

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

Robert Bedoić
Filip Brkić
Tomislav Horvat

POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI PROCESA
DESTILACIJE PRIMJENOM DIZALICA TOPLINE

Zagreb, 2017.

Ovaj rad je izrađen na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zavod za reakcijsko inženjerstvo i katalizu pod mentorstvom doc. dr. sc. Igora Dejanovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis oznaka i indeksa

Oznaka	Jedinica	Značenje
A	m^2	površina izmjene topline
B	$kg\ h^{-1}$	protok donjeg produkta
CAPEX	\$	ukupni investicijski troškovi
D	$kg\ h^{-1}$	protok destilata
h	$J\ kg^{-1}$	jedinična entpalija tvari
F	$kg\ h^{-1}$	protok pojenja
L	$kg\ h^{-1}$	refluks
N	-	teorijski broj stupnjeva
NTU	-	broj jedinica prijenosa
OPEX	\$	ukupni pogonski troškovi
p	Pa	apsolutni tlak
P	W	snaga kompresora
q	$J\ kg^{-1}$	jedinična toplina
Q	$J\ s^{-1}, W$	toplinska dužnost
R	-	refluksni omjer
R/R_{min}	-	radni omjer refluksa
T	K, °C	termodinamička temperatura, relativna temperatura
TAC	\$	godišnji troškovi
U	$W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$	ukupni koeficijent prolaza topline
V	$m^3\ h^{-1}$	protok pare
y	%	udio komponente u parnoj fazi

x	%	udio komponente u kapljevitj fazi
α	-	relativna hlapivost
ε	-	faktor dizalice topline

INDEKSI

Oznaka	Značenje
B	donji produkt
c	kondenzator, kondenzacija
D	destilat
DT	dizalica topline
e	isparivač, isparavanje
F	pojenje
i	lakše hlapiva komponenta
j	teže hlapiva komponenta
min	minimalni
'	vrela kapljevina
"	suhozasićena para

Sadržaj

1	UVOD	2
2	OPĆI DIO	2
2.1	Procesi prerade nafte	2
2.2	Destilacija	4
2.3	Ravnoteža para-kapljevina	6
2.4	Modeliranje procesa kontinuirane destilacije	6
2.4.1	Fenske-Underwood metoda	7
2.4.2	Gililandova metoda	7
2.4.3	Strogi proračun	8
2.5	CHEMCAD	9
2.6	Dizalice topline	10
2.6.1	Termodinamički proces u dizalicama topline	11
2.6.2	Primjena dizalica topline u kemijskoj procesnoj industriji	14
2.6.3	Dizalice topline u destilacijskim procesima	15
3	MATERIJALI I METODE	16
3.1	Materijali	16
3.2	Metode	17
3.2.1	Simulacija destilacijske kolone	17
3.2.2	<i>Shortcut</i> model destilacijske kolone	18
3.2.3	<i>SCDS</i> model destilacijske kolone	19
3.2.4	<i>SCDS</i> model destilacijske kolone s dizalicom topline koja vrši rekompresiju vršnih para (VRC)	20
3.2.5	<i>SCDS</i> model destilacijske kolone s primjenom dizalice topline koja koristi vanjsku radnu tvar (VC)	22
3.2.6	Dimenzioniranje	22
3.2.7	Procjena troškova	24
4	REZULTATI	25
4.1	Rezultati <i>Shortcut</i> modela	25
4.2	Rezultati <i>SCDS</i> modela destilacijske kolone	27
4.3	Rezultati <i>SCDS</i> modela destilacijske kolone VRC	30
4.4	Rezultati <i>SCDS</i> modela destilacijske kolone VC	32
4.5	Procjena isplativosti investicije	35
5	RASPRAVA	35

5.1	Radni tlak kolone	35
5.2	Odabir R/R_{\min} s obzirom na minimum ukupnih troškova	36
5.3	SCDS model destilacijske kolone	36
5.4	SCDS model destilacijske kolone VRC.....	37
5.5	SCDS model destilacijske kolone VC.....	37
6	ZAKLJUČAK.....	38
7	ZAHVALE	38
8	POPIS LITERATURE.....	39
9	SAŽETAK.....	40
10	SUMMARY	40

1 UVOD

Povećanje energetske učinkovitosti u kućanstvu, prometu ili industriji, smatra se značajnim faktorom. Kemijska procesna industrija troši velike količine energije pa je svako ulaganje u povećanje energetske učinkovitosti pozdravljeno i s ekonomskog i energetskog aspekta. Destilacija kao toplinski separacijski proces troši ogromne količine energije pa su se na tom polju razvile mnoge mogućnosti uštede energije. Neke od njih se već dugi niz godina primjenjuju na postrojenjima dok se neki zbog složenosti još uvijek ne primjenjuju. Dizalice topline jedan su od mogućih načina povećanja energetske učinkovitosti. Zbog visokih početnih ulaganja njihova isplativost opravdana je dužim periodom rada.

Cilj ovog rada je ispitati ekonomsku opravdanost upotrebe dizalica topline u destilacijskoj koloni za separaciju smjese propan-propen. Razlog primjene dizalica topline u separaciji te smjese je velika potrošnja energenata (ogrjevne pare i rashladne vode). Propan i propen vrlo su bitne petrokemijske sirovine i koriste se u sintezi širokog broja kemikalija. Primjena dizalica topline stoga mora osigurati da čistoće produkata budu unutar granica tolerancije. Ovaj rad pisan je čisto teoretski te se ne oslanja na nikakve eksperimentalne podatke. Služi za preliminarna ispitivanja mogućih poboljšanja već postojećih procesa

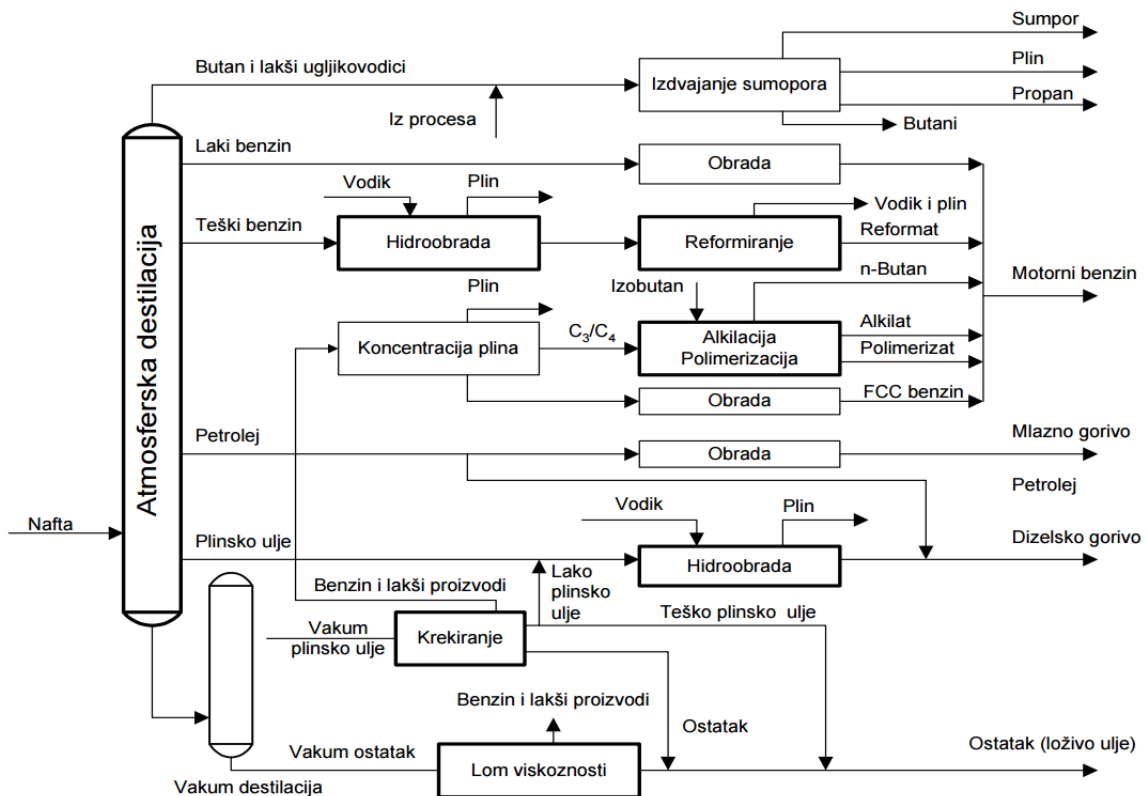
2 OPĆI DIO

2.1 Procesi prerade nafte

Naziv *nafta* perzijskog je podrijetla, nastao od glagola *nafata* (znoj Zemlje). Kapljevita je do polučvrsta tvar, nalazi se u Zemljinoj kori, sastavljena je pretežito od smjese brojnih ugljikovodika. Sadrži i organske spojeve sa sumporom, dušikom i kisikom, a u vrlo malim udjelima sadrži veći broj teških metala. Zbog velikog broja ugljikovodika i drugih spojeva i sastavnica, s velikim razlikama u svojstvima, nafta se ne može izravno upotrebljavati, ni kao gorivo niti kao kemijska sirovina. Uporabni naftni proizvodi (motorni benzini, dieselska goriva, goriva za zrakoplove, ukapljeni naftni plin, petrokemijske sirovine itd.) dobivaju se preradom nafte, koja se obavlja u složenim tehnologijskim cjelinama zvanim rafinerijama. Procesi preradbe se mogu razvrstati na separacijske, konverzijske i procese obrade. Separacijski procesi su karakterizirani odvajanjem naftnih sastavnica prema fizikalnim svojstvima, bez strukturnih promjena ugljikovodika. Najčešći procesi takve prirode su: destilacija, ekstrakcija, apsorpcija, kristalizacija, itd. Konverzijskim procesima mijenja se veličina i/ili struktura ugljikovodika. Prema vrsti kemijske pretvorbe dijele se na:

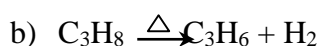
- parno kreiranje
- toplinsko kreiranje
- katalitičko kreiranje
- hidrokreiranje
- alkilacija
- reformiranje
- izomerizacija
- oligomerizacija (polimerizacija)

Procesi obrade dijele se na obradu vodikom, oksidaciju destilacijskih ostataka, procese pri dobivanju mineralnih baznih ulja i kemijske metode. Na slici 1 prikazani su temeljni procesi i proizvodi prerade nafte [1].

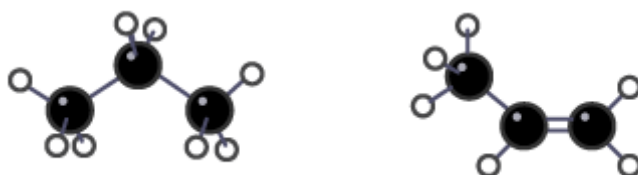


Slika 1 Shematski prikaz procesa prerade nafte [1]

Piroliza ugljikovodika najznačajniji je proces petrokemijske industrije jer služi kao izvor većine temeljnih organskih industrijskih sirovina: eten, propen, izobuten, buten i BTX (benzet, toluen, ksilen). Najčešće sirovine su etan, propan, butan, primarni benzin, plinski kondenzat i plinsko ulje. Proces nije kataliziran zbog velike sklonosti nezasićenih ugljikovodika reakcijama ciklizacije i koksiranja čime bi se smanjila aktivnost katalizatora stoga se proces provodi pri visokim temperaturama (od 750 do 900 °C) i nižim tlakovima (od 2 do 4 bar). Pri opisanim uvjetima zbivaju se endotermne reakcije cijepanja veze C-C (krekiranje, a) i C-H (dehidrogenacija, b). Oba oblika cijepanja veze prikazana su za slučaj korištenja propana kao sirovine.



Konverzija po prolazu niža je od 100% pa je dobivenu smjesu nakon reakcije potrebno separirati. Smjesa propana i propena izdvaja se frakcijskom destilacijom od ostalih produkata pirolize. Propen je, uz eten, najviše upotrebljavan olefinski ugljikovodik, a najznačajniji su mu proizvodi: polipropilen, izopropanol, akrilonitril, propilen-oksid, itd. Pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku je bezbojan, neutrovan plin, blagog naftnog mirisa. Propan je plin iz skupine alkana koji se dobiva iz nafte ili zemnog plina. Pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku je bezbojan, neutrovan i bez mirisa. Najčešće se koristi kao energent. Zbog velike sličnosti strukture molekula propana i propena (slika 2) ovi spojevi imaju vrlo bliske temperature vrelišta što rezultira malom relativnom hlapivošću smjese. To za posljedicu ima veliki broj ravnotežnih stupnjeva prilikom separacije u destilacijskoj koloni, kao i veliki utrošak energije.



