

Optimizacija Kaibelove kolone za separaciju smjese ugljikovodika

Galov, Daniel

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:294948>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Daniel Galov

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, Rujan 2019

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Daniel Galov

Optimizacija Kaibelove kolone za separaciju smjese ugljikovodika

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: doc. dr. sc. Igor Dejanović, redoviti profesor

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof.dr.sc. Aleksandra Sander

Izv.prof.dr.sc. Krunoslav Žižek

SAŽETAK

Destilacija je proces za separaciju kapljevutih smjesa na produkte na temelju razlika u vrelištu pojedinih komponenata. Ova energetski intenzivna separacijska tehnika je među najčešće korištenima u procesnoj industriji te je jedan od glavnih potrošača energije. Radi toga, i najmanje uštede u potrošnji energije predstavljaju značajno smanjenje pogonskih troškova postrojenja.

Jedan od načina povećanja energetske djelotvornosti procesa destilacije je korištenje toplinski povezanih destilacijskih nizova, a jedan od njih je tzv. Kaibelova kolona. U suštini, Kaibelova kolona sastoji se od tri binarne destilacijske kolone za separaciju pojne smjese na četiri proizvoda, izvedene unutar jednog plašta. S obzirom da su kolone međusobno povezane toplinskim vezama, dovoljan je jedan kondenzator i jedan isparivač za provođenje separacije. Ovakva konfiguracija može ostvariti znatne energetske uštede u odnosu na nizove konvencionalnih binarnih destilacijskih kolona.

Cilj ovog rada je simuliranje takve kolone za separaciju smjese aromatskih ugljikovodika te potom optimizacija i dimenzioniranje čime bi se dokazale navedene energetske uštede te prikazale financijske uštede koje ovakvi sustavi mogu ostvariti.

Ključne riječi: destilacija, Kaibel kolona, ušteda energije, CHEMCAD, optimizacija

SUMMARY

Distillation is a process used for separating liquid mixtures based on differences in boiling points of each component. This intensive separation technique is among the most used ones in modern process industry and one of the most energy consuming industrial processes. Due to that even the slightest energy savings can mean a significant reduction in operating costs for the plant.

One of the ways of improving energy efficiency is using thermally coupled distillation columns one of which is the so called Kaibel column. Basically the Kaibel column represents three binary distillation columns for separating a mixture into four products, installed into just one shell. Since the columns are fully thermally coupled only one reboiler and one condenser is needed to perform the separation. This kind of column configuration brings significant energy savings in comparison to a conventional distillation column arrangement.

The aim of this work is to simulate such a column for separating an aromatics mixture and afterwards optimising and sizing of the equipment in order to prove the potential energy savings and financial benefits such systems can achieve.

Key words: distillation, Kaibel column, energy savings, CHEMCAD, optimisation

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	3
2.1. Proces destilacije.....	3
2.1.1. Fazni dijagrami	4
2.1.4. Difuzija	6
2.1.2. Teorijski stupanj.....	6
2.1.3. Stripiranje, rektifikacija, frakcionacija.....	8
2.2. Destilacijske kolone	15
2.2.1. Kolone s pliticama	19
2.2.2. Kolone s punilima	24
2.2.3. Toplinski povezane kolone	29
3. MATERIJALI I METODE	34
3.1. CHEMCAD.....	34
3.2. Separacijski zadatak.....	35
3.3. Metodika	37
4. REZULTATI I RASPRAVA	45
5. ZAKLJUČAK.....	51
6. POPIS OZNAKA.....	52
7. LITERATURA	54
8. ŽIVOTOPIS.....	56

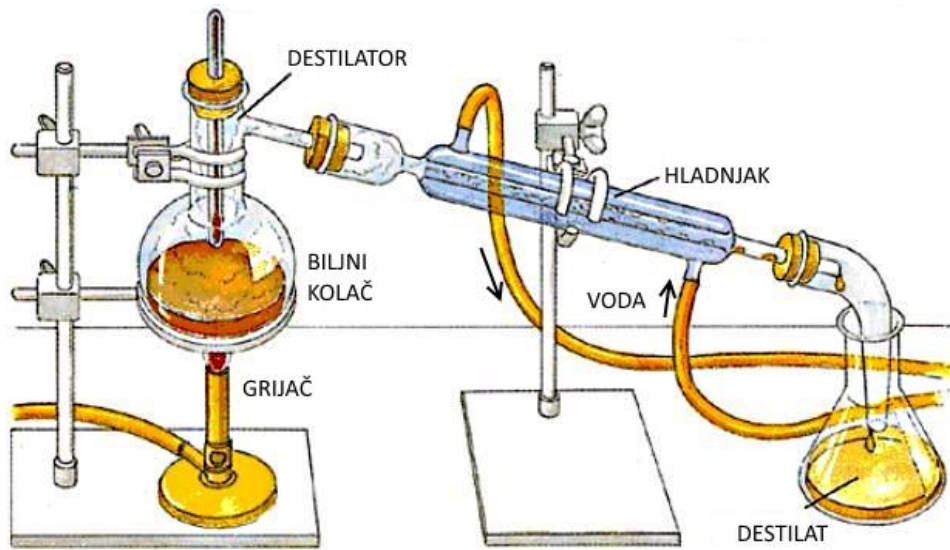
1. UVOD

Destilacija je proces razdvajanja smjese na dvije ili više komponente na temelju razlike u vrelištima. Kapljevit smjesa dviju ili više komponenti se zagrijava i djelomično isparava, prilikom čega se smatra da para koja je u ravnoteži s kapljevinom sadrži više lakše hlapljivih komponenti tj. komponenti s nižim vrelištem.

Proces je poznat već stoljećima. U spisima koji datiraju oko 800. godine, destilacija se smatra jednom od sedam operacija alkemije. Najstarija poznata primjena destilacije je uređaj za isparavanje i koncentraciju alkohola u napitcima. Prvi točan opis postupka destilacije za dobivanje vode, alkohola i eteričnih ulja dao je Albert Magnus (1316. – 1390.). Prvom kolonom za destilaciju smatra se kolona Cellier-Blumenthala iz 1813. godine (Francuska). Plitice sa zvonima se prvi put koriste 1822. u Engleskoj. Prvim punilima smatraju se staklene kuglice kojima su se punile kolone (1820.). Prvom literaturom o osnovama destilacije smatra se " La rectification de l'alcohol " od Ernesta Sorela.¹

Pojam destilacije je kroz povijest obuhvaćao različite tehnike. Sredinom prošlog stoljeća destilacijom se smatralo jednostupanjsko odvajanje produkata, kao npr. frakcijska destilacija. Višestupanjska destilacija nazivala se rektifikacijom. U američkoj literaturi pod pojmom destilacija podrazumijeva se jednostupanjska destilacija i rektifikacija. Ovakva terminologija s vremenom se sve više prihvaća i u europskoj literaturi.¹

Na *Slici 1.1.*² vidljiva je oprema za provedbu destilacije u laboratorijskom mjerilu. Proces destilacije smatra se jednim od glavnih potrošača energije na globalnoj razini. Tako veliki udio u potrošnji, u kombinaciji sa stalnim porastom potrebe za energijom i razvojem industrije, iziskuje optimiziranje procesa do najsitnijih detalja kako bi se umanjili pogonski troškovi i kako bi proces bio ekološki što prihvatljiviji. Takav pristup rezultira pojavom sofisticiranih procesnih jedinica kao što su Kaibelove i Petlyukove kolone, koje integriraju toplinu struja te tako minimiziraju potrošnju i potrebu za ogrijevnim ili rashladnim medijima.



Slika 1.1. Oprema za provedbu destilacije u laboratorijskom mjerilu²

2. OPĆI DIO

2.1. Proces destilacije

Kao što je već spomenuto, procesom destilacije smatra se fizičko razdvajanje smjese na komponente različitih vrelišta. Drugim riječima, temelji se na ravnoteži para – kapljevina. Idealni model destilacije podvrgava se u potpunosti Daltonovom i Raoultovom zakonu. Daltonov zakon objašnjava ukupni tlak kao sumu parcijalnih tlakova pojedinih komponenti smjese. Zagrijavanjem višekomponentne smjese, tlak pare svake pojedine komponente raste, što rezultira porastom ukupnog tlaka para smjese. Kada tlak pare dosegne tlak okoline smatramo da komponenta vrije. Bitno je naglasiti da lakše hlapive komponente nikada ne "vriju prve". Pri temperaturi vrelišta sve hlapive komponente isparavaju, a udio pojedine komponente u pari jednak je udjelu parcijalnog tlaka komponente u ukupnom tlaku para.¹

$$P_{total} = \sum p_i \quad (1)$$

Raoultov zakon govori da je tlak para otapala, koje se nalazi u ravnoteži sa razrijeđenom otopinom, izravno proporcionalan molarnom udjelu otapala u otopini.

$$p = x \cdot p_0 \quad (2)$$

Postoji nekoliko vrsta destilacija od kojih svaka na određeni način olakšava separaciju ili je čini specifičnijom za odvajanje pojedine skupine komponenti. Neke od poznatijih vrsta destilacije su: vakuum destilacija, šaržna destilacija, frakcijska destilacija, azeotropna destilacija, molekulska destilacija itd. Superiornost destilacije nad ostalim separacijskim postupcima obrazlaže se kinetikom i termodinamikom procesa. S kinetičkog stajališta destilacija je vrlo povoljan separacijski proces jer je brzina prijenosa ograničena jedino otporom difuziji u oba granična sloja na međufaznoj površini para-kapljevina. U većini ostalih separacija postoji inertni medij (npr. adheziv, inertno otapalo itd.) koji smanjuje gustoću toka prijenosa tvari.¹

Termodinamička djelotvornost procesa, koju definiramo omjerom minimalno potrebnog rada i stvarno utrošenog neto rada, je u prosjeku 10%, a upotrebom međugrijača ili međukondenzatora moguće je dosegnuti i veće vrijednosti. Unatoč činjenici da 10% djelotvornosti nije mnogo, ne postoji veliki broj povoljnijih separacijskih procesa zbog čega se destilacija smatra najboljim i najjeftinijim postupkom za separaciju kapljevinih smjesa.¹

Iako je vrlo često primjenjivan proces, postoje slučajevi u kojima destilacija nije optimalno rješenje, kao što su:

- korozivne smjese ili smjese sa velikom koncentracijom nečistoća izazvat će kontaminaciju opreme što iziskuje čišćenje iste te samim time onemogućuje kontinuiranu proizvodnju i znatno podiže pogonske troškove
- pojna smjesa sadrži malu količinu tvari visokog vrelišta koju želimo separirati. Ovakav sastav smjese zahtjeva isparavanje cijele mase kako bi se odvojila mala količina željene komponente.
- jedna od komponenti je termički nestabilna, što će izazvati degradaciju ili modifikaciju iste te željeni proizvod neće imati željena svojstva
- relativna hlapivost komponenti ima bliske vrijednosti. Separacija takve smjese energetski je vrlo nepovoljna.^{1,3}

2.1.1. Fazni dijagrami

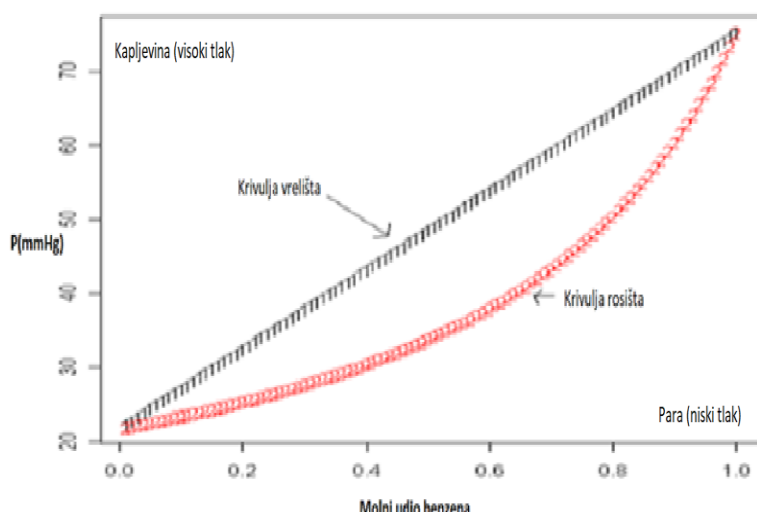
Fazni dijagrami su grafički prikazi koji se koriste da bi opisali ponašanje binarnih sustava pri različitim temperaturama. Takvi dijagrami prikazuju međusobne ovisnosti dviju od tri varijabli binarnih sustava uz konstantnu treću varijablu. Najčešće varijable su: tlak, temperatura i sastav. Na *Slici 2.1.*⁴ vidljive su karakteristične krivulje isparavanja i krivulje kondenzacije. Vrelište i rosište računaju se pomoću sljedećih jednažbi:¹

- Vrelište

$$\sum K_i \times x_i \quad (3)$$

- Rosište

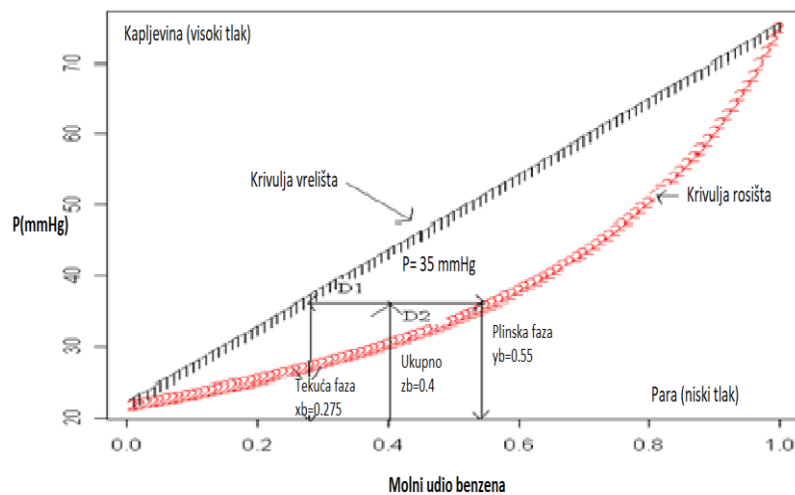
$$\frac{\sum y_i}{K_i} = 1 \quad (4)$$



Slika 1.1. P-x/y dijagram binarne smjese benzen-toluen⁴

Osim navedenih krivulja na grafičkom prikazu vidljive su i druge bitne informacije. Vidljiva su sjecišta dviju krivulja u točkama $x_{\text{Benzen}}=0$ i $x_{\text{Benzen}}=1$. Ta sjecišta predstavljaju tlakove para čistih komponenti pri temperaturi od 20^o C. Poznavajući tlak i sastav, možemo odrediti hoće li određena smjesa biti u tekućem, plinovitom ili dvofaznom stanju što je vrlo bitan polazni faktor prilikom dizajniranja i vođenja procesa. Udio benzena u sustavu je 40 % pri tlaku od 25 mmHg. Čitava smjesa će pri takvim uvjetima biti u plinovitom stanju, a porastom tlaka do npr. 50 mmHg, smjesa će se u potpunosti ukapljiti. Prema tome, može se zaključiti da će dizajn šarzne destilacije ovakvog sustava pri 20^o C zahtijevati tlak između 30 i 40 mmHg.

Na Slici 2.2.⁴ vidljiv je princip određivanja faznog stanja. Ako je poznat ukupni sastav smjese i tlak para, možemo odrediti stanje pojedine komponente i udio iste komponente u binarnoj smjesi. Iz točke poznatog sastava jedne od komponenti sa x-osi prati se vertikalna linija do željenog tlaka. Povlačimo potom kroz dobivenu točku liniju paralelnu sa x osi. Sjecište dobivenog pravca s krivuljom vrelišta nam daje sastav tekuće faze, a sjecište pravca s krivuljom rosišta daje sastav plinovite faze. Ovakav princip daje točna rješenja jer tlak pojedine faze mora biti konstantan dok su faze u ravnoteži.⁴



Slika 2.2. Određivanje faznog stanja komponenti binarnog sustava⁴

Vrlo koristan princip je i pravilo poluge koje se koristi kod faznih dijagrama kako bi odredili ukupni udio smjese koji se nalazi u pojedinoj fazi, a računa se prema formuli (Slika 2.2.):⁴

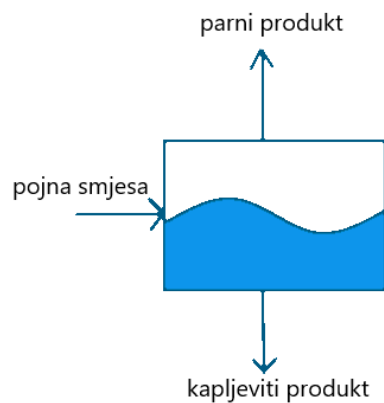
$$\% \text{ kapljevine} = D2 / (D1 + D2) \quad (5)$$

Ukratko, fazni dijagrami daju okviran pregled stanja i sastava pojedinih faza i odličan su alat za početak dizajna procesa.

