Azeotropna destilacija s promjenom tlaka

Zeljko, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:171019

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petar Zeljko

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing. Petar Zeljko

Zagreb, 2021.

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

Hvala Bogu !

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci tokom cijelog studija.

Posebno se zahvaljujem doc. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju na mentorstvu tijekom izrade ovog rada, uloženom vremenu, trudu i strpljenju te svakom upućenom savjetu.

Petar Zeljko

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Zeljko** Mat. br.: 0035209885

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Azeotropna destilacija s promjenom tlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Pressure swing azeotropic distillation**

Opis zadatka:

Smjese tvari, kod kojih postoji azeotropna točka, ne mogu se razdvojiti na čiste tvari u jednostavnoj destilacijskoj koloni. Jedan od načina kojim se kod takvih smjesa postižu veći stupnjevi razdvajanja (tzv. azeotropna destilacija) je destilacija u više kolona pri različitim tlakovima.

Ako u postrojenje ulazi 10000 kg/h smjese etanol-voda temperature 25 °C, masenog udjela etanola 15 %, a na raspolaganju stoji suhozasićena vodena para tlaka 6 bar i rashladna voda temperature 15 °C, u okviru ovog rada potrebno je:

- dati pregled različitih načina azeotropne destilacije smjese etanol-voda,
- nacrtati dijagram toka odabranog tipa postrojenja za kontinuiranu azeotropnu destilaciju smjese etanol-voda,
- za odabrani tip postrojenja i različite tlakove u kolonama, analizirati procese u kojima se postiže minimalni stupanj razdvajanja zadane smjese 98 %, s obzirom na:
  - potrošnju rashladnog i ogrjevnog medija
  - okvirne dimenzije kolona, koristeći jedan od dostupnih empirijskih izraza za izračun stupnja efikasnosti kolona.

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. TEORIJSKE OSNOVE 2
2.1. Dvojne smjese 2
2.2. Rektifikacija 3
2.3. Spojena kolona 3
2.4. Određivanje teorijskog broja plitica prema McCabeu i Thielu 5
2.5. Određivanje minimalnog refluksa 8
3. MOGUĆI OBLICI AZEOTROPNE DESTILACIJE 9
3.1. Dodavanje treće komponente 9
3.2. Adsorpcija 10
3.3. Promjena tlaka 11
4. DESTILACIJA S POMJENOM TLAKA 13
4.1. Kolona pod visokim tlakom 13
4.2. Izvedba postrojenja bez povrata pare 14
4.3. Izvedba postrojenja s povratom pare u prvu kolonu 15
5. ANALIZA UTROŠKA RASHLADNE VODE I OGRJEVNE PARE 21
5.1. Odabir koncentracije konačnog produkta 22
5.2. Analiza sustava kada se koristi potpuna kondenzacija 22
5.3. Analiza sustava kada se koristi djelomična kondenzacija 25
5.4. Usporedba sustava s potpunom i djelomičnom kondenzacijom 29
6. ANALIZA DIMENZIJA KOLONE 31
6.1. Iskoristivost plitica 31
6.2. Visina kolone 32
6.3. Promjer kolone 32
6.4. Okvirne dimenzije 1. kolone (pod atmosferskim tlakom) 33
6.5. Okvirne dimenzije 2. kolone 37
6.6. Spojene kolone 42
7. KOLONA S PUNILIMA 44
8. ZAKLJUČAK 45
LITERATURA 46

POPIS SLIKA

Slika 1. ϑ-ξ dijagram za: a) isparavanje smjese [2], b) azeotropna smjesa [2] 3
Slika 2. Spojena kolona kolona [3] 4
Slika 3. Pravac jačanja i iscrpljivanja u McCabe-Thiel-ovom dijagramu (adaptirano iz[3])6
Slika 4. Pravci napajanja (adaptirano iz [3]) 7
Slika 5. Određivanje broja plitica u McCabe-Thiel-ovom dijagramu [3] 8
Slika 6. Određivanje minimalnog refluksa 8
Slika 7. Azeotropna destilacija s dodatkom treće komponente (adaptirano iz [4] i [5]) 10
Slika 8. Adsorpcija etanola iz azeotropske smjese [6] 11
Slika 9. Ravnotežne linije za razne tlakove 12
Slika 10. Određivanje broja plitica na sastavima većim od azeotropnog 13
Slika 11. Shema postrojenja s dva produkta 14
Slika 12. Shema postrojenja za azeotropsku destilaciju s promjenom tlaka 15
Slika 13. Vrh kolone uključujući napajanje 16
Slika 14. McCabe-Thielov dijagram za sa dva napajanja 17
Slika 15. Potpuna kondenzacija i parcijalna kondenzacija 18
Slika 16. Dijagram toka destilacije s promjenom tlaka 21
Slika 17. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za potpunu kondenzaciju 25
Slika 18. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za djelomičnu kondenzaciju 27
Slika 19. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za djelomičnu kondenzaciju s promjenom tlaka 27
Slika 20. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za razne $\Delta\vartheta_{RV}$ 29
Slika 21. McCabe-Thielov dijagram za potpunu kondenzaciju 33
Slika 22. Promjena D i H s razlikom ξ_g-ξ_d 35
Slika 23. McCabe-Thielov dijagram za nepotpunu kondenzaciju 35
Slika 24. Promjena D i H s razlikom ξ_g-ξ_d i Promjena D i H s razlikom tlakom 37
Slika 25. McCabe-Thielov dijagram kolone pod visokim tlakom za potpunu kondenzaciju 38
Slika 26. Promjena D i H s razlikom ξ_g-ξ_d za kolonu pod visokim tlakom s potpunom kondenzacijom. 39
Slika 27. McCabe-Thielov dijagram kolone pod visokim tlakom za nepotpunu kondenzaciju. 40
Slika 28. Promjena D i H s razlikom ξ_g-ξ_d za kolonu pod visokim tlakom s nepotpunom kondenzacijom i promjena D i H s promjenom tlaka 42
Slika 29. McCabe-Thielov dijagram obiju kolona sa potpunom kondenzacijom i McCabe-Thielov dijagram obiju kolona sa nepotpunom kondenzacijom 43
Slika 30. Razna nestrukturirana punila [12] 44
Slika 31. Razna strukturirana punila [13] 44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Učini i protoci kada se koristi potpuna kondenzacija 24
Tablica 2. Učini i protoci kada se koriste deflegmatori 26
Tablica 3. Učini i protoci kada se povećava $\Delta\vartheta_{RV}$ 28
Tablica 4. Usporedba djelomične i potpune kondenzacije 30
Tablica 5. Iskoristivost kolona za različite tlakove 32
Tablica 6. Okvirne dimenzije kolone za potpunu kondenzaciju 34
Tablica 7. Okvirne dimenzije kolone kod nepotpune kondenzacije 36
Tablica 8. Okvirne dimenzije kolona pod visokim tlakom za potpunu kondenzaciju 39
Tablica 9. Okvirne dimenzije kolona pod visokim tlakom za nepotpunu kondenzaciju 41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	m	Promjer kolone
H	m	Visina kolone
$HETP$	m	Visina punila
H_i	kJ	Entalpija
h_i	kJ/kg	Specifična entalpija
i	-	Broj iteracija
m_i	kg	Masa
M_i	g/kg	Molarna masa
n_i	-	Broj plitica
n_i	kmol	Množina tvari
p_i	bar	Tlak
q	kg/kg	Omjer protoka kapljevine u koloni i komine
q_{mi}	kg/h	Maseni protok
q_{ni}	kmol/h	Molarni protok
Q_v	m^3/h	Volumni protok
R_i	kmol/kmol	Refluks
R_{ikg}	kg/kg	Maseni refluks
T_i	K	Temperatura
α	-	Relativna hlapivost
α_s	-	Srednja relativna hlapivost
δ	kg/kg	Omjer protoka pare u koloni i destilata ili džibre
ΔH_{mdi}	kJ/kmol	Specifična molna toplina isparivanja
$\Delta\vartheta_{RV}$	°C	Promjena temperature rashladne vode
η	-	Iskoristivost plitica
ϑ_i	°C	Temperatura

μ	mPas	Dinamička viskoznost
ξ_i	kg/kg	Maseni udio etanola u smjesi
ρ_i	kg/m^3	Gustoća smjese
φ	kg/kg	Omjer protoka kapljevine u koloni i destilata ili džibre
Φ_i	kW	Izmjenjeni toplinski tok; dovedeni ili odvedeni
ψ_i	kmol/kmol	Molni udio etanola u smjesi

SAŽETAK

U sklopu završnog rada dan je pregled mogućih azeotropnih destilacija smjese etanola vode. Dana je shema azeotropne destilacije s promjenom tlaka. Za odabrani tip postrojenja analizirana je potrošnja ogrjevnog i rashladnog medija za različite tlakove u kolonama. Drugi dio analize obuhvaća okvirne dimenzije kolona. Na kraju je dan kratak uvid u punila koja se koriste u destilaciji.

Ključne riječi: azeotropna destilacija, shema postrojenja, tlakovi, punila

SUMMARY

As part of the final thesis, an overview of possible azeotropic distillations of the ethanol and water mixture is given. A scheme of azeotropic distillation with pressure change is given. For the selected type of plant, the consumption of heating and cooling medium for different pressures in the columns is analyzed. The second part of the analysis covers the approximate dimensions of the columns. At the end, a brief introduction into the packing used in distillation is given.

Keywords: azeotropic distillation, plant scheme, pressures, packing

1. UVOD

Destilacija je proces razdvajanja smjesa poznat još iz doba Aristotela u čijim se zapisima spominje isparavanje morske vode radi dobivanja slatke [1]. Destilacija danas ima izrazito široku primjenu u procesnoj, naftnoj, kemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Također, ima široku primjenu u domaćinstvima za proizvodnju rakije, odnosno tradicionalno rečeno za „pečenje“ rakije. Destilacija se još koristi i u proizvodnji raznoraznih mirisa te proizvodnji kisika i dušika frakcijskom destilacijom zraka.

Također postoji velika potreba za medicinskim alkoholom koji zahtjeva visoke koncentracije etanola u smjesi etanola i vode. Tu dolazi do problema jer se izrazito visoki sastavi ne mogu postići zbog postojanja azeotropnog sastava kojeg nije moguće prijeći klasičnom destilacijom.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Dvojne smjese

Dvojne smjese su mješavine dvije različite tvari (kapljevine). Lakše hlapljiva tvar, odnosno ona s nižim vrelištem nazivat će se tvar 2, dok će tvar s višim vrelištem biti označena kao tvar 1. Kada se definira stanje neke čiste tvari dovoljno je definirati dvije veličine stanja (npr. tlak i temperaturu) da bi ona bila jednoznačno definirana. Međutim kod smjese je nužno definirati sastav odnosno udio koliko je koje tvari. Omjer tvari 2 u ukupnoj masi, odnosno količini smjese izražavat će se preko masenog odnosno molnog udjela tvari 2 u smjesi.

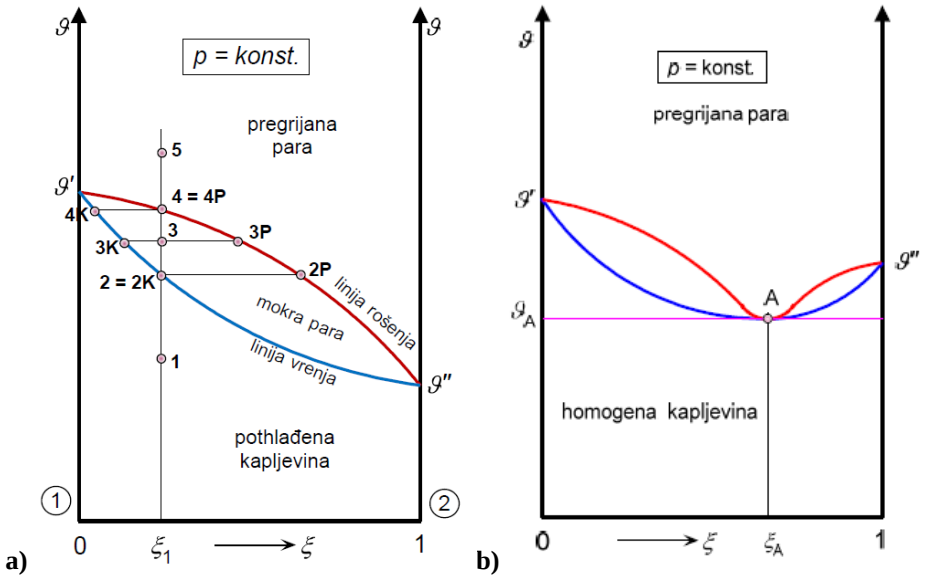
$$\xi = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \tag{2-1}$$

$$\psi = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \tag{2-2}$$

gdje ξ predstavlja maseni, a ψ molni udio lakše hlapljive tvari. m je masa tvari, a n je količina pojedine tvari u smjesi. Izrazi (2-1) i (2-2) se mogu povezati ako se količina prikaže kao $n = m/M$, gdje je M molarna masa pojedine tvari:

$$\psi = \frac{\frac{m_2}{M_2}}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}} = \frac{\xi}{\frac{M_2}{M_1}(1-\xi) + \xi}. \tag{2-3}$$

Jako je bitno naglasiti da se kod većine dvojnih smjesa pri isparavanju mijenja temperatura te sastav kapljevite i parne faze (slika 1. a) što nije bio slučaj kod čistih tvari. To svojstvo se iskorištava kod destilacije jar ako kapljevina daje paru većeg sastava to se može odvoditi kao destilat. Ako kapljevina daje paru manjeg sastava onda džibra daje sastav velike koncentracije tvari 2. Kod smjesa koje imaju azeotropni sastav (slika 1. b) prilikom isparavanja ne mijenja se sastav niti temperatura pare i kapljevine. To je vrlo bitno jer kod destilacije taj sastav se neće moći prijeći klasičnim putem o čemu će biti riječ u idućem poglavlju.



Slika 1. **ϑ-ξ dijagram za: a) isparavanje smjese [2], b) azeotropna smjesa [2]**

2.2. Rektifikacija

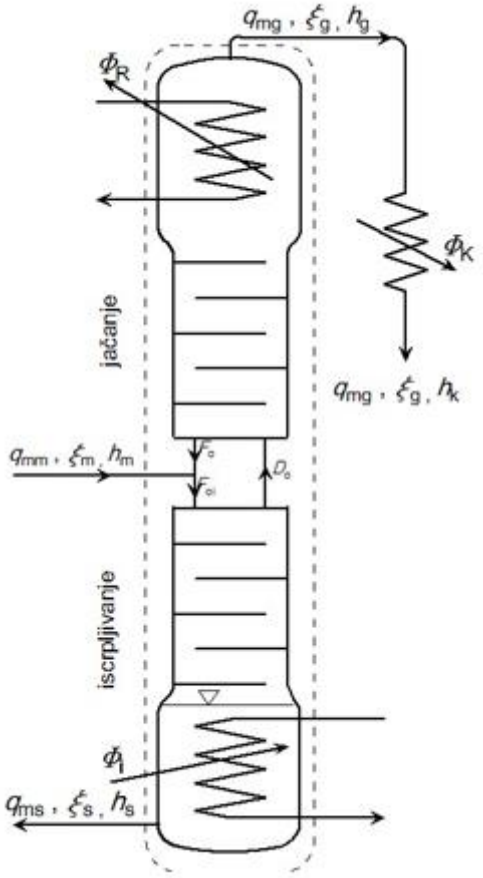
Rektifikacijska kolona je sastavni dio destilacijskih aparata. Kolona se pozicionira između kotlića i deflegmatora (obarala) ili kondenzatora i svrha joj je da omogući što dulji kontakt između kapljevite i parne faze. Tako se produžava vrijeme za izmjenu topline i mase što je nužno za dobro razdvajanje tvari 1 i 2. Konstrukcijski se kolona izvodi kao okomiti cilindar s punilima ili kao kolona s pliticama. Te „prepreke“ omogućuju duži kontakt. Na svakoj plitici ili prolasku kroz raznorazna punila para i kapljevina nastoje postići ravnotežu i tako će se kapljevina osiromašivati, a para obogaćivati s tvari 2. Plitice se koriste kod većih aparata gdje je potrebno često čišćenje jer omogućuju lakše održavanje od punila.

Rektifikacijske kolone (u nastavku samo kolone) mogu biti izvedene kao kolone za jačanje, iscrpljivanje ili spojene kolone. Kod kolona za jačanje nastoji se postići da u destilatu bude što veća koncentracija tvari 2, dok je kod kolone za iscrpljivanje cilj što manja koncentracija tvari 2 u džibri (kapljevini) koja se odvodi iz kotlića. Spojena kolona služi za spajanje ovih dviju kolona u jednu jer se tako u jednoj koloni omogućuje iscrpljivanje džibre i postizanje destilata visoke koncentracije.

2.3. Spojena kolona

S obzirom na to da je promjene stanje u kolonama s punilima jako teško pratiti zbog složenosti geometrije i nemogućnosti postavljanja kontrolnih presjeka način funkcioniranja

kolona (slika 2) će se pratiti pomoću kolona s pliticama jer se promjene stanja mogu najjasniji vidjeti.



Slika 2. Spojena kolona kolona [3]

Ulaz svježe smjese (komine) s protokom q_{mm} je na najvišoj plitici kolone za iscrpljivanje i ispod najniže plitice kolone za jačanje (na slici su kolone prikazane razdvojeno iako u stvarnosti nisu nego su spojene u jednu jedinstvenu kolonu). Komina se na svom ulazu miješa s kapljevinom iz kolone za jačanje te se kapljevina dalje slijevaju kroz kolonu za iscrpljivanje dok para iz kolone za iscrpljivanje prolazi kroz kolonu za jačanje. Iz toga se vidi da se za pogon kolone troši toplina Φ_i koja se dovodi u kotliću iz kojeg se odvodi vrela džibra protoka q_{ms} i stanja ξ_s. Sadržaj kotlića ostaje konstantan jer se kontinuirano slijeva kapljevina iste koncentracije. Na vrhu kolone izlazi para protoka q_{mg} s koncentracijom ξ_g koja se dalje vodi u kondenzator gdje se kondenzira i zatim odvodi iz aparata. Prije izlaska iz kolone para prolazi kroz deflegmator (obaralo) gdje se jednim dijelom kondenzira te se kondenzirani dio vraća u kolonu kao oborina i slijeva niz plitice. Ta oborina se miješa s parom i tu dolazi do izmjene topline i mase odnosno obogaćivanja pare i osiromašivanja kapljevine. Ostatak pare koji nije kondenzirao odvodi se u kondenzator kao destilat.

