

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Tomislav Horvat

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Tomislav Horvat

PRIMJENA DIZALICE TOPLINE U INDUSTRIJSKOM PROCESU

Voditelj rada: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Veljko Filipan

Doc. dr. sc. Igor Dejanović

Izv. prof. dr. sc. Domagoj Vrsaljko

Zagreb, rujan 2018.

SAŽETAK RADA

Ovaj rad promatra mogućnosti primjene dizalica topline u industrijskim procesima. Promatra se proces destilacijske kolone (deizopentanizera) te integraciju dizalice topline u taj proces. Razmatra se integracija više vrsta dizalica topline, prvenstveno dizalica topline s vanjskim radnim medijem (korištenjem više vrsta radnih medija) te dizalica topline s rekompresijom vršnih para. Cilj je odrediti toplinski koeficijent pumpi te odrediti ima li ekonomske računice kod integracije dizalica topline. Prethodna istraživanja potvrdila su ekonomsku isplativost integracije dizalica topline na jednostavnijim primjerima destilacijske kolone (kod separacije ekvimolarnih smjesa propan/propen te separacije smjese izobutan/*n*-butan). Ovdje se promatra industrijska izvedba procesa separacije smjese izopentan/*n*-pentan ne samo s ekonomskog aspekta, već i s termodinamičkog aspekta, što je također nešto što se nije uzimao u obzir kod prethodnih istraživanja.

Ključne riječi: VRC (vapor recompression), VC (vapor compression), dizalice topline, CHEMCAD, destilacija

ABSTRACT

This paper examines the possibilities of using heat pumps in industrial processes. The process of the distillation column (deisopentaniser) and the integration of heat pumps in this process are being studied. The integration of multiple types of heat pumps is considered, preferably heat pumps with reffridgerants (operating using multiple types of reffridgerants) and the heat pump with vapour recompression. The aim is to determine the coefficient of performance and determine if there is an economic viability in heat pump integration. Previous studies have confirmed the economic viability of the heat pump integration on the simpler examples of the distillation column (with separation of equimolar mixtures of propane / propene and separation of the isobutane / n-butane mixture). Here is an example from industry considering the separation process of the isopentane / n-pentane mixture not only from an economic point of view, but also from a thermodynamic aspect, which is also something that has not been taken into account in the previous researches.

Key words: VRC, VC, heat pumps, CHEMCAD, distillation

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO.....	2
2.1. PROCES PRERADE NAFTE.....	2
2.2. DESTILACIJA.....	4
2.2.1. DIJAGRAM VRELIŠTA	5
2.2.2. RELATIVNA HLAPIVOST	6
2.2.3. RAVOTEŽA PARA-KAPLJEVINA ZA SMJESU IZOPENTAN/ <i>n</i> -PENTAN	7
2.2.4. DESTILACIJSKA KOLONA.....	8
2.2.4.1. PLITICE	10
2.2.4.2. PUNILA	12
2.2.5. PROJEKTIRANJE PROCESA KONTINUIRANE DESTILACIJE	13
2.2.5.1. FENSKE-UNDERWOOD METODA	14
2.2.5.2. GILLILANDOVA METODA.....	14
2.3. TRANSFORMATORI TOPLINE.....	15
2.3.1. TERMODINAMIČKE OSNOVE PROCESA HLAĐENJA.....	16
2.3.2. DIZALICE TOPLINE (DT).....	18
3. MODELIRANJE PROCESA, KOMPONENTI I SIMULACIJE	21
3.1. PODACI S DEIZOPENTANIZERA	21
3.2. ODABIR KOMPONENTI	22
3.3. POJEDNOSTAVLJENI MODEL	24
3.4. SCDS MODEL DESTILACIJSKE KOLONE	26
3.5. SCDS MODEL S INTEGRIRANOM DIZALICOM TOPLINE	28
3.6. SCDS MODEL S INTEGRACIJOM VRC DT	30
3.7. SCDS MODEL S INTEGRIRANOM VC DT	33
3.8. DIMENZIONIRANJE	35
4. REZULTATI SIMULACIJE I USPOREDBA S EKSPERIMENTALNIM PODACIMA.....	36
4.1. POJEDNOSTAVLJENI MODEL	36
4.2. SCDS MODEL	37
4.3. VRC DT.....	39
4.4. VC DT DIMETIL-ETER	40
4.5. VC DT IZOBUTAN.....	41
4.6. VC DT NH ₃	42

4.7. VC DT PROPAN	43
4.8. USPOREDBA SVIH SIMULACIJA	44
5. RASPRAVA.....	45
6. ZAKLJUČAK	46
7. POPIS SIMBOLA	47
8. LITERATURA.....	48
9. ŽIVOTOPIS.....	49

1. UVOD

U ovom radu razmatrat će se primjena dizalica topline u industrijskom procesu. Industrijski proces koji se promatra je dio rafinerijskog postrojenja, preciznije deizopentanizer u sklopu procesa izomerizacije. Deizopentanizer je naziv za destilacijsku kolonu kojoj je primarni cilj razdvajanje n-pentana i izopentana kao glavnih komponenata ulazne smjese, dok je cilj procesa izomerizacije povećanje oktanskog broja jedne od komponenata za dobivanje motornog benzina. Promatrat će se i primjena dviju vrsta izvedbe samih dizalica topline kao i korištenje raznih radnih medija te dati kratki osvrt na sam odabir radnih medija. Ukupna ocjena primjene dizalice topline u industrijskom procesu biti će načinjena od ekonomskog (ukupni godišnji troškovi) i termodinamičkog aspekta (koeficijent toplinske pumpe). Problemi će biti analizirani u CHEMCAD-u (procesni simulator). S obzirom da se sve više pažnje posvećuje energetskej učinkovitosti u svakodnevnom životu (kućanski aparati, stanovi, žarulje...) postavlja se pitanje kako povećati energetskej učinkovitost energetskei intenzivnih procesa poput destilacije koja zahtjeva puno energije i za grijanje (vodena para) i hlađenje (rashladna voda). Upravo primjena dizalica topline omogućava bolju energetskej učinkovitost samog procesa te smanjuje potrebu za energijom za grijanje i hlađenje na račun utrošene električne energije. Uslijed nedostatka podataka o integraciji dizalica topline u realan proces u industriji ovaj rad se temelji na simulacijama provedenim u procesnom simulatoru, a ulazni i izlazni sastavi i protoci te radni uvjeti kolone postavljeni su na temelju iskustva [1].

2. OPĆI DIO

2.1. PROCES PRERADE NAFTE

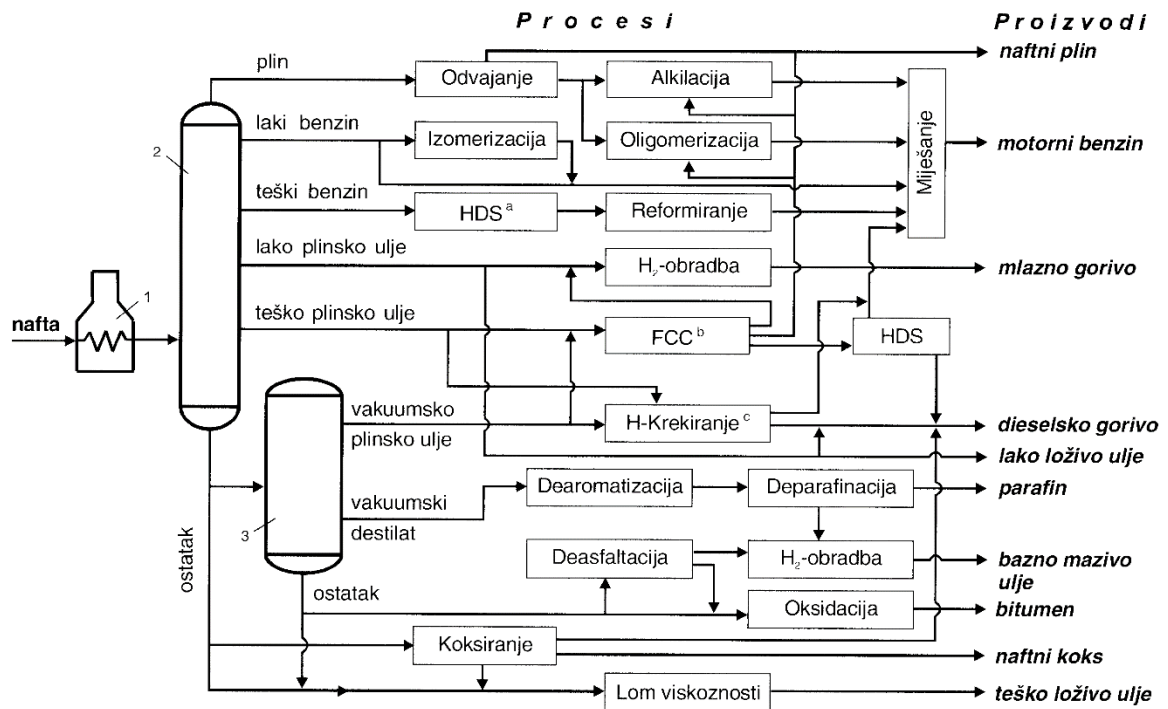
Nafta je prirodna kapljevita do polučvrsta tvar koja se nalazi u zemljinoj kori te se pretežito sastoji od smjese brojnih ugljikovodika i uvijek sadrži sumporove, dušikove i kisikove organske spojeve, a u manjim udjelima veći broj teških metala. Dobiva se kroz bušotine na ležištima nafte te se cjevovodima, tankerima i cisternama dovodi do rafinerije u kojoj se prerađuje. Glavni proizvodi su motorni benzini, dieselska goriva, goriva za zrakoplove, mlazna goriva, ukapljeni naftni plin, loživa ulja, maziva ulja te petrokemijske sirovine. Procesi prerade dijele se na:

- procese odvajanja (separacijske procese)
- procese pretvorbe (konverzijske procese)
- procese obradbe (processe čišćenja)

Procesi odvajanja, odnosno separacijski procesi često se nazivaju i primarnim procesima jer se temelje na fizikalnim svojstvima bez strukturnih promjena molekula. Najvažniji primarni proces je destilacija dok su manje zastupljeni i procesi ekstrakcije te adsorpcije. Procesi pretvorbe i obrade nazivaju se još i sekundarnim procesima kod kojih dolazi do promjene kemijske strukture molekula u svrhu povećanja iscrpka na vrjednijim proizvodima, poboljšanja kvalitete primarnih destilata (oktanski broj, cetanski broj...), dobivanja sirovina za petrokemijsku proizvodnju (alkani, olefini, aromatski ugljikovodici). Prema vrsti kemijske promjene procesi pretvorbe dijele se na:

- cijepanje većih u manje molekule (parno, toplinsko, katalitičko i hidrokrekiranje)
- pregradnja molekula (reformiranje i izomerizacija)
- povećanje molekulske mase (alkilacija, oligomerizacija, polimerizacija)

Na slici 1 prikazani su procesi koji se koriste te konačni proizvodi koji se dobivaju u rafinerijama.



1 – peć, 2 – atmosferska destilacija, 3 – vakuumska destilacija
^a hidrodesulfurizacija, ^b katalitičko krekiranje, ^c hidrokrekiranje

Slika 1 Temeljni procesi i proizvodi preradbe nafte [2]

Tijekom većine konverzijskih procesa preradbe naftnih preradevina zbivaju se i reakcije izomerizacije, posebice alifatskih ugljikovodika, ali samo kao popratne reakcije. Izomerizacija je poseban proces iz skupine procesa reformiranja benzina, u kojem se *n*-alkani prevode u izoalkane, tzv. *izomerizat-benzin* i služi kao sastavnica motornog benzina, povećavajući njegov oktanski broj. Sirovina je benzinska frakcija vrelišta do 62 °C i sadrži pretežno *n*-pentan i *n*-heksan. Proces se može upotrebljavati i za dobivanje odgovarajućih izoalkana, a najvažnije su reakcije i procesi pretvorbe:

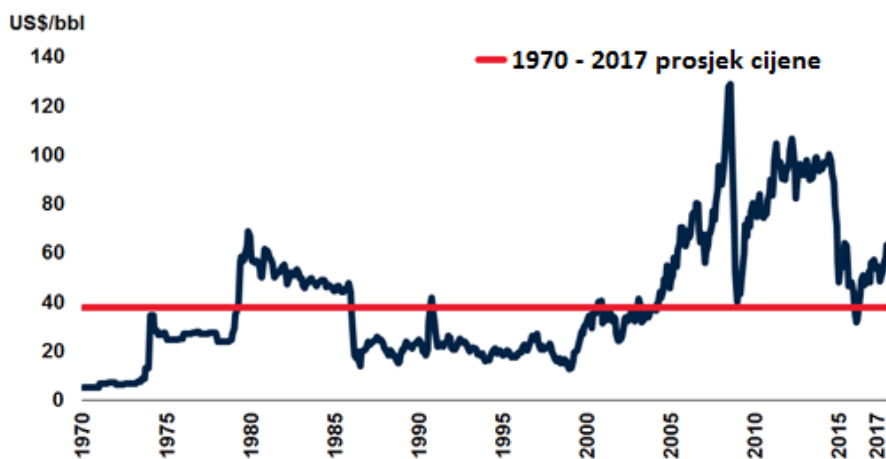
- *n*-butan → izobutan sirovina za proces alkilacije
 - *n*-pentan → izopentan sirovina za dobivanje izoprena
 - smjesa *n*-pentan/*n*-heksan sastavnica motornog benzina
- OB* = 25 – 35 *OB* = 95 – 100

Svojevrsne reakcije jesu:

- pretvorba *n*-alkana u metil-alkane
- premještanje metilne skupine duž lanca
- promjena broja metilnih skupina

Oktanski broj (*OB*) normirani je brojčani pokazatelj kakvoće motornog benzina s obzirom na jednolikost izgaranja (antidetonska vrijednost). Dobar rad motora podrazumijeva postupno i jednoliko izgaranje stlačene smjese goriva i zraka. Neujednačeno izgaranje nastaje zbog razlika u brzini oksidacije nazočnih ugljikovodika. Najbrže reagiraju granati ugljikovodici, jer sadrže vrlo reaktivan vodik na *terc*-C atomu, zatim olefini, a ostali, posebice ravnolančani alkani, izgaraju relativno sporo. Posljedica toga je nejednoliko izgaranje uz štetne „udare“, odnosno lupanje motora. Sklonost nejednolikom izgaranju povećava se i s povećanjem tlaka gorive smjese, a benzin s većim *OB* jednoliko izgara i pri višim tlakovima.

Na slici 2 vidi se cijena sirove nafte kroz period od 1970. do 2017. gdje se vidi utjecaj geopolitičkih događaja na cijenu nafte. Period 2. svjetskog rata te „naftni šokovi“ uz sve veću potražnju za rafinerijskim proizvodima (motorni benzin, dieselska goriva...) zbog rasta i razvoja društva te spoznaje da je nafta neobnovljivi izvor energije iznjedrili su mnoge tehnologije pomoću kojih se dobivalo više korisnih produkata iz iste količine nafte, to posebice uključuje okretanje sekundarnim procesima. [2]



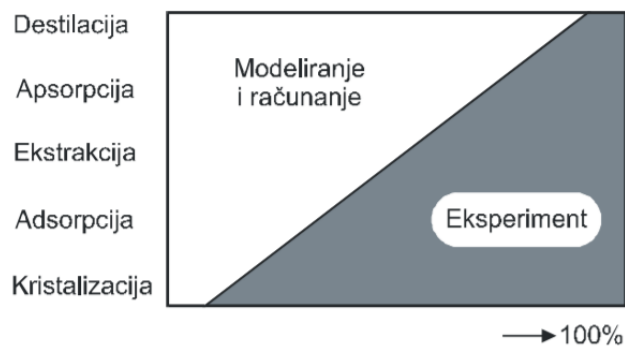
Slika 2 Cijena nafte u razdoblju godine 1970. - 2017. [3]

2.2. DESTILACIJA

Destilacija je proces kod kojeg se kapljevita smjesa dviju ili više komponenti razdvaja do pojedinačnih komponenti željene čistoće. Zasniva se na činjenici da para sadržava veći udio komponente nižeg vrelišta. Hlađenjem i kondenzacijom pare destilat će biti bogatiji na lakše hlapivoj komponenti dok će donji produkt sadržavati veću količinu teže hlapive komponente. Separacija komponenti destilacijom temelji se na njihovim različitim

temperaturama vrelišta. Separacija kapljevitih smjesa destilacijom jedan je od najstarijih separacijskih procesa. Unatoč tome što troši velike količine energije, kada god je potrebno separirati neku kapljevitu smjesu prvi je izbor uvijek destilacija. Destilacija se načelno ne provodi za separaciju smjesa jako i slabo zasićenih komponenti, smjesa izomera, smjesa vode i polarnih organskih ili anorganskih komponenti, smjesa kod kojih se intervali vrelišta preklapaju. Efikasnost destilacije ograničavaju: relativna hlapivost, zahtjevi na čistoću pojenja i produkta, potreba za ekstremnim temperaturama i tlakovima, mali kapacitet proizvodnje, neželjene reakcije na temperaturama u koloni. Stoga se za separaciju tih smjesa koriste drugi separacijski procesi poput: ekstrakcije, membranskih procesa, adsorpcije, azeotropne ili ekstrakcijske destilacije. [4]

Usprkos tome što se destilacija načelno ne provodi za separaciju smjesa izomera upravo zbog velikog teorijskog razumijevanja procesa destilacije moguće je modeliranje i projektiranje procesa destilacije. Slika 3 prikazuje omjer modeliranja i računanja prema eksperimentiranju kod projektiranja postrojenja za suvremene kemijsko-inženjerske operacije. Iz slike je vidljivo da je udio modeliranja i računanja pri projektiranju destilacijskih postrojenja oko 90%, a udio eksperimentiranja tek oko 10%. Što znači da se danas praktički cijele naftne rafinerije mogu projektirati na računalu koristeći suvremene kemijsko inženjerske programe poput programskih paketa CHEMCAD, Aspen Plus i drugih [5].