Slika 2: Prikaz strukture molekule propana (lijevo) i propena (desno) [2]

2.2 Destilacija

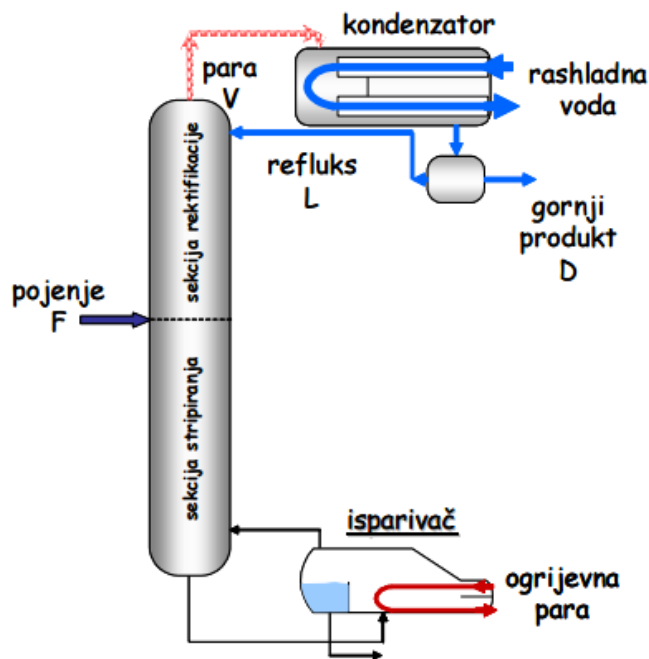
Destilacija je proces razdvajanja kapljevitih smjesa na čiste komponente ili smjese određenih sastava na osnovi razlika u vrelištima komponenata. U kemijskoj industriji primjenjuju se brojni tipovi destilacija, šaržnih, polukontinuiranih i kontinuiranih, uključujući

složene tipove poput ekstraktivne destilacije ili destilacije uz kemijsku reakciju. Destilacijski procesi općenito zahtijevaju veliki utrošak energije (2005. godine oko 4,85% ukupne potrošnje energije u SAD odnosilo se na destilacijske procese). Stoga je razumljivo da se upravo istraživanjima destilacijskih procesa i faznih ravnoteža para–kapljevina na kojima se oni zasnivaju posvećuje posebna pozornost, jer se tako mogu ostvariti znatne uštede[3].

Destilacija se provodi u destilacijskoj koloni koja se sastoji od:

- vertikalnog cilindričnog tijela u kojem se odvija separacija komponenti
- unutrašnjih dijelova (plitice/tavani ili punila) koji poboljšavaju proces separacije
- isparivača koji osigurava isparavanje kapljevine
- kondenzatora za kondenzaciju gornjeg produkta
- posude u kojoj se zadržava kondenzirana para sa vrha kolone kako bi se dio mogao vraćati natrag u kolonu kao refluks

Destilacijska kolona podijeljena je na dvije sekcije. U sekciji rektifikacije smjesa se obogaćuje lakše hlapivom komponentom na putu prema vrhu kolone. U sekciji stripiranja povećava se udio teže hlapive komponente prema dnu kolone. Omjer protoka dijela produkta vrha koji se vraća u kolonu (L) i protoka destilata (D) naziva se refluksnim omjerom (R) (Slika 3.). Sama kolona je podijeljena na određeni broj koncentracijskih stupnjeva. Svaki koncentracijski stupanj predstavlja jednu ravnotežu između pare i kapljevine. U koloni s pliticama (tavanima) broj plitica predstavlja broj koncentracijskih stupnjeva ako se pretpostavi stupanj djelovanja plitica 100%. 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. U realnim uvjetima nije moguće postići ravnotežno stanje jer kolone rade u stacionarnom režimu. Stvaran broj koncentracijskih stupnjeva potrebnih za željenu separaciju uvijek će biti veći od teoretskog što ovisi o djelotvornosti plitica odnosno punila i radnim uvjetima [4].



Slika 3 Prikaz kolone za destilaciju [4]

2.3 Ravnoteža para-kapljevina

Istovremena prisutnost pare i kapljevina u kemijsko-inženjerskoj praksi susreće se pri nizu tehnoloških procesa. Za opisivanje fazne ravnoteže para-kapljevina postoji niz jednadžbi stanja, a neke od najčešće korištenih su SRK (Soave-Redlich-Kwong) i PR (Peng-Robinson). Obje jednadžbe stanja ugrađene su u mnogobrojne procesne simulatore [3].

2.4 Modeliranje procesa kontinuirane destilacije

Postoje dvije osnovne vrste proračuna procesa destilacije: brzi i strogi. Brzi proračuni uključuju grafičke (McCabe-Thiele i Ponchon-Savarit) i algebarske metode (Fenske-Underwood i Gilliland). Najčešće služe za preliminarne proračune potrebne za brze usporedbe različitih uvjeta procesa kao i za izračun početnih vrijednosti za stroge proračune. Strogi proračuni zahtijevaju poznavanje većeg broja parametara, ali daju točnije rezultate i mogu poslužiti kao osnova za dimenzioniranje opreme. Strogi proračun podrazumijeva proračun svakog pojedinog ravnotežnog stupnja unutar destilacijske kolone. S obzirom da se u radu proračun bazira na korištenju procesnog simulatora koji koristi algebarske metode, u nastavku teksta su opisane detaljnije.

2.4.1 Fenske-Underwood metoda

Fenske-Underwoodova metoda služi za određivanje R_{min} i NTU_{min} . Ova metoda se bazira na pretpostavci da je stalni molarni protok tvari kroz sustav (kolona ili plitica) i stalne relativne hlapivosti $\alpha_{i,j}$ koja se definira prema (1).

$$\alpha_{i,j} = \frac{\left(\frac{y_i}{x_i}\right)}{\left(\frac{y_j}{x_j}\right)} = \frac{y_i \cdot x_j}{y_j \cdot x_i} \quad (1)$$

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

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

Minimalni refluksni omjer, R_{min} , dobiva se za $NTU \rightarrow \infty$.

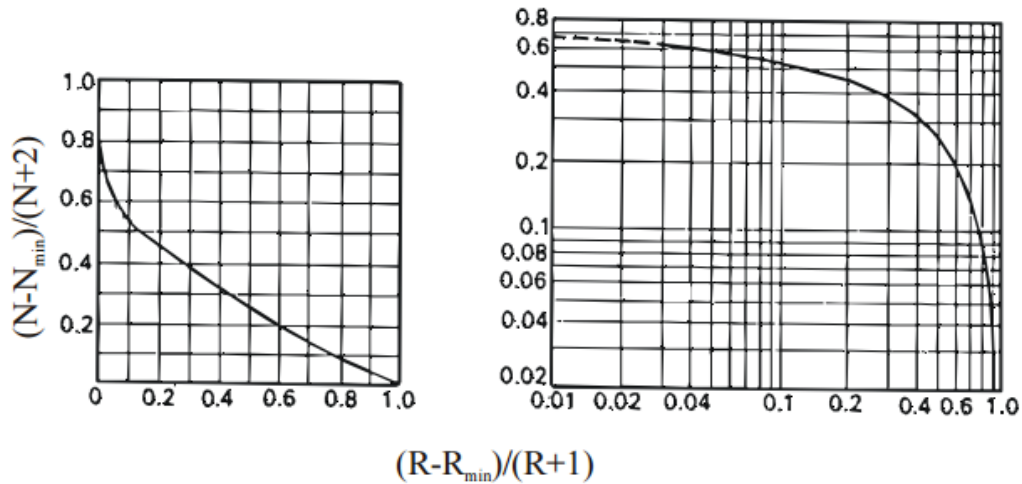
$$R_{min} = \frac{1}{\alpha_{i,j} - 1} \cdot \left(\left(\frac{x_D}{x_F}\right)_i - \alpha_{i,j} \cdot \left(\frac{x_D}{x_F}\right)_j \right) \quad (3)$$

Za određivanje mjesta pojenja koristi se empirijski postupak Kirkbridea, odnosno njegova modifikacija [5].

$$N_F = \frac{NTU}{1 + \left[\left(\frac{x_j}{x_i}\right)_F \cdot \left(\frac{x_{i,B}}{x_{j,D}}\right)^2 \cdot \frac{B}{D} \right]^{0,206}} - 0.5 \log(NTU) \quad (4)$$

2.4.2 Gillilandova metoda

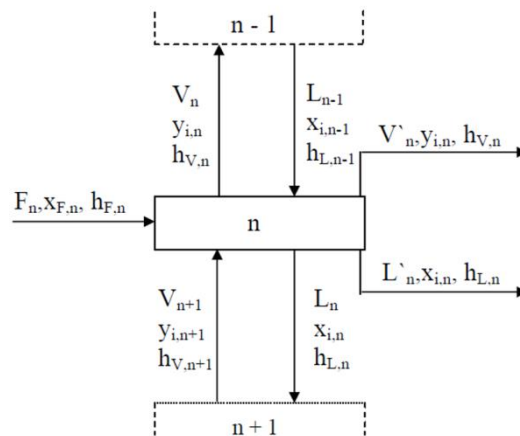
Gillilandov dijagram daje empirijsku relaciju između broja teoretskih jedinica prijenosa i refluksnog omjera (Slika 4.).



Slika 4 Grafički prikaz ovisnosti refluksnog omjera i broja teorijskih stupnjeva [4]

2.4.3 Strogi proračun

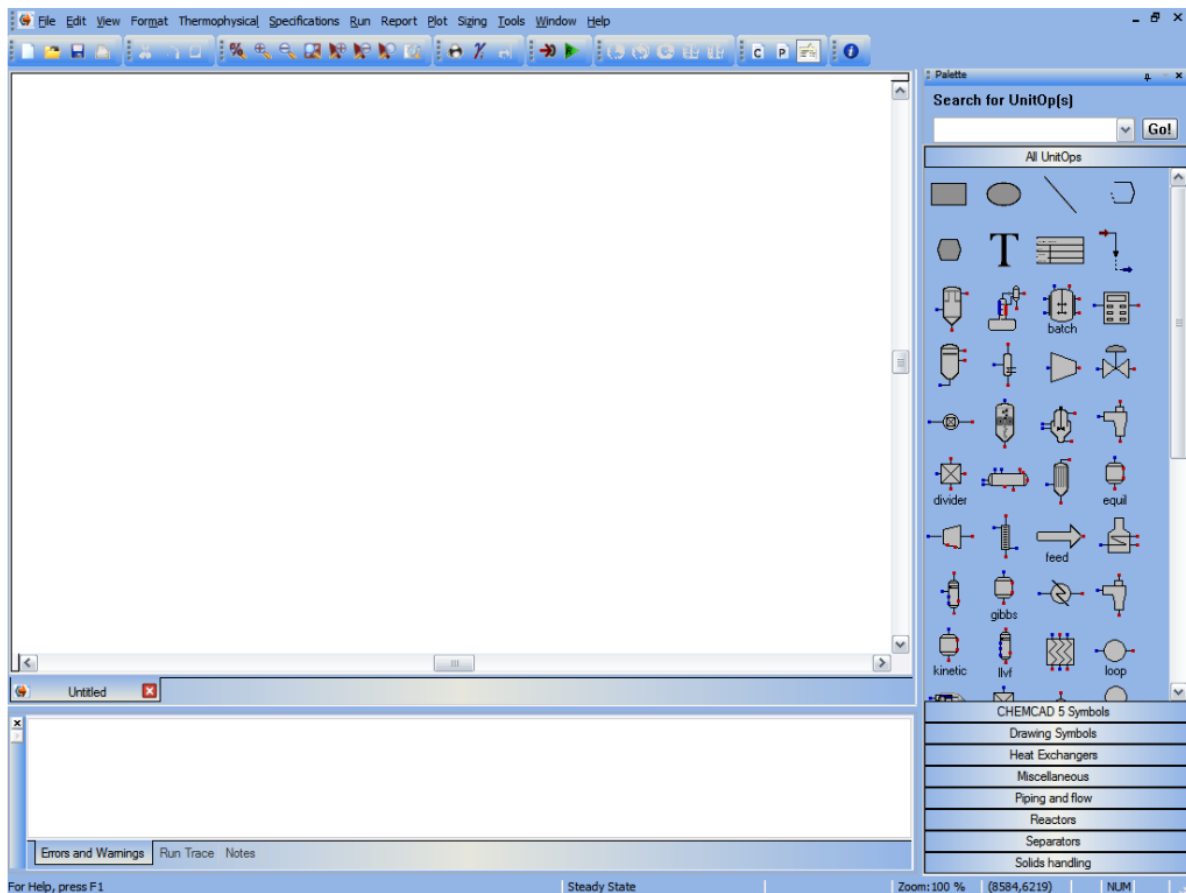
Proračun destilacijskih kolona uvelike se ubrzao uvođenjem računala pa su se stoga mogle i rješavati složenije bilance tvari i energije. Današnji modeli za proračun temelje se na MESH (*mass – equilibrium – summation – enthalpy*) sustavu jednačbi. Prema njemu se postavljaju ukupna bilanca tvari i bilanca tvari po komponentama za svaki ravnotežni stupanj. Jednadžbe su u osnovi nelinearne te se rješavaju iterativnim postupcima. Da bi bilo moguće rješavanje potrebno je poznavanje karakteristika pojne smjese (protok, temperatura, sastav itd.) [6]. Algoritam postavljanja bilanci za teorijski stupanj n prikazana je na slici 5 [6].



Slika 5 Ravnotežni stupanj sa podacima potrebnim za MESH proračun [6]

2.5 CHEMCAD

CHEMCAD je programski sustav tvrtke *Chemstations Inc.* Primjenjuje se u simulaciji kemijskih i fizikalnih procesa u industriji. Program koristi *DIPPR (Design Institute for Physical Property data)* bazu podataka o termodinamičkim svojstvima čistih tvari (preko 2000 tvari). U *CHEMCAD*-u moguće je definirati tvari koje nisu sadržane u *DIPPR*-u korištenjem korelacija kao što su *Joback*, *UNIFAC*, itd. Program se sastoji od sučelja podijeljenog na prozore (slika 6). Glavni prozor služi za grafički prikaz danog procesa. Kraj njega se nalazi prozor sa procesnom opremom koja se uobičajeno koristi u modernim postrojenjima. Program omogućava simulacije kontinuiranih, šaržnih i polukontinuiranih procesa. Za modeliranje procesa destilacije postoje već ugrađeni modeli kao što su: *Shortcut*, *SCDS*, *Tower* i *Tower+*.