Masene i energijska bilance postavljene na kolonu glase:

$$q_{\mathrm{mm}} = q_{\mathrm{mg}} + q_{\mathrm{ms}} \tag{2-4}$$

$$q_{\mathrm{mm}}\xi_{\mathrm{m}} = q_{\mathrm{mg}}\xi_{\mathrm{g}} + q_{\mathrm{ms}}\xi_{\mathrm{s}} \tag{2-5}$$

$$q_{\mathrm{mm}}h_{\mathrm{m}} + \phi_{\mathrm{i}} = q_{\mathrm{mg}}h_{g} + q_{\mathrm{ms}}h_{\mathrm{s}} + \phi_{\mathrm{R}} \tag{2-6}$$

Što je veći odvedeni toplinski tok na deflegmatoru to je jači konačni produkt međutim to nužno utječe na toplinu koju je potrebno dovesti u kotliću jer je tada nužno dovesti više topline.

2.4. Određivanje teorijskog broja plitica prema McCabeu i Thielu

Ovaj način određivanja plitica je čest u praksi jer je dovoljno poznavati ravnotežna stanja vrele kapljevine i suho-zasićene parne faze smjese. Najtočniji je kada se radi o smjesama sastavljenim od tvari koje imaju približno istu molarnu toplinu isparavanja $\Delta H_{\mathrm{md1}} \approx \Delta H_{\mathrm{md2}}$ jer su tada linija vrenja i linija rošenja praktički paralelni pravci. S dovoljnom točnošću ova se metoda može koristiti i za smjese koje odstupaju od toga.

Osnovna pretpostavka McCabe-Theileove metode je konstantnost tokova oborine i pare na svim pliticama kolone [3]. Razmatra se kolona koja umjesto deflegmatora (u nastavku djelomičnog kondenzatora) koristi kondenzator pa se vrela ili blago pothlađena kapljevina jednim dijelom odvaja i veća nazad u kolonu.

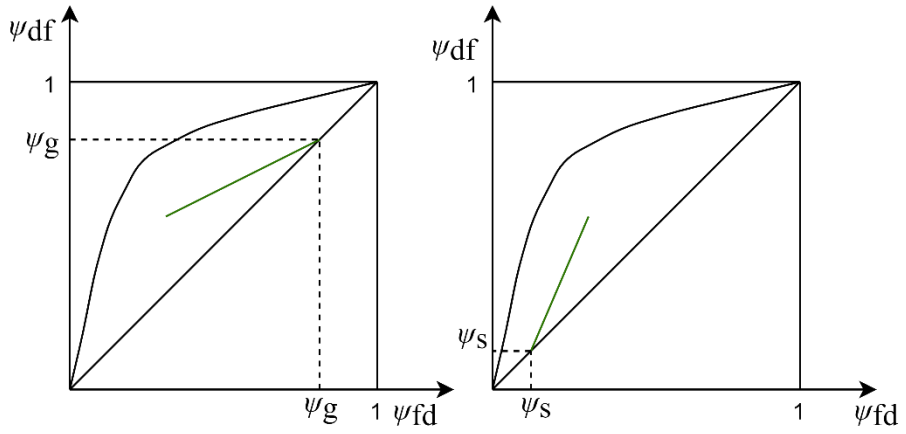
Pravac jačanja dobije se postavljanjem masenih bilanci oko vrha kolone uz $\varphi = q_{\mathrm{nF}}/q_{\mathrm{ng}}$ (protok kapljevite oborine u omjeru s protokom destilata) i $\delta = q_{\mathrm{nD}}/q_{\mathrm{ng}}$ (protok uzlazne pare u koloni oborine u omjeru s protokom destilata):

$$\psi_{\mathrm{D}} = \frac{\varphi}{\delta}\psi_{\mathrm{F}} + \frac{1}{\delta}\psi_{\mathrm{g}}\,. \tag{2-7}$$

φ predstavlja refluks R odnosno koliko kapljevine se vraća u kolonu u odnosu na dobiveni destilat. Ako se u (2-7) uvrsti $\psi_{\mathrm{F}} = \psi_{\mathrm{g}}$ dobije se $\psi_{\mathrm{D}} = \psi_{\mathrm{g}}$ pa se vidi gdje pravac jačanja siječe liniju jednakih sastava pare i kapljevine (linija s nagibom 45°). Nagib pravca jačanja je:

$$\frac{\varphi}{\delta} = \frac{\varphi}{\varphi + 1} < 1 \tag{2-8}$$

iz čega je vidljivo da je nagib pravca manji od 45° što je prikazano na slici 3 lijevo.



Slika 3. Pravac jačanja (lijevo) i iscrpljivanja (desno) u McCabe-Thiel-ovom dijagramu (adaptirano iz [3])

Pravac iscrpljivanja se dobije postavljanjem masenih bilanci oko kotlića kolone uz $\varphi = q_{nF}/q_{ns}$ (protok kapljevite oborine u omjeru s protokom džibre) i $\delta = q_{nD}/q_{ns}$ (protok pare koju daje kotlić u omjeru s protokom džibre):

$$\psi_D = \frac{\varphi}{\delta}\psi_F - \frac{1}{\delta}\psi_s \tag{2-9}$$

Ovdje se uvrštavanjem $\psi_F = \psi_S$ dobiva $\psi_D = \psi_S$ pa se vidi gdje pravac iscrpljivanja siječe liniju jednakih sastava pare i kapljevine (linija s nagibom 45°). Nagib ovog pravca je veći od 1 (slika 3 desno) jer je:

$$\frac{\varphi}{\delta} = \frac{\delta + 1}{\delta} > 1 \tag{2-10}$$

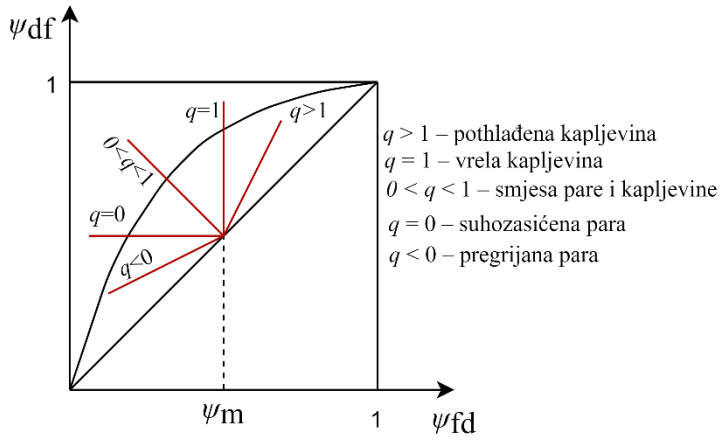
Zadnji karakteristični pravac se dobije postavljanjem masenih bilanci na pojnu piticu uz $q = q_{nF}/q_{nm}$ i naziva se pravac napajanja („*q-line"*):

$$\psi_D = \frac{q}{q-1}\psi_F - \frac{1}{q-1}\psi_m \tag{2-11}$$

Nagib pravca ovisi o stanju komine koje se računa preko izraza:

$$q = \frac{h_D - h_m}{h_D - h_F}\,. \tag{2-12}$$

Na pojnoj plitici (ili na bilo kojoj plitici općenito) je gotovo nemoguće dobiti ravnotežno stanje, ali s obzirom na to da su jako male razlike u entalpijama entalpija pare se može pisati kao $h_D \approx h_{SZP}$, a entalpija kapljevine kao $h_F \approx h_{VK}$ i očitavaju se za sastav ψ_M (slika 4).



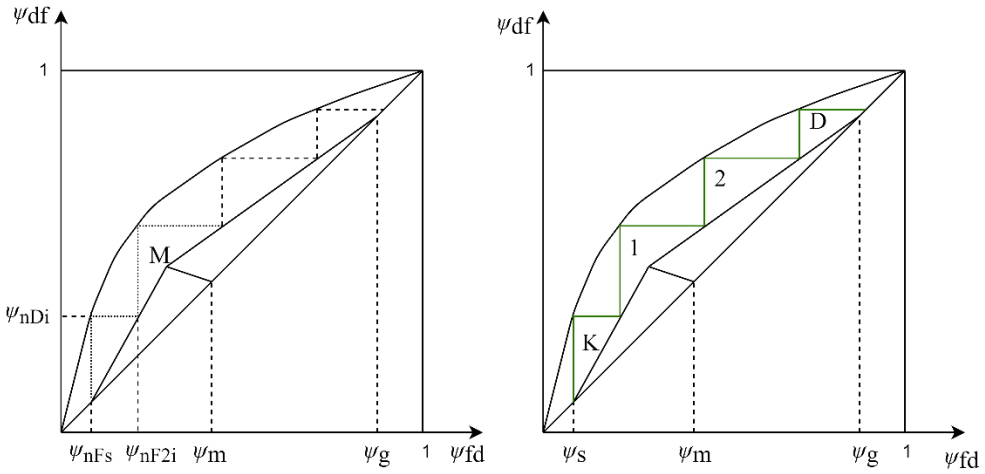
Slika 4. Pravci napajanja (adaptirano iz [3])

U određivanju broja plitica pretpostavlja se da je sastav oborine na izlazu iz kolone jačanja jednak sastavu komine koja ulazi u kolonu. Radi te pretpostavke sva tri pravca se sijeku u istoj točki unatoč tome što je u stvarnosti gotovo nemoguće da se svi ti sastavi poklope. Još se pretpostavlja da se na pliticama postiže ravnoteža između kapljevite i parne faze.

Za određivanje broja plitica (slika 5) najbolje je gledati dio za iscrpljivanje i dio za jačanje zasebno. Kreće se od kotlića jer daje konstantno paru istog sastava. Ta će para u teorijskom slučaju doći u ravnotežu s kapljevinom stanja ψ_{nFs} koja silazi s posljednje plitice i postići stanje ψ_{nD1i}. S tim stanjem para idi prema idućoj plitici i postiže ravnotežu s kapljevinom stanja ψ_{nF2i}. Ta stanja se ucrtavaju u McCabe-Thielov dijagram i svaka nova „stepenica“ predstavlja novu pliticu. To se ponavlja dok sastav pare ne pređe sastav točke M. Analogan postupak se provodi i za liniju jačanja dok se ne pređe traženi sastav destilata ψ_g. Bitno je naglasiti da prvi stupanj predstavlja kotlić, a zadnji kondenzator. Radi te činjenice potrebno je teorijski broj plitica umanjiti za dva osim ako je riječ o sustavu s djelomičnom kondenzacijom kod kojeg se teorijski broj plitica umanjuje za 1. U stvarnosti će taj broj biti mnogo veći jer para i kapljevina neće postizati ravnotežu na pliticama i naprosto neće biti dovoljno vremena niti razdjelne površine među fazama. Zato se teorijski broj plitica uvećava sa stupnjem iskoristivosti plitica koji se kreće između 0,3 i 0,8 i ovisi o izvedbi same plitice.

$$n = \frac{n_{teor}}{\eta} \tag{2-13}$$

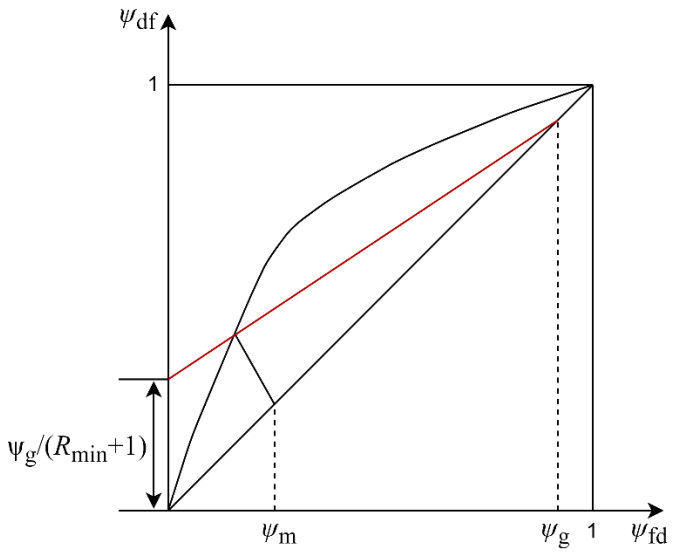
Važno je napomenuti da se ovdje sve promatralo za jedan konstantan tlak što kod rektifikacijskih kolona neće biti slučaj zato što para i kapljevina moraju savladati razne hidrauličke otpore.



Slika 5. Određivanje broja plitica u McCabe-Thiel-ovom dijagramu [3]

2.5. Određivanje minimalnog refluksa

Minimalni refluks se određuje tako da se nađe točka gdje se sijeku pravac napajanja (2-7) i ravnotežna linija $\psi_{df} = f(\psi_{fd})$. Kroz tu točku se provuče pravac jačanja i iz jednadžbe (2-7) se može odrediti minimalan refluks (slika 6). Može se dogoditi da pravac jačanja siječe više puta ravnotežnu liniju. Tada se traži da pravac jačanja u području koje je veće od točke gdje se sijeku pravac napajanja i ravnotežna linija tangira ravnotežnu liniju i to se onda uzima kao točka u kojoj je određen minimalan refluks. Za minimalan refluks potrošak ogrjevne topline je najmanji, ali je zato broj plitica beskonačan. Radi toga refluks je potrebno uvećati da bi se smanjio broj plitica na neki realan broj.



Slika 6. Određivanje minimalnog refluksa

3. MOGUĆI OBLICI AZEOTROPNE DESTILACIJE

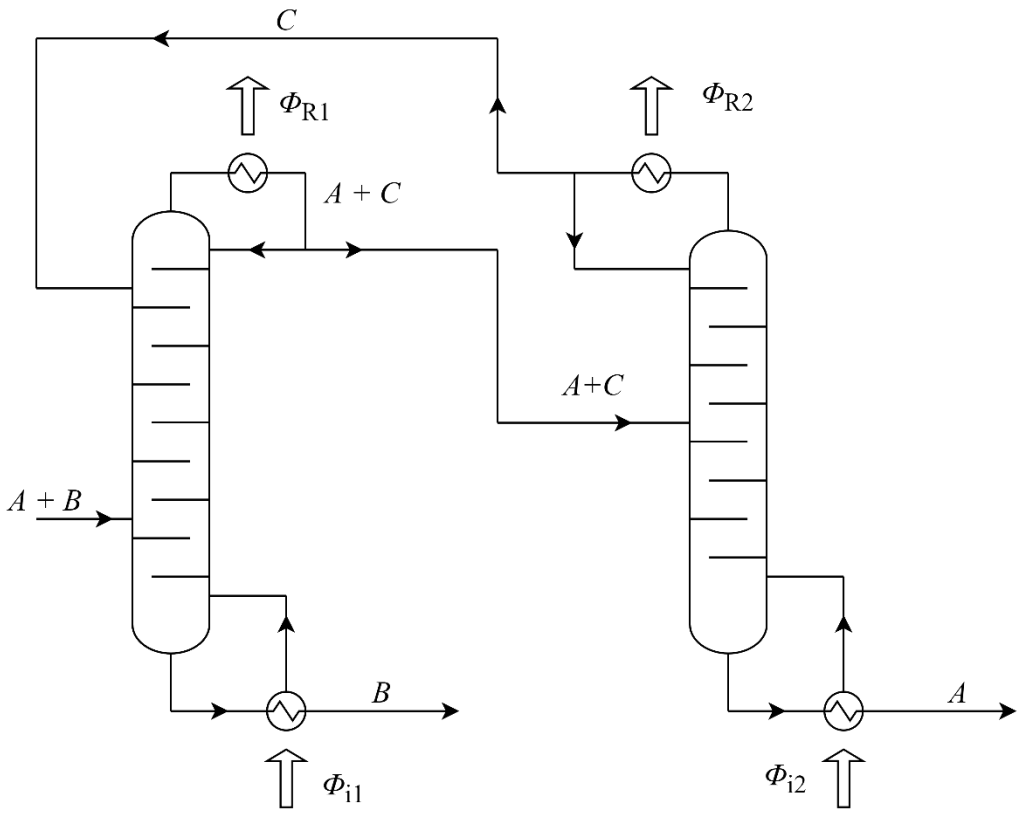
Kao što je već rečeno postoje smjese koje imaju azeotropni sastav. Takav sastav ima i smjesa etanola i vode. Ako se želi postići destilat čiji je konačni sastav veći od azeotropnog to se neće moći postići klasičnom destilacijom jer i uz beskonačno veliku površinu smjesa nikada neće moći imati koncentraciju veću od azeotropne. Najveći teorijski postižljiv sastav takvih smjesa je azeotropni.

3.1. Dodavanje treće komponente

Jedan od načina da se pri atmosferskom tlaku postigne sastav alkohola (etanol-voda) veći od ξ_a = 96,4 kg/kg (azeotropni sastav pri 1 bar) je da se u tu smjesu doda treća komponenta (eng. „entrainer“).

Ako mješavina A+B (B je lakše hlapiva komponenta) tvore azeotropnu smjesu one se mogu razdvojiti na način da se doda treća komponenta koja ima niže vrelište (još lakše hlapiva tvar) s ciljem da formira novu azeotropnu smjesu A+C. Sada se jednostavnom destilacijom može izdvojiti komponenta B, a smjesa A+C se destilira još jednom kako bi se ponovno izdvojila komponenta C i nanovo iskoristila u razdvajanju smjese A+B kao što je prikazano na slici (slika 7) .