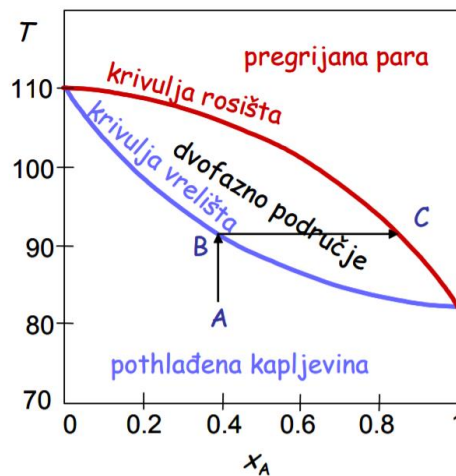


Slika 3 Omjer modeliranja i računanja prema eksperimentiranju kod projektiranja postrojenja za suvremene kemijsko-inženjerske operacije (1991.) [5]

2.2.1. DIJAGRAM VRELIŠTA

Dijagram vrelišta pokazuje kako se ravnotežni sastav komponenti mijenja ovisno o temperaturi pri definiranom tlaku. Slika 4 prikazuje dijagram vrelišta za kapljevitu smjesu A i B. Vrelište čiste komponente A odgovara sastavu u kojem je $x_A = 1$, a vrelište čiste komponente B sastavu u kojem je $x_A = 0$. U ovom je primjeru A lakše

hlapiva komponenta pa ima nižu temperaturu vrelišta. Gornja krivulja se naziva krivulja rosišta, a donja krivulja vrelišta. Točka rosišta je temperatura pri kojoj zasićena para počinje kondenzirati, a točka vrelišta temperatura pri kojoj kapljevina zavrije. Područje iznad krivulje rosišta odgovara pregrijanoj pari, a ispod krivulje vrelišta pothlađenoj kapljevini. Na primjer, zagrijavanjem pothlađene kapljevine koja sadrži 40% komponente A (točka A), koncentracija joj se ne mijenja sve dok se ne zagrije do temperature vrelišta (točka B) i tada započinje vrenje. Para koja nastaje vrenjem ima ravnotežni sastav definiran točkom C (oko 80%) [4].



Slika 4 Dijagram vrelišta [4]

2.2.2. RELATIVNA HLAPIVOST

Relativna hlapivost je mjera razlike hlapivosti dviju komponenti, odnosno njihovih temperatura vrelišta. Njena vrijednost ukazuje na lakoću separacije destilacijom. Relativna hlapivost komponente A u odnosu na komponentu B definira se kao:

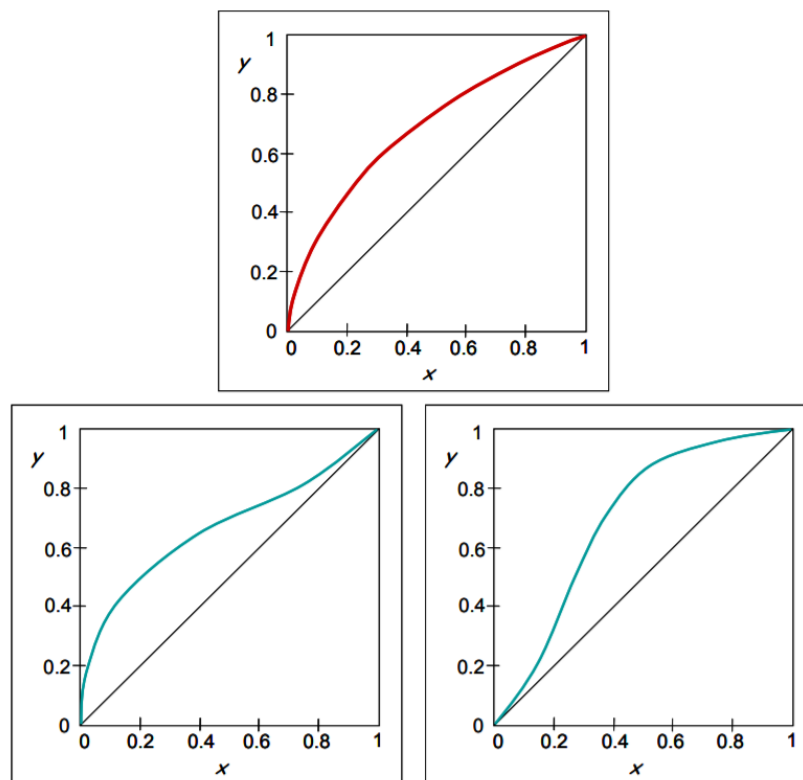
$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}} \quad (1)$$

U izrazu (1) x_A označava molni udio komponente A u kapljevini a y_A molni udio komponente A u parnoj fazi dok se indeks B odnosi na komponentu B. Ako je relativna hlapivost dvije komponente bliska jedinici, komponente imaju slične karakteristike tlaka para, bliske temperature vrelišta, pa će stoga biti izuzetno teško separirati ih destilacijom. U tom slučaju smjesa se mora separirati nekim drugim procesom. Kao granična vrijednost relativne hlapivosti uzima se 1,2 što znači da se separacija smjese relativne hlapivosti manje do 1.2 ne provodi procesom destilacije, već se treba separirati nekim drugim procesom (npr. ekstrakcijom) [4]. Za sustav

izopentan/*n*-pentan relativna hlapivost pri tlaku od 1,79 bar i temperaturi od 51,7 °C iznosi 1,26. Povećanjem tlaka i temperature relativna hlapivost pada [6].

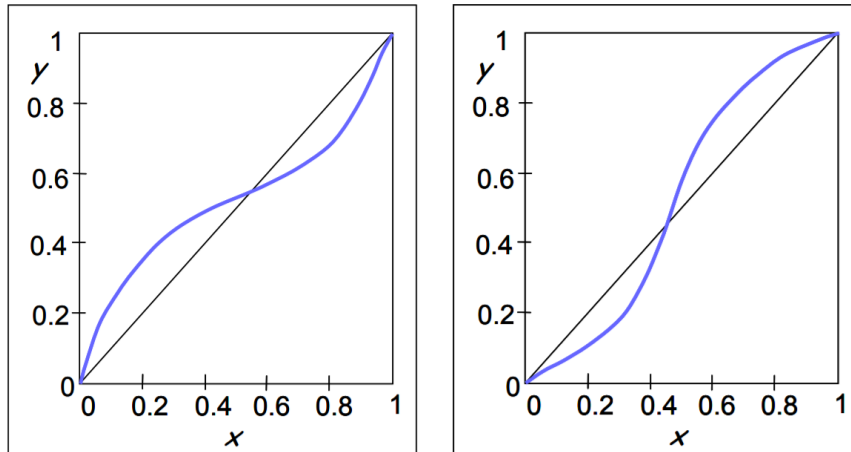
2.2.3. RAVOTEŽA PARA-KAPLJEVINA ZA SMJESU IZOPENTAN/*n*-PENTAN

Destilacijske kolone projektiraju se ovisno o svojstvima vrelišta komponenata u smjesi. Dakle, njihova veličina, posebno visina definirana je ravnotežom para kapljevina. Naime, s obzirom da se radi o procesu prijenosa tvari, potpomognutom prijenosom topline, pokretačka sila definirana je odstupanjem od ravnoteže. Na slici 5 prikazani su ravnotežni dijagram idealne i realnih smjesa.



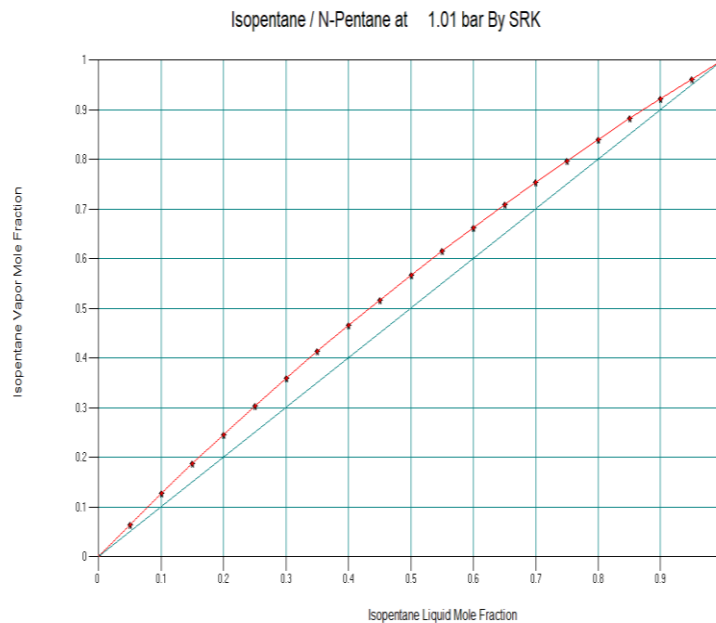
Slika 5 Ravnotežni dijagram idealne (gore) i realnih smjesa (dolje) [4]

Azeotropne smjese nije moguće u potpunosti separirati destilacijom. Ravnotežne krivulje presjecaju dijagonalu te se točka sjecišta naziva azeotropnom točkom. Karakteristika te točke jest da su u njoj ravnotežni sastavi kapljevite i parne faze isti. Na slici 6 prikazani su ravnotežni dijagrami azeotropnih smjesa. Karakteristika azeotropnih smjesa je da se destilacijom na izlazu može dobiti jedna čista komponenta i smjesa sa sastavom azeotropne točke [4].



Slika 6 Ravnotežni dijagrami azeotropnih smjesa [5]

Na slici 7 prikazan je ravnotežni dijagram za smjesu izopentan/*n*-pentan. Ravnotežni dijagram je nacrtan pomoću programskog paketa CHEMCAD te je vidljivo nepostojanje azeotropne točke te usporedbom sa slikom 5 zaključuje se da je smjesa izopentan/*n*-pentan idealna pri tlaku od 1.01 bar.



Slika 7 Ravnotežni dijagram za smjesu izopentan/*n*-pentan

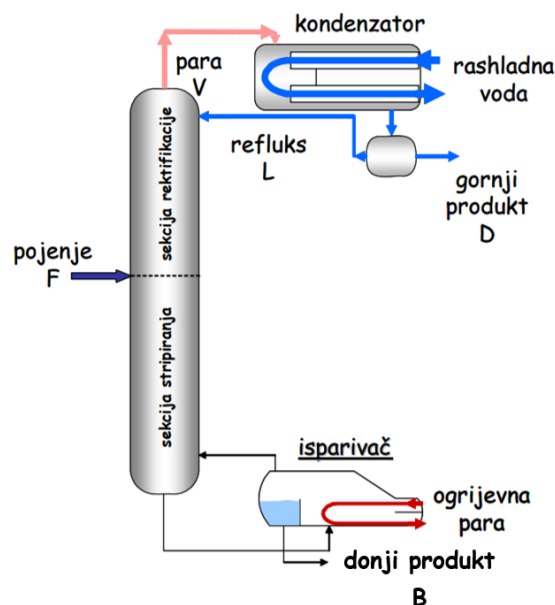
2.2.4. DESTILACIJSKA KOLONA

Postoji mnogo različitih izvedbi destilacijskih kolona od kojih je svaka projektirana za specifičnu separaciju. Jedan od mogućih podjela kolona je način na koji rade. Tako postoje šaržne i kontinuirane kolone. U šaržne se kolone pojenje unese u kolonu a zatim se provede destilacija. Nakon što je postignuta željena separacija u kolonu se

unos nova količina pojne smjese. U kontinuiranim kolonama razdvaja se kontinuirana struja pojenja bez prekida rada, osim ako nema problema u radu kolone. Destilat i donji produkt također se kontinuirano odvede iz kolone. Takve kolone mogu raditi s velikim protocima. Kontinuirane kolone se dalje klasificiraju obzirom na vrstu pojenja (dvokomponentne smjese, višekomponentne smjese), prema broju produkta (dva produkta, više od dvije izlazne struje), dodaje li se u kolonu pomoćna komponenta (ekstraktivna destilacija, azeotropna destilacija) te s obzirom na izvedbu unutrašnjosti kolone (kolone s pliticama, kolone s punilima).

Destilacijska kolona sastoji se od nekoliko dijelova koji služe za prijenos topline ili poboljšanje procesa prijenosa tvari te su prikazani na slici 8. Osnovne komponente su:

- Vertikalno cilindrično tijelo u kojem se odvija separacija komponenti
- Unutrašnji dijelovi (punila ili plitice) koji poboljšavaju proces separacije komponenti
- Isparivač koji osigurava isparavanje kapljevine
- Kondenzator za kondenzaciju gornjeg produkta
- Posuda u kojoj se zadržava kondenzirana para s vrha kolone kako bi se dio mogao vraćati natrag u kolonu kao refluks



Slika 8 Shematski prikaz destilacijske kolone [4]

Pojna smjesa, F, koju je potrebno separirati uvodi se u kolonu na mjestu ovisnom o stanju pojne smjese (od podhlađene kapljevine do pregrijane pare). Mjesto na kojem

se u kolonu uvodi pojna smjesa dijeli kolonu na dva dijela: sekciju rektifikacije i sekciju stripiranja. U sekciji rektifikacije (pojačavanja) koncentracija lakše hlapive komponente raste, dok u sekciji stripiranja (istjerivanja) koncentracija teže hlapive komponente raste. Iz kolone se odvođe gornji produkt (destilat) koji je bogatiji na lakše hlapivoj komponenti, te donji produkt koji je bogatiji na teže hlapivoj komponenti. Kolone uglavnom rade uz definirani refluksni omjer. Refluksni omjer se definira kao omjer količine destilata koji se vraća natrag u kolonu (refluks, L) i količine destilata (D) koji se odvođe kao gornji produkt.

$$R = \frac{L}{D} \quad (2)$$

Kolone rade uz refluks kako bi se osigurala željena separacija. Povratom dijela gornjeg produkta omogućava se uklanjanje preostale količine teže hlapive komponente iz parne faze koja izlazi na vrhu kolone.

Kolona je podijeljena na određeni broj koncentracijskih stupnjeva. Ako se radi o koloni s pliticama (tavanima) onda broj plitica predstavlja broj koncentracijskih stupnjeva. Ukoliko je kolona ispunjena nasipnim ili strukturiranim punilima, potrebno je odrediti koji dio kolone odgovara jednom koncentracijskom stupnju. Prema definiciji, jedan koncentracijski stupanj je dio kolone u kojem se smatra da je postignuto ravnotežno stanje [4].

2.2.4.1. PLITICE

Plitice su horizontalne ravne ploče određene geometrije postavljene na definiranoj udaljenosti jedna od druge unutar kolone. Sastoje se od dva dijela: mjesto dodira faza i mjesto separacije faza. Klasifikacija plitica osniva se na vrsti plitica, vrsti i broju mjesta separacije faza, smjeru i putu strujanja kapljevine u dodirnoj zoni, smjeru strujanja pare preko plitica, prisustvo razbijala, punila i ostalih dijelova koji poboljšavaju kontakt faza a time i separaciju faza. Način strujanja faza je kontroliran. Kapljevina struji preko plitice prema dolje, a para se diže tako da struje u suprotnim smjerovima.

Svaka plitica se ponaša kao mala kolona u kojoj se odvija jedan dio separacije. Zbog toga se kolone s pliticama nazivaju i kolone sa stupnjevitim kontaktom. Dakle, što je više plitica bolji je stupanj separacije, a ukupna djelotvornost će ovisiti o klasifikaciji plitice. Plitice su tako izvedene da poboljšaju kontakt pare i kapljevine uzimajući u

obzir raspodjelu kapljevine i pare na plitici. Što je bolji međusobni kontakt pare i kapljevine, bolja je separacija na svakoj plitici i ukupnoj koloni. To znači da će biti potrebno manje plitica za isti stupanj separacije (manja potrošnja energije i troškovi).