2.1.2. Teorijski stupanj

Teorijski stupanj u brojnim separacijskim procesima predstavlja hipotetsku zonu ili stupanj u kojem dvije faze (kapljevina i para neke komponente) uspostavljaju ravnotežu. Učinkovitost separacijskih procesa raste s porastom broja teorijskih stupnjeva. Drugim riječima, veći broj teorijskih stupnjeva znači veću djelotvornost destilacijskog procesa. Teorijski stupanj u destilacijskoj koloni treba ispunjavati sljedeće uvjete:

1. Radi u stacionarnom stanju i ima dva produkta
2. Para i kapljevina na teorijskom stupnju su u međusobnom kontaktu i idealno pomiješani
3. Ukupna para koja napušta teorijski stupanj je u ravnoteži sa ukupnom kapljevinom koja napušta teorijski stupanj.¹



Slika 2.3. Opći prikaz idealnog destilacijskog stupnja

Budući da se na fizičkom stupnju destilacijske kolone (plitica) nikad ne može uspostaviti ravnoteža, broj potrebnih stupnjeva je uvijek veći od broja teorijskih stupnjeva. Broj potrebnih stupnjeva se izračunava prema jednadžbi:

$$N_a = \frac{N_t}{E} \quad (8)$$

gdje su:

N_a – broj potrebnih stupnjeva

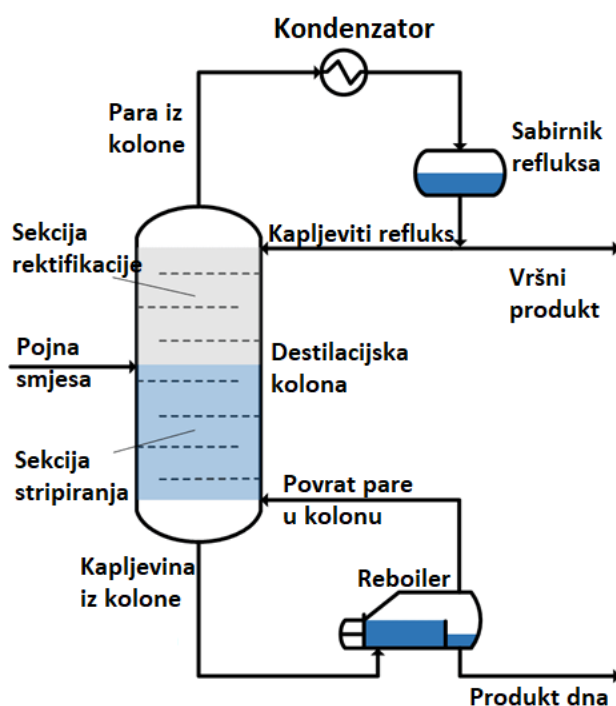
N_t - broj teorijskih stupnjeva

E – djelotvornost plitice

Plitice, odnosno stupnjevi u destilacijskoj koloni, proizvode se obično od čeličnih ploča te se postavljaju duž kolone u intervalima od 60 – 75 cm. Takva izvedba odabrana je kako bi se olakšala instalacija te pristup pojedinim sekcijama kolone zbog eventualnih održavanja. Jedan od jednostavnijih primjera kontaktnog tijela je sitasta plitica. Željeni kontakt faza ostvaruje se tako da para struji određenim protokom kroz šupljine u plitici prema gore te na taj način prolazi kroz kapljevinu koja se slijeva niz pliticu. Kontakt se može pospješiti i dodavanjem tzv. zvona na šupljine, ali o pojedinim izvedbama kontaktnih tijela će biti govora u daljnjim poglavljima.¹

2.1.3. Stripiranje, rektifikacija, frakcionacija

Para koja s dna kolone struji prema vrhu prolazi kroz kapljevину te odlaskom s teorijskog stupnja postaje bogatija na lakše hlapivoj komponenti, a shodno tome kapljevina postaje bogatija teže hlapivom komponentom. Drugim riječima, para koja dolazi na stupanj isparava hlapiviju komponentu iz kapljevine. Takav način koncentriranja teže hlapive komponente u kapljevini nazivamo stripiranje.¹



Slika 2.4. Sekcije frakcionatora⁵

Para za stripiranje generira se isparavanjem dijela kapljevine u isparivaču na dnu kolone. Kapljevina koja dolazi na određene stupnjeve, tzv. pretok, izdvaja teže hlapivu komponentu iz pare kondenzacijom. Stupnjevi na kojima se taj proces događa nazivaju se rektifikacijski stupnjevi. Stupnjevi rektifikacije i stripiranja međusobno se povezuju u frakcionaciju. Frakcionator je destilacijska kolona sa sekcijom stripiranja i rektifikacije te mogućnošću izdvajanja većeg broja komponenti. U ovakvoj koloni stupnjevi koji se nalaze iznad pojnog stupnja predstavljaju sekciju rektifikacije na čijem vrhu se nalazi sustav za kondenzaciju dobivenog destilata. Para se odvodni do kondenzatora gdje se izvršava izmjena topline te na taj način ukapljivanje produkta koji se skladišti u posudama. Stupnjevi ispod pojnog stupnja u

frakcionatoru nazivaju se sekcijom stripiranja, a na dnu sekcije nalazi se isparivač koji služi za dobivanje pare isparavanjem dijela produkta dna.⁵

Uzimajući u obzir kolonu prikazanu na slici mogu se napisati bilance tvari. Ukupna bilanca za kolonu je;

$$F = D + B \quad (9)$$

gdje je:

F - protok pojnog stupnja

D - protok destilata

B - protok produkta dna

A bilanca za pojedinu komponentu:

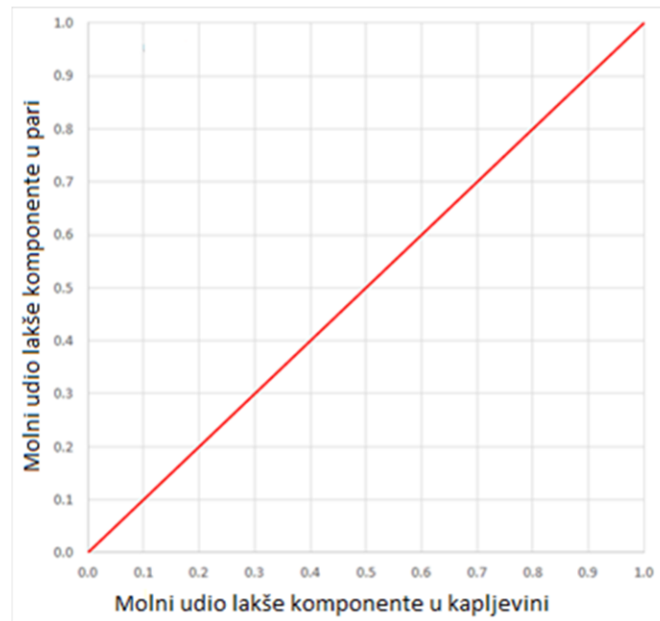
$$F \times z = D \times x_D + B \times x_B \quad (10)$$

Kada se raspišu sve bilance, koristi se najčešće McCabe-Thiele metoda za određivanje broja ravnotežnih stupnjeva za danu pojnu smjesu. Metoda je grafička metoda koja se uglavnom koristi kod separacija dvokomponentnih sustava. Veliki broj realnih procesa je prekompleksan za ovu metodu, ali unatoč tome ona predstavlja izvrstan alat za opis separacija pomoću plitica kao i opis utjecaja refluksnog omjera, sastava pojne smjese i sastava produkta na dizajn kolone. Koriste se sljedeće pretpostavke:

- pojna smjesa je binarna, tj. sastoji se od samo dvije komponente
- toplinska dužnost za dvije komponente je jednaka, tj. isparavanjem jednog mola teže komponente dolazi do kondenzacije jednog mola lakše komponente
- ostali termodinamički učinci su zanemarivi (npr. toplina otapanja)
- 100 - postotna djelotvornost pojedine plitice; u praksi se ne postiže ravnoteža parakapljevina na svakoj plitici.¹

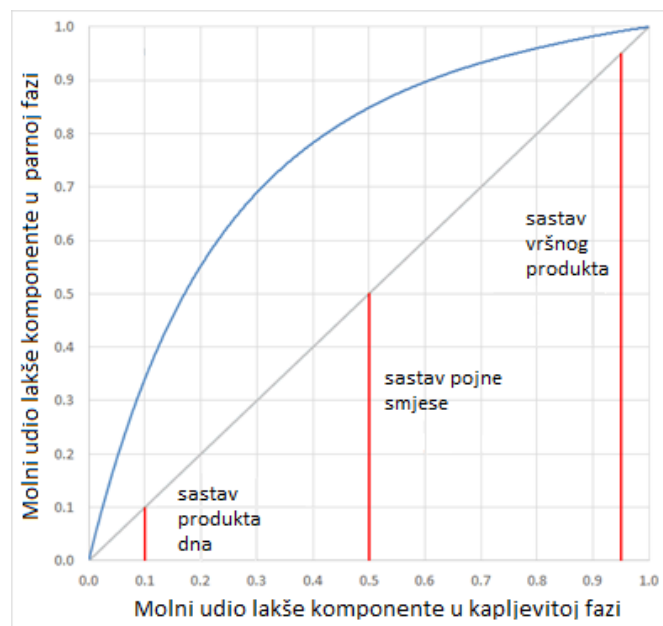
Za izradu dijagrama potrebno je poznavati sastav pojne smjese, temperaturu ukapljivanja i vrelišta pojne smjese te željeni sastav vrha i dna. Započinje se izradom x-y grafa. Na x os se upisuje množinski udio lakše komponente u tekućoj fazi, a na y os množinski udio lakše

komponente u parnoj fazi. Potom se ucrtava linija pod kutem od 45° iz ishodišta do desnog gornjeg kuta odnosno iz (0,0) u (1,1).



Slika 2.5. Ucertavanje linije pod kutem od 45° u McCabe-Thiele dijagram⁶

Slijedi unošenje podataka za sastav pojedinih faza te se označava sastav pojne smjese kao i sastav produkta vrha i dna na x osi (Slika 2.6.).⁶

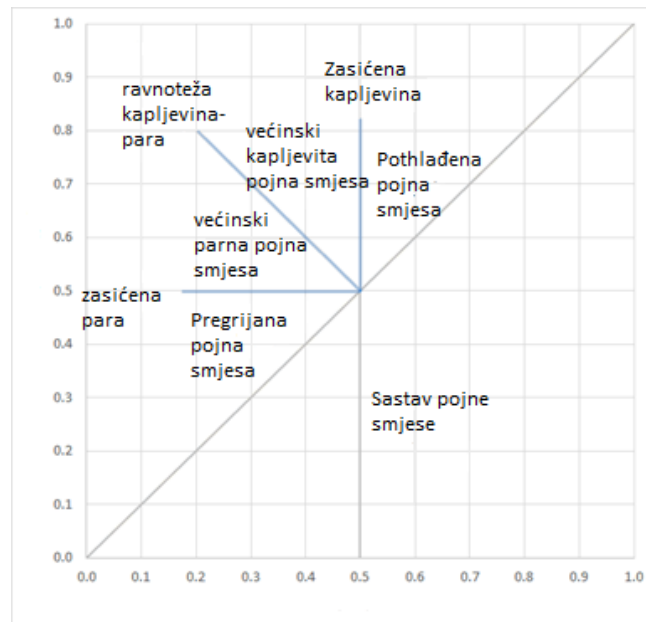


Slika 2.6. Ucertavanje sastava pojne smjese, destilata i produkta dna⁶

Na dizajn kolone uvelike utječe udio pare u pojnoj smjesi kao i temperatura iste. O navedenim parametrima ovisit će nagib linije koja predstavlja pojnu smjesu (Slika 2.7).⁶ Kada je pojna smjesa 50 mol% kapljevina linija će biti okomita na pravac od 45°. Kada je pojna smjesa zasićena kapljevina linija je vertikalna, a kada je zasićena para linija je horizontalna. Za pojne smjese koje sadrže određene postotke pare i kapljevine koristi se sljedeća jednadžba za određivanje nagiba linije;

$$m = \frac{q}{q-1} \quad (11)$$

gdje je q molni postotak kapljevine u pojnoj smjesi.⁶



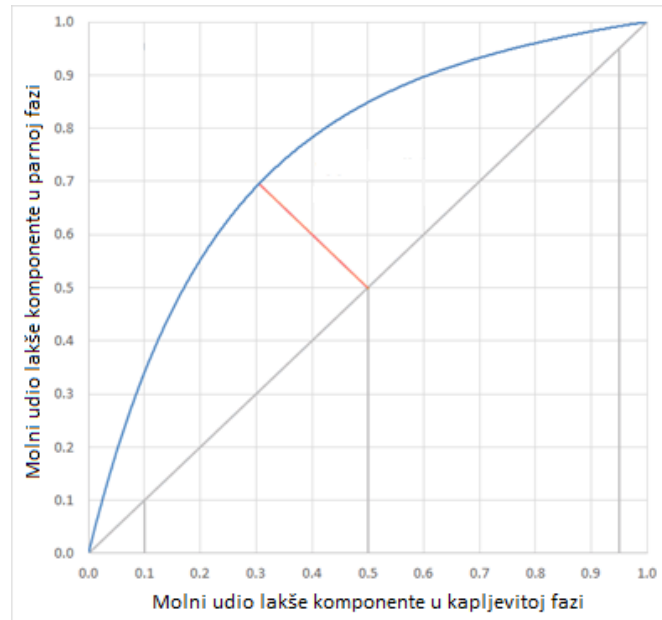
Slika 2.7. Nagib linije pojne smjese ovisno o sastavu⁶

Ako je pojna smjesa pothlađena kapljevina ili pregrijana para, prvo se određuje vrijednost q prema formuli:

$$q = 1 - \frac{T_f - T_b}{T_d - T_b} \quad (12)$$

te se nakon toga koristi gore navedena formula za nagib. Za pothlađenu kapljevinu nagib je između pravca 45° i vertikalnog položaja a za pregrijanu paru nagib je između pravca 45° i

horizontalnog položaja. Kada se izračuna nagib, ucrtavamo pravac od mjesta gdje pravac pojne smjese siječe pravac 45° do krivulje ravnoteže para kapljevina (Slika 2.8.).⁶



Slika 2.8. Ucrtavanje linije pojne smjese nakon izračuna nagiba⁶

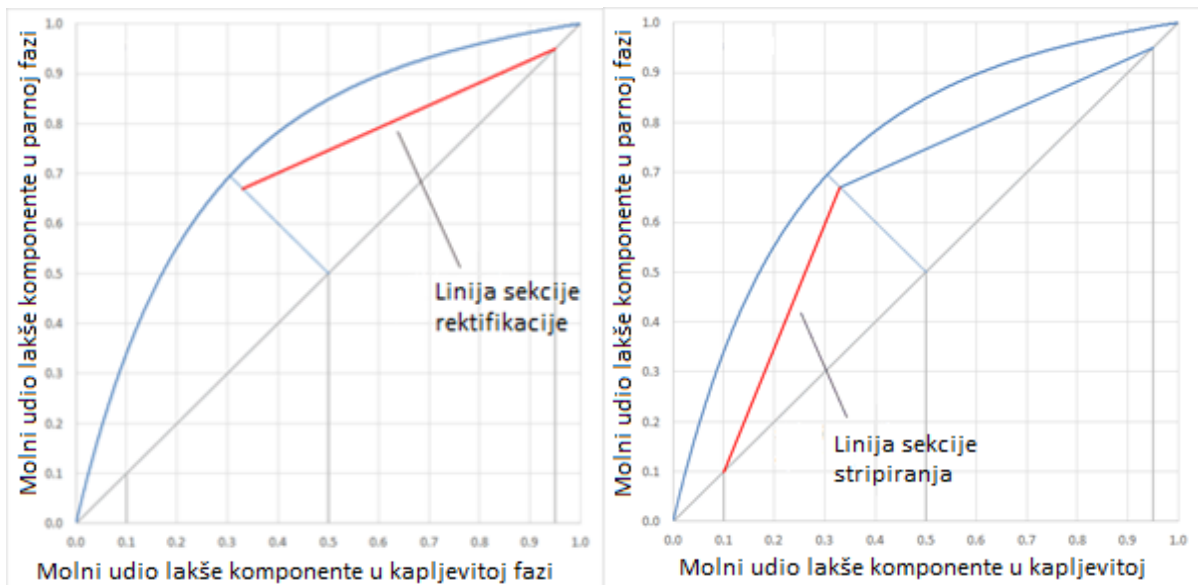
Kao što je već opisano, para koja izlazi na vrhu kolone se hladi i ukapljuje. Dio ukapljene struje se odvodi kao vršni produkt, a dio se vraća natrag u kolonu kao refluks. Kapljevita struja refluksa teče niz kolonu u suprotnom smjeru od pare te "izmjenjuje" težu komponentu u pari za lakšu komponentu iz kapljevine, koncentrirajući lakšu komponentu u pari. Linija sekcije rektifikacije predstavlja količinu kapljevine koja se vraća u sekciju kao refluks. Povećanjem refluksa u dijagramu se dobiju veći koraci što rezultira manjim brojem potrebnih plitica. Da bi bilo moguće odrediti nagib linije rektifikacije potrebno je poznavati molne protoke vršnog produkta D , kao i refluksa L :

$$m = \frac{L}{(D+L)} \quad (13)$$

Nakon izračuna nagiba ucrtava se linija sekcije rektifikacije od mjesta gdje linija sastava vršnog produkta siječe pravac 45° do linije pojne smjese (Slika 2.9.).⁶ Na vrlo sličan način se određuje i nagib linije sekcije stripiranja, ali se u gore navedenu formulu umjesto protoka vršnog produkta (D) uvrštava protok pare koja izlazi iz isparivača na dnu kolone (B).