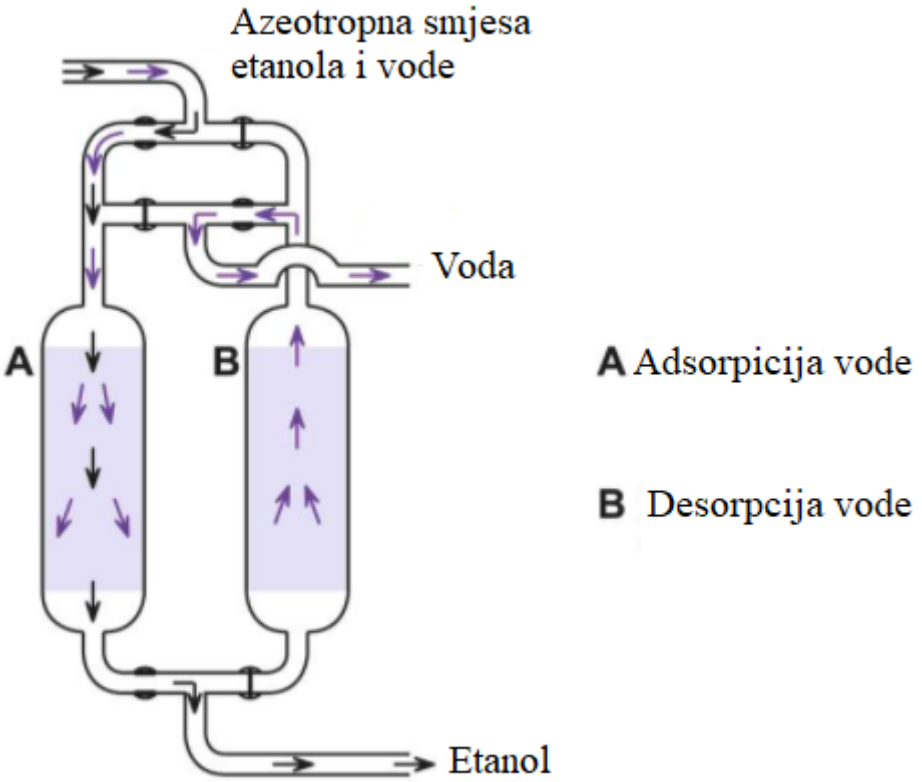
U svrhu razdvajanja etanola i vode dodaje se benzen kao lakše hlapiva tvar i tada se u prvom stupnju izdvaja etanol, a smjesa benzena i voda ide u drugi stupanj radi ponovne destilacije kako bi se dobio što čišći benzen da bi se mogao vratiti i ponovno koristiti za razdvajanje smjese etanola i vode.



Slika 7. Azeotropna destilacija s dodatkom treće komponente (adaptirano iz [4] i [5])

3.2. Adsorpcija

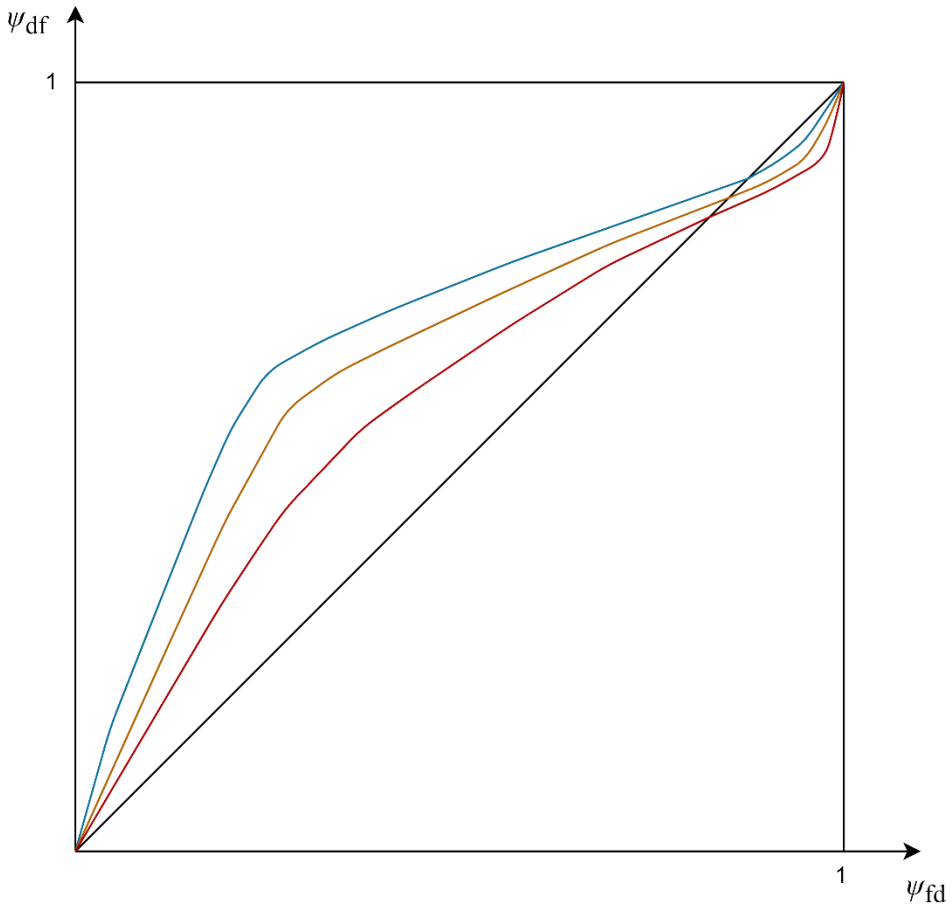
Drugi način je da se uz pomoć adsorbera ukloni jedan od sudionika u smjesi. Iz mješavine etanola i vode vodu se može ukloniti ako se azeotropsku smjesu pusti kroz sita koja su izvedena od zeolita. U toj izvedbi su obično dvije paralelno spojene kolone od kojih se jedna drži u radu za proizvodnju etanola dok se u drugoj regenerira (desorbira) zeolit za ponovnu upotrebu kao što je prikazano na slici (slika 8).



Slika 8. Adsorpcija etanola iz azeotropske smjese [6]

3.3. Promjena tlaka

Treći način je da se promjeni tlak u kolonama. Azeotropni sastav smjese nije konstantan i nepromjenjiv već se on može mijenjati kako se vidi na slika 9. Ako se tlak u koloni spusti dovoljno nisko azeotropni sastav može nestati i tada je moguća destilacija kakva je prikazana u TEORIJSKE OSNOVE. Međutim problem je taj što za smjesu etanol voda azeotropni sastav nestaje na tlakovima koji su ispod 0,01 bar što je iznimno teško postići i onda održavati u tako velikim sustavima kao što su destilacijske kolone.



Slika 9. Ravnotežne linije za razne tlakove

Drugi način s kojim se može iskoristiti činjenica da se mijenja azeotropni sastav smjesi etanol-voda je destilacija s promjenom tlaka. Na slici je vidljivo da se kod smjesa s temperaturnim minimumom s porastom tlaka azeotropna točka pomiče u lijevo odnosno smanjuje se koncentracija etanola u azeotropnom sastavu. To se iskorištava tako da se pri atmosferskom tlaku u jednoj destilacijskoj koloni postigne što viša koncentracija destilata. Zatim se taj destilat tlači na neki viši tlak i u koloni na višem tlaku destilira do željeno visokog sastava, a teorijski moguće i do čistog etanola u beskonačno velikoj destilacijskoj koloni.

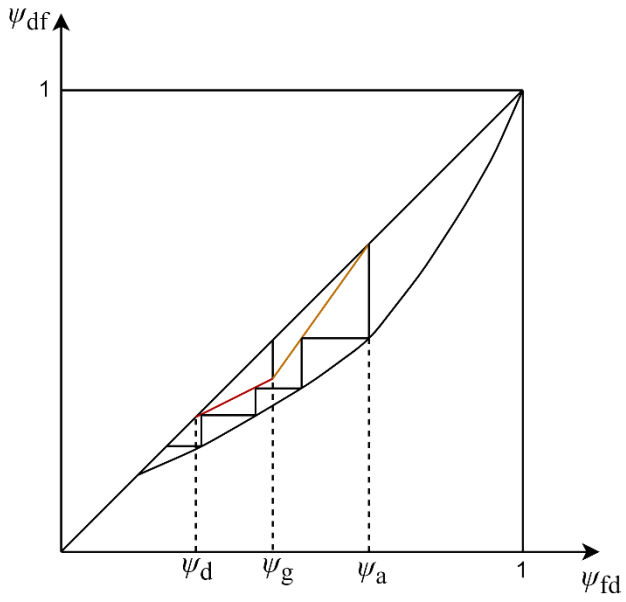
Destilacija opisana pod 3.1. traži dodatnu komponentu koju je potrebno posebno izdvajati u procesu što zahtjeva dodatnu kolonu. Isto tako potrebno je pripremiti ili nabaviti treću komponentu da bi se uopće mogla koristiti. Ako bi se koristila destilacija opisana pod 3.2. tada bi bilo potrebno održavati i mijenjati adsorbere. Također regeneracija adsorbera se odvaja pod niskim tlakovima tako da tu postoje značajni zahtjevi za čvrstoćom konstrukcije. Stoga se u ovom radu analizirala destilacija s promjenom tlaka koja ne traži dodatne tvari već energijski ulog koji je analiziran u narednim poglavljima.

4. DESTILACIJA S POMJENOM TLAKA

Kao što je već navedeno destilacija s promjenom tlaka funkcionira tako da se pri atmosferskom tlaku postigne što veća koncentracija etanola u smjesi i zatim stlači na neki veći tlak. Kako se zbog promjene tlaka sastav azeotropne smjese smanji tada se destilat destilira još jednom da bi se postigao željeno visoki sastav

4.1. Kolona pod visokim tlakom

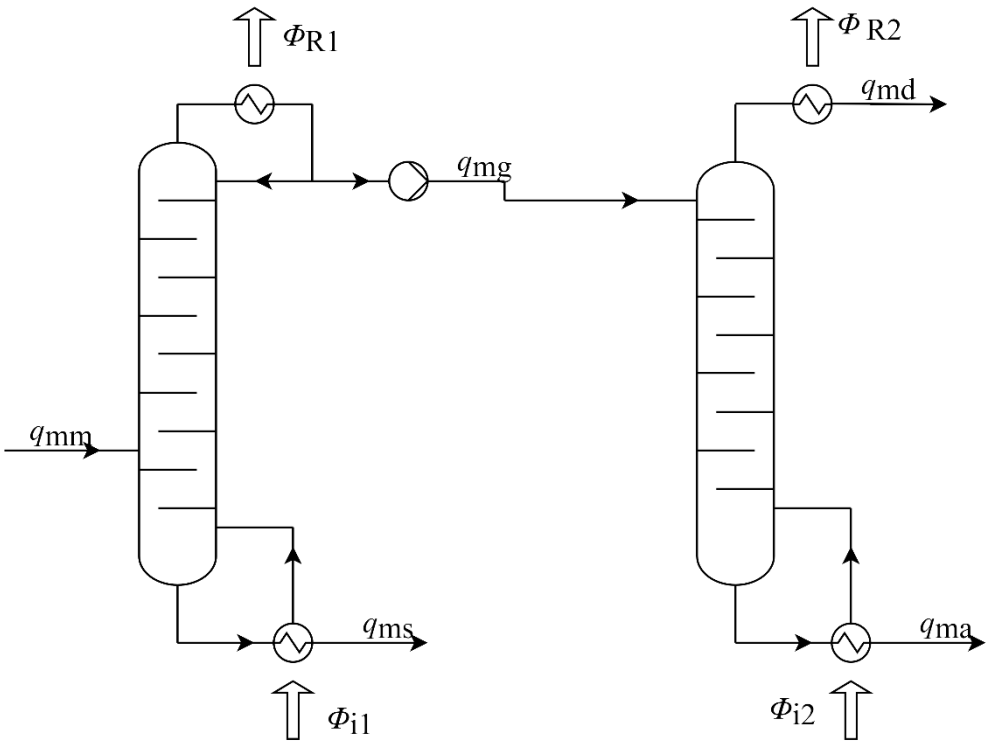
Bitno je naglasiti da se u drugoj koloni ne uzima destilat kao konačni produkt nego džibra. To je zato što je na sastavima višim od azeotropnog toliko više etanola da će pri isparavanju prije nestati vode. Radi toga ako se želi postići izrazito koncentriran produkt mora se iscrpiti smjesa da džibra bude što više koncentracije. McCabe-Thielov dijagram za drugu kolonu je prikazan na slici 10. Nagibi pravaca jačanja i iscrpljivanja koji su prikazani s jednadžbama (2-8) i (2-10) i ovdje vrijede te se i tako vidi da se na pravcu jačanja smanjuje, a na pravcu iscrpljivanja povećava koncentracija alkohola u smjesi. Postupak određivanja plitica je isti kao što je opisano u 2.4.



Slika 10. Određivanje broja plitica na sastavima većim od azeotropnog

4.2. Izvedba postrojenja bez povrata pare

Ako se sustav izvede kao na slici 11 tada postoje dva produkta. Džibra visoke koncentracije i para (koju treba kondenzirati) sastava malo nižeg od azeotropnog.

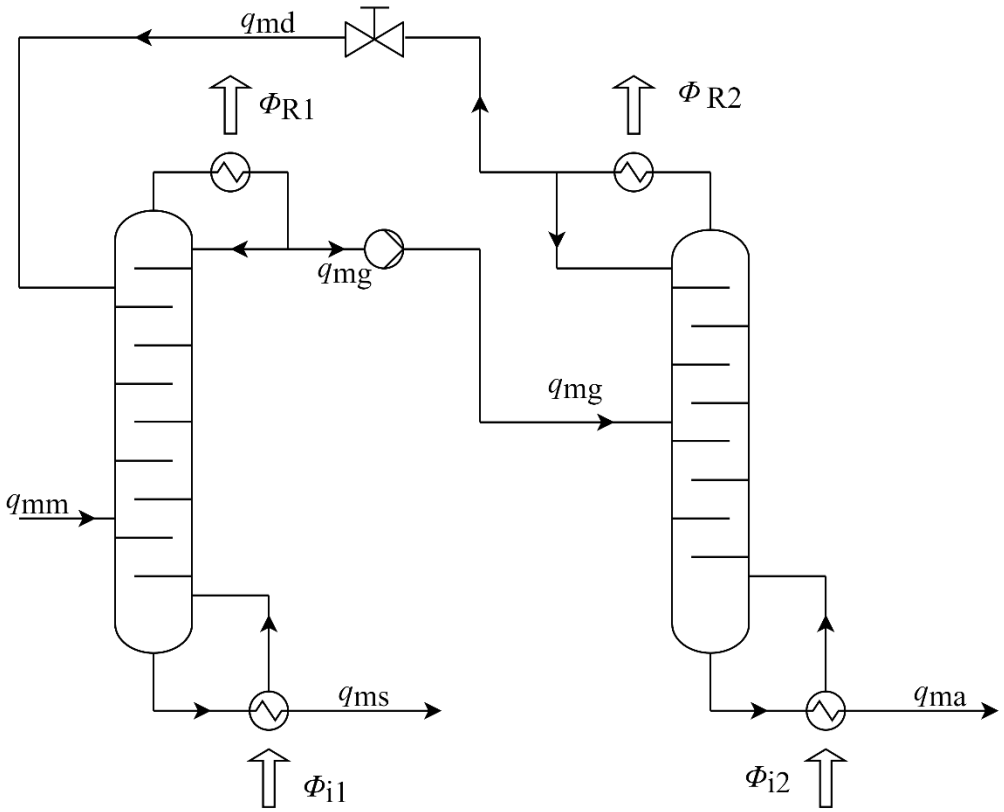


Slika 11. Shema postrojenja s dva produkta

U ovom slučaju kolona na atmosferskom tlaku je spojena, a kolona pod visokim tlakom je kolona za iscrpljivanje. Naime nema potrebe da u drugoj koloni drugi produkt bude što manjeg sastava jer se to moglo postići i bez tlačenja na visoki tlak. U ovom slučaju protok džibre iz druge kolone je dosta mali, a većina produkta je para čiji je sastav manji od azeotropnog pri atmosferskom tlaku. Da bi taj sustav funkcionirao treba uložiti u opremu koja radi pod visokim tlakom, osigurati dodatni tok rashladne vode za kondenzaciju destilata i dovoditi još toplinske energije za grijanje kotlića druge kolone. Još jedan problem je broj plitica. Kod sustava koji imaju povrat destilata druge kolone u prvu nagib međupravca se povećava pa je strmiji od pravca jačanja kolone s jednim napajanjem. Rezultat toga je znatno manji broj plitica u sustavima koji imaju povrat destilata druge kolone. Radi navedenih razloga neće se analizirati ovaj tip sustava već sustav koji daje samo jedan produkt – džibru druge kolone.

4.3. Izvedba postrojenja s povratom pare u prvu kolonu

Shema postrojenje je vidljiva na slici 12. Prikazana je izvedba kada se koristi potpuna kondenzacija nakon pojedine kolone. Povrat destilata druge kolone u prvu ima dvojaku ulogu. Tako dižbra iz druge kolone (konačan produkt) ima mnogo veći protok nego kada se koristi sustav opisan u 4.2. To se vidi nakon odabira masenih koncentracija te postavljanja bilanci. Drugi razlog je taj što s parom iz druge kolone grijemo prvu destilacijsku kolonu. Problem je što su u ovom slučaju protoci koji idu kroz kondenzator prve kolone veći pa treba naći optimalnu radnu točku.



Slika 12. Shema postrojenja za azeotropsku destilaciju s promjenom tlaka

Nakon postavljanja i sređivanja masenih bilanci dobiju se izrazi za protoke prikazane na slici 12:

$$q_{\mathrm{ma}} = \frac{q_{\mathrm{mm}}(\xi_{\mathrm{m}} - \xi_{\mathrm{s}})}{\xi_{\mathrm{a}} - \xi_{\mathrm{s}}} \tag{4-1}$$

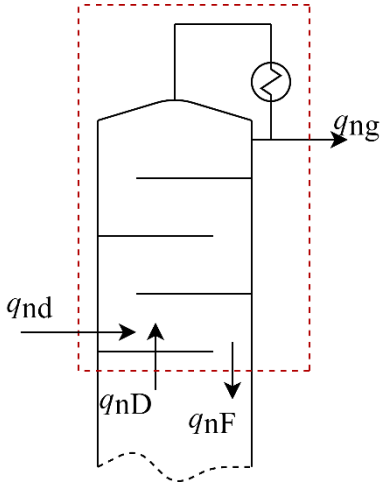
$$q_{\mathrm{ms}} = q_{\mathrm{mm}} - q_{\mathrm{ma}} \tag{4-2}$$

$$q_{\mathrm{mg}} = \frac{q_{\mathrm{ma}}(\xi_{\mathrm{a}} - \xi_{\mathrm{d}})}{\xi_{\mathrm{g}} - \xi_{\mathrm{d}}} \tag{4-3}$$

$$q_{\mathrm{md}} = q_{\mathrm{mg}} - q_{\mathrm{ma}} \tag{4-4}$$

Gdje je q_{ma} protok konačnog produkta (džbire druge kolone), q_{ms} protok džbire prve kolone, q_{mg} protok destilata prve kolone, a q_{md} protok destilata druge kolone.

Prije analize bitno je prilagoditi izračun broja plitica jer sada postoje dva napajanja, a ne samo jedno. Svježa komina će se dovoditi u donjem dijelu jer ima manje sastave, dok će se destilat iz druge kolone dovoditi pred sam vrh kolone zbog visokih koncentracija. Ovdje je kolona podijeljena u tri dijela: dio za jačanje (iznad drugog napajanja), dio za iscrpljivanje (ispod prvog napajanja) i dio koji se nalazi između dva napajanja. Pravci za jačanje i iscrpljivanje u McCabe-Thielvom dijagramu ostaju isti kako su prikazani u 2.4. jer im je i izvod isti. Za izvođenje međupravca (pravac između dva napajanja) postavlja se masena bilanca oko potpunog ili djelomičnog kondenzatora zajedno s drugim napajanjem (slika 13).



Slika 13. Vrh kolone uključujući napajanje

$$q_{nd} + q_{nD} = q_{nF} + q_{ng} \tag{4-5}$$

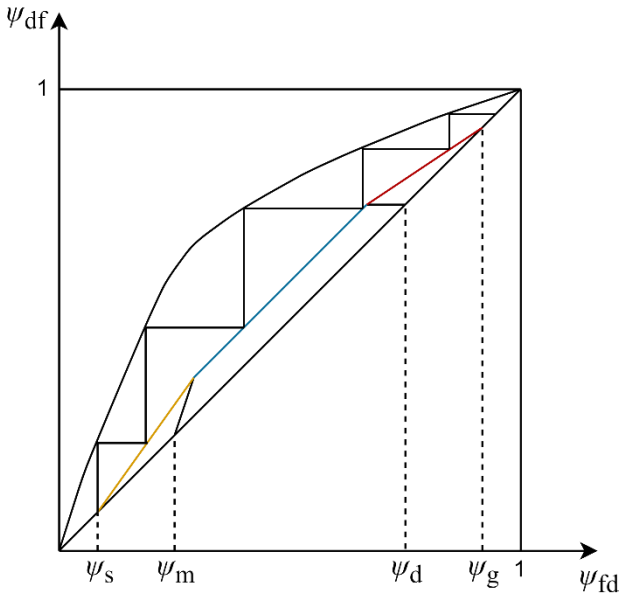
$$q_{nd}\psi_d + q_{nD}\psi_D = q_{nF}\psi_F + q_{ng}\psi_g \tag{4-6}$$

Malom preinakom (4-6) dobiva se jednadžba međupravaca

$$\psi_D = \frac{q_{nF}}{q_{nD}}\psi_F + \frac{1}{q_{nD}}(q_{ng}\psi_g - q_{nd}\psi_d) \tag{4-7}$$

Za određivanje međupravca potrebno je odrediti jednu točku koja pripada tom pravcu. Odabire se točka u kojoj se sijeku pravac drugog napajanja i pravac jačanja. U stvarnosti nikada neće biti moguće da se ova tri pravca pogode u istoj točki! Ona se može odrediti jer su sastavi odabrani, a protoci izračunati postavljanjem bilanci na čitave kolone. Tada se q_{nD} i q_{nF} mogu izračunati uvrštavanjem (4-5) u (4-7) te uvrštavanjem točke sjecišta triju pravaca, a samim time može se dobiti i jednadžba međupravca. Ovdje je riječ o molnim protocima tako da masene protoke i koncentracije prije uvrštavanja u navedene jednadžbe treba pretvoriti u količinske

pomoću jednadžbe (2-3). Nakon toga se određuje pravac iscrpljivanja i onda se pristupa određivanju broj plitica na isti način kao i kod destilacije s jednim napajanjem (slika 5). Određivanje minimalnog refluksa je ovdje isto kao i kod sustava s jednim napajanjem samo je bitno da se minimalan refluks određuje pomoću pravca napajanja koji daje povrat iz druge kolone. Na slici 14 je prikazan primjer određivanja plitica u McCabe-Thielovom dijagramu s dva napajanja.



Slika 14. McCabe-Thielov dijagram s dva napajanja

Ako se koristi potpuna kondenzacija tada se sva kapljevina koja izlazi iz destilacijske kolone prvo kondenzira i onda se jedan dio vraća u kolonu, a ostatak ide u iduću. Odabir refluksa je jako bitan jer utječe na izračun broja plitica i što je on veći broj potrebnih plitica je manji. Kod azeotropske destilacije s promjenom tlaka to je izrazito bitno jer se traže visoke koncentracije destilata pa će samim time biti značajan broj plitica unatoč razmjerno velikom refluksu.

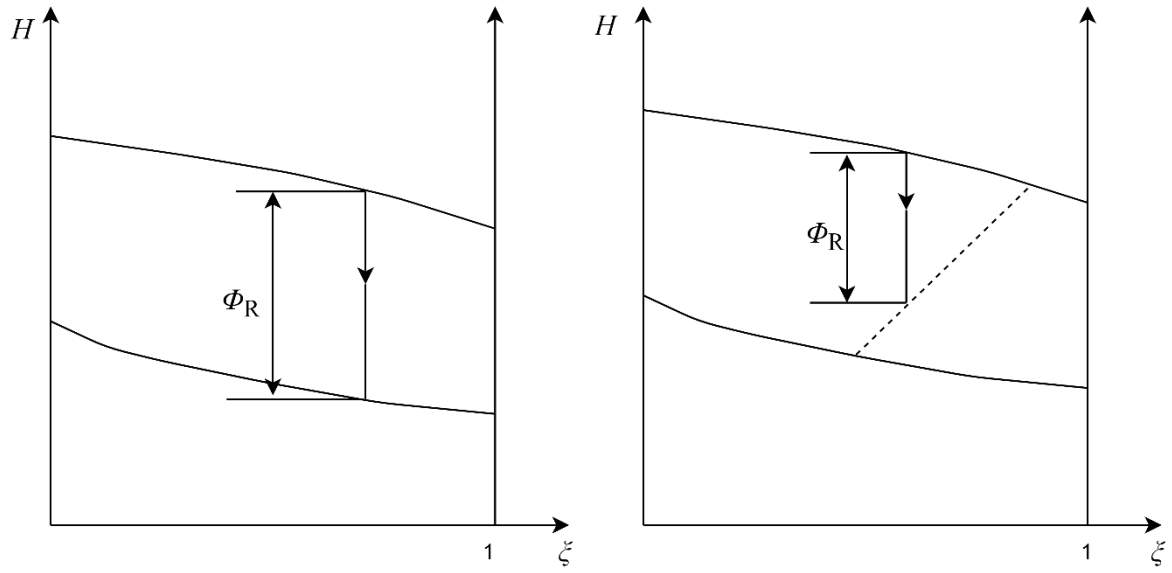
$$R_1 = \frac{q_{nF}}{q_{ng}} \tag{4-8}$$

$$R_{1kg} = \frac{q_{nF} M_F}{q_{ng} M_g} = R_1 \frac{M_e \psi_F + M_w (1-\psi_F)}{M_e \psi_g + M_w (1-\psi_g)} = R_1 \tag{4-9}$$

Kod potpune kondenzacije maseni R_{1kg} i molni R_1 iznosi refluksa su isti jer je molni sastav isti prije i nakon kondenzatora. Ako se postavi masena bilanca oko izmjenjivača topline tada iz kolone izlazi mješavina s protokom:

$$q_{m2g} = q_{mg} + q_{mF} = (1 + R_{1kg}) q_{mg} \tag{4-10}$$

gdje je q_{m2g} protok prije ulaska u izmjenjivač u kojem kondenzira. Slka 15 lijevo prikazuje proces kondenzacije. Ovdje je sastav refluksa isti kao i sastav mješavine koja izlazi iz kolone, kao i sastav smjese koji ide u iduću kolonu.



Slika 15. Potpuna kondenzacija (lijevo) i parcijalna kondenzacija (desno)

Kod izvedbe s djelomičnom kondenzacijom ti sastavi neće biti isti. Mješavina koja ide prema drugoj koloni je većeg sastava od one mješavine koja ulazi u izmjenjivač, a ta smjesa ima veći sastav od sastava smjese koji se vraća u kolonu (slika 15).

$$R_1 = \frac{q_{nF}}{q_{ng}} \tag{4-11}$$

Kod djelomične kondenzacije brojčana vrijednost refluksa izraženog u kg/kg (R_{1kg}) ne daje istu vrijednost kao molni refluks R_1 koji se odabire pri izračunu broja plitica. Prvo se određuje sastav kapljevine koja se vraća u kolonu. U ovom slučaju se odabire sastav na izlazi iz kolone kao i sastav na izlazu iz djelomičnog kondenzatora. Koliki će biti iznos refluksa ovisi o pravcu razmješavanja (crtkano prikazan na slika 15) odnosno o izvedbi izmjenjivača. Sastav kapljevine koja se vraća u kolonu se dobije iz postavljanja masene bilance etanola oko djelomičnog kondenzatora:

$$q_{n2g} \psi_{2g} = q_{ng} \psi_g + q_{nF} \psi_F \tag{4-12}$$

gdje je q_{n2g} molni protok na izlazu iz kolone (prije ulaska u izmjenjivač). Iz toga se može raspisati:

$$\psi_{F1} = \frac{q_{n2g}}{q_{nF}}\psi_{2g} - \frac{q_{ng}}{q_{nF}}\psi_{g} = \frac{q_{nF}+q_{ng}}{q_{nF}}\psi_{2g} - \frac{q_{ng}}{q_{nF}}\psi_{g} = \frac{R_1+1}{R_1}\psi_{2g} - \frac{1}{R_1}\psi_{g} \quad (4\text{-}13)$$

Zatim se može izračunati refluks (kg/kg):

$$R_{1kg} = \frac{q_{nF}M_F}{q_{ng}M_g} = R_1\frac{M_e\psi_{F1} + M_w(1-\psi_{F1})}{M_e\psi_g + M_w(1-\psi_g)} \quad (4\text{-}14)$$

Analiza utroška rashladne vode i ogrjevne pare kreće od postavljanja 1. glavnog stavaka oko prve kolone:

$$\phi_{i1} + \phi_{R1} = q_{ms}h_s + q_{md}h_d - q_{mm}h_m \quad (4\text{-}15)$$

Da bi se odredio učin kotlića prvo je potrebno postaviti prvi glavni stavak oko kondenzatora da bi se odredio potrebni odvođeni toplinski tok u prvoj koloni. Ako je riječ o potpunoj kondenzaciji treba kondenzirati svu paru koja izlazi iz kolone. Bilanca glasi:

$$\phi_{R1} = q_{m2g}\left(h_g - h_{gSZP}\right) = q_{mg}\left(R_{1kg}+1\right)\left(h_g - h_{gSZP}\right) \quad (4\text{-}16)$$

gdje je h_g entalpija kondenzata, a h_{gSZP} entalpija suhozasićene pare na ulazu u kondenzator.

Ako je postrojenje izvedeno s djelomičnom kondenzacijom tada traženi rashladni učin iznosi:

$$\phi_{R1} = q_{mg}h_g + q_{mF}h_R - q_{m2g}h_{2g} = q_{mg}\left(h_g + R_{1kg}h_R - (1+R_{1kg})h_{2g}\right). \quad (4\text{-}17)$$

Ovdje je h_g entalpija suhozasićene pare na izlazu iz izmjenjivača, h_R entalpija kondenzata, a h_{2g} entalpija suhozasićene pare na ulazu u izmjenjivač. Sada se može odrediti potrebi učin u prvom kotliću ϕ_{i1}. Nakon toga se postavlja bilanca oko kondenzatora druge kolone i dobiva se potrebni rashladni učin drugog kondenzatora ϕ_{R2}. Izrazi su isti kao i za prvu kolonu samo se umjesto indeksa g koristi indeks d kojim je označen destilat druge kolone, a umjesto indeksa 1 indeks 2 što označava drugu kolonu:

$$\phi_{R2} = q_{m2d}\left(h_d - h_{dSZP}\right) = q_{md}\left(R_{2kg}+1\right)\left(h_d - h_{dSZP}\right) \quad (4\text{-}18)$$

$$\phi_{R2} = q_{md}h_d + q_{mF}h_{R2} - q_{m2d}h_{2d} = q_{md}\left(h_d + R_{2kg}h_{R2} - (1+R_{2kg})h_{2d}\right) \quad (4\text{-}19)$$

Učin drugog kotlića se može odrediti nakon postavljanja energijske bilance oko cijelog sustava jer je prethodno sve izračunato:

$$\phi_{i1} + \phi_{i2} + \phi_{R1} + \phi_{R2} = q_{ms}h_s + q_{ma}h_a - q_{mm}h_m \quad . \quad (4\text{-}20)$$

Kada su poznati svi toplinski tokovi može se odrediti ukupni učin dvaju kondenzatora i dvaju kotlića:

$$\phi_R = \phi_{R1} + \phi_{R2} \quad (4\text{-}21)$$

$$\phi_{\mathrm{i}} = \phi_{\mathrm{i1}} + \phi_{\mathrm{i2}} \tag{4-22}$$

Protok rashladne vode q_{mRV} koja hladi kondenzatore je

$$q_{\mathrm{mRV}} = \frac{|\phi_{\mathrm{R}}|}{\Delta h_{\mathrm{RV}}} \tag{4-23}$$

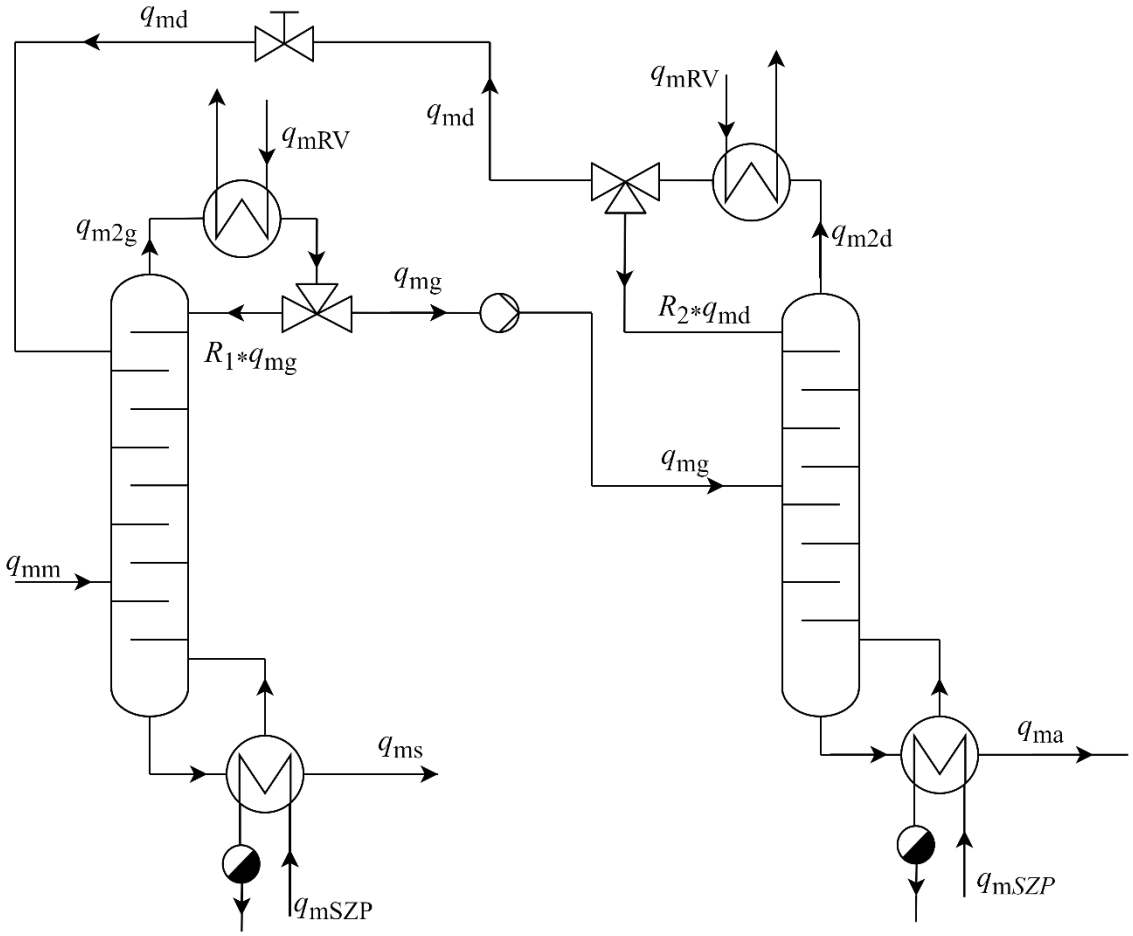
Δh_{RV} se određuje iz toplinskih tablica ili nekog od dostupnih programa (npr. COOL.PROP) nakon što se odabere za koliko stupnjeva celzija se zagrijava rashladna voda. Potrebni protok suhozasićene vodene pare se dobije dijeljenjem ukupnog toplinskog toka dvaju kotlića sa specifičnom toplinom isparavanja r vode pri zadanom tlaku (u ovom radu je to 6 bar):

$$q_{\mathrm{mSZP}} = \frac{\phi_{\mathrm{i}}}{r} \tag{4-24}$$

U sustavu s djelomičnom kondenzacijom ne ide vreli kondenzat prema drugoj koloni već para. Tada se ne može koristi pumpa nego kompresor. U ovome radu se uzima da je uz kompresor izvedeno hlađenje koje smjesu nakon kompresije hladi na entalpiju jednaku onoj prije kompresije.

5. ANALIZA UTROŠKA RASHLADNE VODE I OGRJEVNE PARE

U ovom odjeljku analizirat će se potreba sustava za azeotropnu destilaciju s promjenom tlaka prema potrošnji rashladne vode i ogrjevnog medija za sustav prikazan na slici 16.



Slika 16. Dijagram toka destilacije s promjenom tlaka

Zadane vrijednosti su:

- Maseni protok q_{mm} = 10000 kg/h
- Temperatura komine: ϑ_m = 25°C
- Maseni udio etanola u komini: ξ_m = 0,15 kg/kg
- Minimalni stupanj razdvajanja zadane smjese: 98%
- Temperatura rashladne vode: ϑ_{RV} = 15°C
- Tlak suhozasićene ogrjevne pare: p_{SZP} = 6 bar

Odabrane vrijednosti:

- Molarna masa etanola [7]: M_2 = 46,07 g/kmol
- Molarna masa vode [7]: M_1 = 18,02 g/kmol
- Tlak u prvoj koloni: p_1 = 1 bar
- Tlak u drugoj koloni varira i odabrane su vrijednosti od 20, 25 i 30 bar
- Sastavi prve i druge džibre, sastavi na izlazima iz kolona te odabrani iznosi refluksa prikazani su u narednim tablicama
- Sve ostale vrijednosti su računate i odabirane pomoću programa Cool.Prop

Ravnotežne linije za razne tlakove su određene primjenom NRTL modela [8]. Proračun je proveden u programu MATLAB.

5.1. Odabir koncentracije konačnog produkta

U zadatku se traži minimalno razdvajanje smjese od 98%. To znači da u konačnom produktu mora biti barem 98% etanola ulazne komine, odnosno mora biti zadovoljen uvjet:

$$q_{\mathrm{ma}}\ \xi_{\mathrm{a}} \geq 0,98\, q_{\mathrm{mm}}\ \xi_{\mathrm{m}} \tag{5-1}$$

5.2. Analiza sustava kada se koristi potpuna kondenzacija

U ovom dijelu biti će prikazana analiza utroška rashladne vode i ogrjevne pare kada se vrši potpuna kondenzacija u sustavu. Proračun se provodi prema izrazima navedenim u prošlom odjeljku. Kolone se smatra idealno izoliranima tj. nema izmjene topline s okolišem. U prvom dijelu analize odabire se druga kolona koja je pod tlakom od 30 bara.

Odabrane vrijednosti:

- Maseni udio u džibri: ξ_{s}
- Maseni udio konačnog produkta (džibra druge kolone): ξ_{a}
- Maseni udio prvog destilata (komina druge kolone): ξ_{g}
- Maseni udio drugog destilata (povrat u prvu kolonu): ξ_{d}
- Refluks prve kolone: R_1
- Refluks druge kolone: R_2
- Zagrijavanje rashladne vode: $\Delta\vartheta_{\mathrm{RV}}$

Izračunate vrijednosti:

- Maseni protok džibre prve kolone (4-2): q_{ms}
- Maseni protok konačnog produkta (džibra druge kolone) (4-1): q_{ma}

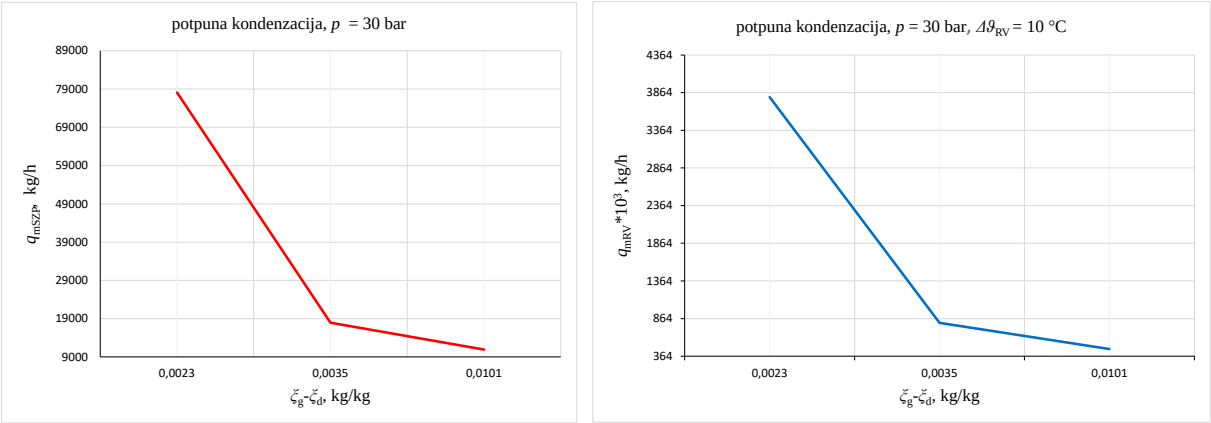
- Maseni protok prvog destilata (komina druge kolone) (4-3): q_{mg}
- Maseni protok drugog destilata (povrat u prvu kolonu) (4-4): q_{md}
- Rashladni učin prvog kondenzatora (4-16): ϕ_{R1}
- Rashladni učin drugog kondenzatora (4-18): ϕ_{R2}
- Ukupni rashladni učin (4-21): ϕ_{R}
- Utrošak rashladne vode (4-23): q_{mRV}
- Učin prvog kotlića (4-15): ϕ_{i1}
- Učin drugog kotlića (4-20): ϕ_{i2}
- Ukupni učin kotlića (4-22): ϕ_{i}
- Protok SZP-a (4-24): q_{mSZP}

Tablica 1 prikazuje kako se mijenjaju učini i protoci s promjenom masenih koncentracija etanola. Rezultati su prikazani za konstantan tlak od 30 bar. Kratica Jedn. označava pomoću koje jednadžbe se izračunala pojedina veličina.

Tablica 1. Učini i protoci kada se koristi potpuna kondenzacija

				Jedn.
p_1, bar	1	1	1	Odabrano
p_2, bar	30	30	30	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	0,003	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,98	0,96	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,9539	0,9535	0,9595	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9516	0,95	0,9494	Odabrano
R_1, kmol/kmol	5,00	5,00	5,00	Odabrano
R_2, kmol/kmol	5,00	5,00	7,13	Odabrano
q_{mm}, kg/h	10000	10000	10000	Zadano
q_{ms}, kg/h	8495,4	8463,9	8474,6	(4-2)
q_{ma}, kg/h	1504,6	1536,1	1525,4	(4-1)
q_{mg}, kg/h	18579	4388,7	2612,8	(4-3)
q_{md}, kg/h	17074	2852,7	1087,4	(4-4)
$\lvert\Phi_{R1}\rvert$, kW	28178	6692,5	3947,6	(4-16)
$\lvert\Phi_{R2}\rvert$, kW	16039	2689	1390,5	(4-18)
$\lvert\Phi_{R}\rvert$, kW	44217	9381,5	5338,1	(4-21)
$\Delta\vartheta_{RV}$, °C	10	10	10	Odabrano
q_{mRV}, kg/h	3804200	807140	459270	(4-23)
Φ_{i1}, kW	26872	7130,6	4610,7	(4-15)
Φ_{i2}, kW	18364	3247,6	1722,4	(4-20)
Φ_{i}, kW	45235	10378,2	6333,1	(4-22)
q_{mSZP}, kg/h	78076	1791,3	10931	(4-24)

U tablici 1 je vidljivo da su protoci rashladnog i ogrjevnog izrazito visokog iznosa jer su i učini veliki. Razlog tomu su izrazito veliki protoci q_{mg} i q_{md} koji se dodatno množe s refluksom i tek onda se dobiva protok koji treba kondenzirati (4-10). U jednadžbi (4-1) je prikazano da na protok q_{mg} utječe razlika ξ_a-ξ_d i razlika ξ_g-ξ_d. Puno veći utjecaj ima ξ_g-ξ_d jer se nalazi u nazivniku, a uvijek je manja od razlike ξ_a-ξ_d. Kod dijeljenja s malim brojevima rezultat naglo raste. Radi te činjenice što je razlika ξ_g-ξ_d jako mala protoci će biti značajni. Na slici 17 je zorno prikazano kako povećanje razlike ξ_g-ξ_d bitno smanjuje protoke rashladne vode i suhozasićene pare. Vidljivo je da ako se razlika među njima poveća za 0,0078 kg/kg potrebni tok rashladne vode padne za 3 344 930 kg/h, a suhozasićene vodene pare za 67 145 kg/h. Unatoč znatnom smanjenju tih protoka oni su i dalje velikog iznosa. Zato se prelazi na analizu sustava s djelomičnom kondenzacijom.



Slika 17. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za potpunu kondenzaciju

5.3. Analiza sustava kada se koristi djelomična kondenzacija

S obzirom na to da u ovom slučaju u izmjenjivaču dolazi samo do djelomične kondenzacije za očekivati je manje učine i protoke. Kao što je pokazano u potpoglavlju 4.3. kod djelomične kondenzacije sastav smjese prije ulaska u izmjenjivač i nakon njega nije isti. Stoga se javljaju dvije nove veličine:

- Maseni udio smjese prije ulaska u izmjenjivač prve kolone: ξ_{2g}
- Maseni udio smjese prije ulaska u izmjenjivač druge kolone: ξ_{2d}

Prvo se izračuna njihov molni sastav na način koji je objašnjen u 4.3., a zatim se pretvore u masene udjele ξ_{2g} i ξ_{2d}.

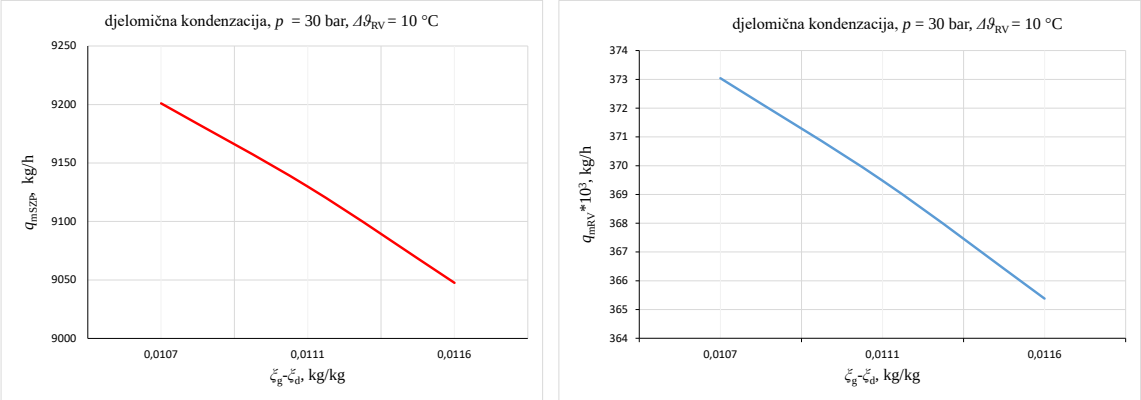
Tablica 2 prikazuje rezultate proračuna u sustavu azeotropne destilacije s promjenom tlaka kada se koristi djelomična kondenzacija. Prva tri stupca s brojčanim vrijednostima pokazuju analizu pri 30 bar. Zadnji stupac s 30 bar i iduća dva stupca (s 25 i 20 bar) sadrže konstantne masene udjele etanola odnosno prikazuju promjenu traženih protoka rashladne vode i suhozasićene vodene pare s promjenom tlaka u drugoj koloni uz konstante sastave za sva tri slučaja.

Tablica 2. Učini i protoci kada se koriste deflegmatori

						Jedn.
p_1, bar	1	1	1	1	1	Odabrano
p_2, bar	30	30	30	25	20	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9484	0,9489	0,9493	0,9493	0,9493	Odabrano
ξ_{2g}, kg/kg	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	Izračunato (postupak iznad tablice)
ξ_{2d}, kg/kg	0,9485	0,949	0,9494	0,9494	0,9494	Izračunato (postupak iznad tablice)
R_1, kmol/kmol	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	Odabrano
R_2, kmol/kmol	8,78	8,39	8,09	8,64	8,87	1,15*R_{min}
q_{mm}, kg/h	10000	10000	10000	10000	10000	Zadano
q_{ms}, kg/h	8474,6	8474,6	8474,6	8474,6	8474,6	(4-2)
q_{ma}, kg/h	1525,4	1525,4	1525,4	1525,4	1525,4	(4-1)
q_{mg}, kg/h	2406,4	2446,1	2480,5	2480,5	2480,5	(4-3)
q_{md}, kg/h	881,03	920,7194	955,138	955,1388	955,1388	(4-4)
$\lvert\Phi_{R1}\rvert$, kW	3027,6	3077,5	3120,8	3120,8	3120,8	(4-17)
$\lvert\Phi_{R2}\rvert$, kW	1219,3	1217	1215	1388,7	1524,4	(4-19)
$\lvert\Phi_R\rvert$, kW	4246,9	4294,5	4335,8	4509,5	4645,2	(4-21)
$\Delta\vartheta_{RV}$, °C	10	10	10	10	10	Odabrano
q_{mRV}, kg/h	365380	369480	373040	387980	399650	(4-23)
Φ_{i1}, kW	4183,6	4232,4	4274,7	4275	4275,9	(4-15)
Φ_{i2}, kW	1058,3	1057,2	1056,2	1212,4	1327,8	(4-20)
Φ_i, kW	5241,9	5289,6	5330,9	5487,4	5603,7	(4-22)
q_{mSZP}, kg/h	9047,5	9129,8	9201	9471,1	9671,9	(4-24)

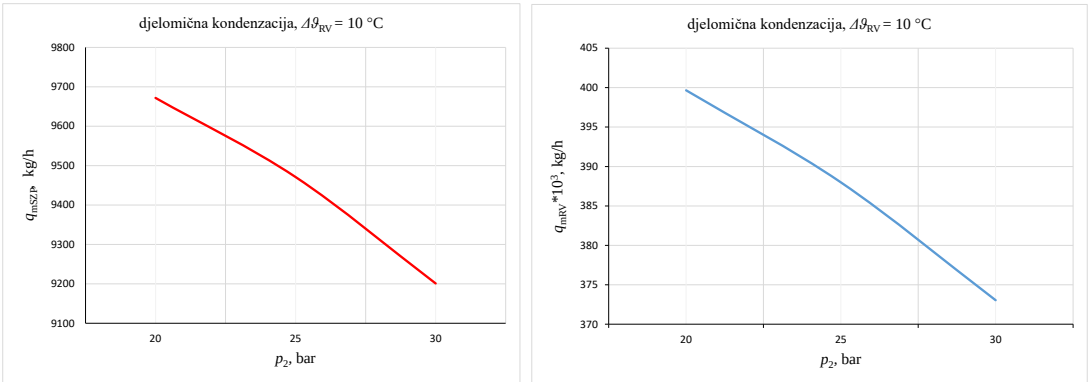
U tablici 2 je vidljivo što je grafički prikazano na slici 18. Protoci q_{mRV} i q_{mSZP} su manji nego kod potpune kondenzacije. To je zato protoci q_{m2g} i q_{m2d} (protoci koji ulaze u izmjenjivač) ne kondenziraju u potpunosti već jedan dio tih protoka kao para ide prema idućoj koloni. Kao i kod sustava s potpunom kondenzacijom i ovdje se s povećanjem razlike ξ_g-ξ_d smanjuju učini, a samim time i protoci ogrjevnog i rashladnog medija. Kada razlika ξ_g-ξ_d naraste za 0,0009 kg/kg protok rashladne vode se smanji za 7 660 kg/h, a SZP-a za 153,5 kg/h. Vidljivo je da i mali pomak u koncentracijama donosi smanjenje potrošnje. Unatoč značajnim smanjenjima protoka

ne može se razlika ξ_g-ξ_d povećavati po volji jer sastavi ξ_g i ξ_d utječu na dimenzije kolone koje će biti analizirane u idućem poglavlju.



Slika 18. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za djelomičnu kondenzaciju

U zadnja tri stupca tablice 2 su brojčane vrijednosti rezultata dobivenih za različite tlakove (30, 25, 20 bar) i iste odabrane sastave. Vidljivo je da iznosi refluksa rastu sa smanjenjem tlaka. Do toga dolazi jer se ravnotežne linije sve više približuju liniji jednakih sastava pare i kapljevine (linija koja je u McCabe-Thielovom dijagramu pod 45°, slika 9) pa im iznos minimalnog refluksa raste. Na slici 19 su grafički prikazani rezultati iz drugog dijela tablice 2. Zorno se vidi da je između 20 i 30 bar razlika u protocima rashladne vode 26 610 kg/h, a razlika u protocima suhozasićene pare 470,9 kg/h. Unatoč tome sustave pod nižim tlakovima ne treba isključiti iz daljnje analize jer ti sustavi radi nižih tlakova imaju manje zahtjeve na čvrstoću nego sustavi na 30 bar.



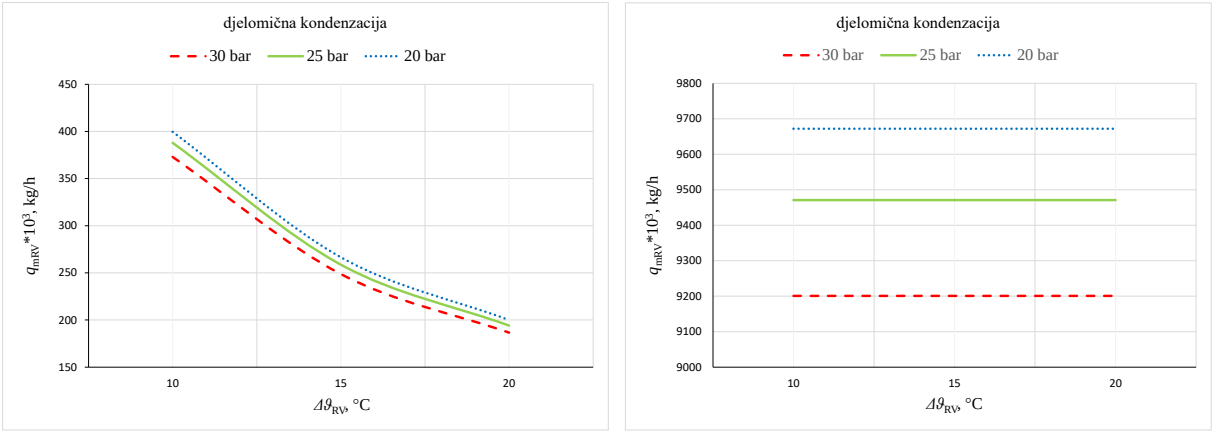
Slika 19. q_{mVK} i q_{mSZP} u ovisnosti o tlaku druge kolone p_2 za djelomičnu kondenzaciju

Iako se značajno smanjuju protoci rashladne vode i ogrjevne pare oni su i dalje veliki. Ako bi se rashladna voda mogla zagrijati za 15 ili 20 °C tada bi njeni protoci bili značajno smanjeni. U tablici 3 su prikazani rezultati kada se mijenja zagrijavanje rashladne vode $\Delta\vartheta_{RV}$ za različite tlakove. Sastavi su isti kao i zadnja tri stupca tablice 2.

Tablica 3. Učini i protoci kada se povećava $\Delta\vartheta_{RV}$

										Jedn.
p_1, bar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Odabrano
p_2, bar	30	30	30	25	25	25	20	20	20	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	0,9493	Odabrano
ξ_{2g}, kg/kg	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	Izračunato (postupak iznad tablice 2)
ξ_{2d}, kg/kg	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	0,9494	Izračunato (postupak iznad tablice 2)
R_1, kmol/kmol	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	Odabrano
R_2, kmol/kmol	8,09	8,09	8,09	8,64	8,64	8,64	8,87	8,87	8,87	$1{,}15*R_{min}$
$\lvert\Phi_{R1}\rvert$, kW	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	3120,8	(4-17)
$\lvert\Phi_{R2}\rvert$, kW	1215	1215	1215	1388,7	1388,7	1388,7	1524,4	1524,4	1524,4	(4-19)
$\lvert\Phi_{R}\rvert$, kW	4335,8	4335,8	4335,8	4509,5	4509,5	4509,5	4645,2	4645,2	4645,2	(4-21)
$\Delta\vartheta_{RV}$ °C	20	15	10	20	15	10	20	15	10	Odabrano
q_{mRV}, kg/h	186620	248770	373040	194090	258730	387980	199930	266520	399650	(4-23)
Φ_{i1}, kW	4274,7	4274,7	4274,7	4275	4275	4275	4275,9	4275,9	4275,9	(4-15)
Φ_{i2}, kW	1056,2	1056,2	1056,2	1212,4	1212,4	1212,4	1327,8	1327,8	1327,8	(4-20)
Φ_{i}, kW	5330,9	5330,9	5330,9	5487,4	5487,4	5487,4	5603,7	5603,7	5603,7	(4-22)
q_{mSZP}, kg/h	9201	9201	9201	9471,1	9471,1	9471,1	9671,9	9671,9	9671,9	(4-24)

Na slici 20. su grafički prikazani rezultati tablice tablice 3. Vidljiv je značajan pad protoka rashladne vode. Ako se $\Delta\vartheta_{RV}$ s 10 °C poveća na 20 °C protok rashladne vode za sustav s 30 bar se smanji za 186 420 kg/h, za sustav s 25 bar se smanji za 193 890 kg/h, a za sustav s 20 bar se smanji za 199 720 kg/h. Što sustav traži više rashladne vode to je i veća ušteda s povećanjem $\Delta\vartheta_{RV}$. Na slici 20 desno se vidi da protoci suhozasićene vodene pare ostaju konstanti jer se nije mijenjao toplinski tok. Također na slici 20 desno se jasnije vidi da sustavi pod višim tlakovima traže manje ogrjevne pare.



Slika 20. Grafički prikaz q_{mVK} i q_{mSZP} za razne $\Delta\vartheta_{RV}$

5.4. Usporedba sustava s potpunom i djelomičnom kondenzacijom

U svrhu usporedbe sustava s potpunom i djelomičnom kondenzacijom odabiru se isti sastavi u jednom i drugom slučaju. U tablici 4 su prikazani rezultati proračuna. Vidljivo je da su protoci q_{ma}, q_{ms}, q_{md} i q_{mg} ostali isti što je i logično jer su sastavi koji ih definiraju ostali isti. Razlika između protoka rashladne vode je 57 650 kg/h, a između protoka szhozasićene vodene pare 1 157 kg/h. Ovaj prikaz ukazuje na to da je djelomična kondenzacija energijski isplativija. Traži manje rashladne vode jer je ne kondenzira cjelokupne destilate. Isto tako troši manje suhozasićene vodene pare jer para iz jedne kolone zagrijava drugu pa je manji potrebni učin kotlića.

Tablica 4. Usporedba djelomične i potpune kondenzacije

	potpuna	djelomična	Jedn.
p_1, bar	1	1	Odabrano
p_2, bar	30	30	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	Odabrano
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,9667	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,96	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9493	0,9493	Odabrano
R_1, kmol/kmol	5,00	5,00	Odabrano
R_2, kmol/kmol	7,39	8,09	Odabrano
q_{mm}, kg/h	10000	10000	Zadano
q_{ms}, kg/h	8474,6	8474,6	(4-2)
q_{ma}, kg/h	1525,4	1525,4	(4-1)
q_{mg}, kg/h	2480,5	2480,5	(4-3)
q_{md}, kg/h	955,1388	955,138	(4-4)
$\lvert\Phi_{R1}\rvert$, kW	3793	3120,8	(4-16)
$\lvert\Phi_{R2}\rvert$, kW	1313,8	1215	(4-18)
$\lvert\Phi_{R}\rvert$, kW	5106,8	4335,8	(4-21)
$\Delta\vartheta_{RV}$, °C	10	10	Odabrano
q_{mRV}, kg/h	430690	373040	(4-23)
Φ_{i1}, kW	4473	4274,7	(4-15)
Φ_{i2}, kW	1628,8	1056,2	(4-20)
Φ_{i}, kW	6101,8	5330,9	(4-22)
q_{mSZP}, kg/h	10358	9201	(4-24)

6. ANALIZA DIMENZIJA KOLONE

U ovom odjeljku rada analizira se promjena dimenzija kolona s obzirom na odabrane koncentracije i odabrani tip kondenzacije (potpuna ili djelomična). Prikazan je i utjecaj promjene tlaka u drugoj koloni. Proračun se provodi prema načinu objašnjenom u teorijskim osnova i proveden je pomoću programa MATLAB.

6.1. Iskoristivost plitica

U McCabe-Thielovom dijagramu se prikazuje teorijski broj plitica. Da bi se odredio potreban stvaran broj plitica treba uzeti u obzir iskoristivost tih plitica. Njihova iskoristivost se računa prema O'Connell-ovom modificiranom izrazu [9]:

$$\eta = 0,503\mu^{-0,226}\alpha_s^{-0,08}. \tag{6-1}$$

gdje je μ dinamička viskoznost kapljevine i određuje se za srednju temperaturu u koloni:

$$T = \frac{T_s + T_g}{2} \tag{6-2}$$

T_s je temperatura džibre, a T_g temperatura destilata. Temperature kao i dinamička viskoznost se određuju pomoću programa Cool.Prop. α_s predstavlja srednju relativnu hlapivost. Relativna hlapivost se računa preko:

$$\alpha = \frac{\psi_{df}}{\psi_{fd}} \tag{6-3}$$

ψ_{df} je molni udio etnola u pari u ravnoteži s kapljevinom, a ψ_{fd} molni udio etanola u kapljevini u ravnotežni s parom. Te veličine čine ravnotežnu liniju u McCabe-Thielovom dijagramu pa vrijedi da je $\psi_{df} = f(\psi_{fd})$. Ta funkcijska ovisnost se dobiva pomoću NRTL modela [8]. Relativna hlapivost se tada može zapisati:

$$\alpha = \frac{f(\psi_{fd})}{\psi_{fd}} \tag{6-4}$$

Srednja relativna hlapivost se računa kao aritmetička sredina relativnih hlapivosti. Račun kreće od nekog jako malog sastava ψ_{fd} (npr. džibre). Ne smije krenuti od 0 jer bi to bilo dijeljenje s 0. Zatim se na odabrani ψ_{fd} dodaje neki korak (u ovom radu 0,02 kmol/kmol) i za svaki novi ψ_{fd} se izračuna relativna hlapivost. Proces se ponavlja dok se ne postigne vrijednost 1 Tada je srednja relativna hlapivost:

$$\alpha_s = \frac{\Sigma \alpha}{i} \tag{6-5}$$

gdje je i ukupan broj relativnih hlapivosti uzetih u račun. Tablica 5 prikazuje izračunate iskoristivosti za razne kolone.

Tablica 5. Iskoristivost kolona za različite tlakove

					Jedn.
p, bar	1	20	25	30	Odabrano
α_s	2,1671	1,8583	1,8582	2,0027	(6-5)
μ, mPas	0,46509	0,1243	0,102	0,0979	Cool.Prop.
η, -	0,56213	0,76681	0,80186	0,8045	(6-1)

U analizi će se izračunate iskoristivosti držati konstantnima unatoč promjenama u sastavu jer su temperature na koncentracijama oko azeotropne praktički konstantne pa se viskoznost neće značajno mijenjati.

6.2. Visina kolone

Kako je rečeno u prethodnoj analize teorijski broj plitica je izrazito velik. Stvarni broj plitica je mnogo veći jer se teorijski dijeli s iskoristivošću plitica (2-13). Određivati visinu kolone s pliticama ne bi imalo smisla jer bi tada neke kolone bile visoke preko 50 m. U situacijama kada je značajan broj teorijskih plitica kolone se izvode kao kolone s punilima. To ne znači da je cijela analiza uzaludna jer postoje metode koje povezuju potrebnu visinu punila i teorijski broj plitica. Jedan od najčešćih načina je preko *HETP*-a odnosno preko visine punila koje ima ekvivalentan učin kao teorijska plitica (eng. „*Height Equivalent to Theoretical Plate"*).

$$H = n_{uk} HETP \tag{6-6}$$

gdje je n_{uk} teorijski broj plitica. *HETP* se može računati preko postojećih modela ili se može očitati iz kataloga proizvođača. U svrhu ovog rada odabrano je strukturirano punilo iz kataloga proizvođača [10] te *HETP* iznosi 0,16 m.

6.3. Promjer kolone

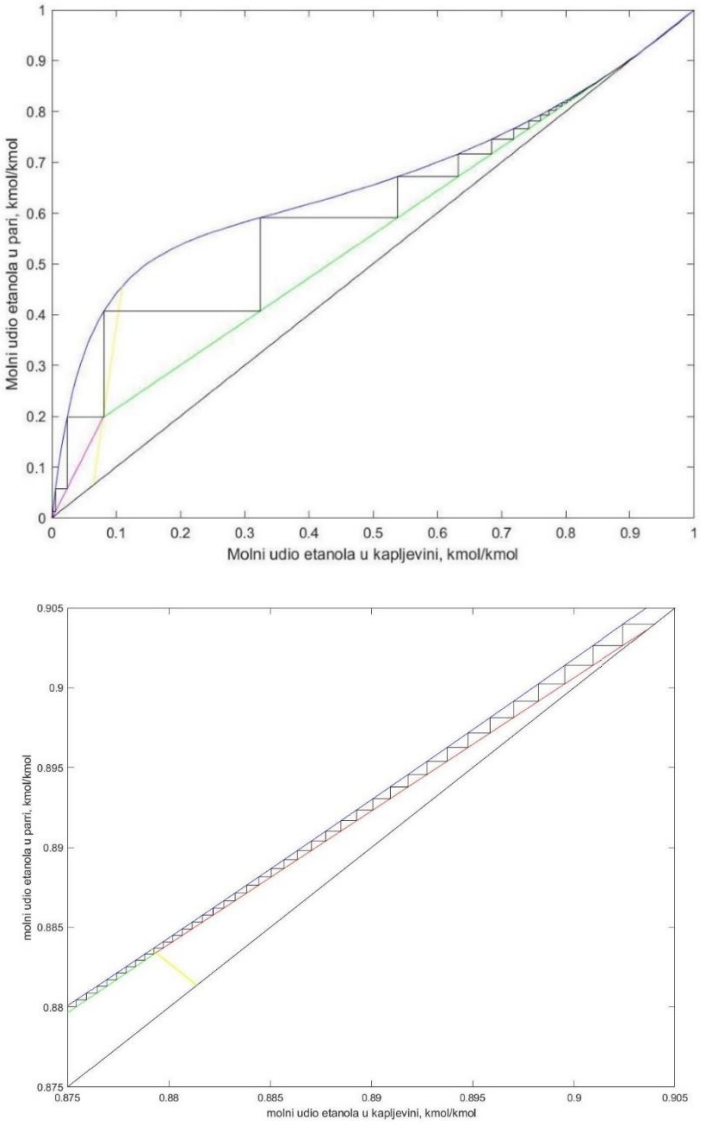
Kod određivanja promjera koristi se približan izraz iz [11]:

$$D = 4,5 Q_v^{0,5} \left(\frac{\rho_D}{\rho_F - \rho_D} \right) \tag{6-7}$$

Gdje je ρ_F gustoća kapljevine koja se vraća u kolonu, a ρ_D gustoća pare na izlazu iz kolone. Q_V je volumni protok na izlazu iz kolone i on se dobije dijeljenjem masenog protoka s ρ_D

6.4. Okvirne dimenzije 1. kolone (pod atmosferskim tlakom)

Prva kolona analizira se za konstantan tlak od 1 bar. Na slici 21 gore je primjer McCabe-Thielovog dijagrama za kolonu pod atmosferskim tlakom i s potpunom kondenzacijom. Zbog toga što su sastavi blizu azeotropnog jako mali, plitice u tom području i pravac drugog napajanja se ne vide kada se prikazuje cijeli dijagram, stoga su prikazan na slici 21 dolje. Na slici 21 dolje se vidi da pravac napajanja nije okomita linija iako je potpuna kondenzacija u drugoj koloni. Riječ je o mokroj pari jer se vrela kapljevina prije ulaska u prvu kolonu prigušuje s 30 na 1 bar.



Slika 21. McCabe-Thielov dijagram za potpunu kondenzaciju

U narednim tablicama pojedini brojevi plitica su označeni s:

- n_{i1} – broj plitica dijela iscrpljivanja 1. kolone
- n_{ij1} – broj plitica dijela između dva napajanja 1. kolone
- n_{j1} – broj plitica dijela jačanja 1. kolone
- n_{uk1} – ukupni teorijski broj plitica 1. kolone
- n_1 – stvarni potrebni broj plitica 1. kolone
- indeksom 2 su označeni brojevi plitica 2. kolone s time da druga kolona ima samo jedno napajanje pa ne sadrži n_{ij}

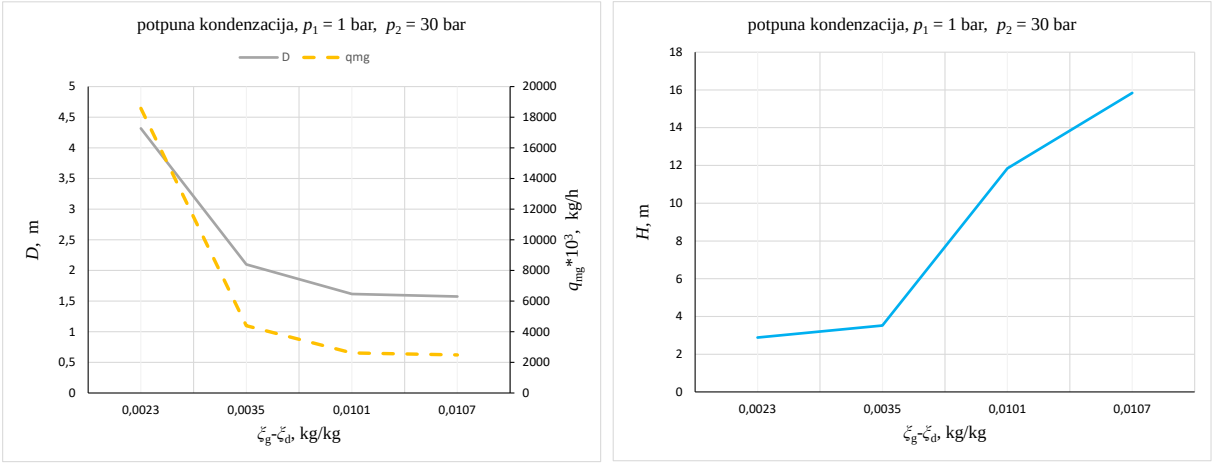
U tablici 6 su prikazani rezultati okvirnih dimenzija 1. kolone koja je pod tlakom od 1 bar, dok je u drugoj koloni 30 bar. Sastavi odgovaraju onima iz tablice 1, broj plitica je izračunat preko McCabe-Thielove medote (u tablici označeno s McCT), a okvrine dimenzije preko približnog proračuna.

Tablica 6. Okvirne dimenzije kolone za potpunu kondenzaciju

					Jedn.
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabarno
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	0,003	0,003	Odabarno
ξ_g, kg/kg	0,9539	0,9535	0,9595	0,96	Odabarno
ξ_d, kg/kg	0,9516	0,95	0,9494	0,9493	Odabarno
R_1, kmol/kmol	5	5	5	5	Odabarno
n_{i1}, -	2	3	3	3	McCT
n_{ij1}, -	17	18	49	64	McCT
n_{j1}, -	1	3	24	34	McCT
n_{uk1}, -	18	22	74	99	McCT
n_1, -	32,02127	39,14	131,64	176,117	(2-13)
D, m	4,316265	2,098061	1,615646	1,57421	(6-7)
H, m	2,88	3,52	11,84	15,84	(6-6)

S obzirom na to da je sastav džibre konstantan grafovi na slici 22 grafički prikazuju rezultate iz tablice 6 u ovisnosti o razlici ξ_g-ξ_d. Na slici 22 lijevo je vidljivo kako se promjer kolone smanjuje s povećanjem razlike ξ_g-ξ_d. To je zato što se protoci q_{mg} i q_{md} smanjuju s povećanjem te razlike kako je prikazano u poglavlju 5. Graf na slici 22 desno pokazuje kako visina kolone raste s povećanjem razlike ξ_g-ξ_d jer se tada traže viši sastavi. S druge strane u tablici 6 se vidi da visina kolone u drugom stupcu naraste u odnosu na prvi iako je sastav ξ_g manji. Do toga dolazi jer se promijenio sastav ξ_d koji pravac jačanja produljuje, a međupravac smanjuje. Kako je pravac jačanja položeniji od međupravca što je pravac jačanja duži biti će veći broj plitica. Koliko je

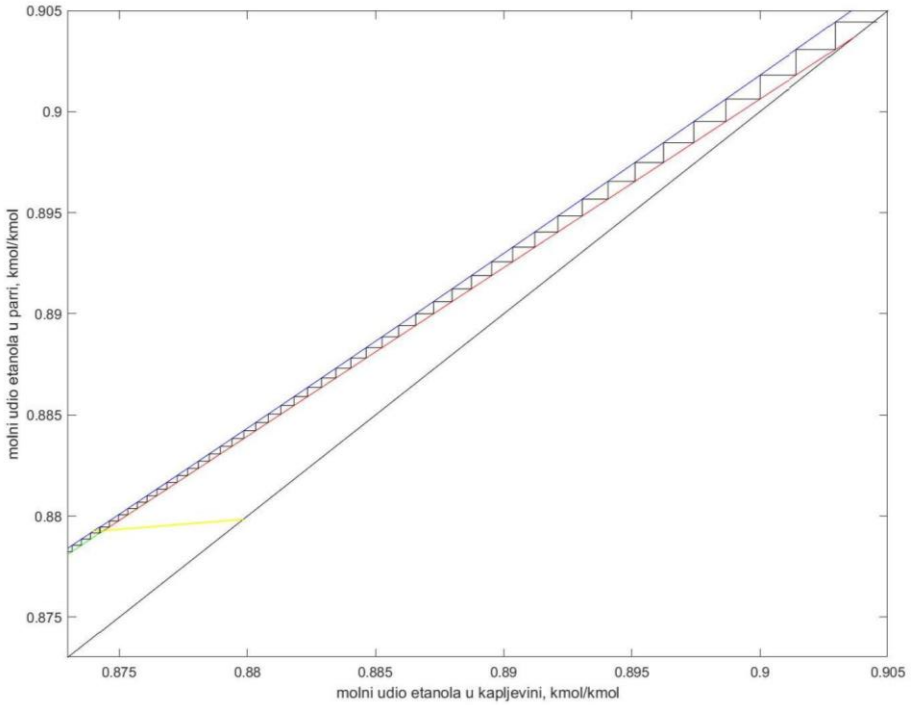
velik utjecaj razlike ξ_g-ξ_d na dimenzije kolone zorno je prikazano na slici 22 jer ako se ta razlika promjeni s 0,0023 kg/kg na 0,0107 kg/kg (promjena od 0,0084 kg/kg) promjer se smanji s 4,32 m na 1,57 m, a visina naraste s 2,88 m na 15,84 m.



Slika 22. Promjena *D* i *H* s razlikom ξ_g-ξ_d

Također je vidljivo da protoci i promjeri sve sporije padaju s povećanjem razlike ξ_g-ξ_d.

Na slici 23 je prikazana situacija McCabe-Thielovog dijagrama kada se u drugoj koloni koristi djelomična kondenzacija što se zaključuje preko pravca napajanja (žuta linija na grafu). Kod djelomične kondenzacije destilat je suhozasićena para koja nakon prigušenja postaje pregrijana i zato pravac napajanja nije horizontalan 2.4.



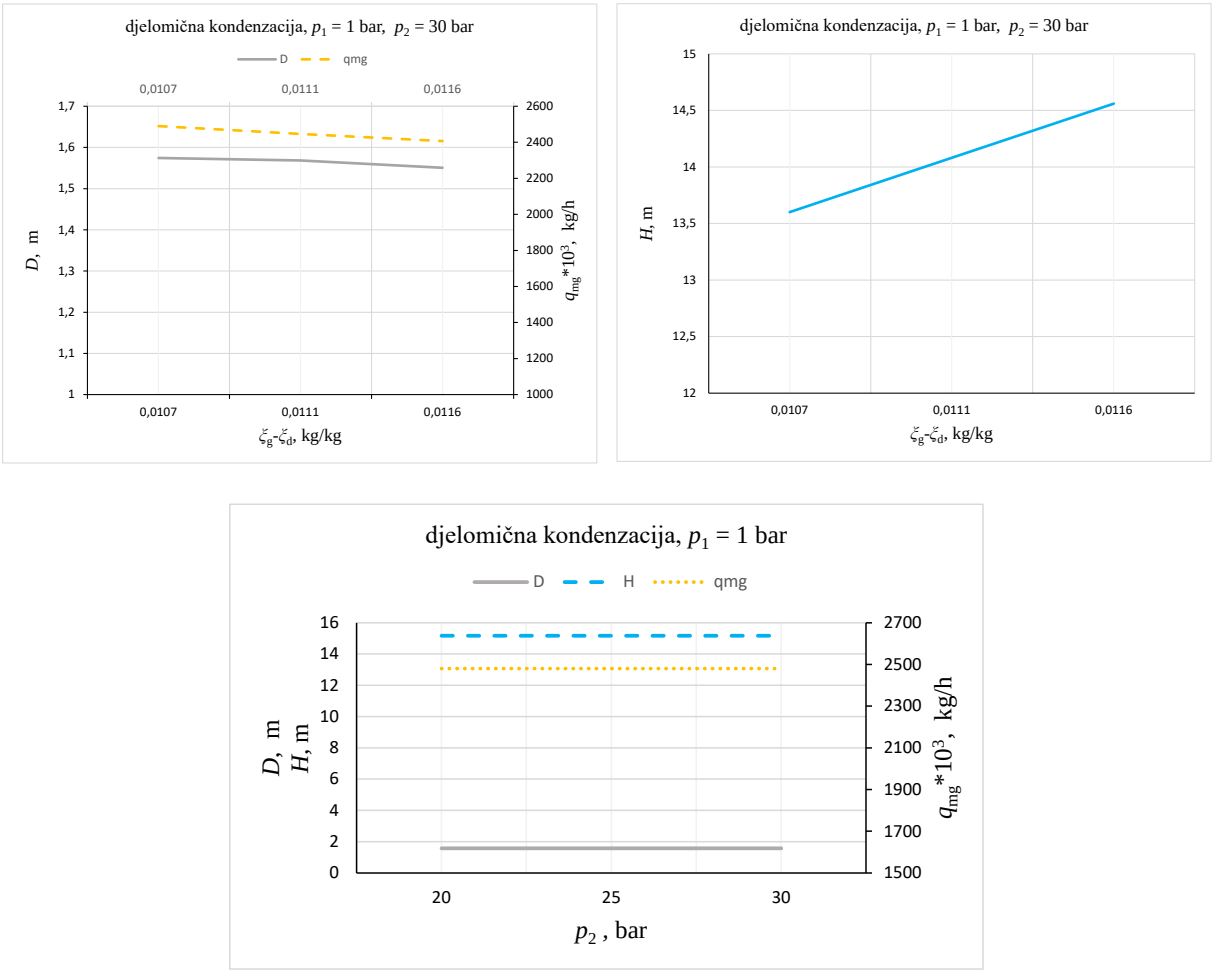
Slika 23. McCabe-Thielov dijagram za nepotpunu kondenzaciju

Tablica 7 prikazuje rezultate okvirnih dimenzija 1. kolone za 30 bar kada se u sustavu koristi djelomična kondenzacija. Sastavi odgovaraju onima iz tablice 2.

Tablica 7. Okvirne dimenzije kolone kod nepotpune kondenzacije

						Jedn.
p_2	30	30	30	25	20	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_s, kg/kg	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9484	0,9489	0,9493	0,9493	0,9493	Odabrano
ξ_{2g}, kg/kg	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	0,9595	Izračunato (podpoglavlje 5.3.)
R_1, kmol/kmol	5	5	5	5	5	Odabrano
n_{i1}, -	4	3	3	3	3	McCT
n_{ij1}, -	54	54	53	53	53	McCT
n_{j1}, -	34	32	30	30	30	McCT
n_{uk1}, -	91	88	85	85	85	McCT
n_1, -	161,8853	156,5484	151,2115	151,2115	151,2115	(2-13)
D, m	1,550519	1,568516	1,57421	1,57421	1,57421	(6-7)
H, m	14,56	14,08	13,6	13,6	13,6	(6-6)

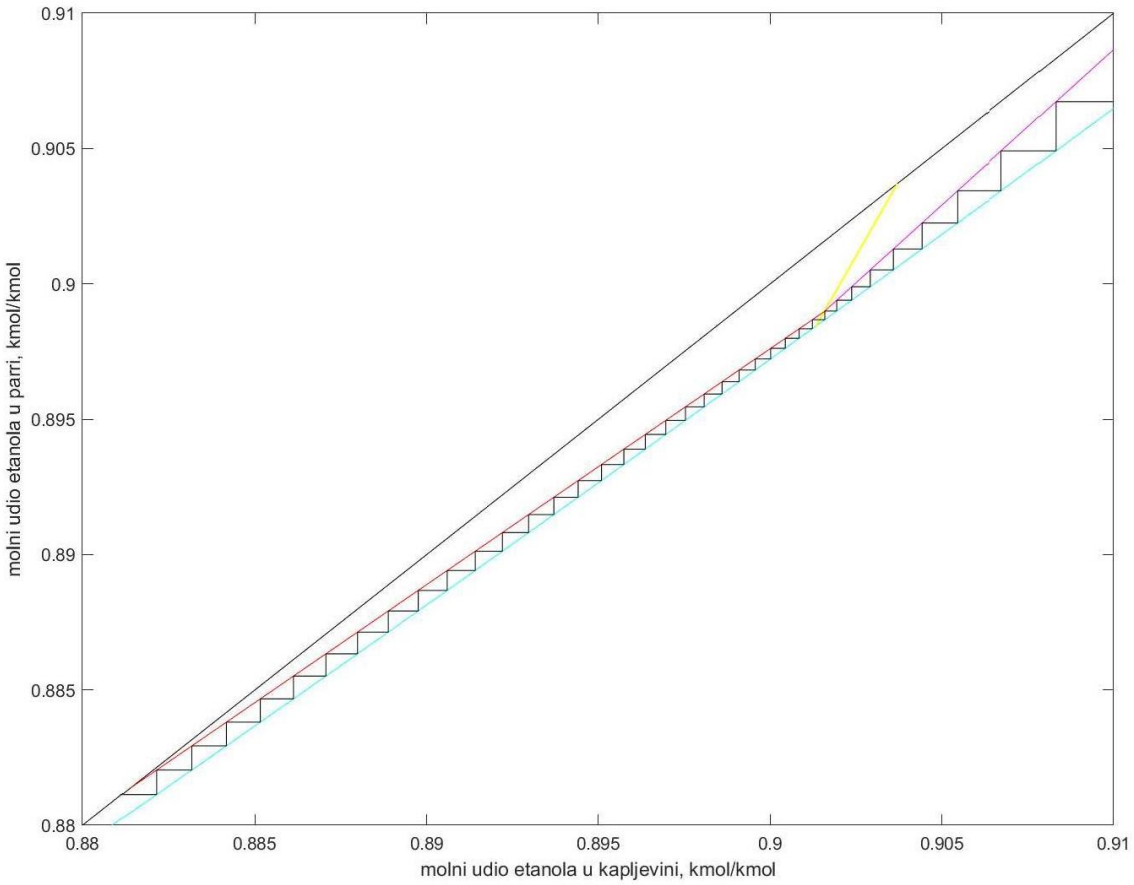
Grafički prikazani rezultati prva tri stupca tablice 7 na slici 24 (lijevo gore) pokazuju da što se više smanjuje razlika ξ_g-ξ_d sve sporije se smanjuje promjer kolone. Ako se ta razlika poveća s 0,0107 kg/kg na 0,0116 kg/kg promjer se spusti s 1,57 m na 1,55 m dok visina kolone naraste s 13,6 m na 14,56 m. Zato iako povećanje razlike ξ_g-ξ_d utječe na smanjenje protoka q_{mg} (time i na protok rashladne vode i suhozasićene pare (poglavlje 5), a na taj način i na smanjenje promjera kolone ne može se povećavati po volji jer visina kolone naglo raste. Na slici 24 dolje prikazani su rezultati zadnja tri stupca tablice. Vidljivo je da promjena tlaka u drugoj koloni ne utječe na dimenzije prve jer su odabrani sastavi ostali isti za sva tri slučaja.



Slika 24. Promjena *D* i *H* s razlikom ξ_g-ξ_d (gore) i Promjena *D* i *H* s razlikom tlakom (dolje)

6.5. Okvirne dimenzije 2. kolone

Na slici 25 je prikazan McCabe-Thielov dijagram za drugu kolonu pod tlakom od 30 bar i s potpunom kondenzacijom. Po nagibu pravca napajanja (žuta linija na grafu) vidljivo je da je riječ o pothlađenoj kapljevini (2.4.). Zbog praktički nestlačivosti kapljevine pumpa ima neznatan utjecaj na promjenu entalpije destilata. Kada se stlači vrelu kapljevinu destilata ona postaje pothlađena jer se zbog povećanja tlaka udaljila od točke zasićenja.



Slika 25. McCabe-Thielov dijagram kolone pod visokim tlakom za potpunu kondenzaciju

Tablica 8 prikazuje rezultate za opisani slučaj. Sastavi odgovaraju onima u tablici 1 i tablici 6. U prvoj koloni iznos refluksa R_1 se držao konstantnim bez obzira koliki je bio minimalan refluks radi smanjenja broja plitica. U drugoj koloni nije konstantan jer minimalan refluks u određenim situacijama prelazi vrijednost od 5 kmol/kmol. Stoga je refluks R_2 računat kao

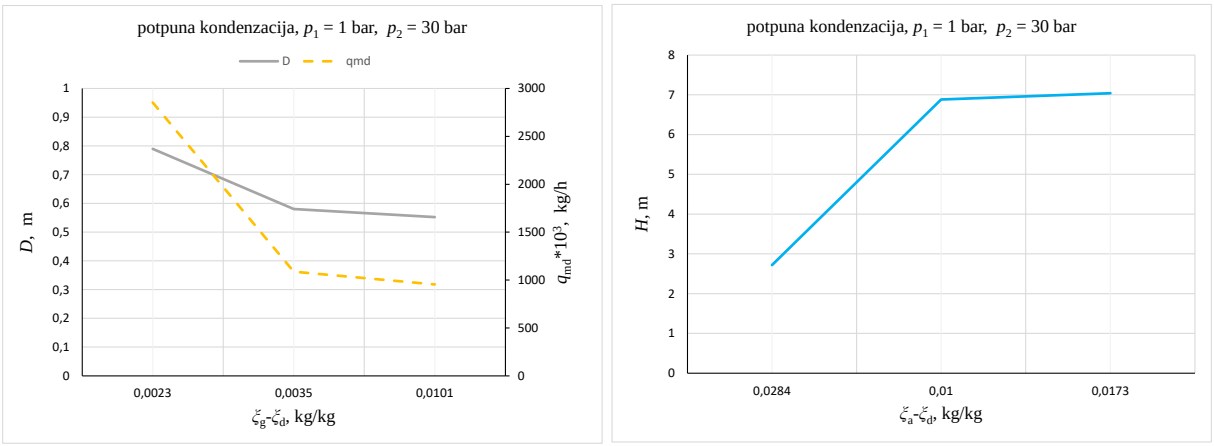
$$R_2 = 1,5 R_{\min}, \tag{6-8}$$

a $R_{\min}$ se određuje na način kako je opisano u 2.4.

Tablica 8. Okvirne dimenzije kolona pod visokim tlakom za potpunu kondenzaciju

					Jedn.
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,98	0,96	0,9667	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,9539	0,9535	0,9595	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9516	0,95	0,9494	0,9493	Odabrano
R_2, kmol/kmol	5,00	5,00	7,12	7,39	(6-8)
n_{i2}, -	21	11	13	12	McCT
n_{j2}, -	4	8	32	34	McCT
n_{uk2}, -	23	17	43	44	McCT
n_2, -	28,58929	21,13122	53,44955	54,69256	(2-13)
D, m	1,931388	0,789984	0,58067	0,552471	(6-7)
H, m	3,68	2,88	6,88	7,04	(6-6)

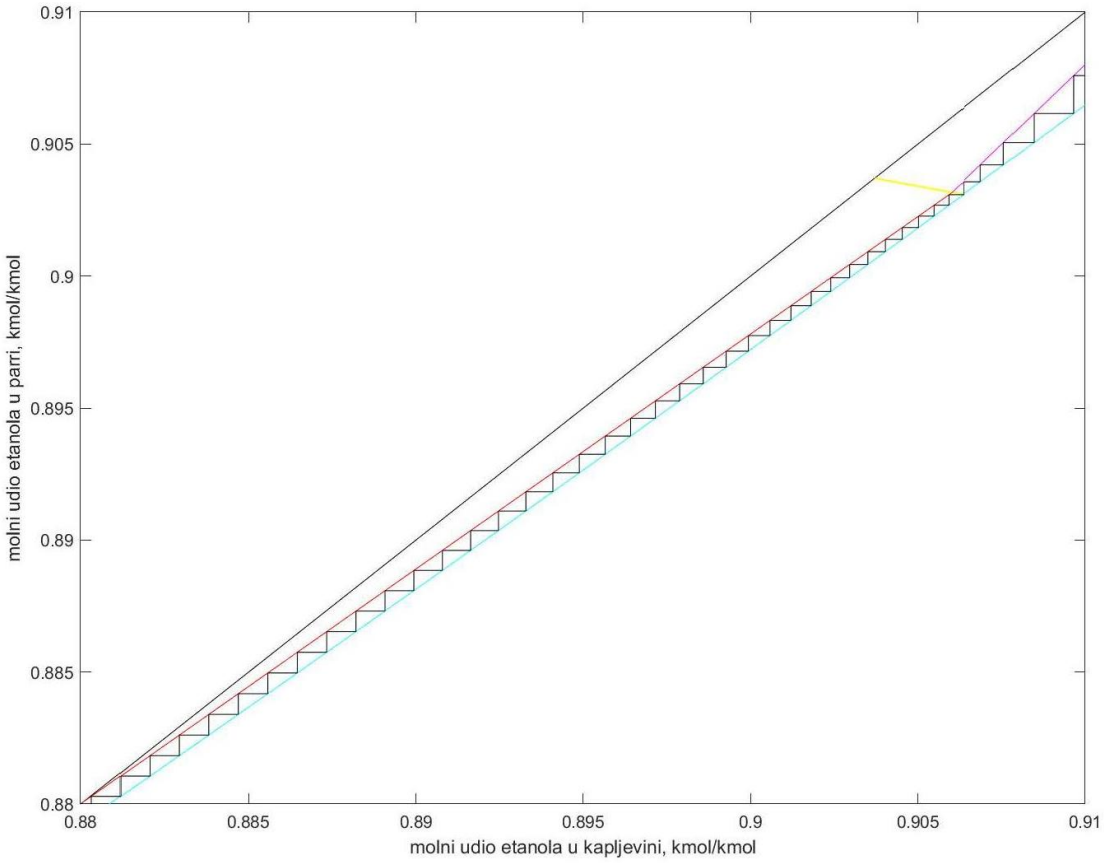
Slika 26 grafički prikazuje kako se promjer 2. kolone smanjuje s razlikom ξ_g-ξ_d. Kako je već do sada opisano što je razlika ξ_g-ξ_d veća protok q_{mg} je manji, a samim time i q_{md} zbog jednadžbe (q_{md}= q_{mg}- q_{ma}). Slika 26 prikazuje kako se visina mijenja s promjenom ξ_a-ξ_d jer druga kolona ima samo jedno napajanje i u ovom dijelu analize ξ_a (koncentracija konačnog produkta, džibre druge kolone) se mijenja. Što je ta razlika veća viša je i kolona jer se traži veća koncentracije džbire i manja koncentracije destilata. U tablici 8 vidljivo je da kada se ona promjeni s 0,01 kg/kg na 0,0174 kg/kg broj plitica naraste za 27, a samim time i visina kolne za 3,36 m. Visina kolone dobivena u prvom stupcu tablice 8 je viša od kolone u drugom stupcu je je sastav ξ_a znatno viši pa je i linija iscrpljivanja viša što nužno povećava visinu cjelokupne kolone.



Slika 26. Promjena *D* i *H* s razlikom ξ_g-ξ_d za kolonu pod visokim tlakom s potpunom kondenzacijom

Kada se koriste sustavi s djelomičnom kondenzacijom McCabe-Thiel-ov dijagram za kolonu pod visokim tlakom izgleda kao na slici 27. Kako je rečeno u 4.3. kod djelomične

kondenzacije potreban je kompresor koji tlači suhozasićenu paru prve kolone na viši tlak. Također navedeno je da se uzima kompresor nakon kojeg dolazi hlađenje pregrijane pare do entalpije destilata prije kompresije. Da bi na višem tlaku bila postignuta ista entalpija kao pod tlakom 1 bar potrebno je ohladiti smjesu do zasićenog područja. Stoga je na slici 27 pravac napajanja mokra para (žuta linija na grafu).



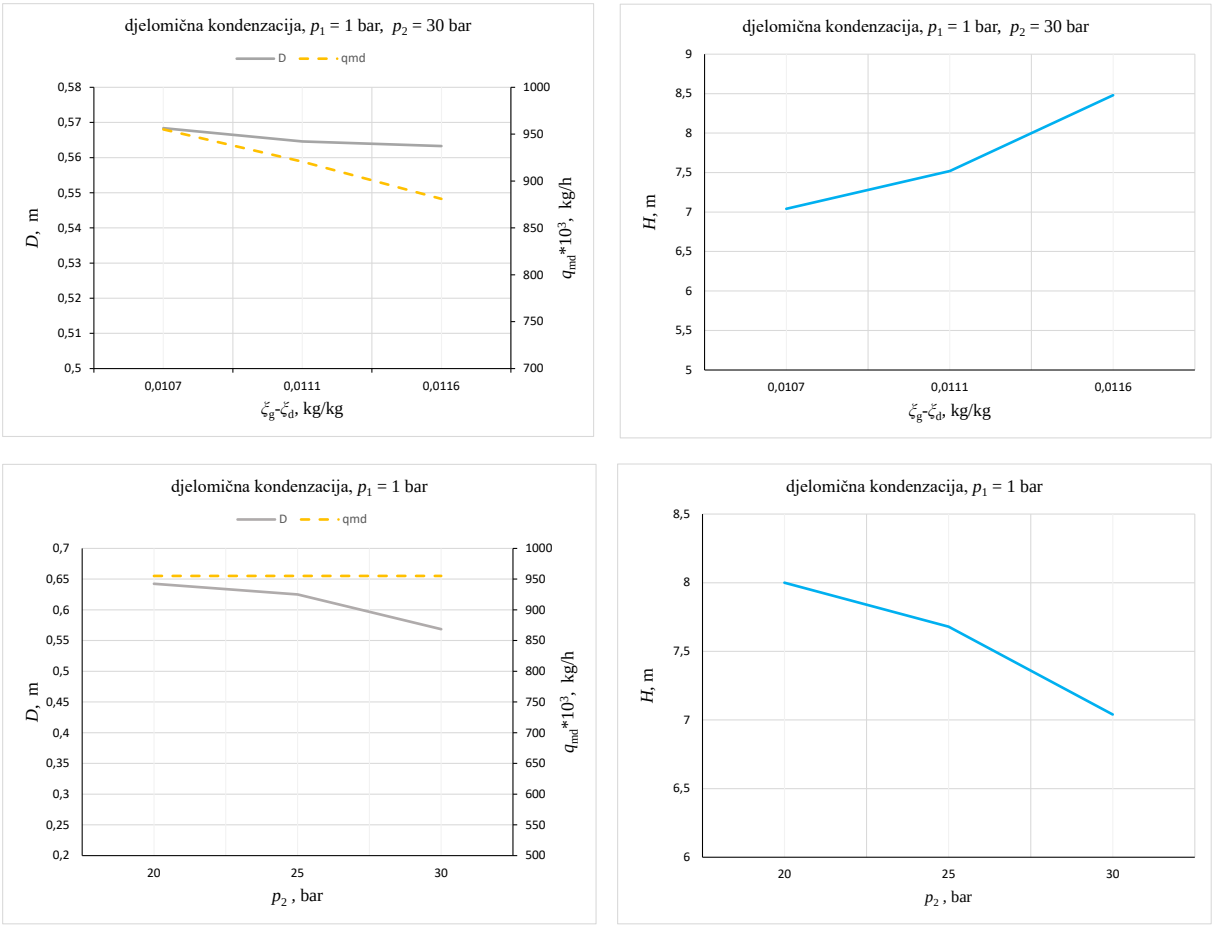
Slika 27. McCabe-Thielov dijagram kolone pod visokim tlakom za nepotpunu kondenzaciju

U tablici 9 su prikazani rezultati analize. Sastavi odgovaraju onima u tablici 2 i tablici 7. Prva tri stupca predstavljaju analizu provedenu za konstantan tlak od 30 bar kada se mijenja sastav ξ_d dok druga tri stupca (uključujući zadnji od 30 bar) predstavljaju promjenu dimenzija kolone u ovisnosti o tlaku uz konstantne sastave.

Tablica 9. Okvirne dimenzije kolona pod visokim tlakom za nepotpunu kondenzaciju

						Jedn.
p2	30	30	30	25	20	Odabrano
ξ_m, kg/kg	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	Odabrano
ξ_a, kg/kg	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	0,9667	Odabrano
ξ_g, kg/kg	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	Odabrano
ξ_d, kg/kg	0,9484	0,9489	0,9493	0,9493	0,9493	Odabrano
ξ_{2g}, kg/kg	0,9485	0,949	0,9494	0,9494	0,9494	Odabrano
R_2, kmol/kmol	8,78	8,39	8,09	8,64	8,87	(6-8)
n_{i2}, -	9	9	9	10	10	McCT
n_{j2}, -	45	39	36	39	41	McCT
n_{uk2}, -	53	47	44	48	50	McCT
n_2, -	65,87968	58,4216	54,69256	59,86104	65,20513	(2-13)
D, m	0,563277	0,564575	0,568353	0,624914	0,642409	(6-7)
H, m	8,48	7,52	7,04	7,68	8	(6-6)

Kako se sada ξ_a drži konstantnim svi grafovi su ponovno prikazani u ovisnosti o razlici ξ_g-ξ_d. Slika 28 gore prikazuje da se promjer jako polako smanjuje s promjenom ξ_g-ξ_d. U slučaju promjene razlike ξ_g-ξ_d s 0,0107 kg/kg na 0,0116 kg/kg promjer se smanji samo za 0,005 m (praktički konstantan promjer) dok visina kolone naraste za 1,44 m. Kako je već rečeno, a vidljivo je i u ovoj situaciji što se više povećava ta razlika protoci i promjer se sve sporije smanjuju, a potrebna visina punila značajno raste. Kao što je pokazano u prethodnim analizama povećanje razlike ξ_g-ξ_d smanjuje promjer kolone i potrebne rashladne i ogrjevne učine, ali nužno povećava potrebnu visinu punila za kolonu.



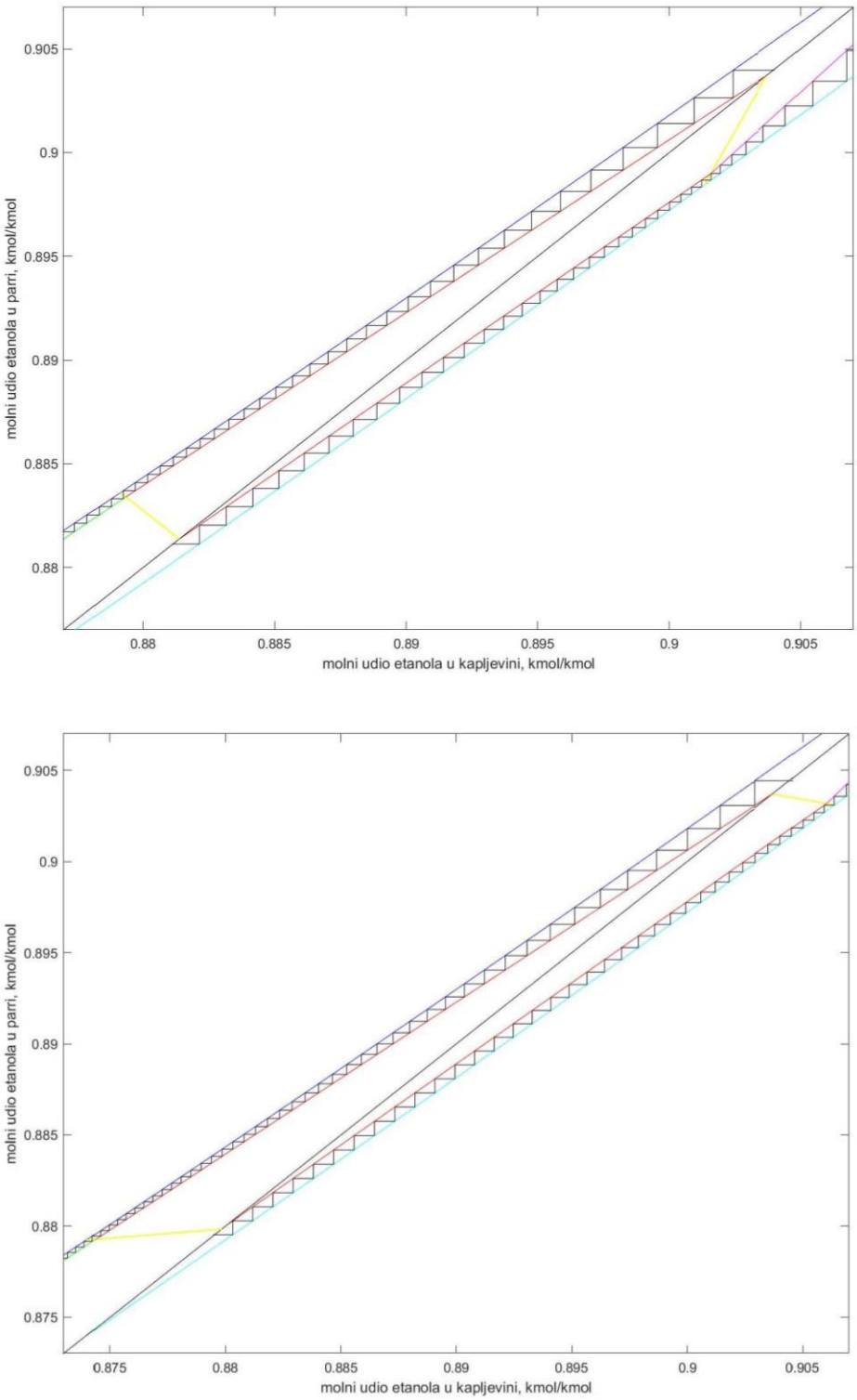
Slika 28. Promjena *D* i *H* s razlikom ξ_g-ξ_d za kolonu pod visokim tlakom s nepotpunom kondenzacijom (gore) i promjena *D* i *H* s promjenom tlaka (dolje)

Donji dio slike 28 prikazuje kako se s promjenom tlaka uz iste sastave promjer kolone umanjuje unatoč konstantnom protoku q_{md}. To je zato što se minimalni refluks mijenja, a sa njime i odabrani refluks R_2. Zato što je ta promjena mala, mala je i promjena promjera. Razlika između promjera kolone na 30 bar i kolone na 20 je 0,074 m dok je promjena visine punila kolone za tu istu promjenu tlaka 0,96 m.

6.6. Spojene kolone

Slika 29 prikazuje kako izgleda McCabe-Thielov dijagram kada se u njega ucrta kolona pod atmosferskim i kolona pod visokim tlakom. Vidljivo je da je destilat jedne kolone komina druge. Na slici 29 gore prikazan je McCabe-Thielov dijagram kada se koristi potpuna kondenzacija u sustavu. To je vidljivo po nagibima pravaca napajanja (žute linije na grafu) jer destilat druge kolone (vrela kapljevina) nakon prigušenja postaje mokra para, dok destilat prve kolone (vrela kapljevina) nakon tlačenja na viši tlak postaje pothlađena kapljevina. Slika 29

dolje prikazuje sustav s djelomičnom kondenzacijom i kompresorom nakon kojeg je izvedeno dodatno hlađenje kako je već rečeno u 4.3. i 6.5. Radi toga suhozasićena para destilata prve kolone nakon kompresora i dodatnog hlađenja postaje mokra para, a suhozasićena para destilata druge kolone postaje pregrijana.



Slika 29. McCabe-Thielov dijagram obiju kolona sa potpunom kondenzacijom (gore) i McCabe-Thielov dijagram obiju kolona sa nepotpunom kondenzacijom (gore)

7. KOLONA S PUNILIMA

S obzirom da se u procesu analize pokazalo da procesi za postizanje azeotropnog ili većeg sastava zahtijevaju kolone s punilima u ovom odjeljku će se dati kratak osvrt u njih. Kao što je rečeno i u 2.4 punila služe kao i plitice, da budu pregrade. Njihova bit je da osiguraju što bolji i duži kontakt na način da silazni tok kapljevine razliju na što veću površinu, a da za uzlaznu paru ostave dovoljno velike presjeke za strujanje da se time pospješi izmjena topline i tvari među njima [3]. Mogu biti napravljena od raznoraznih materijala: metala, drva, stakla… Po izvedbi se dijele na strukturirana i nestrukturirana. Nestrukturirana punila mogu biti raznorazne strugotine ili mogu biti izvedeni kao različita tijela (slika 30).



Slika 30. Razna nestrukturirana punila [12]

Drugi mogući oblik su strukturirana punila. Omogućuju bolju izmjenu topline i mase i zato im je *HETP* manji, ali su radi toga nužno i skuplji. Primjer strukturiranog punila je na slici 31.



Slika 31. Razna strukturirana punila [13]

8. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana energijska analiza azeotropske destilacije s promjenom tlaka. Nakon provedene analize zaključuje se da je to energijski izrazito zahtjevan proces jer zahtjeva puno dovedene topline u kotlićima obiju kolona i puno odvedene topline u kondenzatorima. To je prvenstveno zato jer je vrlo mala razlika u sastavu između destilata prve kolone (komina druge) i destilata druge kolone (dodatno napajanje prve) što znatno povećava protoke kroz kondenzator. To utječe na potreban rashladni učin, a samim time i na potrebnu toplinsku energiju. Drugi razlog tako velikim toplinskom zahtjevima je što se traži visoka koncentracija destilata i vrlo niska koncentracija džibre prve kolone da bi bilo moguće izdvojiti više od 98% etanola ulazne smjese. Povećanjem linija jačanja potreba za toplinskom energijom za pojedinu kolonu raste. Nasuprot tomu što je razlika između destilata kolona veće učin je manji. Analiza je pokazala da povećanje razlike ima veći utjecaj i stoga se vidi smanjenje potrebnih učina unatoč postizanju viših sastava. Prikazano je da porast temperature rashladne vode može značajno smanjiti potrebu za njom i uvijek treba ići na što je veće moguće poraste temperature rashladne vode.

Kao što je rečeno poželjno je imati što veću razliku između sastava destilata kolona. Drugi dio analize pokazao je da to nužno nosi visoke kolone i da je nužno prijeći na izvedbe s punilima kako visina kolone ne bi bila izrazito velika.

Konačno analiza je pokazala da sa smanjenjem tlaka u drugoj koloni, uz uvjet da se žele postići isti sastavi, potrebni učini i visina kolone rastu što ne isključuje te sustave iz analize jer imaju manje zahtjeve na čvrstoću zbog manjih tlakova.

Destilacija s promjenom tlaka je izrazito osjetljiva na promjene u sastavima i traženje optimuma je iteracijski postupak u koji treba uključiti investicijske i pogonske troškove.

LITERATURA

[1] **Hrvatska enciklopedija**, web stranica: *https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=14783* , veljača 2021.

[2] *Ferdelji N.*, **Predavanje iz kolegija *Termodinamika smjesa***, FSB, Zagreb, 2020.

[3] *Andrassy M.*, **Podloge za predavanja iz kolegija *Toplinske operacije*,** FSB

[4] *Kiss A.A.*, **Distillation, Azeotropic Distillation,** AkzoNobel, Deventer, 2013

[5] Web pdf predložak: https://www.chemicalprocessing.com/assets/Media/PublicationsArticle/ColumnMapFigs.pdf

[6] **The Essential Chemical Industry – online**, web stranica: https://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/ethanol.html , veljača 2021.

[7] *Halasz, B., Galović A., Boras, I.*, **Toplinske tablice**, FSB, Zagreb, 2010.

[8] *Hadrich B., Kechaou N.*, **Identification of Vest Model for Equilibrium Dana of Ethanol-Water Mixture**, National Engineering School of Sfax, 2010.

[9] *Duss M., Taylor R.*, **AIChE The Global Home of Chemical Engineers,** web stranica: https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2018/july/predict-distillation-tray-efficiency , veljača 2021.

[10] Koch-Glitch, **Structured packing,** katalog: https://www.koch-glitsch.com/Technical-Documents/Brochures/Structured-Packing-Brochure , veljača 2021.

[11] *M.R. Resetarits, M.J. Lockett*, **Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)**, 2003.

[12] **IndiaMART, Industrial & Engineering Goods**, Tower Packing, Random Packing, web stranica: https://www.indiamart.com/proddetail/random-packing-15686161333.html , veljača 2021.

[13] *Maurice I. Stewart Jr.*, **Surface Production Operations (Third Edition), Volume 2**, 2014.

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

[15] *Ferdelji N.*, **Predavanje iz kolegija *Toplinske operacije***, FSB, Zagreb, 2020.