Slika 6 Grafičko sučelje procesnog simulatora [7]

Shortcut model proračuna temelji se na *Fenske – Underwood – Gilliland – Kirkbride* sustavu jednačbi. *Kirkbride* sustav jednačbi koristi se za određivanje položaja pojne plitice.

Za proračun potrebno je definirati pojnu smjesu te udio komponenata u gornjem i donjem produktu. Rezultati simulacije su:

- toplinske dužnosti kondenzatora i isparivača
- minimalan broj teorijskih stupnjeva
- položaj pojne plitice
- minimalni refluksni omjer
- izračunati refluksni omjer koji se dobije iz definiranog radnog omjera refluksa (R/R_{\min})

Strogi modeli proračuna su *Tower*, *Tower+* i *SCDS* koji se temelje na *MESH* sustavu jednadžbi. *Tower* model zahtjeva manji broj iteracija i brže konvergira, no nije toliko zastupljen zbog jednostavnosti proračuna. *SCDS* model je složeniji od *Tower* modela pa može simulirati posebne slučajeve:

- reaktivna destilacija
- trofazni sustav
- sustavi s neidealnim K vrijednostima (azeotropne smjese)
- neravnotežni model procesa destilacije

Tower+ je proširenje *Tower* modela, teže konvergira i koristi se kod modeliranja destilacijskih kolona u rafinerijama i petrokemijskim postrojenjima [7].

2.6 Dizalice topline

Dizalice topline su transformatori topline u kojima je minimalna temperatura u procesu viša ili jednaka onoj okoline, a maksimalna temperatura u procesu veća od one okoline. U procesu se toplina odvodi od tijela niže temperature i dovodi tijelu više temperature, uz utrošak rada. Za rad uređaja potreban je izvor topline (tijelo niže temperature) koje se može ohladiti na određenu temperaturu i potrošač tako dobivene topline (tijelo više temperature). Primjena dizalica topline omogućava iskorištavanje topline tijela s relativno niskom temperaturom (npr. okolni zrak, morska voda, voda nakon hlađenja hidrogenatora, tlo) [8]. S obzirom na način rada dizalice topline dijele se na [9]:

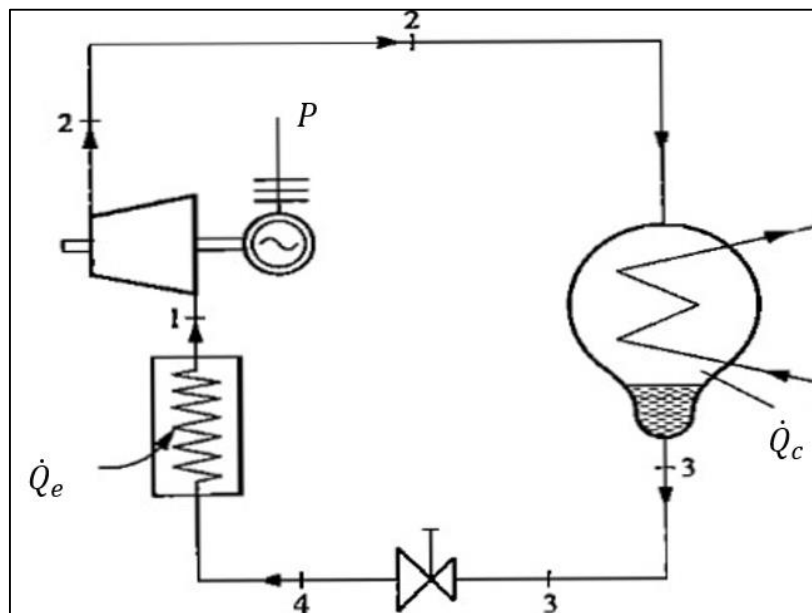
- mehaničke kompresijske
- apsorpcijske
- adsorpcijske

– termoakustične

Mehaničke kompresijske dizalice topline zasnivaju svoj rad na kompresiji suhozasićene ili pregrijane pare, dok kod apsorpcijskih dizalica topline nakon isparavanja dolazi do apsorpcije radne tvari u apsorpcijskoj tvari (LiBr-voda ili amonijak-voda). Kod adsorpcijskih dizalica topline nakon isparavanja dolazi do adsorpcije radne tvari na krutom adsorbentu (zeolit-voda, silika gel-voda, aktivni ugljen-metanol). Termoakustične dizalice topline nisu u komercijalnoj primjeni. Kao radna tvar u dizalicama topline mogu se koristiti: amonijak, freoni, razne smjese ugljikovodika, itd. Današnja primjena dizalica topline odnosi se za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju, no sve se više raširila upotreba istih u procesima gdje je potrebno povećati energetska učinkovitost.

2.6.1 Termodinamički proces u dizalicama topline

Osnovni elementi parno-kompresijskog uređaja su: kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač.



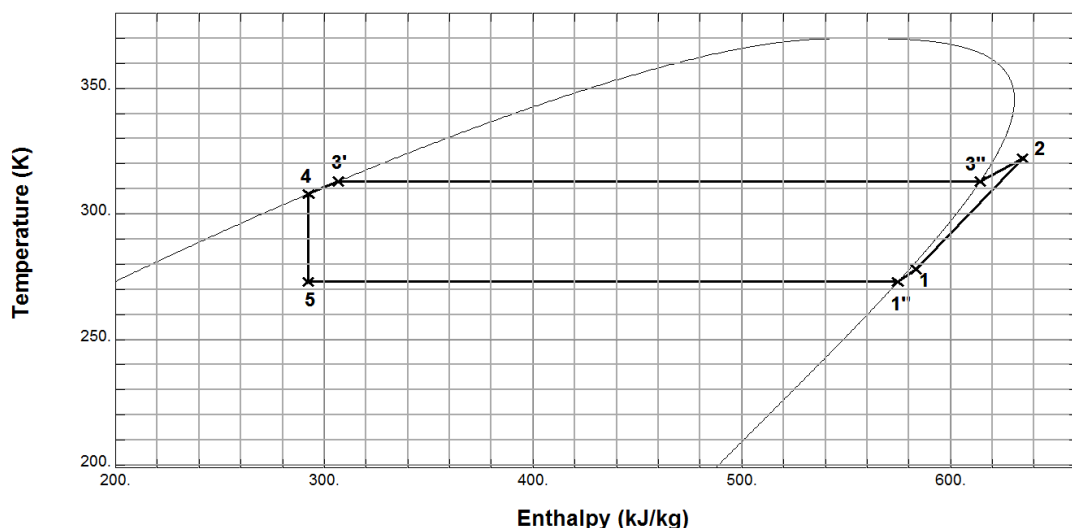
Slika 7 Shema kompresijske dizalice topline [8]

Proces u jednostavnoj parno kompresijskoj dizalici topline prikazanoj na slici 7 protječe na sljedeći način: radna tvar se komprimira uz potrošnju mehaničkog rada (1 do 2). Slijedi hlađenje i kondenzacija (2 do 3), pri čemu oslobođeni toplinski tok preuzima rashladna voda ili zrak kojim se kondenzator hladi. Pomoću toplinskog toka rashladne tvari, zrak ili rashladna voda zagrijavaju se do temperature na kojoj se mogu primijeniti u različite svrhe, npr. za

zagrijavanje prostora, bazena i slično. Nakon kondenzacije radna tvar prigušuje se do tlaka i temperature u isparivaču (3 do 4). U isparivaču se mokroj pari (smjesa pare i kapljevine) dovodi toplinski tok (4 do 1) koji je oduzet tijelu koje se hladi.

Kako bi se postigao što veći faktor grijanja dizalice topline te uz to osigurao optimalan i siguran rad prikazani teorijski proces poboljšava se kako je prikazano na slici 8 napravljenoj u računalnom programu REFPROP za radnu tvar propan [10]:

- pregrijavanjem suhozasićene pare (1"-1) na ulazu u kompresor (suhozasićena para na ulazu u kompresor mogla bi sadržavati eventualne čestice kapljevite faze te na taj način prouzročiti hidrauličke udare); time se ujedno i povećava jedinična toplina koja se dovodi radnoj tvari, odnosno rashladni učin, ali i povisuje temperatura na izlazu iz kompresora
- pothlađivanje vrele kapljevine (3'-4) na izlazu iz kondenzatora (gibanjem radne tvari kroz cjevodod od kondenzatora do prigušnog ventila dolazi do pada tlaka, odnosno sniženja temperature; pojava isparavanja smanjuje propusnu moć prigušnog ventila pošto je jedinični volumen kapljevine manji od jediničnog volumena mokre pare; stoga da se izbjegne pojava pare provodi se pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku) proces se gotovo podudara sa lijevom graničnom krivuljom pa se često u toplinskom dijagramu takav i prikazuje.



Slika 8 Termodinamički proces s pregrijavanjem suhozasićene pare, pothlađivanjem kondenzata te izentropskom kompresijom propana kao radne tvari

Jedinična toplina koja se radnoj tvari odvodi na slici 8 odgovara razlici entalpija stanja 2 i 4. Jedinična toplina koja se dovodi radnoj tvari odgovara razlici entalpija stanja 1 i 5. Kompresor vrši kompresiju radne tvari, od stanja 1 do 2 ako je kompresija izentropska pri čemu jedinični rad također odgovara razlici entalpija. Pothlađivanje vrele kapljevine pri stalnom tlaku je proces od stanja 3' do stanja 4. U nepovratnom procesu prigušivanja od 4 do 5 nema nikakve izmjene rada odnosno korisne topline pa za taj proces vrijedi $h_4 = h_5$. Toplinski tok kondenzacije (\dot{Q}_c) dobiva se iz izraza (5):

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_4 - h_2) \quad (5)$$

a toplinski tok u isparivaču iz (6):

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (6)$$

Snaga kompresora potrebna za kompresiju radne tvari sa tlaka u isparivaču na tlak u kondenzatoru definirana je sa (7):

$$P = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

U termodinamici su dogovoreni predznaci topline i rada kojih se je potrebno pridržavati. Predznak toplinske dužnosti kondenzacije radne tvari je negativan jer se ta toplina odvodi od radne tvari. Toplinska dužnost isparavanja, kao i snaga kompresora imaju pozitivan predznak. Za kružne procese vrijedi da je ukupno izmijenjena toplina jednaka ukupno izmijenjenom radu, što se za slučaj dizalice topline može napisati kao (8):

$$|\dot{Q}_c| - \dot{Q}_e = P \quad (8)$$

Faktor grijanja dizalice topline (koeficijent dizalice topline, COP=coefficient of performance) dan je izrazom (9):

$$\varepsilon_{DT} = |\dot{Q}_c|/P \quad (9)$$

Faktor grijanja dizalice topline ovisi o temperaturnom režimu rada dizalice topline, o stupnju iskorištenja kompresora, kao i o primijenjenoj radnoj tvari. Isplativost dizalica topline očituje se u tome da za svaki uloženi kWh električne energije potrebne za pogon kompresora, iznos dobivene toplinske energije uvijek iznosi više od 1 kWh, odnosno često taj iznos bude između 2 i 5 kWh [9]. Nedostatak dizalica topline odnosi se na vrlo velike investicijske troškove. Ekonomičnost njihove primjene ogleda se u dugoročnom korištenju.

2.6.2 Primjena dizalica topline u kemijskoj procesnoj industriji

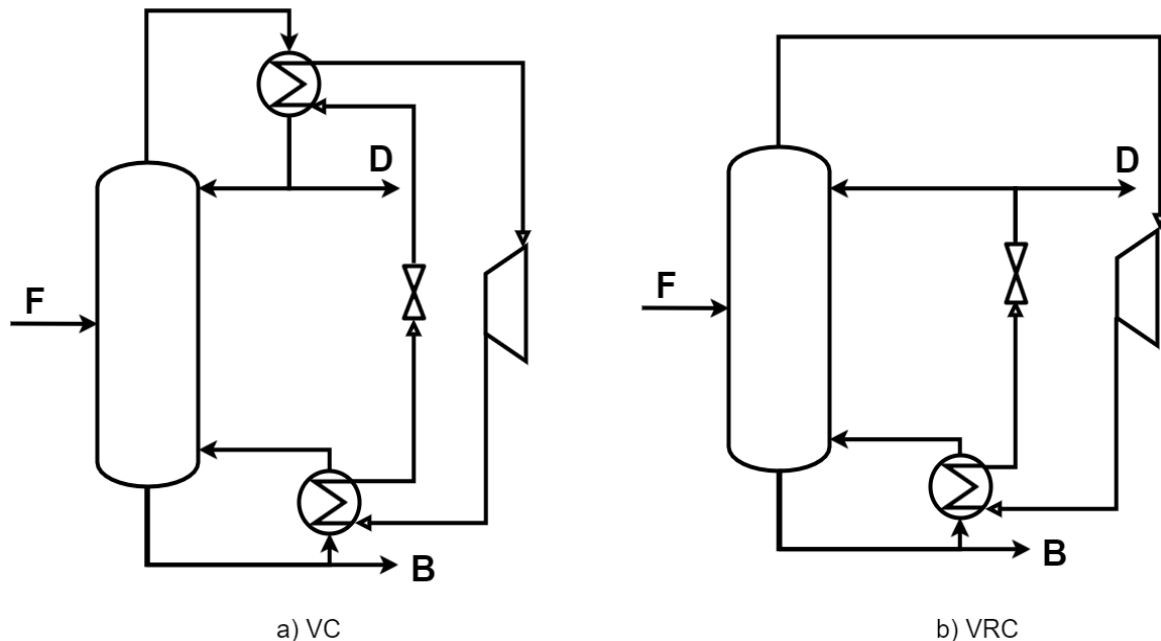
Dizalice topline se koriste u kemijskoj industriji za iskorištenje otpadne topline na višim temperaturama, hlađenje procesnih struja, ili u radu CHP (*combined heat and power*) jedinica. Značajne primjene dizalica topline u kemijskoj industriji ogledaju se u ovim operacijama:

- sušenje: dizalica topline snabdijeva toplinom sušnicu/sušionik te ujedno odvlažuje zrak nakon izlaska iz sušnice
- zagrijavanje procesnih struja: najčešće primjenjivano u prehrambenoj ili farmaceutskoj industriji za potrebe predgrijavanja procesnih struja, ili u svrhu pripreme tople vode za čišćenje procesnih jedinica i njezinih dijelova
- pasterizacija: dizalice topline moraju osigurati dovoljno visoku temperaturu pri kojima se uspješno uništavaju mikroorganizmi čime se produljuje vijek trajanja hrane
- destilacija: najčešći separacijski postupak, zahtjeva ogromne količine topline (preko 40 % ukupne potrošnje toplinske energije u kemijskim postrojenjima). Primjene dizalica topline u destilacijskim kolonama vrlo su raznolike i postoji nekoliko mogućnosti njihovih primjena u destilacijskoj koloni. [11]

U osnovi, dizalice topline pokazuju niži faktor grijanja (niže iskorištenje) kada se koriste za postizanje viših temperatura, a ujedno su temperaturno ograničene svojstvima radnih tvari (kritičnom temperaturom) [12]. Stoga je izbor radne tvari, kao i svrha korištenja dizalica topline osjetljiv postupak u čemu procesni simulatori uvelike pomažu kod projektiranja.