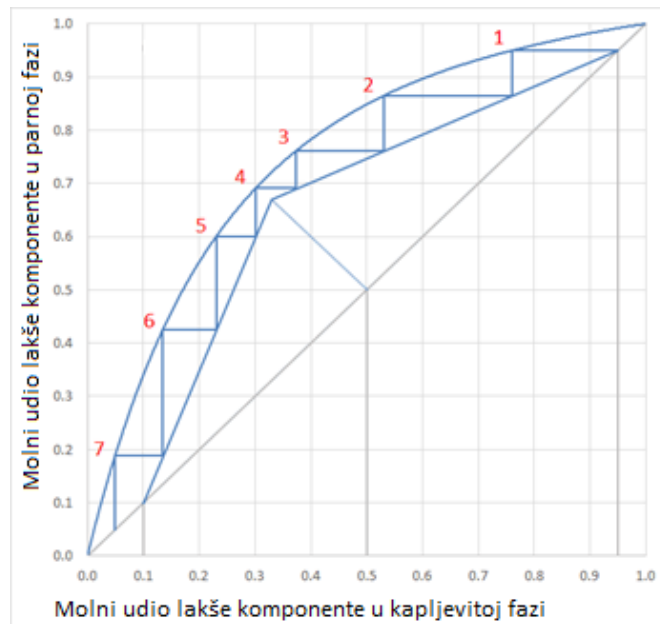
$$m = \frac{L}{(B+L)} \quad (14)$$

Kao što je već navedeno, vruća para koja struji iz isparivača prema vrhu kolone isparava lakše komponente iz kapljevine koja struji niz kolonu te se posljedično tome teške komponente iz kapljevine kondenziraju. Nakon izračuna se u dijagram ucrtava linija sekcije stripiranja od mjesta gdje linija sastava produkta dna siječe pravac 45° do linije pojne smjese (Slika 2.9.).⁶



Slika 2.9. Ucertavanje linija sekcije rektifikacije i stripiranja nakon izračuna nagiba⁶

Kada su svi nagibi izračunati i svi navedeni pravci ucrtani u dijagram započinje se s crtanjem teorijskih stupnjeva. Iz sjecišta linije vršnog produkta s pravcem 45° povlači se horizontalna linija do krivulje ravnoteže para-kapljevina. Potom se povlači vertikalna linija do linije sekcije rektifikacije. Postupak se ponavlja dok zadnji vertikalni pravac ne bude iza pravca sastava produkta dna. Broj teorijskih stupnjeva se sada može odrediti brojanjem sjecišta horizontalnih "koraka" i krivulje ravnoteže para-kapljevina, uključujući i prvo sjecište iza linije sastava produkta dna (Slika 2.10.).⁶



Slika 2.10. Princip određivanja broja teorijskih stupnjeva⁶

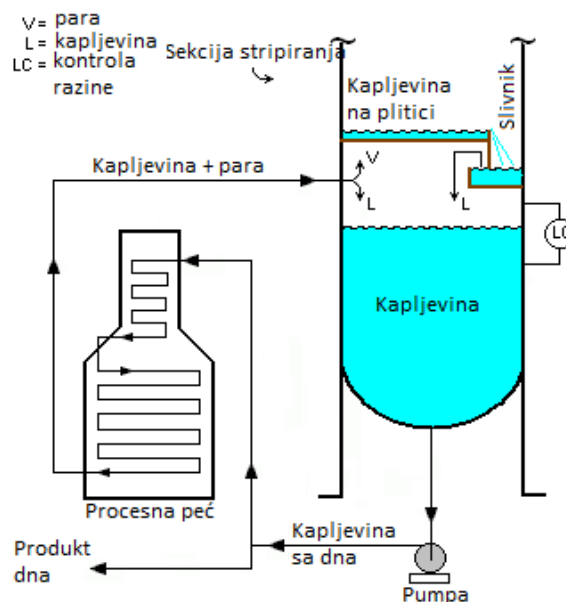
Na točni broj potrebnih stupnjeva u destilacijskoj koloni može utjecati velik broj parametara od kojih su najznačajniji: refluksni omjer, sastav vršnog produkta i produkta dna, relativna hlapivost pojedine komponente te izgled krivulje ravnoteže para-kapljevina. Refluksni omjer možda je najznačajniji parametar koji utječe na dizajn kolone. Kao što je već opisano, povećanje refluksnog omjera znači smanjenje broja potrebnih stupnjeva. Bitno je naglasiti da ušteda koja se ostvaruje smanjenjem broja potrebnih plitica za sobom povlači određeni broj drugih troškova, kao što je potreba za kolonom većeg promjera, kako bi se proces mogao nesmetano provoditi zbog većeg broja kapljevina koji ulazi s refluksom natrag u kolonu. Također, bit će potreban i veći isparivač koji će proizvesti dovoljnu količinu pare. Potreba za čistijim produktom vrha ili dna kolone (npr. povećanje udjela lakše komponente u destilatu ili smanjenje udjela lakše komponente u produktu dna), grafički gledano, dovodi proces u usko područje između krivulje ravnoteže para-kapljevina i pravca 45° te rezultira povećanjem potrebnog broja stupnjeva čak i za male poraste čistoće produkta. Ukoliko postoji potreba za separacijom dviju komponenti s bliskim vrelištem, npr. etan, C₂H₆, i etilen, C₂H₄, pogonski troškovi rastu budući da će biti potrebna viša kolona s većim brojem stupnjeva. Također valja napomenuti i porast troškova ukoliko se razdvaja azeotropna smjesa.^{1,6}

2.2. Destilacijske kolone

Destilacijske kolone sastoje se od nekoliko komponenti čija je svrha optimiranje prijenosa tvari i/ili energije (Slika 2.4.)⁵. Standardna destilacijska kolona sastoji se od:

- vertikalnog plašta koji je kućište za unutrašnje dijelove i u kojem se odvija separacija
- unutrašnjosti ispunjene kontaktnim tijelima (punila ili plitice)
- sabirnika refluksa koji hvata kondenziranu paru sa vrha kolone kako bi se ista u obliku refluksa vratila natrag u kolonu i ponovno iskoristila
- kondenzatora koji hladi i ukapljuje paru koja napušta kolonu na vrhu
- isparivača koji opskrbljuje kolonu parom.

Kapljevita smjesa koja se obrađuje obično se u kolonu uvodi negdje oko polovine visine plašta na pliticu koju nazivamo pojni stupanj. Pojni stupanj dijeli kolonu na dvije sekcije: sekciju rektifikacije i sekciju stripiranja. Pojna smjesa se slijeva niz kolonu te se skuplja u isparivaču na dnu, gdje se dovodi toplinska energija te se stvara tok pare koji se uvodi se u plašt na dnu kolone. Kapljevina koja se uklanja iz isparivača naziva se produkt dna.⁵



Slika 2.11. Shematski prikaz rada isparivača (procesna peč)⁷

Najčešći tip isparivača je cijevni izmjenjivač s plaštom ili neka varijacija ovog tipa, budući da ovakvi isparivači zadovoljavaju velik broj traženih mehaničkih i procesnih specifikacija uz prihvatljive troškove. Neki od osnovnih tipova isparivača su:

- *kotlasti isparivač* – kotao kapljevine u koju je uronjen snop cijevi kroz koje struji vrući medij.
- *termosifonski isparivač* – razlika u gustoći između ulazne kapljevine i izlazne smjese para/kapljevina poganja strujanje kapljevine. Kod vertikalnih modela isparavanje se odvija najčešće u cijevi iako je moguće i isparavanje u plaštu. Modeli sa horizontalnim isparavanjem nemaju mogućnost isparavanja u cijevi. Sustavi mogu biti s jednim prolazom kapljevine kroz uređaj ili sa opcijom recirkulacije (višestruki prolaz). Recirkulacija omogućava proizvodnju veće količine pare.
- *cijev u snopu* – u principu je cijevni isparivač bez plašta tako da je moguće koristiti bilo koju glavu za snop cijevi. Snop se uranja u posudu. Glavna prednost je ušteda na vanjskim cjevovodima. Ovakav model često se koristi kada se želi eliminirati utjecaj curenja medija u vanjskim cjevovodima.
- *horizontalni isparivači* – koriste se kad je potrebna velika dodirna površina
- *vertikalni isparivači* – koriste se kada je dostupna mala površina za instalaciju uređaja. Međutim, uklanjanje snopa cijevi iz vertikalnog plašta često predstavlja poteškoće
- *padajući film* – sastoji se obično od vertikalnog isparivača s isparavanjem u cijevi. Razdjelnik kapljevine raspoređuje pojnu smjesu po unutrašnjosti cijevi te kapljevina isparava u filmu na putu prema dnu cijevi. Mogu biti istostrujni ili protustrujni. Najveći nedostatak jest što ovakvi isparivači pri intenzivnom isparavanju zahtjevaju složen sustav raspodjele kapljevine kako unutrašnjost cijevi ne bi ostala suha.¹

Neki od najbitnijih faktora pri odabiru isparivača su:

- *odabir mjesta isparavanja: cijev ili plašt* – fluidi koji stvaraju više naslaga ili su korozivni trebaju strujati kroz cijevi zbog jednostavnosti čišćenja, fluidi s većim radnim tlakom zahtjevaju strujanje kroz cijevi, parna faza zahtjeva strujanje kroz plašt
- *vertikalna ili horizontalna orijentacija jedinice* - kriteriji za odabir su potrebna kontaktna površina i jednostavnost čišćenja
- *protočni ili kotlasti tip* – ovise o toplinskoj dužnosti i reološkim svojstvima pojne smjese.¹

Često ne postoji standardni model isparivača koji bi zadovoljavao tražene specifikacije za pojedini proces, stoga odabir modela mora zadovoljiti kriterije cijene instalacije, pogonskih troškova i performansa. Kondenzatori u sustavu prenose toplinu s radnog medija na rashladni medij (obično zrak ili voda) kako bi izazvali kondenzaciju te tako učinili produkt lakšim za skladištenje. Najčešće, kondenzatori su tipa snop cijevi u plaštu ili zračni hladnjaci. Kod snopa cijevi u plaštu kondenzacija se uglavnom odvija unutar plašta iz dva razloga:

- ako se para koja treba kondenzirati nalazi u plaštu, pad tlaka će biti niži nego u slučaju kad je para u cijevi te je na taj način proces jednostavniji i jeftiniji
- odabir rashladnog medija – kako se kao rashladni medij uglavnom koristi industrijska voda, korozija je jedan od glavnih ograničavajućih faktora, a korozivne površine je znatno lakše ukloniti u cijevi nego u plaštu.⁸

U sljedećoj tablici nalaze se preporučeni tipovi kondenzatora za pojedine uvjete:

Tablica 2.1. Tip kondenzatora prema zahtjevima procesa⁹

Uvjeti u procesu	Mjesto odvijanja kondenzacije		
	Shell & Tube - u plaštu	Shell & Tube - u cijevi	Zračni hladnjak – u cijevi
Niski pad tlaka	++		+
Totalna kondenzacija	+	+	
Parcijalna kondenzacija		+	++
Depresurizacija sustava		-	+
Pojna smjesa sa širokim rasponom temp. ukapljivanja	-		+
Proces sklon onečišćenju opreme	+	+	-
Skupi materijali		+	-
Ostali faktori			
Cijena opreme	Niska	Niska	Visoka
Ukupna cijena			Niska
Cijena održavanja			-
Potrebna kontaktna površina	Mala	Mala	Velika
Pozicioniranje jedinice	Povišen teren ili ravna podloga	Povišen teren ili ravna podloga	Povišen teren
Zaštita od požara	+	++	-

+ tip kondenzatora odgovara traženim uvjetima

++ tip kondenzatora jako dobro odgovara traženim uvjetima

- tip kondenzatora ne odgovara traženim uvjetima

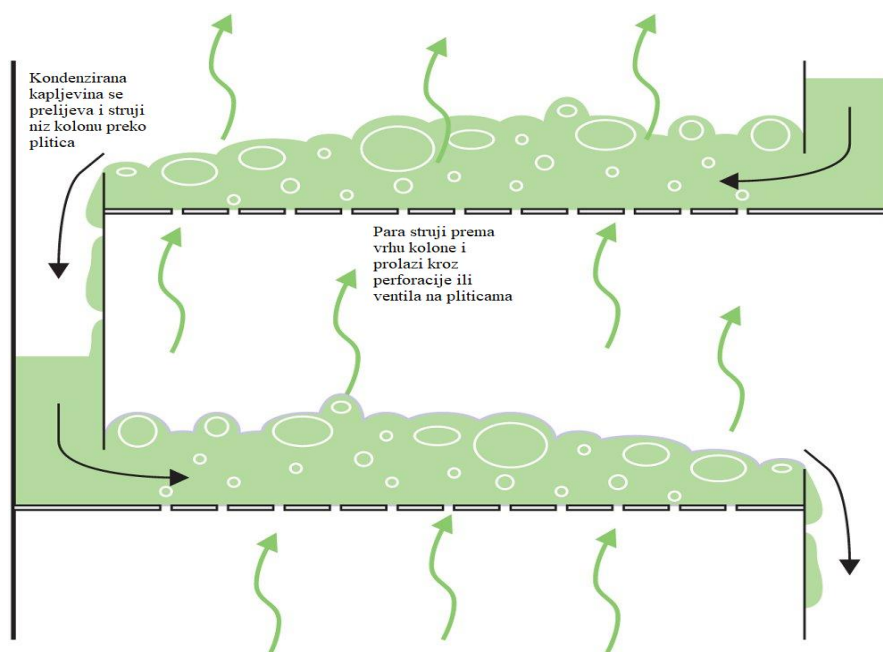
Neki od čimbenika koji utječu na odabir i dimenzioniranje kondenzatora su:

- *minimalno temperaturno približenje* – izmjenjivači topline imaju određena ograničenja koja onemogućuju da izlazna temperatura pojne smjese bude znatno niža od izlazne temperature rashladnog medija. Kako bi se te temperature znatnije približile potrebno je nekoliko izmjenjivača spojenih u seriju. Budući da kod zračnih hladnjaka zrak struji okomito na cijevi, dovoljno velik zračni hladnjak može postići znatnije temperaturno približenje.
- *mogućnost odzračivanja* – pokretanje sustava obično zahtjeva odzračivanje jedinice. Također, odzračivanje je bitno budući da velik broj procesa akumulira komponente koje ne mogu kondenzirati. Sustave za odzračivanje obično je lakše implementirati u kondenzatore kod kojih se proces kondenzacije odvija u plaštu.
- *pojne smjese sa širokim rasponom temperatura rosišta* – kod rada s ovakvim pojnim smjesama često može doći do fazne separacije. Kad se faze odvoje, djelomično ukapljena para može sadržavati nedovoljno težih komponenti da bi se kondenzacija nastavila. Ova pojava izaziva poteškoće kod uređaja gdje se kondenzacija odvija u plaštu i u cijevima kao i kod uređaja gdje imamo više prolaza medija kroz sustav. Rješenje zahtjeva kombinaciju jednog prolaza medija kroz sustav uz kondenzaciju u cijevi sa visokim padom tlaka u plaštu.
- *cijena* – uključuje koštanje izmjenjivača, kontrolora motora, cijevi unutar jedinice i njihovu instalaciju. Obično zračni hladnjaci koštaju više od hladnjaka tipa cijev u plaštu.
- *zaštita od požara* – krila rotora zračnog hladnjaka obično su vrlo blizu tlu te zbog toga ih je dosta teško zaštititi od požara. Aluminijska krila su dosta krhka. Cijevi kroz koje struji pojna smjesa relativno su otvorene te su zbog toga izložena opasnosti od požara. Dovoljan razmak od tla rješava ovakav problem.
- *ukupna cijena* – uključuje obradu rashladne vode kao i sve cjevovode izvan jedinice potrebne za rad. Općenito, ukoliko je dostupan veći prostor zračni hladnjaci mnogo su jeftiniji.
- *troškovi održavanja* – zračni hladnjaci imaju pokretne dijelove tako da su troškovi održavanja shodno tome veći.
- *greške rashladnog medija* – zračni hladnjaci će, zbog otvorenosti sustava i prirodnog strujanja zraka, hladiti ulaznu smjesu čak i sa isključenim radom ventilatora. U nekim

slučajevima, prilikom nestanka električne energije ova mogućnost može biti od presudne važnosti.⁹

2.2.1. Kolone s pliticama

Plitice su elementi koji osiguravaju mjesto dodira faza kao i mjesto separacije istih. Konstrukcijski su izvedene kao vodoravne ploče određene strukture, postavljene na određenoj udaljenosti jedna od druge unutar kolone. Kondenzirana kapljevina struji s vrha kolone prema dnu preko plitica, kroz čije perforacije struji para prema vrhu (Slika 2.12.). Na taj način ostvaruje se maksimalni kontakt te prijenos tvari i topline.