Osnovna podjela plitica je na:

- sitaste plitice (slika 9)
- plitice s poklopcima (slika 10)
- plitice s ventilima (slika 11) [4]



Slika 9 Primjer sitastih plitica [7]



Slika 10 Plitice s poklopcima [8]



Slika 11 Plitice s ventilima [9]

2.2.4.2. PUNILA

Punila omogućavaju bolji kontakt između faza, osiguravaju povećanje međufazne površine, a time i efikasniji prijenos topline i tvari. Mogu biti nasipna (slika 12) ili strukturirana (slika 13). Nasipna punila su različitih jednostavnih geometrijskih oblika i mogu biti napravljena od različitih materijala ovisno o svojstvima sustava (čelik, bakar, ugljen, porculan, staklo, plastika). Ne izazivaju veliki pad tlaka što bi značilo velik utrošak energije potrebne za strujanje pare u koloni. Osim za destilaciju koriste se i za čišćenje plinova, apsorpciju, isparavanje i ekstrakciju.

Zbog gravitacije kapljevina struji prema dolje i na punilu tvori tanki film preko kojeg struji plin. Kapljevina mora biti ravnomjerno raspodijeljena i osigurati potpuno mokra punila što se postiže (na početku procesa) potapanjem kolone. Poroznost sloja veća je uz rub nego u središtu, pa teži strujati uz stjenku.



Slika 12 Nasipna punila [10]



Slika 13 Strukturirana punila [11]

Nasipna punila koriste se za kolone manjeg promjera. Podnose velika specifična opterećenja te osiguravaju visoku djelotvornost separacije uz nisku cijenu. S druge strane, strukturirana punila su pogodna za rad pod vakuumom. Podnose još veća opterećenja uz manji pad tlaka. Djelotvornost separacije je veća, ali su i skuplja od nasipnih punila.

Djelotvornost kolone s punilima istog promjera kao i kolona s pliticama je veća s obzirom da punila osiguravaju dodatnu međufaznu površinu. Visina kolona s punilima je manja, a manji je i promjer kolone. S obzirom na način na koji para i kapljevina dolaze u kontakt kolone s punilima nazivaju se i kolone s kontinuiranim kontaktom jer faze kontinuirano struje. [4]

2.2.5. PROJEKTIRANJE PROCESA KONTINUIRANE DESTILACIJE

Prvi korak u projektiranju kolone je određivanje potrebnog broja separacijskih stupnjeva. Broj teoretskih jedinica prijenosa (koncentracijskih stupnjeva) može se odrediti:

- Grafički
 - McCabe-Thieleovom metodom
 - Ponchon-Savaritovom metodom
- Računski
 - Fenske-Underwood metodom
 - Gillilandovom metodom

Grafičke metode se koriste kod rješavanja problema određivanja potrebnog broja separacijskih stupnjeva na papiru uz prisutan ravnotežni dijagram smjese koja se želi separirati. Računske metode su prisutne u CHEMCAD-u te se koriste u *Shortcut* modelu destilacijske kolone [4].

2.2.5.1. FENSKE-UNDERWOOD METODA

Ova metoda se zasniva na pretpostavci stalnih molnih protoka i stalne relativne hlapivosti, $\alpha_{1,2}$.

Minimalni broj teoretskih stupnjeva, NTU_{min} , ostvaruje se kod totalnog refluksa ($R \rightarrow \infty$).

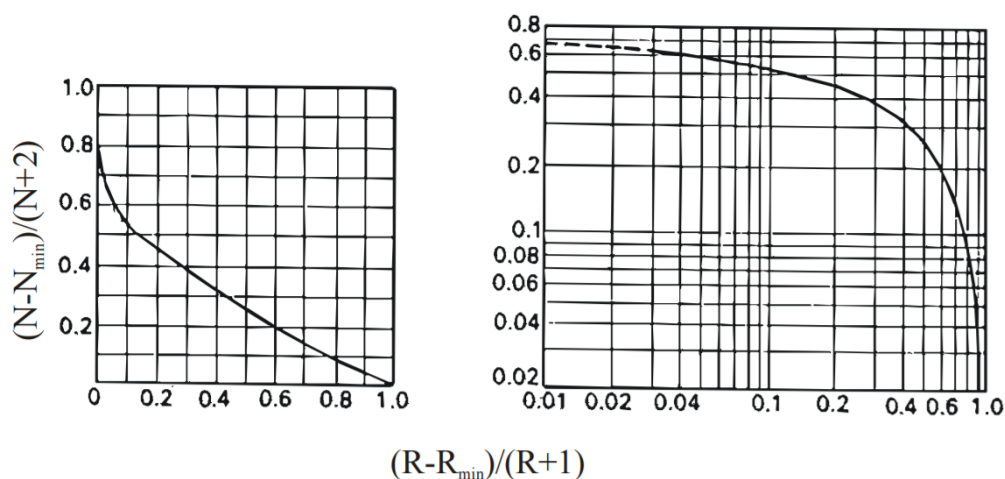
$$NTU_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D \cdot (1-x_B)}{x_B \cdot (1-x_D)}\right)}{\log(\alpha_{1,2})} - 1 \quad (3)$$

Minimalni refluksni omjer dobiva se za slučaj kada $NTU \rightarrow \infty$

$$R_{min} = \frac{1}{\alpha_{1,2}-1} \cdot \left[\frac{x_D}{x_F} - \alpha_{1,2} \cdot \frac{1-x_D}{1-x_F} \right] \quad (4)$$

2.2.5.2. GILLILANDOVA METODA

Gillilandov dijagram daje empirijsku relaciju između broja teoretskih jedinica prijenosa i refluksnog omjera, slika 14. Za danu destilaciju minimalni refluksni omjer i minimalni broj teorijskih jedinica prijenosa mogu se odrediti McCabe-Thieleovom metodom ili izračunati prema Fenske-Underwoodu [4].



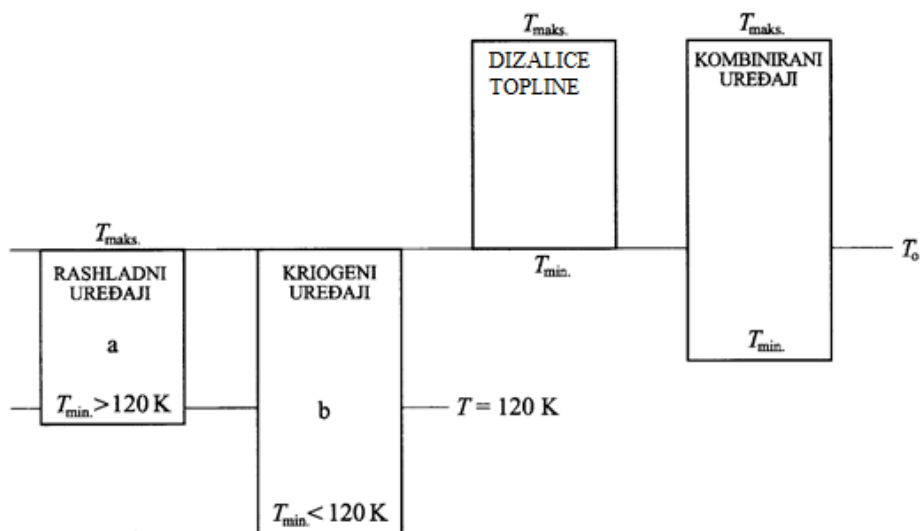
Slika 14 Relacija između refluksnog omjera i broja koncentracijskih stupnjeva [4]

2.3. TRANSFORMATORI TOPLINE

Transformatori topline su uređaji u kojima se odvijaju procesi za dobivanje niskih temperatura. U takvim sustavima toplinska energija se odvodi od tijela s relativno niskom temperaturom k primaocu, tj. tijelu s višom temperaturom. Prema prvom glavnom zakonu termodinamike, toplina i rad ekvivalentni su i mogu prelaziti s jedno u drugo. Drugim glavnim zakonom termodinamike utvrđeno je da toplina prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature. Prijelaz topline u obrnutom smjeru ne može se odvijati sam od sebe, nego jedino uz kompenzaciju, odnosno potrošnju energije. U ovakvim procesima sudjeluje rashladna djelatna tvar ili radni medij, koji prenosi toplinu s tijela niže temperature na tijelo više temperature. Za povišenje toplinskog potencijala primjenjuju se uređaji koji troše vanjsku energiju, električnu, mehaničku, toplinsku, kemijsku, kinetičku...

Odnos maksimalne $T_{maks.}$ i minimalne $T_{min.}$ temperature prema temperaturi okoline T_o prikazan je na slici 15 te se transformatori topline dijele se na:

- niskotemperaturne, gdje je $T_{min.} < T_o$, a $T_{maks.} = T_o$, koji se opet prema razini $T_{min.}$ dijele na a) rashladne ($T_{min.} > 120$ K) i b) kriogene ($T_{min.} < 120$ K) uređaje
- dizalice topline, gdje je $T_{min.} \geq T_o$, a $T_{maks.} > T_o$
- kombinirane uređaje, koji imaju funkciju rashladnog uređaja i dizalice topline gdje je $T_{min.} < T_o$, a $T_{maks.} > T_o$



Slika 15 Temperaturna područja u transformatorima topline [12]

Jedna od daljnjih podjela transformatora topline može biti prema načinu rada i obuhvaća dvije grupe: termomehaničke i elektromagnetske. Procesi u termomehaničkim sustavima zasnivaju se na povišenju tlaka bilo kojeg rashladnog medija. Rad elektromagnetskih sustava temelji se na primjeni konstantnog ili promjenjivog magnetskog ili električnog polja. U tehničkoj praksi najrasprostranjeniji su termomehanički sustavi, koji se ovisno o načinu povišenja tlaka, najčešće dijele na kompresijske i apsorpcijske.

Rad kompresijskih uređaja zasniva se na povišenju tlaka, a rashladni proces kompenzira se s energijom u obliku mehaničkog rada. Prema vrsti i agregatnom stanju rashladnog medija dijele se na parne i plinske. U parnim rashladnim uređajima radni medij mijenja agregatno stanje tokom procesa kompresije, kondenzacije i isparavanja nakon ekspanzije (prigušivanja). Primjenjuju se one djelatne tvari koje se lako ukapljuju (npr. NH₃, freoni), a proces kompresije odvija se do temperatura bliskih kritičnoj temperaturi ili nižih od kritične temperature. U plinskim rashladnim uređajima radni medij, obično zrak, ne mijenja agregatno stanje, a temperatura je tokom cijelog procesa viša od kritične temperature [12].

2.3.1. TERMODINAMIČKE OSNOVE PROCESA HLADENJA

Pojednostavljena analiza uključuje samo gubitke termodinamičkog procesa, dok su tehnički zanemareni. Ljevokretni termodinamički procesi temelje se na Carnotovu, iako su u stvarnosti različiti od njega. Usporedba zračnog i parnog procesa s ljevokretnim Carnotovim procesom prikazana je u T, s dijagramu prikazanom na slici 16. U rashladnom procesu povišenje tlaka (1 do 2) ostvaruje se uz utrošak energije za pogon kompresora (w). Slijedi hlađenje, odnosno kondenzacija (2 do 3) te sniženje temperatura (3 do 4). Količina topline, oslobođena u izvoru niske temperature, tj. toplina koja se dovodi rashladnom mediju od tijela koje se hladi, naziva se rashladni učin (q_0). Omjer rashladnog učina i utrošene energije je stupanj iskorištenja procesa. On je, u pravilu, u većini uređaja veći od jedan, a naziva se faktor hlađenja:

$$\varepsilon_R = \frac{q_0}{w} \quad (5)$$

Kao usporedni proces koristi se ljevokretni Carnotov proces 1, A, 3, B, odnosno 1, 2, 3, B, koji ima stupanj djelovanja prema:

$$\eta_C = \varepsilon_R = \frac{q_0}{w} = \frac{q_0}{q_1 - q_0} = \frac{T_{min.}}{T_{maks.} - T_{min.}} \quad (6)$$

Ovaj stupanj djelovanja ovisi samo o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi te će biti veći što je viša temperatura hlađenja ($T_{\min.}$) i manja razlika temperature okoline ($T_{\max.}$) i temperature hlađenja. Prema tome, osnovno pravilo vođenja rashladnih procesa utvrđuje da ne treba nikada hladiti na nižu temperaturu od nužno potrebne.

U zračnom rashladnom procesu (1, 2, 3, 4) izobarni procesi hlađenja (2 do 3) i zagrijavanja (4 do 1) rashladnog medija provode se pri konačnim razlikama temperatura. Teorijski faktor hlađenja (ϵ_R) niži je nego u Carnotovom procesu. To slijedi iz činjenice da je faktor hlađenja manji nego u Carnotovom procesu, tj. površina a, 1, 4, b, a manja je od površine a, 1, B, b, a, a utrošeni rad je veći: površina 1, 2, 3, 4, 1 veća je od površine 1, A, 3, B, 1.

Pojednostavljeni proces u parnim uređajima 1, 2, 3, 4 razlikuje se od Carnotovog (1, 2, 3, B) samo po tome što se sniženje temperature ne postiže povratljivom adijabatskom ekspanzijom (3 do B), nego nepovratljivim procesom prigušivanja (3 do 4). Nepovratljivo hlađenje u prigušnom ventilu, uz $h = \text{konst.}$, uzrokuje smanjenje rashladnog učina pa je površina a, 1, 4, c, a manja od površine a, 1, B, b, a. Rad koji se troši za pogon kompresora jednak je u oba slučaja:

$$w_K = h_2 - h_1 \quad (7)$$

Ekspanzija u pojednostavljenom procesu se provodi bez vanjskog rada ($h_3 = h_4$). Slijedi da je ukupno utrošeni rad u parnom rashladnom procesu jednak radu koji se troši u kompresoru:

$$w = h_2 - h_1 \quad (8)$$

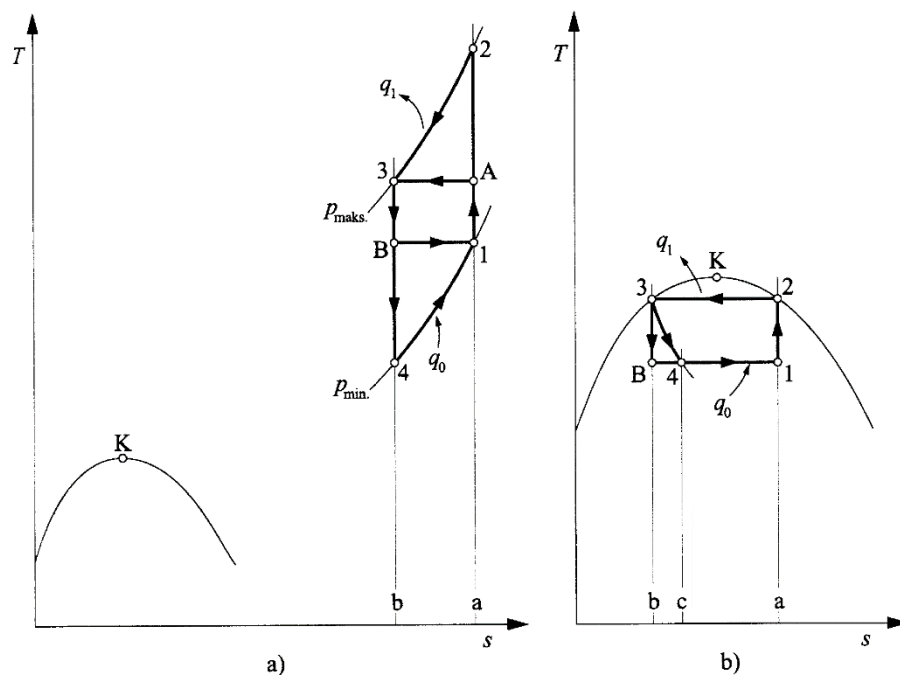
Rashladni učin je:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (9)$$

Uvrštavanjem (8) i (9) u (6) dobiva se faktor hlađenja:

$$\epsilon_R = \frac{q_0}{w} = \frac{q_0}{q_1 - q_0} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (10)$$

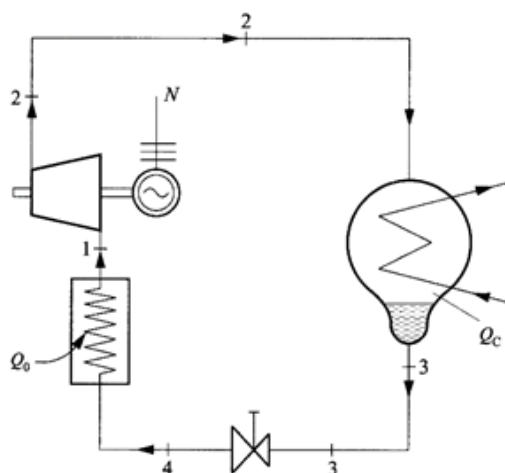
Rashladni stupanj parnih procesa razlikuje se od Carnotovog, ali znatno manje nego u zračnih rashladnih procesa. U usporedbi sa zračnim uređajima, parni rashladni uređaji imaju povoljniji termodinamički proces, zbog većeg rashladnog stupnja i učina. [12]



Slika 16 Usporedba a) zračnog i b) parnog rashladnog procesa [12]

2.3.2. DIZALICE TOPLINE (DT)

Dizalice topline u procesu energiju oduzimaju tijelu s nižom temperaturom i predaju tijelu više temperature, uz utrošak rada. Za rad uređaja potreban je davalac topline, koji se može ohladiti na zadovoljavajuću temperaturu, i potrošač tako dobivene topline. Primjena dizalica topline omogućuje iskorištavanje energije tijela s relativno niskom temperaturom (okolni zrak, morska voda, voda nakon hlađenja hidrogeneratora). Kao dizalice topline mogu se koristiti sve vrste rashladnih uređaja, pa prema tome i svi radni mediji koji se u njima upotrebljavaju (NH_3 , freoni, smjesa $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, zrak). Dizalice topline su posebno važne u kombiniranom sustavu za grijanje i hlađenje. Danas se najčešće primjenjuju za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju. Postoje kompresijske dizalice topline (KDT) i apsorpcijske dizalice topline (ADT). Osnovni elementi uređaja su kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač. Osnovni elementi prikazani su na slici 17. Proces u kondenzatoru može se odvijati u dva ili tri stupnja, tj. hlađenje, kondenzacija i pothlađivanje radnog medija. U isparivaču se oduzima toplina davaocu, a toplinska moć isparivača ovisi o snazi kompresora. Davaoci ili izvori topline mogu biti prirodni ili umjetni. Izvori topline moraju imati zadovoljavajuću raspoloživost te stalnu temperaturu tijekom cijele godine, veliku specifičnu toplinu, moraju biti jeftini, čisti i inertni prema materijalu od kojeg su izrađeni uređaji.