2.6.3 Dizalice topline u destilacijskim procesima

S obzirom na podjelu načina rada dizalica topline postoji nekoliko načina njihove primjene u proces destilacije. Opisani su neki oblici primjena, kao i njihove značajke. Slika 9 prikazuje dva moguća načina primjene parno kompresijske dizalice topline u destilacijsku kolonu [13]:



Slika 9 Primjena parno kompresijskih dizalica topline u proces destilacije

VC (vapour compression) predstavlja klasičan način primjene dizalice topline u destilacijsku kolonu koji je u prisutan u mnogim industrijskim primjenama [14], [15]. U dizalici topline koristi se vanjska radna tvar koja služi za prijenos topline. Kondenzator destilacijske kolone radi kao isparivač radne tvari. Nakon izmjene topline, radna tvar se komprimira pri čemu joj se podižu tlak i temperatura. Potom ulazi u izmjenjivač topline u kojem predaje toplinu donjem produktu (isparivač destilacijske kolone). Zatim slijedi prigušivanje radne tvari do tlaka isparavanja i cijeli se ciklus ponavlja. Pošto se izmjenjivači topline, kao i kompresor te ekspanzijski ventil nalaze izvan destilacijske kolone, nisu nužne znatne modifikacije samog procesa. Ovakav oblik primjene dizalice topline pokazao se prikladan prilikom separacije korozivnih, kao i vrlo onečišćenih smjesa.

VRC (vapour recompression column) je vrhunska tehnologija u industrijskim postrojenjima za destilaciju binarnih smjesa čije komponente imaju vrlo bliska vrelišta [16]. Ovakav način rada ne zahtjeva upotrebu izmjenjivača topline (kondenzatora) na izlazu iz vrha

destilacijske kolone. Gornji produkt komprimira se te s povišenom temperaturom ulazi u isparivač donjeg produkta gdje predaje toplinu. Potom se prigušuje na tlak kolone i proces se ponavlja. Primjena VRC postupka u razdvajanju azeotropne smjese metanol-aceton kao alternativna zamjena postupku ekstraktivne destilacije opisana je u članku [17]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da VRC tehnologija ima nešto višu efikasnost i niže investicijske troškove u odnosu na VC [18].

Treći oblik primjene dizalice topline u proces destilacije je TVR (thermal vapour recompression) [11]. Osniva se na VRC tehnologiji, a razlika je u tome što se umjesto kompresora upotrebljava ejektor pare. Prilikom e젝cije pare u cijev promjenjivog promjera dolazi do Venturijevog efekta čime raste tlak. Nedostatak zamjene kompresora e젝torom očituje se u relativno niskoj učinkovitosti e젝tora prilikom povećanja tlaka. Uz to, mala odstupanja od radne točke u radu e젝tora mogu izazvati značajne promjene u potrošnji pare, kao i ukupnu ekonomsku isplativost. Uz navedene mogućnosti primjene parno kompresijskih dizalica topline navedeni su još neki različiti načini [11]. Nisu detaljno objašnjeni pošto se ne razmatraju u pisanom radu:

- HIDiC (heat-integrated distillation column)-toplinski integrirana destilacijska kolona
- TCHP (transcritical heat pump)-transkrićna dizalica topline
- AHP (absorption heat pump)-apsorpcijska dizalica topline
- HT (heat transformers)-transformatori topline
- CRHP (compression-resorption heat pump)-hibridna dizalica topline

3 MATERIJALI I METODE

Svrha rada je procijeniti ukupne troškove obićne destilacijske kolone, kao i destilacijske kolone u koju su primjenjene dizalice topline da bi mogli zaključiti je li njihova upotreba isplativa. Također procjenjuje se vrijeme potrebno da investicija bude ekonomski opravdana. U ovom slučaju uspoređuju se ukupni troškovi konvencionalne destilacijske kolone, destilacijske kolone s rekompresijom vršnih para (VRC) te destilacijske kolone s vanjskom radnom tvari (VC). Optimira se rad destilacijske kolone uzevši u obzir refluksni omjer i broj plitica kolone da se dobije minimum pogonskih i investicijskih troškova. U obzir se također uzima i radni tlak kolone jer utjeće na pogonske troškove.

3.1 Materijali

Sastav i stanje pojne struje korištene u proraćunu definiran je tablicom 1.

Tablica 1 Sastav i karakteristike pojne smjese

	Molni udio
Propen	0,5
Propan	0,5
Zahtjevana čistoća propena	0,998
Zahtjevana čistoća propana	0,998
Protok, kg/h	3500
Temperatura, °C	15
Tlak, bar	25

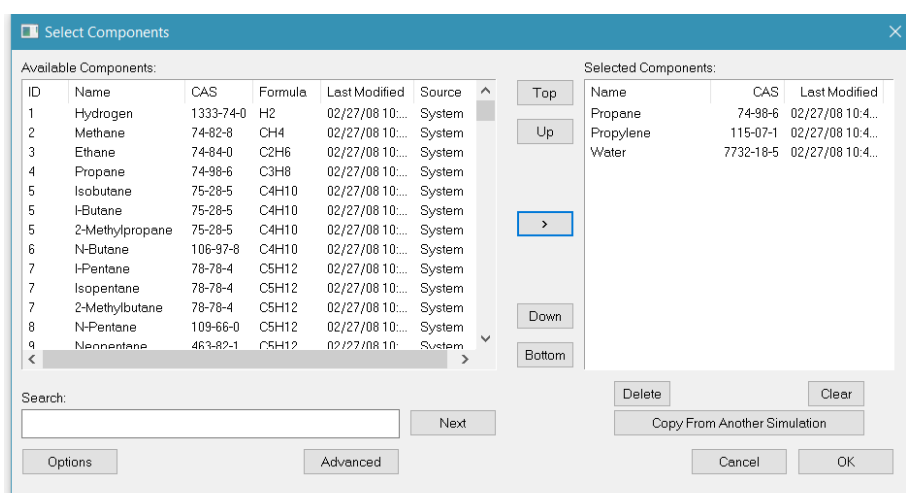
Proračun je napravljen u CHEMCAD-u, dok je obrada podataka napravljena u Microsoft Excelu.

3.2 Metode

Za modeliranje i proračun ukupnih troškova različitih izvedbi destilacijskih kolona korišten je procesni simulator *CHEMCAD*.

3.2.1 Simulacija destilacijske kolone

Prvi korak je odabir komponenti koje se koriste u proračunu (slika 10). Uz komponente koje se nalaze u pojnoj smjesi potrebno je odabrati i energent. U ovom slučaju odabere se propan i propen kao komponente u pojnoj smjesi te voda kao energent (rashladna voda i pregrijana para).

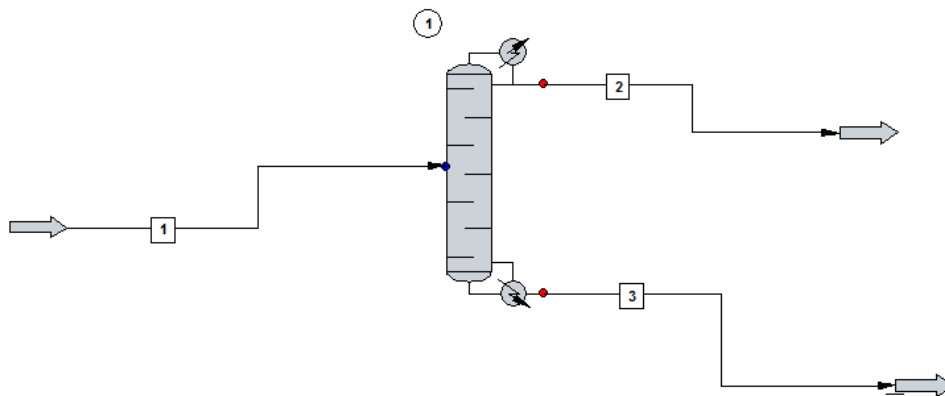


Slika 10 Prikaz izbornika za odabir komponenti

Nakon odabira komponenti odabire se prikladna jednađba stanja. U ovom slučaju zadana SRK jednađba stanja odgovara zbog toga što ona daje najbolje rezultate za velik broj ugljikovodika.

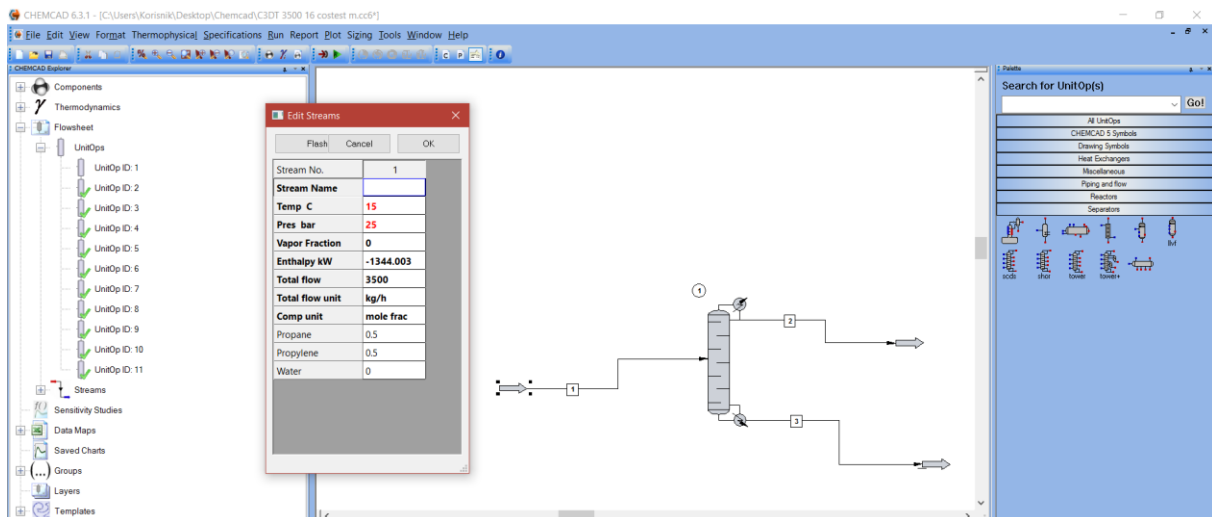
3.2.2 Približni model destilacijske kolone

Nakon odabira komponenti u grafičkom sučelju napravljen je približni model destilacijske kolone, tzv. *shortcut* model, na način prikazan na slici 11.



Slika 11 Prikaz sheme *Shortcut* modela destilacijske kolone

Slijedi ddefiniranje sastava i stanja pojne smjese na način prikazan na slici 12.