Slika 2.12. Način rada kolone s pliticama

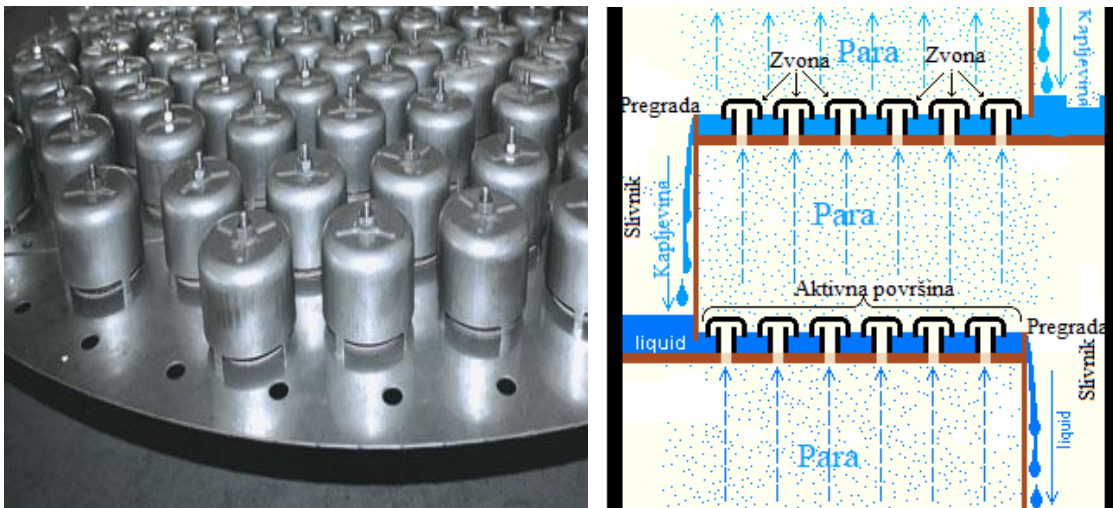
Četiri su najčešća tipa plitica koje se koriste:

- sitaste plitice
- plitice sa zvonima
- "dual flow" plitice
- plitice s ventilima.

Najčešće korištene plitice do 1960. bile su plitice sa zvonima. Zbog načina rada i jednostavnosti izvedbe se tada počinju koristiti sitaste plitice i plitice s ventilima.

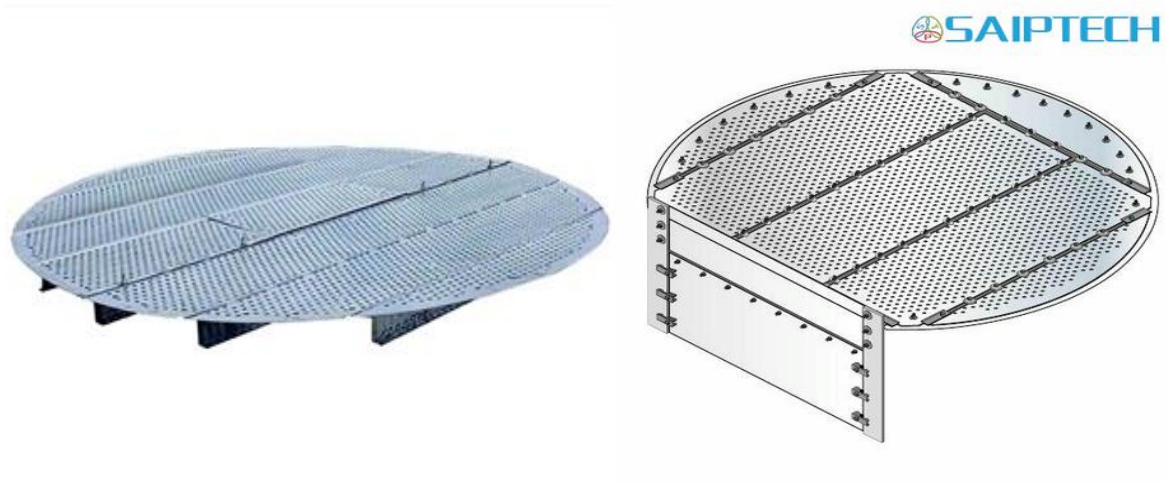
Model sa zvonima (*Slika 2.13.*)¹¹ je perforirana ploča u čijim su šupljinama kratke cijevi koje su zatvorene kapičom (zvonom) s prorezima na rubu. Ovako zatvorene plitice rade na način da se, uslijed strujanja pare, zvona otvaraju odnosno kliznu na vrh cijevi što omogućava prolaz pare na drugu stranu plitice. Visina radnog fluida s pjenom, koja nastaje uslijed strujanja parne faze kroz kapljevitu, mora biti najmanje jednaka visini pregrade na rubu slivnika kako bi se kapljevina mogla slijevati niz kolonu i pri malim protocima pare i kapljevine.

Za razliku od plitica sa zvonima, sitaste plitice su potpuno ravne perforirane ploče bez cijevi ili pokrova za iste. Para struji prema vrhu kolone kroz perforacije i na taj način sprječava otjecanje kapljevine kroz perforacije (*Slika 2.12.*). Ako brzina strujanja pare nije dovoljno velika, dio kapljevine će otjecati što će dovesti do smanjenja učinkovitosti separacije na pojedinoj plitici .^{1,5}



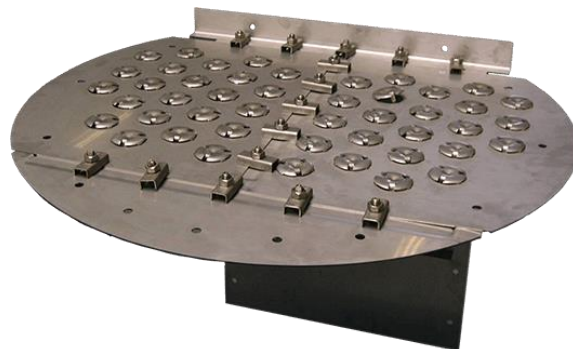
Slika 2.13. Plitica sa zvonima tvrtke INTRA i ilustracija mehanizma rada plitice sa zvonima¹¹

"Dual flow" plitice su zapravo sitaste plitice bez preljeva (*Slika 2.14.*)^{3,5}. Para i kapljevina istovremeno struje kroz šupljine što rezultira smanjenom djelotvornosti plitice, ali i povećanim kapacitetom zbog mogućnosti većeg opterećenja pojedine plitice.



Slika 2.14. "Dual flow" plitice (lijevo) tvrtke Sulzer i sitaste plitice kineske tvrtke Saiptech^{3,5}

Ventilske plitice umjesto zvana i cijevi u perforacije imaju ugrađene ventile koji se, ovisno o brzini strujanja pare, otvaraju više ili manje (*Slika 2.15.*)⁵. Maksimalna visina podizanja ograničena je dužinom nožice ventila. Smanjenjem protoka pare poklopac ventila se spušta sve dok ne prekrije i na taj način zatvori otvor. Na taj način se sprječava otjecanje kapljevine te se omogućuje znatno smanjenje kapaciteta. Ovako fleksibilni radni uvjeti smatraju se najvećom prednošću ovog tipa plitica.



Slika 2.15. Plitica sa ventilima tvrtke MTE⁵

Tablica 2.2. Usporedba karakteristika osnovnih tipova plitica⁸

	SITASTE	VENTILSKE	SA ZVONIMA	DUAL FLOW
KAPACITET	velik	velik do veoma velik	srednje velik	veoma velik
UČINKOVITOST	visoka	visoka	srednje velika	niska
ODNOŠENJE	srednje	srednje	3 puta veće od ventilnih plitica	malo do srednje
PAD TLAKA	srednji	srednji	visok	mali do srednji
CIJENA	niska	20% viša od sitastih	2 do 3 puta viša od cijene sitastih plitica	niska
ODRŽAVANJE	nisko	nisko do srednje	relativno visoko	nisko
SKLONOST PRLJANJU	mala	mala do srednja	visoka tendencija skupljanja krutih čestica	veoma niska; prikladne za rad sa suspenzijama
UTJECAJ KOROZIJE	mali	mali do srednji	visok	veoma mali
RASPOLOŽIVOST PODATAKA ZA PRORAČUN	dobro poznata	podaci su na raspolaganju	dobro poznato	na raspolaganju je dio podataka

Neke od prednosti korištenja kolona s pliticama:

- kod šaržnih destilacija ili diskontinuiranog rada često dolazi do velikih fluktuacija temperature što kod punila može izazvati oštećenja, dok su plitice otporne na velike temperaturne promjene
- proračuni za separaciju pomoću plitica su puno egzaktiniji od proračuna za punila
- zbog znatno veće mase, kolone s punilima imaju znatno veće troškove izgradnje temelja, nosača i sl.
- kolone s punilima podložnije su prljanju i puno su manje osjetljive na krute čestice u kapljevini
- ventilske plitice i plitice sa zvonima funkcioniraju jako dobro u slučaju smanjenja kapaciteta. Upotrebom raspodjelnika kapljevine koji su nužni u koloni sa punilima ograničeni smo minimalnim kapacitetom, što nije slučaj kod kolone s pliticama.
- kod kolona s velikim promjerom punila uzrokuju neravnomjernu raspodjelu kapljevine
- kod kolona s pliticama znatno je jednostavnije ugraditi ili odstraniti dodatne elemente kao i čistiti unutrašnjost kolone.¹

Ograničenja za upotrebu plitica su definirana tako da spriječe curenje pri malim opterećenjima te plavljenje pri većim opterećenjima. Curenje se javlja kada je pad tlaka pare, koja prolazi kroz pliticu, prenizak da bi održao kapljevinu na plitici pa ona počinje curiti kroz perforacije. Kada se pad tlaka na suhoj plitici spusti ispod 12 mm H₂O curenje može postati ozbiljan problem. Empirijsko je pravilo da curenje od 20 % znači pad djelotvornosti od 10 %. U drugu ruku, plavljenje se javlja u drugom ekstremnom slučaju: kada je brzina strujanja pare kroz šupljine prevelika. Površina plitice će poplaviti u slučaju kada suvišak pare, zbog svoje brzine strujanja, odnosi kapljice tekućine na stupanj iznad. Empirijsko pravilo je da 10% odnošenja rezultira u 10 postotnom padu djelotvornosti.¹⁰

Također, postoji i mogućnost plavljenja preljeva. Razina pjene u preljevu određena je padom tlaka na plitici kao i trenjem pri strujanju kapljevine niz kolonu. Kako se pad tlaka na pojedinoj plitici povećava tako će i opterećenje kapljevinom porasti te posljedično tome i razina pjene u preljevu. Kada razina pjene poraste iznad visine pregrade na plitici, plitica će poplaviti. Plavljenje se najlakše može izbjeći povećanjem razmaka između plitica i smanjenjem pada tlaka na plitici. Postoji praktično pravilo koje opterećenje plitica može podnijeti s jednim prolazom kapljevine. Obično se ta vrijednost izražava kao protok po

jedinici visine pregrade na plitici. Ako opterećenje iznosi više od $90 \text{ m}^3/\text{m-h}$, biti će potrebno povećati broj prolaza kapljevine kako bi se izbjegli režimi strujanja koji će smanjiti djelotvornost. Zato se prilikom dizajniranja plitice obično započinje s jednim prolazom kapljevine te se prema potrebi prelazi na dva ili četiri prolaza. Plitice s tri prolaza obično se ne koriste jer su asimetrične i teško je izbalansirati i postići ravnomjernu raspodjelu kapljevine. Plitice s više od četiri prolaza se jako rijetko koriste te ih je nužno odabrati i dimenzionirati s velikim oprezom. Općenito, kod aplikacija s toliko velikim opterećenjima kapljevinaom punila su obično bolja rješenja.^{1,10}

2.2.2. Kolone s punilima

Dok se plitice koriste kako bi osigurali postepen kontakt pare i kapljevine, svrha punila je konstantan kontakt medija. Zbog velike kontaktne površine, kolone s punilima mogu raditi pri manjim padovima tlaka od kolona s pliticama i često mogu biti korištene za vakuum destilaciju u slučajevima gdje su tlak i temperatura reboilera niski. Neke od ostalih prednosti su: manja ukupna visina kolone, jednostavna izvedba, jednostavnost instaliranja, širok raspon materijala od kojih se mogu proizvoditi (plastika, metal, keramika). Unatoč svim tim prednostima, da bi ostvarili optimalan učinak nužno je ostvariti jako dobru distribuciju kapljevine na vrhu sloja punila. Kako bi to osigurali na dugi niz godina potrebno je temeljito i pravovremeno održavanje opreme. Uz to, kolone s punilima jako loše rade sa sustavima koji sadrže krutine koje imaju tendenciju zapinjanja u volumenu punila te na taj način narušavaju dobru distribuciju kapljevine po cijelom volumenu.^{1,3}

Postoje dvije osnovne vrste punila: nasipna i strukturirana. Nasipna punila (*Slika 2.16.*)⁹ sastoje se od brojnih malih elemenata veličine od 15 do 100 mm. Obično se "nasipaju" u kolonu iz kutija kako bi nasumično ispunili prostor. Strukturirana punila (*Slika 2.17.*)⁹ su obično višeslojni blokovi sačinjeni od mreže koja može biti od velikog broja metala, nemetala ili metalnih legura (grafit, plastika itd.). Ovakva struktura ravnomjerno raspoređuje kapljevinu i paru po presjeku kolone. Općenito, strukturirana punila izazivaju manji pad tlaka i ostvaruju bolju separaciju uz manju visinu sloja punila, ali su zato skuplja i zahtjevnija za instalirati. Nasipna punila se najčešće preferiraju kod destilacija korozivnih medija, naročito ako su potrebna keramička punila, zbog agresivnih kemikalija ili ekstremno nepovoljnih temperaturnih uvjeta. Nasipna punila kao i strukturirana ostvaruju separaciju osiguravajući

površinu za prijenos tvari između pare i kapljevine. Kod nasipnih punila manji elementi od



kojih su sačinjena rezultiraju većom kontaktnom površinom po jedinici volumena pa tako i većom djelotvornosti, ali uz veći pad tlaka. Suprotno tome strukturirana punila koja su sačinjena od većih elemenata osiguravaju manju površinu pa time i manju djelotvornost, ali uz niži pad tlaka i mogućnost većeg opterećenja.⁹ Separacijsku djelotvornost punila obično izražavamo parametrom koji nazivamo visinom ekvivalentnom teorijskoj plitici (*HETP*). Teorijska plitica ili stupanj predstavlja miješanje pare i kapljevine do postizanja ravnoteže. Broj teorijskih plitica ovisi o uvjetima unutar kolone, komponentama, zahtjevima za čistoću produkata i obično se određuje procesnim simulacijama.¹⁰ Dobiveni broj

teorijskih stupnjeva i *HETP* se koriste da bi se odredila visina sloja punila

Slika 2.16. Nasipna punila¹⁰

Kao što je već spomenuto, dobra distribucija kapljevine na vrhu sloja punila je ključna za djelotvornu separaciju. Loša distribucija kod punila dokazano je najveći čimbenik koji izaziva razne probleme prilikom provedbe procesa.



Slika 2.17. Strukturirana punila¹⁰

Aktivna površina punila mora biti potpuno pokrivena i jednoliko nakvašena kapljevnom da bi se postigla maksimalna djelotvornost. Međutim, broj mogućih redistribucija kapljevne u koloni ograničen je empirijskim pravilom koje osigurava jednoliko kvašenje i kontakt. Naime, za nasipna punila veličine 25 mm ili više i većinu strukturiranih punila preporučeno je 40-100 redistribucija/m² da bi se ostvarila dobra djelotvornost. Iako od 100 - 200 redistribucija/m² može osigurati bolju djelotvornost kod manjih nasipnih punila i strukturiranih punila s velikom površinom tipa 500 m²/m³ ili više. Raspon protoka kapljevne koju distributor mora preraspodijeliti je vrlo bitan faktor u dizajniranju postrojenja. Ako je protok niži od donje granice projektiranog sustava, razina kapljevne u distributoru će biti preniska što će rezultirati pojačanim curenjem i konačno padom djelotvornosti. Ukoliko je protok veći od maksimalno projektiranog protoka za pojedino punilo, raste opasnost od plavljenja što na kraju ponovo rezultira padom djelotvornosti separacije.¹⁰

Nasipna punila mogu se naći s velikim brojem raznih oblika: cilindrični, sedlasti, okrugli. Tradicionalni oblici kao npr. Raschig prstenovi ili Intalox sedla zamijenjeni su modernijim dizajnima kao npr. Pall prstenovima i IMTP punilima.



Slika 2.18. Neke od vrsta nasipnih punila: a) Pall prsteni, b) Raschig prsteni, c) Intalox sedla, d) IMTP punila^{5,10}

Ovakav tip punila karakteriziran je svojom veličinom ili promjerom iako različita punila istog promjera mogu rezultirati sasvim različitim učinkom separacije. Kod nižih kolona s nasipnim punilima minimalni omjer promjera kolone i punila koji se preporuča je od 8:1 do 10:1.