Slika 17 Shematski prikaz dizalice topline [12]

U jednostavnoj parno kompresijskoj dizalici topline protječe proces (prikazan na slici 18) na sljedeći način: rashladni medij se komprimira uz potrošnju mehaničkog rada (1 do 2). Slijedi hlađenje i kondenzacija (2 do 3), pri čemu oslobođenu toplinu preuzima rashladna voda ili zrak kojim se kondenzator hladi. Pomoću topline rashladnog medija, zrak ili rashladna voda se zagrijavaju do temperature na kojoj se mogu primijeniti u različite svrhe, npr. za zagrijavanje. Nakon kondenzacije rashladni medij se prigušuje do tlaka i temperature u isparivaču (3 do 4). Mokra para sada ulazi u isparivač, oduzima toplinu tijelu koje se hladi, isparuje i vraća se u kompresor. Promjena stanja u isparivaču prikazana je linijom (4 do 1). Prema tome, kod svake dizalice topline kao i kod parnog rashladnog uređaja potrebna su dva osnovna izmjenjivača topline, kondenzator i isparivač. U kondenzatoru se hladi rashladni medij nakon kompresije. Voda za hlađenje kondenzatora, tj. primalac topline (izvor hladnoće) zagrijava se te se koristi za grijanje prostora, bazena i slično. U isparivač ulazi rashladni medij nakon prigušenja. Vanjski zrak ili voda za grijanje isparivača, tj. davalac topline ili izvor topline se pri tome hladi i primjenjuje se za npr. klimatizaciju.

Koeficijent dizalice topline ili faktor grijanja (COP – coefficient of performance) u procesu grijanja izražava se kao:

$$\varepsilon_{DT} = \frac{q_c}{w} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (11)$$

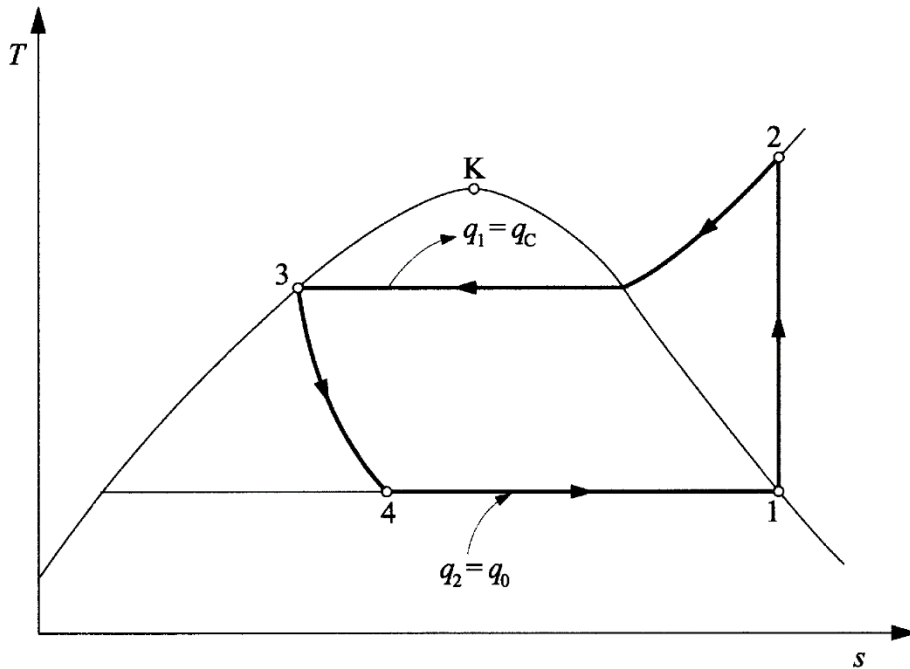
Rashladni koeficijent dizalice topline ili faktor hlađenja je:

$$\varepsilon_R = \frac{q_0}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (12)$$

Iz $w = q_1 - q_0$ slijedi $q_1 = w + q_0$

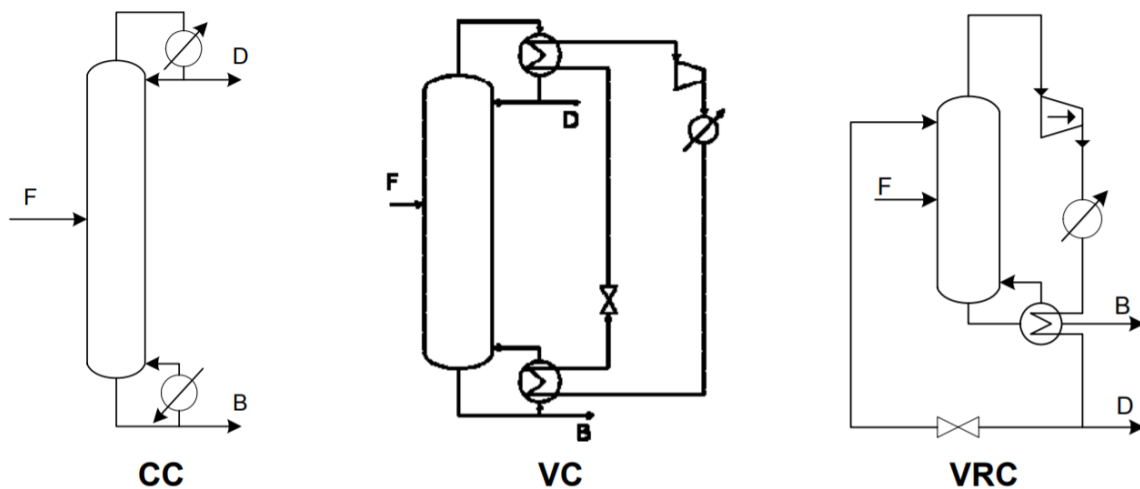
Povezanost faktora grijanja i faktora hlađenja dana je izrazom:

$$\varepsilon_{TP} = \frac{q_1}{w} = \frac{w+q_0}{w} = 1 + \frac{q_0}{w} = 1 + \varepsilon_R \quad (13)$$



Slika 18 Idealizirani termodinamički proces u parno kompresijskoj toplinskoj pumpi [12]

Cilj dizalice topline u destilaciji je korištenje topline kondenzacije koja se otpušta u kondenzatoru za isparavanje u isparivaču. S obzirom da je temperatura isparivača viša od temperature kondenzatora potrebno je koristiti dizalice topline. Sheme različitih integracija dizalica topline u destilacijsku kolonu prikazane su na slici 19 [13].



Slika 19 Konvencionalna kolona (CC), kolona s kompresijom vanjskog radnog medija (VC) i kolona s rekompresijom vršnih para (VRC) [13]

Kod konvencionalne kolone toplina je dovedena isparivaču i odvedena kondenzatoru. Toplinske dužnosti su približno slične. Za smjese s bliskim temperaturama vrelišta potreban je veći refluksni omjer što povećava toplinske dužnosti izmjenjivača topline na koloni. Kako su dizalice topline ekonomičnije za malo povećanje temperature, veće će se uštede postići kod takvih sustava.[13]

3. MODELIRANJE PROCESA, KOMPONENTI I SIMULACIJE

Cilj rada jest istražiti mogućnost integracije dizalica topline u destilacijsku kolonu deizopentanizera čiji su parametri (sastavi struja na ulazu i izlazu, temperature, tlakovi, protoci i dimenzije kolone) poznati, kao i procijeniti ukupne godišnje troškove (TAC) koji se dobiju kao zbroj ukupnih pogonskih troškova (OPEX) i ukupnih investicijskih troškova (CAPEX) dijeljenjih sa periodom promatranja:

$$TAC = OPEX + \frac{CAPEX}{broj\ godina} \quad (14)$$

Kao rezultat dobije se vrijeme potrebno da se investicija u dodatnu procesnu opremu (kompresor, izmjenjivači topline) isplati. Također će se promatrati dvije vrste dizalica topline, a to su: dizalice topline s mehaničkom rekompresijom vršnih para (VRC) te dizalice topline s mehaničkom kompresijom radnog medija (VC) sa 4 različita vanjska radna medija (amonijak, dimeileter, izobutan i propan). Na kraju će se odrediti termodinamički pokazatelj opravdanosti integracije dizalica topline.

3.1. PODACI S DEIZOPENTANIZERA

Da bi se moglo uspoređivati poklapanje simulacija destilacijske kolone treba imati eksperimentalne podatke. Eksperimentalni podaci prikazani su u tablici 1 [1]. U tablici 2 prikazani su podaci o dimenzijama i samoj izvedbi kolone. Cilj je dobiti iste ili slične sastave na vrhu i dnu te protoke. Promatrat će se i relativno odstupanje od eksperimentalnih podataka prikazanih u tablici 1. Za sve je simulacije korišten procesni simulator CHEMCAD.

Relativno odstupanje računa se prema izrazu:

$$RO = \frac{\text{podatak iz tablice 1} - \text{podatak iz tablice 3}}{\text{podatak iz tablice 1}} \quad (15)$$

Tablica 1 Prikaz, protoka, tlaka, temperatura i sastava ulazne i izlaznih struja

	ULAZ	VRH	DNO
	mol. udio	mol. udio	mol. udio
izoburan	0,002	0,010	0,000
<i>n</i> -butan	0,045	0,160	0,000
izopentan	0,260	0,800	0,013
<i>n</i> -pentan	0,270	0,030	0,380
ciklopentan	0,023	0,000	0,030
2,2-dimetilbutan	0,013	0,000	0,020
2,3-dimetilbutan	0,020	0,000	0,030
2-metilpentan	0,110	0,000	0,160
3-metilpentan	0,076	0,000	0,110
<i>n</i> -heksan	0,120	0,000	0,170
metilciklopentan	0,026	0,000	0,040
cikloheksan	0,005	0,000	0,007
ostatak	0,030	0,000	0,040
<hr/>			
Protok, kg/h	30000	8800	21200
Tlak, (bar)	3,4		
Temperatura, °C	50		

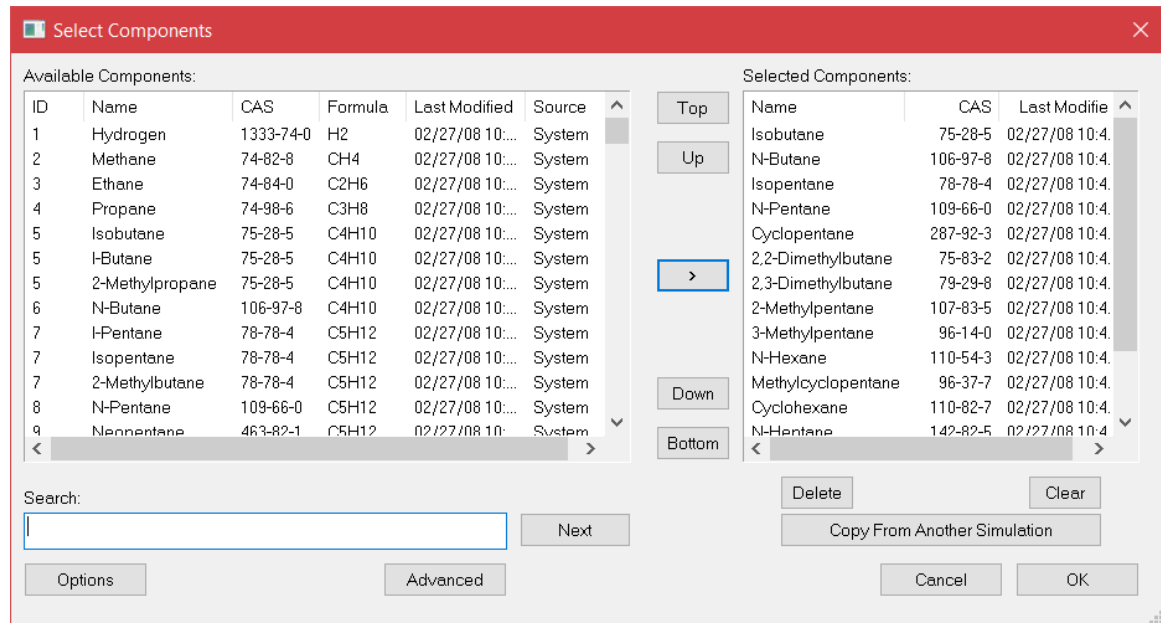
Tablica 2 Prikaz karakteristika kolone

Tlak na vrhu, bar	2,2
Razmak između sitastih plitica s dva prolaza, m	0,6
Promjer kolone, m	2,9
Visina kolone, m	54
Refluksni omjer	9,27

3.2. ODABIR KOMPONENTI

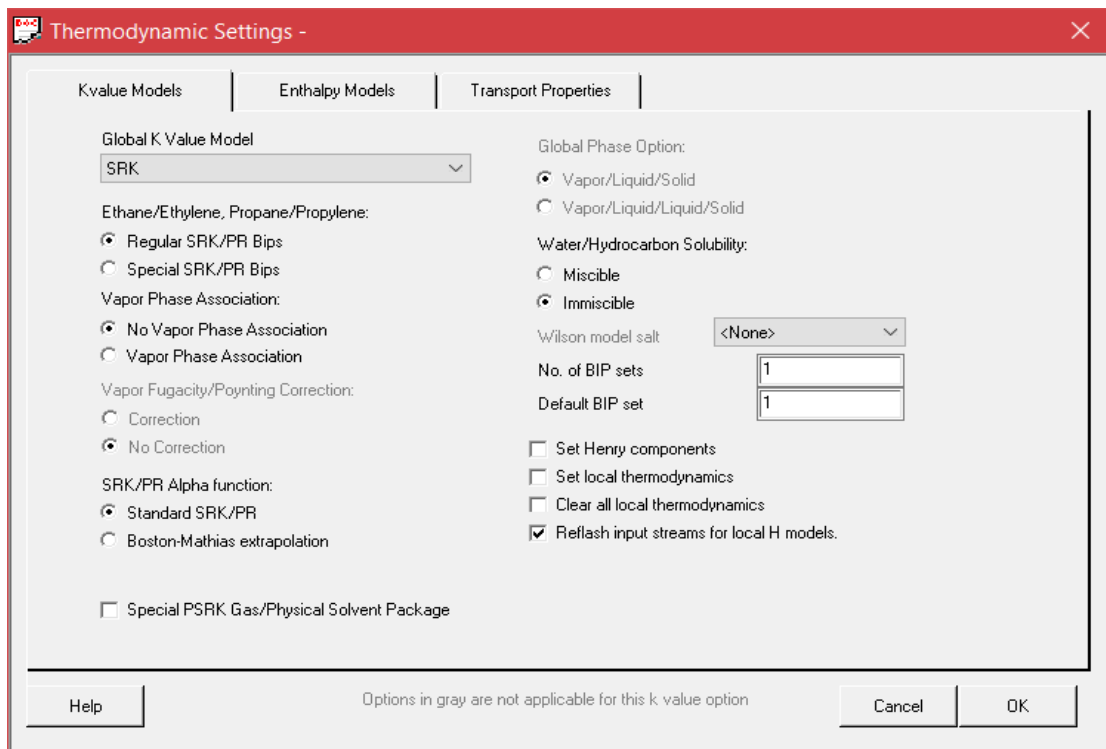
Prvi korak u procesu simulacije je odabir komponenti koje se koriste u proračunu. U ovom koraku odabiru se apsolutno sve komponente koje se koriste, bez obzira koriste li se za samu simulaciju separacije kao komponente pojne smjese ili kao energenti, u ovom slučaju voda (vodena para kao energent u isparivaču i rashladna voda kao energent u kondenzatoru), amonijak, dimetileter, propan i izobutan (koji se koriste kao vanjski radni mediji u dizalici topline). Na slici 20 je prikazan korak odabira komponenti za simulaciju.