Slika 12 Definiranje pojne smjese

Nakon toga definiraju se parametri i nezavisne varijable modela: radni tlak kondenzatora, pad tlaka, iscrpak lakše i teže komponente u destilatu te refluksni omjer (slika 13). Vrijednost

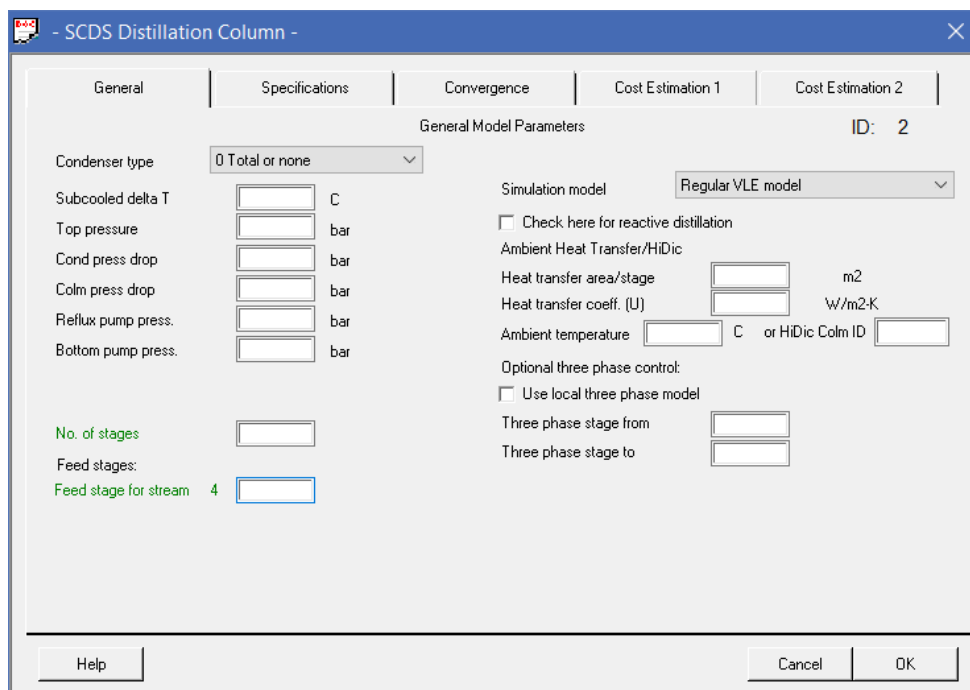
refluksni omjer optimira se tako da se postigne minimum pogonskih i investicijskih troškova (veći R/R_{\min} daje manji broj teorijskih stupnjeva, ali su veći pogonski troškovi).

The screenshot shows the 'Shortcut Column (SHOR)' dialog box. The title bar reads '- Shortcut Column (SHOR) -' and the ID is 12. The 'Select mode:' dropdown is set to '3 Design: FUG with Kirkbride feed tray location'. The 'Select condenser type:' dropdown is set to '0 Total'. The 'Column pressure' and 'Column pressure drop' fields are empty, with 'bar' units. The 'Number of stages' field is empty. The 'Reflux ratio' and 'R/Rmin' fields are empty. The 'Case Study' section has 'Number of points', 'Lower bound R/Rmin', and 'Upper bound R/Rmin' fields, all empty. The 'Key Component Specifications' section has 'Light key component' and 'Heavy key component' dropdowns set to '<None>', and 'Light key split' and 'Heavy key split' input fields. The 'Calculated Results' section has 'Condenser duty', 'Reboiler duty', 'Minimum stages', and 'Feed stage' input fields, and 'Reflux ratio, minimum' and 'Reflux ratio, calculated' input fields. The 'Help', 'Cancel', and 'OK' buttons are at the bottom.

Slika 13 Definiranje *Shortcut* modela

3.2.3 SCDS model destilacijske kolone

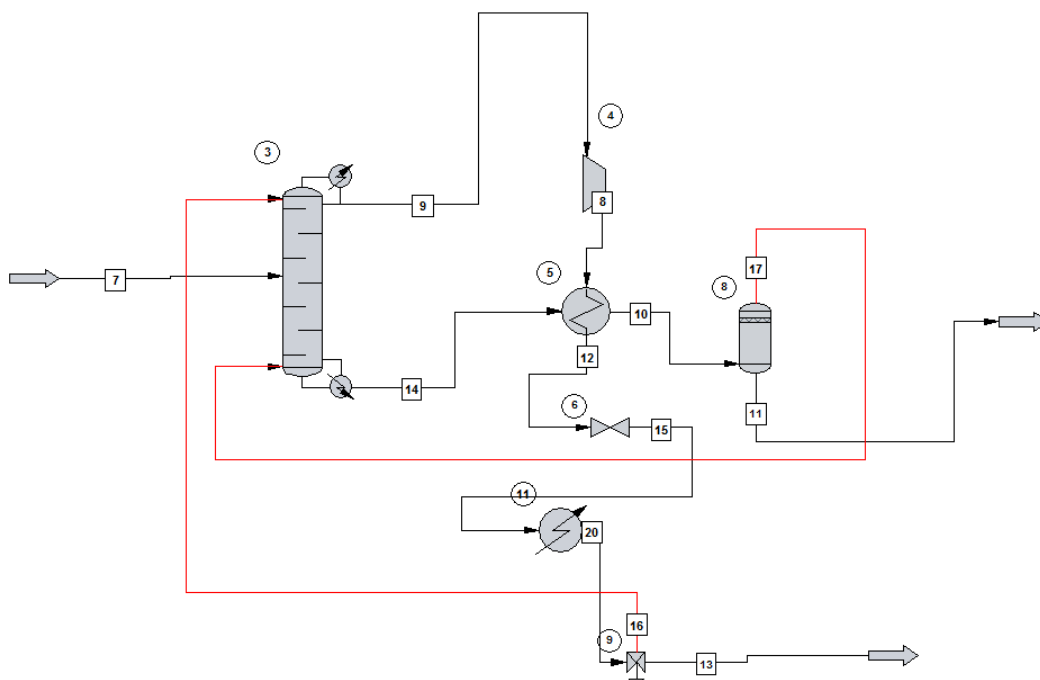
Rezultati *Shortcut* modela (broj ravnotežnih stupnjeva i položaj pojnog stupanja) koriste se za inicijalizaciju *SCDS* modela destilacijske kolone. Osim toga, potrebno je definirati vrstu kondenzatora, specifikacije isparivača i kondenzatora pomoću zadanog iscrpka na kartici specifikacije (slika 14).



Slika 14 Definiranje *SCDS* modela destilacijske kolone

3.2.4 *SCDS* model destilacijske kolone s dizalicom topline uz rekompresiju vršnih para (VRC)

Model VRC dizalice topline prikazan je na slici 15.



Slika 15 Prikaz *SCDS* modela destilacijske kolone VRC

U ovom slučaju, umjesto isparivača koji koristi pregrijanu vodenu paru kao ogrjevno sredstvo, koristi se proizvod vrha kojem se podiže tlak u kompresoru (4) da se omogući prijenos topline s proizvoda vrha na proizvod dna te ispario točno određen udio proizvoda dna. Toplinska dužnost ovog izmjenjivača topline (5) jednaka je toplinskoj dužnosti isparivača u SCDS modelu destilacijske kolone. Parna faza dobivena isparavanjem dijela proizvoda dna se zatim vraća na zadnji stupanj SCDS modela, a kapljevita faza predstavlja konačni proizvod dna. Struja proizvoda vrha se zatim prigušuje na tlak kolone te se u potpunosti ukapljuje u izmjenjivaču topline (16) i izdvaja se konačni proizvod vrha dok se ostatak vraća na prvi teorijski stupanj SCDS modela destilacijske kolone (refluks). U ovom slučaju SCDS model je drugačije definiran (slika 16), jer nisu prisutni kondenzator i isparivač, a postoje dvije dodatne pojne struje (struje 16 i 17). Te su struje definirane stanjem drugog i prethodnjeg stupnja SCDS modela destilacijske kolone. Struja 16 ulazi na prvi teorijski stupanj, dok struja 17 ulazi na posljednji teorijski stupanj. Ostatak SCDS modela definira se kao u prethodnom slučaju.

The screenshot shows the 'SCDS Distillation Column' configuration window. The 'General' tab is selected, displaying 'General Model Parameters' for ID: 3. The interface includes several input fields and dropdown menus for configuring the distillation column. Key parameters include:

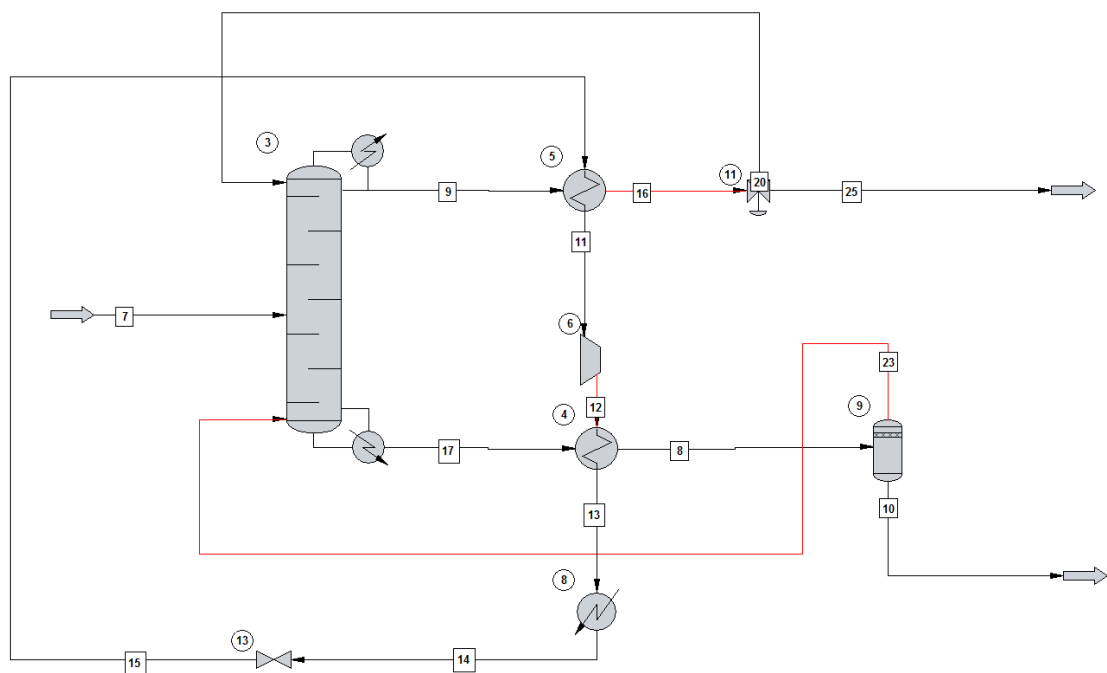
- Condenser type:** 0 Total or none
- Simulation model:** Regular VLE model
- Feed stages:**
 - Feed stage for stream 16: []
 - Feed stage for stream 7: []
 - Feed stage for stream 17: []
- Pressure and Temperature Settings:** Subcooled delta T, Top pressure, Cond press drop, Colm press drop, Reflux pump press., Bottom pump press., Ambient temperature.
- Heat Transfer Settings:** Heat transfer area/stage, Heat transfer coeff. (U), Ambient Heat Transfer/HiDic.
- Optional three phase control:** Use local three phase model, Three phase stage from, Three phase stage to.

Buttons for 'Help', 'Cancel', and 'OK' are located at the bottom of the window.

Slika 16 Definiranje SCDS modela destilacijske kolone VRC

3.2.5 SCDS model destilacijske kolone s primjenom dizalice topline koja koristi vanjsku radnu tvar (VC)

SCDS model destilacijske kolone s VC dizalicom topline, prikazan je na slici 17. Model SCDS kolone u ovom slučaju je definiran kao i u prethodnom. Kod ove izvedbe koristi se vanjska radna tvar (propan) koji se podiže na viši tlak u kompresoru (6). Propan na povišenom tlaku i temperaturi koristi se kao ogrjevni medij u isparivaču (4) gdje predaje toplinu dijelu donjeg produkta, a pritom se djelomično ukapljuje. Donji produkt ulazi u *flash* posudu (oprema 9) gdje se odvaja kapljevita faza koja izlazi kao konačan produkt dna, dok se plinovita faza vraća kao na posljednji teorijski stupanj. Dodatni izmjenjivač topline (8) služi za potpuno ukapljivanje radne tvari. Na prigušnom ventilu (13) radna tvar se prigušuje u vodi u kondenzator (5). U tom izmjenjivaču radna tvar isparava na račun primljene topline od produkta vrha koji se ukapljuje. Dio produkta vrha izdvaja se kao konačni produkt vrha, a ostatak se vraća kao refluks na prvi teorijski stupanj.



Slika 17 Prikaz SCDS modela destilacijske kolone VC

3.2.6 Dimenzioniranje

Dimenzioniranje opreme je temelj za procjenu investicijskih troškova, a provodi se nakon što simulacija konvergira s definiranim tolerancijama i zadovoljavajućom točnošću. Dimenzioniranje se provodi za destilacijsku kolonu i za izmjenjivače topline. Na slici 18 može se vidjeti jedan od koraka dimenzioniranja destilacijske kolone sa sitastim pliticama.

Sieve Tray

Starting Stage: 1
Ending Stage: 171

Tray diameter: [] m
Tray spacing: 0.6096 m
No. of passes: 1
Hole A /Tot A: 0.1
Weir height: 0.0508 m
Flood correlation: Fair

Downcomer
Clearance: 0.04445 m
Optional flow area: [] m²
Side width: [] m
Center width: [] m
Off-center width: [] m
Off-side width: [] m
Downcomr A/ Tot A: 0.12

System factor: 1
Flood percent: 80
Hole diameter: 0.00635 m
Hole pattern: Triangular pitch
Hole pitch: 0.015875 m
Tray thickness: 0.0019812 m

Splash Baffle
Efficiency for Fractionator
Light key: <None>
Heavy key: <None>
Efficiency for Absorbers
Solute: []

Thickness specifications
Design pressure: [] bar
Joint efficiency: 0.85
Allowable stress: 944.582 bar
Corrosion allow.: 0.00079375 m

Buttons: Help, Cancel, OK

Slika 18 Dimenzioniranje plitica SCDS modela destilacijske kolone VRC

Na slici 19 može se vidjeti jedan od koraka dimenzioniranja izmjenjivača topline.