Najčešće korišten materijal za proizvodnju strukturiranih punila je tanki lim (debljina je 0,1 – 0,2 mm). Budući da je konstrukcijski materijal toliko tanak, vrlo je bitno spriječiti koroziju. Stoga je odabir materijala za punila jedan od ključnih koraka projektiranja kolone. Aktivna površina strukturiranih punila se izražava većinom u m^2/m^3 . Dostupna su punila s aktivnom površinom od minimalno $40\text{-}90 \text{ m}^2/\text{m}^3$ pa sve do punila sa $900 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Punila u rasponu od $40\text{-}90 \text{ m}^2/\text{m}^3$ obično se nazivaju rešetkama i dizajn s takvim punilima karakterizira veliki slobodni volumen i veliki kapacitet proizvodnje. Obično se takva izvedba pogona odabire kada su prljanje i hidrauličko opterećenje izraženi. Strukturirana punila površine oko $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ se obično koriste u separacijama zraka i proizvodnji osjetljivih kemikalija.¹⁰

Kut nagiba korugacija kod strukturiranih punila je također faktor koji treba uzeti u obzir pri odabiru. Obično kut iznosi 45° , ali postoje i aplikacije sa kutom od 60° . Tipično označavanje punila koristi sufiks Y za kut korugacije od 45° , a X za korugacije od 60° . Porastom kuta korugacija djelotvornost i pad tlaka opadaju a kapacitet raste. Površina većine strukturiranih punila je teksturirana i perforirana. Teksture osiguravaju raspodjelu kapljevine po cijelom volumenu sloja punila, a perforacije pospješuju protok i izjednačavanje razlike tlaka između pojedinih slojeva punila. Komercijalne kolone zahtjevaju dovod za ugradnju unutrašnjih elemenata kolone. Pojedini slojevi punila moraju se složiti u blokove dovoljno maloga volumena za transport kroz dovod. Kada se postave u kolonu, slojevi punila se organiziraju paralelno jedan s drugim. Uzorak složenog punila identičan je za svaki sloj, a instaliraju se s pomakom od 90° kako bi se izbjeglo vertikalno preklapanje zavara odnosno šavova. Na taj način spriječava se strujanje pare i kapljevine kroz šav i zaobilaženje sloja punila.¹⁰

Uzimajući sve navedene podatke u obzir jasno je da najveće prednosti strukturiranih punila dolaze do izražaja pri niskom tlaku (niže od 2 atm) i manjim protocima kapljevine. Neki od bitnih faktora za odabir strukturiranih punila su:

- *tlak u sustavu* – kod destilacije tlak u sustavu je dobar indikator protoka kapljevine. S porastom tlaka raste i protok. Već je ranije spomenuto da strukturirana punila odgovaraju procesima pri niskom tlaku odnosno niskim protocima kapljevine.
- *promjer plašta* – ovaj faktor je bitniji pri odabiru plitica nego punila. Minimalni promjer koji se preporuča za korištenje plitica je 760 mm. Kolone s manjim promjerom su manje praktične za korištenje plitica i punila se koriste gotovo uvijek.

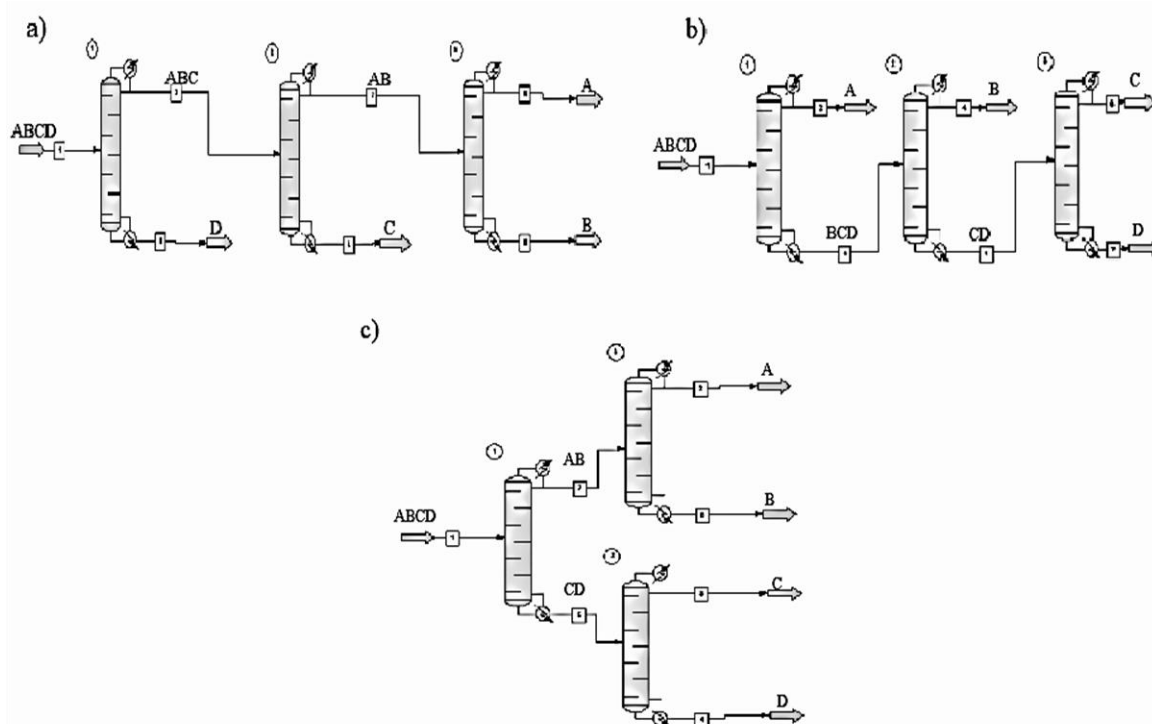
Promjer kolone koji odgovara strukturiranom punilu ovisi o aktivnoj površini punila. Primjerice, standardna punila od $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ zadovoljavaju minimalni promjer kolone od 100 mm. Što se tiče većih promjera, nema gornje granice promjera kolone koji se preporuča za korištenje strukturiranog punila.

- *broj stupnjeva* – u slučajevima gdje je potreban jako veliki broj stupnjeva strukturirana punila su obično bolje rješenje zbog svoje visoke djelotvornosti. Zbog mogućnosti ostvarivanja visokog tlaka i velikog protoka kapljevine, u nekim slučajevima plitice su bolji izbor. Mehaničku izvedbu unutrašnjosti kolone također treba uzeti u obzir. Budući da sekcije s punilima imaju potrebu za redistributorima kapljevine i kolektorima, sekcija s punilima s malo stupnjeva može zahtijevati više slobodnog vertikalnog prostora od iste sekcije s pliticama.
- *toplinska degradacija produkta* – u većini procesa gdje je termalna degradacija problem, preporuča se upotreba strukturiranih punila. Zbog kratkog vremena zadržavanja u sekcijama sa strukturiranim punilima toplinska degradacija je minimalna. Također, s ovakvim tipom punila pad tlaka je niži nego kod kolona s pliticama što omogućava rad donjih sekcija kolone pri nižim tlakovima i temperaturama.¹

2.2.3. Toplinski povezane kolone

Kao što je već ranije spomenuto, proces destilacije zauzima 10% od ukupne svjetske potrošnje energije i jedan od glavnih ciljeva procesne industrije postao je smanjenje potrošnje energije u destilacijskim postrojenjima. Jedan od načina uštede energije je primjena destilacijskih kolona s razdjelnom stijenkom, tehnologijom kojom se jednim plaštom mogu zamijeniti nizovi dviju ili više binarnih destilacijskih kolona.

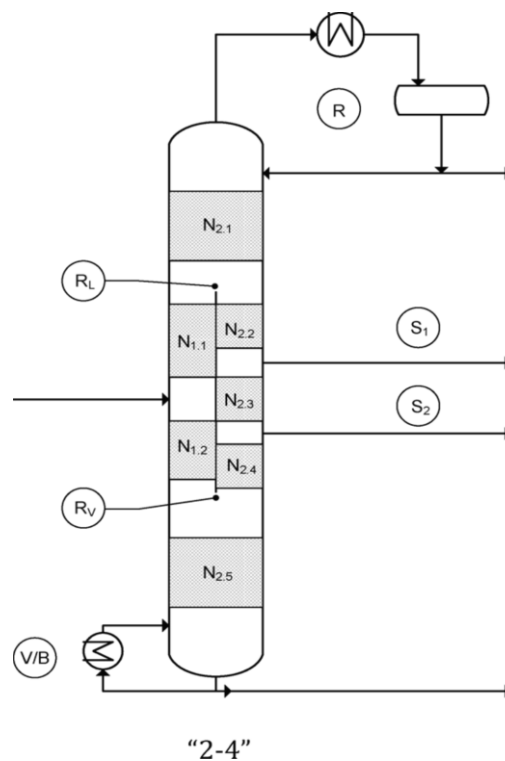
Za separaciju višekomponentnih smjesa, potrebno je koristiti nizove binarnih destilacijskih kolona. Kako bi se višekomponentna smjesa razdvojila na četiri proizvoda uz visoku oštrinu separacije, potrebno je koristiti niz od tri konvencionalne, binarne destilacijske kolone te ukupno tri kondenzatora i tri isparivača. Neke od mogućih kombinacija prikazane su na slici 2.19.



Slika 2.19. Prikaz konvencionalnih konfiguracija za separaciju četverkomponentne smjese a) indirektni niz, b) direktni niz, c) "sloppy" niz

U četverkomponentnoj smjesi ABCD, A je komponenta s najnižim vrelištem, D je komponenta s najvišim vrelištem, a vrelišta komponenata B i C je između vrelišta

komponenti A i D. Na *Slici 2.19.* a) komponenta D se odvaja u prvoj koloni, a C i B u drugoj odnosno trećoj. U konfiguraciji 2.19. b) u prvoj koloni odvaja se komponenta A itd. Ista analogija vrijedi i za trokomponentne pojne smjese s razlikom da će se u "sloppy" nizu komponenta B, komponenta sa srednjim vrelištem, distribuirati u određenoj mjeri u produktu vrha odnosno dna predfrakcionatora. Ukoliko se u „sloppy“ nizu isparivač i kondenzator predfrakcionatora te isparivač gornje glavne kolone i kondenzator donje glavne kolone zamijene toplinskim vezama, dobit će se tzv. Kaibelova konfiguracija, prikazana na slici 2.20.

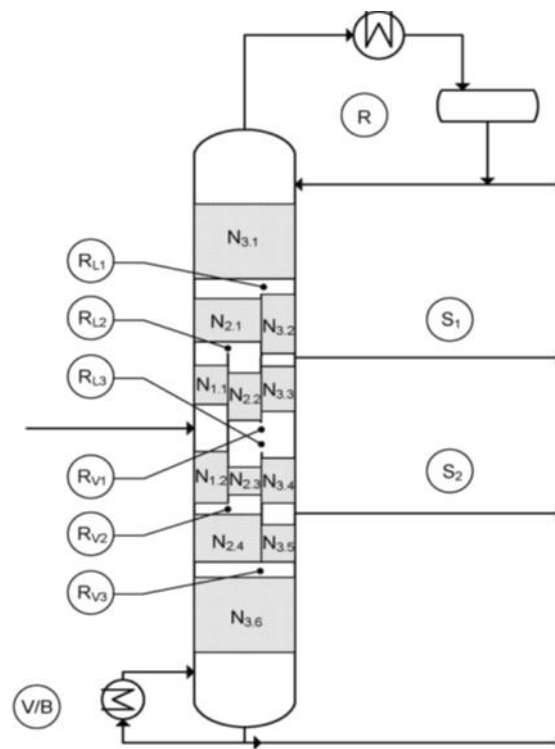


Slika 2.20. Shematski prikaz Kaibelove destila

Kada se ovakav sustav ispravno projektira energetske uštede su 20-40 % u odnosu na konvencionalne konfiguracije. Uštede se ostvaruju jer se na ovaj način izbjegava efekat miješanja jer su para i kapljevina u ravnoteži ako se kontrola kolone odvija na ispravan način. Zbog smanjenih protoka unutar kolone i zbog kompaktnosti izvedbe ostvaruju se dodatne uštede prilikom izvedbe i instalacije.^{13,14}

Još veće uštede, ukoliko sustav koji treba separirati to omogućuje, mogu se ostvariti primjenom tzv. proširene Petlyukove konfiguracije (*Slika 2.21*)¹². Ovakva izvedba zahtjeva znatno kompleksniju unutarnju strukturu od Kaibelove konfiguracije. Iako je na slici prikazana konfiguracija za separaciju četiri produkta, u teoriji se koncepcija može proširiti i

na veći broj produkata, no to je uglavnom nepraktično. Na ovaj način energetske uštede rastu i do 50%. Sve navedene činjenice znače da će proširena Petlyuk konfiguracija zahtijevati manji promjer kolone kao i manji isparivač i kondenzator, ali unutrašnjost kolone će zbog povećanog broja razdjelnih stijenki biti kompleksna i teško izvediva. Unatoč tome i unatoč povećanim instalacijskim troškovima, mogućnosti velikih ušteda čine ovu konfiguraciju i dalje atraktivnom i vrijednom razmatranja.¹³



Slika 2.21. Petlyuk konfiguracija s razdjelnom stijenkom¹³

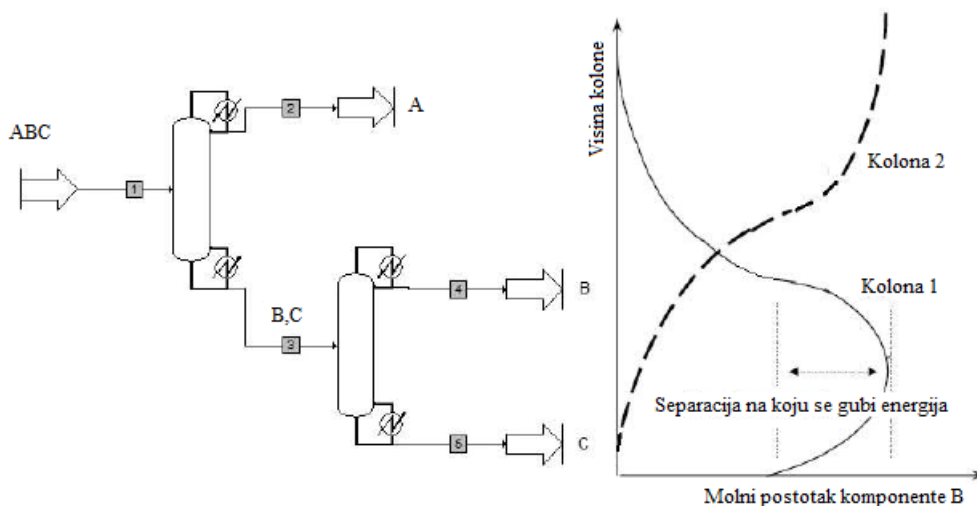
Iako Petlyukova konfiguracija može pružiti veće uštede, Kaibelova konfiguracija je vrlo jednostavna, jer ima samo jednu razdjelnu stijenku.

Neke od ostalih prednosti su:

- visoka čistoća bočnih proizvoda u usporedbi s konvencionalnim kolonama s bočnim proizvodima;
- manji konstrukcijski volumen – za separaciju višekomponentnih smjesa, kolona s razdjelnom stijenkom zahtjeva samo jedan isparivač i jedan kondenzator da bi dobila

čiste produkte. Zbog toga ovakva kolona zahtjeva manje prostora za ugradnju. Također, nema potrebe za cijevovodima za spajanje predfrakcionatora i glavne kolone.

- niži troškovi – za separaciju trokomponentnih ili četverokomponentnih smjesa potrebna je samo jedna kolona s jednim kondenzatorom i jednim reboilerom što izravno iziskuje niže pogonske i investicijske troškove
- manja potrošnja energije – još jedan aspekt uštede koji se ostvaruje upotrebom razdjelne stijenke vidljiv je na shematskom prikazu na *Slici 2.22*.¹⁵



Slika 2.22 Energija koja se gubi na separaciju komponente B u konvencionalnim separacijama¹⁵

U prvoj koloni konvencionalne konfiguracije za separaciju trokomponentne smjese odvajamo najhlapljiviju komponentu A kao vršni produkt dok B i C odlaze u dno. Udio komponente B u prvoj koloni doseže maksimum na sredini visine kolone, a zatim opada prema dnu uslijed miješanja s manje hlapivom komponentom C. Energija koja se gubi u području označenom na dijagramu je energija potrebna za separaciju B od C. Na ovaj način vidljivo je kako efekt miješanja uzrokuje pad toplinske djelotvornosti procesa.

Uzimajući to u obzir možemo sagledati istu separaciju u koloni s razdjelnom stijenkom. U predfrakcionatoru, komponenta B se raspodjeljuje između vrha i dna kolone. Na taj način rektifikacijska sekcija predfrakcionatora odvaja A i B od komponente C, a sekcija stripiranja odvaja B i C od komponente A te se tako izbjegava efekt miješanja.¹⁵

Iako nudi brojne mogućnosti za redukciju investicijskih i pogonskih troškova ovakve kolone imaju i neke nedostatke:

- jedna mogućnost za odabir tlaka – dok kod konvencionalnih postrojenja za separaciju s više kolona tlakovi mogu biti različiti, kolona s razdjelnom stijenkom radi pri samo jednom tlaku što je čini manje fleksibilnom u tom aspektu rada
- povećani ukupni pad tlaka zbog većeg broja teorijskih stupnjeva
- visina kolone – zbog većeg broja teorijskih stupnjeva kolona sa stijenkom imati će veći promjer i biti će viša od obje kolone u konvencionalnoj konfiguraciji.

