivaju alternativni izrazi za specifične tokove komine i džibre:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s}, \varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s}, \quad (2-80)$$

Sređena bilanca energije glasi:

$$\frac{\phi_i - (h_s - h_m)}{\xi_m - \xi_s} = \frac{h_d + \phi_r - h_m}{\xi_d - \xi_m} \quad (2-81)$$

Izraz predstavlja jednadžbu pravca glavne presječne koja prolazi stanjem komine  $F_m$  i kroz polove razlučivanja  $\Pi_i$  i  $\Pi$ . Položaj polova razlučivanja dijela za iscrpljivanje  $\Pi_i$  i dijela za jačanje  $\Pi$ , a time i smjer glavne presječne kolone, i ovdje je potrebno odabrati u skladu s pravilom da niti jedna izoterma ne smije biti strmija od susjedne presječne. To znači da niti



jedna izoterma dijela za iscrpljivanje ne smije presijecati ordinatu  $\xi_s$  niže od točke  $\Pi_i$ , dok sve izoterme dijela za jačanje moraju sjeći ordinatu  $\xi_d$  ispod točke  $\Pi$ .

**Primjer proračuna.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura komine:  $\vartheta_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija komine:  $h_m = 50 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$ ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 93,51\% = 0,9351 \text{ kg/kg}$ ,
- temperatura pare destilata:  $\vartheta_d = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1148,7 \text{ kJ/kg}$ ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_k = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 209,2 \text{ kJ/kg}$ ,
- minimalni pol razlučivanja kolone za jačanje:  $\Pi_{min} = 2441 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja kolone za jačanje:  $\Pi = 2859,5 \text{ kJ/kg}$
- minimalni pol razlučivanja kolone za iscrpljivanje:  $\Pi_{imin} = -82,1 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja kolone za iscrpljivanje:  $\Pi = -102,1 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$ ,
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$ ,
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 209,67 \text{ kJ/kg}$ ,
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$ ,
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$ .

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 4}{8,9 - 4} = 18,255 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 8,9}{8,9 - 4} = 17,255 \text{ kg/kg} .$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{18,255} = 82,170 \text{ kg/h} = 0,02283 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 17,255 \cdot 82,170 = 1417,830 \text{ kg/h} = 0,39384 \text{ kg/s} .$$

Specifični toplinski tok deflegmatora:

$$\phi_r = \Pi - h_d = 2859,5 - 1148,7 = 1710,8 \text{ kJ/kg} .$$

Toplinski tok deflegmatora:

$$\Phi_r = q_{md} \cdot \phi_r = 0,02283 \cdot 1710,8 = 39,049 \text{ kW}$$

Maseni tok rashladne vode u deflegmatoru:

$$q_{mrvr} = \frac{\Phi_r}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{39,049}{(209,67 - 63,35)} = 0,26688 \text{ kg/s} = 960,752 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_m + \Phi_r = \\ &= 0,39384 \cdot 400 + 0,02283 \cdot 1148,7 - 0,41667 \cdot 50 + 39,049 = 201,972 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_i = \frac{\Phi_i}{q_{ms}} = \frac{201,972}{0,39384} = 512,825 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_i}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{201,972}{(2748,11 - 640,19)} = 0,09582 \text{ kg/s} = 344,936 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,02283 \cdot (1148,7 - 209,2) = 21,444 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{21,444}{0,02283} = 939,5 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u kondenzatoru:

$$q_{mrv} = \frac{\Phi_k}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{21,444}{(209,67 - 63,35)} = 0,14656 \text{ kg/s} = 527,605 \text{ kg/h} .$$

Gornji proračun je proveden za pretpostavljenu koncentraciju džibre  $\xi_s = 4\%$ . Varirajući koncentraciju džibre između  $\xi_s = 1\%$  i  $\xi_s = 8\%$ , dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 2-14, 2-15 i 2-16.

Tablica 2-14. Očitani parametri spojene kolone iz  $h - \xi$  dijagrama

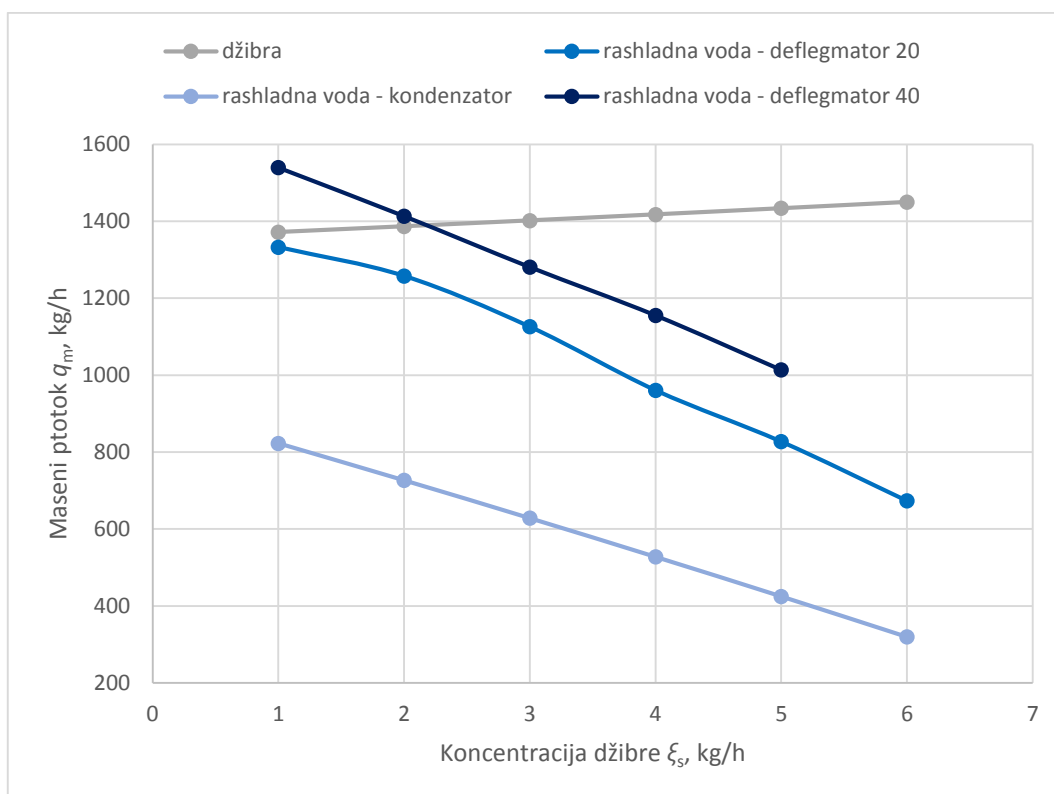
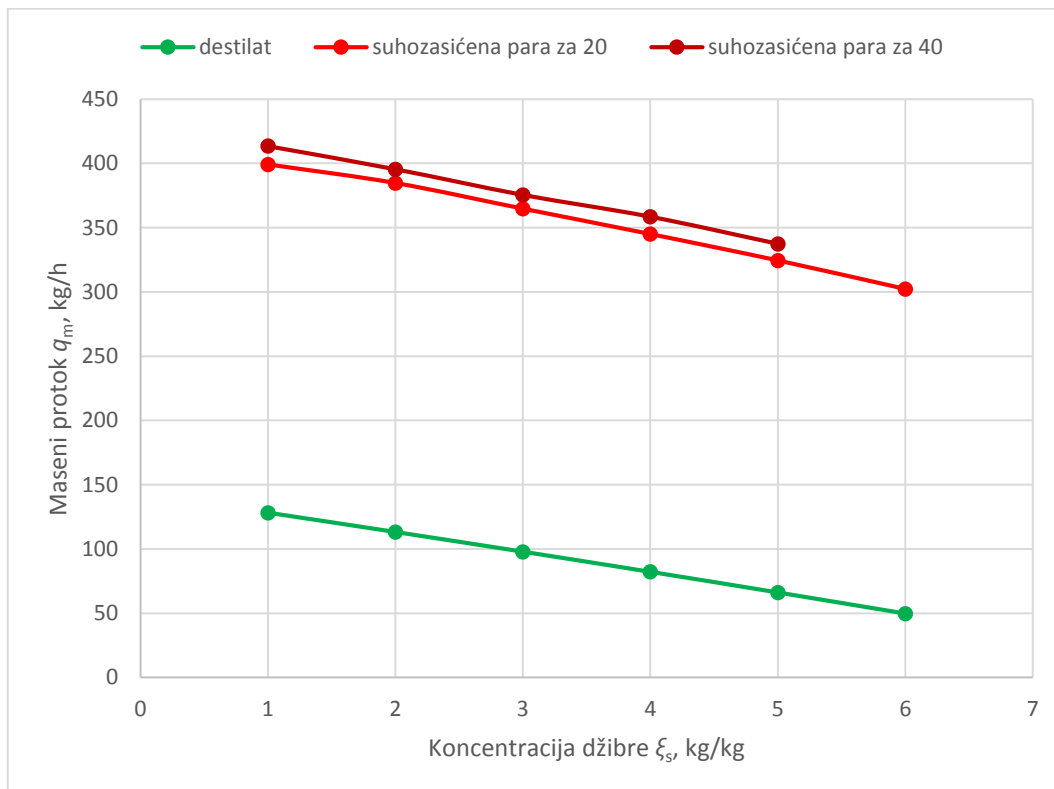
$\xi_s, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_s, \text{kJ/kg}$	418,5	412,3	404,1	400	391,8	383,6	377,4	373,4
$\vartheta_s, ^\circ\text{C}$	98	97,1	96	95,2	94,6	93,6	92,9	92
$\xi_d, \%$	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51	93,51
$h_d, \text{kJ/kg}$	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7	1148,7
$h_k, \text{kJ/kg}$	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2
$\vartheta_d, ^\circ\text{C}$	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7
$\Pi_{i\min}, \text{kJ/kg}$	-168,2	-141,5	-106,7	-82,1	-57,4	-22,6	/	/
$\Pi_{\min}, \text{kJ/kg}$	2441	2441	2441	2441	2441	2441	/	/
$\Pi_{i20}, \text{kJ/kg}$	-188,2	-161,5	-126,7	-102,1	-77,4	-42,6	/	/
$\Pi_{20}, \text{kJ/kg}$	2670,8	2775,4	2832,8	2859,5	2978,5	3128,2	/	/
$\Pi_{i40}, \text{kJ/kg}$	-208,2	-181,5	-146,7	-122,1	-97,4	/	/	/
$\Pi_{40}, \text{kJ/kg}$	2906,7	2976,4	3064,6	3206,2	3390,8	/	/	/

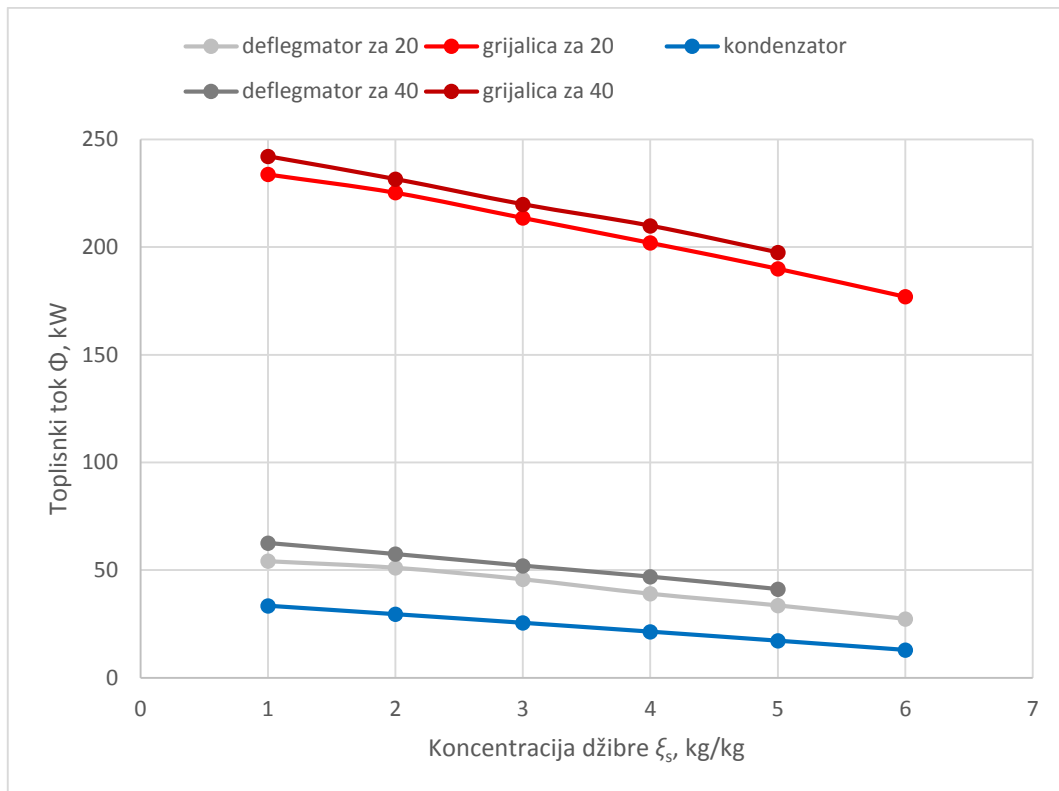
Tablica 2-15. Izračunati parametri spojene kolone za  $\Pi_{i20}$ 

$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_m$ , kg/kg	11,705	13,256	15,332	18,255	22,675	30,14	/	/
$\varphi_s$ , kg/kg	10,705	12,256	14,332	17,255	21,675	29,14	/	/
$q_{md}$ , kg/h	128,147	113,157	97,835	82,17	66,152	49,768	/	/
$q_{ms}$ , kg/h	1371,853	1386,843	1402,165	1417,83	1433,848	1450,232	/	/
$\phi_r$ , kJ/kg	1522,1	1626,7	1684,1	1710,8	1829,8	1979,5	/	/
$\Phi_r$ , kW	54,181	51,131	45,768	39,049	33,624	27,366	/	/
$q_{mrvr}$ , kg/h	1333,057	1258,009	1126,049	960,752	827,265	673,291	/	/
$\Phi_i$ , kW	233,716	225,236	213,545	201,972	189,949	176,943	/	/
$\phi_i$ , kJ/kg	613,314	584,673	548,267	512,825	476,91	439,236	/	/
$q_{mzas}$ , kg/h	399,15	384,668	364,701	344,936	324,403	302,191	/	/
$\Phi_k$ , kW	33,443	29,531	25,532	21,444	17,264	12,988	/	/
$\phi_k$ , kJ/kg	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5	/	/
$q_{mrvk}$ , kg/h	822,815	726,563	628,183	527,605	424,755	319,554	/	/

Tablica 2-16. Izračunati parametri spojene kolone za  $\Pi_{i40}$ 

$\xi_s$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_m$ , kg/kg	11,705	13,256	15,332	18,255	22,675	/	/	/
$\varphi_s$ , kg/kg	10,705	12,256	14,332	17,255	21,675	/	/	/
$q_{md}$ , kg/h	128,147	113,157	97,835	82,17	66,152	/	/	/
$q_{ms}$ , kg/h	1371,853	1386,843	1402,165	1417,83	1433,848	/	/	/
$\phi_r$ , kJ/kg	1758	1827,7	1915,9	2057,5	2242,1	/	/	/
$\Phi_r$ , kW	62,579	57,449	52,067	46,963	41,2	/	/	/
$q_{mrvr}$ , kg/h	1539,659	1413,452	1281,038	1155,452	1013,669	/	/	/
$\Phi_i$ , kW	242,113	231,554	219,844	209,885	197,525	/	/	/
$\phi_i$ , kJ/kg	635,35	601,074	564,441	532,918	495,932	/	/	/
$q_{mzas}$ , kg/h	413,491	395,458	375,46	358,451	337,342	/	/	/
$\Phi_k$ , kW	33,443	29,531	25,532	21,444	17,264	/	/	/
$\phi_k$ , kJ/kg	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5	/	/	/
$q_{mrvk}$ , kg/h	822,815	726,563	628,183	527,605	424,755	/	/	/

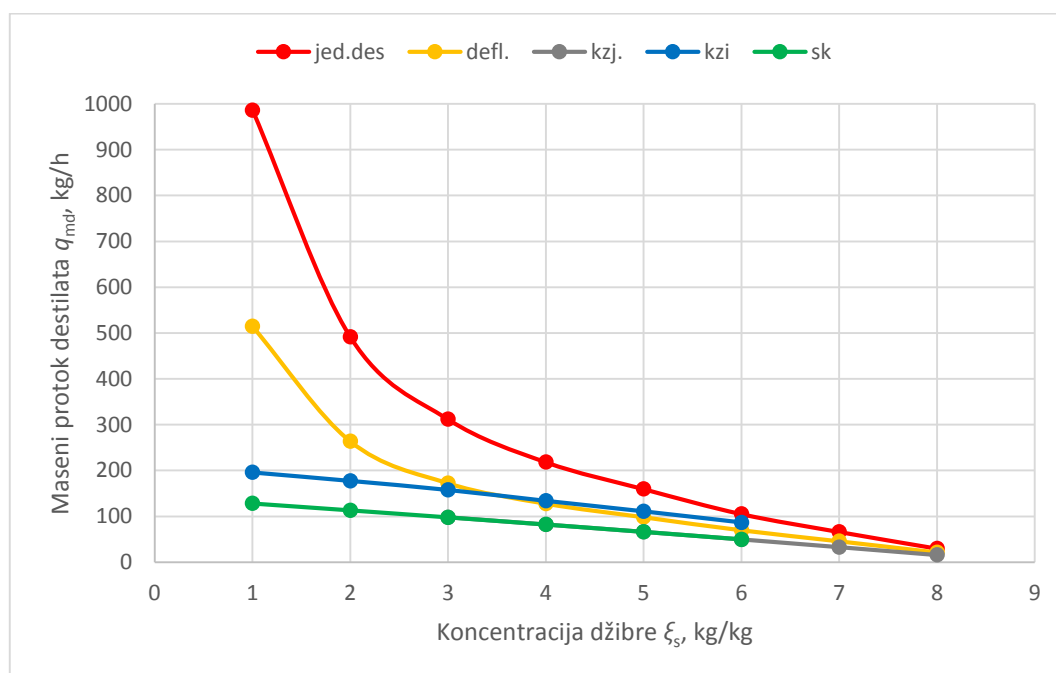
Slika 2-25.  $q_m - \xi_s$  dijagram za džibru i rashladnu vodu spojene koloneSlika 2-26.  $q_m - \xi_s$  dijagram za destilat i suhozasićenu paru spojene kolone



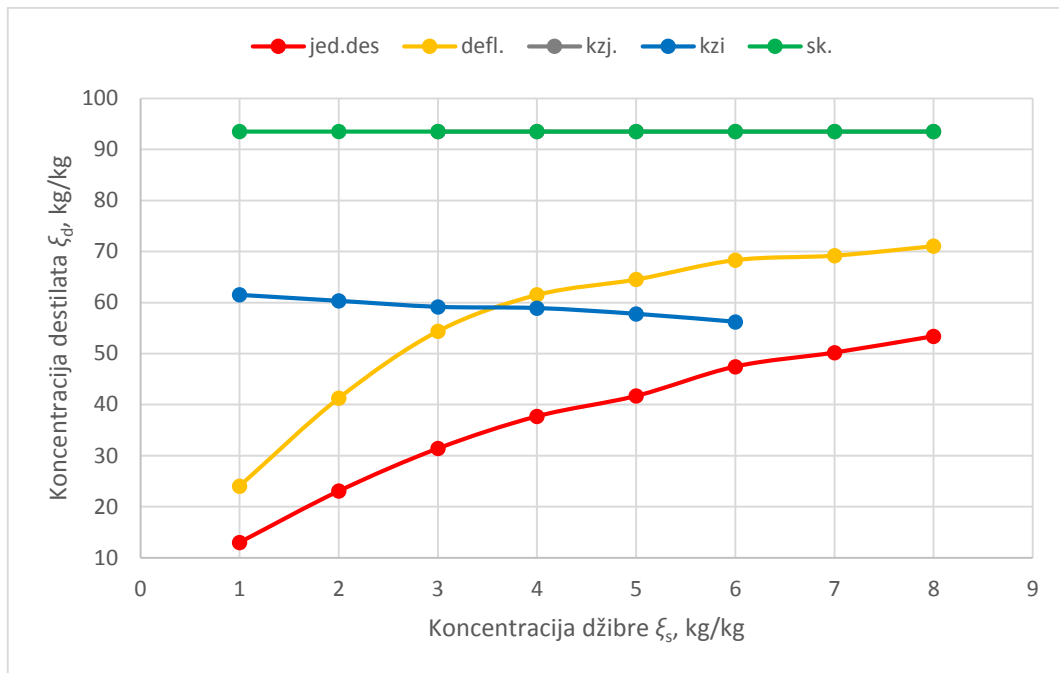
Slika 2-27.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za deflegmator, grijalicu i kondenzator spojene kolone

## 2.8. Usporedba sustava destilacije i rektifikacije

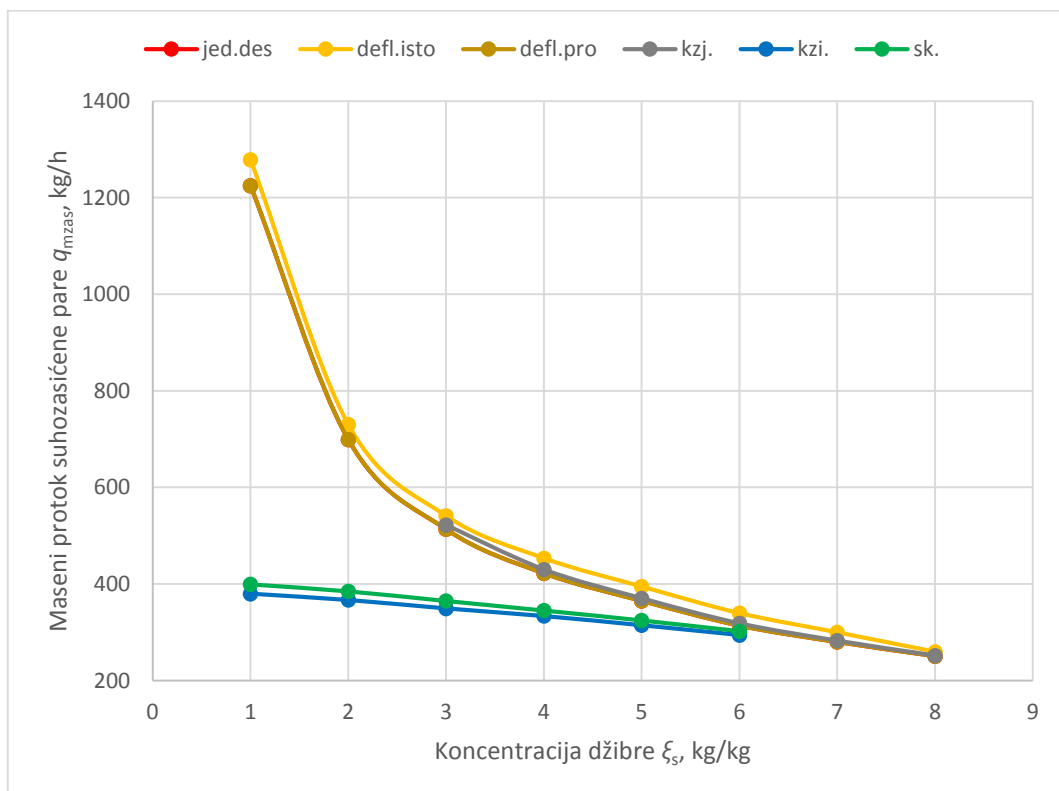
U prethodnim poglavljima izvršena je kvantitativna analiza sustava destilacije i rektifikacije mijenjajući koncentraciju džibre. U ovom poglavlju će se usporediti te vrijednosti za masene protoke destilata, postizive koncentracije destilata, masene protoke rashladne vode za hlađenje kondenzatora i deflegmatora i suhozasićene pare za pogon grijalice, toplinske tokove grijalice, kondenzatora, deflegmatora u slikama 2-28 do 2-35.