General Specifications

General Information | Modeling Methods

Calculation mode: Design
TEMA class/ standard: TEMA R
Orientation: Horizontal
TEMA front end head: A - Channel & Removable Cover
TEMA shell type: E - One Pass
TEMA rear end head: L - Fixed Tubesheet (A head)

Stream name: []
Process type: Forced Evaporation
Fouling factor: 0.000176109 m²-K/W
Optional h Coeff.: [] W/m²-K

Buttons: Help, Cancel, OK

Slika 19 Dimenzioniranje izmjenjivača topline

3.2.7 Procjena troškova

U obzir su uzeti investicijski i pogonski troškovi opreme. Investicijski troškovi za kolonu izračunati su prema Douglasu [18], dok su investicijski troškovi ostatka opreme uzeti iz *CHEMCAD*-a u izborniku procjena koštanja. Važno je napomenuti da se očekuju niži pogonski troškovi kod kolona sa primjenom dizalica topline, dok su investicijski troškovi u tom slučaju nešto veći zbog dodatne opreme. Kao energenti za procjenu koštanja koriste se:

- trofazna električna struja 380 V, frekvencije 50 Hz uz cijenu od 0,45 kn/kWh
- vodena para na temperaturi od 260 °C i tlaku od 4 bara cijene 172 kn/t
- rashladna voda na tlaku od 4,5 bara i temperaturi od 25 °C, uz dozvoljeno zagrijavanje za 10 °C čija je cijena 0,2 kn/m³

Trošak *SCDS* modela destilacijske kolone računa se kao zbroj koštanja plašta i plitica destilacijske kolone umnožen za faktor ugradnje koji iznosi 3. Faktor ugradnje odnosi se na sve moguće troškove prilikom ugradnje destilacijske kolone (transport, cjevovodi, armatura, itd.). Ukupni investicijski trošak (CAPEX) dobije se zbrajanjem troškova destilacijske kolone i izmjenjivača topline (kondenzator i isparivač).

Ukupni investicijski trošak *SCDS* modela destilacijske kolone s primjenom dizalice topline VRC i VC računa se kao zbroj troškova destilacijske kolone, izmjenjivača topline i *flash* posude.

Godišnji pogonski troškovi (OPEX) dobiju se kao umnožak godišnje potrošnje energenata te njihove cijene izražene u američkim dolarima prema srednjem tečaju za USD koji je dana 11.04.2017. iznosio 6,999 HRK.

Ukupni godišnji troškovi (TAC) računaju se kao zbroj ukupnih investicijskih troškova podijeljenih sa vremenskim periodom rada postrojena i godišnjih pogonskih troškova. U razmatranje je uzet vremenski period od 10 godina da se ispita isplativost primjene dizalice topline u destilacijsku kolonu.

4 REZULTATI

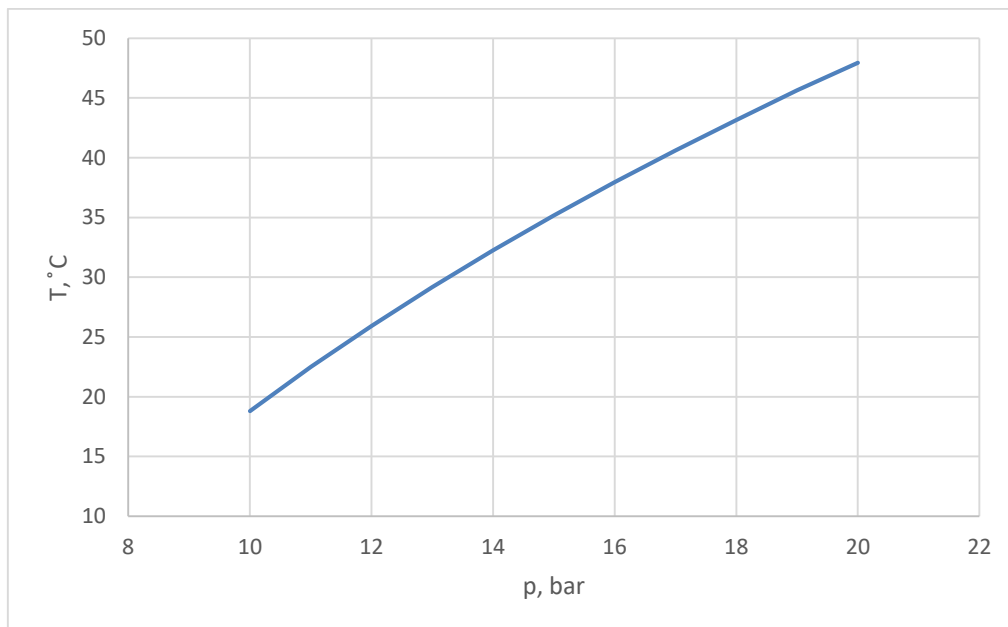
4.1 Rezultati *Shortcut* modela

Tablica 2 prikazuje broj stupnjeva i toplinsku dužnost isparivača za odabrane tlakove

Tablica 2 Broj stupnjeva i toplinska dužnost isparivača za odabrane tlakove

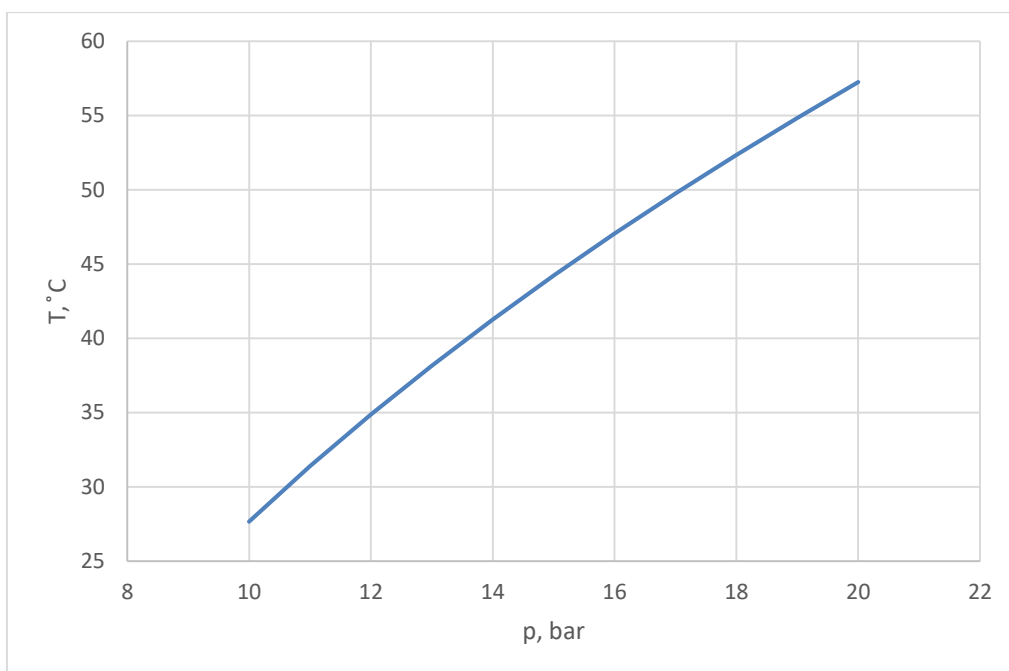
Tlak, bar	Broj stupnjeva	Toplinska dužnost isparivača, kW
10	143	29012
11	147	29411,1
12	152	29790,2
13	157	30152,9
14	161	30502,1
15	166	30840,3
16	171	31169,4
17	176	31491,3
18	181	31807,4
19	187	32119,2
20	192	32428,4

Slika 21 prikazuje ovisnost temperature kondenzacije o tlaku kolone



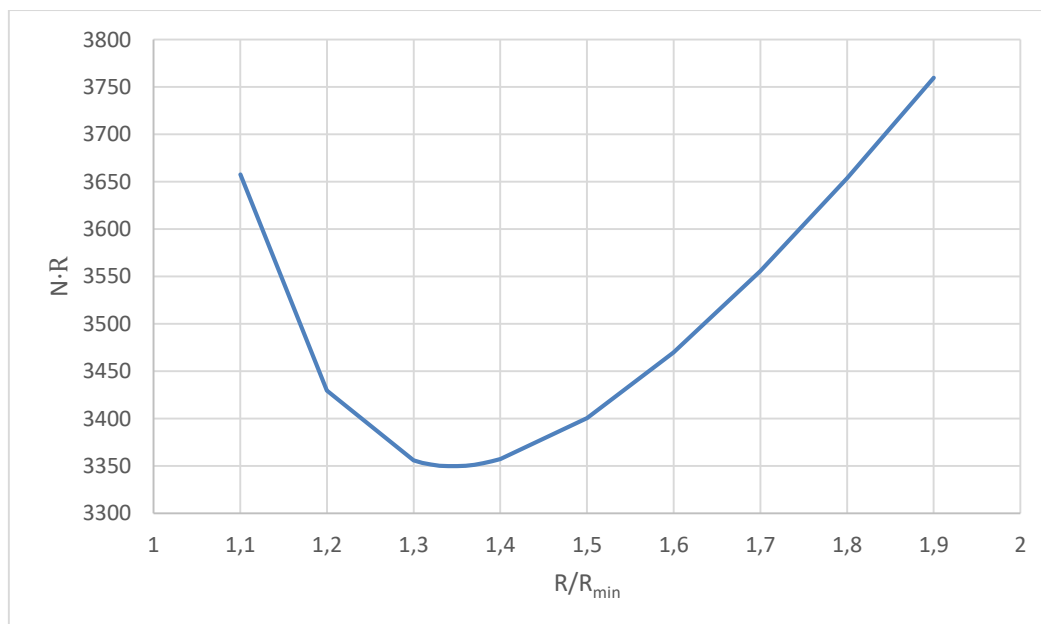
Slika 20 Ovisnost temperature kondenzacije o tlaku destilacijske kolone

Slika 21 prikazuje ovisnost temperature isparavanja o tlaku kolone



Slika 21 Ovisnost temperature isparavanja o tlaku destilacijske kolone

Slika 22 prikazuje ovisnost umnoška $N \cdot R$ o R/R_{min}



Slika 22 Prikaz ovisnosti umnoška $N \cdot R$ o R/R_{min}

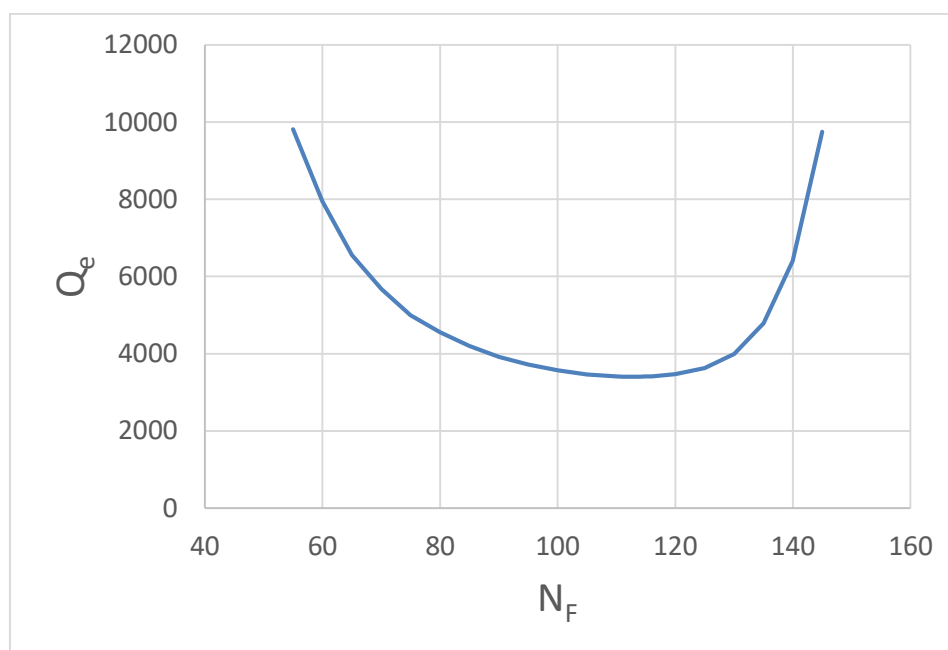
Tablica 3 prikazuje rezultate *Shortcut* modela destilacijske kolone

Tablica 3 Rezultati *Shortcut* modela za minimalni ukupni trošak

R/R_{\min}	1,35
Broj teorijskih stupnjeva	171
Minimalni broj teorijskih stupnjeva	99
Teorijski stupanj pojenja	86
Toplinska dužnost kondenzatora, kW	30393,5
Toplinska dužnost isparivača, kW	31169,4
Tlak kolone, bar	16
Minimalni refluksni omjer	14,5171
Izračunati refluksni omjer	19,5981

4.2 Rezultati *SCDS* modela destilacijske kolone

Slika 23 prikazuje ovisnost teorijskog stupnja pojenja o toplinskoj dužnosti isparivača



Slika 23 Ovisnost teorijskog stupnja pojenja o toplinskoj dužnosti isparivača

Tablica 4 prikazuje rezultate *SCDS* modela destilacijske kolone

Tablica 4 Rezultati *SCDS* modela destilacijske kolone

Teorijski stupanj pojenja	111
Broj teorijskih stupnjeva	171
Produkt dna, mol.% propana	0,998
Produkt vrha, mol.% propena	0,998
Pad tlaka kolone, bar	0,3
Temperatura proizvoda vrha, °C	37,95
Temperatura proizvoda dna, °C	47,06
Tlak kolone na vrhu, bar	16
Toplinska dužnost isparivača, kW	3402,1
Toplinska dužnost kondenzatora, kW	3324,41

Tablica 5 prikazuje neka svojstva izlaznih struja dobivenih *SCDS* modelom destilacijske

Tablica 5 Svojstva izlaznih struja u *SCDS* modelu destilacijske kolone

	Produkt vrha	Produkt dna
Temperatura, °C	37,95	47,06
Tlak	16	16,3
Molarni protok, kmol h ⁻¹	40,61	40,61
Maseni protok, kg h ⁻¹	1709,25	1790,75
Molarni udio komponenata		
Propan	0,0020	0,9980
Propen	0,9980	0,0020

Tablica 6 prikazuje rezultate dimenzioniranja kolone

Tablica 6 Rezultati dimenzioniranja SCDS modela destilacijske kolone

Destilacijska kolona	
Promjer kolone, m	1,68; 1,83
Plitice	sitaste
Pojni stupanj	111
Broj sekcija	1
Razmak između plitica, m	0,6096
Broj teorijskih stupnjeva	171
Djelotvornost plitica	0,9
Broj plitica	188
Visina kolone, m	120
Kondenzator	
$U \cdot A$, kW K ⁻¹	490,30
Protok rashladne vode, m ³ h ⁻¹	286,58
Isparivač	
$U \cdot A$, kW K ⁻¹	35,59
Protok ogrjevnne pare, t h ⁻¹	5,13

Tablica 7 prikazuje procjene investicijskih i pogonskih troškova te ukupni godišnji trošak.