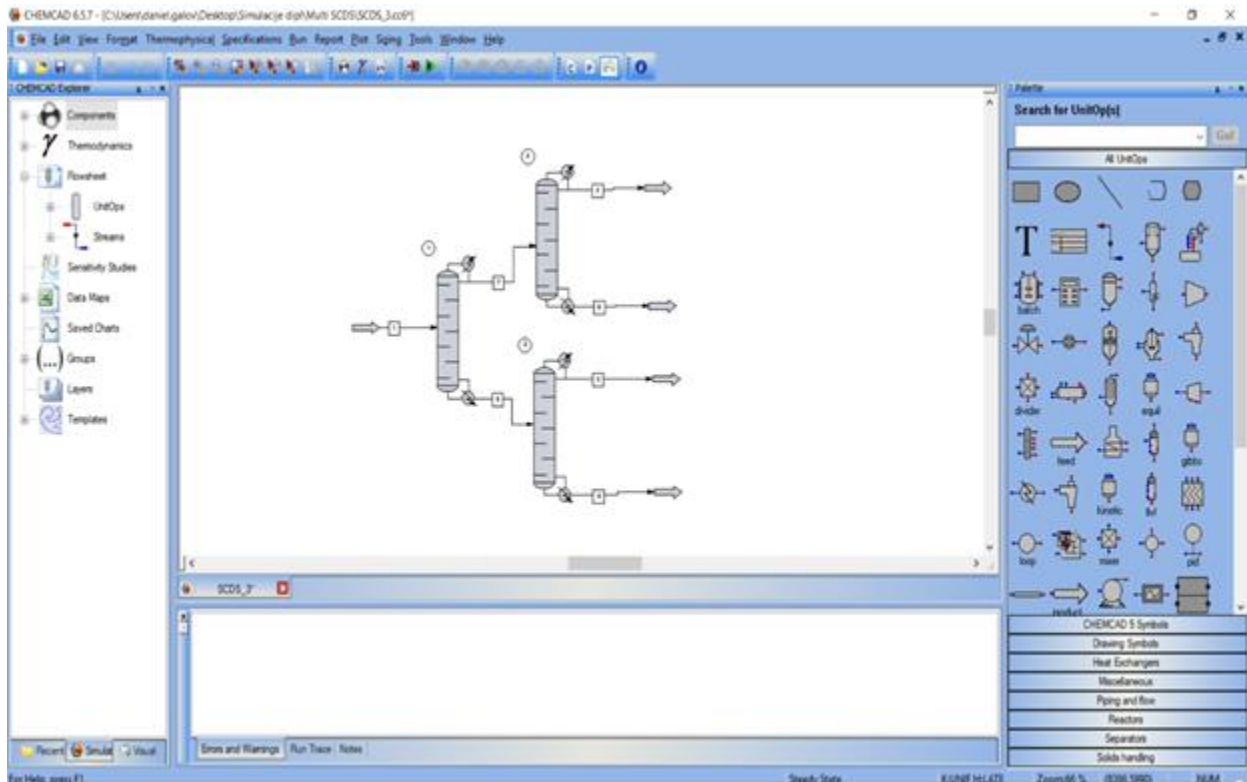
Prva instalirana kolona s razdjelnom stijenkom bila je u Ludwigshafenu u Njemačkoj, a izvela ju je tvrtka BASF, a danas ih je u uporabi preko 300, uglavnom za separaciju tri proizvoda. Kolone su opremljene punilima kao i pliticama, a raspon radnih tlakova im je od 2 mbar do 10 bar. Rasponi promjera su od 0,6 m do 4 m (odnosi se na BASF kolone). Najveću instaliranu kolonu konstruirala je tvrtka Linde AG za Sasol u Johannesburgu. Ta kolona visoka je 107 m, a promjer joj je više od 5 m. Jedna od najčešćih aplikacija kolone s razdjelnom stijenkom je odvajanje benzena iz motornog ulja do sadržaja manjeg od 1 vol %. Od ostalih aplikacija često se provodi i odvajanje ksilena kao bočnog produkta za ponovnu primjenu u kolonama za separaciju aromata.¹⁵

3. MATERIJALI I METODE

3.1. CHEMCAD

CHEMCAD je fleksibilna platforma za simulaciju procesa koja sadrži širok raspon kemijskih komponenti, veliku bazu termodinamičkih modela te modela jediničnih operacija različitog stupnja složenosti. CHEMCAD omogućava brzo i jednostavno modeliranje šaržnih i kontinuiranih procesa te izradu dinamičkih i statičkih simulacija različitih operacija kemijske industrije.

Za simuliranje procesa destilacije postoji niz gotovih modela, različitih mogućnosti i stupnja složenosti - Tower, SCDS i *Shortcut*. Za brzi izračun koristi se *Shortcut* model koji se temelji na Fenske-Underwood-Gilliland-Kirkbinde sustavu jednadžbi. Za razliku od *Shortcut* modela, Tower i SCDS spadaju u tzv. rigorozne *tray-by-tray* modele, u kojima se za svaki ravnotežni stupanj postavljaju tzv. MESH jednadžbe, koje se zatim rješavaju odgovarajućim algoritmom. SCDS za razliku od Towera se može koristiti i za simulaciju separacija trofaznih sustava (LLV), a podržava i neravnotežni model procesa destilacije u kojem se na svakom ravnotežnom stupnju umjesto fazne ravnoteže računa stvarni prijenos tvari preko međufazne površine. Također, ova dva modela mogu se koristiti i za izradu dinamičkih simulacija procesa destilacije.¹⁶ Na *Slici 4.1.* vidi se izgled sučelja programa. Prikazana je simulacija niza triju SCDS kolona za separaciju pojne smjese na četiri produkta kakva se koristi za određivanje minimalnog broja stupnjeva.



Slika 3.1. Sučelje programa

3.2. Separacijski zadatak

Polazna sirovina za rad je smjesa BTX. Sastav i stanje pojne smjese nalazi se u *Tablici 3.1.* Navedenu pojnu smjesu potrebno je separirati na četiri produkta sa sljedećim sastavima:

- produkt vrha – 1,3 mas. % benzena
- prvi bočni produkt – 65-66 mas. % benzena
- drugi bočni produkt – 99-100 mas. % toluena
- produkt dna – 0,001 mas. % toluena

Približnim simuliranjem Kaibelove destilacijske kolone određuje se minimalni broj stupnjeva za separaciju te se potom simulira šest slučajeva s različitim brojem stupnjeva. Za simulaciju s najvećim brojem stupnjeva uzima se slučaj $1,85 \cdot N_{min}$ te se za svaki od ostalih slučajeva broj stupnjeva smanjuje za 10 %, a sastav produkata se drži konstantnim kako bi se pokazala ušteda energije koju ovakvi sustavi ostvaruju. Za ovako optimirane simulacije prati se funkcija cilja $N \cdot (R+I)$. Slučajevi se dimenzioniraju te je potrebno procijeniti pogonske i investicijske troškove te izračunati ukupne godišnje troškove (*TAC*). Nakon izračuna godišnjih troškova uspoređujemo približnu funkciju cilja $N \cdot (R+I)$ s rigoroznom funkcijom cilja *TAC*, te ocjenjujemo primjenjivost približne funkcije na ovakve simulacije.

Tablica 3.1. Sastav pojne smjese¹²

Temperatura / °C	100
Tlak / bar	3,010
Protok / kg/h	31736,5
Komponenta	Maseni udio
n-butan	0,019
i-pentan	0,064
n-pentan	0,045
2-metilpentan	0,080
n-heksan	0,042
benzen	0,086
3-metilheksan	0,020
toluen	0,247
etilbenzen	0,035
p-ksilen	0,042
m-ksilen	0,122
o-ksilen	0,055
m-etiltoluen	0,047
1,3,5-trimetilbenzen	0,077
1,4-dietilbenzen	0,017

Uz sastav i stanje pojne smjese, u simulaciji Kaibelove kolone definira se i sastav i stanje rashladne vode za kondenzator te svojstva lož ulja za procesnu peć koja se koristi kao reboiler.

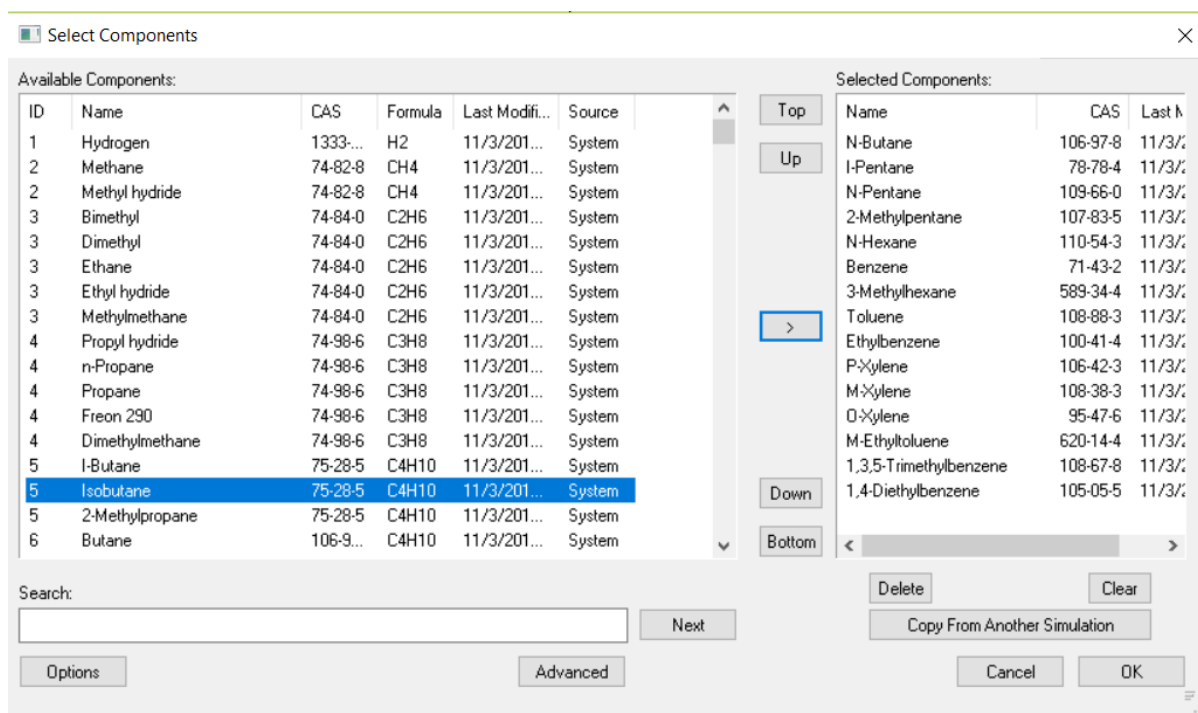
Tablica 3.2. Pomoćni mediji

Kondenzator		
Rashladni medij	<i>T_{ul} / T_{iz} / °C</i>	<i>p / bar</i>
Rashladna voda	25/35	3
Isparivač		
Ogrjevni medij	Djelotvornost peći	Ogrijevna vrijednost / kWh/t
Lož ulje	75 %	11164,9

3.3. Metodika

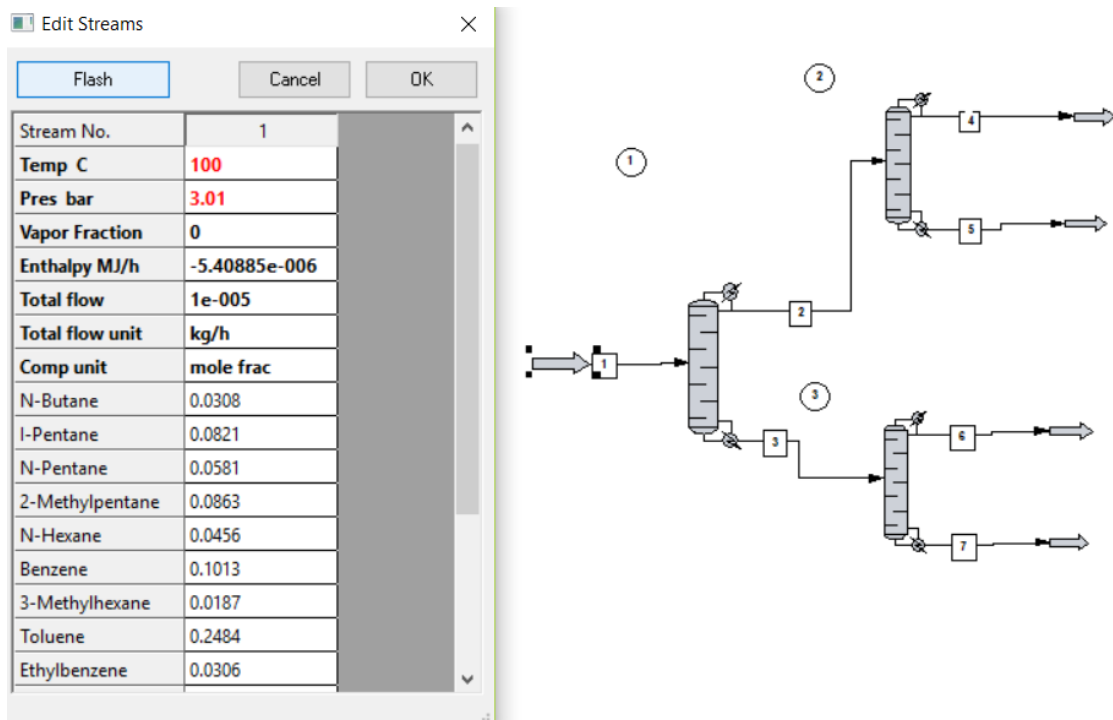
Kako bi se Kaibelova kolona simulirala u CHEMCAD-u sustav se promatra kao niz od tri binarne kolone. U predfrakcionatoru provodi se separacija najlakše i najteže hlapljive komponente u dvije struje, a ostale komponente se raspoređuju između vrha i dna. Dobivena parna i kapljevita struja uvode se kao pojna smjesa u glavnu kolonu na vrhu, odnosno dnu. Prefrakcionator je povezan s glavnom kolonom izravnom kapljevitom i parnom povratnom strujom. Budući da se za separaciju koristi toplina navedenih struja nema potrebe za isprivačem i kondenzatorom. Ovakvo povezivanje kolona naziva se toplinskom vezom. Glavna kolona dijeli smjesu na četiri produkta te se s toga može promatrati kao dvije binarne kolone povezane međusekcijom. U toj sekciji bitno je postići totalni refluks odnosno količina pare i kapljevine mora biti jednaka kako bi se ostvario optimalan prijenos tvari i energije te time i optimalan separacijski učinak.

Za početak je potrebno odrediti konfiguracije Kaibel kolone koje će se obraditi, odnosno broj stupnjeva za pojedinu konfiguraciju. U tu svrhu određivan je minimalan broj stupnjeva N_{min} . Kao što je ranije već navedeno, N_{min} se izračunava pomoću Fenske jednadžbe. Kako je taj model sadržan u *shortcut* modelu koji je dostupan u CHEMCADu, prva separacija simulirana je sa 3 *shortcut* kolone kako bi se odredio N_{min} .



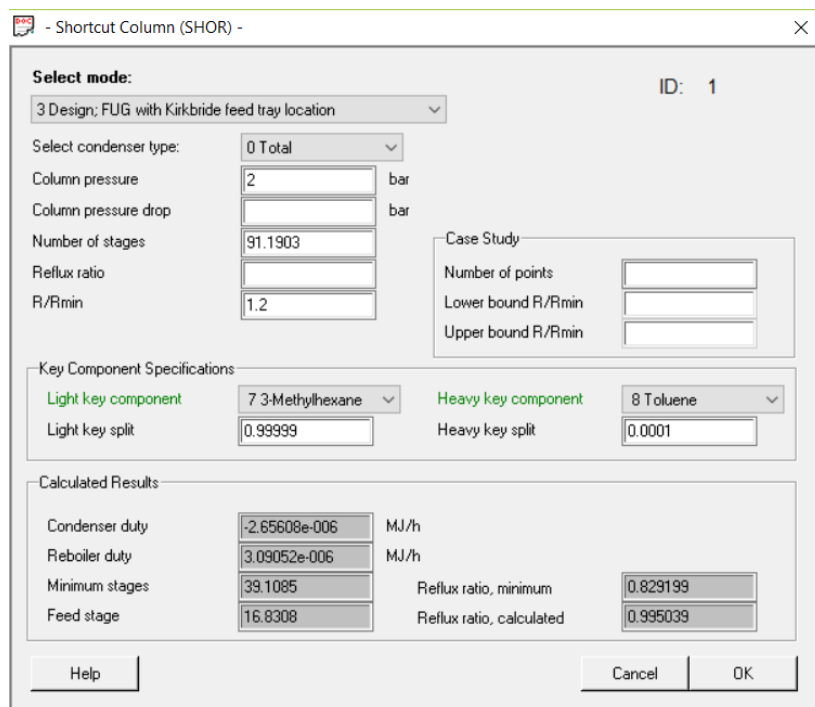
Slika 3.2. Sučelje za odabir komponenti

Prvi korak je definiranje komponenti iz baze podataka dostupne u CHEMCADu (Slika 3.2.). Potom se definiraju minimalna i maksimalna temperatura procesa kao i minimalni i maksimalni tlak. U ovom prozoru također je moguće odabrati komponente koje neće sudjelovati u procesu nego će se koristiti kasnije kao rashladni ili ogrijevni medij. Slijedi odabir termodinamičkog modela kao i niza drugih postavki vezanih za prijenos tvari i energije. Modeli se odabiru prema iskustvu ili prema odgovarajućoj literaturi. U ovom slučaju odabran je UNIFAC model. Nakon odabira modela odabiru se procesne jedinice. Ovdje su to tri shortcut kolone međusobno povezane prema Slici 3.1. Zatim unosimo sastav i stanje pojne smjese (Slika 3.3.) te se pokreće simulacija.



Slika 3.3. Definiranje stanja i sastava pojne smjese

Cilj separacije u prvoj koloni, tzv. prefrakcionatoru, je odvojiti benzen i lakše komponente kao vršni produkt, a toluen i teže komponente kao produkt dna. U tu svrhu u *shortcut* modelu moramo definirati iscrpak lakše ključne komponente, iscrpak teže ključne komponente kao i tlak i refluksni omjer R/R_{min} .