Slika 2-28.  $q_m - \xi_s$  dijagram za destilat

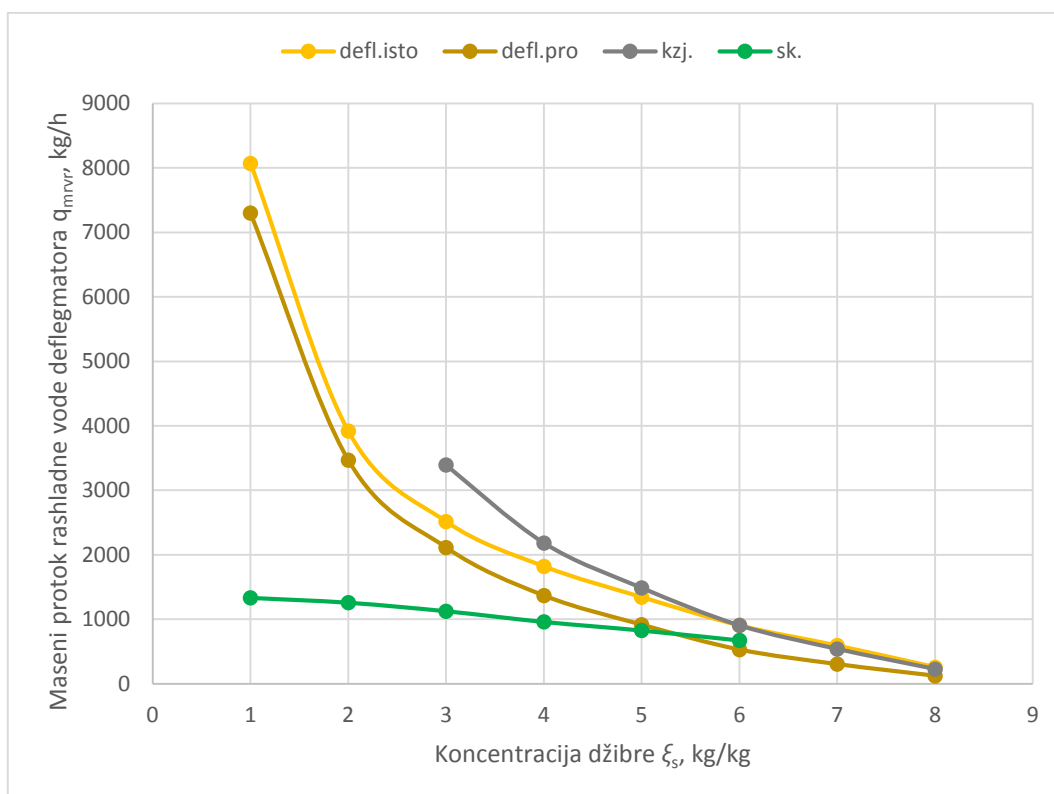
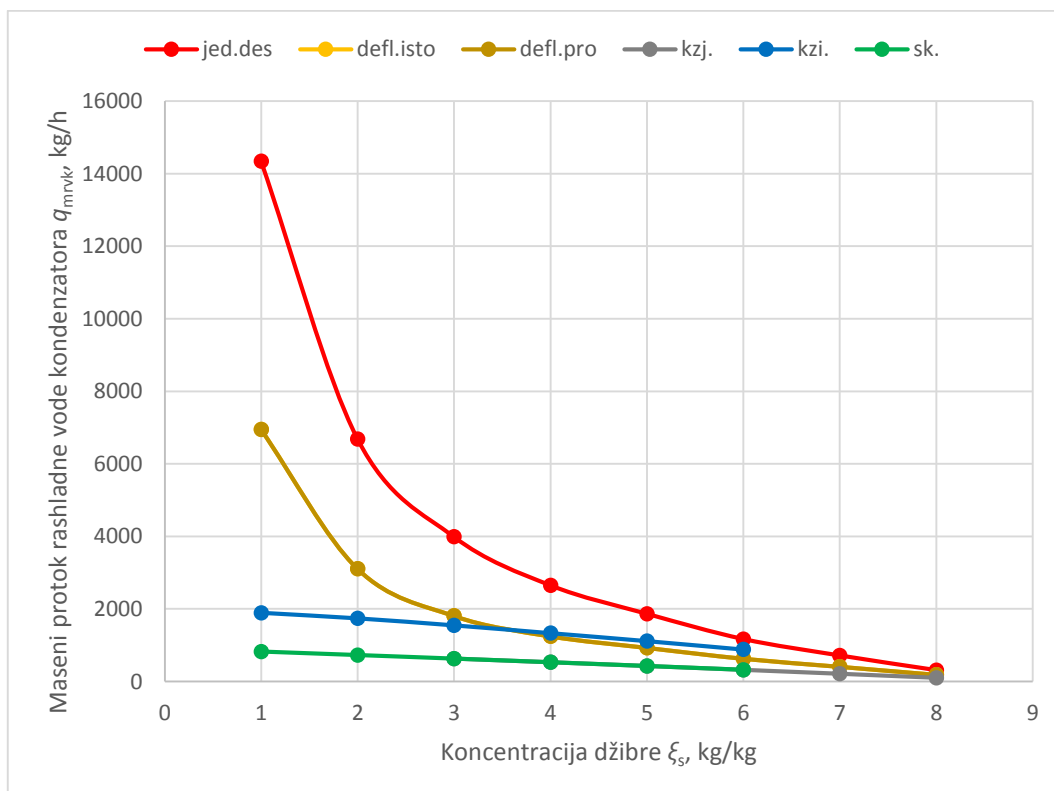


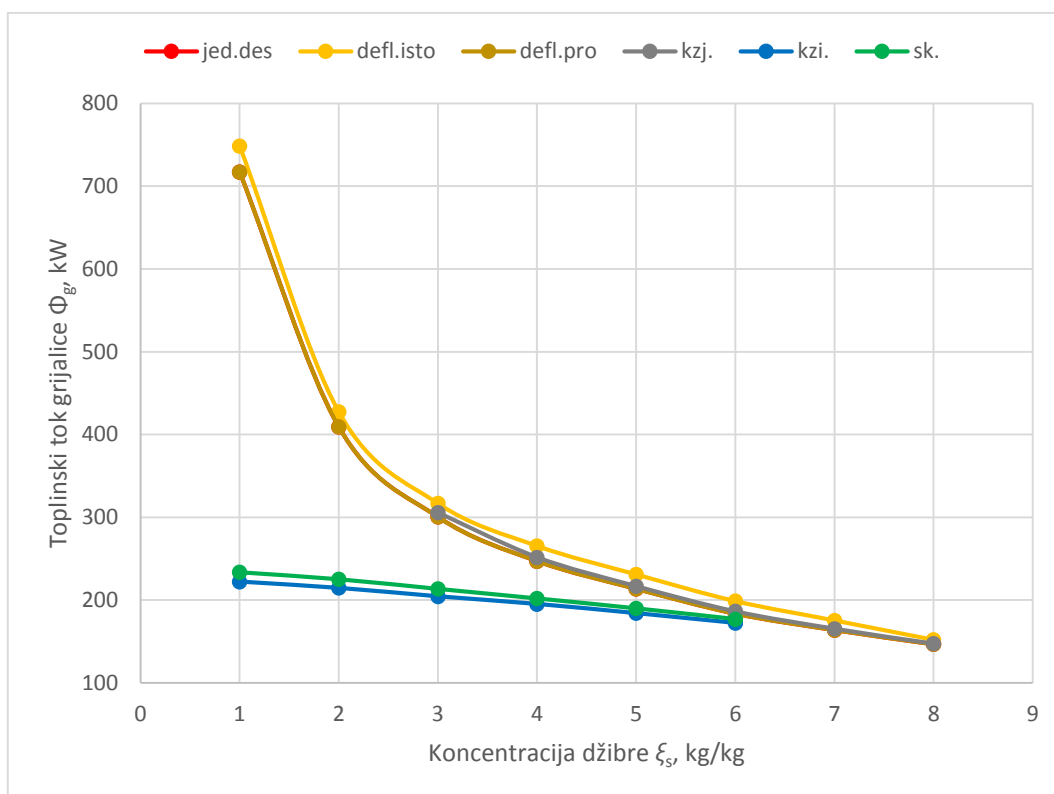
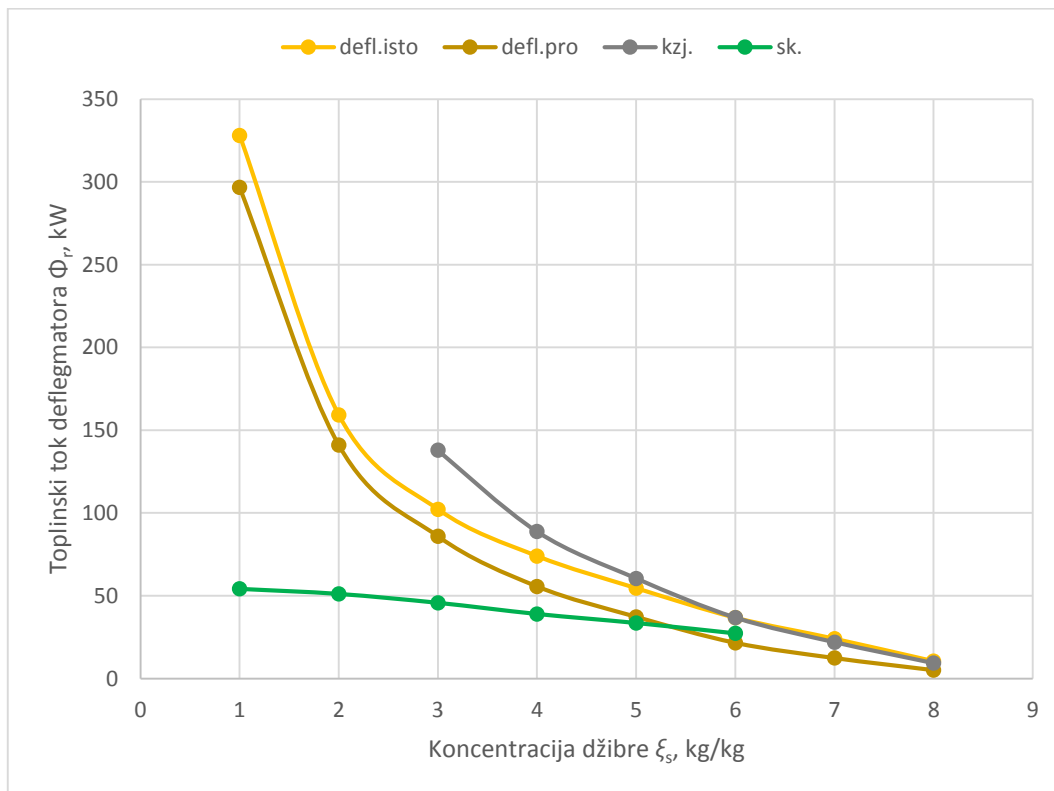
Slika 2-29.  $\xi_d - \xi_s$  dijagram za destilat

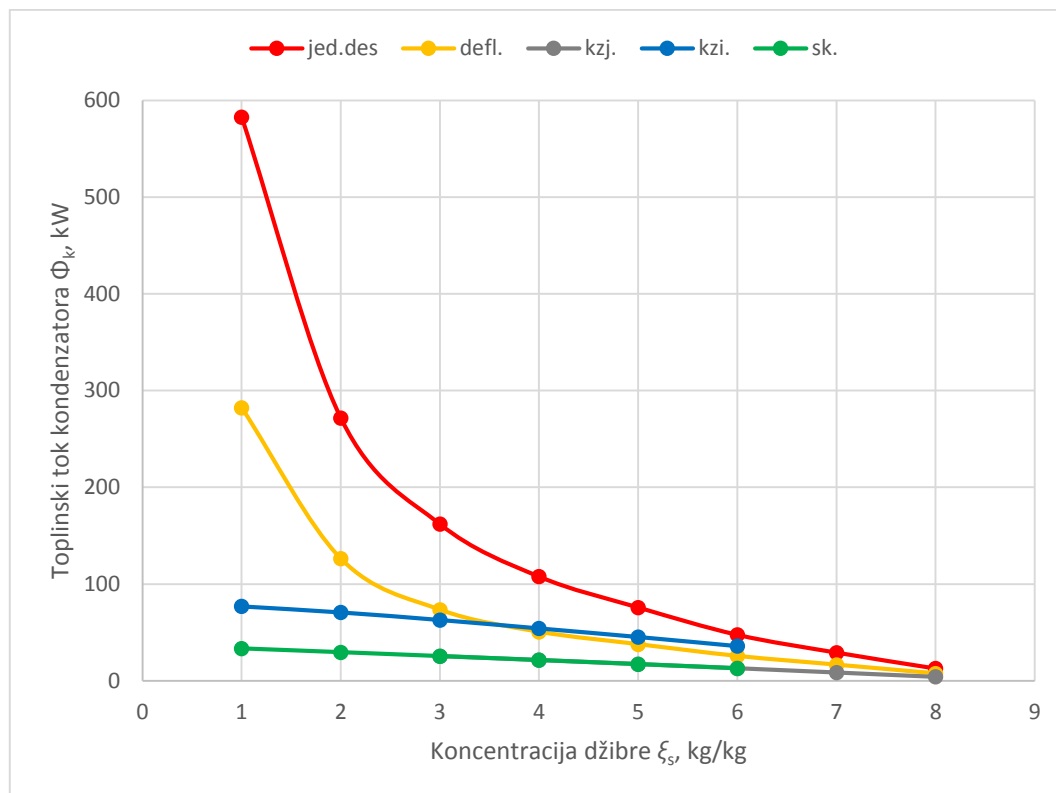


Slika 2-30.  $q_m - \xi_s$  dijagram za suhozasićenu paru



Slika 2-31.  $q_m - \xi_s$  dijagram za rashladnu vodu deflegmatoraSlika 2-32.  $q_m - \xi_s$  dijagram za rashladnu vodu kondenzatora

Slika 2-33.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za grijalicuSlika 2-34.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za deflegmator

Slika 2-35.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za kondenzator

Na temelju gornjih dijagrama donose se sljedeći zaključci. Jednostavnom destilacijom se dobiva najviše destilata iz zadane dvojne smjese, ali postiziva koncentracija konačnog proizvoda je najniža od svih ostalih sustava i nije dovoljna jer je daleko niža od tražene koncentracije. Po pitanju masenih protoka suhozasićene pare i rashladne vode, taj sustav je najveći njihov potrošač. Također ta tvrdnja vrijedi i za toplinske tokove grijalice i kondenzatora.

Sustavi destilacije s deflegmacijom su malo bolji od sustava s jednostavnom destilacijom radi ugradnje deflegmatora kojemu je funkcija postizanje viših koncentracija konačnog proizvoda uslijed veće izmjenjivačke površine i duljeg dodira uzlazne ravnotežne pare iz grijalice s refluksom koji se slijeva s površine deflegmatora. Zato što se dio ravnotežne pare iz grijalice ukapljuje, dobiva se manje destilata nego kod jednostavne destilacije, ali je destilat više koncentracije. Destilat i u ovom slučaju ne zadovoljava traženu koncentraciju. Maseni protok suhozasićene pare je približno jednak ili malo veći od jednostavne destilacije, maseni protok rashladne vode u deflegmatoru se naglo povećava smanjenjem koncentracije džibre, ali je nešto niži od kolone za jačanje, dok je maseni protok rashladne vode u kondenzatoru niži od jednostavne destilacije, ali nešto veći od rektifikacijskih kolona uz malu iznimku kolone za iscrpljivanje. Toplinski tok grijalice je isti ili jednak kao u jednostavne destilacije jer se mora

dodatno zagrijavati refluks, a toplinski tok kondenzatora je veći od onih u rektifikacijskim kolonama, ali manji od jednostavne destilacije.

U koloni za jačanje je moguće postići traženu koncentraciju konačnog proizvoda, ali u najmanjim količinama od svih sustava. Kako bi se to postiglo, potreban je najveći toplinski tok za pogon grijalice i maseni protok suhozasićene pare, najviše toplinskog toka i masenog protoka rashladne vode za odvođenje toplinskog toka u deflegmatoru, ali je potrebno najmanje rashladne vode i odvedenog toplinskog toka u kondenzatoru.

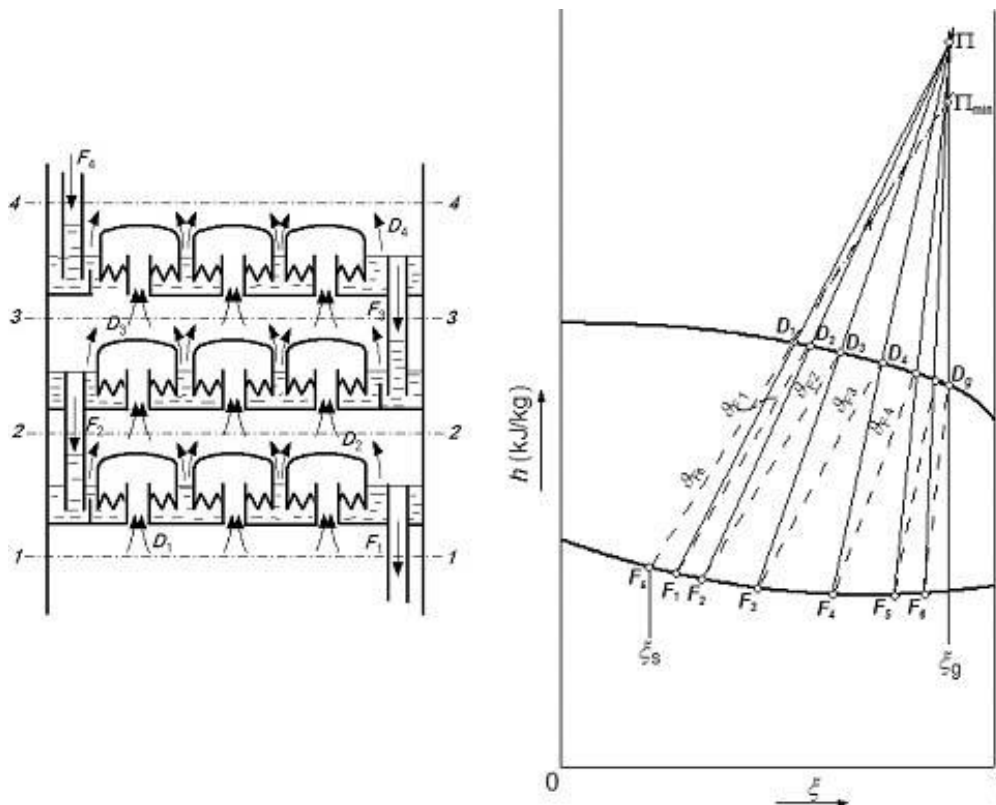
Kolona za iscrpljivanje služi samo za što bolje izdvajanje tvari 1 pa po samoj definiciji kolone nije moguće dobiti traženu koncentraciju destilata. Za njezin pogon je potrebno najmanje ogrjevnog toplinskog toka i pare, ali nešto malo više rashladne vode za hlađenje kondenzatora od ostalih kolona.

Spojena kolona spaja dobre karakteristike kolone za jačanje i kolone za iscrpljivanje. Njom se može postići tražena koncentracija uz nisku potrošnju pare i rashladne vode. Također i malo je potrebno odvoditi toplinskog toka za hlađenje deflegmatora i kondenzatora i ogrjevnog toplinskog toka u usporedbi sa svim drugim sustavima.

Na temelju provedene analize i usporedbe sustava destilacije i rektifikacije, zaključuje se da je optimalno rješenje spojena kolona s koncentracijom džibre od  $\xi_s = 4\%$ . Još je potrebno odrediti broj plitica kolone što će biti obavljeno u idućem poglavlju.

## 2.9. Potrebni broj plitica

Važno je znati s koliko plitica se mora opremiti neka kolona kako bi se mogao izvršiti traženi rektifikacijski zadatak. U najpovoljnijem teorijskom slučaju, dolazna para i odlazna kapljevina iste plitice su u ravnoteži. Prema slici 2-36, para  $G_2$  će biti u ravnoteži s kapljevinom  $F_1$ , zatim  $G_3$  s  $F_2$ , itd. Vidi se da su indeksi pare uvijek veći za 1 od indeksa kapljevine, što znači da je para višeg presjeka u ravnoteži s kapljevinom nižeg presjeka. Kad je odlučena visina pola razlučivanja  $\Pi$  te uz poznavanje sastava pare  $G_1$  na ulazu u najdonju pliticu, sastav kapljevine  $F_1$  se dobije povlačenjem presječne  $\overline{\Pi G_1}$ . Kapljevina  $F_1$  je bila posljednji put u dodiru s parom  $G_2$  na prvoj plitici pa je mogla doći u ravnotežu s njom. Zato se točka  $G_2$  nađe tako da se kroz  $F_1$  položi izoterma  $\vartheta_{F_1}$  koja na liniji kondenzacije daje ravnotežno stanje  $G_2$ . Takav se postupak ponavlja sve dok se ne postigne traženo stanje  $G_d$ . Brojanjem povučenih izoterma dobije se teoretski broj plitica kolone. Ako se odabrani pol razlučivanja poklopi s minimalnim polom razlučivanja, tada će se presječnica poklopiti s jednom od izoterma i broj plitica će biti beskonačan, što je nepoželjno, tako da se pol uvijek mora pomaknuti više od minimalnog. Što se više pol razlučivanja odaljuje od minimalnog, potreban je manji broj plitica, ali je potrebno i više utrošiti topline za provedbu tog procesa.



Slika 2-36. Shema Teoretski broj plitica [5]

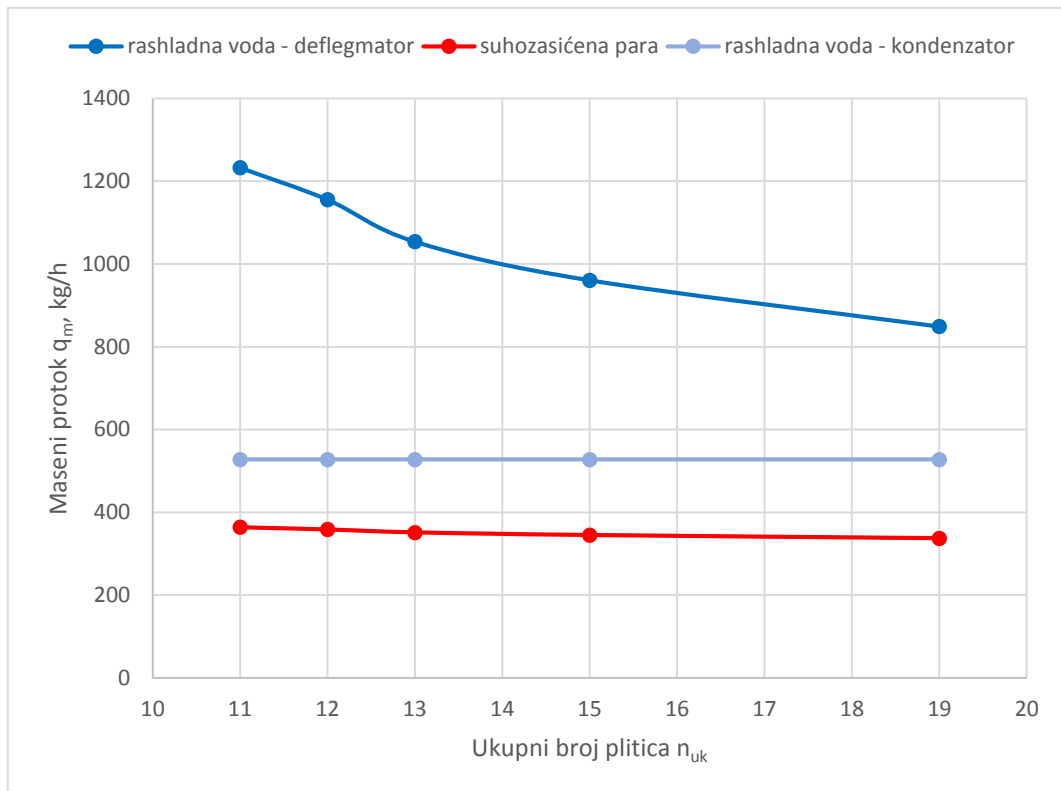
Za spojenu kolonu s koncentracijom džibre od  $\xi_s = 4\%$  je variran broj plitica i dobiveni rezultati su prikazani u tablici 2-17 i 2-18.

Tablica 2-17. Očitani parametri spojene kolone iz  $h - \xi$  dijagrama za različiti broj plitica

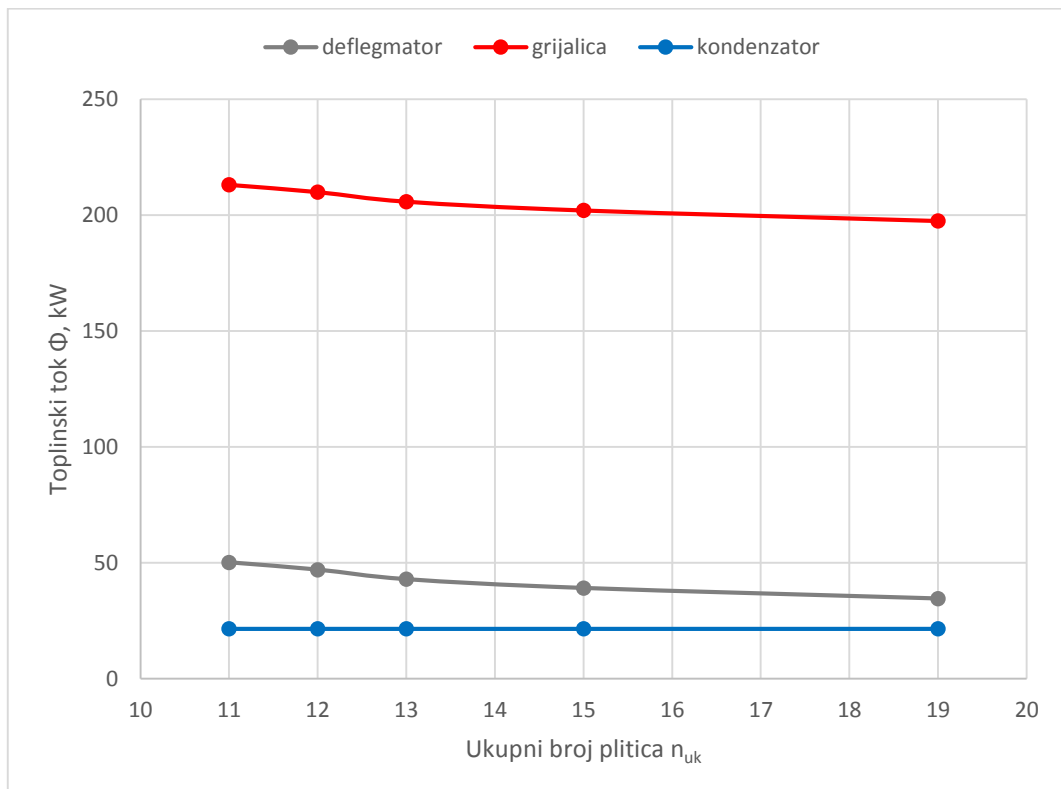
$n_i$	2	2	1	1	1
$n_j$	17	13	12	11	10
$n_{uk}$	19	15	13	12	11
$\Pi_{imin},$ kJ/kg	-82,1	-82,1	-82,1	-82,1	-82,1
$\Pi_i,$ kJ/kg	-92,1	-102,1	-112,1	-122,1	-132,1
$\Pi_{min},$ kJ/kg	2441	2441	2441	2441	2441
$\Pi,$ kJ/kg	2660,5	2859,5	3025,6	3206,2	3343,6

Tablica 2-18. Izračunati parametri spojene kolone za različiti broj plitica

$n_i$	2	2	1	1	1
$n_j$	17	13	12	11	10
$n_{uk}$	19	15	13	12	11
$\varphi_m,$ kg/kg	18,255	18,255	18,255	18,255	18,255
$\varphi_s,$ kg/kg	17,255	17,255	17,255	17,255	17,255
$q_{md},$ kg/h	82,17	82,17	82,17	82,17	82,17
$q_{ms},$ kg/h	1417,83	1417,83	1417,83	1417,83	1417,83
$\phi_r,$ kJ/kg	1511,8	1710,8	1876,9	2057,5	2194,9
$\Phi_r,$ kW	34,507	39,049	42,84	46,963	50,099
$q_{mrvr},$ kg/h	848,998	960,752	1054,031	1155,452	1232,613
$\Phi_g,$ kW	197,43	201,972	205,763	209,885	213,021
$\phi_g,$ kJ/kg	501,292	512,825	522,451	532,918	540,881
$q_{mzas},$ kg/h	337,179	344,936	351,411	358,451	363,807
$\Phi_k,$ kW	21,444	21,444	21,444	21,444	21,444
$\phi_k,$ kJ/kg	939,5	939,5	939,5	939,5	939,5
$q_{mrvk},$ kg/h	527,605	527,605	527,605	527,605	527,605



Slika 2-37.  $q_m - n_{uk}$  dijagram za rashladnu vodu i suhozasićenu paru



Slika 2-38.  $\Phi - \xi_s$  dijagram za grijalicu, deflegmator i kondenzator

Na temelju gornje analize zaključuje se da smanjenjem broja plitica se povećavaju toplinski tokovi i maseni tokovi grijalice i deflegmatora, dok parametri kondenzatora ostaju jednaki jer se ukapljuje ista količina destilata istog sastava. Znatnije povećanje započinje kod ukupnog broja od 13 plitica pa je konačno odabrano upravo tih 13 plitica, tj. 1 plitica kolone za iscrpljivanje i 12 plitica kolone za jačanje.

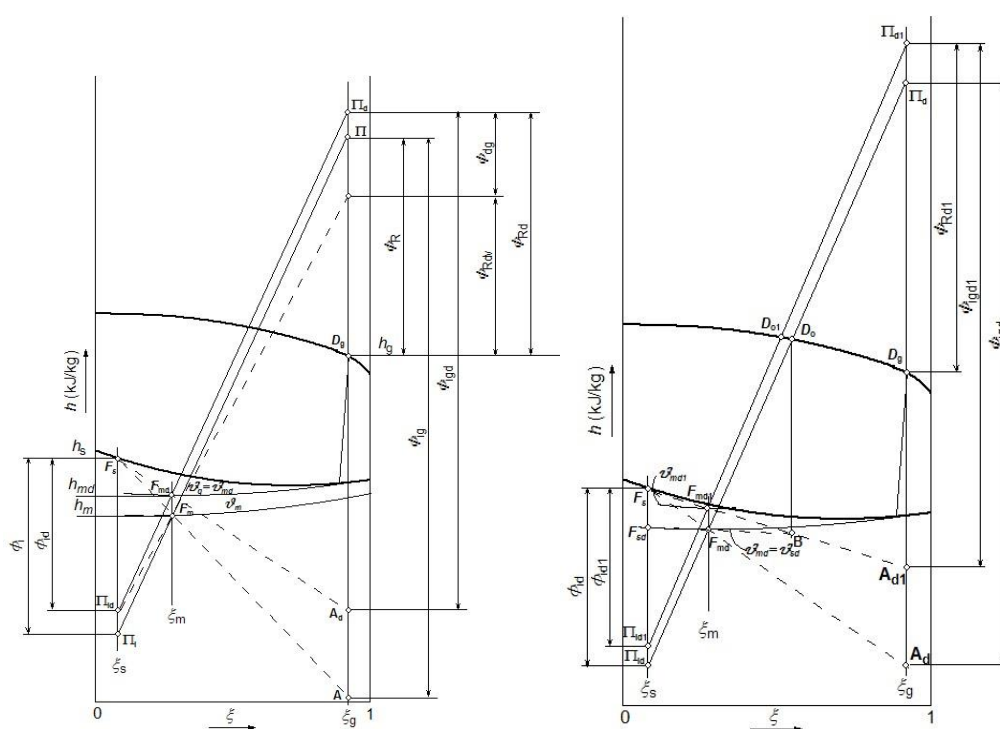


### 3. UŠTEDA ENERGIJE

Destilacijski i rektifikacijski procesi, kao što je kvantitativno pokazano u dosadašnjem razmatranju, su veliki potrošači energije pa je potrebno posebnu pažnju posvetiti racionalnom korištenju energije, npr. iskorištavajući otpadne ili druge procesne tokove za grijanje/hlađenje. Od procesa se zahtijevati da za traženu svrhu treba što manje ulazne energije, da izlazni tokovi odnose samo nužnu energiju i da toplinski gubici u sustavu budu što manji.

Temperatura komine na ulazu u kolonu značajno utječe na utrošak pogonske topline, tj. s povećanjem temperature komine, toplina dovedena grijalici će biti sve manja. To se može napraviti na dva načina:

- korištenjem svježe komine za hlađenje deflegmatora,
- korištenjem vrela džibre za predgrijavanje svježe komine prije ulaska u grijalicu.



Slika 3-1. Predgrijavanje komine u deflegmatoru i dogrijaču u  $h - \xi$  dijagram [5]

Iz slike 3-1 je vidljivo da u oba slučaja povećanjem temperature svježe komine prije ulaska u grijalicu se pol razlučivanja  $\Pi_i$  približava  $F_s$  čime se smanjuje potrena pogonska energija.

Također točka A se značajno povisuje, ali i pol razlučivanja  $\Pi$  se malo povisuje, samo na kraju kad se izračuna njihova razlika, vidljivo je smanjenje utroška energije.

U deflegmatoru se kilogramu komine predaje specifični toplinski tok prema [1]:

$$\phi_r = h_{mdog} - h_m \cdot \quad (3-1)$$

U dogrijaču toplina koju odaje vrela džibra svježoj komini prema [1] glasi:

$$\phi_d = h_{mdog} - h_m = h_s - h_{sdog} \cdot \quad (3-2)$$

**Proračun.** Poznati parametri su:

- tlak dvojne smjese:  $p = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$  ,
- maseni udio tvari 2 u komini:  $\xi_m = 8,9\% = 0,089 \text{ kg/kg}$  ,
- odabrana temperatura komine:  $\vartheta_{mdog} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija komine:  $h_{mdog} = 276,9 \text{ kJ/kg}$  ,
- maseni protok komine:  $q_m = 1500 \text{ kg/h} = 0,41667 \text{ kg/s}$
- maseni udio tvari 2 u džibri:  $\xi_s = 4\% = 0,04 \text{ kg/kg}$  ,
- temperatura džibre:  $\vartheta_s = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija džibre:  $h_s = 400 \text{ kJ/kg}$  ,
- maseni udio tvari 2 u pari destilata:  $\xi_d = 93,51\% = 0,9351 \text{ kg/kg}$  ,
- temperatura destilata:  $\vartheta_d = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija pare destilata:  $h_d = 1148,7 \text{ kJ/kg}$  ,
- specifična entalpija destilata:  $h_k = 209,2 \text{ kJ/kg}$  ,
- minimalni pol razlučivanja kolone za jačanje:  $\Pi_{min} = 2674,9 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja kolone za jačanje:  $\Pi = 3076,9 \text{ kJ/kg}$
- minimalni pol razlučivanja kolone za iscrpljivanje:  $\Pi_{imin} = 143,6 \text{ kJ/kg}$
- pol razlučivanja kolone za iscrpljivanje:  $\Pi = 114,9 \text{ kJ/kg}$
- tlak rashladne vode:  $p_{rv} = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$  ,
- ulazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 63,35 \text{ kJ/kg}$  ,
- izlazna temperatura rashladne vode:  $\vartheta_{rv2} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- ulazna specifična entalpija rashladne vode:  $h_{rv1} = 105,2 \text{ kJ/kg}$  ,
- tlak zasićenja suhozasićene pare:  $p_{zas} = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$  ,

- temperatura zasićenja suhozasićene pare:  $\vartheta_{zas} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- specifična entalpija suhozasićene pare:  $h''_{zas} = 2748,11 \text{ kJ/kg}$  ,
- specifična entalpija vrele kapljevine:  $h'_{zas} = 640,19 \text{ kJ/kg}$  .

Specifični maseni tok komine:

$$\varphi_m = \frac{\xi_d - \xi_s}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 4}{8,9 - 4} = 18,255 \text{ kg/kg} .$$

Specifični maseni tok džibre:

$$\varphi_s = \frac{\xi_d - \xi_m}{\xi_m - \xi_s} = \frac{93,51 - 8,9}{8,9 - 4} = 17,255 \text{ kg/kg} .$$

Maseni tok destilata:

$$q_{md} = \frac{q_{mm}}{\varphi_m} = \frac{1500}{18,255} = 82,170 \text{ kg/h} = 0,02283 \text{ kg/s} .$$

Maseni tok džibre:

$$q_{ms} = \varphi_s \cdot q_{md} = 17,255 \cdot 82,170 = 1417,830 \text{ kg/h} = 0,39384 \text{ kg/s} .$$

Specifični toplinski tok deflegmatora:

$$\phi_r = \Pi - h_d = 3076,9 - 1148,7 = 1928,2 \text{ kJ/kg} .$$

Toplinski tok deflegmatora:

$$\Phi_r = q_{md} \cdot \phi_r = 0,02283 \cdot 1928,2 = 44,011 \text{ kW}$$

Specifična entalpija komine dogrijane u deflegmatoru:

$$h_{mrd} = \frac{\Phi_r}{q_{mm}} + h_m = \frac{44,011}{0,41667} + 50 = 155,6 \text{ kJ/kg} .$$

Temperatura komine dogrijane u deflegmatoru:  $\vartheta_{mrd} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$  .

Toplinski tok grijalice:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= q_{ms} \cdot h_s + q_{md} \cdot h_d - q_{mm} \cdot h_{mdog} + \Phi_r = \\ &= 0,39384 \cdot 400 + 0,02283 \cdot 1148,7 - 0,41667 \cdot 276,9 + 44,011 = 112,392 \text{ kW} . \end{aligned}$$

Specifični toplinski tok grijalice:

$$\phi_i = \frac{\Phi_i}{q_{ms}} = \frac{112,392}{0,39384} = 285,374 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok suhozasićene pare:

$$q_{mzas} = \frac{\Phi_i}{(h''_{zas} - h'_{zas})} = \frac{112,392}{(2748,11 - 640,19)} = 0,05332 \text{ kg/s} = 191,949 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok kondenzaora:

$$\Phi_k = q_{md} \cdot (h_d - h_k) = 0,02283 \cdot (1148,7 - 209,2) = 21,444 \text{ kW} .$$

Specifični toplinski tok kondenzaora:

$$\phi_k = \frac{\Phi_k}{q_{md}} = \frac{21,444}{0,02283} = 939,5 \text{ kJ/kg} .$$

Maseni tok rashladne vode u kondenzatoru:

$$q_{mrv} = \frac{\Phi_k}{(h_{rv2} - h_{rv1})} = \frac{21,444}{(105,2 - 63,35)} = 0,51241 \text{ kg/s} = 1844,663 \text{ kg/h} .$$

Toplinski tok dogrijača:

$$\Phi_{dog} = q_{mm} \cdot (h_{mdog} - h_{mrd}) = 0,41667 \cdot (276,9 - 155,6) = 50,530 \text{ kW} .$$

Specifična entalpija ohlađene džibre:

$$h_{sdog} = h_s - \frac{\Phi_{dog}}{q_{ms}} = 400 - \frac{50,530}{0,39384} = 271,7 \text{ kJ/kg} .$$

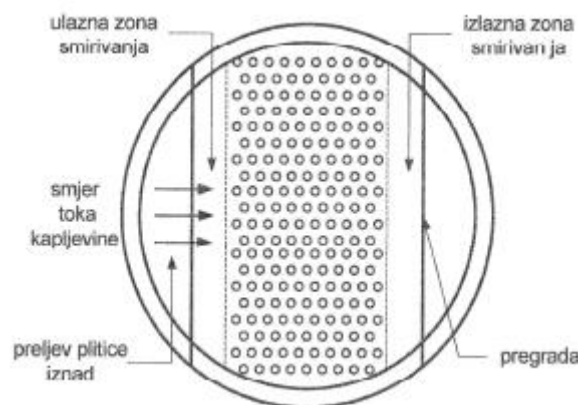
Temperatura ohlađene džibre u dogrijaču:  $\vartheta_{sdog} = 66,5 \text{ }^\circ\text{C}$  .

Na temelju gornjeg proračuna i proračuna iz prethodnog poglavlja, vidljiva je značajna ušteda energije. Ušteda na toplinskom toku grijalice iznosi 45,38%, dok je blago povećanje toplinskog toka deflegmatora od 2,73%. Po pitanju energenata, protok suhozasićene pare se smanjio za 54,62%, a rashladna voda za hlađenje deflegmatora nije potrebna jer je tu ulogu preuzela komina. S dobivenim vrijednostima ide se u daljnji proračun.

## 4. PRORAČUN KOLONE S PLITICAMA

Nakon što je izveden termodinamički proračun spojene kolone, pristupa se dimenzioniranju same kolone. U ovom radu plitice kolone su izvedene kao sitaste plitice. Sitaste plitice su najjednostavniji tip plitica, a riječ je o tankoj ravnoj ploči s mnogo malih kružnih otvora kroz koje struji para; ali su manje učinkovite od plitica sa zvonima ili ventilima. Zbog jednostavne konstrukcije, jednostavne su za inspekciju i čišćenje.

Postupak njihovog dimenzioniranja preuzet je iz [7]. Proračun započinje zadavanjem početnih vrijednosti temperatura, protoka i svojstava pare i kapljevine na plitici. Zatim se prema uputama iz [7] odabiru faktori sustava, plavljenja i curenja te preliminarnu dimenziju plitice. Nakon toga pristupa se proračunu koji je iterativne naravi pa se nakon malog igranja s parametrima dobivaju konačne vrijednosti.



Slika 4-1. Sitasta plitica [7]

Aktivna površina je površina presjeka kolone umanjena za ukupnu površinu preljeva i sve neperforirane površine, a računa se kao:

$$A_A = \frac{q_{vG} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_F - \rho_G}}}{SF \cdot C_{SB} \cdot F_{pl}}, \quad (4-1)$$

gdje su  $q_{vG}$  volumni protok pare,  $\rho_G$  gustoća pare,  $\rho_F$  gustoća kapljevine,  $SF$  faktor sustava,  $C_{SB}$  Souders-Brownova konstanta i  $F_{pl}$  faktor plavljenja.

Faktor sustava  $SF$  je iskustvena veličina, a povezuje sklonost sustava pjenjenju; što je veća sklonost pjenjenja to je manji faktor sustava. Najveća vrijednost je 1, a najmanja 0. Može se izračunati iz napetosti površine:

$$SF = \left( \frac{\sigma [mN/m]}{20} \right)^{0,2} . \quad (4-2)$$

Souders-Brownova konstanta se računa prema:

$$C_{SB} = a_4 \cdot F_{LV}^4 + a_3 \cdot F_{LV}^3 + a_2 \cdot F_{LV}^2 + a_1 \cdot F_{LV} + a_0 , \quad (4-3)$$

gdje je  $F_{LV}$  parametar protoka koji se računa kao:

$$F_{LV} = \frac{q_{mF}}{q_{mG}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_F}} . \quad (4-4)$$

Nakon aktivne površine, potrebno je izračunati površinu preljeva koja je jednaka:

$$A_D = \frac{q_{vF}}{u_{LDmax} \cdot F_{pl}} , \quad (4-5)$$

gdje je  $u_{LDmax}$  maksimalna dopuštena brzina kapljevine u preljevu koja se uzima kao minimalna vrijednost iz sljedećih izraza:

$$u_{LDmax} = 0,170 \cdot SF , \quad (4-6)$$

$$u_{LDmax} = 0,007 \cdot \sqrt{\rho_F - \rho_G} \cdot SF , \quad (4-7)$$

$$u_{LDmax} = 2,53 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{T_s [mm] \cdot (\rho_F - \rho_G)} \cdot SF . \quad (4-8)$$

Ukupna površina plitice jednaka je:

$$A_T = A_A + 2 \cdot A_D , \quad (4-9)$$

a iz nje se računa promjer plitice:

$$d_T = \sqrt{\frac{4 \cdot A_T}{\pi}} . \quad (4-10)$$

Nakon izračunatih površina, sada je potrebno izračunati sve ostale konstrukcijske parametre. Broj prijelaza kapljevine preko plitice se računa kao:

$$N_{pmax} = 1,237 \cdot \sqrt{A_A} , \quad (4-11)$$

a onda se prema njemu računa raspodjela površine preljeva ako je prijelaza kapljevine veći od 1; ako je 1 kao u ovom slučaju, tada površina preljeva ostaje kakva je dobivena gornjim izrazom.

Sada se pristupa dimenzioniranju posljednjih konstrukcijskih parametara plitice. Iz omjera površine preljeva i ukupne površine plitice  $A_D/A_T$  se iz [7] očitavaju omjer visine odsječka preljeva i promjera plitice  $H_D/d_T$  i omjer duljine pregrade i promjera plitice  $L_w/d_T$  iz kojih se izračunaju te veličine. Omjer površine otvora i aktivne površine jednak je:

$$f_a = \frac{A_h}{A_A}, \quad (4-12)$$

a izračuna se iz:

$$f_a = 0,905 \cdot \left(\frac{d_h}{p_h}\right)^2. \quad (4-13)$$

Kada se dobije površina otvora, može se dobiti broj otvora na ploči plitice:

$$N_h = \frac{4 \cdot A_h}{\pi \cdot d_h^2}. \quad (4-14)$$

Opterećenje plitice kapljevnom računa se kao:

$$Q_F = \frac{q_{vF}}{L_w}, \quad (4-15)$$

a ona mora biti manja od  $75 \text{ m}^3/(hm)$ .

Nakon što su poznati svi konstrukcijski parametri, potrebno je kontrolirati plavljenje plitice i preljeva čime će se potvrditi je li plitica pravilno dimenzionirana.

Plavljenje plitice se računa prema:

$$\% \text{ plavljenja} = \frac{100 \cdot C_S}{C_{SBplav} \cdot SF}. \quad (4-16)$$

$C_S$  – faktor je jednak:

$$C_S = \frac{V_L}{A_A}, \quad (4-17)$$

Gdje je  $V_L$  opterećenje plitice parom koje se računa kao:

$$V_L = q_{vG} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_F - \rho_G}}. \quad (4-18)$$

$C_{SBplav}$  je Souders-Brownov faktor, a glasi:

$$C_{SBplav} = 0,04143 \cdot \left(\frac{d_h^2[mm] \cdot \sigma[mN/m]}{\rho_F}\right)^{0,125} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{0,1} \cdot \sqrt{\frac{T_s[mm]}{h_{ct}[mm]}}, \quad (4-19)$$

gdje je  $h_{ct}$  visina čiste kapljevine koja je jednaka:

$$h_{ct} = (h_{ct})_{H2O} \cdot \left(\frac{996}{\rho_F}\right)^{0,5 \cdot (1-n)}, \quad (4-20)$$

$$(h_{ct})_{H2O} = \frac{0,49774 \cdot f_a^{-0,791} \cdot d_h^{0,833} [mm]}{1 + 0,001311 \cdot Q_F^{-0,59} [m^3/(hm)] \cdot f_a^{-1,79}}, \quad (4-21)$$

$$n = 9,0945 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_h [mm]}{f_a}. \quad (4-22)$$

Plavljenje preljeva se računa prema:

$$\% \text{ plavljenja} = \frac{100 \cdot u_{LD}}{u_{LDmax}}. \quad (4-23)$$

Maksimalna dopuštena brzina kapljevine u preljevu jednaka je:

$$u_{LDmax} = 1,887 \cdot 10^{-4} \cdot T_s [mm] \cdot SF. \quad (4-24)$$

Brzina kapljevine u preljevu jednaka je:

$$u_{LD} = \frac{q_{vF}}{A_D}. \quad (4-25)$$

Plavljenja plitice i preljeva moraju biti manja ili jednaka faktoru plavljenja  $F_{pl}$ .

Prema gore navedenom proračunu, proračunate su dimenzije plitice kolone za iscrpljivanje koja je najopterećenija protokom kapljevine i najgornje plitice kolone za jačanje koja je najopterećenija protokom pare. U tablicama 4-1 i 4-2 su navedeni ulazni parametri za proračun i dobiveni konačni parametri proračuna nakon provedenog iterativnog postupka.



Tablica 4-1. Ulazni parametri za proračun

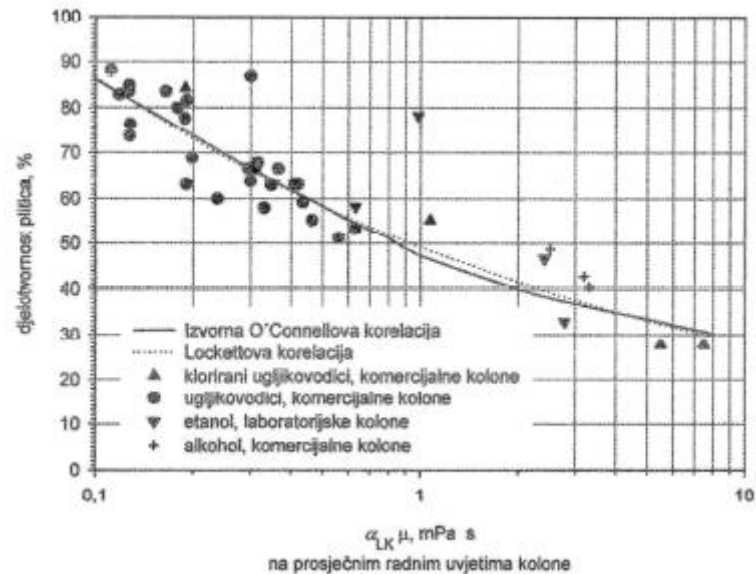
Kolona	Kolona za iscrpljivanje	Kolona za jačanje
$p$ , Pa	98000	98000
$\vartheta$ , °C	91,7	77,75
$\xi_F$ , %	8,63	90,68
$\xi_G$ , %	54,49	92,52
$\varphi$ , kg/kg	1,101	0,54
$\delta$ , kg/kg	0,101	1,54
$q_{mF}$ , kg/h	1560,973	44,381
$q_{mG}$ , kg/h	143,143	126,552
$\rho_F$ , kg/m <sup>3</sup>	935,621	753,838
$q_{vF}$ , m <sup>3</sup> /h	1,668	0,059
$\sigma$ , mN/m	52,701	19,416
$\rho_G$ , kg/m <sup>3</sup>	0,871	1,386
$q_{vG}$ , m <sup>3</sup> /s	164,302	91,296
$F_{pl}$	0,7	0,7
$F_w$	0,65	0,65
SF	1	1
$T_s$ , mm	305	150
$h_w$ , mm	40	20
$h_z$ , mm	28	8
$d_h$ , mm	6,35	6,35
$t_t$ , mm	2	2

Tablica 4-2. Proračunom dobiveni rezultati

Kolona	Kolona za iscrpljivanje	Kolona za jačanje
$F_{LV}$	0,33277	0,01504
$C_{SB}$	0,04284	0,04359
$A_A$ (odabran), $m^2$	0,024	0,0385
$u_{LDmax}$ , m/s	0,17	0,17
$u_{LDmax}$ , m/s	0,214	0,192
$u_{LDmax}$ , m/s	0,135	0,085
$A_D$ (odabran), $m^2$	0,0115	0,00424
$A_T$ , $m^2$	0,047	0,04697
$d_T$ , mm	245	245
$N_{pmax}$	1	1
$A_D/A_T$	0,2447	0,0902
$H_D/d_T$	0,2934	0,1458
$L_w/d_T$	0,9107	0,7075
$H_D$ , mm	72	36
$L_w$ , mm	223	173
$Q_F$ , $m^3/(hm)$	7,489	0,34
$p_h/d_h$	4	4
$p_h$ , mm	25,4	25,4
$f_a$	0,05656	0,05656
$A_h$ , $m^2$	0,00136	0,00218
$N_h$	43	69
$n$	0,1021	0,1021
$(h_{ct})_{H_2O}$ , mm	21,07	15,82
$h_{ct}$ , mm	21,67	17,92
$C_{SBplav}$ , mm	0,08569	0,06414
$V_L$ , $m^3/s$	0,00139	0,00109
$C_s$ , m/s	0,05806	0,02827
% plavljenja plitice	67,75	44,08
$u_{LDmax}$ , m/s	0,058	0,028
$u_{LD}$ , m/s	0,04	0,004
% plavljenja preljeva	70,02	13,64

Prema dobivenim rezultatima, promjer kolone za jačanje bi bio manji nego onaj u kolone za iscrpljivanje, ali radi simetrije kolona, promjeri kolona su izjednačeni pa prema tome se može zaključiti da je plitica kolone za jačanje predimenzionirana.

Učinkovitost plitica spojene kolone pretpostavlja se na 50% prema iskustvenim podacima iz slike 4-2. Kako je teorijski broj plitica kolone za iscrpljivanje jednak 1, stvarni je 2, a teorijski broj plitica kolone za jačanje 12, stvarni će biti 24, što ukupno iznosi 26 plitica spojene kolone.

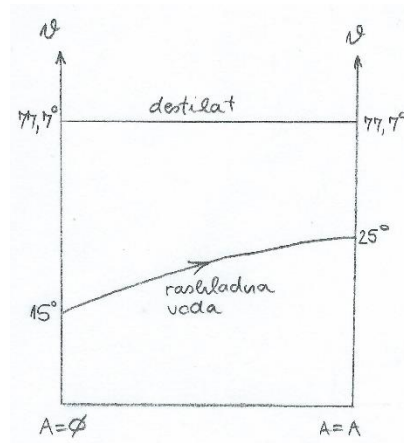


Slika 4-2. Učinkovitost plitica u stvarnim kolonama [7]

## 5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

### 5.1. Kondenzator

Kondenzator je izveden kao standardni shell and tube izmjenjivač topline, u kojem je primar rashladna voda koja struji kroz snop cijevi i hladi sekundar, koji je para destilata koja okomito nastrujava na snop cijevi.



Slika 5-1.  $\vartheta - A$  dijagram kondenzatora.

#### Poznati parametri.

Poznati parametri kondenzatora:

- toplinski tok kondenzatora:  $\Phi_k = 25 \text{ kW} = 25000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura stijenke cijevi:  $\vartheta_{stj} = 47,84 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Poznati parametri primara:

- temperatura ulaza primara:  $\vartheta_{1ul} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperatura izlaza primara:  $\vartheta_{1iz} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- srednja temperatura primara:  $\vartheta_{1ul} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- tlak primara:  $p_1 = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$ ,
- specifični toplinski kapacitet primara:  $c_{p1} = 4191,44 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća primara:  $\rho_1 = 999,233 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost primara:  $\lambda_1 = 0,59796 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost primara:  $\mu_1 = 0,0010069 \text{ Pas}$ .

Poznati parametri sekundara:

- temperatura ulaza sekundara:  $\vartheta_{2ul} = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura izlaza sekundara:  $\vartheta_{2iz} = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura filma sekundara:  $\vartheta_{2f} = 62,77 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- tlak sekundara:  $p_2 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$  ,
- specifični toplinski kapacitet sekundara:  $c_{p2} = 3093,06 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća filma sekundara:  $\rho_2 = 763,361 \text{ kg/m}^3$
- gustoća pare sekundara:  $\rho_{2G} = 1,406 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost sekundara:  $\lambda_2 = 0,16871 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost sekundara:  $\mu_2 = 0,0005383 \text{ Pas}$
- ulazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2ul} = 1148,7 \text{ kJ/kg} = 1148700 \text{ J/kg}$  ,
- izlazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2iz} = 209,2 \text{ kJ/kg} = 209200 \text{ J/kg}$  .

### Proračun.

Maseni protok primara:

$$q_{m1} = \frac{\Phi_k}{c_{p1} \cdot (\vartheta_{1iz} - \vartheta_{1ul})} , \quad (5-1)$$

$$q_{m1} = \frac{25000}{4191,44 \cdot (25 - 15)} = 0,59645 \text{ kg/s} = 2147,233 \text{ kg/h} .$$

Maseni protok sekundara:

$$q_{m2} = \frac{\Phi_k}{h_{2ul} - h_{2iz}} , \quad (5-2)$$

$$q_{m2} = \frac{25}{1148,7 - 209,2} = 0,02661 \text{ kg/s} = 95,796 \text{ kg/h} .$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{2ul} - \vartheta_{1iz}) - (\vartheta_{2iz} - \vartheta_{1ul})}{\ln \frac{(\vartheta_{2ul} - \vartheta_{1iz})}{(\vartheta_{2iz} - \vartheta_{1ul})}} , \quad (5-3)$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(77,7 - 25) - (77,7 - 15)}{\ln \frac{(77,7 - 25)}{(77,7 - 15)}} = 57,56 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Odabir cijevi:

- materijal cijevi: bakar
- vanjski promjer cijevi:  $d_{cv} = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke cijevi:  $s_c = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$  ,
- toplinska provodnost cijevi:  $\lambda_c = 372 \text{ W/(mK)}$  ,
- površina poprečnog presjeka cijevi:  $A_{cu} = 0,0001311 \text{ m}^2$  .

Potreban broj cijevi:

- pretpostavljena brzina primara u cijevi:  $w_1 = 0,6 \text{ m/s}$  ,
- broj cijevi u jednom prolazu:

$$N_c = \frac{q_{m1}}{\rho_1 \cdot w_1 \cdot A_{cu}} , \quad (5-4)$$

$$N_c = \frac{0,59645}{999,233 \cdot 0,6 \cdot 0,0001311} = 8,796 \approx 9 ,$$

- broj prolaza:  $n_p = 2$  ,
- ukupni broj cijevi:  $N_{cuk} = 18$  ,
- stvarna brzina primara u cijevima:

$$w_1 = \frac{q_{m1}}{\rho_1 \cdot N_c \cdot A_{cu}} , \quad (5-5)$$

$$w_1 = \frac{0,59645}{999,233 \cdot 9 \cdot 0,0001311} = 0,586 \text{ m/s} .$$

Prijelaz topline na strani primara:

- model prijelaza topline: turbulentno strujanje u cijevi prema [6] ,
- pretpostavljena duljina cijevi:  $L_c = 540 \text{ mm} = 0,54 \text{ m}$  ,
- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_1 \cdot w_1 \cdot d_{cu}}{\mu_1} , \quad (5-6)$$

$$Re = \frac{999,233 \cdot 0,586 \cdot 0,012}{0,0010069} = 6983,3 ,$$

- Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1}, \quad (5-7)$$

$$Pr = \frac{0,0010069 \cdot 4191,44}{0,59796} = 7,058,$$

- Nusseltov broj:

$$Nu = 0,012 \cdot (Re^{0,87} - 280) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d_{cu}}{L_c} \right)^{2/3} \right], \quad (5-8)$$

$$Nu = 0,012 \cdot (6983,3^{0,87} - 280) \cdot 7,058^{0,4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,012}{0,54} \right)^{2/3} \right] = 54,599,$$

- koeficijent prijelaza topline primara:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_{cu}}, \quad (5-9)$$

$$\alpha_1 = \frac{54,599 \cdot 0,59796}{0,012} = 2720,67 \text{ W}/(m^2K).$$

Prijelaz topline na strani sekundara:

- model prijelaza topline: filmska kondenzacija na horizontalnom snopu cijevi prema [8],
- širina toka:

$$l_w = \frac{p_l \cdot p_t - \pi \cdot d_{cv}^2}{4 \cdot p_l}, \quad (5-10)$$

$$l_w = \frac{0,01485 \cdot 0,0297 - \pi \cdot 0,016^2}{4 \cdot 0,01485} = 0,01616 \text{ m},$$

- broj cijevi u redu:  $N_r = 4$ ,
- srednja površina strujanja:

$$A_m = l_w \cdot N_r \cdot L_c, \quad (5-11)$$

$$A_m = 0,01616 \cdot 4 \cdot 0,54 = 0,0349 \text{ m}^2,$$

- brzina pare:

$$w_G = \frac{q_{m2}}{2 \cdot \rho_G \cdot A_m} \quad (5-12)$$

$$w_G = \frac{0,02661}{2 \cdot 1,406 \cdot 0,0349} = 0,271 \text{ m/s}$$

- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_F \cdot w_G \cdot d_{cv}}{\mu_F}, \quad (5-13)$$

$$Re = \frac{763,361 \cdot 0,271 \cdot 0,016}{0,0005383} = 6153,$$

- koeficijent prijelaza topline koji uzima u obzir utjecaj smičnog naprezanja:

$$\alpha_{2sh} = 0,59 \cdot \frac{\lambda_2}{d_{cv}} \cdot \sqrt{Re}, \quad (5-14)$$

$$\alpha_{2sh} = 0,59 \cdot \frac{0,16871}{0,016} \cdot \sqrt{6153} = 488 \text{ W/(m}^2\text{K)},$$

- koeficijent prijelaza topline koji uzima u obzir nizvodno gibanje kondenzata:

$$\alpha_{2F} = 0,728 \cdot \frac{\lambda_2}{d_{cv}} \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot (\rho_2 - \rho_{2G}) \cdot g \cdot (h_{2ul} - h_{2iz}) \cdot d_{cv}^3}{\mu_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_{stj}) \cdot \lambda_2}}, \quad (5-15)$$

$$\alpha_{2F} = 0,728 \cdot \frac{0,16871}{0,016} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{763,361 \cdot (763,361 - 1,406) \cdot 9,81 \cdot (1148700 - 209200) \cdot 0,016^3}{0,0005383 \cdot (77,7 - 47,84) \cdot 0,16871}}$$

$$= 2302,76 \text{ W/(m}^2\text{K)},$$

- ukupni koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \alpha_{sh}^2 + \sqrt{\left(\frac{1}{4} \cdot \alpha_{sh}^4 + \alpha_{2F}^4\right) \cdot (N_r^{5/6} - (N_r - 1)^{5/6})}}, \quad (5-16)$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{1}{2} 488^2 + \sqrt{\left(\frac{1}{4} \cdot 488^4 + 2302,76^4\right) \cdot (4^{5/6} - (4 - 1)^{5/6})}}$$

$$= 1575,99 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$



Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu cijevi:

- specifični toplinski tok na strani primara:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (\vartheta_{stj} - \vartheta_{1iz}) , \quad (5-17)$$

$$q_1 = 2720,67 \cdot (47,84 - 25) = 62140,08 \text{ W/m}^2 ,$$

- specifični toplinski tok na strani sekundara:

$$q_2 = \frac{\vartheta_{2ul} - \vartheta_{stj}}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_2} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right)} , \quad (5-18)$$

$$q_2 = \frac{77,7 - 47,84}{\frac{0,012}{0,016 \cdot 1575,99} + \frac{0,012}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,016}{0,012} \right)} = 62139,6 \text{ W/m}^2 .$$

Dimenzioniranje izmjenjivača:

- koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_2} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right) + \frac{1}{\alpha_1}} , \quad (5-19)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,012}{0,016 \cdot 1575,99} + \frac{0,012}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,016}{0,012} \right) + \frac{1}{2720,67}} = 1179,12 \text{ W/(m}^2\text{K)} ,$$

- površina izmjene topline:

$$A = \frac{\Phi_k}{k \cdot \Delta\vartheta_m} , \quad (5-20)$$

$$A = \frac{25000}{1179,12 \cdot 57,56} = 0,36838 \text{ m}^2 ,$$

- duljina cijevi:

$$L_c = \frac{A}{N_{cuk} \cdot d_{cu} \cdot \pi} , \quad (5-21)$$

$$L_c = \frac{0,36838}{18 \cdot 0,012 \cdot \pi} = 0,543 \text{ m} = 543 \text{ mm} ,$$

- korak rasporeda cijevi:  $t = 21 \text{ mm} = 0,021 \text{ m}$  ,
- okomiti korak cijevi:  $p_t = 29,7 \text{ mm} = 0,0297 \text{ m}$  ,
- uzdužni korak cijevi:  $p_l = 14,85 \text{ mm} = 0,01485 \text{ m}$  ,
- konstanta rasporeda cijevi:  $f_1 = 1,3$  , (pravokutni raspored)

- konstanta broja cijevi:  $f_2 = 22 \text{ mm} = 0,022 \text{ m}$ ,
- promjer plašta:

$$D_T = \sqrt{f_1 \cdot N_{cuk} \cdot t^2 + f_2 \cdot N_{cuk}^{1/2} \cdot t + d_{cv}} , \quad (5-22)$$

$$D_T = \sqrt{1,3 \cdot 18 \cdot 21^2 + 22 \cdot 18^{1/2} \cdot 21 + 16} = 126,81 \text{ mm} = 0,12681 \text{ m} ,$$

Odabrane dimenzije izmjenjivača:

- duljina cijevi:  $L_c = 550 \text{ mm} = 0,55 \text{ m}$ ,
- vanjski promjer plašta:  $D_v = 139,7 \text{ mm} = 0,1397 \text{ m}$ ,
- debljina stijenke:  $s = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$ ,
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 131,7 \text{ mm} = 0,1317 \text{ m}$ .

Dimenzioniranje priključaka:

Ulaz i izlaz vode

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_1 \cdot w \cdot \pi}} , \quad (5-23)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,59645}{999,233 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,02757 \text{ m} = 27,57 \text{ mm} ,$$

- odabran je priključak DN25

Ulaz pare destilata

- brzina pare:  $w = 5 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_G \cdot w \cdot \pi}} , \quad (5-24)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02661}{1,406 \cdot 5 \cdot \pi}} = 0,06943 \text{ m} = 69,43 \text{ mm} ,$$

- odabran je priključak DN65

Izlaz destilata

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

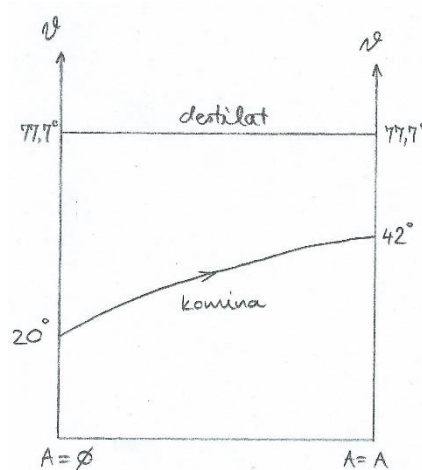
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_2 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-25)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02661}{763,361 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,00666 \text{ m} = 6,66 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN10

## 5.2. Deflegmator

Deflegmator je izveden kao shell and tube izmjenjivač topline, u kojem je primar komina koja se zagrijava prolaskom oko vertikalnog snopa cijevi, a sekundar je para destilata koja se djelomično ukapljuje struajući kroz snop cijevi te tako hladi kominu.



Slika 5-2.  $\vartheta - A$  dijagram deflegmatora.

### Poznati parametri.

Poznati parametri deflegmatora:

- toplinski tok deflegmatora:  $\Phi_r = 45 \text{ kW} = 45000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura stijenke cijevi:  $\vartheta_{stj} = 64,67 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Poznati parametri primara:

- temperatura ulaza primara:  $\vartheta_{1ul} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperatura izlaza primara:  $\vartheta_{1iz} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- srednja temperatura primara:  $\vartheta_{1ul} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- tlak primara:  $p_1 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- specifični toplinski kapacitet primara:  $c_{p1} = 4047,86 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća primara:  $\rho_1 = 971,114 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost primara:  $\lambda_1 = 0,54169 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost primara:  $\mu_1 = 0,0007985 \text{ Pas}$ ,
- ulazna specifična entalpija primara:  $h_{1ul} = 50 \text{ kJ/kg} = 50000 \text{ J/kg}$ ,
- izlazna specifična entalpija primara:  $h_{1iz} = 155,6 \text{ kJ/kg} = 155600 \text{ J/kg}$ .

Poznati parametri sekundara:

- temperatura ulaza sekundara:  $\vartheta_{2ul} = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura izlaza sekundara:  $\vartheta_{2iz} = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura filma sekundara:  $\vartheta_{2f} = 71,185 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- tlak sekundara:  $p_2 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$  ,
- specifični toplinski kapacitet sekundara:  $c_{p2} = 3195,88 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća sekundara:  $\rho_2 = 757,802 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost sekundara:  $\lambda_2 = 0,16902 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost sekundara:  $\mu_2 = 0,0004699 \text{ Pas}$
- specifična toplina deflegmacije:  $\phi_r = 1928,2 \text{ kJ/kg} = 1928200 \text{ J/kg}$  .

### Proračun.

Maseni protok primara:

$$q_{m1} = \frac{\Phi_r}{c_p \cdot (\vartheta_{1iz} - \vartheta_{1ul})} , \quad (5-24)$$

$$q_{m1} = \frac{45}{155,6 - 50} = 0,42614 \text{ kg/s} = 1534,091 \text{ kg/h} .$$

Maseni protok sekundara:

$$q_{m2} = \frac{\Phi_r}{\phi_r} , \quad (5-26)$$

$$q_{m2} = \frac{45}{1928,2} = 0,02334 \text{ kg/s} = 84,016 \text{ kg/h} .$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{2ul} - \vartheta_{1iz}) - (\vartheta_{2iz} - \vartheta_{1ul})}{\ln \frac{(\vartheta_{2ul} - \vartheta_{1iz})}{(\vartheta_{2iz} - \vartheta_{1ul})}} , \quad (5-27)$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(77,7 - 42) - (77,7 - 20)}{\ln \frac{(77,7 - 42)}{(77,7 - 20)}} = 45,82 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Odabir cijevi:

- materijal cijevi: bakar
- vanjski promjer cijevi:  $d_{cv} = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke cijevi:  $s_c = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$  ,
- toplinska provodnost cijevi:  $\lambda_c = 372 \text{ W/(mK)}$  ,
- površina poprečnog presjeka cijevi:  $A_{cu} = 0,0002011 \text{ m}^2$  ,
- ukupni broj cijevi:  $N_{cuk} = 57$  .

Prijelaz topline na strani sekundara:

- model prijelaza topline: filmska kondenzacija na vertikalnom snopu cijevi prema [6],
- pretpostavljena duljina cijevi:  $H_c = 310 \text{ mm} = 0,31 \text{ m}$  ,
- karakteristična duljina:

$$L_k = \sqrt[3]{\frac{\mu_2^2}{\rho_2^2 \cdot g}} , \quad (5-28)$$

$$L_k = \sqrt[3]{\frac{0,0004699^2}{757,802^2 \cdot 9,81}} = 0,00003397 \text{ m} ,$$

- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{q_{mF}}{\pi \cdot d_{cu} \cdot \mu_2} , \quad (5-29)$$

$$Re = \frac{0,01233}{\pi \cdot 0,016 \cdot 0,0004699} = 9,16 ,$$

- koeficijent prijelaza topline sekundara:

$$\alpha_2 = 0,925 \cdot \frac{\lambda_2}{L_k} \cdot Re^{-1/3} , \quad (5-30)$$

$$\alpha_2 = 0,925 \cdot \frac{0,16902}{0,00003397} \cdot 9,16^{-1/3} = 2199,97 \text{ W/(m}^2\text{K)} ,$$

Prijelaz topline na strani primara:

- model prijelaza topline: strujanje oko pregrada prema [10],
- minimalni razmak između pregrada:

$$L_M = 0,2 \cdot D_u , \quad (5-31)$$

$$L_M = 0,2 \cdot 0,245 = 0,049 \text{ m} = 49 \text{ mm} ,$$

- slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni:

$$S_U = \left( \frac{D_u^2}{8} \right) \cdot (\gamma - \sin \gamma) - 6 \cdot \frac{d_{cv}^2 \cdot \pi}{4} , \quad (5-32)$$

$$\begin{aligned} S_U &= \left( \frac{0,245^2}{8} \right) \cdot \left( \frac{113,06 \cdot \pi}{180} - \sin \frac{113,06 \cdot \pi}{180} \right) - 6 \cdot \frac{0,02^2 \cdot \pi}{4} = \\ &= 0,00602 \text{ m}^2 , \end{aligned}$$

- najuži presjek strujanja u međuzoni:

$$S_M = (2 \cdot e_1 + 16 \cdot e) \cdot L_m , \quad (5-33)$$

$$S_M = (2 \cdot 0,0085 + 16 \cdot 0,006) \cdot 0,049 = 0,00488 \text{ m}^2 ,$$

- presjek na koji se odnosi brzina strujanja:

$$S_D = \sqrt{S_M \cdot S_U} , \quad (5-34)$$

$$S_D = \sqrt{0,00488 \cdot 0,00602} = 0,00542 \text{ m}^2 ,$$

- ekvivalentna brzina strujanja:

$$w_e = \frac{q_{m1}}{\rho_1 \cdot S_D} , \quad (5-35)$$

$$w_e = \frac{0,42614}{971,114 \cdot 0,00542} = 0,081 \text{ m/s} ,$$

- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_1 \cdot w_e \cdot d_{cv}}{\mu_1} , \quad (5-36)$$

$$Re = \frac{971,114 \cdot 0,081 \cdot 0,02}{0,0007985} = 1970,6 ,$$

- Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1}, \quad (5-37)$$

$$Pr = \frac{0,0007985 \cdot 4047,86}{0,54169} = 5,967,$$

- konstanta za obradu plašta:  $C = 0,22$ ,
- Nusseltov broj:

$$Nu = C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33}, \quad (5-38)$$

$$Nu = 0,22 \cdot 1970,6^{0,6} \cdot 5,967^{0,33} = 37,6,$$

- koeficijent prijelaza topline primara:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_{cv}}, \quad (5-39)$$

$$\alpha_1 = \frac{37,6 \cdot 0,54169}{0,02} = 1018,38 \text{ W}/(m^2K),$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu cijevi:

- specifični toplinski tok na strani sekundara:

$$q_2 = \alpha_2 \cdot (\vartheta_{2ul} - \vartheta_{stj}), \quad (5-40)$$

$$q_2 = 2199,97 \cdot (77,7 - 64,67) = 28665,64 \text{ W}/m^2,$$

- specifični toplinski tok na strani primara:

$$q_1 = \frac{\vartheta_{stj} - \vartheta_{1iz}}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_1} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln\left(\frac{d_{cv}}{d_{cu}}\right)}, \quad (5-41)$$

$$q_1 = \frac{64,67 - 42}{\frac{0,016}{0,02 \cdot 1018,38} + \frac{0,016}{2 \cdot 372} \ln\left(\frac{0,020}{0,016}\right)} = 28683,09 \text{ W}/m^2.$$

Dimenzioniranje izmjenjivača:

- koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_1} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln\left(\frac{d_{cv}}{d_{cu}}\right) + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5-42)$$



$$k = \frac{1}{\frac{0,016}{0,02 \cdot 1018,38} + \frac{0,02}{2 \cdot 372} \ln\left(\frac{0,02}{0,016}\right) + \frac{1}{2199,97}} = 803,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) ,$$

- površina izmjene topline:

$$A = \frac{\Phi_k}{k \cdot \Delta\vartheta_m} , \quad (5-43)$$

$$A = \frac{45000}{803,27 \cdot 45,82} = 1,22255 \text{ m}^2 ,$$

- duljina cijevi:

$$H_c = \frac{A}{N_{cuk} \cdot d_{cu} \cdot \pi} , \quad (5-44)$$

$$H_c = \frac{1,22255}{57 \cdot 0,016 \cdot \pi} = 0,427 \text{ m} = 427 \text{ mm} ,$$

- korak rasporeda cijevi:  $t = 26 \text{ mm} = 0,026 \text{ m}$  ,
- konstanta rasporeda cijevi:  $f_1 = 1,1$  ,
- konstanta broja cijevi:  $f_2 = 0 \text{ mm} = 0 \text{ m}$  ,
- promjer plašta:

$$D_T = \sqrt{f_1 \cdot N_{cuk} \cdot t^2 + f_2 \cdot N_{cuk}^{1/2} \cdot t + d_{cv}} , \quad (5-45)$$

$$D_T = \sqrt{1,1 \cdot 57 \cdot 26^2 + 16} = 225,88 \text{ mm} = 0,22588 \text{ m} ,$$

Odabrane dimenzije izmjenjivača:

- duljina cijevi:  $L_c = 430 \text{ mm} = 0,43 \text{ m}$  ,
- vanjski promjer plašta:  $D_v = 255 \text{ mm} = 0,255 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke:  $s = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 245 \text{ mm} = 0,245 \text{ m}$  .

Dimenzioniranje priključaka:

Ulaz i izlaz komine

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$  ,
- promjer priključka:

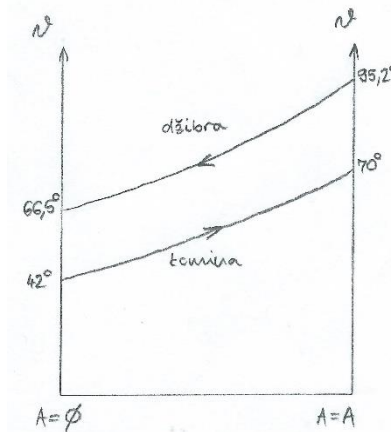
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_1 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-46)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,42614}{971,114 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,02364 \text{ m} = 23,64 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN25

### 5.3. Dogrijač

Dogrijač je izveden kao standardni shell and tube izmjenjivač topline, u kojem je primar džibra koja struji kroz snop cijevi i zagrijava sekundar, kominu koja struji oko snopa cijevi.



Slika 5-3.  $\vartheta - A$  dijagram dogrijača.

#### Poznati parametri.

Poznati parametri kondenzatora:

- toplinski tok kondenzatora:  $\Phi_{dog} = 55 \text{ kW} = 55000 \text{ Pa}$ ,
- temperatura stijenke cijevi:  $\vartheta_{stj} = 74,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Poznati parametri primara:

- temperatura ulaza primara:  $\vartheta_{1ul} = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperatura izlaza primara:  $\vartheta_{1iz} = 66,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- srednja temperatura primara:  $\vartheta_{1sr} = 80,85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- tlak primara:  $p_1 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- specifični toplinski kapacitet primara:  $c_{p1} = 4160,32 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća primara:  $\rho_1 = 957,003 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost primara:  $\lambda_1 = 0,62754 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost primara:  $\mu_1 = 0,0003548 \text{ Pas}$ ,
- ulazna specifična entalpija primara:  $h_{1ul} = 400 \text{ kJ/kg} = 400000 \text{ J/kg}$ ,
- izlazna specifična entalpija primara:  $h_{1iz} = 271,7 \text{ kJ/kg} = 271700 \text{ J/kg}$ .

Poznati parametri sekundara:

- temperatura ulaza sekundara:  $\vartheta_{2ul} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura izlaza sekundara:  $\vartheta_{2iz} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- srednja temperatura sekundara:  $\vartheta_{sr} = 56 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- tlak sekundara:  $p_2 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$  ,
- specifični toplinski kapacitet sekundara:  $c_{p2} = 4073,71 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća sekundara:  $\rho_2 = 957,865 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost primara:  $\lambda_2 = 0,56531 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost primara:  $\mu_2 = 0,0005084 \text{ Pas}$
- ulazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2ul} = 155,6 \text{ kJ/kg} = 155600 \text{ J/kg}$  ,
- izlazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2iz} = 276,9 \text{ kJ/kg} = 276900 \text{ J/kg}$  .

### Proračun.

Maseni protok primara:

$$q_{m1} = \frac{\Phi_{dog}}{h_{1ul} - h_{1iz}} , \quad (5-47)$$

$$q_{m1} = \frac{55}{400 - 271,7} = 0,42868 \text{ kg/s} = 1543,258 \text{ kg/h} .$$

Maseni protok sekundara:

$$q_{m2} = \frac{\Phi_k}{h_{2iz} - h_{2ul}} , \quad (5-48)$$

$$q_{m2} = \frac{55}{276,9 - 155,6} = 0,45342 \text{ kg/s} = 1632,317 \text{ kg/h} .$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{1ul} - \vartheta_{2iz}) - (\vartheta_{1iz} - \vartheta_{2ul})}{\ln \frac{(\vartheta_{1ul} - \vartheta_{2iz})}{(\vartheta_{1iz} - \vartheta_{2ul})}} , \quad (5-49)$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(92,5 - 70) - (66,5 - 42)}{\ln \frac{(92,5 - 70)}{(66,5 - 42)}} = 24,85 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Odabir cijevi:

- materijal cijevi: bakar
- vanjski promjer cijevi:  $d_{cv} = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke cijevi:  $s_c = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$  ,
- toplinska provodnost cijevi:  $\lambda_c = 372 \text{ W/(mK)}$  ,
- površina poprečnog presjeka cijevi:  $A_{cu} = 0,0001311 \text{ m}^2$  .