Tablica 7 Troškovi SCDS modela destilacijske kolone

Investicijski troškovi		
Oprema		Cijena, \$
Plast destilacijske kolone		1.384.146
Plitice destilacijske kolone		997.667
Trošak destilacijske kolone		7.145.440
Trošak kondenzatora		234.366
Trošak isparivača		38.661
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)		7.418.467
Pogonski troškovi		
Energent	Protok	Cijena, \$
Rashladna voda	2510483 m ³ god ⁻¹	71.738
Ogrjevna para	44939 t god ⁻¹	1.103.775
Električna energija	0 kWh	0
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)		1.175.514
Godišnji troškovi u periodu od 10 godina (TAC)		1.917.361

4.3 Rezultati SCDS modela destilacijske kolone VRC

Tablica 8 prikazuje rezultate SCDS modela destilacijske kolone s primjenom dizalice topline VRC

Tablica 8 Rezultati SCDS modela destilacijske kolone VRC

Teorijski stupanj ulaska gornjeg refluksa	1
Teorijski stupanj pojenja	111
Teorijski stupanj ulaska donjeg refluksa	171
Broj teorijskih stupnjeva	171
Pad tlaka kolone, bar	0,3
Temperatura proizvoda vrha, °C	37,95
Temperatura proizvoda dna, °C	47,06
Tlak kolone na vrhu, bar	16

Tablica 9 prikazuje neka svojstva izlaznih struja dobivenih *SCDS* modelom destilacijske kolone sa primjenom dizalice topline VRC

Tablica 9 Svojstva izlaznih struja u *SCDS* modelu destilacijske kolone VRC

	Produkt vrha	Produkt dna
Temperatura, °C	37,95	47,06
Tlak	16	16,3
Molarni protok, kmol h ⁻¹	40,61	40,61
Maseni protok, kg h ⁻¹	1709,23	1790,55
Molarni udio komponenata		
Propan	0,0019	0,9981
Propen	0,9981	0,0019

Tablica 10 prikazuje rezultate dimenzioniranja kolone VRC koristeći *SCDS* model

Tablica 10 Rezultati dimenzioniranja *SCDS* modela destilacijske kolone VRC

Destilacijska kolona	
Promjer kolone, m	1,68; 1,83
Plitice	sitaste
Broj sekcija	1
Razmak između plitica, m	0,6096
Broj teorijskih stupnjeva	171
Djelotvornost plitica	0,9
Broj plitica	190
Visina kolone, m	120
Izmjenjivač topline (oprema 5)	
U·A, kW K ⁻¹	107,43
Izmjenjivač topline (oprema 11)	
U·A, kW K ⁻¹	70,56
Protok rashladne vode, m ³ h ⁻¹	41,24
Kompresor	
Snaga kompresije, kW	555,87

Tablica 11 prikazuje procjene investicijskih i pogonskih troškova te ukupni godišnji trošak.

Tablica 11 Troškovi SCDS modela destilacijske kolone VRC

Investicijski troškovi		
Oprema	Cijena, \$	
Plast destilacijske kolone	1.384.146	
Plitice destilacijske kolone	997.667	
Trošak destilacijske kolone	7.145.440	
Trošak izmjenjivača topline (oprema 5)	286.165	
Trošak izmjenjivača topline (oprema 11)	76.773	
Trošak kompresora	2.120.970	
Flash posuda	54.771	
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	9.684.119	
Pogonski troškovi		
Energent	Protok	Cijena, \$
Rashladna voda	361290 m ³ god ⁻¹	10.324
Ogrjevna para	0 t god ⁻¹	0
Električna energija	4869447 kWh	313.080
Ukupni pogonski troškovi (OPEX)	323.404	
Godišnji troškovi u periodu od 10 godina (TAC)	1.291.817	

4.4 Rezultati SCDS modela destilacijske kolone VC

Tablica 12 prikazuje rezultate SCDS modela destilacijske kolone s primjenom dizalice topline VC

Tablica 12 Rezultati SCDS modela destilacijske kolone VC

Teorijski stupanj ulaska gornjeg refluksa	1
Teorijski stupanj pojenja	111
Teorijski stupanj ulaska donjeg refluksa	171
Broj teorijskih stupnjeva	171
Pad tlaka kolone, bar	0,3
Temperatura proizvoda vrha, °C	37,62
Temperatura proizvoda dna, °C	47,06
Tlak kolone na vrhu, bar	16

Tablica 13 prikazuje neka svojstva izlaznih struja dobivenih *SCDS* modelom destilacijske kolone s primjenom dizalice topline VC

Tablica 13 Svojstva izlaznih struja u *SCDS* modelu destilacijske kolone VC

	Produkt vrha	Produkt dna
Temperatura, °C	37,62	47,06
Tlak	16	16,3
Molarni protok, kmol h ⁻¹	40,61	40,61
Maseni protok, kg h ⁻¹	1709,23	1790,86
Molarni udio komponenata		
Propan	0,0018	0,9980
Propen	0,9982	0,0020

Tablica 14 prikazuje rezultate dimenzioniranja kolone VC koristeći *SCDS* model

Tablica 14 Rezultati dimenzioniranja destilacijske kolone VC koristeći *SCDS* model

Destilacijska kolona	
Promjer kolone, m	1,68; 1,83
Plitice	sitaste
Broj sekcija	1
Razmak između plitica, m	0,6096
Broj teorijskih stupnjeva	171
Djelotvornost plitica	0,9
Broj plitica	190
Visina kolone, m	120
Izmjenjivač topline (oprema 5)	
U·A, kW K ⁻¹	128,53
Izmjenjivač topline (oprema 4)	
U·A, kW K ⁻¹	234,87
Izmjenjivač topline (oprema 8)	
U·A, kW K ⁻¹	19,32
Protok rashladne vode, m ³ h ⁻¹	51,50
Kompresor	
Snaga kompresije, kW	674,86

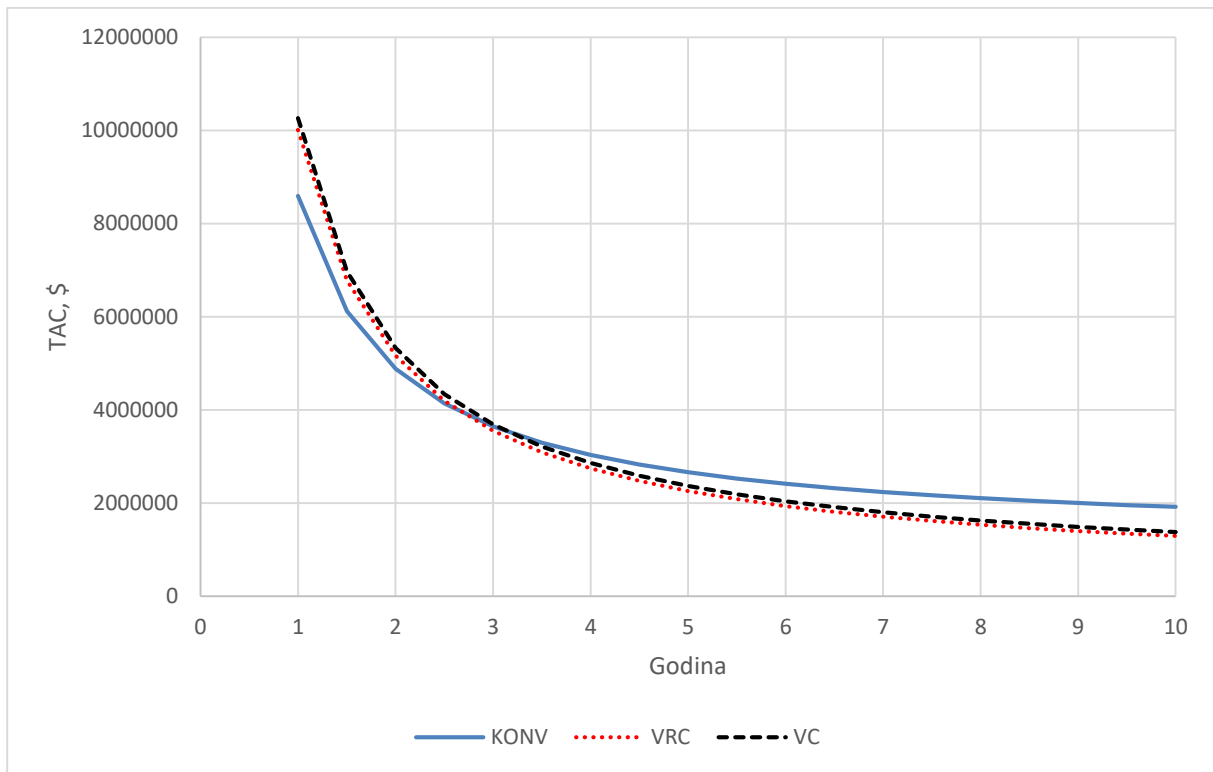
Tablica 15 prikazuje procjene investicijskih i pogonskih troškova te ukupni godišnji trošak.

Tablica 15 Troškovi SCDS modela destilacijske kolone VC

Investicijski troškovi		
Oprema	Cijena, \$	
Plast destilacijske kolone	1.384.146	
Plitice destilacijske kolone	997.667	
Trošak destilacijske kolone	7.145.440	
Trošak izmjenjivača topline (oprema 5)	121.554	
Trošak izmjenjivača topline (oprema 4)	143.594	
Trošak izmjenjivača topline (oprema 8)	13.555	
Trošak kompresora	2.396.100	
Flash posuda	51.009	
Ukupni investicijski troškovi (CAPEX)	9.871.253	
Pogonski troškovi		
Pogonski troškovi	Veličina	Cijena, \$
Rashladna voda	451097 m ³ god ⁻¹	12.890
Ogrjevna para	0 t god ⁻¹	0
Električna struja	5911756 kWh	380.095
Ukupni operacijski troškovi (OPEX)	392.986	
Godišnji troškovi u periodu od 10 godina (TAC)	1.380.111	

4.5 Procjena isplativosti investicije

Slika 24 prikazuje usporedbu ukupnih godišnjih troškova, izračunatih uz period amortizacije 1-10 godina, za sva tri slučaja: konvencionalni proces (KONV), VRC i VC.



Slika 24 Usporedba ukupnih godišnjih troškova za sva tri slučaja kroz 10 godina amortizacije

5 RASPRAVA

Kako bi se projektiranju procesa destilacije pristupilo sistemski bilo je potrebno upoznati se s termodinamičkim svojstvima procesnih struja, načelom rada destilacijskih kolona. Također razmatra se primjena dizalica topline s ciljem povećanja energetske učinkovitosti separacijskih procesa u postrojenjima, ograničenje primjene procesnog simulatora kao i ekonomski aspekt rada postrojenja. U nastavku su pojašnjeni rezultati proračuna, te je napravljena usporedba između procesa bez i sa primjene dizalica topline.

5.1 Radni tlak kolone

Izbor radnog tlaka kolone utječe na izlazne temperature produkta vrha i dna, broj ravnotežnih stupnjeva separacije, a time i na visinu destilacijske kolone. Prema slici 20 pri tlaku od 16 bar temperatura vrha je viša od 35 °C što omogućava korištenje rashladne vode od 25 °C s dopuštenim zagrijanjem od 10 °C kao rashladno sredstvo u kondenzatoru. Nadalje, viši tlak u koloni rezultira većim brojem teorijskih stupnjeva separacije kao i povećanjem

toplinske dužnosti isparivača što je vidljivo u tablici 2. Previsoki radni tlak kolone bi teoretski onemogućio korištenje ogrjevnih pare kao medija za isparavanje. S obzirom na promatrani raspon tlakova (slika 21) temperatura dna kolone ne prelazi temperaturu ogrjevnih pare koja je na raspolaganju.