Slika 3.4. Definiranje parametara za shortcut kolonu

Ista analogija primjenjuje se u sljedeće dvije kolone, s tim da je u gornjoj koloni potrebno dobiti vršni produkt s manje od 1,5 mas. % benzena, a produkt dna sa 65-70 mas. % benzena. U donjoj koloni destilat je toluen s 98 mas % čistoće, a teške komponente predstavljaju proizvod dna gdje udio toluena ne smije biti veći od 0,1 mas. %. Na ovaj način kao rezultat dobije se minimalan broj ravnotežnih stupnjeva, N_{min} za gornju i donju kolonu, čiji zbroj, s 20 dodatnih ravnotežnih stupnjeva za direktnu izmjenu topline između pare i kapljevine predstavlja minimalan broj stupnjeva za ovu separaciju u Kaibelovoj koloni.

Slijedi simulacija kolone s razdjelnom stijenkom. U tu svrhu odabran je SCDS model zbog rigoroznijeg izračuna i mogućnosti uvida u stanja medija u svakoj od sekcija. Prvih par koraka u izradi simulacije jednaki su koracima za izračun N_{min} tj, odabiru se komponente i termodinamički model. Sami izgled simulacije je drugačiji, a i koriste se samo dvije SCDS kolone. Prva radi kao predfrakcionator, a druga kao glavna kolona. Također, samo definiranje pojedinih parametara u SCDS kolonama drugačije od shortcut kolone. Kod SCDS kolona za simulaciju definira se broj stupnjeva, pojni stupanj, vršni tlak, pad tlaka u koloni i kondenzatoru te odabremo način rada kondenzatora i reboilera kao i stupnjeve na kojima se produkti crpe iz kolone.

The screenshot shows the 'SCDS Distillation Column' software interface. The 'Specifications' tab is selected, showing 'Heat and Material Balance Specifications' and 'Side Product Specifications'.

Heat and Material Balance Specifications (ID: 1)

Condenser mode:	Specification	Component
12 Distillate component mass fraction	0.013	6 Benzene
Select reboiler mode:	Specification	Component
12 Bottom component mass fraction	1e-005	8 Toluene

Side Product Specifications

Stream	Stage	Side product mode	Specification	Unit
3	25	Liquid Mass Flow	15762	kg/h
4	48	Liquid Mass Flow	3982	kg/h
5	67	Liquid Mass Flow	7528	kg/h
6	122	Vapor Mass Flow	34001	kg/h

Optional Tray Specification

Adjust the specification for: 0. None

until the: 0. Tray Tray

Variable: 0 = None

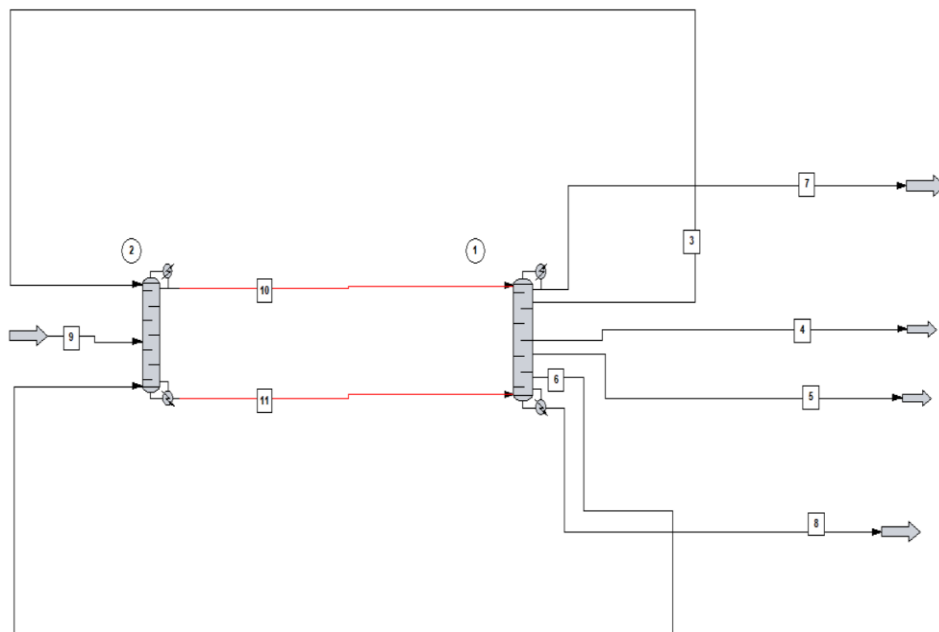
Phase: 0. Liquid

is equal to a specified value of:

Slika 3.5. Odabir načina rada reboilera i kondenzatora za SCDS kolonu

Nakon što je model u simulaciji odabran i nakon što je definirana pojna smjesa potrebno je fizički povezati kolone. Kako se kod ovakvih konfiguracija želi integrirati toplinu struja, prefrakcionator nema kondenzator i isparivač nego potrebnu toplinu osiguravaju povratne struje pare odnosno kapljevine iz glavne kolone.

Izgled ispravno povezanih procesnih struja u simulaciji vidi se na *Slici 3.6*. Ostali brojevi stupnjeva za produkte glavne kolone određuju se tako da bi pojedine sekcije imale dovoljno teorijskih stupnjeva za efikasno izvršiti pojedine separacije.



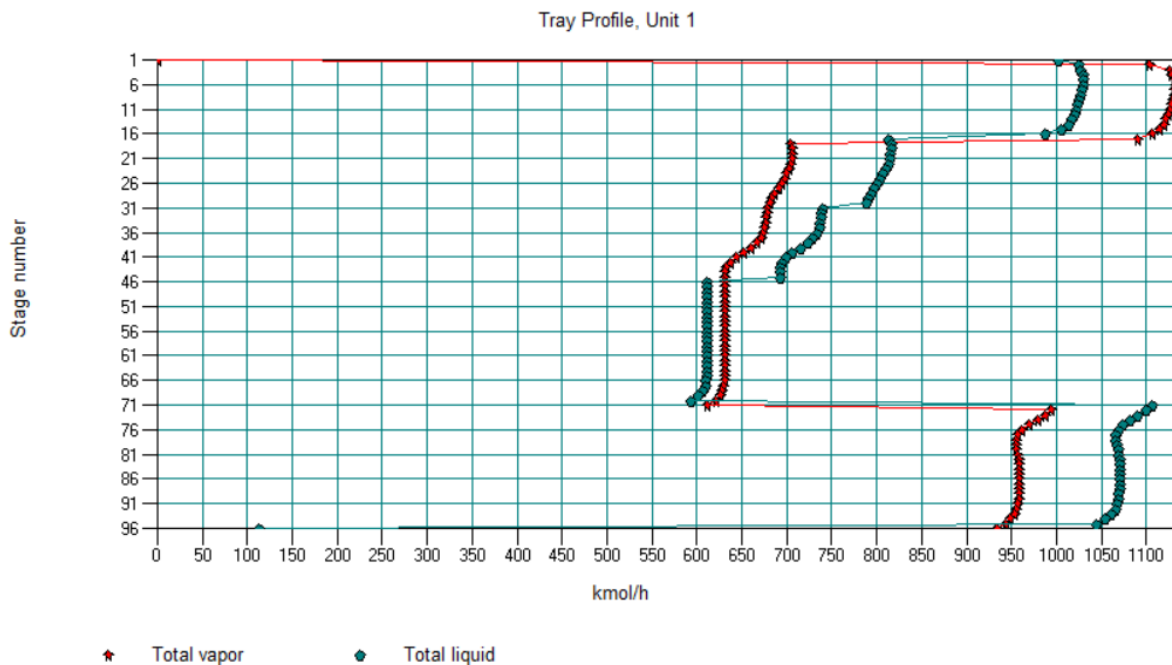
Slika 3.6. Izgled simulacije u CHEMCADu sa odgovarajućim brojem struja

Kako bi se to simuliralo u CHEMCAD-u potrebno je obratiti pažnju na nekoliko pravila:

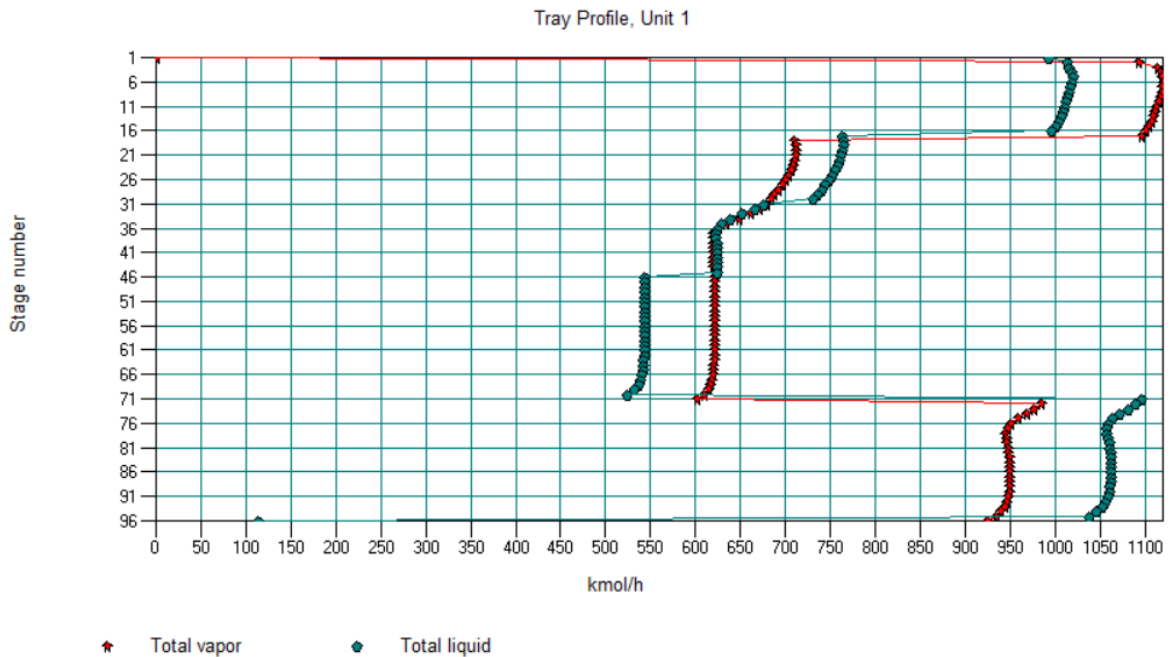
- povratnu struju kapljevine iz glavne kolone (struja 3) u prefrakcionator potrebno je uvesti na stupnju broj 1, a povratnu struju pare (struja 6) na zadnjem stupnju
- struja koja sadrži vršni produkt prefrakcionatora (struja 10) mora ulaziti u glavnu kolonu na stupnju na kojem povratna struja kapljevine (struja 3) izlazi iz te kolone
- struja koja sadrži produkt dna prefrakcionatora (struja br. 11) mora ulaziti u glavnu kolonu na stupnju na kojem povratna struja pare (struja 6) izlazi iz te kolone.

Kada su kolone ispravno povezane definira se pad tlaka i broj stupnjeva u prefrakcionatoru, a u glavnoj koloni vršni tlak i pad tlaka u koloni i kondenzatoru. Izborom načina rada reboilera i kondenzatora definira se sastav destilata i produkta dna (1,3 mas. % benzena odnosno 0,001 mas. % toluena). Također, potrebno je definirati protoke dvaju bočnih produkata (struja 4 – 3982 kg/h i struja 5 – 7528 kg/h).

Nakon što su svi parametri zadani potrebno je provjeriti totalni refluks. U dijelu kolone između prvog i drugog bočnog produkta bilanca pare i kapljevine mora biti jednaka nula. Drugim riječima, količina pare i kapljevine koja ulaze u sekciju mora biti jednaka količini koja izlazi iz sekcije. Kako bi podesili totalni refluks u CHEMCAD-u izrađuje se profil kolone s krivuljama ukupne količine pare i kapljevine u koloni. Kada kolona radi pri totalnom refluksu krivulje pare i kapljevine se u području između bočnog produkta 1 i 2 preklapaju kao što je vidljivo na *Slikama 3.7.* i *3.8.* Na položaj krivulja može se utjecati izmjenom protoka struja 3 i 6 (povratne struje kapljevine i pare iz glavne kolone) te tako postići totalni refluks, a time i optimalno ostvariti integraciju topline u sustavu.



Slika 3.7. Profil kolone koja ne radi pri totalnom refluksu



Slika 3.8. Profil kolone koja radi pri totalnom refluksu

Ovako definirane simulacije moraju dati isti sastav proizvoda. Kada su svi navedeni uvjeti zadovoljeni iz simulacija se isčitavaju podaci i izračunava se približna funkciju cilja $N^*(R+1)$ te se započinje se s dimenzioniranjem i procjenom troškova koje se provodi po Delft metodi.¹⁷

Kako bi se izračunali ukupni godišnji troškovi koji u radu predstavljaju rigoroznu funkciju cilja, svaki komad opreme mora biti propisno dizajniran. Drugim riječima dimenzije opreme moraju biti poznate. Dimenzije plašta kolone ovise o protocima kroz kolonu koji se specificiraju prema podacima dobivenima provođenjem simulacija.¹⁷ Također određuje se i pozicija razdjelne stijenke s ciljem ostvarivanja pada tlaka po visini sekcije ($\Delta p / \Delta z$) manjeg od 3 mbar/m. Za ovaj rad kolone koje se analiziraju opremljene su punilima. Rigorozna funkcija cilja koju se želi pratiti (TAC) sastoji se od pogonskih i investicijskih troškova. Investicijski troškovi (TIC) sastoje se od investicijskih troškova kondenzatora, isparivača, unutrašnjih komponenti kolone i plašta. Kako bi izračunali investicijske troškove za kondenzator koristi se jednadžba:

$$Cijena (\$) = (M\&S / 280) * (474,7 * A^{0,65}) * (2,29 + F_c) \quad (15)$$

Potrebna površina kondenzatora dobije se dimenzioniranjem istoga u CHEMCADu. Veličina $M\&S$ je Marshall and Stevens indeks a F_c je indeks koštanja izračunat uz pomoć korekcijskih faktora koji su dostupni u literaturi.¹⁷ Investicijski troškovi za reboiler računaju se također

prema sličnom izrazu, a ovisi o faktorima koštanja i toplinskoj dužnosti isparivača koja se dobije kao rezultat, simuliranjem pojedinog slučaja. Investicijski troškovi unutrašnjih komponenti sastoje se od ukupnih troškova raspodjelnika kapljevine, sabirnika kapljevine, nosača i troškova punila za obrađeni slučaj. Troškovi sabirnika i raspodjelnika kapljevine te nosača računaju se prema:

$$Cijena (\$) = Faktor\ pozicije * A * Cijena / m^2 \quad (16)$$

Faktor pozicije iznosi 1 za sekcije koje nisu podijeljene razdjelnom stijenkom, a 1,2 za sekcije kroz koje prolazi stijenka. Cijene pojedinih komponenti nalaze se u sljedećoj tablici:

Tablica 3.3. Cijene opreme po m²

Oprema	Cijena / \$/m ²
Raspodjelnik kapljevine	4000
Sabirnik kapljevine	2000
Nosači	800

Troškovi punila određuju se prema:

$$Cijena (\$) = V * Faktor\ površine * (Cijena / m^3) * Faktor\ pozicije \quad (17)$$

V u ovoj jednadžbi predstavlja volumen pojedine sekcije dobiven umnoškom visine i površine presjeka sekcije, a za cijenu punila uzeto je 2000 \$/m³. Za izračun ukupnih investicijskih troškova ostalo je još odrediti investicijske troškove plašta koji se određuju prema:

$$Cijena (\$) = 2981,7 * (M\&S/280) * d^{1,066} * H^{0,802} \quad (18)$$

Zbrojem svih opisanih investicijskih troškova dobiju se ukupni investicijski troškovi (TIC). Slijedi određivanje ukupnih godišnjih pogonskih troškova (TOC). Ukupni godišnji pogonski troškovi sastoje se od godišnjih pogonskih troškova kondenzatora i isparivača. Godišnji troškovi kondenzatora računaju se prema izrazu:

$$Cijena (\$) = F_w * (Cijena / t) * 8322 \quad (19)$$

Veličina F_w je protok rashladne vode u kondenzatoru, a dobiven je kao i prethodno površina dimenzioniranjem u CHEMCADu. Za cijenu rashladne vode uzima se 0,03 \$/t vode. Godišnji troškovi isparivača računaju se prema izrazu:

$$\text{Cijena (\$)} = ((Q_r * \text{Cijena lož ulja} / t) / (\text{Efikasnost isparivača} * \text{Ogrijevna vrijednost lož ulja})) * 8322 \quad (20)$$

Na ovaj način određeni su ukupni pogonski troškovi. Na temelju dobivenih vrijednosti za TIC i TOC računaju se ukupni godišnji troškovi prema:

$$TAC = (TIC / \text{životni vijek}) + TOC \quad (21)$$

Za životni vijek uzima se 10 godina. Ovako dobivenu rigoroznu funkciju cilja TAC uspoređuje se sa prethodno određenom funkcijom $N*(R+I)$ te se ocjenjuje primjenjivost približne funkcije na proces obrađen u radu.¹⁷

4. REZULTATI I RASPRAVA

Kao što je već spomenuto, predfrakcionatori služe da bi se benzen i lakše komponente separirale u produkt vrha, a toluen i teže u produkt dna. Također, predfrakcionator nema kondenzator ni isparivač budući da potrebnu toplinu osiguravaju povratne struje iz glavne kolone. Da bi se separacija ostvarila predfrakcionatori definiraju se na sljedeći način:

Tablica 4.1. Parametri predfrakcionatora

Slučaj	1	2	3	4	5	6
N	20	31	32	44	48	53
Pojni stupanj za kapljevitu / parnu povratnu struju	1/20	1/31	1/32	1/44	1/48	1/53
Pojni stupanj	10	14	16	22	24	27
Pad tlaka/ bar	0,017	0,026	0,027	0,037	0,04	0,0371

Kako bi simulacije bile usporedive kondenzator i isparivač za svaku simulaciju definirani su na način da drže sastav destilata i produkta dna konstantnim (1.33 % benzena odnosno 0.001% toluena u dnu). Također, fiksirani su i protoci prvog i drugog bočnog produkta (S1 – 3982 kg/h , S2 – 7528 kg/h). Ostale specifikacije prilagođene su kako bi postigli željenu čistoću odnosno totalni refluks:

Tablica 4.2. Parametri glavne kolone

Slučaj	1	2	3	4	5	6
Tlak/ bar	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Pad tlaka u kondenzatoru/ bar	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Pad tlaka u koloni/ bar	0,081	0,1	0,11	0,12	0,13	0,12
<i>N</i>	96	118	131	142	156	172
<i>Nuk</i>	116	149	163	186	204	225
Pojni stupanj za struju 10	17	19	21	23	25	25
Pojni stupanj za struju 11	71	90	100	111	122	134
Protok kapljevite povratne struje/ kg/h	18831	14441	22373	19337	15762	15558
Protok parne povratne struje/ kg/h	36504	31690	39988	37532	34001	33520

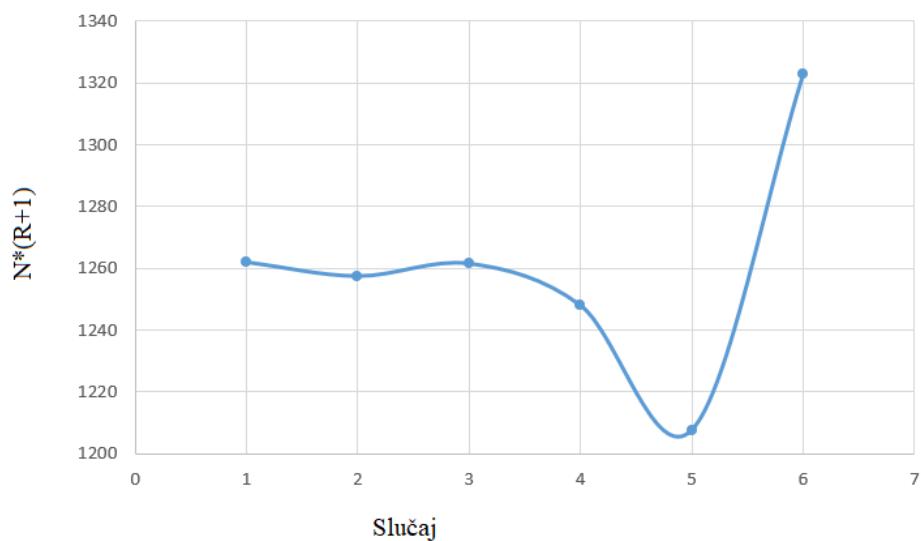
Kako bi se našla energetski najpovoljnija simulacija kao približnu funkciju cilja prati se veličina $N*(R+I)$. Provedbom simulacije dobiju se sljedeći rezultati te se računa približna funkcija cilja:

Tablica 4.3. Rezultati simulacija

Slučaj	1	2	3	4	5	6
<i>Nuk</i>	116	149	163	186	204	225
% benzena u destilatu	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
% benzena u prvom bočnom produktu	65,56	65,65	65,63	65,65	65,62	65,63
% toluena u drugom bočnom produktu	99,89	99,96	99,99	99,97	99,99	99,99
% toluena u dnu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Q_r / MW	9,09	7,21	6,67	5,87	5,26	5,23
Q_c / MW	-8,43	-6,55	-6,01	-5,21	-4,6	-4,57
Refluksni omjer	9,88	7,44	6,74	5,71	4,92	4,88
$N^*(R+I)$	1262,08	1257,56	1261,62	1248,06	1207,68	1323
T_{vrh} / °C	58,66	58,66	58,66	58,66	58,66	70,96
T_{dno} / °C	137,81	137,81	137,81	137,81	137,812	147,11

Iz rezultata simulacije vidljivo je da s porastom broja stupnjeva opadaju dužnosti izmjenjivača, što se može objasniti većom količinom pare i kapljevine koja se može iskoristiti kao refluks te time osigurati veću količinu topline za integraciju. Također, funkcija cilja pokazuje minimum za slučaj 5 (204 ravnotežna stupnja) koji prema tome predstavlja najoptimalniju konfiguraciju za ovakvu separaciju.



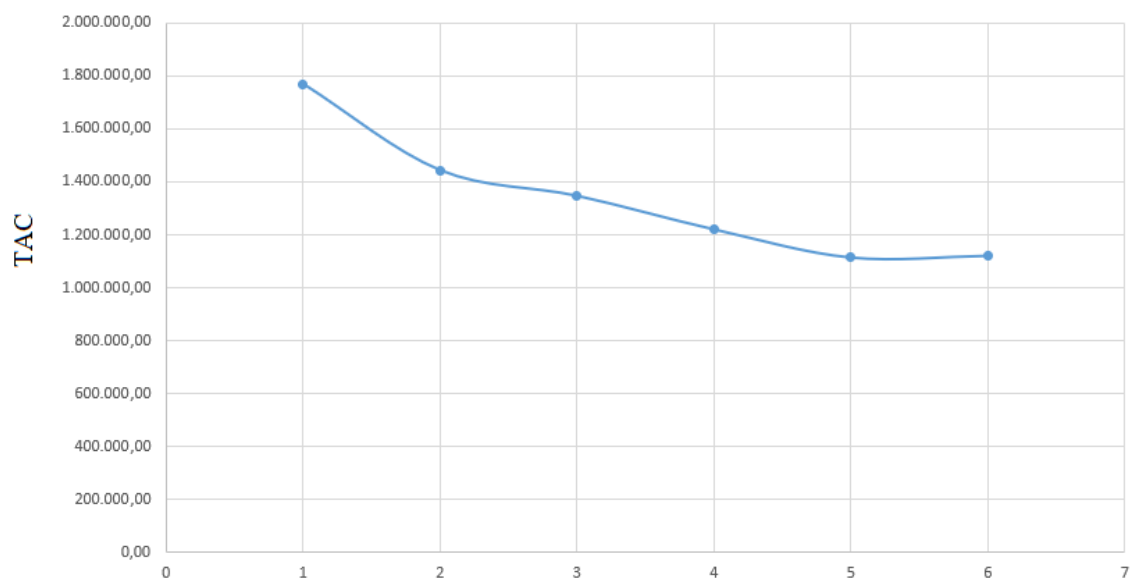
Slika 4.1. Grafički prikaz rezultata optimizacije

Uz približnu funkciju cilja prate se i godišnji toškovi kao rigoroznu funkciju cilja. Rezultati izračuna godišnjih troškova i dimenzioniranja za pojedini slučaj su sljedeći:

Tablica 4.4. Rezultati za dimenzioniranja i izračuna TAC

Slučaj	1	2	3	4	5	6

Troškovi instalacije/ \$	4.207.639,61	3.713.924,30	3.567.681,94	3.515.847,16	3.373.159,69	3.483.670,67
Operativni troškovi/ \$	1.347.735,35	1.072.826,36	990.992,17	870.021,24	778.306,45	773.584,50
TAC/ \$	1.768.499,31	1.444.218,79	1.347.760,36	1.221.605,96	1.115.622,42	1.121.951,57
D/ m	2,95	2,7	2,65	2,6	2,5	2,5
H/ m	52,60	54,60	56,60	58,60	61,00	63,80
Površina kondenzatora/ m²	300	237	220	198	170	169
Protok rashladne vode/ t/h	722,20	564,77	517,69	448,50	395,54	393,00

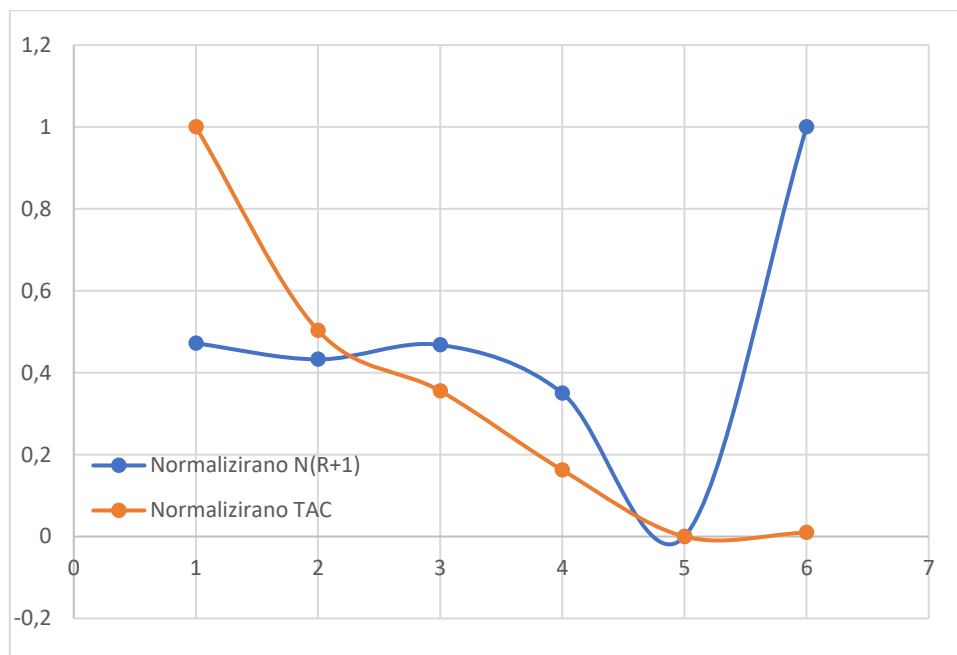


Slika 4.2. Grafički prikaz godišnjih troškova

Kao što je vidljivo, operativni troškovi opadaju, a troškovi instalacije rastu s porastom broja stupnjeva. To objašnjavamo većom količinom toplinske energije koja stoji na raspolaganju za integraciju u sustav, a s porastom broja stupnjeva raste broj punila i volumen plašta čime rastu investicijski troškovi. Ponovno, minimum godišnjih troškova je za slučaj broj 5, što se poklapa s minimumom približne funkcije cilja $N^*(R+I)$.

Tablica 4.5. Tablica sa normaliziranim podacima za rigoroznu i približnu funkciju cilja

Slučaj	1	2	3	4	5	6
Norm. $N^*(R+I)$	0,47173	0,43254	0,46774	0,35016	0,00000	1,00000
Norm. TAC	1,00000	0,50331	0,35556	0,16233	0,00000	0,00969



Slika 4.3. Grafički prikaz normaliziranih godišnjih troškova i rigorozne funkcije cilja $N^*(R+I)$

Grafičkim prikazom i usporedbom normaliziranih podataka (Slika 4.3.) za približnu i rigoroznu funkciju cilja, vidljivo je da obje funkcije dosežu minimum za slučaj 5. Iako se minimumi podudaraju jasno je da se, ukoliko se prati samo približna funkcija cilja $N^*(R+I)$,

propušta prilika za ostvarivanje dodatnih ušteda kojima može rezultirati dodatno optimiranje i praćenje rigorozne funkcije cilja *TAC*.

5. ZAKLJUČAK

Troškovi provedbe procesa separacije u Kaibelovoj koloni znatno je niža u odnosu na konvencionalne konfiguracije za separiranje četiriju produkata. Energetski troškovi su niži zahvaljujući izbjegavanju porasta entropije uslijed ponovnog miješanja. Također, potreban je samo jedan isparivač i jedan kondenzator, a čitava konfiguracija izvodi se u jednom plaštu što znači i manje investicijske troškove. Uzimajući sve to u obzir jasno je da ovakva konfiguracija predstavlja održivo rješenje za separaciju smjese aromata.

Provedenim simulacijama pokazane su energetske uštede koje se mogu ostvariti primjenom razdijelne stijenke. Sve sintetizirane izvedbe zadovoljavaju zahtjeve čistoće produkta. Kako bi se usporedile različite konfiguracije, potrebno je koristiti funkciju cilja, koja će u sebi sadržati i pogonske i investicijske troškove. U ovom radu provedena je evaluacija primjenjivosti približne funkcije cilja, $N(R+1)$, koja se često koristi umjesto TAC, jer je TAC nepraktično računati u svakom koraku simulacije. Pokazano je da, iako se za promatrani sustav vrijednosti obje funkcije cilja poklapaju minimumi, trend je bitno različit. Stoga se za inicijalni proračun preporuča koristiti $N(R+1)$, no zatim je potrebno za konfiguracije u okolici odabrane izračunati TAC, radi sigurnosti.

6. POPIS OZNAKA

Δp – pad tlaka, bar

F_v – volumni protok tekućine kroz fluid m^3/h

ρ – gustoća tekućine, kg/dm^3

F – protok pojne smjese, kmol/h

D – protok destilata (gornji produkt), kmol/h

B – protok donjeg produkta, kmol/h

x_F – molni udio u pojenju

x_D – molni udio u destilatu

x_B – molni udio u donjem produktu

Q_r – toplinska dužnost isparivača, MW

Q_c – toplinska dužnost kondenzatora, MW

V – protok pare, kmol/h

L – protok kapljevine, protok otapala, kmol/h

λ – specifični toplinski kapacitet, $\text{J}/\text{kmol K}$

R – refluksni omjer

N – broj teorijskih stupnjeva

H – visina kolone, m

E – djelotvornost plitice

R – stvarni refluksni omjer; opća plinska konstanta, $\text{J}/\text{kmol K}$

p – tlak, bar

x - molni udio otopljene komponente u otapalu

y - molni udio otopljene komponente u plinskoj smjesi

X - koncentracija kapljevite faze izražena u omjerima, kmol/kmol

z_i – množinska koncentracija komponente i

r_i^T – iscrpak komponente i u destilatu

q – molni postotak kapljevine u pojnoj smjesi

N_a – broj potrebnih stupnjeva

N_t - broj teorijskih stupnjeva

J_1 – množinska gustoća toka komponente 1, kmol/sm²

$D_{1,2}$ – koeficijent difuzije komponente 1 u komponenti 2, m²/s

c_i – koncentracija komponente i , kmol/m³

L – duljina difuzijskog puta, m

d – promjer destilacijske kolone, m

$M\&S$ – Marshall and Stevens indeks

F_c – indeks koštanja

A – površina, m²

F_w – protok rashladne vode, t/h

7. LITERATURA

1. Beer, E., Destilacija, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 2006
2. <http://www.koval.hr> (pristup 14. kolovoza 2018.)
3. Sander, A., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu: Toplinski separacijski procesi, interna skripta, FKIT, Zagreb, 2011.
4. https://en.wikibooks.org/wiki/Introduction_to_Chemical_Engineering_Processes/Vapor-Liquid_equilibrium (pristup 14. kolovoza 2018.)
5. <http://www.rccostello.com/distil/distilint.htm> (pristup 6. siječnja 2019.)
6. <https://neutrium.net/unit-operations/distillation/mccabe-thiele-plot/> (pristup 12. kolovza 2019.)
7. Talapatra, S., Farell, K., Two-Phase Flow Regimes in Exchangers and Piping, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition Paper, USA, 2015
8. Đuranović, M., Ferdelji, N., Diplomski rad: Rektifikacijski uređaj za kontinuiranu destilaciju etanola, FSB, Zagreb, 2018
9. <https://www.chemicalprocessing.com/articles/2014/choose-the-correct-condenser/> (pristup 13. kolovoza 2019.)
10. Pilling, M., Holden, B.S., Choosing Trays and Packings for Distillation, CEP Magazine, 2009, 44-50
11. http://intra-process.com/index.php?lg=en&main=Bubble_Cap_Trays&site=01:01:01 (pristup 13. kolovoza 2019.)
12. Dejanović, I., Matijašević, Lj., Halvorsen, I.J., Skogestad, S., Jansen, H., Kaibel, B., Olujić, Ž., Designing four-product dividing wall columns for separation of a multicomponent aromatics mixture, Chemical Engineering Research and Design, 89, 2011, 1155-1167
13. Halvorsen, I. J., Skogestad, S., Energy efficient distillation, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011, 1-10

14. Wolf, E. A., Skogestad, S., Operation of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Columns, , Industrial & Engineering Chemistry Research, 34, 1995, 2094-2103
15. Reneaume, J. M., Estel, M. L., Doktorski rad: Conceptual Design, Simulation and Experimental Validation of Divided Wall Column: Application for Non-reactive and Reactive Mixture, Universite de Toulouse, 2015
16. Chemstations Inc., CHEMCAD Version 6 – User guide, SAD, 2007.
17. Kiss, A. A., Advanced Distillation Technologies, Design, Control and Applications, John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2013

8. ŽIVOTOPIS

Daniel Galov, univ. bacc. ing. cheming., [REDACTED]
[REDACTED] 2010. godine u Metkoviću završava Gimnaziju Metković te iste godine upisuje preddiplomski studij Kemijsko inženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Preddiplomski studij završava 2015. godine s temom "Učinak kvantnomehaničkog tuneliranja u radu tranzistora" pod mentorstvom profesora Vladimira Dananića. Diplomski studij upisuje 2017. godine a od 2018. do danas radi kao servisni i aplikativni inženjer za analitičku opremu.