S lijeve strane prikazana je lista komponenata koja sadrži 2277 komponente uz opciju dodavanja drugih komponenti. S desne strane prikazane su odabrane komponente.



Slika 20 Prikaz odabira komponenti

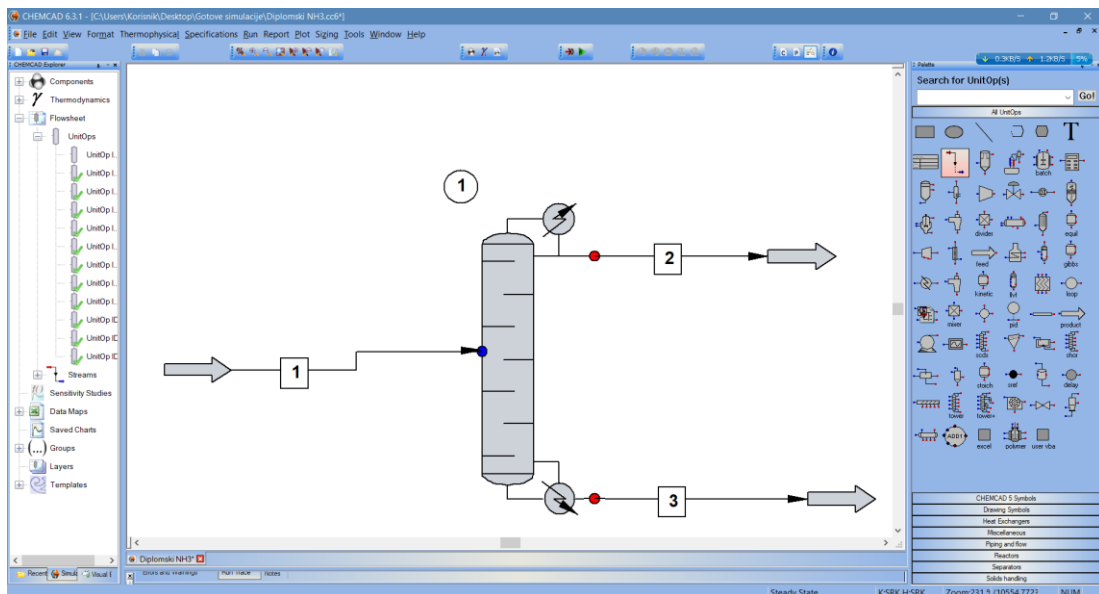
Da bi simulacija imala smisla te da bi dobili razumne vrijednosti potrebno je osigurati odgovarajuće termodinamičke modele koji su najprikladniji za odabrane komponente. S obzirom da se ovdje radi o mahom ugljikovodičnim spojevima CHEMCAD automatski odabire SRK model. Ponekad CHEMCAD ne može dobro odabrati model, pa je poželjno provjeriti postavke. Izbornik sa termodinamičkim postavkama prikazan je na slici 21.



Slika 21 Prikaz izbornika sa termodinamičkim postavkama

3.3. POJEDNOSTAVLJENI MODEL

Pojednostavljeni (*Shortcut*) model destilacijske kolone, prikazan na slici 22, ima mogućnost samo jednog ulaza (lijeva strana) te dva izlaza (desna strana) na vrhu i dnu kolone te daje samo procjene broja plitica te broj plitice na kojem ulazi pojna struja.



Slika 22 Shematski prikaz *Shortcut* modela destilacijske kolone u CHEMCAD-u

Iz *Shortcut* modela destilacijske kolone dobivaju se podaci koji su potrebni za preciznije proračune (*SCDS* model destilacijske kolone). Razlog tome leži u činjenici da se za

projektiranje može koristiti način rada koji uključuju računske metode: Fenske-Underwoodova i Gillilandova metoda (FUG) što se može vidjeti na slici 23. Na slici su također vidljivi podaci koje treba popuniti da bi dobili procjenu toplinske dužnosti kondenzatora i isparivača, minimalnog broja stupnjeva, broj plitice na kojoj ulazi pojna smjesa, minimalni refluks i refluksni omjer. Podaci koje trebamo upisati su tlak kolone, pad tlaka kolone i refluksni omjer što je prikazano na slici 23. Također treba odrediti vrstu i specifikacije teške i lake ključne komponente. S obzirom da se radi o deizopentanizeru čija je funkcija separacija smjese izopentan/*n*-pentan kao lakša ključna komponenta stavljen je izopentan, a kao teška ključna komponenta stavljen je *n*-pentan. Namještanjem specifikacija ključnih komponenti dobiva se željeni sastav.

Select mode: ID: 1

3 Design: FUG with Kirkbride feed tray location

Select condenser type: 0 Total

Column pressure: 2.2 bar

Column pressure drop: 0.3 bar

Number of stages: 64.0559

Reflux ratio: 9.27

R/Rmin:

Case Study

Number of points:

Lower bound R/Rmin:

Upper bound R/Rmin:

Key Component Specifications

Light key component: 3 Isopentane

Light key split: 0.965

Heavy key component: 4 N-Pentane

Heavy key split: 0.02

Calculated Results

Condenser duty: -28977.7 MJ/h

Reboiler duty: 30549.8 MJ/h

Minimum stages: 34.6858

Feed stage: 38.6614

Reflux ratio, minimum: 7.19241

Reflux ratio, calculated: 9.27

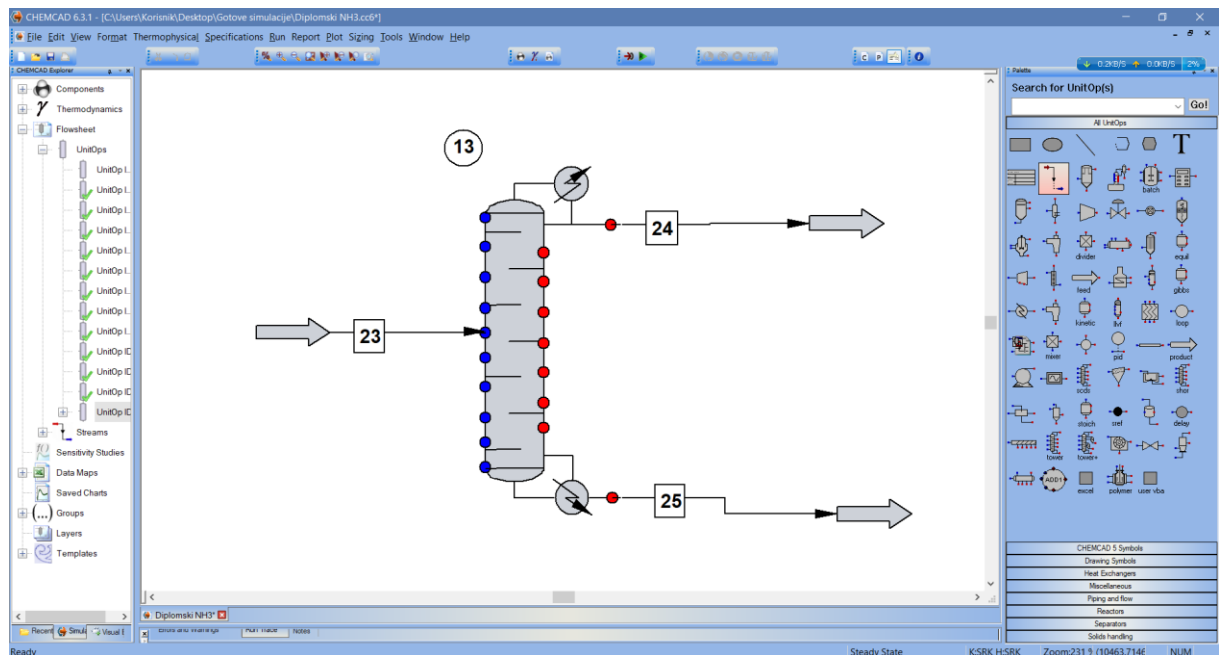
Help Cancel OK

Slika 23 Prikaz izbornika za definiranje *Shortcut* modela destilacijske kolone

Na račun dobivenih vrijednosti za broj plitica te broj pojne plitice, uz već zadani tlak i pad tlaka te specifikacija ključnih komponenti kreće se u izbornik za definiranje *SCDS* modela destilacijske kolone.

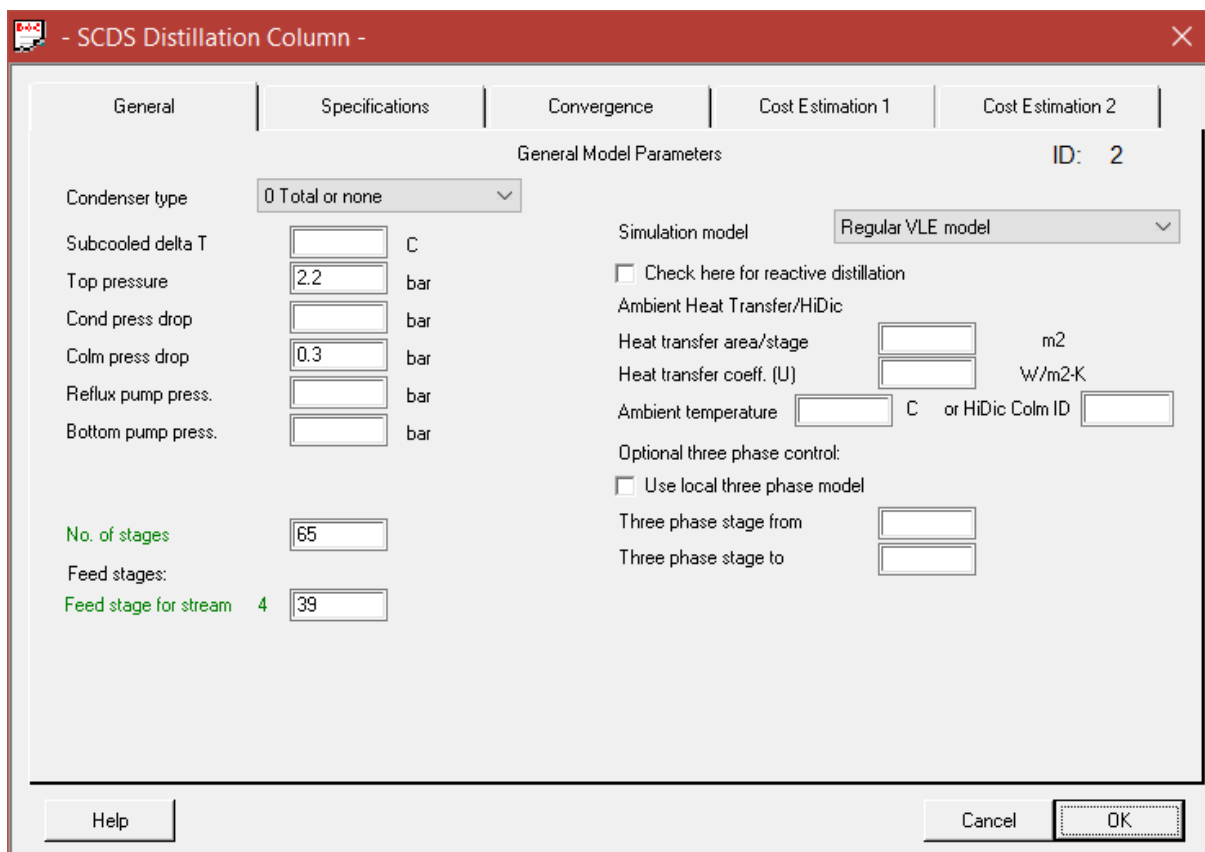
3.4. SCDS MODEL DESTILACIJSKE KOLONE

Kao što je već bilo rečeno s poznatim i dobivenim podacima sa *Shortcut* modela destilacijske kolone kreće se u definiranje varijabli u izborniku *SCDS* modela destilacijske kolone. Na slici 24 prikazan je shematski prikaz *SCDS* modela destilacijske kolone te se vidi razlika u odnosu na shematski prikaz *Shortcut* model destilacijske kolone. Vidljivo je da ima više ulaza u kolonu (lijeva strana) te više od dva izlaza iz kolone (desna strana). Zbog toga je moguće simulirati destilacijsku kolonu sa 3 ili više ulaza i izlaza što će biti slučaj kod integracije dizalice topline (3 ulaza, 2 izlaza).

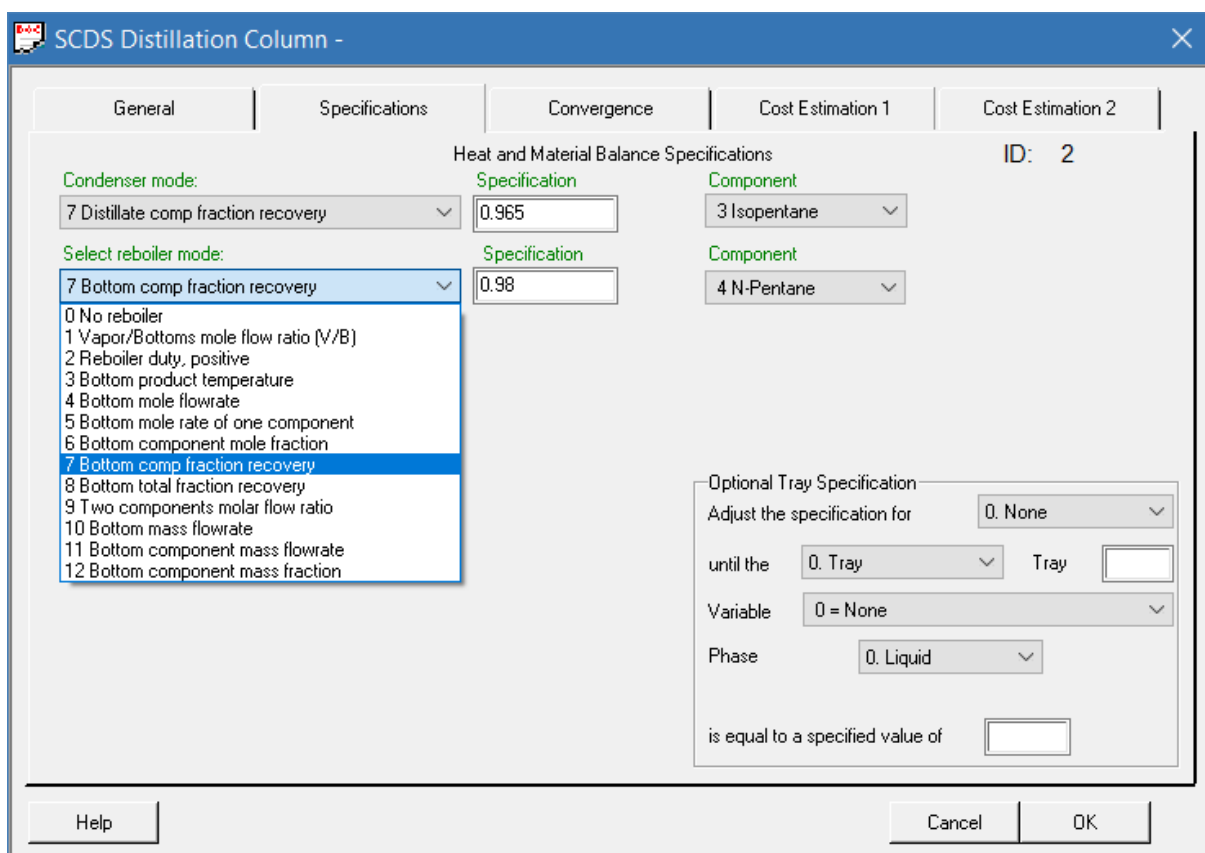


Slika 24 Shematski prikaz *SCDS* modela u CHEMCAD-u

Na slici 25 se vidi opći izbornik u koji se upisuju vrijednosti tlaka i pada tlaka kolone te broj plitica i broj pojne plitice. Na slici 26 prikazan je izbornik specifikacija gdje definiramo što će se koristiti kao podatak na temelju kojeg će kolona raditi što se može definirati na čak 17 različitih načina za kondenzator i 12 za isparivač.