Potreban broj cijevi:

- pretpostavljena brzina primara u cijevi:  $w_1 = 0,6 \text{ m/s}$  ,
- broj cijevi u jednom prolazu:

$$N_c = \frac{q_{m1}}{\rho_1 \cdot w_1 \cdot A_{cu}} , \quad (5-50)$$

$$N_c = \frac{0,42868}{957,003 \cdot 0,6 \cdot 0,0001311} = 6,601 \approx 8 ,$$

- broj prolaza:  $n_p = 8$  ,
- ukupni broj cijevi:  $N_{cuk} = 48$  ,
- stvarna brzina primara u cijevima:

$$w_1 = \frac{q_{m1}}{\rho_1 \cdot N_c \cdot A_{cu}} , \quad (5-51)$$

$$w_1 = \frac{0,42868}{957,003 \cdot 8 \cdot 0,0001311} = 0,495 \text{ m/s} .$$

Prijelaz topline na strani primara:

- model prijelaza topline: turbulentno strujanje u cijevi prema [6] ,
- pretpostavljena duljina cijevi:  $L_c = 900 \text{ mm} = 0,9 \text{ m}$  ,
- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_1 \cdot w_1 \cdot d_{cu}}{\mu_1} , \quad (5-52)$$

$$Re = \frac{957,003 \cdot 0,495 \cdot 0,012}{0,0003548} = 16026,2 ,$$

- Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1}, \quad (5-53)$$

$$Pr = \frac{0,0003548 \cdot 4160,32}{0,62754} = 2,352,$$

- Nusseltov broj:

$$Nu = 0,012 \cdot (Re^{0,87} - 280) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d_{cu}}{L_c} \right)^{2/3} \right], \quad (5-54)$$

$$Nu = 0,012 \cdot (16026,2^{0,87} - 280) \cdot 2,352^{0,4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,012}{0,9} \right)^{2/3} \right] = 76,233,$$

- koeficijent prijelaza topline primara:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_{cu}}, \quad (5-55)$$

$$\alpha_1 = \frac{76,233 \cdot 0,62754}{0,012} = 3986,61 \text{ W}/(m^2K).$$

Prijelaz topline na strani sekundara:

- model prijelaza topline: strujanje oko pregrada prema [10],
- minimalni razmak između pregrada:

$$L_M = 0,2 \cdot D_u, \quad (5-56)$$

$$L_M = 0,2 \cdot 0,222 = 0,0444 \text{ m} = 44,4 \text{ mm} \approx 100 \text{ mm},$$

- slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni:

$$S_U = \left( \frac{D_u^2}{8} \right) \cdot (\gamma - \sin \gamma) - 6 \cdot \frac{d_{cv}^2 \cdot \pi}{4}, \quad (5-57)$$

$$\begin{aligned} S_U &= \left( \frac{0,222^2}{8} \right) \cdot \left( \frac{83,36 \cdot \pi}{180} - \sin \frac{83,36 \cdot \pi}{180} \right) - 6 \cdot \frac{0,016^2 \cdot \pi}{4} = \\ &= 0,00284 \text{ m}^2, \end{aligned}$$

- najuži presjek strujanja u međuzoni:

$$S_M = (2 \cdot e_1 + 16 \cdot e) \cdot L_m, \quad (5-58)$$

$$S_M = (2 \cdot 0,0111 + 5 \cdot 0,006 + 24) \cdot 0,1 = 0,00812 \text{ m}^2,$$

- presjek na koji se odnosi brzina strujanja:

$$S_D = \sqrt{S_M \cdot S_U} , \quad (5-59)$$

$$S_D = \sqrt{0,00284 \cdot 0,00812} = 0,00481 \text{ m}^2 ,$$

- ekvivalentna brzina strujanja:

$$w_e = \frac{q_{m2}}{\rho_2 \cdot S_D} , \quad (5-60)$$

$$w_e = \frac{0,45342}{957,003 \cdot 0,00481} = 0,099 \text{ m/s} ,$$

- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_2 \cdot w_e \cdot d_{cv}}{\mu_2} , \quad (5-61)$$

$$Re = \frac{957,865 \cdot 0,099 \cdot 0,016}{0,0005084} = 2969,7 ,$$

- Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\mu_2 \cdot c_{p2}}{\lambda_2} , \quad (5-62)$$

$$Pr = \frac{0,0005084 \cdot 4073,71}{0,56531} = 3,663 ,$$

- konstanta za obradu plašta:  $C = 0,22$  ,

- Nusseltov broj:

$$Nu = C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33} , \quad (5-63)$$

$$Nu = 0,22 \cdot 2969,7^{0,6} \cdot 3,663^{0,33} = 40,9 ,$$

- koeficijent prijelaza topline sekundara:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_{cv}} , \quad (5-64)$$

$$\alpha_2 = \frac{40,6 \cdot 0,56531}{0,016} = 1446,44 \text{ W/(m}^2\text{K)} ,$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu cijevi:

- specifični toplinski tok na strani primara:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (\vartheta_{1ul} - \vartheta_{stj}) , \quad (5-65)$$

$$q_1 = 3986,61 \cdot (95,2 - 74,6) = 82124,17 \text{ W/m}^2 ,$$

- specifični toplinski tok na strani sekundara:

$$q_2 = \frac{\vartheta_{stj} - \vartheta_{2iz}}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_2} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right)} , \quad (5-66)$$

$$q_2 = \frac{74,6 - 70}{\frac{0,012}{0,016 \cdot 1446,44} + \frac{0,012}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,016}{0,012} \right)} = 82046,93 \text{ W/m}^2 .$$

Dimenzioniranje izmjenjivača:

- koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_2} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right) + \frac{1}{\alpha_1}} , \quad (5-67)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,012}{0,016 \cdot 1446,44} + \frac{0,012}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,016}{0,012} \right) + \frac{1}{3986,61}} = 1292 \text{ W/(m}^2\text{K)} ,$$

- površina izmjene topline:

$$A = \frac{\Phi_k}{k \cdot \Delta\vartheta_m} , \quad (5-68)$$

$$A = \frac{55000}{1292 \cdot 24,85} = 1,71318 \text{ m}^2 ,$$

- duljina cijevi:

$$L_c = \frac{A}{N_{cuk} \cdot d_{cu} \cdot \pi} , \quad (5-69)$$

$$L_c = \frac{1,71318}{48 \cdot 0,012 \cdot \pi} = 0,947 \text{ m} = 947 \text{ mm} ,$$

- korak rasporeda cijevi:  $t = 21 \text{ mm} = 0,021 \text{ m}$  ,
- konstanta rasporeda cijevi:  $f_1 = 1,1$  ,
- konstanta broja cijevi:  $f_2 = 105 \text{ mm} = 0,105 \text{ m}$  ,
- promjer plašta:

$$D_T = \sqrt{f_1 \cdot N_{cuk} \cdot t^2 + f_2 \cdot N_{cuk}^{1/2} \cdot t + d_{cv}} , \quad (5-70)$$

$$D_T = \sqrt{1,1 \cdot 48 \cdot 21^2 + 105 \cdot 48^{1/2} \cdot 21 + 16} = 212,37 \text{ mm} = 0,21237 \text{ m} ,$$



Odabrane dimenzije izmjenjivača:

- duljina cijevi:  $L_c = 950 \text{ mm} = 0,95 \text{ m}$ ,
- vanjski promjer plašta:  $D_v = 230 \text{ mm} = 0,23 \text{ m}$ ,
- debljina stijenke:  $s = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$ ,
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 222 \text{ mm} = 0,222 \text{ m}$ .

Dimenzioniranje priključaka:

Ulaz i izlaz džibre

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_1 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-71)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,42868}{957,003 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,02388 \text{ m} = 23,88 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN25

Ulaz i izlaz komine

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

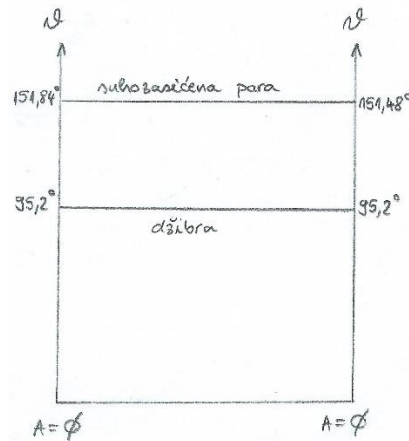
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_2 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-72)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,45342}{957,865 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,02455 \text{ m} = 24,55 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN25

## 5.4. Grijalica

Grijalica je izvedena kao standardni shell and tube izmjenjivač topline, u kojem je primar džibra koja isparava oko snopa cijevi i sekundar, koji je suhozasićena para koja kondenzira u snopu cijevi i time zagrijava džibru.



Slika 5-4.  $\vartheta - A$  dijagram grijalice.

### Poznati parametri.

Poznati parametri kondenzatora:

- toplinski tok kondenzatora:  $\Phi_k = 120 \text{ kW} = 120000 \text{ W}$ ,
- temperatura stijenke cijevi:  $\vartheta_{stj} = 140,97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Poznati parametri primara:

- temperatura ulaza primara:  $\vartheta_{1ul} = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperatura izlaza primara:  $\vartheta_{1iz} = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- srednja temperatura primara:  $\vartheta_{1sr} = 95,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- tlak primara:  $p_1 = 0,98 \text{ bar} = 98000 \text{ Pa}$ ,
- specifični toplinski kapacitet primara:  $c_{p1} = 4180,63 \text{ J/(kgK)}$ ,
- gustoća primara:  $\rho_1 = 947,444 \text{ kg/m}^3$ ,
- toplinska provodnost primara:  $\lambda_1 = 0,63314 \text{ W/(mK)}$ ,
- dinamička viskoznost primara:  $\mu_1 = 0,0002985 \text{ Pas}$ ,
- gustoća primara uz stijenk:  $\rho_{1stj} = 910,932 \text{ kg/m}^3$ ,
- kinematička viskoznost primara:  $\nu_1 = 0,000000315 \text{ m}^2/\text{s}$ ,
- specifični toplinski tok grijalice:  $\phi_i = 285,374 \text{ kJ/kg} = 285374 \text{ J/kg}$

Poznati parametri sekundara:

- temperatura ulaza sekundara:  $\vartheta_{2ul} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- temperatura izlaza sekundara:  $\vartheta_{2iz} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- srednja temperatura sekundara:  $\vartheta_{2f} = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}$  ,
- tlak primara:  $p_2 = 5 \text{ bar} = 500000 \text{ Pa}$  ,
- specifični toplinski kapacitet kapljevine sekundara:  $c_{pF2} = 4315,4 \text{ J/(kgK)}$
- gustoća kapljevine sekundara:  $\rho_{F2} = 915,33 \text{ kg/m}^3$
- toplinska provodnost kapljevine primara:  $\lambda_{F2} = 0,68166 \text{ W/(mK)}$
- dinamička viskoznost kapljevine primara:  $\mu_{F2} = 0,0001802 \text{ Pas}$
- gustoća pare sekundara:  $\rho_{2G} = 2,668 \text{ kg/m}^3$
- dinamička viskoznost pare primara:  $\mu_{2G} = 0,0000141 \text{ Pas}$
- ulazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2ul} = 2748,11 \text{ kJ/kg} = 2748110 \text{ J/kg}$  ,
- izlazna specifična entalpija sekundara:  $h_{2iz} = 640,19 \text{ kJ/kg} = 640190 \text{ J/kg}$  .

### Proračun.

Maseni protok primara:

$$q_{m1} = \frac{\Phi_i}{\phi_i} , \quad (5-73)$$

$$q_{m1} = \frac{120}{285,374} = 0,42050 \text{ kg/s} = 1513,801 \text{ kg/h} .$$

Maseni protok sekundara:

$$q_{m2} = \frac{\Phi_i}{h_{2ul} - h_{2iz}} , \quad (5-74)$$

$$q_{m2} = \frac{120}{2748,11 - 640,19} = 0,05693 \text{ kg/s} = 204,941 \text{ kg/h} .$$

Razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{2ul} - \vartheta_{1iz} , \quad (5-75)$$

$$\Delta\vartheta_m = 151,84 - 95,2 = 56,64 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Odabir cijevi:

- materijal cijevi: bakar
- vanjski promjer cijevi:  $d_{cv} = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke cijevi:  $s_c = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$  ,
- toplinska provodnost cijevi:  $\lambda_c = 372 \text{ W/(mK)}$  ,
- površina poprečnog presjeka cijevi:  $A_{cu} = 0,0002011 \text{ m}^2$  .

Potreban broj cijevi:

- pretpostavljena brzina sekundara u cijevi:  $w_2 = 3 \text{ m/s}$  ,
- broj cijevi u jednom prolazu:

$$N_c = \frac{q_{m2}}{\rho_2 \cdot w_2 \cdot A_{cu}} , \quad (5-76)$$

$$N_c = \frac{0,05693}{2,668 \cdot 3 \cdot 0,0002011} = 35,375 \approx 36 ,$$

- broj prolaza:  $n_p = 1$  ,
- ukupni broj cijevi:  $N_{cuk} = 38$  ,
- stvarna brzina sekundara u cijevima:

$$w_2 = \frac{q_{m2}}{\rho_2 \cdot N_c \cdot A_{cu}} , \quad (5-77)$$

$$w_2 = \frac{0,05693}{2,668 \cdot 38 \cdot 0,0002011} = 2,793 \text{ m/s} .$$

Prijelaz topline na strani primara:

- model prijelaza topline: slobodna konvekcija oko dugačke horizontalne cijevi prema [2],
- Grashofov broj:

$$Gr = \frac{\rho_1 - \rho_{stj}}{\rho_1} \cdot \frac{g \cdot d_{cv}^3}{\nu_1^2} , \quad (5-78)$$

$$Gr = \frac{947,444 - 910,932}{947,444} \cdot \frac{9,81 \cdot 0,02^3}{0,000000315^2} = 30474821 ,$$

- Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1}, \quad (5-79)$$

$$Pr = \frac{0,0002985 \cdot 4180,63}{0,63314} = 1,971,$$

- Rayleighev broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (5-80)$$

$$Ra = 30474821 \cdot 1,971 = 60060079,$$

- Nusseltov broj:

$$Nu = \left\{ 0,60 + 0,387 \cdot Ra^{1/6} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-8/27} \right\}^2, \quad (5-81)$$

$$Nu = \left\{ 0,60 + 0,387 \cdot 60060079^{1/6} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,559}{1,971} \right)^{9/16} \right]^{-8/27} \right\}^2 = 54,789,$$

- koeficijent prijelaza topline primara:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_{cv}}, \quad (5-82)$$

$$\alpha_1 = \frac{54,789 \cdot 0,63314}{0,016} = 2168,08 \text{ W}/(m^2K).$$

Prijelaz topline na strani sekundara:

- model prijelaza topline: kondenzacija u horizontalnim cijevima [10],
- Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_{2G} \cdot w_2 \cdot d_{cu}}{\mu_{2G}}, \quad (5-83)$$

$$Re = \frac{2,668 \cdot 2,793 \cdot 0,016}{0,0000141} = 8544 < 35000,$$

- modificirana latentna toplina:

$$r' = r + \frac{3}{8} \cdot c_{pF2} \cdot (\vartheta_{2sr} - \vartheta_{stj}), \quad (5-84)$$

$$r' = 2107920 + \frac{3}{8} \cdot 4315,4 \cdot (151,84 - 140,97) = 2125511 \text{ J/kg} ,$$

- koeficijent prijelaza topline primara:

$$\alpha_2 = 0,555 \cdot \left( \frac{g \cdot \rho_{2F} \cdot (\rho_{2F} - \rho_{2G}) \cdot \lambda_{2F}^3 \cdot r'}{\mu_{2F} \cdot (\vartheta_{2sr} - \vartheta_{stj}) \cdot d_{cu}} \right)^{1/4} , \quad (5-85)$$

$$\alpha_2 = 0,555 \cdot \left( \frac{9,81 \cdot 915,33 \cdot (915,33 - 2,668) \cdot 0,68166^3 \cdot 2125511}{0,0001802 \cdot (151,84 - 140,97) \cdot 0,02} \right)^{1/4} =$$

$$= 11265,94 \text{ W/(m}^2\text{K)} .$$

Specifični toplinski tok sveden na unutrašnju površinu cijevi:

- specifični toplinski tok na strani primara:

$$q_1 = \frac{\vartheta_{stj} - \vartheta_{1iz}}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_1} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right)} , \quad (5-86)$$

$$q_1 = \frac{140,97 - 95,2}{\frac{0,016}{0,02 \cdot 2168,08} + \frac{0,016}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,020}{0,016} \right)} = 122448,61 \text{ W/m}^2 .$$

- specifični toplinski tok na strani sekundara:

$$q_2 = \alpha_2 \cdot (\vartheta_{2ul} - \vartheta_{stj}) , \quad (5-87)$$

$$q_2 = 11265,94 \cdot (151,84 - 140,97) = 122460,77 \text{ W/m}^2 ,$$

Dimenzioniranje izmjenjivača:

- koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{cu}}{d_{cv} \cdot \alpha_1} + \frac{d_{cu}}{2 \cdot \lambda_c} \ln \left( \frac{d_{cv}}{d_{cu}} \right) + \frac{1}{\alpha_2}} , \quad (5-88)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,016}{0,02 \cdot 2168,08} + \frac{0,016}{2 \cdot 372} \ln \left( \frac{0,02}{0,016} \right) + \frac{1}{11265,94}} = 1862,03 \text{ W/(m}^2\text{K)} ,$$

- površina izmjene topline:

$$A = \frac{\Phi_i}{k \cdot \Delta\vartheta} , \quad (5-89)$$

$$A = \frac{120000}{1862,03 \cdot 56,64} = 1,13781 \text{ m}^2 ,$$

- duljina cijevi:

$$L_c = \frac{A}{N_{cuk} \cdot d_{cu} \cdot \pi} , \quad (5-90)$$

$$L_c = \frac{1,13781}{38 \cdot 0,02 \cdot \pi} = 0,596 \text{ m} = 596 \text{ mm} ,$$

- korak rasporeda cijevi:  $t = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$  ,
- konstanta rasporeda cijevi:  $f_1 = 1,3$  ,
- konstanta broja cijevi:  $f_2 = 22 \text{ mm} = 22 \text{ m}$  ,
- promjer plašta:

$$D_T = \sqrt{f_1 \cdot N_{cuk} \cdot t^2 + f_2 \cdot N_{cuk}^{1/2} \cdot t + d_{cv}} , \quad (5-91)$$

$$D_T = \sqrt{1,3 \cdot 30 \cdot 25^2 + 22 \cdot 30^{1/2} \cdot 25 + 20} = 205,11 \text{ mm} = 0,20511 \text{ m} ,$$

Odabrane dimenzije izmjenjivača:

- duljina cijevi:  $L_c = 650 \text{ mm} = 0,650 \text{ m}$  ,
- vanjski promjer plašta:  $D_v = 219,1 \text{ mm} = 0,2191 \text{ m}$  ,
- debljina stijenke:  $s = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 211,9 \text{ mm} = 0,2119 \text{ m}$  .

Dimenzioniranje priključaka:

Ulaz i izlaz džibre

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$  ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m1}}{\rho_1 \cdot w \cdot \pi}} , \quad (5-92)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,4205}{947,444 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,02377 \text{ m} = 23,77 \text{ mm} ,$$

- odabran je priključak DN25

Ulaz pare

- brzina pare:  $w = 5 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_G \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-93)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,05693}{2,668 \cdot 5 \cdot \pi}} = 0,07371 \text{ m} = 73,71 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN80

Izlaz kondenzata

- brzina vode:  $w = 1 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_2 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-94)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,05693}{915,33 \cdot 1 \cdot \pi}} = 0,0089 \text{ m} = 8,9 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN10

Izlaz ravnotežne pare

- maseni protok ravnotežne pare:
- brzina vode:  $w = 6 \text{ m/s}$ ,
- promjer priključka:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m2}}{\rho_2 \cdot w \cdot \pi}}, \quad (5-95)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,03976}{0,871 \cdot 6 \cdot \pi}} = 0,09841 \text{ m} = 98,41 \text{ mm},$$

- odabran je priključak DN100.



## 6. PRORAČUN ČVRSTOĆE GRIMALICE

### 6.1. Plašt ulaza i izlaza sekundara

Proračun plašta ulaza i izlaza sekundara je izvršen prema normi HRN.M.E2.253, a proračun izreza prema normi HRN.M.E2.256 [10].

Parametri proračuna:

- materijal: P265GH
- proračunski tlak  $p = 4 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa}$
- ispitni tlak:  $p' = 8 \text{ bar} = 800000 \text{ Pa}$
- dodatak za dopušteno odstupanje materijala:  $c_1 = 0,3 \text{ mm}$
- dodatak na koroziju i trošenje:  $c_2 = 1 \text{ mm}$
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 211,9 \text{ mm}$
- vanjski promjer plašta:  $D_v = 219,1 \text{ mm}$
- izvedena debljina stijenke:  $s_e = 3,6 \text{ mm}$
- koeficijent valjanosti zavarenog spoja:  $v = 0,85$
- vanjski promjer cijevi:  $d_v = 88,9 \text{ mm}$
- unutarnji promjer cijevi:  $d_u = 82,5 \text{ mm}$
- potrebna debljina stijenke cijevnog priključka:  $s_s = 3,2 \text{ mm}$

Proračunska čvrstoća za radno i ispitno stanje:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/150}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-1)$$

$$f_d = \min\left(\frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(148,67; 170,83) = 148,67 \text{ MPa}$$

$$f_d' = \min\left(\frac{R_{p0,2/20}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-2)$$

$$f_d' = \min\left(\frac{265}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(176,67; 170,83) = 170,83 \text{ MPa}$$

Uvjet za proračun po normi HRN.M.E2.253 [10] glasi:

$$\frac{D_v}{D_u} \leq 1,2 \quad (6-3)$$

$$\frac{219,1}{211,9} = 1,034 \leq 1,2$$

Potrebna debljina stijenke pri radnom i ispitnom stanju iznose:

$$s = \frac{D_v \cdot p}{20 \cdot f_d \cdot v + p} + c_1 + c_2 \quad (6-4)$$

$$s = \frac{219,1 \cdot 4}{20 \cdot 148,67 \cdot 0,85 + 4} + 0,3 + 1 = 1,646 \text{ mm}$$

$$s' = \frac{D_v \cdot p'}{20 \cdot f_d' \cdot v + p'} + c_1 + c_2 \quad (6-5)$$

$$s' = \frac{219,1 \cdot 8}{20 \cdot 170,83 \cdot 0,85 + 8} + 0,3 + 1 = 1,902 \text{ mm}$$

Uvjet za proračun po normi HRN.M.E2.256 glasi:

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_v} \leq 0,1 \quad (6-6)$$

$$0,002 \leq \frac{3,6 - 0,3 - 1}{219,1} = 0,00294 \leq 0,1$$

čime je taj uvjet zadovoljen.

Parametri za očitavanje koeficijenta  $v_A$  iz [10] glase:

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_e - c_1 - c_2} = \frac{3,2 - 0,3 - 1}{3,6 - 0,3 - 1} = 0,82609 \quad (6-7)$$

$$\frac{d_v}{\sqrt{(D_u + s_e - c_1 - c_2)(s_e - c_1 - c_2)}} = \quad (6-8)$$

$$\frac{114,3}{\sqrt{(211,9 + 3,6 - 0,3 - 1) \cdot (3,6 - 0,3 - 1)}} = 1,67822$$

Približnim očitavanjem iz dijagrama iz [10]  $v_A = 0,47$ . Nakon toga se ponovno proračunava potrebna debljina stijenke pri radnom i ispitnom stanju:

$$s = \frac{D_v \cdot p}{20 \cdot f_d \cdot v_A + p} + c_1 + c_2 \quad (6-9)$$

$$s = \frac{219,1 \cdot 4}{20 \cdot 148,67 \cdot 0,47 + 4} + 0,3 + 1 = 2,004 \text{ mm}$$

$$s' = \frac{D_v \cdot p'}{20 \cdot f_d' \cdot v_A + p'} + c_1 + c_2 \quad (6-10)$$

$$s' = \frac{219,1 \cdot 8}{20 \cdot 170,83 \cdot 0,47 + 8} + 0,3 + 1 = 2,536 \text{ mm}$$

Izvedena debljina plašata  $s_e = 3,6 \text{ mm}$  zadovoljava.

## 6.2. Ravna podnica

Proračun ravne podnice je izvršen prema normi HRN.M.E2.259 [10].

Parametri proračuna:

- materijal: P265GH
- proračunski tlak  $p = 4 \text{ bar} = 300000 \text{ Pa}$
- ispitni tlak:  $p' = 8 \text{ bar} = 600000 \text{ Pa}$
- proračunski promjer:  $D_{cu} = 211,9 \text{ mm}$

Proračunska čvrstoća za radno i ispitno stanje:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/150}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-11)$$

$$f_d = \min\left(\frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(148,67; 170,83) = 148,67 \text{ MPa}$$

$$f_d' = \min\left(\frac{R_{p0,2/20}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-12)$$

$$f_d' = \min\left(\frac{265}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(176,67; 170,83) = 170,83 \text{ MPa}$$

Potrebna debljina stijenke pri radnom i ispitnom stanju iznose:

$$s = 0,4 \cdot D_{cu} \sqrt{\frac{p}{10 \cdot f_d}} \quad (6-13)$$

$$s = 0,4 \cdot 211,9 \sqrt{\frac{3}{10 \cdot 148,67}} = 4,4 \text{ mm}$$

$$s' = 0,4 \cdot d_2 \sqrt{\frac{p'}{10 \cdot f_{d'}}} \quad (6-14)$$

$$s' = 0,4 \cdot 211,9 \sqrt{\frac{6}{10 \cdot 170,83}} = 5,7 \text{ mm}$$

Izvedena debljina ravne podnice  $s_e = 10 \text{ mm}$  zadovoljava.

### 6.3. Prirubnički spoj

Odabir brtvi i prirubnica iz [11]:

#### Slijepa prirubnica:

- vanjski promjer prirubnice:  $D_{vp} = 320 \text{ mm}$
- visina prirubnice:  $b = 20 \text{ mm}$
- promjer središta vijaka:  $d_t = 280 \text{ mm}$
- broj vijaka:  $N_v = 8 \times M16$
- rupa za vijke:  $d_r = 18 \text{ mm}$

#### Prirubnica za navarivanje:

- vanjski promjer prirubnice:  $D_{vp} = 320 \text{ mm}$
- unutarnji promjer prirubnice:  $D_{up} = 219,1 \text{ mm}$
- visina prirubnice:  $b = 22 \text{ mm}$
- promjer središta vijaka:  $d_t = 280 \text{ mm}$
- rupa za vijke:  $d_r = 18 \text{ mm}$
- broj vijaka:  $N_v = 8 \times M16$

#### Brtva:

- materijal: klingerit
- vanjski promjer brtve:  $d_{Du} = 262 \text{ mm}$
- unutarnji promjer brtve:  $d_{Du} = 220 \text{ mm}$
- korisna širina brtve:  $b_D = 21 \text{ mm}$
- srednji promjer brtve:  $d_D = 241 \text{ mm}$
- visina brtve:  $h_D = 5 \text{ mm}$ .

**Proračun cijevne stijene.**

Proračun cijevne stijene je izvršen prema normi HRN.M.E2.259 [10].

Parametri proračuna:

- materijal: P265GH
- proračunski tlak  $p = 4 \text{ bar} = 300000 \text{ Pa}$
- ispitni tlak:  $p' = 8 \text{ bar} = 600000 \text{ Pa}$
- vanjski promjer cijevi:  $d_{cv} = 20 \text{ mm}$
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 16 \text{ mm}$
- unutarnji promjer plašta:  $D_u = 211,9 \text{ mm}$
- korak rasporeda cijevi:  $t = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$ .

Proračunska čvrstoća za radno i ispitno stanje:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/150}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-15)$$

$$f_d = \min\left(\frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(148,67; 170,83) = 148,67 \text{ MPa}$$

$$f_d' = \min\left(\frac{R_{p0,2/20}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (6-16)$$

$$f_d' = \min\left(\frac{265}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right) = \min(176,67; 170,83) = 170,83 \text{ MPa}$$

Proračunski koeficijent za dodatni protusmjerni rubni moment jednak je  $C_1 = 0,35$  prema [10].

Potrebna debljina stijenske za radno i ispitno stanje iznosi:

$$s = C_1 \cdot d_d \sqrt{\frac{p}{10 \cdot f_d}} \quad (6-17)$$

$$s = 0,35 \cdot 241 \sqrt{\frac{4}{10 \cdot 148,67}} = 4,38 \text{ mm}$$

$$s' = C_4 \cdot D_u \sqrt{\frac{p'}{10 \cdot f_d' \cdot \nu}} \quad (6-18)$$

$$s' = 0,35 \cdot 241 \sqrt{\frac{8}{10 \cdot 170,83}} = 5,77 \text{ mm}$$

Izvedena debljina cijevne stijene  $s_e = 20 \text{ mm}$  zadovoljava.

### Proračun vijaka.

Proračun vijčanog spoja s brtvom unutar kruga rupa odrađen je prema normi HRN.M.E2.257 [10].

Parametri proračuna:

- proračunski tlak:  $p = 4 \text{ bar} = 300000 \text{ Pa}$
- ispitni tlak:  $p' = 8 \text{ bar} = 600000 \text{ Pa}$
- sigurnost u vijku:  $S_D = 1,2$ ,
- koeficijent brtve za radno stanje:  $k_1 = 27,3 \text{ mm}$ ,
- parametar brtve:  $k_0 \cdot K_D = 409,88 \text{ N/mm}$ ,
- proračunska čvrstoća vijka:  $K = 400 \text{ N/mm}^2$ ,
- pomoćne vrijednosti:  $\varphi = 1$ ,  $Z = 1,51$ ,  $Z' = 1,29$ ,  $c_5 = 3 \text{ mm}$ .

Sile u vijcima za radno stanje:

- sila uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB} = \frac{p \cdot \pi \cdot D_{up}^2}{40} \quad (6-19)$$

$$F_{RB} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 219,1^2}{40} = 15081,2 \text{ N}$$

- sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

$$F_{FB} = \frac{p \cdot \pi \cdot (d_D^2 - D_{up}^2)}{40} \quad (6-20)$$

$$F_{FB} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (241^2 - 219,1^2)}{40} = 3165,5 \text{ N}$$

- sila u brtvi:

$$F_{DB} = \frac{p}{10} \cdot \pi \cdot d_D \cdot S_D \cdot k_1 \quad (6-21)$$

$$F_{DB} = \frac{4}{10} \cdot \pi \cdot 241 \cdot 1,2 \cdot 27,3 = 9921,4 \text{ N} ,$$

- najmanja sila u vijcima:

$$F_{SB} = F_{RB} + F_{FB} + F_{DB} \quad (6-22)$$

$$F_{SB} = 15081,2 + 3165,5 + 9921,4 = 28167,9 \text{ N} .$$

- promjer jezgre vijka:

$$d_k = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB}}{K \cdot N_v}} + c_5 \quad (6-23)$$

$$d_k = 1,51 \cdot \sqrt{\frac{28167,9}{400 \cdot 8}} + 3 = 7,48 \text{ mm} .$$

Sile u vijcima za ispitno stanje:

- sila uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB} = \frac{p' \cdot \pi \cdot D_{up}^2}{40} \quad (6-24)$$

$$F_{RB} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 219,1^2}{40} = 30162,4 \text{ N} ,$$

- sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

$$F_{FB} = \frac{p' \cdot \pi \cdot (d_D^2 - D_{up}^2)}{40} \quad (6-25)$$

$$F_{FB} = \frac{8 \cdot \pi \cdot (241^2 - 219,1^2)}{40} = 6331 \text{ N} ,$$

- sila u brtvi:

$$F_{DB} = \frac{p'}{10} \cdot \pi \cdot d_D \cdot S_D \cdot k_1 \quad (6-26)$$

$$F_{DB} = \frac{8}{10} \cdot \pi \cdot 241 \cdot 1,2 \cdot 27,3 = 19842,8 \text{ N} ,$$

- najmanja sila u vijcima:

$$F_{SB} = F_{RB} + F_{FB} + F_{DB} \quad (6-27)$$

$$F_{SB} = 30162,4 + 6331 + 19842,8 = 56336,2 \text{ N} .$$

- promjer jezgre vijka:

$$d_k = Z' \cdot \sqrt{\frac{F_{SB}}{K \cdot N_v}} \quad (6-28)$$

$$d_k = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{56336,2}{400 \cdot 8}} = 5,41 \text{ mm} .$$

Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje:

$$F_{DV} = \pi \cdot d_D \cdot k_0 K_D , \quad (6-29)$$

$$F_{DV} = \pi \cdot 241 \cdot 409,88 = 310329,9 \text{ N} .$$

Kako je sila u vijcima za ugradbeno stanje veća od ispitnog, tada se vrijednost korigira:

$$F_{DV} = 0,2 \cdot F_{DV} + 0,8 \cdot \sqrt{F_{SB} \cdot F_{DV}} , \quad (6-30)$$

$$F_{DV} = 0,2 \cdot 310329,9 + 0,8 \cdot \sqrt{56336,2 \cdot 310329,9} = 167844 \text{ N} ,$$

- promjer jezgre vijka:

$$d_k = Z' \cdot \sqrt{\frac{F_{DV}}{K \cdot N_v}} \quad (6-31)$$

$$d_k = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{167844}{400 \cdot 8}} = 9,34 \text{ mm} .$$

Vijci M16 zadovoljavaju proračun.



**Proračun prirubnice za navarivanje.**

Proračun vijčanog spoja s brtvom unutar kruga rupa odrađen je prema normi HRN.M.E2.257 [10].

Parametri proračuna:

- umanjeni promjer za vijke:  $d_t' = 13,5 \text{ mm}$  [10] ,
- debljina stijenke cijevi:  $s_c = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$  ,
- unutarnji promjer cijevi:  $d_{cu} = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$  ,
- toplinska provodnost cijevi:  $\lambda_c = 372 \text{ W/(mK)}$  ,
- površina poprečnog presjeka cijevi:  $A_{cu} = 0,0002011$

Korisna dvostruka širina prirubnice:

$$b = D_{vp} - D_{up} - d_t' , \quad (6-32)$$

$$b = 320 - 219,1 - 13,5 = 87,4 \text{ mm} .$$

Pomoćna vrijednost:

$$Z = (D_u + s_e) \cdot s_e^2 , \quad (6-33)$$

$$Z = (211,9 + 3,6) \cdot 3,6^2 = 2792,88 \text{ mm}^3 .$$

Krak sile u vijku za radno/ispitno te ugradno stanje:

$$a = \frac{d_t - D_u - s_e}{2} , \quad (6-34)$$

$$a = \frac{280 - 211,9 - 3,6}{2} = 32,25 \text{ mm} ,$$

$$a_D = \frac{d_t - d_D}{2} , \quad (6-35)$$

$$a_D = \frac{280 - 241}{2} = 19,5 \text{ mm} .$$

Moment otpora za radno i ugradno stanje:

$$W = \frac{F_{SB} \cdot a}{f} , \quad (6-36)$$

$$W = \frac{28167,9 \cdot 32,25}{148,67} = 6110,28 \text{ mm}^3 ,$$

$$W' = \frac{F_{DV} \cdot a}{f'}, \quad (6-37)$$

$$W' = \frac{167844 \cdot 19,5}{176,67} = 18525,82 \text{ mm}^3 .$$

Visina oboda prirubnice:

$$h_F = \sqrt{1,42 \cdot \frac{W - Z}{b}}, \quad (6-38)$$

$$h_F = \sqrt{1,42 \cdot \frac{18525,82 - 2792,88}{87,4}} = 15,99 \text{ mm}.$$

Visina oboda odabranih prirubnica je veći proračunske pa se zaključuje da čitav prirubnički spoj zadovoljava.

## 7. ZAKLJUČAK

Kontinuirane destilacija i rektifikacija su energetske jedne od najintenzivnijih procesa u tehnici što je i pokazano u ovom radu. Kako bi se razdvojila mala količina destilata, potrebna je velika količina ogrjevnog medija i time topline, gdje je najveći njezin potrošač jednostavna destilacija, ali se potrošnja smanjuje što se uvodi više dodirnih površina između pare destilata i refluksa. Osim energetskih kriterija, bilo je potrebno ispuniti još kriterij konačne koncentracije proizvoda što mogu samo kolona za jačanje i spojena kolona pa su one jedine dolazile u obzir kod izbora konačnog procesa.

Nakon što je odabran način vođenja procesa, pristupilo se energetske optimizaciji gdje se vidjelo da sa razumnim korištenjem toplinskih tokova može značajno uštedjeti na energentima.

Kada su određeni parametri procesa, pristupilo se konstruiranju kolone i svih izmjenjivača topline u procesu. U spojenoj koloni su proračunate plitice za kolonu za iscrpljivanje i kolonu za jačanje gdje se vidjelo da su plitice kolone za iscrpljivanje najviše opterećene pa se prema njima konstruirao i ostatak kolone. Prilikom konstruiranja izmjenjivača topline pazilo se da dimenzije budu u razumnim omjerima i uzimalo se što više standardnih dijelova kako bi se pojednostavnila konstrukcija.

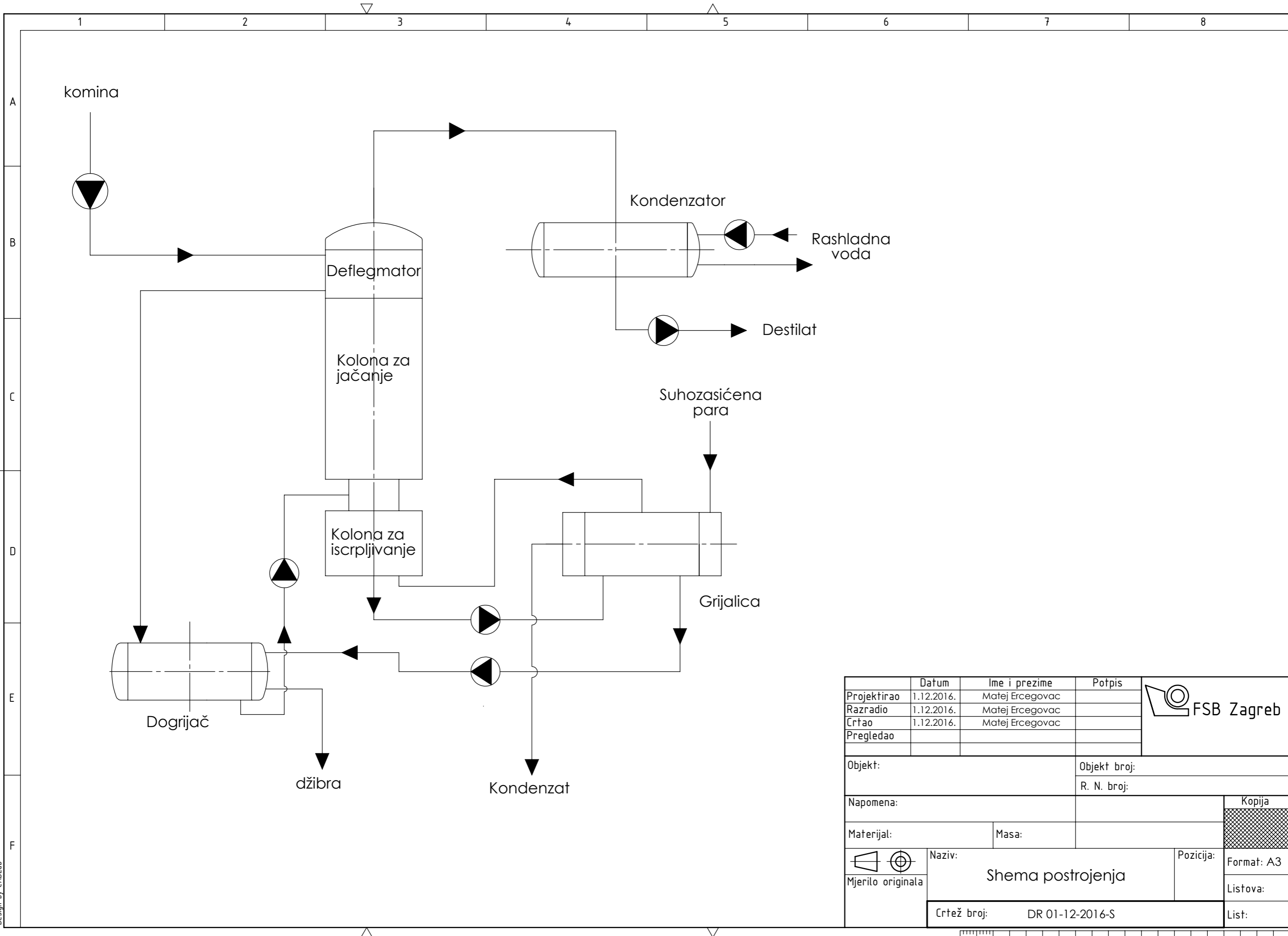
## LITERATURA

- [1] F. Bošnjaković: *Nauka o toplini III. dio*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [2] A. Galović: *Termodinamika II*, FSB, Zagreb, 2010.
- [3] A. Galović: *Termodinamika I*, FSB, Zagreb, 2010.
- [4] B. Halasz, A. Galović, I. Boras: FSB, Zagreb, 2008.
- [5] M. Andrassy: Podloge za predavanja iz kolegija Toplinske operacije
- [6] VDI Heat Atlas: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [7] E. Beer: Destilacija, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 2006.
- [8] S. Kakac: Boilers, evaporators and condensers, John Wiley and Sons, Inc., 1991.
- [9] Krautov strojarški priručnik, Sajema, d.o.o., Zagreb, 2009.
- [10] I. Boras, S. Švaić: Podloge za predavanja iz kolegija Gradnja aparata
- [11] IPIM: Tehnički priručnik za procesnu industriju, IPIM, Zagreb, 1993.