5.2 Odabir R/R_{min} s obzirom na minimum ukupnih troškova

Pri nižim vrijednostima R/R_{min} broj teoretskih stupnjeva separacije je veći što daje višu kolonu i u konačnici veće investicijske troškove. Pri višim vrijednostima R/R_{min} investicijski troškovi su niži, ali su operativni troškovi viši. Razlog tome je veća toplinska dužnost isparivača zbog veće količine smjese za separaciju koja se nalazi u koloni. Optimalan R/R_{min} određuje se iz minimuma krivulje ovisnosti $N \cdot R$ o R/R_{min} (slika 22). Tako dobiveni R/R_{min} iznosi 1,35 te je s tom vrijednošću proveden proračun za sve simulacije. Nakon konvergencije proračuna *Shortcut* modela za $R/R_{min}=1,35$ i $p=16$ bar dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3. Za proračun *SCDS* modela destilacijske kolone korišten je broj ravnotežnih stupnjeva iz *Shortcut* modela.

5.3 SCDS model destilacijske kolone

Za određene optimalne vrijednosti R/R_{min} , p i N iz *Shortcut* modela te definirani sastav gornjeg i donjeg produkta u *SCDS* modelu određuje se pojni stupanj za minimalnu vrijednost toplinske dužnosti isparavanja (slika 23). U tablici 4 dani su rezultati proračuna *SCDS* modela destilacijske kolone. U tablici 5 nalaze se svojstva produkta vrha i dna kolone: temperature, tlakovi i protoci.

Rezultati dimenzioniranja *SCDS* modela destilacijske kolone i izmjenjivača topline nalaze se u tablici 6. Promjer kolone se mijena s 1,68 na 1,83 metra prema dnu kolone, dok je razmak između plitica unaprijed zadan od strane procesnog simulatora. Visina kolone mora osiguravati odgovarajući broj plitica uz njihovu definiranu međusobnu udaljenost, kao i dodatni prostor za smještaj kondenzatora i isparivača. Uzimajući kao pretpostavku potrebnu visinu za smještaj isparivača od 2,7 m te kondenzatora od 2 m ukupna visina kolone iznosi 120 m. Toplinske dužnosti isparivača i kondenzatora vrlo su bliske, no zbog manje pokretačke sile procesa prijenosa topline u kondenzatoru u odnosu na isparivač umnožak potrebne površine izmjene (A) i ukupnog koeficijenta prolaza topline (U) za kondenzator iznosi $490,30 \text{ kW K}^{-1}$, a za isparivač $35,59 \text{ kW K}^{-1}$.

U tablici 7 prikazani su troškovi *SCDS* modela destilacijske kolone. Procijenjeni godišnji troškovi uz amortizaciju 10 godina iznose 1.913.860,00 \$.

5.4 SCDS model destilacijske kolone VRC

Rezultati dimenzioniranja *SCDS* modela destilacijske kolone VRC nalaze se u tablici 8. Karakteristike kolone su iste kao u *SCDS* modelu. S obzirom da se razmatra primjena VRC u već postojeću destilacijsku kolonu visina kolone se ne mijenja te ostaje 120 m. Dio produkta vrha destilacijske kolone vraća se kao pojna smjesa na prvi teorijski stupanj, a dio produkta dna destilacijske kolone vraća se kao pojna smjesa na posljednji teorijski stupanj. Dobivena čistoća donjeg i gornjeg produkta viša je od zadane te se nalazi u tablici 9.

U tablici 10 nalaze se rezultati dimenzioniranja. Kompresor komprimira struju na izlazu s vrha kolone na tlak od 50 bar. Uz pretpostavku adijabatske (izentropske) kompresije temperatura struje na izlazu iz kompresora iznosi 110,86 °C. U izmjenjivaču topline (oprema 5) ta se struja hladi čime isparava produkt dna kolone osiguravajući toplinsku dužnost isparivača *SCDS* modela destilacijske kolone. Izlazna temperatura ohlađene struje iznosi 54,5 °C te iznos umnoška $U \cdot A$ iznosi 107,43 kW K⁻¹. Ohlađena struja produkta vrha prigušuje se na prigušnom ventilu na radni tlak kolone te se u potpunosti ukapljuje u izmjenjivaču topline (oprema 11) i vraća se na vrh destilacijske kolone.

Tablica 11 prikazuje troškove *SCDS* modela destilacijske kolone VRC. Procijenjeni godišnji troškovi uz amortizaciju 10 godina iznose 1.255.437,00 \$.

5.5 SCDS model destilacijske kolone VC

Rezultati dimenzioniranja *SCDS* modela destilacijske kolone VC nalaze se u tablici 12. Karakteristike kolone su iste kao u *SCDS* modelu. S obzirom da se razmatra primjena VC u već postojeću destilacijsku kolonu visina kolone se ne mijenja te ostaje 120 m. Dio produkta vrha destilacijske kolone vraća se kao pojna smjesa na prvi teorijski stupanj, a dio produkta dna destilacijske kolone vraća se kao pojna smjesa na posljednji teorijski stupanj. Dobivena čistoća gornjeg produkta viša je od zadane te se nalazi u tablici 13.

U tablici 14 nalaze se rezultati dimenzioniranja. Vanjska radna tvar (propan protoka 52 t h⁻¹) isparava se u izmjenjivaču topline (oprema 5) i pregrijava na račun topline primljene od produkta vrha kolone. Tlak vanjske radne tvari izabran je tako da temperatura isparavanja bude dovoljno niska da omogući prijenos topline. Kako bi izbjegli eventualne kapljice na

ulazu u kompresor vanjska radna tvar pregrijava se u tom izmjenjivaču sa 19,5 °C na 26,14 °C pri tlaku od 8,332 bar. Produkt vrha destilacijske kolone ukaplji se na temperaturi od 37,62 °C. Kompresor komprimira vanjsku radnu tvar na 22 bar i 70,88 °C. Tlak vanjske radne tvari u izmjenjivaču topline (oprema 4) biran je tako da se hlađenjem i kondenzacijom radne tvari postigne temperatura viša od temperature produkta dna destilacijske kolone. Temperatura vanjske radne tvari na izlasku iz izmjenjivača topline iznosi 61,17 °C te je udio parne faze 0,1636. Kako bi se radna tvar u potpunosti kondenzirala prije nego što uđe u prigušni ventil (oprema 13) kondenzira se u dodatnom izmjenjivaču topline (oprema 8).

U tablica 15 prikazani su troškovi SCDS modela destilacijske kolone VC. Procijenjeni godišnji troškovi uz amortizaciju 10 godina iznose 1.380.111,00 \$.

6 ZAKLJUČAK

Model separacije ekvimolarne smjese propan-propen konvencionalnim procesom destilacije, VRC te VC procesom, uspješno je napravljen u procesnom simulatoru CHEMCAD. S obzirom da je separacija smjesa izomera, kao što su propen i propan, energetske vrlo intenzivna, nezavisne varijable modela sva tri slučaja optimirane su tako da daju minimum pogonskih troškova. Iako VRC i VC imaju znatno veće investicijske troškove jer koriste kompresor, ukupni godišnji troškovi su niži zbog smanjenih pogonskih troškova. Uz amortizacijski period 10 godina, uštede u odnosu na konvencionalni proces iznose 33 % za VRC, odnosno 28 % uz VC. Iako se primjenom VRC tehnologije ostvaruju 5 % manje uštede, primjena VC je i dalje atraktivna, jer se odvajanjem sustava dizalice topline od procesnog kruga očekuju manji problemi u radu.

7 ZAHVALE

Posebne zahvale idu našem mentoru doc. dr. sc. Igoru Dejanoviću na stručnoj i velikodušnoj pomoći, podršci i savjetima tijekom izrade ovoga znanstvenog rada.

Uz to, zahvaljujemo se asistentu, mag.ing.cheming. Goranu Lukaču na pruženoj pomoći tijekom izrade rada, kao i univ.bacc.chem.ing Andreji Žužić na korisnim sugestijama.

8 POPIS LITERATURE

1. Janović, Z., *Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi*, Kerschoffset, Zagreb, 2014.
2. http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/triple_ocr_21c/further_chemistry/hydrocarbons/revision/1/ (pristup: 23.04.2017.)
3. Rogošić, M., *Kemijsko-inženjerska termodinamika*, nastavni tekst, FKIT, Zagreb, 2013.
4. Sander, A., *Jedinične operacije u ekoinženjerstvu: Toplinski separacijski procesi*, interna skripta, FKIT, Zagreb, 2011.
5. Schweitzer, P. A., *Handbook of separation techniques for chemical engineers*, McGraw-Hill, New York, 1979.
6. Walas, S.M., *Costs of Individual Equipment, Chemical Process Equipment: Selection and Design*, Butterworth-Heinemann, Boston, 1990, 665-667.
7. Chemstations Inc., *CHEMCAD Version 6 – User guide*, SAD, 2007.
8. Budin, R., Mihelić Bogdanić, A., *Osnove tehničke termodinamike*, 3. izdanje, Školska knjiga Zagreb, 2012.
9. http://www.industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/ (pristup 8. travnja, 2017)
10. Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O., Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties— REFPROP*, User's Guide, Version 8.0, April, 2007
11. Kiss, A. A., Infante Ferreira, C. A., *Heat Pumps in Chemical Process Industry*, CRC Press, 2016
12. Bedoić, R., Filipan, V., *The Analysis of Heat Transfer in a Compression Heat Pump Working With Different Zeotropic and Azeotropic Mixtures*, 24th International Symposium on Heating, Refrigerating and Air Conditioning 6. travnja 2017., <https://www.fsb.unizg.hr/interklima2017/eng/home.html> (pristup 8th April, 2017)
13. Bruinsma, O.S.L., Spoelstra, S., *Heat pumps in distillation, Distillation & Absorption Conference*, 12-15 September 2010, Eindhoven, The Netherlands, www.ecn.nl/docs/library/report/2010/m10090.pdf (pristup 8. travnja, 2017)
14. Gsell, G. V., Nunez, C., Smith-Palmer, M., *Advances in Vapor Compression Technology for the Production of USP Purified Water and Water For Injection*, Pharmaceutical Engineering, Vol. 33 (3), 2013

15. <https://www.aquatechnology.net/vaporcompressiondistillers.html> (pristup 8. travnja, 2017)
16. Kiss A. A., Landaeta, S. J. F., Ferreira, C. A. I., *Towards Energy Efficient Distillation Technologies - Making The Right Choice*, Energy, Vol. 47, 2012., 531-542
17. Nhien, L. C., Kim, G., Andika R., Husnil, Y. A., Lee, M., *Application of Mechanical Vapor Recompression to Acetone – Methanol Separation*, International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 5 (3), 2014
18. Douglas, J.M., *Conceptual Design of Chemical Processes*. 1st ed. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, ed. B.J. Clark i J.W. Bradley. 1988: McGraw-Hill. 601.

9 SAŽETAK

Optimizacijom modela procesa destilacije ekvimolarne smjese propan-propen određeni su radni uvjeti koji vode do minimalne potrošnje energenata. Primjenom dizalica topline s rekompresijom vršnih para (VRC), odnosno vanjskom radnaom tvari (VC) u tako optimirani model destilacijske kolone određeni su odgovarajući investicijski i pogonski troškovi. Pri ekonomskoj analizi procesa korišteno je vrijeme amortizacije od 10 godina. Usporedbom dvaju načina primjena dizalica topline slijedi da se najveće uštede ostvaruju primjenom VRC tehnologije.

10 SUMMARY

Application of Heat Pumps to Increase Energy Efficiency of Distillation Processes

Through optimization of distillation model for separation of equimolar mixture propane-propene, operating conditions leading to minimized operating costs are determined. Capital expenses (CAPEX) and operating expenses (OPEX) were calculated for three optimized cases: conventional distillation process, VRC (vapour recompression column) and VC (vapour compression), with amortization period set to 10 years. It was determined that for the particular separation task, greatest energy savings are accomplished with VRC technology.

Key words: *distillation, heat pumps, VRC, VC, energy savings, energy efficiency*

ŽIVOTOPIS

Filip Brkić rođen je 11. Listopada 1994. Godine u Vinkovcima. U Ivankovu završava OŠ August Cesarec, a školovanje nastavlja u Vinkovcima, u gimnaziji Matije Antuna Reljkovića. Godine 2013. upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, prediplomski smjer Kemijsko inženjerstvo, koje završava 2016. obranom završnog rada na temu „Metode procjene topljivosti krutine u kapljevini“ te iste godine upisuje diplomski studij Kemijsko inženjerstvo, modul Kemijsko- procesno inženjerstvo.

Robert Bedoić rođen je 27. ožujka 1995. u Zagrebu. U Križevcima završava OŠ Vladimir Nazor, a školovanje nastavlja u Zagrebu u Prirodoslovnoj školi Vladimira Preloga, smjer prirodoslovna gimnazija. 2013. godine upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, prediplomski smjer Kemijsko inženjerstvo. Godine 2016. brani završni rad pod temom „Analiza termodinamičkog procesa s realnim radnim tvarima“. Iste godine upisuje diplomski studij Kemijsko inženjerstvo, modul Kemijsko-procesno inženjerstvo.

Tomislav Horvat rođen je 10. lipnja 1994. u Čakovcu. U Nedelišću završava OŠ Nedelišće, a školovanje nastavlja u Čakovcu u gimnaziji Josipa Slavenskog Čakovec. Godine 2013. upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, prediplomski smjer Kemijsko inženjerstvo. Godine 2016. brani završni rad na temu „Materijali za izradu mikroreaktora“ i iste godine upisuje diplomski studij Kemijsko inženjerstvo, modul Kemijsko- procesno inženjerstvo na istom fakultetu.