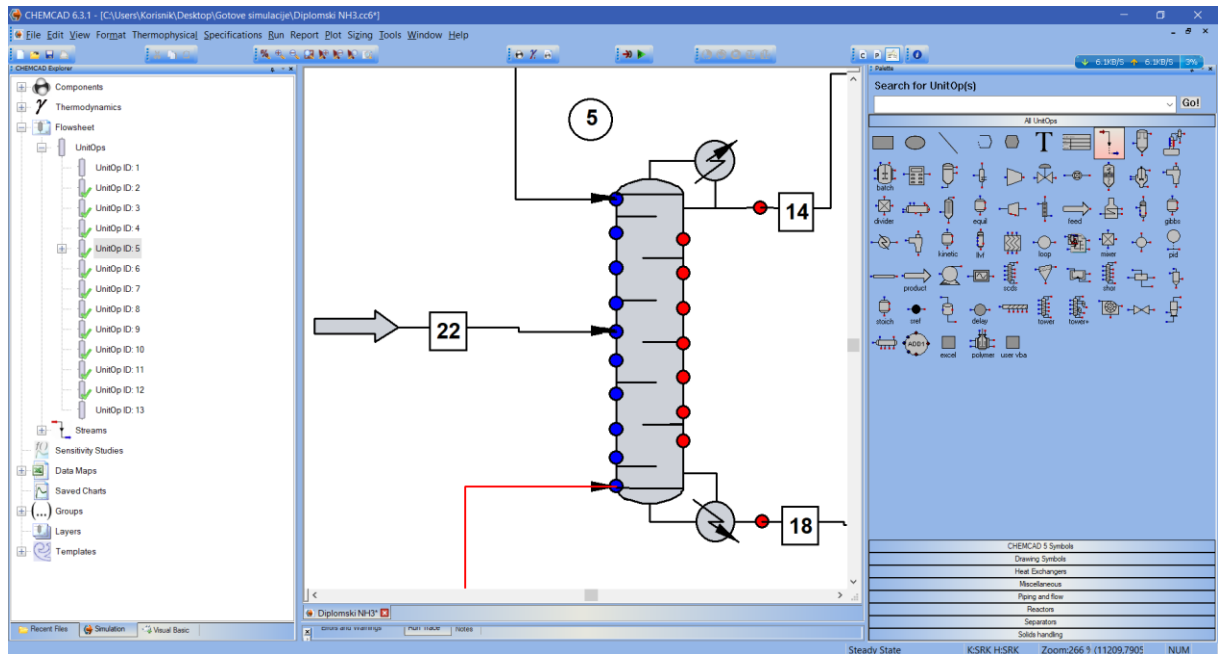
Slika 25 Opći izbornik SCDS modela



Slika 26 Izbornik sa specifikacijama rada SCDS modela

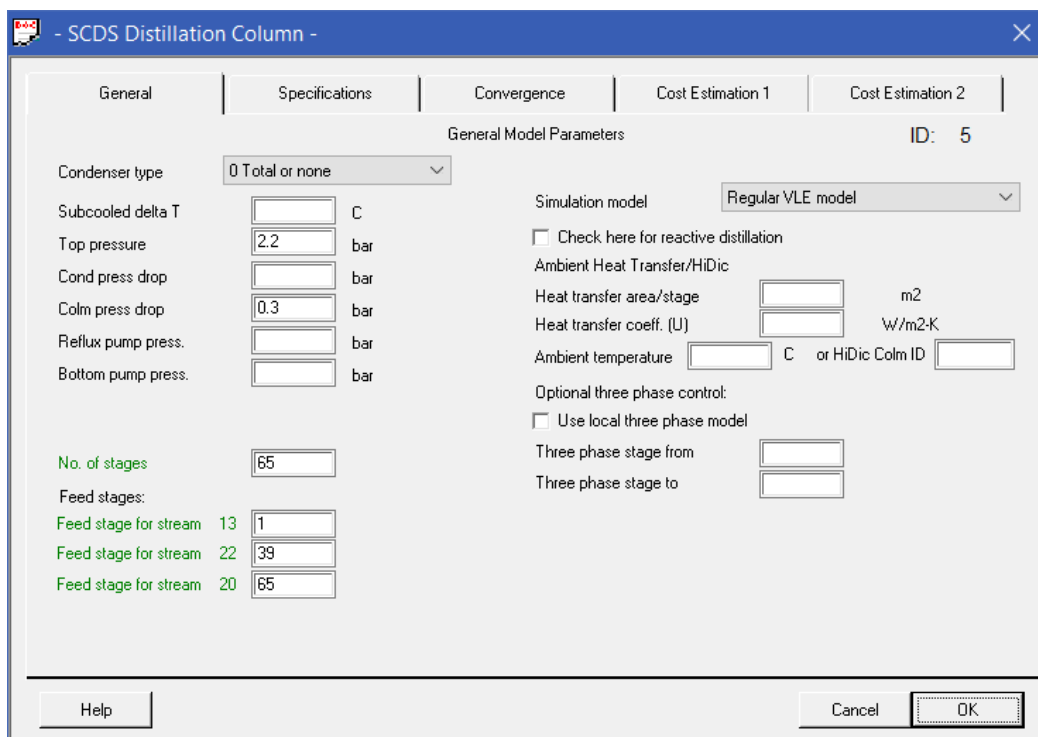
3.5. SCDS MODEL S INTEGRIRANOM DIZALICOM TOPLINE TOPLINE

Razlika SCDS modela i SCDS modela s integriranom dizalicom topline (DT) jest u tome što SCDS model s integriranom DT ima tri ulaza (jedan na prvoj plitici, jedan na pojnoj plitici, a jedan na dnu) te nema kondenzatora ni isparivača. Shema tog modela kolone prikazana je na slici 27.



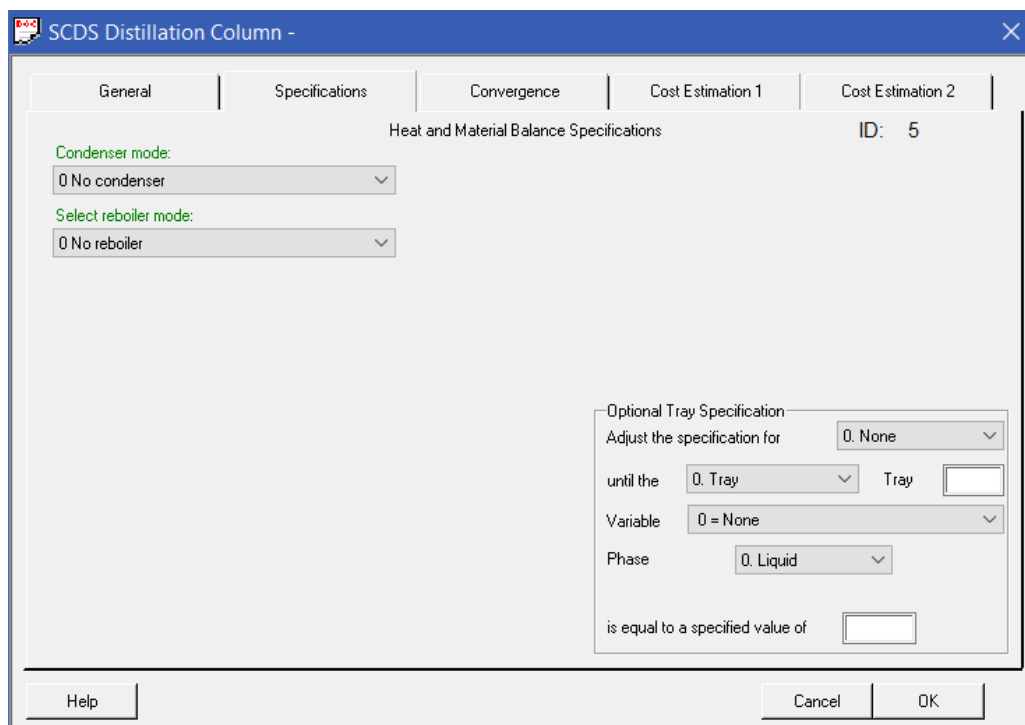
Slika 27 Shema SCDS modela s integriranom DT

Razlog tome je što se koriste vanjski izmjenjivači topline koji preuzimaju uloge kondenzatora i isparivača. Prilikom definiranja podataka u općem izborniku pojavljuju se još dvije opcije koje definiraju pojnu pliticu gornjeg i donjeg refluxa što je i prikazano na slici 28.



Slika 28 Prikaz općeg izbornika SCDS modela s integriranom DT

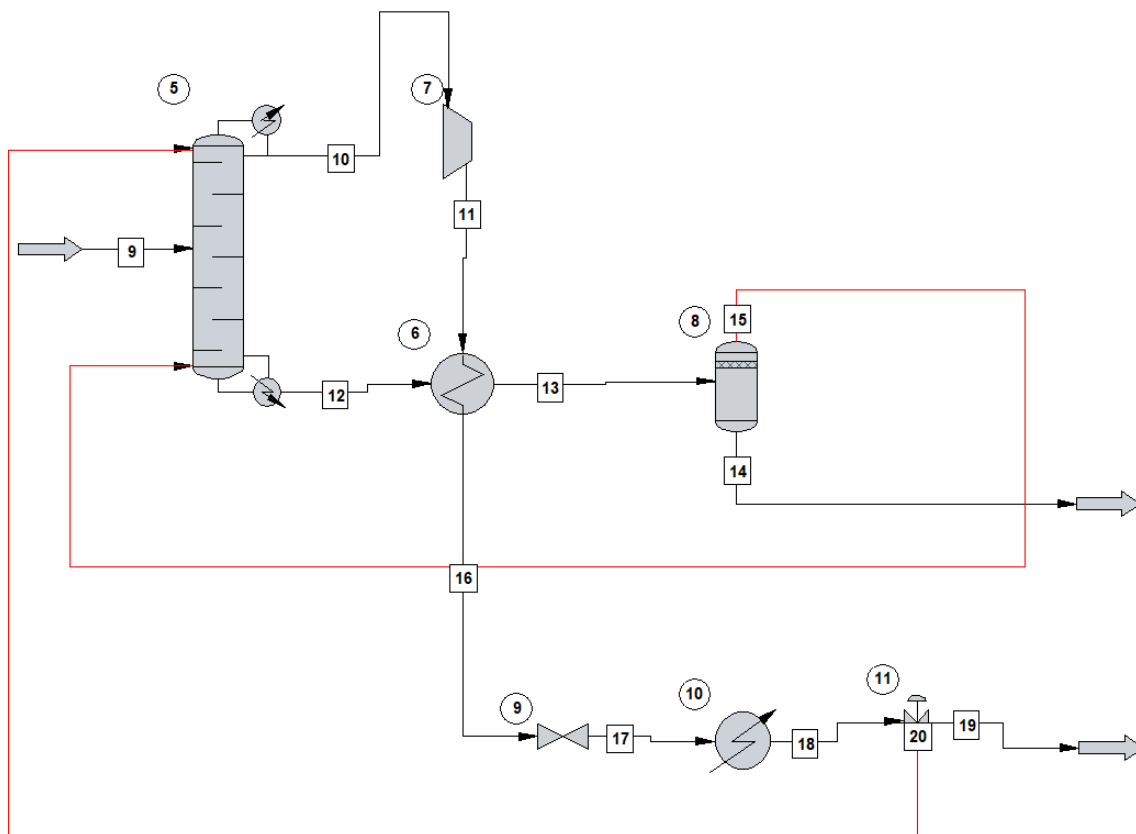
Na slici 29 prikazan je izbornik specifikacija rada kolone iz čega je vidljivo da SCDS model s integriranom DT radi bez kondenzatora i isparivača.



Slika 29 Izbornik specifikacija rada SCDS modela s integriranom DT

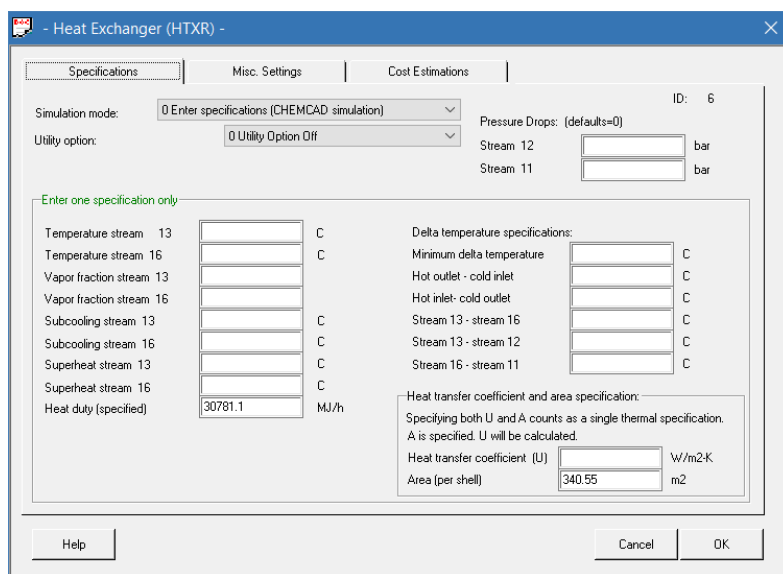
3.6. SCDS MODEL S INTEGRACIJOM VRC DT

Na slici 30 prikazana je shema procesa SCDS modela destilacijske kolone s integriranom dizalicom topline uz rekompresiju vršnih para (VRC DT). Karakteristika ovog procesa jest to što se para (struja 10) s vrha kolone (oprema 5) komprimira pomoću kompresora (oprema 7) da bi joj se podigao tlak i temperatura da bi mogla ispariti donji produkt (struja 12) na izlazu iz kolone koji je u kapljevitom obliku te odlazi u izmjenjivač topline (oprema 6) koji ima funkciju isparivača. Tom izmjenjivaču topline definirana je toplinska dužnost koja odgovara toplinskoj dužnosti isparivača kod SCDS modela. Time se postiže djelomično isparavanje donjeg izlaza (struja 13) iz kolone te se ta dvofazna struja odvodi u *flash* posudu (oprema 8) gdje se odvaja kapljeviti dio od isparenog dijela. Time se dobiva konačni proizvod dna (struja 14) u kapljevitom obliku, dok ostatak struje (struja 15) u parnoj fazi odlazi natrag u kolonu na posljednju pliticu. Nakon što se para vrha (struja 16) kolone ukapljila prolazi kroz prigušni ventil (oprema 9) u kojem se prigušuje te se smanjuje tlak na željenu vrijednost. Nakon toga se smjesa (struja 17) potpuno ukapljuje u dodatnom izmjenjivaču topline (oprema 10) te odlazi na ventil (oprema 11) gdje se odvaja kao konačni produkt vrha (struja 19) kolone te ostatak (struja 20) koji se kao kapljevina vraća na prvu pliticu. Struja 9 predstavlja pojnu struju. Iz poznatih vrijednosti rada kompresora i toplinske dužnosti izmjenjivača topline izračuna se toplinski koeficijent dizalice topline.



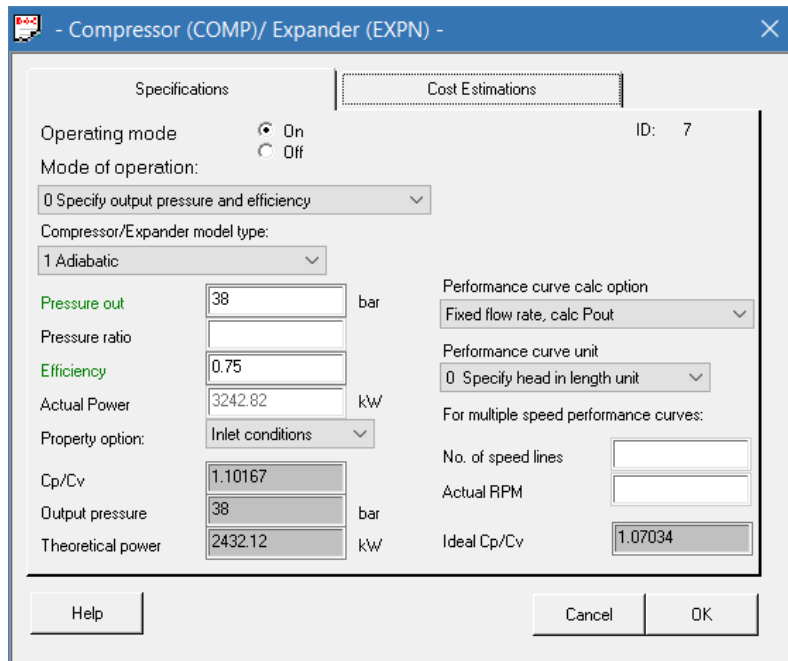
Slika 30 Shematski prikaz SCDS modela VRC DT

U nastavku će biti malo detaljnije objašnjen proces definiranja pojedine opreme. Procesna oprema koja se koristi (isključujući kolonu) jest izmjenjivač topline s 2 ulaza i izlaza koji se može definirati na razne načine, ali je u ovom primjeru definiran sa toplinskom dužnošću što je prikazano na slici 31.