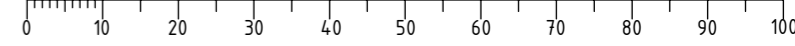
## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

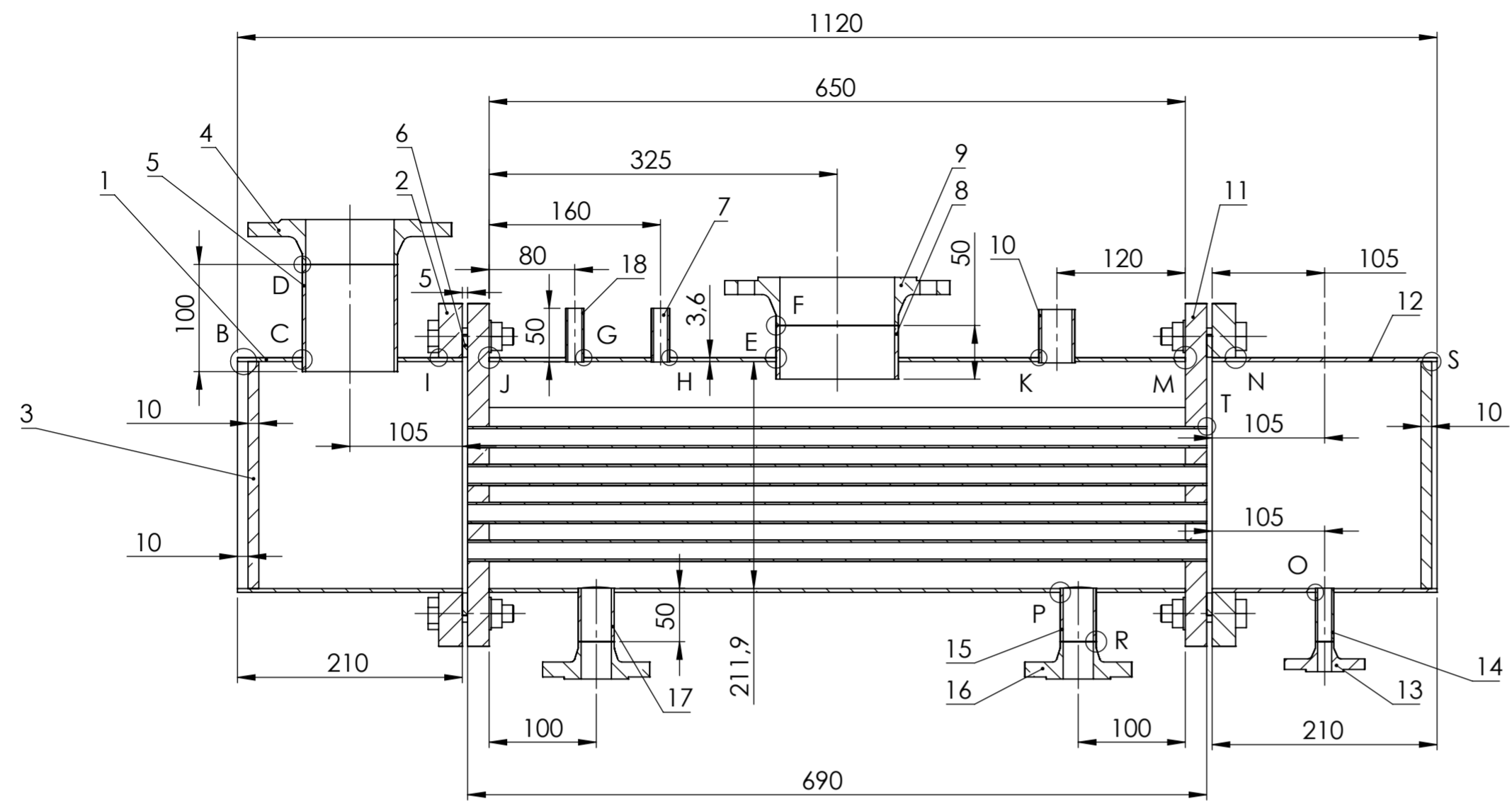




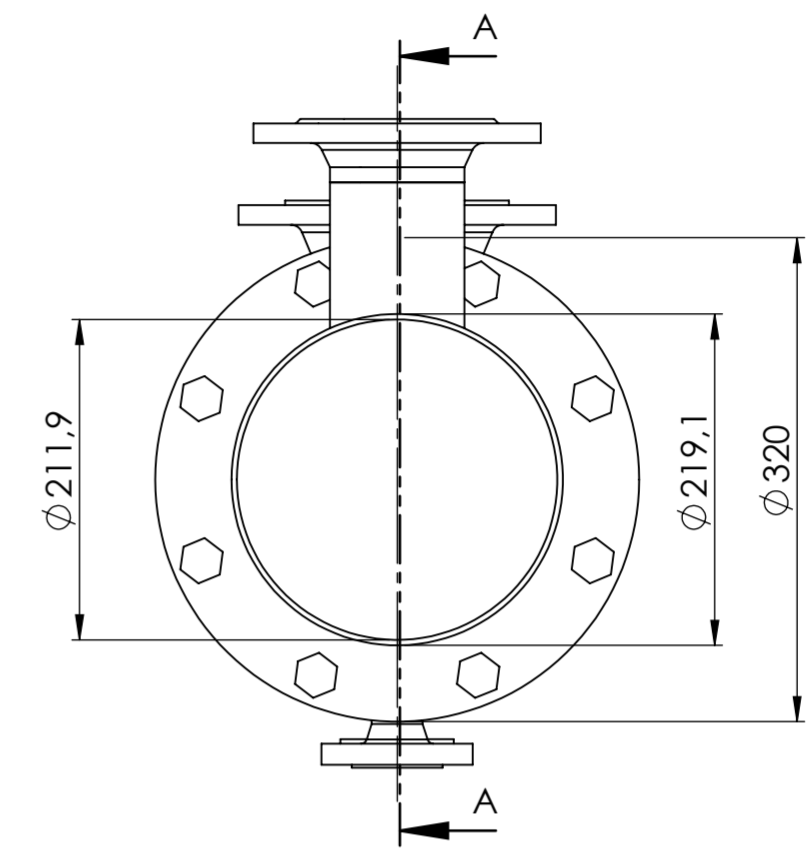
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	1.12.2016.	Matej Ercegovac		
Razradio	1.12.2016.	Matej Ercegovac		
Crtao	1.12.2016.	Matej Ercegovac		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:		
Naziv:			Pozicija:	
Mjerilo originala			<b>Shema postrojenja</b>	
Crtež broj:			List:	
DR 01-12-2016-S				



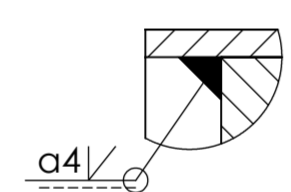
Design by CADLab



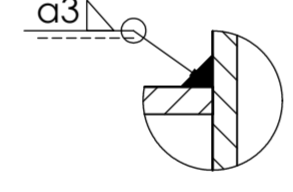
PRESJEK A-A



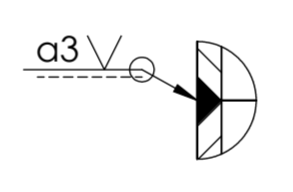
DETALJ B  
MJERILO 1:1



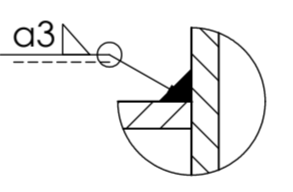
DETALJ C  
MJERILO 1:1



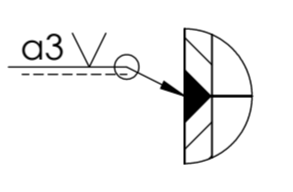
DETALJ D  
MJERILO 1:1



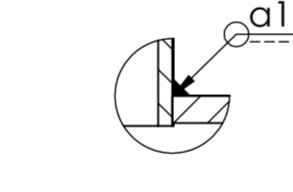
DETALJ E  
MJERILO 1:1



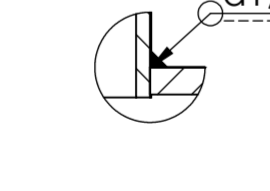
DETALJ F  
MJERILO 1:1



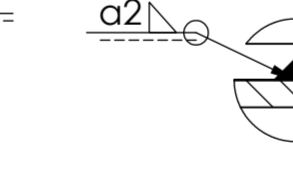
DETALJ G  
MJERILO 1:1



DETALJ H  
MJERILO 1:1



DETALJ I  
MJERILO 1:1



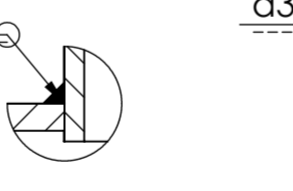
DETALJ J  
MJERILO 1:1



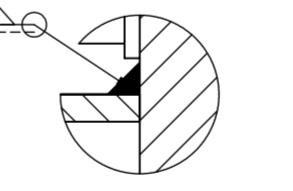
DETALJ K  
MJERILO 1:1



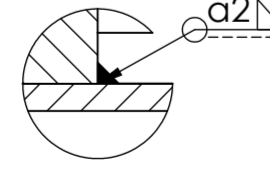
DETALJ L  
MJERILO 1:1



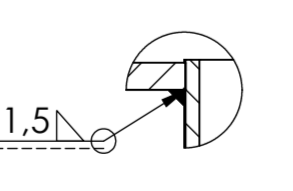
DETALJ M  
MJERILO 1:1



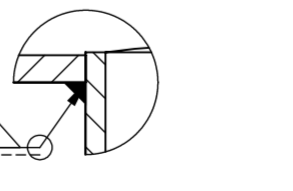
DETALJ N  
MJERILO 1:1



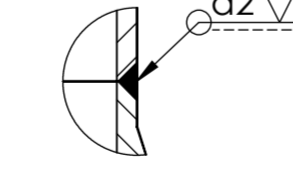
DETALJ O  
MJERILO 1:1



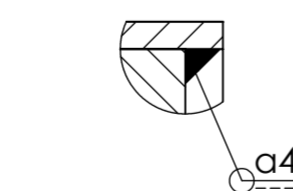
DETALJ P  
MJERILO 1:1



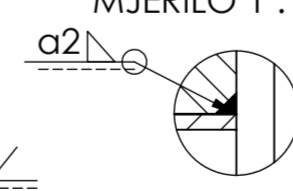
DETALJ R  
MJERILO 1:1



DETALJ S  
MJERILO 1:1

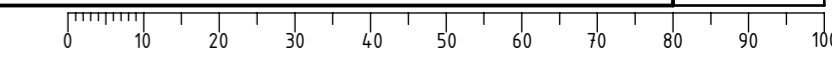


DETALJ T  
MJERILO 1:1

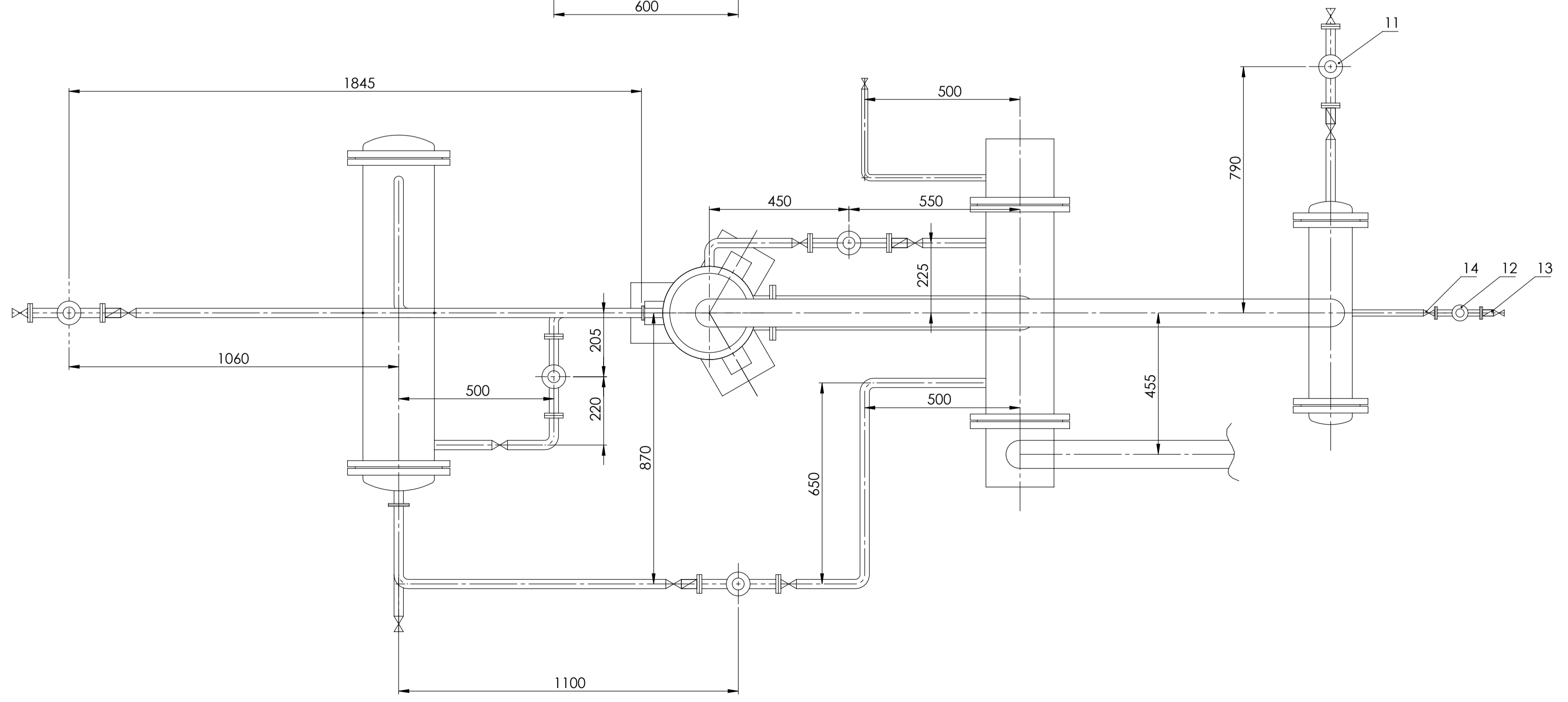
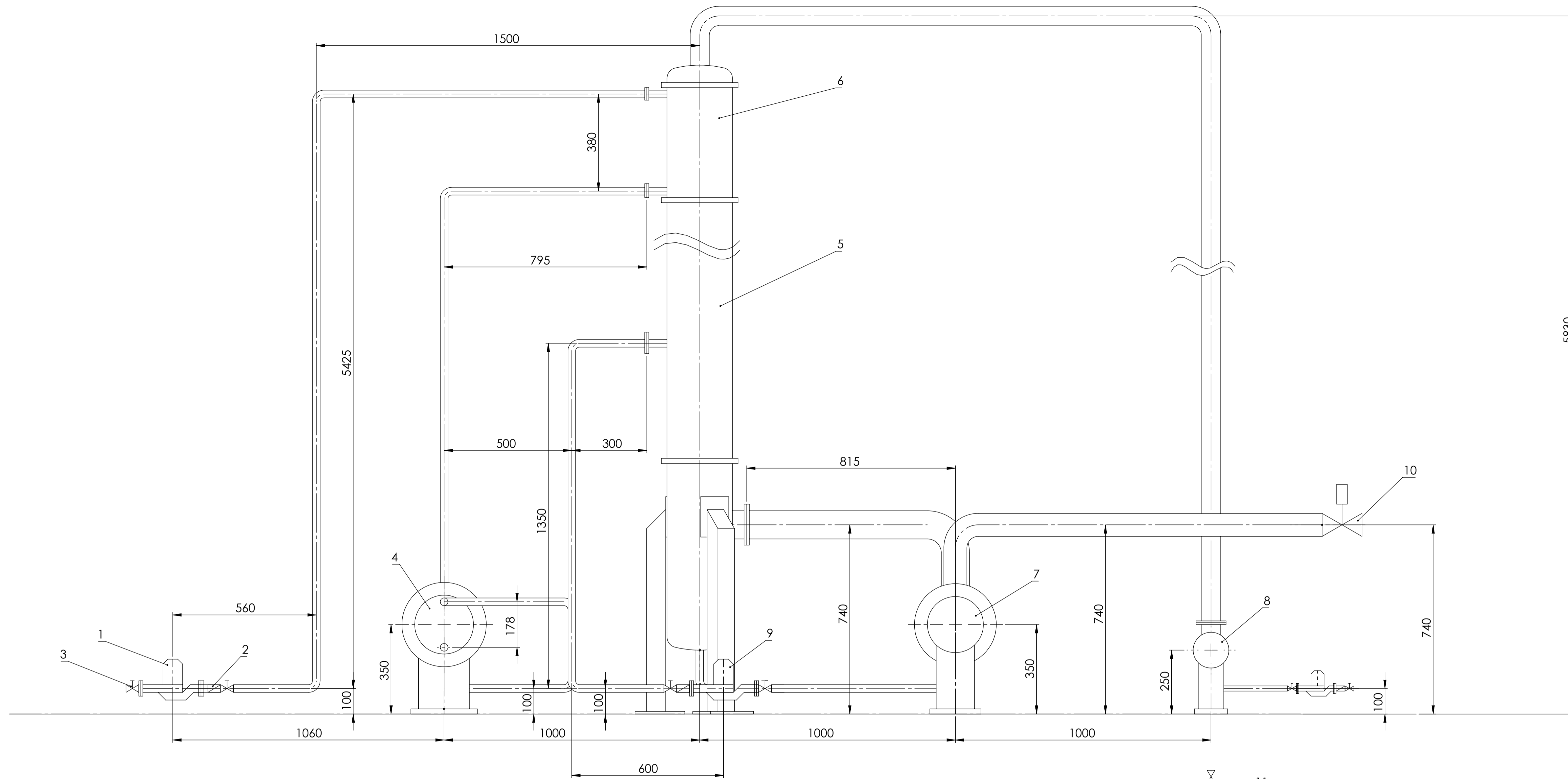


18	Priključak manometra	1				
17	Ulaz džibre	1				
16	Prirubnica za navarivanje DN25	2				
15	Izlaz džibre	1				
14	Cijev DN10	1				
13	Prirubnica za navarivanje DN10	1				
12	Plasť izlaza kondenzata	1				
11	Cijevna stijena	1				
10	Priključak sigurnosnog ventila	1				
9	Prirubnica za navarivanje DN100	1				
8	Cijev DN100	1				
7	Priključak termometra	1				
6	Brтва	1				
5	Cijev DN80	1				
4	Prirubnica za navarivanje DN80	1				
3	Ravna podnica	1				
2	Prirubnica za navarivanje DN200	1				
1	Plasť ulaza pare	1				

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
	Projektirao	1.12.2016.	Matej Ercegovac			
	Razradio	1.12.2016.	Matej Ercegovac			
	Crtao	1.12.2016.	Matej Ercegovac			
	Pregledao					
	Mentor					
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
				R. N. broj:		
Napomena:		Smjer:		Procesno-energetski		Kopija
Materijal:		Masa:		DIPLOMSKI RAD		
Mjerilo originala		Naziv:		GRIJALICA		Format: A2
		Crtež broj: DR 01-12-2016-G				Listova: 2
						List: 1







19	Cijev DN 100	1				
18	Cijev DN80	1				
17	Cijev DN65	1				
16	Cijev DN25	6				
15	Cijev DN10	2				
14	Ventil DN10	3				
13	Protupovratni ventil DN10	1				
12	Pumpa za desfilat	1				
11	Pumpa za rashladnu vodu	1				
10	Motorni ventil	1				
9	Pumpa za džibru	2				
8	Kondenzator	1				
7	Crijalica	1				
6	Deflegmator	1				
5	Spojena kolona	1				
4	Dogrijač	1				
3	Ventil DN25	9				
2	Protupovratni ventil DN25	2				
1	Pumpa za kominu	2				

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis
Projektirao		1.12.2016.	Matej Ercegovac			
Razradio		1.12.2016.	Matej Ercegovac			
Crtao		1.12.2016.	Matej Ercegovac			
Pregledao						
Mentor						
ISO - tolerancije			Objekt broj:		R. N. broj:	
Objekt:			Objekt broj:		Kopija	
Napomena:			Smjer:		Procesno-energetski	
Materijal:			Masa:		DIPLOMSKI RAD	
Mjerilo originala			Naziv:		Forma: A1	
			Dispozicijski nacrt uredaja		Listova: 2	
			Crtež broj: DR 01-12-2016-D		List: 2	