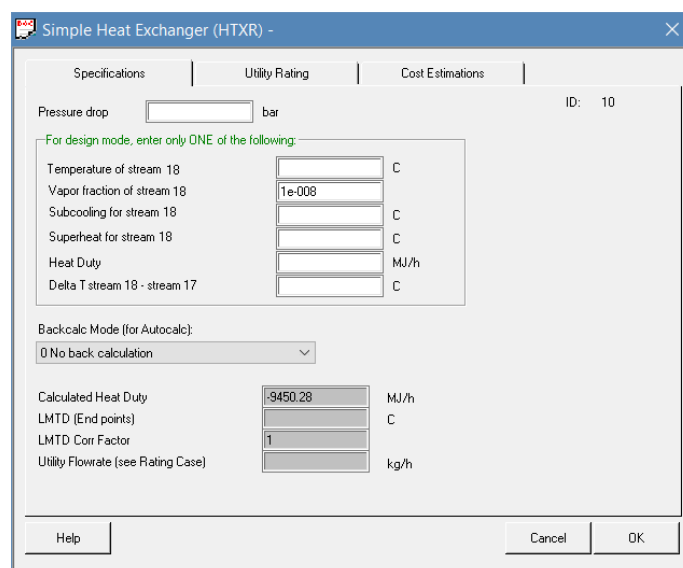
Slika 31 Izbornik za specifikaciju izmjenjivača topline s 2 ulaza i izlaza

Specifikacija kompresora ne nudi previše mogućnosti kao što je i vidljivo sa slike 32. Najčešće se koristi opcija 0 gdje se odredi izlazni tlak i učinkovitost procesa kompresije.



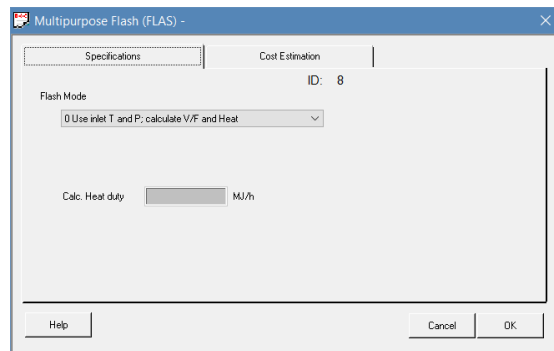
Slika 32 Izbornik za specifikaciju kompresora

Za potpuno ukapljivanje struje 17 u ovom slučaju koristi se izmjenjivač s jednim ulazom i izlazom. Ovo je nešto jednostavnija opcija koja ne nudi previše mogućnosti. U ovom slučaju definiran je s izlaznim udjelom parne faze koji iznosi 10^{-8} što se uzima kao u potpunosti ukapljena struja. Slika 33 prikazuje mogućnosti koje nudi ovakav model izmjenjivača topline.



Slika 33 Izbornik za specifikaciju jednostavnog izmjenjivača topline

Funkcija *flash* posude jest da odvoji kapljevину od pare kod dvofaznih smjesa. Slika 34 prikazuje mogućnosti *flash* posude.



Slika 34 Izbornik za specifikaciju *flash* posude

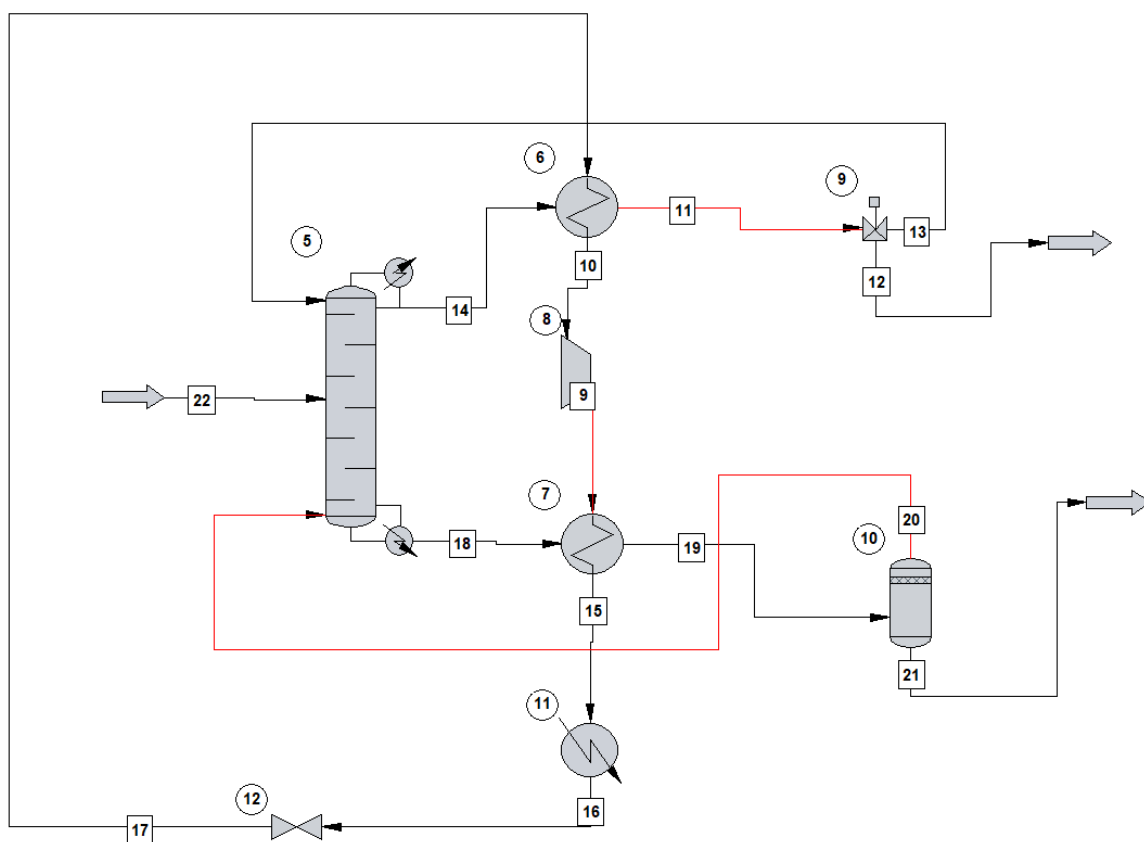
Najjednostavniji dijelovi opreme za specifikaciju jesu prigušni ventil kojemu se definira samo izlazni tlak, te ventil koji ima mogućnost specifikacije podjele izlaznih tokova.

3.7. SCDS MODEL S INTEGRIRANOM VC DT

SCDS model s integriranom dizalicom topline koja koristi vanjski radni medij (VC DT) razlikuje se od prethodnog modela po tome što koristi vanjski radni medij za isparavanje i kondenzaciju produkata dna i vrha. Na slici 35 je prikazana shema SCDS modela s integriranom VC DT. Para s vrha (struja 14) kolone dolazi do kondenzatora (oprema 6), odnosno isparivača vanjskog radnog medija, te se u potpunosti ukapljuje. Toplinska dužnost jednaka je toplinskoj dužnosti kondenzatora SCDS modela kolone. Pomoću ventila (oprema 9) se odvaja na produkt vrha kolone (struja 12) te refluks (struja 13) koji se vraća natrag u kolonu na prvoj plitici u obliku kapljevine. Kapljevina s dna kolone (struja 18) ulazi u isparivač (oprema 7) koji je definiran toplinskom dužnošću isparivača SCDS modela kolone. Dolazi do djelomičnog isparavanja te se dvofazna smjesa (struja 19) odvodi u *flash* posudu (oprema 10) koja razdvaja kapljeviti dio kao konačan produkt dna u obliku kapljevine (struja 21) te refluks (struja 20) koji se vraća u kolonu na posljednjoj plitici u obliku pare. Vanjski radni medij (struja 17) u isparivaču radnog medija (oprema 6) preuzima toplinu od pare s vrha kolone (struja 14) te u potpunosti isparava. U takvom stanju (struja 10) ulazi u kompresor (oprema 8) te se komprimira što za posljedicu ima porast tlaka te temperature. Nakon kompresora radni medij (struja 9) odlazi u kondenzator radnog medija (oprema 7) gdje predaje toplinu kapljevini s dna kolone (struja 18) pri čemu se djelomično ukapljuje (struja 15). Da bi se osiguralo potpuno ukapljivanje vanjskog radnog medija uvodi se dodatni hladnjak te se vanjski radni medij u potpunosti ukapljuje (struja 16). Nakon toga dolazi do prigušnog ventila (oprema 12) te se prigušuje prilikom čega mu pada tlak i temperatura te se

vraća u početno stanje (struja 17). Kao radni medij koristi se amonijak, dimetil-eter, izobutan i propan. Princip definiranja pojedinih dijelova opreme je identičan prethodnom primjeru.

Da bi se optimirao proces struja 17 definira se pri temperaturi od 30 °C te se uzme kao u potpunosti ukapljena struja te se određuje tlak, zatim se protok namjesti tako da ima dovoljno topline da se u potpunosti ispari u isparivaču radne tvari (oprema 6). Zatim se komprimira na najniži tlak (koji je relativno visok zbog manjeg protoka radnog medija) koji dozvoljava djelomično isparavanje struje 18. S obzirom da se struja 9 ne ukapljuje u potpunosti treba uvesti dodatni izmjenjivač topline (oprema 11) da bi se u potpunosti kondenzirala. Nakon toga slijedi prigušivanje na tlak koji se odredio na početku. S obzirom da prigušivanje dovodi do djelomično ukapljenog radnog medija, smanjuje se mogućnost struje 17 za ukapljivanje struje 14, stoga treba povećati masu radnog medija. S povećanim protokom smanjuje se potreban tlak za osiguravanje isparavanja u isparivaču (oprema 7). Prigušivanje s manjeg tlaka uzrokuje manji udio pare u struji 17, što može uzrokovati djelomično isparenu struju 10 i kapljice u kompresoru. Tim procesom određuju se optimalni radni uvjeti simulacije (protok radnog medija i izlazni tlak kompresora).



Slika 35 Shematski prikaz SCDS modela VRC DT

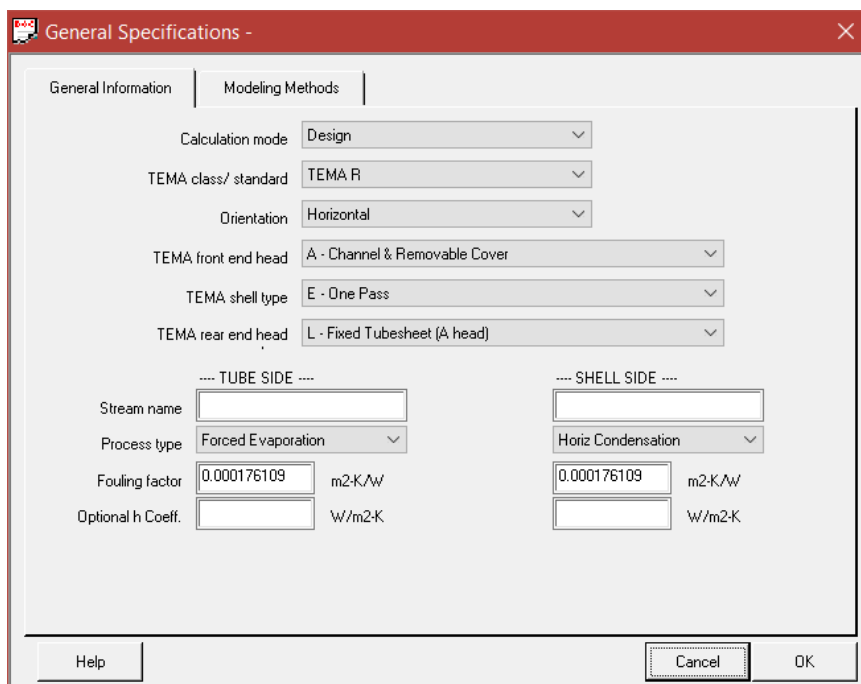
3.8. DIMENZIONIRANJE

Dimenzioniranje je esencijalan korak kod procjene troškova procesa jer na temelju podataka o dimenzijama pojedine opreme CHEMCAD izbacuje cijenu komada opreme. Cijena ovisi o puno raznih varijabla, no većina su predefinirane u CHEMCAD-u. Dimenzioniranjem se gu odrediti varijable koje specifično utječu na cijenu opreme. Za izmjenivače topline ta varijabla je površina potrebna za izmjenu topline. Za destilacijsku kolonu je to promjer i visina. Cijena kompresora ovisi o tlaku na izlazu, dok cijena *flash* posude ovisi o vremenu zadržavanja. Te vrijednosti su bitne za određivanje investicijskih troškova (CAPEX) dok su za procjenu pogonskih troškova bitne varijable protoka vodene pare i rashladne vode te potrošnja električne energije za pokretanje kompresora. Svodenjem tih varijabli na godišnju razinu te množenjem sa jediničnom cijenom troška pojedinog energenta te njihovim zbrojem dolazi se do ukupnih pogonskih troškova na godišnjoj razini (OPEX). Niže na slikama su prikazani neki od koraza za dimenzioniranje pojedinog komada opreme. Slika 36 prikazuje dimenzioniranje prve sekcije kolone koja je podijeljena na 2 sekcije i koriste se sitaste plitice s 2 prolaza.

Starting Stage	1	System factor	1	Section:	1
Ending Stage	38	Flood percent	80		
Tray diameter		Hole diameter	0.00635		m
Tray spacing	0.6096	Hole pattern	Triangular pitch		
No. of passes	2	Hole pitch	0.015875		m
Hole A /Tot A	0.1	Tray thickness	0.0019812		m
Weir height	0.0508	<input type="checkbox"/> Splash Baffle			
Flood correlation	Fair	Efficiency for Fractionator			
Downcomer		Light key	<None>		
Clearance	0.04445	Heavy key	<None>		
Optional flow area		Efficiency for Absorbers			
Side width		Solute			
Center width		Thickness specifications			
Off-center width		Design pressure			bar
Off-side width		Joint efficiency	0.85		
Downcmr A/ Tot A	0.12	Allowable stress	944.582		bar
		Corrosion allow.	0.00079375		m

Slika 36 Jedan od koraka dimenzioniranja kolone

Na slici 37 prikazan je jedan od koraka dimenzioniranja izmjenjivača topline. Ovaj korak uključuje definiranje načina proračuna, vrsta standarda, orijentaciju izmjenjivača, vrsta plašta, vrsta procesa koja se odvija cijevima i u plaštu.



Slika 37 Jedan od koraka dimenzioniranja izmjenjivača topline

4. REZULTATI SIMULACIJE I USPOREDBA S EKSPERIMENTALNIM PODACIMA

4.1. POJEDNOSTAVLJENI MODEL

Tablica 3 Prikaz izlaznih struja dobivenih *Shortcut* modelom

	ULAZ	VRH	DNO
	mol. udio	mol. udio	mol.udio
izobutan	0,002	0,007	0,000
<i>n</i> -butan	0,045	0,148	0,000
izopentan	0,260	0,827	0,013
<i>n</i> -pentan	0,270	0,018	0,380
ciklopentan	0,023	0,000	0,033
2,2-dimetilbutan	0,013	0,000	0,019
2,3-dimetilbutan	0,020	0,000	0,029
2-metilpentan	0,110	0,000	0,158
3-metilpentan	0,076	0,000	0,109
<i>n</i> -heksan	0,120	0,000	0,172
metilciklopentan	0,026	0,000	0,037
cikloheksan	0,005	0,000	0,007
ostatak	0,030	0,000	0,043

Protok, kh/h	30000	8225	21775
Tlak, (barg)	2,4		
Temperatura, °C	50		

Tablica 4 Prikaz relativne greške između eksperimentalnih podataka i simulacije

	ULAZ	VRH	DNO
	relativna greška		
izobutan	0	0,3	0
n-butan	0	0,075	0
izopentan	0	-0,034	0
n-pentan	0	0,4	0
ciklopentan	0	0	-0,1
2,2-dimetilbutan	0	0	0,05
2,3-dimetilbutan	0	0	0,033
2-metilpentan	0	0	0,013
3-metilpentan	0	0	0,010
n-heksan	0	0	-0,012
metilciklopentan	0	0	0,075
cikloheksan	0	0	0
ostatak	0	0	-0,075
Protok, kh/h	0	0,065	-0,027
Tlak, (barg)	0		
Temperatura, °C	0		

4.2. SCDS MODEL

Tablica 5 Rezultati dimenzioniranja SCDS modela kolone

Destilacijska kolona

Promjer 1. sekcije kolone/promjer 2. sekcije kolone	2,90/3,05
Vrsta plitica	sitaste
Broj sekcija	2
Razmak između plitica, m	0,6
Broj teorijskih stupnjeva	65
Djelotvornost plitica	0,9

Broj plitica	73
Visina kolone, m	54,48
Kondenzator	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	964
Protok rashladne vode, m ³ /h	698
Isparivač	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	99,12
Protok vodene pare, t/h	14,145

Tablica 6 Prikaz troškova za konvencionalnu kolonu

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1479,7
Kondenzator	385,4
Isparivač	46,6
Ukupni investicijski troškovi	1911,7

Pogonski troškovi

Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	6112553 m ³ /god	193,1
Vodena para	123910 t/god	3366,9
Električna energija za pokretanje kompresora	0 kWh/god	0
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		3560,0
Godišnji troškovi (TAC)		3687,5

4.3. VRC DT

Tablica 7 Rezultati dimenzioniranja

Izmjenjivač topline (oprema 6)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	341
Izmjenjivač topline (oprema 10)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	85
Protok rashladne vode, m ³ /h	226
Kompresor (oprema 7)	
Rad kompresije, kW	3244

Tablica 8 Prikaz troškova opreme, energije i ukupnih troškova

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1064,2
Izmjenjivač topline (oprema 6)	241,8
Izmjenjivač topline (oprema 10)	41,5
Kompresor	6442,5
Flash posuda	101,6
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	7891,7

Pogonski troškovi

Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	1977395 m ³ /god	62,5
Vodena para	0 t/god	0
Električna energija	28407103 kWh/god	2019,5
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		2082,0
Godišnji troškovi (TAC)		2608,1

4.4. VC DT DIMETIL-ETER

Tablica 9 Rezultati dimenzioniranja

Izmjenjivač topline (oprema 6)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	1652
Izmjenjivač topline (oprema 7)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	1820
Izmjenjivač topline (oprema 11)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	40
Protok rashladne vode, m ³ /h	141
Kompresor (oprema 8)	
Rad kompresije, kW	2069

Tablica 10 Prikaz troškova opreme, energije i ukupnih troškova

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1064,2
Izmjenjivač topline (oprema 6)	703,8
Kompresor	4850,8
Izmjenjivač topline (oprema 7)	1076,9
Izmjenjivač topline (oprema 11)	42,4
Flash posuda	101,6
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	7839,7

Pogonski troškovi

Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	1233583 m ³ /god	39,0

Vodena para	0 t/god	0
Električna energija	18122513 kWh/god	1288,3
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		1327,3
Godišnji troškovi (TAC)		1850,0

4.5. VC DT IZOBUTAN

Tablica 11 Rezultati dimenzioniranja

Izmjenjivač topline (oprema 6)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	1100
---	------

Izmjenjivač topline (oprema 7)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	4283
---	------

Izmjenjivač topline (oprema 11)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	57
---	----

Protok rashladne vode, m ³ /h	152
--	-----

Kompresor (oprema 8)

Rad kompresije, kW	2192
--------------------	------

Tablica 12 Prikaz troškova opreme, energije i ukupnih troškova

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1064,2
Izmjenjivač topline (oprema 6)	445,1
Kompresor	5030,4
Izmjenjivač topline (oprema 7)	2246,5
Izmjenjivač topline (oprema 11)	31,1
Flash posuda	101,6

Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	8918,8	
Pogonski troškovi		
Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	1329242 m ³ /god	42,0
Vodena para	0 t/god	0
Električna energija	19197628 kWh/god	1364,8
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)	1406,8	
Godišnji troškovi (TAC)	2001,3	

4.6. VC DT NH₃

Tablica 13 Rezultati dimenzioniranja

Izmjenjivač topline (oprema 6)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	679
Izmjenjivač topline (oprema 7)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	2215
Izmjenjivač topline (oprema 11)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	23
Protok rashladne vode, m ³ /h	131
Kompresor (oprema 8)	
Rad kompresije, kW	1950

Tablica 14 Prikaz troškova opreme, energije i ukupnih troškova

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1064,2

Izmjenjivač topline (oprema 6)	266,0	
Kompresor	4271,7	
Izmjenjivač topline (oprema 7)	1830,7	
Izmjenjivač topline (oprema 11)	30,0	
Flash posuda	101,6	
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	7564,2	
Pogonski troškovi		
Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	1143793 m ³ /god	36,1
Vodena para	0 t/god	0
Električna energija	17078671 kWh/god	1214,1
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		1250,2
Godišnji troškovi (TAC)		1754,5

4.7. VC DT PROPAN

Tablica 15 Rezultati dimenzioniranja

Izmjenjivač topline (oprema 6)

Potrebna površina izmjene topline, m ²	1140
Izmjenjivač topline (oprema 7)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	1968
Izmjenjivač topline (oprema 11)	
Potrebna površina izmjene topline, m ²	69
Protok rashladne vode, m ³ /h	231
Kompresor (oprema 8)	
Rad kompresije, kW	3116

Tablica 16 Prikaz troškova opreme, energije i ukupnih troškova

Investicijski troškovi

Oprema	Cijena, ·10 ³ \$
Destilacijska kolona	1064,2
Izmjenjivač topline (oprema 6)	462,9
Kompresor	6281,8
Izmjenjivač topline (oprema 7)	1588,7
Izmjenjivač topline (oprema 11)	62,4
<i>Flash</i> posuda	101,6
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	9561,6

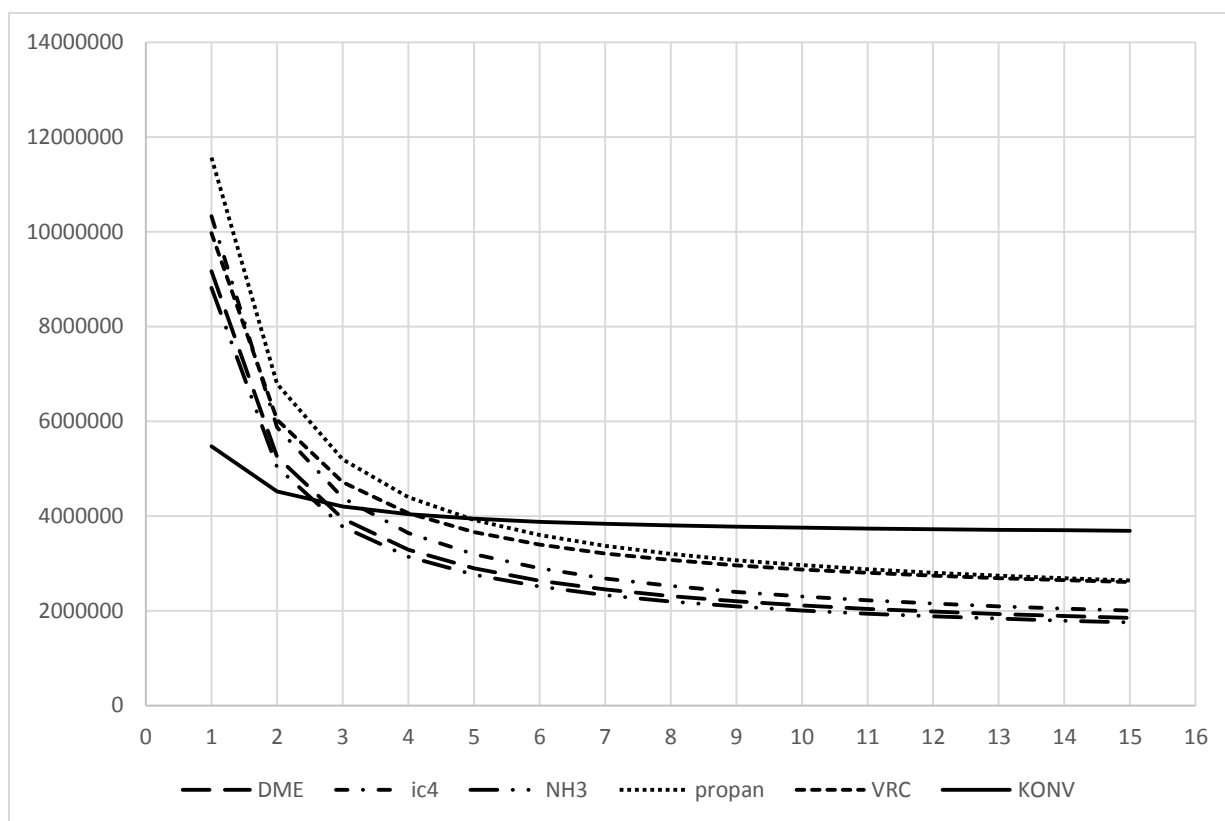
Pogonski troškovi

Energent	Protok	Cijena, ·10 ³ \$
Rashladna voda	2022246 m ³ /god	63,9
Vodena para	0 t/god	0
Električna energija	27293620 kWh/god	1940,3
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		2004,2
Godišnji troškovi (TAC)		2641,6

4.8. USPOREDBA SVIH SIMULACIJA

Tablica 17 Usporedba isplativosti integracije raznih vrsta DT sa ekonomskog i termodinamičkog aspekta

Simulacija	Postotak uštede	ϵ_{DT}
VRC	29,27	3,45
VC DT dimetil-eter	49,83	4,91
VC DT izobutan	45,73	4,70
VC DT NH ₃	52,42	5,16
VC DT propan	28,36	3,60



Slika 38 Grafički prikaz godišnjeg troška po godinama

5. RASPRAVA

Usporedbom tablice 2 i tablice 3 vide se razlike u sastavima i protocima za eksperimentalne (tablica 2) i teorijske podatke (tablica 3). Odstupanja su prikazana u tablici 4. Vidimo da je najveće odstupanje čak 40% i to kod *n*-pentana u struji vrha. Osim odstupanja izobutana od 30% u vrhu nema nešto većih odstupanja. Sastavi dna su prilično dobro pogođeni, no postoji određeno odstupanje od ciljanih vrijednosti protoka što se i vidi iz tablice 4. Razlozi leže u tome što utjecaj na izlazne struje imaju i vremenski poremećaji (pljusak tijekom ljetnih vrućina) koji nisu uzeti u obzir u simulacijama.

Što se tiče samog SCDS modela kolone iz tablice 5 vidljivo je da promjer prve sekcije odgovara eksperimentalnim podacima dok se kod druge sekcije poveća promjer. Visina kolone, uz vrijeme zadržavanja od 5 minuta dimenzioniranjem i dobivanjem volumena posude (pa preko toga i visinu) te po 1,5 metara visine za mjesto gdje dolazi pojenje i za kondenzator te umnoška broja plitica, dolazi se do vrijednosti od 54,48, što je malo više od ciljane vrijednosti.

Što se tiče troškova kolone koji su prikazani u tablici 6 te usporedbom troškova opreme ostalih slučajeva (s integracijom dizalica topline) prikazanih u tablicama 8, 10, 12, 14 i 16

vidi se da je konvencionalna destilacija puno povoljnija s gledišta investicijskih troškova. S druge strane pokazuje se apsolutno neprofitabilnom po pitanju operativnih troškova. Sve kolone s integriranom dizalicom postižu značajne uštede. No što se tiče samih dimenzija vidljivih iz tablica 7, 9, 11, 13 i 15 one prilično variraju. Razlozi variranja leže u tome što se koriste različite izvedbe dizalica topline, kao i odabir različitih radnih medija koji imaju vlastite specifičnosti (specifični toplinski kapacitet, koeficijent prolaska topline) što ima direktan utjecaj na količinu vanjskog radnog medija koji se treba koristiti. A količina radnog medija direktno utječe na same dimenzije dijelova procesne opreme. Što se tiče samih dimenzija, kolone su identične, dok se vidi ponegdje i znatna razlika u potrebnoj površini izmjenjivača topline. Kod integracije dizalice topline s rekompresijom vršnih para vide se najmanje površine izmjenjivača. Kod konvencionalne kolone te su površine nešto veće. Kod integracija dizalica topline s vanjskim radnim medijem te su površine poprilično velike.

Po svem sudeći, u svim slučajevima vidljivo je da je integracija dizalica topline u potpunosti opravdana. Čak štoviše iz slike 38 vidljivo je da čak i najmanje isplativoj integraciji dizalice topline treba svega 5 godina da postane isplativija od konvencionalne kolone. Vidi se također da je DT VC NH₃ najisplativija te su već nakon 2 godine ukupni godišnji troškovi manji u odnosu na konvencionalnu destilacijsku kolonu. U stopu je slijedi DT VC dimetil-eter koja neznatno zaostaje. Vidimo da su ugljikovodici (izobutan, propan te smjesa koju separiramo) nešto lošiji po pitanju isplativosti. Po pitanju toplinskog koeficijenta dizalice topline također je primjetan slijed, gdje je DT s najvećom uštedom upravo ona koja ima najviši toplinski koeficijent. Iako je izobutan nešto lošiji po pitanju isplativosti (tek nakon 3 godine postaje isplativ) vidimo da se ne razlikuje previše u postotku uštede kao ni po pitanju toplinskog koeficijenta. VRC DT i VC DT propan postižu uštede koje iznose manje od 30%, što je još uvijek poprilična ušteda. Što se tiče toplinskog koeficijenta također je nešto lošiji u odnosu na VC DT NH₃.

6. ZAKLJUČAK

Analizom podataka iz tablice 17, te grafičkog prikaza na slici 38 vidi se da je integracija dizalica topline u promatrani industrijski proces itekako opravdana. Već u 5. godini postižu se manji ukupni godišnji troškovi za sve dizalice topline čime se može zaključiti da su dizalice topline (u ovim okolnostima) izuzetno isplative. Glavni razlog tome je što se štede velike količine energije. Iz tablice 17 daje se zaključiti da su najatraktivnije

dizalice za primjenu one koje koriste amonijak, dimetil-eter i izobutan, no ponekad je lakše komprimirati samo gornji produkt pa koristiti tu izvedbu dizalice topline. I u tom slučaju postižu se poprilične uštede. Usporedbom dimenzija zaključuje se da je VRC DT najkompaktnija te prilično primamljiva u situacijama gdje je problem nedostatka prostora. Dizalice topline s vanjskim radnim medijem ograničene su raspoloživim prostorom u pogonu, što ograničava njihovu primjenu.

7. POPIS SIMBOLA

B	tok donjeg produkta, -
D	tok destilata, -
F	tok pojne smjese, -
h_1	jedinična entalpija u točki 1, kJ/kg
h_2	jedinična entalpija u točki 2, kJ/kg
h_3	jedinična entalpija u točki 3, kJ/kg
h_4	jedinična entalpija u točki 4, kJ/kg
L	tok refluksa, -
N	broj koncentracijskih stupnjeva, -
N_{\min}	minimalni broj koncentracijskih stupnjeva, -
NTU_{\min}	minimalni broj teoretskih stupnjeva, -
OB	oktanski broj, -
q_0	rashladni učin, kJ/kg
R	refluksni omjer, -
T	temperatura, °C
$T_{\max.}$	maksimalna temperatura, °C
$T_{\min.}$	minimalna temperatura, °C
T_o	temperatura okoline, °C
V	tok pare, -

w	jedinični raspoloživi vanjski rad, kJ/kg
x_A	molni udio komponente A, -
x_A	molni udio komponente A u kapljevitoj fazi, -
x_B	molni udio komponente B u kapljevitoj fazi, -
x_B	molni udio komponente u donjem produktu, -
x_D	molni udio komponente u destilatu, -
x_F	molni udio komponente u pojnoj smjesi, -
y_A	molni udio komponente A u parnoj fazi, -
y_B	molni udio komponente B u parnoj fazi, -
α_{AB}	relativna hlapivost komponente A u odnosu na komponentu B, -
ε_{DT}	koeficijent grijanja, -
ε_R	koeficijent hlađenja, -
η_C	stupanj djelovanja Carnotovog procesa, -

8. LITERATURA

1. Lukač, G., *Privatna komunikacija*, prosinac 2017.
2. Janović, Z., *Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi*, Hrvatsko društvo za goriva i maziva, Zagreb, 2005.
3. <http://blogs.worldbank.org/developmenttalk/what-triggered-oil-price-plunge-2014-2016-and-why-it-failed-deliver-economic-impetus-eight-charts> (pristup 24.09.2018.)
4. Sander, A., *Jedinične operacije u ekoinženjerstvu: Toplinski separacijski procesi*, interna skripta, FKIT, Zagreb, 2011.
5. Rogošić, M., *Kemijsko-inženjerska termodinamika*, nastavni tekst, FKIT, Zagreb, 2013.
6. McCormick R. H., Walsh W. H., Hetrick S. S. Zudkevitch D., *Relative Volatility Data for Isopentane: n-Pentane Mixtures*, J. Chem. Eng. Data, **8** (1963.) 504 – 508
7. <https://www.indiamart.com/proddetail/sieve-tray-distillation-column-14290499173.html> (pristup 19.09.2018.)
8. <https://www.indiamart.com/proddetail/bubble-cap-tray-9371498073.html> (pristup 19.09.2018.)
9. http://intra-process.com/index.php?lg=en&main=Float_Valve_Trays&site=01:01:03 (pristup 19.09.2018.)

10. <https://zhongbaowiremesh.en.made-in-china.com/product/QKZnAvkJVpUR/China-Metal-Random-Packing-Tower-Filler-Stainless-Steel-304-304L-316-316L-for-Distillation-Columns.html> (pristup 19.09.2018.)
11. http://intra-process.com/index.php?lg=en&main=Structured_Packing&site=01:02:02 (pristup 19.09.2018.)
12. Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., *Osnove tehničke termodinamike*, Školska knjiga, Zagreb, 2012.
13. <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/m10090.pdf> (pristup 20.09.2018.)

9. ŽIVOTOPIS

Tomislav Horvat [REDACTED] Pohađao je OŠ Nedelišće, a potom i Gimnaziju Josipa Slavenskog u Čakovcu. Završio je preddiplomski studij Kemijskog inženjerstva na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u rujnu 2016. Iste godine upisuje diplomski studij Kemijskog inženjerstva, modul Kemijsko procesno inženjerstvo, te je dobitnik Rektorove nagrade za akademsku godinu 2016./2017. Trenutno je student druge godine diplomskog studija Kemijskog inženjerstva na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije.