# Rektifikacijska kolona s uređajem za povrat topline

**Benčić, Pavao**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:787341

*Rights / Prava:* Attribution-ShareAlike 4.0 International/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

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








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Pavao Benčić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing. Pavao Benčić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju, na uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog završnog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i „meglenima“ na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Pavao Benčić

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

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

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Pavao Benčić** Mat. br.: 0035212856

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rektifikacijska kolona s uređajem za povrat topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Rectification column with heat recovery unit**

Opis zadatka:

Potrebno je dimenzionirati atmosfersku rektifikacijsku kolonu za kontinuirano razdvajanje smjese etanol-voda u kojoj je minimalni maseni udio etanola u proizvodu 76 % Komina, masenog protoka 5000 kg/h, temperature 15 °C s volumnim udjelom etanola 15 %, se prije ulaska u kolonu zagrijava u štednoj grijalici potpunom kondenzacijom pare proizvoda.

U okviru ovog rada potrebno je:

- definirati udio etanola u džibri, odabrati temperaturu komine na ulazu u kolonu i provjeriti dimenzije štedne grijalice,
- koristeći modificirani O'Connelov izraz za efikasnost kolone, odrediti broj plitica u koloni,
- za odabrani tip plitice i udio etanola u džibri, odrediti dimenzije kolone i geometrijske karakteristike plitica,
- izraditi sklopni crtež kolone.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:
doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

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

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

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... III
POPIS TABLICA ..... IV
POPIS OZNAKA ..... V
SAŽETAK ..... XII
SUMMARY ..... XIII
1. UVOD ..... 1
1.1. Povijest destilacije ..... 1
1.2. Primjena destilacije ..... 1
1.3. Destilacijski postupci ..... 2
2. TEORIJSKE OSNOVE ..... 3
2.1. Parametri dvojne smjese ..... 3
2.2. Jednostavna kontinuirana destilacija ..... 4
2.3. Kontinuirana destilacija s obaranjem (deflegmacijom) ..... 5
2.4. Rektifikacija ..... 7
2.4.1. Kolona za jačanje ..... 9
2.4.2. Kolona za iscrpljivanje ..... 10
2.4.3. Spojena kolona ..... 11
2.4.4. Štednja energije – hlađenje deflegmatora kominom ..... 12
2.4.5. Određivanje broja plitica prema McCabeu i Thielu ..... 13
3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN REKTIFIKACIJSKE KOLONE S UREĐAJEM ZA POVRAT TOPLINE ..... 19
3.1. Proračun potrebnih vrijednosti ..... 19
3.2. Određivanje dimenzija štedne grijalice ..... 22
3.2.1. Prvi slučaj ..... 27
3.2.2. Drugi slučaj. ..... 29
3.2.3. Treći slučaj ..... 31
3.3. Određivanje broja plitica u koloni ..... 33
3.3.1. Prvi slučaj ..... 35
3.3.2. Drugi slučaj. ..... 36
3.3.3. Treći slučaj ..... 37
3.3.4. Usporedba dobivenih rezultata i efikasnost kolone ..... 38
4. ODREĐIVANJE DIMENZIJA KOLONE I GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA PLITICA ..... 41
4.1. Određivanje promjera kolone ..... 42
4.2. Određivanje dimenzija brane ..... 46
4.3. Geometrijske karakteristike zvona i određivanje njihova rasporeda ..... 47
4.4. Hidraulički proračun plitice ..... 52
4.4.1. Faktor odnošenja kapljevine parom ..... 52
4.4.2. Hidraulički gradijent kapljevine na podu ..... 54
4.4.3. Pad tlaka pare ..... 55

4.4.4. Proračun silaznog kanala ..... 57
4.5. Određivanje dimenzija priključaka kolone ..... 58
5. ZAKLJUČAK ..... 61
LITERATURA ..... 62
PRILOZI ..... 63

# POPIS SLIKA

Slika 1. Destilacijski postupci ..... 2
Slika 2. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram jednostavne kontinuirane destilacije [3] ..... 4
Slika 3. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram kontinuirane destilacije s deflegmacijom [3] ..... 5
Slika 4. Shematski prikaz vođenja pare i kapljevine kroz deflegmator [3] ..... 6
Slika 5. Prikaz različitih vrsta punila ..... 7
Slika 6. Prikaz preljevnih plitica ..... 8
Slika 7. Protok pare na plitici [4] ..... 8
Slika 8. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram kolone za jačanje [3] ..... 9
Slika 9. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram kolone za iscrpljivanje [3] ..... 10
Slika 10. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram spojene kolone [3] ..... 11
Slika 11. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram predgrijavanja komine u deflegmatoru [3] ..... 12
Slika 12. Plitice sa zvonima [3] ..... 13
Slika 13. Pravac jačanja i pravac iscrpljivanja u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu [1] ..... 15
Slika 14. Pravac napajanja ovisno o vrsti komine u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu [3] ..... 16
Slika 15. Minimalni refluks [1] ..... 17
Slika 16. Teorijski broj plitica prema McCabe – Thieleu [3] ..... 18
Slika 17. McCabe – Thieleov dijagram za prvi slučaj ..... 35
Slika 18. McCabe – Thieleov dijagram za drugi slučaj ..... 36
Slika 19. McCabe – Thieleov dijagram za treći slučaj ..... 37
Slika 20. McCabe – Thieleov dijagram za treći slučaj s realnim pliticama ..... 40
Slika 21. Hidraulički model plitice sa zvonima ..... 41
Slika 22. Fairova korelacija za plavljenje – ovisnost koeficijenta $C_{SB}$ o parametru protoka i razmaku između plitica [4] ..... 43
Slika 23. Vrijeme zadržavanja kapljevine u ovisnosti o gustoći pare i kapljevine [4] ..... 44
Slika 24. Kružni odsječak s pripadajućim dimenzijama brane ..... 46
Slika 25. Poprečni presjek zvona s označenim dimenzijama ..... 48
Slika 26. Raspored zvona [12] ..... 49
Slika 27. Fairova korelacija za procjenu faktora odnošenja kapljevine parom [4] ..... 53

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz potrebnih vrijednosti za kominu, destilat i džibru ..... 21
Tablica 2. Izotermne topline mješanja u ovisnosti o temperaturi i masenoj koncentraciji .... 22
Tablica 3. Prikaz toplinskih svojstva kapljevite smjese etanol-voda ..... 24
Tablica 4. Dimenzije štedne grijalice u ovisnosti o temperaturi komine ..... 33
Tablica 5. Broj plitica, toplinski tok i potrošnja medija u ovisnosti o iznosu refluksa ..... 38
Tablica 6. Preporučene vrijednosti dimenzija zvona..... 50
Tablica 7. Dimenzije priključaka očitanih iz [11] i iznosi stvarnih brzina ..... 60

# POPIS OZNAKA

| Latinične oznake | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $A'_N$ | $m^2$ | Nova neto površina plitice |
| $A'_D$ | $m^2$ | Nova površina preljeva |
| $A'_T$ | $m^2$ | Nova ukupna površina kolone |
| $A'_{vz}$ | $m^2$ | Površina koju zauzimaju svi vratovi zvona |
| $A_N$ | $m^2$ | Neto površina plitice |
| $A_C$ | $m^2$ | Površina cijevi |
| $A_D$ | $m^2$ | Površina preljeva |
| $A_{Da}$ | $m^2$ | Slobodna površina ispod pregrade preljevnog kanala |
| $A_P$ | $m^2$ | Površina priključka |
| $A_T$ | $m^2$ | Ukupna površina kolone |
| $A_g$ | $m^2$ | Površina štedne grijalice |
| $A_r$ | $m^2$ | Površina ulaznih cijevi |
| $A_š$ | $m^2$ | Površina pravilnog šesterokuta |
| $A_{uk}$ | $m^2$ | Površina pridružena svim zvonima |
| $A_{vz}$ | $m^2$ | Površina jednog vrata zvona |
| $a$ | m | Duljina stranice pravilnog šesterokuta |
| $a_c$ | $m^2$ | Površina unutarnjeg presjeka zvona |
| $a_{cr}$ | $m^2$ | Površina kružnog pojasa između zvona i ulazne cijevi |
| $a_r$ | $m^2$ | Površina unutarnjeg presjeka vrata zvona |
| $b_b$ | m | Širina brane |
| $b_{sh}$ | m | Širina zareza |
| $C_D$ | - | Bezdimenzijski faktor hidrauličkog gradijenta |
| $C_{SB}$ | - | Sounders-Brownova konstanta |
| $C_o$ | - | Pomoćni faktor |
| $C_v$ | - | Korekcijski faktor |
| $c$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet |
| $c_{f1}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet kapljevine tvari 1 |
| $c_{f2}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet kapljevine tvari 2 |
| $c_{p1}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet pare tvari 1 |
| $c_{p2}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet pare tvari 2 |
| $c_{pe1}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet etanola prije deflegmatora |
| $c_{pe2}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet etanola nakon deflegmatora |
| $c_{ps1}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet vode pri temp. džibre |
| $c_{ps2}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet etanola pri temp. džibre |
| $c_{pw1}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet vode prije deflegmatora |

| | | |
|---|---|---|
| $c_{pw2}$ | J/(kg K) | Specifični toplinski kapacitet vode nakon deflegmatora |
| $D_T$ | m | Potrebni promjer kolone |
| $D_u$ | m | Unutarnji promjer kolone |
| $D_v$ | m | Vanjski promjer kolone |
| $d'_z$ | m | Unutarnji promjer zvona |
| $d'_{vz}$ | m | Vanjski promjer vrata zvona |
| $d_P$ | m | Izračunati unutarnji promjer priključka |
| $d_{ek}$ | m | Ekvivalentni promjer |
| $d_r$ | m | Razmak između zvona |
| $d_u$ | m | Unutarnji promjer cijevi |
| $d_v$ | m | Vanjski promjer cijevi |
| $d_{vz}$ | m | Unutarnji promjer vrata zvona |
| $d_z$ | m | Vanjski promjer zvona |
| $F_{LV}$ | - | Parametar protoka |
| $g$ | m/s$^2$ | Koeficijent Zemljine sile teže |
| $h$ | J/kg | Specifična entalpija |
| $h'_2$ | m | Stvarna visina vrha do tjemena zvona |
| $h_1$ | m | Visina |
| $h_1$ | J/kg | Specifična entalpija čiste tvari 1 |
| $h_2$ | J/kg | Specifična entalpija čiste tvari 2 |
| $h_2$ | m | Visina od vrha do tjemena zvona |
| $h_D$ | J/kg | Specifična entalpija pare |
| $h_{Da}$ | m | Pad tlaka uslijed strujanja kapljevine ispod pregrade silaznog kanala |
| $h_{Ds}$ | m | Dinamička potopljenost proreza na zvonima |
| $h_F$ | J/kg | Specifična entalpija kapljevine |
| $h_L$ | m | Visina bistre kapljevine u slivnom kanalu |
| $h_{al}$ | m | Pad tlaka kroz propuhanu kapljevinu |
| $h_c$ | m | Pad tlaka na zvonu |
| $h_{cd}$ | m | Pad tlaka kroz suha zvona |
| $h_{dc}$ | m | Visina bistre kapljevine u slivnom kanalu |
| $h_g$ | J/kg | Specifična entalpija destilata |
| $h_{io}$ | m | Visina bistre kapljevine pri preljevnoj pregradi |
| $h_k$ | m | Potopljenost preljevnog kanala |
| $h_m$ | J/kg | Specifična entalpija komine |
| $h_{m1}$ | J/kg | Specifična entalpija komine prije deflegmatora |
| $h_{m2}$ | J/kg | Specifična entalpija komine nakon deflegmatora |
| $h_{md}$ | J/kg | Specifična entalpija komine nakon deflegmatora |
| $h_{pr}$ | m | Visina brane |
| $h_r$ | m | Pad tlaka kroz ulazne cijevi |

| | | |
|---|---|---|
| $h_{ra}$ | m | Pad tlaka kroz zaokretni kružni kanal |
| $h_s$ | J/kg | Specifična entalpija džibre |
| $h_{sc}$ | m | Razmak između donjeg ruba zvona i plitice |
| $h_{sh}$ | m | Visina zareza na zvonima |
| $h_{szp}$ | J/kg | Specifična entalpija suhozasićene pare |
| $h_t$ | m | Pad tlaka pri strujanju s plitice na pliticu |
| $h_{ur}$ | m | Visina uronjavanja zvona |
| $h_{vk}$ | J/kg | Specifična entalpija vrele kapljevine |
| $h_{vz}$ | m | Duljina vrata zvona |
| $h_{w1}$ | J/kg | Ulazna entalpija vode |
| $h_{w1}$ | J/kg | Izlazna entalpija vode |
| $h_z$ | m | Visina zvona |
| $h_\Delta$ | m | Visina jednakostraničnog trokuta |
| $k_v$ | W/(m$^2$ K) | Koeficijent prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu |
| $L_b$ | m | Duljina brane |
| $L_c$ | m | Umnožak srednjeg broja zvona po redovima i razmaka zvona |
| $L_g$ | m | Duljina štedne grijalice |
| $L_{pc}$ | m | Opseg preljevne cijevi |
| $L_{uk}$ | m | Maksimalni put strujanja kapljevine |
| $L_z$ | m | Razmak zvona |
| $M$ | kg/kmol | Molarna masa |
| $M_1$ | kg/kmol | Molarna masa tvari 1 |
| $M_2$ | kg/kmol | Molarna masa tvari 2 |
| $M_R$ | kg/kmol | Molarna masa refluksa |
| $M_g$ | kg/kmol | Molarna masa destilata |
| $M_m$ | kg/kmol | Molarna masa komine |
| $M_s$ | kg/kmol | Molarna masa džibre |
| $m$ | - | Karakteristika komine |
| $m$ | kg | Masa smjese |
| $m_1$ | kg | Masa tvari 1 |
| $m_2$ | kg | Masa tvari 2 |
| $N$ | - | Broj cijevi |
| $Nu$ | - | Nusseltov broj |
| $N_r$ | - | Broj redova zvona okomitih na smjer strujanja kapljevine |
| $N_s$ | - | Stvarni broj cijevi |
| $N_{sr}$ | - | Srednji broj zvona |
| $n$ | kmol | Količina smjese |
| $n_1$ | kmol | Količina tvari 1 |
| $n_2$ | kmol | Količina tvari 2 |

| | | |
|---|---|---|
| $n_s$ | - | Stvarni broj plitica |
| $n_t$ | - | Teorijski broj plitica |
| $n_z$ | - | Potreban broj zvona |
| $n_{zs}$ | - | Stvarni broj zvona |
| $P$ | - | Broj prolaza |
| $p$ | Pa | Tlak |
| $Pr$ | - | Prandtlov broj |
| $Q_D$ | $m^3/s$ | Volumni protok pare |
| $Q_F$ | $m^3/s$ | Volumni protok kapljevine |
| $q_m$ | kg/s | Maseni protok |
| $q_{mDj}$ | kg/s | Maseni protok pare na vrhu kolone |
| $q_{mg}$ | kg/s | Maseni protok destilata |
| $q_{mm}$ | kg/s | Maseni protok komine |
| $q_{mp}$ | kg/s | Maseni protok pare za zagrijavanje |
| $q_{mr}$ | kg/s | Maseni protok refluksa |
| $q_{ms}$ | kg/s | Maseni protok džibre |
| $q_{msD}$ | kg/s | Maseni protok parovite džibre |
| $q_{mw}$ | kg/s | Maseni protok rashladne vode |
| $q_n$ | kmol/s | Molni protok |
| $q_{nDj}$ | kmol/s | Molni protok pare na vrhu kolone |
| $q_{nFj}$ | kmol/s | Molni protok kapljevine na vrhu kolone |
| $q_{nD}$ | kmol/s | Molni protok pare |
| $q_{nF}$ | kmol/s | Molni protok kapljevine |
| $q_{ng}$ | kmol/s | Molni protok destilata |
| $q_{nm}$ | kmol/s | Molni protok komine |
| $q_{ns}$ | kmol/s | Molni protok džibre |
| $q_t$ | J/kg | Izotermna toplina mješanja |
| $Re$ | - | Reynoldsov broj |
| $R_{VD}$ | - | Faktor rasporeda pare |
| $R_m$ | J/(kmol K) | Opća plinska konstanta |
| $R_{rc}$ | - | Udaljenost između ulaznih cijevi |
| $r_1$ | J/kg | Specifična toplina isparivanja tvari 1 |
| $r_2$ | J/kg | Specifična toplina isparivanja tvari 2 |
| $r_p$ | J/kg | Specifična toplina isparivanja suhozasićene vodene pare |
| $r_u$ | m | Unutarnji polumjer cijevi |
| $r_v$ | m | Vanjski polumjer cijevi |
| $s$ | m | Debljina stijenke |
| $s_1$ | m | Debljina stijenke zvona |
| $s_2$ | m | Debljina stijenke vrata zvona |
| $T$ | K | Temperatura |

| | | |
|---|---|---|
| $T_d$ | K | Temperatura destilata |
| $T_s$ | m | Razmak između plitica |
| $t'_R$ | s | Stvarno vrijeme zadržavanja kapljevine u preljevu |
| $t_R$ | s | Vrijeme zadržavanja kapljevine u preljevu |
| $U'_N$ | m/s | Stvarna brzina pare |
| $U_N$ | m/s | Brzina pare |
| $U_{ns}$ | m/s | Brzina pare svedena na neto površinu |
| $u'_L$ | m/s | Stvarna brzina kapljevine u preljevu |
| $u_{Lmax}$ | m/s | Maksimalna brzina kapljevine u preljevu |
| $V$ | $m^3$ | Volumen smjese |
| $V_1$ | $m^3$ | Volumen tvari 1 |
| $V_2$ | $m^3$ | Volumen tvari 2 |
| $w_{pret}$ | m/s | Pretpostavljena brzina strujanja |
| $w_{stv}$ | m/s | Stvarna brzina strujanja |
| $w_u$ | m/s | Stvarna brzina komine |
| $y_f$ | - | Relativna gustoća pjene u preljevnom kanalu |

**Grčke oznake**

| | | |
|---|---|---|
| $\alpha$ | ° | Kut |
| $\alpha$ | - | Relativna hlapivost |
| $\alpha_s$ | - | Srednja relativna hlapivost |
| $\alpha_u$ | W/($m^2$ K) | Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi |
| $\alpha_v$ | W/($m^2$ K) | Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi |
| $\beta$ | - | Faktor aeracije |
| $\Delta'$ | m | Nekorigirani hidraulički gradijent |
| $\Delta$ | m | Hidraulički gradijent |
| $\Delta h$ | J/kg | Razlika specifičnih entalpija |
| $\Delta h_t$ | m | Razina tekućine iznad brane |
| $\Delta_H$ | m | Hidraulički gradijent |
| $\Delta q_{nD}$ | kmol/s | Razlika molnih protoka pare između dijela kolone za jačanje i dijela kolone za iscrpljivanje |
| $\Delta q_{nF}$ | kmol/s | Razlika molnih protoka kapljevine između dijela kolone za jačanje i dijela kolone za iscrpljivanje |
| $\Delta t_m$ | °C | Manja temperaturna razlika između ulazne temperature komine i temperature kondenzacije destilata |
| $\Delta t_v$ | °C | Veća temperaturna razlika između ulazne temperature komine i temperature kondenzacije destilata |
| $\Delta\vartheta_m$ | °C | Srednja logaritamska temperatura |
| $\eta$ | - | Stupanj iskoristivosti plitice |
| $\eta_1$ | Pas | Dinamička viskoznost tvari 1 |

| | | |
|---|---|---|
| $\eta_2$ | Pas | Dinamička viskoznost tvari 2 |
| $\eta_k$ | Pas | Dinamička viskoznost kondenzata |
| $\eta_m$ | Pas | Dinamička viskoznost komine |
| $\eta_s$ | Pas | Dinamička viskoznost kapljevite smjese etanol-voda |
| $\vartheta$ | °C | Temperatura |
| $\vartheta'_m$ | °C | Ulazna temperatura komine |
| $\vartheta''_m$ | °C | Izlazna temperatura komine |
| $\vartheta'_{s1}$ | °C | Temperatura zasićenja tvari 1 |
| $\vartheta'_{s2}$ | °C | Temperatura zasićenja tvari 2 |
| $\vartheta_d$ | °C | Temperatura destilata |
| $\vartheta_m$ | °C | Srednja temperatura komine |
| $\vartheta_{m1}$ | °C | Početna temperatura komine |
| $\vartheta_s$ | °C | Temperatura džibre |
| $\vartheta_{sv}$ | °C | Temperatura vanjske stijenke |
| $\lambda_1$ | W/(m K) | Toplinska provodnost tvari 1 |
| $\lambda_2$ | W/(m K) | Toplinska provodnost tvari 2 |
| $\lambda_č$ | W/(m K) | Toplinska provodnost čelika |
| $\lambda_k$ | W/(m K) | Toplinska provodnost kondenzata |
| $\lambda_m$ | W/(m K) | Toplinska provodnost komine |
| $\lambda_s$ | W/(m K) | Toplinska provodnost kapljevite smjese etanol-voda |
| $\mu_L$ | Pas | Srednja dinamička viskoznost kapljevine |
| $\xi$ | kg/kg | Maseni udio |
| $\xi_D$ | kg/kg | Maseni udio tvari 2 u pari |
| $\xi_F$ | kg/kg | Maseni udio tvari 2 u kapljevini |
| $\xi_m$ | kg/kg | Maseni udio tvari 2 u komini |
| $\xi_g$ | kg/kg | Maseni udio tvari 2 u destilatu |
| $\xi_{gmin}$ | kg/kg | Minimalni maseni udio tvari 2 u destilatu |
| $\xi_s$ | kg/kg | Maseni udio tvari 2 u džibri |
| $\xi_v$ | $m^3/m^3$ | Volumni udio |
| $\pi$ | J/kg | Pol razlučivanja kolone za jačanje |
| $\pi_i$ | J/kg | Pol razlučivanja kolone za iscripljivanje |
| $\rho_1$ | $kg/m^3$ | Gustoća tvari 1 |
| $\rho_2$ | $kg/m^3$ | Gustoća tvari 2 |
| $\rho_D$ | $kg/m^3$ | Gustoća pare |
| $\rho_F$ | $kg/m^3$ | Gustoća kapljevine |
| $\rho_k$ | $kg/m^3$ | Gustoća kondenzata |
| $\rho_m$ | $kg/m^3$ | Gustoća komine |
| $\rho_s$ | $kg/m^3$ | Gustoća kapljevite smjese etanol-voda |
| $\rho_s$ | $kg/m^3$ | Gustoća džibre |
| $\sigma_L$ | $m^3/(s\ m)$ | Opterećenje segmentne pregrade kapljevinom |
| $\varphi_D$ | kmol/kmol | Specifični molni tok pare |

| | | |
|---|---|---|
| $\varphi_R$ | kmol/kmol | Specifični molni tok refluksa |
| $\varphi_{Rmim}$ | kmol/kmol | Minimalni specifični molni tok refluksa |
| $\varphi_m$ | kg/kg | Specifični maseni tok refluksa |
| $\Phi_k$ | W | Toplinski tok kondenzacije |
| $\Phi_r$ | W | Rashladni učin deflegmatora |
| $\Phi_d$ | W | Toplinski tok predgrijavanja komine |
| $\Phi_i$ | W | Toplinski učin kotlića |
| $\phi_L$ | W/m | Toplinski tok po jedinice duljine |
| $\phi_d$ | J/kg | Specifični toplinski tok deflegmacije |
| $\phi_i$ | J/kg | Toplinski učin kotlića sveden na kg džibre |
| $\phi_r$ | J/kg | Rashladni učin deflegmatora sveden na kg destilata |
| $\psi$ | kmol/kmol | Molni udio |
| $\psi_D$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u pari |
| $\psi_F$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u kapljevini |
| $\psi_R$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u refluksu |
| $\psi_{df}$ | kmol/kmol | Molni udio etanola u pari |
| $\psi_{fd}$ | kmol/kmol | Molni udio etanola u kapljevini |
| $\psi_g$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u destilatu |
| $\psi_{kp}$ | kmol/kmol | Faktor odnošenja kapljevine parom |
| $\psi_m$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u komini |
| $\psi_s$ | kmol/kmol | Molni udio tvari 2 u džibri |

# SAŽETAK

U sklopu završnog rada bilo je potrebno konstruirati atmosfersku rektifikacijsku kolonu za kontinuirano razdvajanje smjese etanol-voda s uređajem za povrat topline. Provedena je analiza dimenzija štedne grijalice s obzirom na različite temperature komine prije ulaska u kolonu te je odabran proizvoljan slučaj za daljnji proračun. U kasnijem dijelu proračuna provedena je analiza potrošnje energije i medija te broja plitica s obzirom na iznos refluksa. Za odabrani slučaj određen je tip plitice te dimenzionirana sama kolona kao i geometrijske karakteristike plitice. Na kraju je bilo potrebno izraditi sklopni crtež kolone.

Ključne riječi: destilacija, rektifikacijska kolona, plitice, štedna grijalica, refluks, termodinamički proračun, hidraulički proračun.

# SUMMARY

In this study it was necesarry to construct an atmospheric rectification column with heat recovery unit for continuous separation of ethanol-water mixture. An analysis for dimensions of heat recovery unit regarding different temperatures of the feed before entering the column was performed, and an arbitrary case was selected for further calculation. In the later part of the calculation, an analysis of energy consumption, fluid consumption, and the number of trays with regard to the amount of reflux was performed. For the selected case, the tray-type was selected and the column itself was dimensioned as well as the geometric characteristics of the tray. In the end, it was necessary to make an assembly drawing of the column.

Key words: distillation, rectification column, tray, heat recovery unit, reflux, thermodynamic calculation, hydraulic calculation.

# 1. UVOD

Destilacija je proces fizičkog razdvajanja smjese u dva ili više proizvoda različitih temperatura vrenja. Razdvajanje će se temeljiti na zagrijavanju smjese kao i kod npr. postupaka uparivanja otopina. Temelji se na činjenici da kada se kapljevita smjesa dviju komponenti različitog vrelišta zagrije i djelomično ispari, para u ravnoteži s kapljevinom sadrži više hlapivije komponente (komponenta s nižim vrelištem) od kapljevine. Teorijske postavke destilacije temelje se na Raoultovom i Daltonovom zakonu te drugim termodinamičkim zakonitostima ponašanja dvojnih i višekomponentnih smjesa.

## 1.1. Povijest destilacije

Destilacija je prastaro umijeće o kojem postoje zapisi već iz starog vijeka (Grčka, Kina). Tvrdi se da je već Aristotel poznavao dobivanje pitke vode od morske vode. U spisima koji se pripisuju arapskom alkemičaru Geberu (VIII. stoljeće) destilacija se spominje kao jedna od sedam operacija alkemije. Tijekom stoljeća destilacija je bila jedini poznati postupak za koncentraciju ili dobivanje tekućina u čistom stanju. Početkom 19. stoljeća načinjena je prva kolona za kontinuiranu destilaciju (Cellier-Brumenthal, Francuska) te su se počele koristiti vrste plitica sa zvonima (Perrier, Engleska). Punila se upotrebljavaju već od 1820. godine, a prve sitaste plitice je uveo Coffy godine 1830. Prva knjiga o osnovama destilacije je knjiga *La rectification de l'alchocol* od Ernesta Sorela iz 1893. godine.

## 1.2. Primjena destilacije

U suvremenom životu destilacija spada u skupinu najvažnijih postupaka procesne industrije, ali također ima važnu ulogu u kemijskoj i farmaceutskoj industriji. Destilacijom se dobiva etilni alkohol iz fermentiranih šećernih otopina pri proizvodnji alkoholnih pića kao što su razne rakije, whiskey, votka itd. Ukapljeni zrak koji predstavlja smjesu kisika, dušika, argona te ostalih plemenitih plinova postupkom destilacije se može rastaviti na te sudionike. Jedan od najvažnijih, ali i najmasovnijih postupaka jest destilacija sirove nafte u svrhu dobivanja frakcija od benzina, preko ulja pa sve do bitumena.

## 1.3. Destilacijski postupci

Destilacijske postupke može se podijeliti na prekidne (šaržne) i neprekidne (kontinuirane). Iako se ne koriste u tolikoj mjeri kao kontinuirana destilacija, šaržna destilacija ima važnu ulogu u kemijskoj procesnoj industriji, a posebno u farmaceutskoj industriji. Šaržna destilacija obično se koristi:

1. kada sastav smjese koja se treba separirati široko varira;
2. kada separaciju treba rjeđe provesti;
3. kada je količina materijala koji se treba separirati relativno mala;
4. kada glavni produkt sadrži relativno male količine lakih ili teških nečistoća.

Za šaržnu destilaciju je karakteristična nestacionarnost procesa, odnosno promjena svojstava smjese za vrijeme trajanja procesa separacije, dok kontinuiranu destilaciju karakteriziraju konstantna svojstva i koncentracije tijekom procesa pa ju je lakše opisati matematičkim modelom.



(a) Šaržna destilacija



(b) Kontinuirana destilacija

**Slika 1. Destilacijski postupci**

# 2. TEORIJSKE OSNOVE

## 2.1. Parametri dvojne smjese

Procese koji će se u nastavku opisivati najjednostavnije je razmatrati na primjeru dvojnih (binarnih) smjesa koje se razdvajaju postupcima jednostavne destilacije ili rektifikacije. Navedeni postupci će se ograničiti samo na binarne smjese jer je kod smjesa s tri ili više komponenata potrebno primijeniti složenije postupke frakcioniranja.

Dvojna smjesa sastojat će se od dvije jednostavne tvari od kojih će ona s većom temperaturom vrenja biti označena kao tvar 1, a ona s nižim vrelištem kao tvar 2. Omjer tih dvaju sudionika u smjesi izražavat će se pomoću pojma koncentracije (udjela) tvari niže temperature vrenja, odnosno tvari 2, u smjesi.

Maseni udio tvari nižeg vrelišta (tvar 2) u smjesi glasi:

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

a maseni udio tvari višeg vrelišta (tvar 1):

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

gdje je $m$ ukupna masa, a $m_1$ i $m_2$ mase tvari 1 odnosno tvari 2 u smjesi. Koncentracija $\xi = 0$ predstavlja čistu tvar 1, a $\xi = 1$ čistu tvar 2.

Molni udio tvari nižeg vrelišta (tvari 2) koristeći izraz za količinu tvari $n = m/M$ u smjesi jednak je:

$$\psi = \frac{n_2}{n_1+n_2} = \frac{\frac{m_2}{M_2}}{\frac{m_1}{M_1}+\frac{m_2}{M_2}}\,, \tag{3}$$

pri čemu je $M$ molarna masa.

Izraz koji povezuje maseni i molni udio u smjesi preko molarnih masa glasi:

$$\xi = \frac{1}{\left(\frac{1}{\psi}-1\right)\frac{M_1}{M_2}+1}\,. \tag{4}$$

Izraz za izračunavanje volumnog udjela tvari 2 u smjesi, uz pretpostavku zanemarivanja kontrakcije volumena, glasi:

$$\xi_V = \frac{V_2}{V} = \frac{V_2}{V_2+V_1}\,, \tag{5}$$

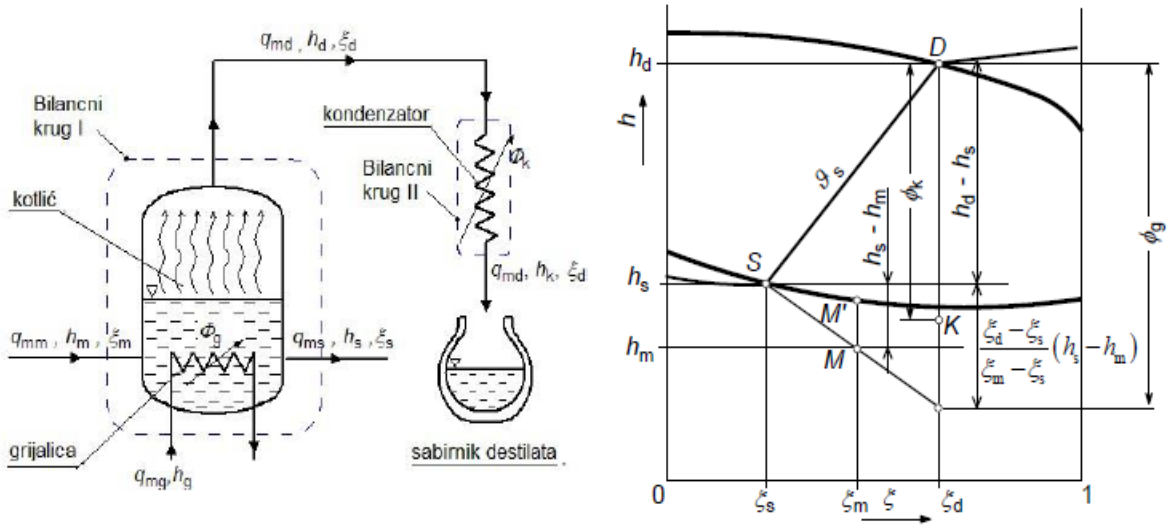
gdje se $V_1$ i $V_2$ odnose na volumen pojedinih tvari u smjesi, a $V$ je volumen smjese.

Izraz za maseni udio preko volumnog udjela i gustoće tvari nižeg vrelišta (tvar 2) $\rho_2$ te gustoće tvari višeg vrelišta (tvar 1) $\rho_1$ glasi:

$$\xi = \frac{1}{\left(\frac{1}{\xi_V} - 1\right)\frac{\rho_1}{\rho_2} + 1}\,. \tag{6}$$

Etanol (kemijski simbol – $C_2H_5OH$) je primarni alkohol s dva ugljikova atoma te ujedno najvažniji član skupine alkohola. Pri sobnoj temperaturi je bezbojna, hlapljiva i lako zapaljiva tekućina ugodna mirisa. U smjesi etanol – voda, etanol ima manju temp. vrenja ($\vartheta \approx 77{,}5$ °C pri atm. tlaku) od vode ($\vartheta \approx 99{,}61$ °C pri atm. tlaku) pa će etanol biti označen kao tvar 2, a voda kao tvar 1.

## 2.2. Jednostavna kontinuirana destilacija



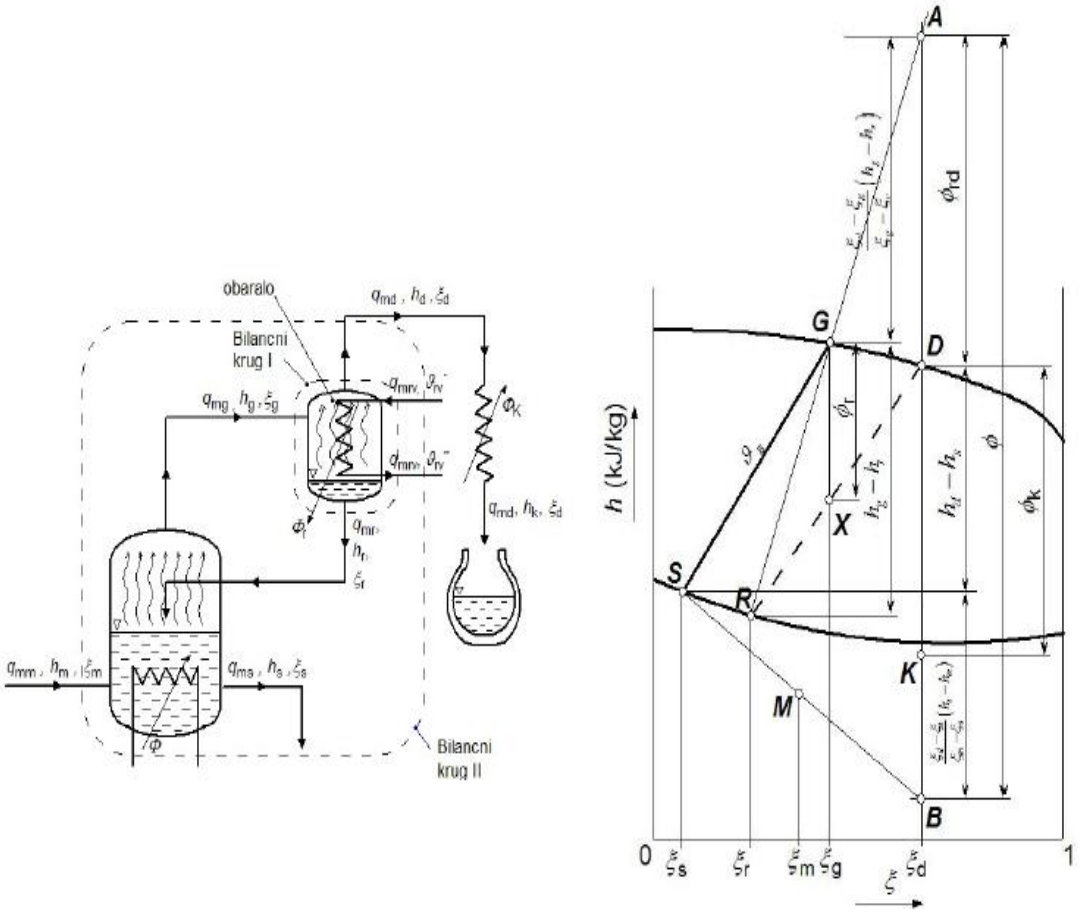

**Slika 2. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram jednostavne kontinuirane destilacije [3]**

Na primjeru jednostavne kontinuirane destilacije najbolje je razmotriti osnovne masene i energetske tokove pri destilaciji. Ona se provodi u uređaju koji se sastoji od kotlića s ugrađenom grijalicom, kondenzatora i sabirnika destilata. U kotlić se kontinuirano dovodi komina stanja *M* masene koncentracije $\xi_m$. Ona se u kotliću zagrijava do stanja vrenja (stanje *M'*), ali se istodobno miješa sa sadržajem kotlića tako da stanje mješavine odgovara stanju *S* vrele džibre s koncentracijom $\xi_s$. Zagrijavanje komine i održavanje vrenja namiruje se dovodom toplinskog toka $\Phi_g$ pomoću nekog ogrjevnog medija, npr. ogrjevne pare. Džibra odaje ravnotežnu paru *D* čije se stanje nalazi na sjecištu izoterme $\vartheta_s$ s linijom rošenja. Ta se para odvodi u kondenzator gdje se odvođenjem toplinskog toka kondenzacije i pothlađenja $\Phi_k$ pomoću nekog rashladnog medija, npr. vode, dobiva pothlađeni destilat stanja *K* koji se odvodi u spremnik. Iz kotlića se

kontinuirano odvodi i vrela džibra koncentracije $\xi_s$. Destilat ima koncentraciju $\xi_d$ koja u ovom slučaju može biti jednaka ravnotežnoj koncentraciji u odnosu na kapljevitu džibru u kotliću. Stoga će koncentracija destilata biti to niža što je niža koncentracija džibre i obrnuto. Jasno je da ovakav postupak separacije ima ograničene mogućnosti, a cilj je što veće razdvajanje tvari 2 od tvari 1, a za ostvarivanje takvih zahtjeva potrebno je navedeni postupak destilacije usavršiti dodatnim uređajima, npr. primjenom obarala ili deflegmatora.

## 2.3. Kontinuirana destilacija s obaranjem (deflegmacijom)

Deflegmator je izmjenjivač topline smješten između kotlića i kondenzatora koji služi za postizanje većih koncentracija destilata. Obično je izveden kao vertikalni cilindrični bubanj s ugrađenim cijevnim registrima različitih oblika (cijevne zavojnice, snop horizontalnih i vertikalnih cijevi itd.) kroz koje struji rashladni medij, obično voda. Na cijevima kondenzira para iz kotlića te se gravitacijski slijeva prema dnu obarala.

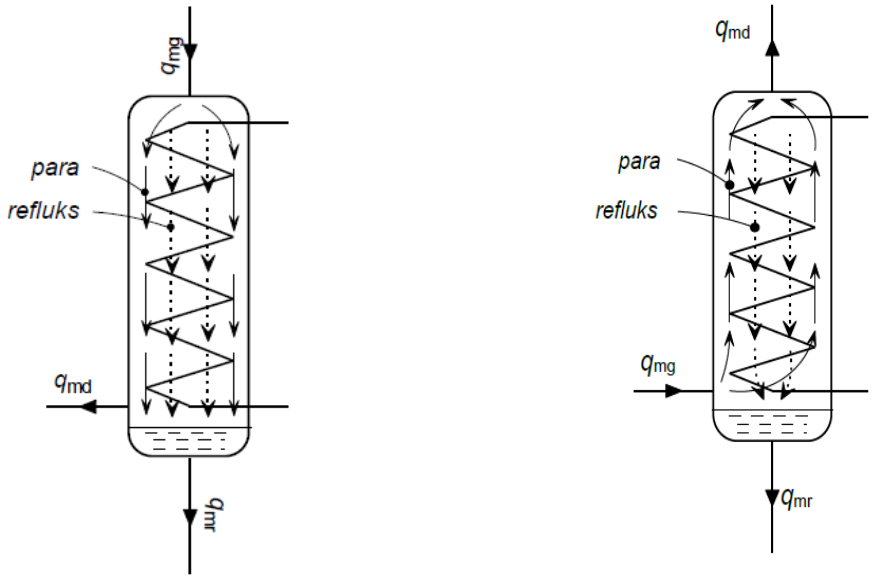



**Slika 3. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram kontinuirane destilacije s deflegmacijom [3]**

I ovdje u kotliću vrije džibra $S$ s koncentracijom $\xi_s$ te odaje ravnotežnu paru $G$ koncentracije $\xi_G$. Ta se para odvodi u obaralo u kojem djelomično kondenzira odvođenjem topline deflegmacije $\Phi_r$. Pri tome nastaje mokra para stanja $X$ iz koje će se kapljevita faza $R$ gravitacijskim slijeganjem na dno obarala izdvojiti iz parne faze $D$. Izdvojena kapljevita faza naziva se oborinom ili refluksom. Razdvajanje će načelno biti neravnotežno, tj. stanja $R$ i $D$ neće ležati na zajedničkoj izotermi, a stanje kapljevite faze može čak biti i u pothlađenom području. Stanja $R$, $D$ i $X$ leže na tzv. pravcu razmješavanja. Njegov nagib će ovisiti o načinu izmjene topline i vođenju pare i kapljevine u obaralu. Na pravcu razmješavanja će udio oborine u smjesi odgovarati dužini $XD$, a onaj parne faze dužini $RX$. Omjer tih udjela određen je položajem stanja $X$ te će oborine biti to više što je odvedene topline $\Phi_r$. U skladu s time će se mijenjati koncentracije parne faze $\xi_d$ i kapljevite faze $\xi_r$. I one će biti načelno to veće što je veća toplina obaranja $\Phi_r$ jer tada pravac razmješavanja mijenja, odnosno smanjuje nagib.

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

Vođenje pare i kapljevine u obaralu može se ostvariti na dva načelno suprotna načina: istosmjerno i protusmjerno.




(a) Istosmjerni deflegmator (b) Protusmjerni deflegmator

**Slika 4. Shematski prikaz vođenja pare i kapljevine kroz deflegmator [3]**

## 2.4. Rektifikacija

Kako bi omogućili što dulji dodir uzlazne pare sa silaznom kapljevinom na što većoj dodirnoj površini ugrađuje se rektifikacijski aparat između obarala i kotlića te se na taj način dobiva uređaj pod nazivom rektifikacijska kolona. Gradi se kao vertikalni cilindar potrebne visine s ugrađenim punilima različitih oblika ili pregradama u obliku preljevnih plitica.

Punila mogu biti raznih veličina, materijala i oblika. Osnovna zadaća im je da silazni tok kapljevine razlije na što veću površinu, a da za uzlaznu paru ostavi dovoljno velike presjeke za strujanje da time pospješi izmjenu topline i tvari među njima.

Punila se općenito dijele na tri vrste [4]:

1. Nasuta punila – pojedinačna punila koja se nasipaju u plašt kolone ili se eventualno slažu, ujedno su najstarija i najčešće upotrebljavana vrsta u komercijalnoj praksi.
2. Strukturirana punila – punila u obliku slojeva načinjenih od korugiranih limova ili metalnih mrežica koja se polažu u kolonu i imaju stalnu poznatu strukturu.
3. Rešetkasta punila – punila načinjena u obliku rešetke koje se polažu u kolonu koja također imaju stalnu strukturu.



(a) Nasuta punila (b) Strukturirana punila (c) Rešetkasta punila

**Slika 5. Prikaz različitih vrsta punila**

Plitice imaju jednaku funkciju kao punila, a primjenjuju se za kolone većih dimenzija i tamo gdje je potrebno temeljito i često čišćenje. Ugrađuju se kao horizontalne prepreke strujanju kapljevite i parne faze kroz rektifikacijski aparat sa zadaćom da ostvare što bolji i dugotrajniji kontakt tih faza u svrhu izmjene topline i tvari.

Razlikujemo četiri vrste plitica:

1. Plitice sa zvonima – plitica je perforirana ploča s kratkim cijevima ugrađenima u perforacije na koje su učvršćena zvona s prorezom ili bez njega na rubu.

2. Sitaste plitice – ravna perforirana ploča gdje para prolazi kroz otvore i njezino strujanje sprječava kapljevinu da curi kroz otvore.
3. „Dual flow“ plitice – varijanta sitastih plitica bez preljeva. Kroz perforacije istodobno protječe i para i kapljevina, tako da te plitice u pravilu imaju nisku djelotvornost i često su nestabilne u radu.
4. Ventilske plitice – u otvorima perforirane ploče ugrađeni su ventili okruglog ili kvadratičnog oblika. Ovisno o brzini pare ventili se više ili manje podižu.



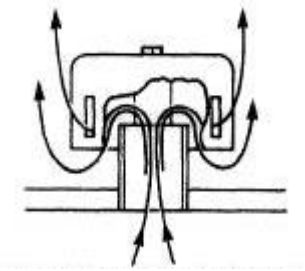
(a) Plitica sa zvonima



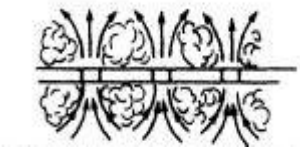
(b) Sitasta plitica

**Slika 6. Prikaz preljevnih plitica**

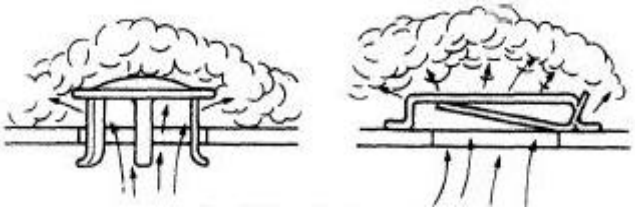
Plitice sa zvonima imaju prednost kada se očekuje veliko smanjenje kapaciteta ili se traži minimalno curenje s plitica. „Dual flow“ plitice imaju prednost kada se radi s korozivnim i prljavim fluidima, a u ostalim slučajevima plitice s ventilima i sitaste plitice najbolji su izbor.



(a) Plitice sa zvonima



(b) Sitaste plitice

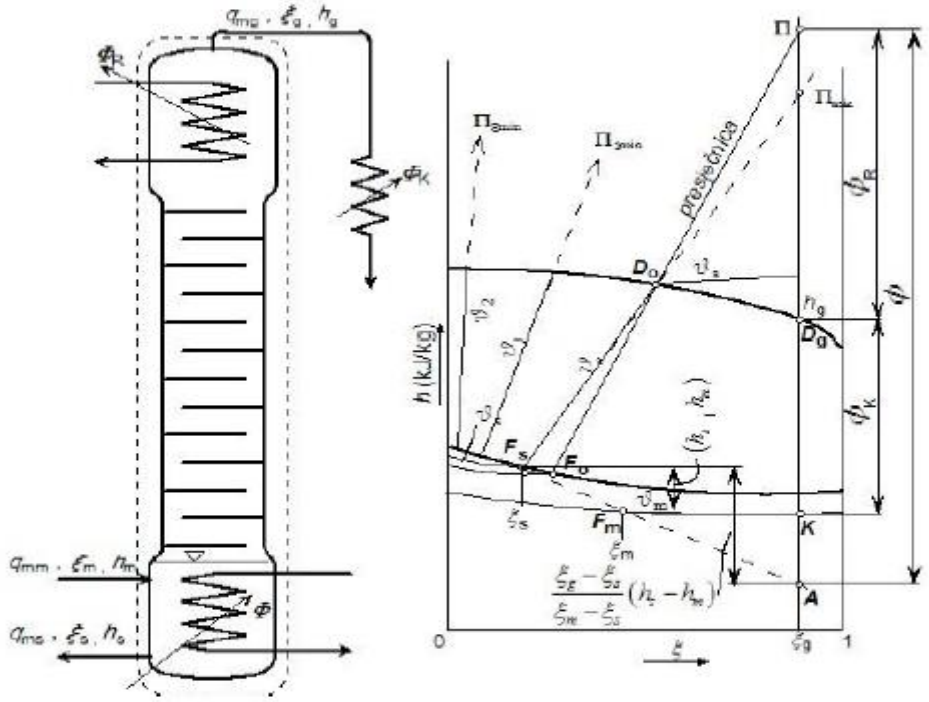


(c) Plitice s ventilima

**Slika 7. Protok pare na plitici [4]**

### 2.4.1. Kolona za jačanje

Kolona za jačanje služi za dobivanje destilata visokih koncentracija. Sastoji se od kotlića ili grijalice na koju se nastavlja rektifikacijski aparat na čijem se vrhu nalazi deflegmator.




**Slika 8. Shematski prikaz i *h*-*ξ* dijagram kolone za jačanje [3]**

U kotlić se dovodi komina $F_\mathrm{m}$ koncentracije $\xi_\mathrm{m}$ kojom se džibra $F_\mathrm{s}$ održava na željenoj koncentraciji $\xi_\mathrm{s}$. Dovodom topline $\Phi$ za pogon kolone, džibra u kotliću vrije i odašilje ravnotežnu paru koja putuje kroz rektifikacijski aparat prema obaralu. Tamo odvođenjem topline obaranja $\Phi_\mathrm{r}$ djelomično kondenzira para koja dolazi s vrha rektifikacijskog aparata. Oborena kapljevita faza gravitacijski teče nadolje prema kotliću u protustruji s parom. Pri tome u koloni dolazi do intenzivnog miješanja uzlazne pare i silazne oborine uz izmjenu tvari i topline, što znači da se para obogaćuje lako hlapivom komponentom 2 smjese a oborina osiromašuje.

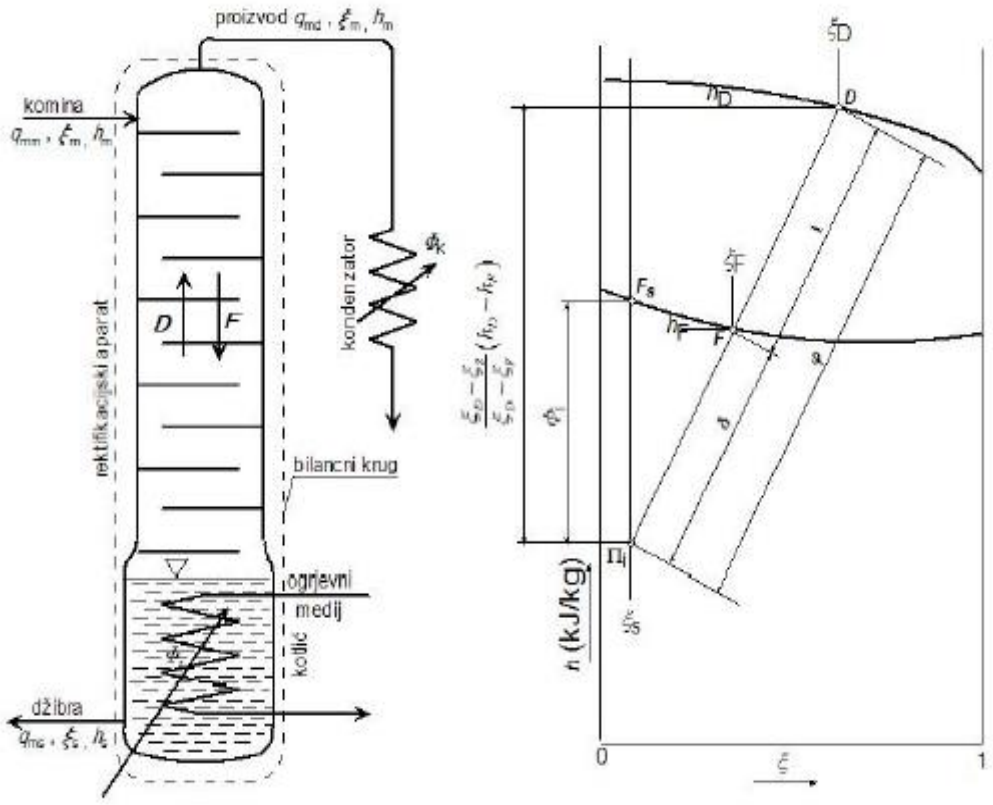
Postavljanjem masenih i energetskih bilanci oko pojedinih dijelova kolone za jačanje te daljnjim sređivanjem tih jednadžbi dobije se:

$$h_\mathrm{F} + \frac{\xi_\mathrm{g} - \xi_\mathrm{F}}{\xi_\mathrm{D} - \xi_\mathrm{F}} (h_\mathrm{D} - h_\mathrm{F}) = h_\mathrm{g} + \phi_\mathrm{r} \,. \tag{7}$$

Izraz (7) predstavlja jednadžbu presječnice kolone za jačanje, koja se u *h*-$\xi$ dijagramu prikazuje kao snop pravaca koji prolaze stanjima kapljevine i pare promatranog presjeka kolone, a svi se sijeku u točki $\pi$ na koncentraciji destilata $\xi_g$ koja se naziva pol razlučivanja.

### 2.4.2. Kolona za iscrpljivanje

Kolona za iscrpljivanje služi za što jače izdvajanje tvari 2 iz džibre, a to znači da će se takvu kolonu koristiti za dobivanje što čišće tvari 1 iz dvojne smjese. Kod kolone za iscrpljivanje ne može se dobiti visoka koncentracija proizvoda kako je to bilo moguće kod kolone za jačanje.




**Slika 9. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram kolone za iscrpljivanje [3]**

Ona nema obarala, već se na vrh kolone dovodi komina s masenim protokom $q_{mm}$ te time predstavlja oborinu koja se kroz rektifikacijski aparat slijeva prema kotliću na dnu kolone. U kotliću vrije džibra $F_s$ te otpušta ravnotežnu paru prema prvoj plitici. Na toj i svim daljnjim pliticama događaju se izmjene tvari i topline s kapljevitom oborinom kao i kod kolone za jačanje. Iz kotlića se izvodi džibra $F_s$ masenim tokom $q_{ms}$. Proizvod vrha kolone za iscrpljivanje je para destilata masenog protoka $q_{md}$.

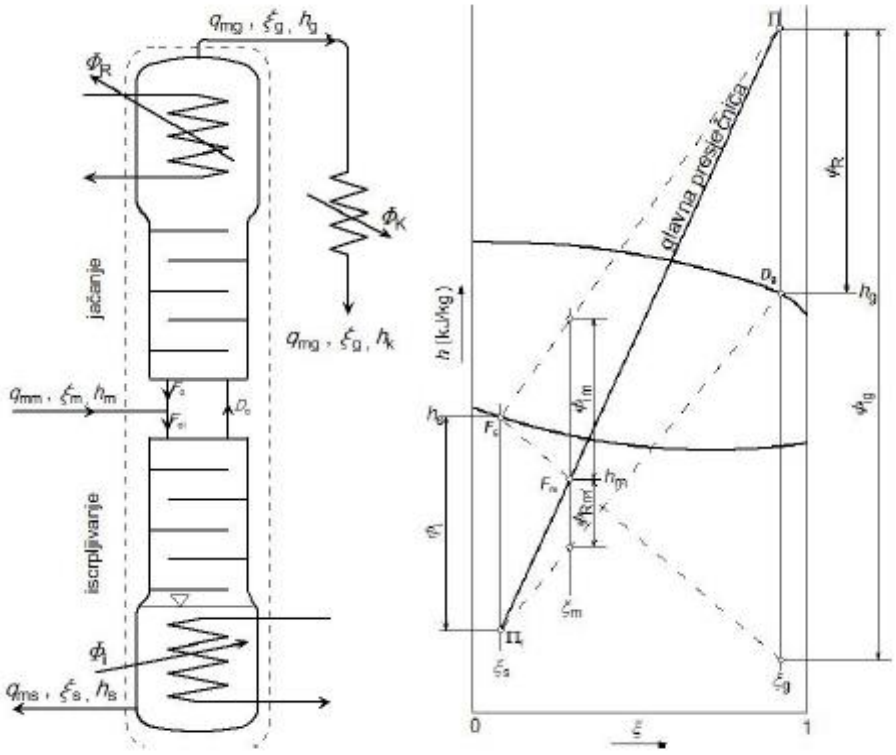
Postavljanjem masenih i energetskih bilanci oko pojedinih dijelova kolone za iscrpljivanje te daljnjim sređivanjem tih jednadžbi dobije se:

$$h_{\mathrm{D}}\text{-}\frac{\xi_{\mathrm{D}}-\xi_{\mathrm{S}}}{\xi_{\mathrm{D}}-\xi_{\mathrm{F}}}(h_{\mathrm{D}}-h_{\mathrm{F}}) = h_{\mathrm{s}}\text{-}\phi_{\mathrm{i}}\ . \qquad (8)$$

Izraz (8) predstavlja jednadžbu presječnice kolone za iscrpljivanje, koja se u *h*-$\xi$ dijagramu prikazuje kao snop pravaca koji prolaze stanjima kapljevine i pare promatranog presjeka kolone, a svi se sijeku u točki $\pi_{\mathrm{i}}$ na koncentraciji džibre $\xi_{\mathrm{s}}$ koja se naziva pol razlučivanja.

### 2.4.3. Spojena kolona

Spojena kolona će se primjenjivati u onim situacijama koje zahtijevaju što potpunije razdvajanje dvojne smjese na njezine sastojke. Sastoji se od kolone za iscrpljivanje na koju je nadograđena kolona za jačanje bez kotlića.




**Slika 10. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram spojene kolone [3]**

Komina $F_{\mathrm{m}}$ dovodi se masenim tokom $q_{\mathrm{mm}}$ u rektifikacijski aparat na mjestu gdje prestaje dio kolone za iscrpljivanje i počinje onaj za jačanje. Na mjestu dovoda komine ona se miješa s refluksom kolone za jačanje $F_{\mathrm{o}}$ koji dolazi odozgo te ta mješavina predstavlja početnu oborinu $F_{\mathrm{oi}}$ na najgornjoj plitici kolone za iscrpljivanje. Iz dijela za iscrpljivanje dolazi para $D_{\mathrm{o}}$ kojom

se napaja dio kolone za jačanje, a to znači da kolona za iscrpljivanje zamjenjuje kotlić kolone za jačanje. Za pogon spojene kolone troši se toplina $\Phi_i$ u kojem vrije džibra stanja $F_s$. Ona se iz kotlića odvodi masenim tokom $q_{ms}$ i koncentracijom $\xi_s$, a sadržaj kotlića se održava dotokom oborine iste koncentracije. Vrh kolone odaje destilat stanja $D_g$ s masenim tokom $q_{mg}$ i koncentracijom $\xi_g$ što je rezultat razmješavanja u deflegmatoru spojene kolone.

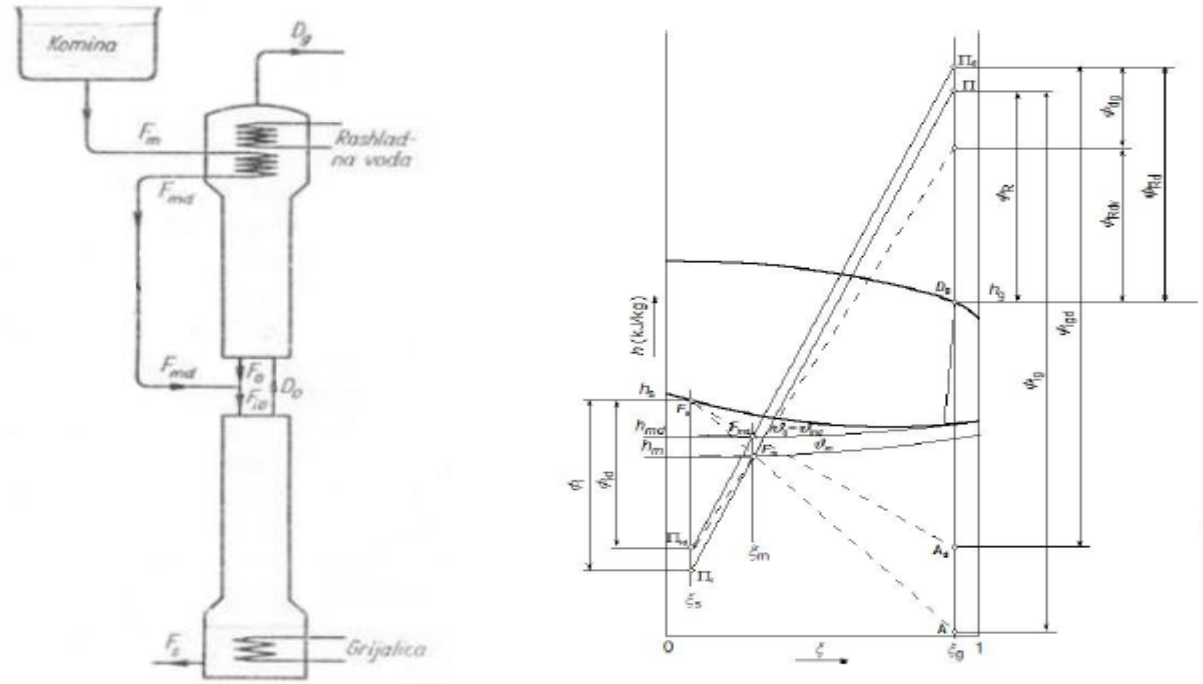
Postavljanjem masenih i energetskih bilanci oko pojedinih dijelova spojene kolone te daljnjim sređivanjem tih jednadžbi dobije se:

$$\frac{\phi_i-(h_s-h_m)}{\xi_m-\xi_s}=\frac{h_g+\phi_r-h_m}{\xi_g-\xi_m}\,. \tag{9}$$

Izraz (9) predstavlja jednadžbu glavne presječnice spojene kolone koja u *h*-$\xi$ dijagramu prolazi stanjem $F_m$ i kroz pripadajuće polove razlučivanja $\pi$ i $\pi_i$.

### 2.4.4. Štednja energije – hlađenje deflegmatora kominom

Temperatura komine na ulazu u kolonu utječe na utrošak pogonske topline pa je jasno da će biti povoljno da komina ima što višu temperaturu. Toplina za grijanje kotlića biti će manja što je stanje komine $F_m$ bliže liniji vrenja, a jedan od načina da se to ostvari je hlađenje deflegmatora kominom.




**Slika 11. Shematski prikaz i *h*-$\xi$ dijagram predgrijavanja komine u deflegmatoru [3]**

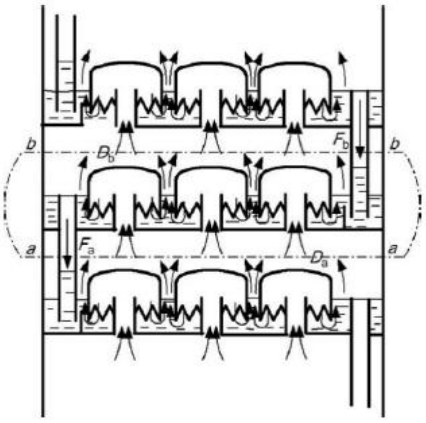
Komina $F_m$ temperature $\vartheta_m$ se prije ulaska u kolonu dovodi do deflegmatora pri čemu se stanje komine pomiče u $F_{md}$ s pripadajućom temperaturom $\vartheta_{md}$. To omogućuje da se pol razlučivanja $\pi_i$ također pomakne u $\pi_{id}$, a time se toplina za grijanje kotlića smanjuje s $\phi_i$ na $\phi_{id}$. Time se također i pol $\pi$ pomiče u $\pi_d$, ali se istodobno točka A premješta u $A_d$, što u konačnici ipak potrebnu toplinu za grijanje kotlića svedenu na kilogram destilata smanjuje na $\phi_{igd}$.

U deflegmatoru se svakom kilogramu komine predaje toplina $\phi_d$:

$$\phi_d = h_{md} - h_m. \tag{10}$$

### 2.4.5. Određivanje broja plitica prema McCabeu i Thieleu

Postupak određivanja teorijskog broja plitica prema McCabeu i Thieleu temelji se na konstrukciji u dijagramu ravnotežnih molnih koncentracija pare $\psi_D$ i kapljevine $\psi_F$ za dvojnu smjesu. Osnovne pretpostavke McCabe-Thieleove metode su usporednost linija vrenja i rošenja u pripadajućem *h*-$\psi$ dijagramu, odnosno konstantnost tokova oborine i pare na svim pliticama kolone te konstantnost tlaka tijekom procesa separacije smjese.




**Slika 12. Plitice sa zvonima [3]**

Ukoliko se postavi molna bilanca za proizvoljnu pliticu prema [Slika 12] i molna bilanca za gornju pliticu kolone za jačanje prema [Slika 8] te uvedu navedene pretpostavke uz sređivanje jednadžbi, dobije se:

$$\psi_D = \frac{q_{ng}}{q_{ng}+q_{nF}}\psi_g + \frac{q_{nF}}{q_{ng}+q_{nF}}\psi_F\,. \tag{11}$$

Uvođenjem specifičnog molnog toka oborine, odnosno refluksa:

$$\varphi_{\mathrm{R}} = \frac{q_{\mathrm{nF}}}{q_{\mathrm{ng}}}\,, \tag{12}$$

te uvrštavanjem (12) u (11) i sređivanjem jednadžbe, dobije se:

$$\psi_{\mathrm{D}} = \frac{1}{1+\varphi_{\mathrm{R}}}\psi_{\mathrm{g}} + \frac{\varphi_{\mathrm{R}}}{1+\varphi_{\mathrm{R}}}\psi_{\mathrm{F}}\,. \tag{13}$$

Izraz (13) opisuje stanja uzlazne pare i silazne kapljevine na presjecima kolone za jačanje i naziva se pravac jačanja. U $\psi_{\mathrm{D}}$ - $\psi_{\mathrm{F}}$ dijagramu ima odsječak $\psi_{\mathrm{g}}/(1+\varphi_{\mathrm{R}})$, a koeficijent smjera mu je $\varphi_{\mathrm{R}}/(1+\varphi_{\mathrm{R}})$.

Za donji dio kolone, dakle onaj za iscrpljivanje, vrijede jednadžbe analogne izrazima za kolonu za jačanje. Pri tome treba imati u vidu da u koloni za iscrpljivanje postoji konstantni višak silazne kapljevine za razliku od kolone za jačanje, gdje je konstantan višak uzlazne pare.

Ukoliko se postavi molna bilanca za proizvoljnu pliticu prema [Slika 12] i molna bilanca za odabranu pliticu kolone za iscrpljivanje prema [Slika 9] te uvedu navedene pretpostavke uz sređivanje jednadžbe, dobije se:

$$\psi_{\mathrm{D}} = \frac{q_{\mathrm{nD}}+q_{\mathrm{ns}}}{q_{\mathrm{nD}}}\psi_{\mathrm{F}} - \frac{q_{\mathrm{ns}}}{q_{\mathrm{nD}}}\psi_{\mathrm{s}}\,. \tag{14}$$

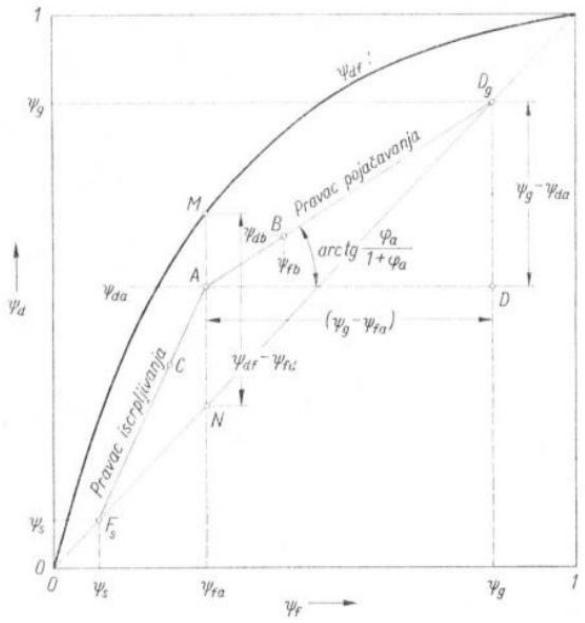
Uvođenjem specifičnog molnog toka pare:

$$\varphi_{\mathrm{D}} = \frac{q_{\mathrm{nD}}}{q_{\mathrm{nF}}} = \frac{q_{\mathrm{nD}}}{q_{\mathrm{nD}}+q_{\mathrm{ns}}}\,, \tag{15}$$

te uvrštavanjem (15) u (14) i sređivanjem jednadžbe dobije se:

$$\psi_{\mathrm{D}} = \frac{1}{\varphi_{\mathrm{D}}}\psi_{\mathrm{F}} - \frac{1-\varphi_{\mathrm{D}}}{\varphi_{\mathrm{D}}}\psi_{\mathrm{s}}\,. \tag{16}$$

Izraz (16) opisuje stanja uzlazne pare i silazne kapljevine na presjecima kolone za iscrpljivanje i naziva se pravac iscrpljivanja. U $\psi_{\mathrm{D}}$ - $\psi_{\mathrm{F}}$ dijagramu ima odsječak $\psi_{\mathrm{s}}(\varphi_{\mathrm{D}}-1)/\varphi_{\mathrm{D}}$, a koeficijent smjera mu je $1/\varphi_{\mathrm{D}}$.




**Slika 13. Pravac jačanja i pravac iscrpljivanja u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu [1]**

Nakon ucrtavanja pravaca iscrpljivanja i jačanja u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagram moglo bi se pristupiti određivanju teorijskog broja plitica. Pri tome bi sjecište pravca iscrpljivanja s pravcem jačanja predstavljalo stanje na plitici na kojoj se dovodi komina uz pretpostavku da komina ima upravo onaj sastav kakav ima i refluks s najdonje plitice kolone za jačanje. To međutim načelno neće biti tako pa se ucrtava dodatni pravac, tzv. pravac napajanja.

Ukoliko se postavi molna i energetska bilanca za pliticu na koju se dovodi komina uz dodatno sređivanje jednadžbe, dobije se izraz za pravac napajanja, a glasi:

$$\psi_{\mathrm{D}} = \frac{m}{m-1}\psi_{\mathrm{F}} - \frac{1}{m-1}\psi_{\mathrm{m}}\ , \tag{17}$$

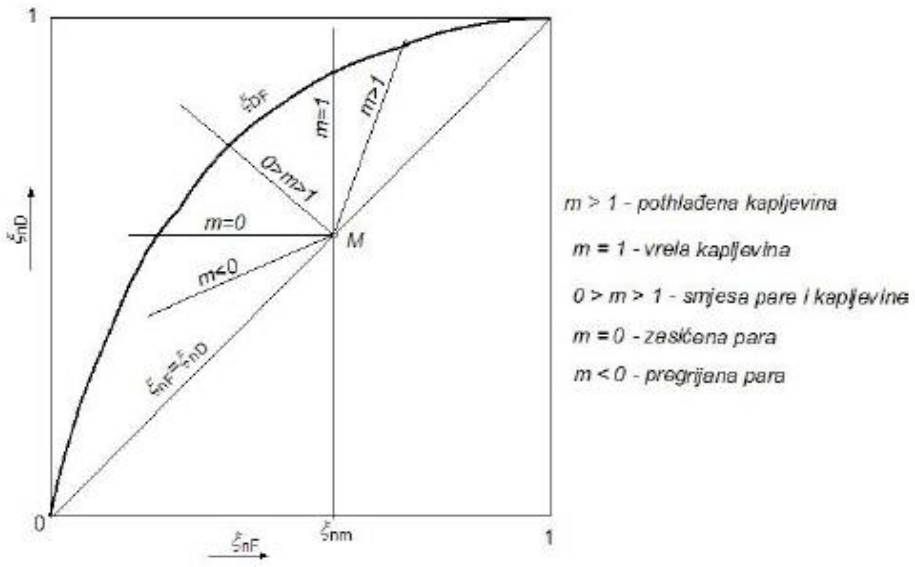
gdje *m* predstavlja karakteristiku komine koja se može prikazati preko razlike tokova kapljevite i parne faze iznad i ispod plitice napajanja:

$$m = \frac{\Delta q_{\mathrm{nF}}}{\Delta q_{\mathrm{nF}} - \Delta q_{\mathrm{nD}}}\ . \tag{18}$$

Karakteristika komine se također može prikazati preko razlika entalpija:

$$m = \frac{h_{\mathrm{D}} - h_{\mathrm{m}}}{h_{\mathrm{D}} - h_{\mathrm{F}}}\ . \tag{19}$$

Komina se u kolonu obično uvodi u kapljevitom stanju, pri čemu se može raditi o pothlađenoj ili vreloj kapljevini, no u nekim slučajevima će vrela kapljevina dolaziti s povišenim tlakom tako da će pri ulasku u kolonu djelomično ispariti. U nekim će postupcima biti smisleno kominu uvoditi u kolonu kao zasićenu ili pregrijanu paru. Za sve navedene slučajeve karakteristika komine će poprimati različite vrijednosti, a o tome će ovisiti smještaj pravca napajanja u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu.




**Slika 14. Pravac napajanja ovisno o vrsti komine u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu [3]**

Nakon definiranih jednadžbi pravaca jačanja, iscrpljivanja i napajanja može se konstruirati McCabe -Thieleov dijagram za određivanje teorijskog broja plitica u koloni.

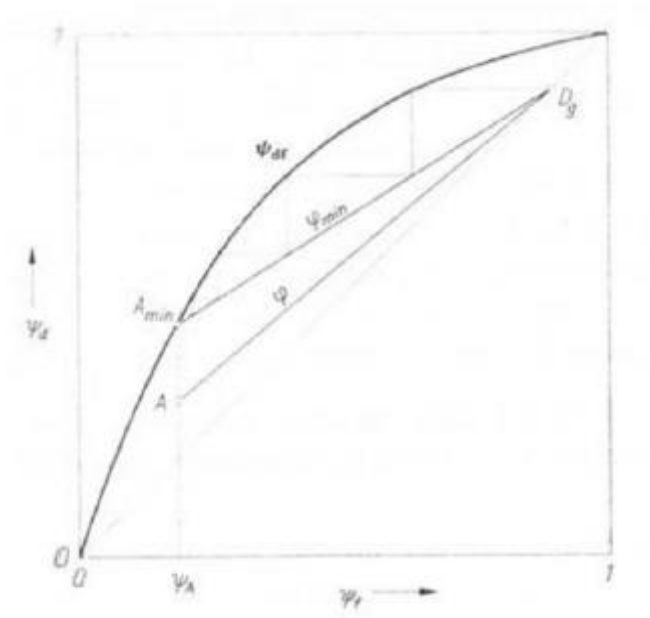
Najprije je potrebno u $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagramu ucrtati ravnotežnu krivulju $\psi_D = f(\psi_F)$ te pravac $\psi_D = \psi_F$. Zatim unosimo podatke o molnoj koncentraciji džibre, komine i destilata koji su obično unaprijed zadani i označujemo te točke na pravcu $\psi_D = \psi_F$. Određuje se karakteristika komine preko izraza (19) u kojemu se mogu uvesti iduće pretpostavke:

1. entalpija pare je približno jednaka entalpiji suhozasićene pare, $h_D \approx h_{szp}$;
2. entalpija kapljevine je približno jednaka entalpiji vrele kapljevine, $h_F \approx h_{vk}$,

te izraz (19) poprima sljedeći oblik:

$$m = \frac{h_{szp} - h_m}{h_{szp} - h_{vk}} . \qquad (20)$$

Sada kada je poznata vrijednost karakteristike komine može se ucrtati pravac napajanja u $\psi_D - \psi_F$ dijagram koristeći izraz (17). Na [Slika 15] ucrtan je pravac napajanja za $m = 1$ što prema [Slika 14] odgovara stanju vrele kapljevine. Nakon toga potrebno je povući pravac iz točke $D_g$ do sjecišta pravca napajanja s ravnotežnom krivuljom $\psi_D = f(\psi_F)$. Time smo dobili pravac jačanja za minimalni refluks $\varphi_{Rmin}$ kod kojega je utrošak topline najmanji, ali je broj potrebnih plitica postao beskonačan. Kako bi se dobio realni refluks uzima se 30% do 50% (100%) veća vrijednost od minimalnog pri čemu se smanjuje broj potrebnih plitica u koloni.




**Slika 15. Minimalni refluks [1]**

Poslije ucrtavanja pravca jačanja za realni refluks potrebno je spojiti točke $F_s$ i $M$ te se time dobije pravac iscrpljivanja. Nakon ucrtavanja pravaca napajanja, jačanja i iscrpljivanja može se početi s određivanjem teorijskog broja plitica u koloni.

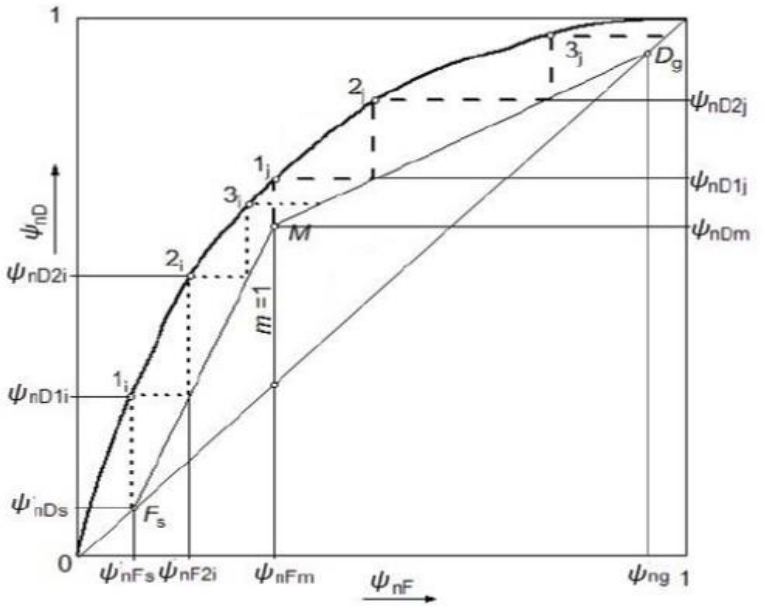
Stanje silazne oborine i uzlazne pare ispod prve plitice kolone za iscrpljivanje nalazi se na pravcu iscrpljivanja u točki $F_s$. Uzlazna para koju odaje vrela džibra u kotliću tada ima koncentraciju $\psi_{nDs}$. Ta će para na prvoj plitici u idealnom slučaju doći u ravnotežu s kapljevinom koja silazi s te plitice s koncentracijom $\psi_{nFs} = \psi_{nFi}$. Pri tome će postići koncentraciju $\psi_{nD1i}$ te će s njom krenuti prema sljedećoj plitici. U susret će joj s te iduće plitice dolaziti kapljevina koncentracije $\psi_{nF2i}$ pa će na sljedećoj plitici para postići koncentraciju $\psi_{nD2i}$. Jednake će se promjene događati i na svim daljnjim presjecima i pliticama kolone za iscrpljivanje. Ucrtavanja takvih stepenica započinje točkom $F_s$ , a završava onom stepenicom koja pogađa ili premašuje potrebnu koncentraciju.

Analogno postupku za kolonu iscrpljivanja određuje se i teorijski broj potrebnih plitica dijela za jačanje. Počinje se stanjem *M* na pravcu jačanja koji ovdje predstavlja stanje na presjeku spojene kolone između najgornje plitice dijela za iscrpljivanje i najdonje plitice kolone za jačanje. Koncentracija uzlazne pare prema prvoj plitici dijela za jačanje $\psi_{nDm}$ će u idealnom slučaju moći doći u ravnotežu s oborinom koncentracije $\psi_{nFm} = \psi_{nF1j}$ i pri tome postići koncentraciju $\psi_{nD1j}$. Na jednak način postizat će se ravnotežna stanja $2_j$, $3_j$ itd. i na sljedećim pliticama dijela za jačanje pri čemu svaka stepenica predstavlja jednu pliticu kolone za jačanje. Konstrukcija se ponavlja dok koncentracija para plitice ne dostigne ili premaši traženu koncentraciju destilata $\psi_g$.

Pri razmotrenom vođenju i intenzivnom komešanju kapljevine na pliticama neke kolone njihov stvarni broj n mora biti veći od teorijskog $n_t$. Razlog je u tome što se ravnoteža pare i kapljevine ne može ostvariti na plitici zbog kratkotrajnog dodira, jer površinski sloj kapljevine ima drukčiji sastav od dubinske kapljevine. Zbog navedenog razloga uvodi se stupanj iskoristivosti plitice:

$$\eta = \frac{n_t}{n_s}, \tag{21}$$

pri čemu je $n_t$ teorijski broj plitica, a $n_s$ realni broj plitica u koloni. Vrijednost stupnja iskoristivosti plitice kreće se od 0,3 do 0,8 ovisno o konstrukciji plitice i samog zvona te načina vođenja faza kroz pliticu.




**Slika 16. Teorijski broj plitica prema McCabe – Thieleu [3]**

# 3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN REKTIFIKACIJSKE KOLONE S UREĐAJEM ZA POVRAT TOPLINE

U ovom poglavlju će se određivati dimenzije štedne grijalice pri različitim temperaturama komine prije ulaska u kolonu i broj plitica. Proces separacije smjese etanol – voda vodi se na atmosferskom tlaku ($p \approx 1{,}013$bar), a provodi se kontinuiranim destilacijskim postupkom zbog jednostavnijeg opisivanja procesa matematičkim modelom. Karakteristike i izračunate vrijednosti etanola će se označavati s indeksom '2', a vodu indeksom '1'.

## 3.1. Proračun potrebnih vrijednosti

Zadane vrijednosti:

- Minimalni maseni udio etanola u proizvodu, $\xi_{gmin} = 76$ %
- Maseni protok komine, $q_{mm} = 5000$ kg/h
- Početna temperatura komine, $\vartheta_{m1} = 15$ °C
- Volumni udio etanola u komini, $\xi_V = 15$ %

Očitane vrijednosti:

- Molarna masa vode, $M_1 = 18{,}02$ kg/kmol [5]
- Molarna masa etanola, $M_2 = 46{,}07$ kg/kmol [10]
- Temperatura zasićenja vode pri atmosferskom tlaku, $\vartheta'_{s1} = 99{,}61$ °C [5]
- Temperatura zasićenja etanola pri atmosferskom tlaku, $\vartheta'_{s2} = 77{,}5$ °C [10]
- Specifična toplina isparivanja vode, $r_1 = 2257$ kJ/kg [5]
- Specifična toplina isparivanja etanola, $r_2 = 838$ kJ/kg [10]
- Opća plinska konstanta, $R_m = 8{,}314$ kJ/(kmol K) [5]
- Gustoća vode za temperaturu $\vartheta = 15$ °C, $\rho_1 = 999{,}1$ kg/m$^3$ [5]
- Gustoća etanola za temperaturu $\vartheta = 15$ °C, $\rho_2 = 793{,}7$ kg/m$^3$ [5]

Odabrane vrijednosti za proračun:

- Maseni udio etanola u proizvodu, $\xi_g = 78$ %
- Maseni udio etanola u džibri, $\xi_s = 0{,}6$ %

Koristeći jednadžbu (6) može se izračunati maseni udio etanola u komini:

$$\xi_{\mathrm{m}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\xi_{\mathrm{V}}}-1\right)\frac{\rho_1}{\rho_1}+1} = 0{,}12295 \text{ kg/kg.}$$

Preko izraza (4) i njegovim sređivanjem može se izračunati molni udio etanola u komini:

$$\psi_{\mathrm{m}} = \frac{\xi_{\mathrm{m}}}{\frac{M_2}{M_1}(1-\xi_{\mathrm{m}})+\xi_{\mathrm{m}}} = 0{,}05198 \text{ kmol/kmol.}$$

Ukoliko se postavi masena bilanca oko spojene kolone prema [Slika 10] mogu se dobiti maseni protoci destilata (proizvoda) i džibre.

Maseni protok destilata se računa prema sljedećem izrazu:

$$q_{\mathrm{mg}} = q_{\mathrm{mm}} \frac{\xi_{\mathrm{m}}-\xi_{\mathrm{s}}}{\xi_{\mathrm{g}}-\xi_{\mathrm{s}}} = 755{,}516 \text{ kg/h,}$$

a maseni protok džibre:

$$q_{\mathrm{ms}} = q_{\mathrm{mm}} - q_{\mathrm{mg}} = 4244{,}48 \text{ kg/h.}$$

Koristeći izraz (4) može se doći do molnog udjela etanola u destilatu:

$$\psi_{\mathrm{g}} = \frac{\xi_{\mathrm{g}}}{\frac{M_2}{M_1}(1-\xi_{\mathrm{g}})+\xi_{\mathrm{g}}} = 0{,}58103 \text{ kmol/kmol.}$$

Također se koristeći (4) izračuna molni udio etanola u džibri:

$$\psi_{\mathrm{s}} = \frac{\xi_{\mathrm{s}}}{\frac{M_2}{M_1}(1-\xi_{\mathrm{s}})+\xi_{\mathrm{s}}} = 0{,}00236 \text{ kmol/kmol.}$$

Molarne mase računaju se preko iduće jednakosti:

$$M = \psi M_2 + (1-\psi)M_1. \qquad (22)$$

Molarna masa komine dobije se preko (22):

$$M_{\mathrm{m}} = \psi_{\mathrm{m}} M_2 + (1-\psi_{\mathrm{m}})M_1 = 19{,}478 \text{ kg/kmol.}$$

Molarna masa destilata dobije se preko (22):

$$M_{\mathrm{g}} = \psi_{\mathrm{g}} M_2 + (1 - \psi_{\mathrm{g}}) M_1 = 34{,}318 \text{ kg/kmol.}$$

Molarna masa džibre dobije se preko (22):

$$M_{\mathrm{s}} = \psi_{\mathrm{s}} M_2 + (1 - \psi_{\mathrm{s}}) M_1 = 18{,}086 \text{ kg/kmol.}$$

Ukoliko se žele dobiti molni protoci koristi se sljedeći izraz:

$$q_{\mathrm{n}} = \frac{q_{\mathrm{m}}}{M} . \tag{23}$$

Molni protok komine dobije se preko (23):

$$q_{\mathrm{nm}} = \frac{q_{\mathrm{mm}}}{M_{\mathrm{m}}} = 256{,}698 \text{ kmol/h.}$$

Molni protok destilata dobije se preko (23):

$$q_{\mathrm{ng}} = \frac{q_{\mathrm{mg}}}{M_{\mathrm{g}}} = 22{,}015 \text{ kmol/h.}$$

Molni protok džibre dobije se preko (23):

$$q_{\mathrm{ns}} = \frac{q_{\mathrm{ms}}}{M_{\mathrm{s}}} = 234{,}683 \text{ kmol/h.}$$

**Tablica 1. Prikaz potrebnih vrijednosti za kominu, destilat i džibru**

| | Maseni protok [kg/h] | Molni protok [kmol/h] | Maseni udio etanola [kg/kg] | Molni udio etanola [kmol/kmol] |
|---|---|---|---|---|
| Komina | 5000 | 256,698 | 0,12295 | 0,05198 |
| Destilat | 755,516 | 22,015 | 0,78 | 0,58103 |
| Džibra | 4244,48 | 234,683 | 0,6 | 0,00236 |

## 3.2. Određivanje dimenzija štedne grijalice

U ovom poglavlju će se određivati dimenzije (površina i duljina) štedne grijalice, odnosno deflegmatora za tri različita slučaja tj. varirat će se tri različite temperature komine prije ulaska u kolonu. U prvom slučaju će temperaturna razlika između početne temperature komine i temperature komine nakon prolaza kroz deflegmator iznositi 10 °C, u drugom slučaju 25 °C, a u trećem će biti 45 °C.

Uvode se neke pretpostavke koje će nam pojednostaviti daljnji proračun, a one glase:

- u deflegmator ulazi suhozasićena para destilata;
- iz deflegmatora refluks i konačni proizvod izlaze kao vrela kapljevina.

Entalpija kapljevine računa se prema sljedećem izrazu:

$$h_{\mathrm{F}} = h_1(1-\xi) + h_2\xi + q_{\mathrm{t}}, \qquad (24)$$

pri čemu je $q_t$ izotermna toplina mješanja, a $h_1$ i $h_2$ su entalpije čiste tvari (etanola i vode).

**Tablica 2. Izotermne topline mješanja u ovisnosti o temperaturi i masenoj koncentraciji**

| ϑ; °C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ; kg/kg | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -28,5 | -25,5 | -22,4 | -19,3 | -16,2 | -13 | -9,8 | -6,6 | -3,3 | 0 | 3,3 |
| 0,2 | -44 | -38,9 | -33,8 | -28,8 | -23,8 | -18,8 | -13,9 | -9 | -4,2 | 0,6 | 5,3 |
| 0,3 | -51,1 | -44,6 | -38,2 | -32 | -25,8 | -19,7 | -13,7 | -7,9 | -2,1 | 3,6 | 9,1 |
| 0,4 | -44,8 | -39,5 | -34 | -28,4 | -22,6 | -16,7 | -10,6 | -4,3 | 2,1 | 8,7 | 15,4 |
| 0,5 | -36 | -31,8 | -27,2 | -22,4 | -17,2 | -11,7 | -5,9 | 0,2 | 6,7 | 13,5 | 20,6 |
| 0,6 | -28,1 | -24,1 | -19,8 | -15,3 | -10,5 | -5,4 | -0,1 | 5,5 | 11,3 | 17,4 | 23,7 |
| 0,7 | -20,5 | -16,5 | -12,4 | -8,2 | -3,9 | 0,4 | 4,8 | 9,3 | 13,8 | 18,4 | 23,1 |
| 0,8 | -14,2 | -10,1 | -6,3 | -2,7 | 0,7 | 3,8 | 6,7 | 9,3 | 11,7 | 13,9 | 15,8 |
| 0,9 | -7,5 | -5,2 | -3,1 | -1,1 | 0,8 | 2,5 | 4,1 | 5,5 | 6,7 | 7,8 | 8,8 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Entalpija suhozasićene pare računa se preko jednadžbe pravca u *h*-$\xi$ dijagramu, a izraz glasi:

$$h_{\mathrm{D}} = \left[\left(c_{\mathrm{f2}}\vartheta'_{\mathrm{s2}} + r_2 + c_{\mathrm{p2}}(\vartheta - \vartheta'_{\mathrm{s2}})\right) - \left(c_{\mathrm{f1}}\vartheta'_{\mathrm{s1}} + r_1 + c_{\mathrm{p1}}(\vartheta - \vartheta'_{\mathrm{s1}})\right)\right]\xi + c_{\mathrm{f1}}\vartheta'_{\mathrm{s1}} + r_1 + c_{\mathrm{p1}}(\vartheta - \vartheta'_{\mathrm{s1}}), \quad (25)$$

pri čemu su $\vartheta'_{\mathrm{s1}}$ i $\vartheta'_{\mathrm{s2}}$ temperature zasićenja etanola i vode, $c_{\mathrm{f}}$ je specifični toplinski kapacitet kapljevine, $c_{\mathrm{p}}$ specifični toplinski kapacitet pare, a $\vartheta$ je temperatura smjese.

Sada slijedi određivanje unutarnjeg (na strani komine) i vanjskog (na strani destilata) koeficijenta prijelaza topline. Na unutarnjoj stijenki cijevi dešava se prisilna konvekcija tj. strujanje komine unutar horizontalne cijevi, a na vanjskoj se vrši kondenzacija suhozasićene pare.

**Postupak određivanja unutarnjeg koeficijenta prijelaza topline:**

Srednja logaritamska temperatura:

$$\Delta\vartheta_{\mathrm{m}} = \frac{\Delta t_{\mathrm{v}} - \Delta t_{\mathrm{m}}}{\ln(\frac{\Delta t_{\mathrm{v}}}{\Delta t_{\mathrm{m}}})}, \quad (26)$$

pri čemu su $\Delta t_{\mathrm{v}}$ i $\Delta t_{\mathrm{m}}$ veća i manja temperaturna razlika između ulazne i izlazne temperature komine i temperature kondenzacije destilata.

Idući korak jest pretpostavka brzine strujanja komine unutar horizontalnih cijevi te odabir promjera i materijala cijevi iz [11]. Pretpostavljene brzine strujanja kreću se u rasponu 0,5 – 1,2 m/s.

Površina cijevi:

$$A_{\mathrm{C}} = \frac{{d_{\mathrm{u}}}^2\pi}{4}, \quad (27)$$

gdje je $d_{\mathrm{u}}$ unutarnji promjer cijevi.

Srednja temperatura komine:

$$\vartheta_{\mathrm{m}} = \frac{\vartheta'_{\mathrm{m}} + \vartheta''_{\mathrm{m}}}{2}, \quad (28)$$

pri čemu je $\vartheta'_{\mathrm{m}}$ ulazna, a $\vartheta''_{\mathrm{m}}$ izlazna temperatura komine. Svojstva komine očitavaju se iz [Tablica 3] za srednju temperaturu.

Svojstva kapljevite smjese etanol – voda (za $p \approx 1{,}013\text{bar}$), kao što su gustoća, toplinska provodnost i dinamička viskoznost koje će se koristiti u daljnjem proračunu dobiju se preko približnih formula koje glase:

$$\ln \rho_s = (1-\xi)\ln\rho_1 + \xi\ln\rho_2 - 30{,}808\left[\frac{(1-\xi)\xi}{T}\right] - 18{,}274\left[\frac{(1-\xi)\xi((1-\xi)-\xi)}{T}\right] + 13{,}890\left[\frac{(1-\xi)\xi((1-\xi)-\xi)^2}{T}\right], \quad (29)$$

$$\ln \eta_s = (1-\xi)\ln\eta_1 + \xi\ln\eta_2 + 724{,}652\left[\frac{(1-\xi)\xi}{T}\right] + 729{,}357\left[\frac{(1-\xi)\xi((1-\xi)-\xi)}{T}\right] + 976{,}05\left[\frac{(1-\xi)\xi((1-\xi)-\xi)^2}{T}\right], \quad (30)$$

$$\lambda_s = (1-\xi)\lambda_1 + \xi\lambda_2 - (\lambda_1 - \lambda_2)(1-\sqrt{(1-\xi)})(1-\xi). \quad (31)$$

Očitavajući svojstva kapljevine iz [5] i [10] za vodu i etanol te uvrštavanjem u jednadžbe (29), (30) i (31) dobiju se sljedeći podaci:

**Tablica 3. Prikaz toplinskih svojstva kapljevite smjese etanol-voda**

| Temperatura [°C] | Gustoća [kg/m$^3$] | Toplinska provodnost [W/(m K)] | Dinamička viskoznost*10$^6$ [Pas] |
|---|---|---|---|
| 20 | 824,1989 | 0,2223 | 1710,108 |
| 30 | 816,7163 | 0,2222 | 1419,547 |
| 40 | 809,0659 | 0,222 | 1152,015 |
| 50 | 801,2736 | 0,2216 | 898,663 |
| 60 | 793,2949 | 0,2209 | 762,577 |
| 70 | 784,6078 | 0,2209 | 649,948 |
| 80 | 775,513 | 0,2207 | 559,758 |

Zatim se određuje broj cijevi N, no radi se o teorijskom broju koji je potrebno uvećati ovisno o postavljenom rasporedu unutar izmjenjivača topline, ali konstrukcija štedne grijalice nije tema ovog rada pa će se stvarni broj cijevi odrediti tako da se uzme približan iznos. Uz poznatu vrijednost stvarnog broja cijevi, može se odrediti stvarna brzina komine, Reynoldsov i Nusseltov broj, a tada i unutarnji koeficijent topline.

Broj cijevi:

$$N = \frac{q_{\mathrm{mm}}}{\rho_{\mathrm{m}} w_{\mathrm{pret}} A_{\mathrm{C}}}\,. \tag{32}$$

Stvarna brzina komine:

$$w_{\mathrm{u}} = \frac{q_{\mathrm{mm}}}{\rho_{\mathrm{m}} N_{\mathrm{s}} A_{\mathrm{C}}}\,, \tag{33}$$

pri čemu je $N_{\mathrm{s}}$ stvarni broj cijevi.

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w_{\mathrm{u}} \rho_{\mathrm{m}} d_{\mathrm{u}}}{\eta_{\mathrm{m}}}\,. \tag{34}$$

Nusseltov broj:

$$Nu = \frac{0{,}0398 Pr Re^{0{,}75}}{1+1{,}74 Re^{-0{,}125}(Pr-1)}\,, \tag{35}$$

oznaka *Pr* označuje Prandtlov broj koji ovisi o toplinskim svojstvima kapljevine.

Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{u}} = \frac{Nu \lambda_{\mathrm{m}}}{d_{\mathrm{u}}}\,. \tag{36}$$

pri čemu je $\lambda_{\mathrm{m}}$ toplinska provodnost komine.

**Postupak određivanja vanjskog koeficijenta prijelaza topline:**

Koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji pare na vanjskoj stijenki cijevi određuje se iterativnim postupkom. Pretpostavi se temperatura vanjske stijenke cijevi te se s tom temperaturom ulazi u proračun za koeficijent prijelaza topline. Zatim se odredi toplinski tok po jedinici duljine, a iz njega se dobije nova temperatura stijenke. Postupak se ponavlja dok se ne dobije konstanta temperatura vanjske stijenke cijevi.

U sljedećim jednadžbama pojavljuju se fizikalna svojstva nastalog kondenzata, a uzimaju se za srednju temperaturu $\vartheta_{\mathrm{m}} = (\vartheta_{\mathrm{d}} + \vartheta_{\mathrm{sv}})/2$.

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi:

$$\alpha_{\mathrm{v}} = \sqrt[4]{\frac{\rho_{\mathrm{k}}^2 \lambda_{\mathrm{k}}^3 g \Delta h}{4\eta_{\mathrm{k}}(\vartheta_{\mathrm{d}} - \vartheta_{\mathrm{sv}}) d_{\mathrm{v}}}}\,, \tag{37}$$

indeks *k* uz svojstva označuje da se radi o kondenzatu, *g* je koeficijent Zemljine sile teže koji iznosi 9,80665 m/s$^2$ , $\vartheta_{\mathrm{d}}$ je temperatura destilata tj. temperatura zasićenja, $\vartheta_{\mathrm{sv}}$ je temperatura stijenke, a $d_{\mathrm{v}}$ vanjski promjer cijevi.

Toplinski tok po jedinici duljine:

$$\phi_{\mathrm{L}} = \frac{2\pi\Delta\vartheta_{\mathrm{m}}}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{u}} r_{\mathrm{u}}} + \frac{1}{\lambda_{\check{\mathrm{c}}}} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{v}}}{r_{\mathrm{u}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{v}} r_{\mathrm{v}}}}\,, \tag{38}$$

pri čemu se $\lambda_{\check{\mathrm{c}}}$ odnosi na toplinsku provodnost čelika i iznosi 58 W/(m K), a $r_{\mathrm{u}}$ i $r_{\mathrm{v}}$ su unutarnji te vanjski polumjeri cijevi.

Temperatura vanjske stijenke:

$$\vartheta_{sv} = \vartheta_{\mathrm{d}} - \frac{\phi_{\mathrm{L}}}{2\pi r_{\mathrm{v}} \alpha_{\mathrm{v}}}\,. \tag{39}$$

**Postupak određivanja površine i duljine štedne grijalice**

Koeficijent prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu:

$$k_{\mathrm{v}} = \frac{1}{\frac{r_{\mathrm{v}}}{\alpha_{\mathrm{u}} r_{\mathrm{u}}} + \frac{r_{\mathrm{v}}}{\lambda_{\check{\mathrm{c}}}} \ln\left(\frac{r_{\mathrm{v}}}{r_{\mathrm{u}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{v}}}}\,. \tag{40}$$

Površina štedne grijalice:

$$A_{\mathrm{g}} = \frac{\Phi_{\mathrm{d}}}{k_{\mathrm{v}} \Delta\vartheta_{\mathrm{m}}}\,. \tag{41}$$

Duljina štedne grijalice:

$$L_{\mathrm{g}} = \frac{A_{\mathrm{g}}}{d_{\mathrm{v}} P N_{\mathrm{s}} \pi}\,, \tag{42}$$

pri čemu je *P* broj prolaza, a u ovom radu uzima se *P* = 2.

### 3.2.1. Prvi slučaj

Temperaturna razlika između početne temperature komine i temperature komine nakon štedne grijalice je 10 °C. Temperature destilata i džibre dobiju se interpolacijom podataka za liniju vrenja i liniju rošenja iz [10]:

$\vartheta_d$ = 79,239 °C ,

$\vartheta_s$ = 99,03 °C.

Očitane vrijednosti za proračun potrebnih entalpija:

- Spec. top. kap. vode pri 15 °C, $c_{pw1}$ = 4,1894 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 15 °C, $c_{pe1}$ = 2,45 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. vode pri 25 °C, $c_{pw2}$ = 4,1822 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 25 °C, $c_{pe2}$ = 2,57 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za 15 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -26,8 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za 25 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -23.25 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{p1}$ = 2,01 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{f1}$ = 4,195 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{p2}$ = 1,809 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{f2}$ = 3,18 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 79,239 °C i $\xi_g$ = 0,78 kg/kg, $q_t$ = 11,905 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 99,03 °C i $\xi_s$ = 0,006 kg/kg, $q_t$ = 0 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap vode pri temp. džibre, $c_{ps1}$ = 4,2106 kJ/k(kgK) [5]
- Spec. top. kap etanola pri temp. džibre, $c_{ps2}$ = 3,44 kJ/(kg K) [14]

Proračun entalpija:

- Entalpija komine prije deflegmatora (24), $h_{m1}$ = 32,83301 kJ/kg
- Entalpija komine nakon deflegmatora (24), $h_{m2}$ = 76,34934 kJ/kg
- Entalpija suhozasićene pare destilata (25), $h_g$ = 1427,787 kJ/kg

- Entalpija džibre (24), $h_s$ = 416,5178 kJ/kg
- Entalpija vrele kapljevine destilata, (24), $h_{vk}$ = 281,5791 kJ/kg

Sada se može izračunati toplinski tok koji komina prima u deflegmatoru:

$$\Phi_d = q_{mm}(h_{m2} - h_{m1}) = 60{,}43935 \text{ kW}.$$

Proračun unutarnjeg koef. prijelaza topline:

- Srednja log. temperatura (26), $\Delta\vartheta_m$ = 54,08501 °C
- Promjer cijevi i pretpostavljena brzina strujanja, $d_u$ = 16 mm i $w_{pret}$ = 0,8 m/s
- Površina (27), $A_C$ = 0,000201 m$^2$
- Srednja temperatura za koju se očitavaju svojstva (28), $\vartheta_m$ = 20 °C
- Broj cijevi (32), $N$ = 10,48
- Stvarni broj cijevi, $N_s$ = 11
- Brzina strujanja komine (33), $w_u$ = 0,761926 m/s
- Reynoldsov broj (34), $Re$ = 5875,454
- Nuseltsov broj (35), $Nu$ = 44,48882
- Koeficijent prijelaza topline na strani komine (36), $\alpha_u$ = 618,1165 W/(m$^2$ K)

Proračun vanjskog koef. prijelaza topline:

- Razlika entalpija, $\Delta h$ = 1146,208 kJ/kg
- Temperatura vanjske stijenke (39), $\vartheta_{sv}$ = 72,5169 °C
- Toplinski tok po jed. duljine (38), $\phi_L$ = 1596,927 W/m
- Koeficijent prijelaza topline na strani destilata (37), $\alpha_v$ = 3780,779 W/(m$^2$ K)

Proračun površine i duljine štedne grijalice:

- Koef. prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu (40), $k_v$ = 430,0629 W/(m$^2$ K)
- Površina štedne grijalice (41), $A_g$ = 2,378015 m$^2$
- Duljina štedne grijalice (42), $L_g$ = 1,720331 m

### 3.2.2. Drugi slučaj

Temperaturna razlika između početne temperature komine i temperature komine nakon štedne grijalice je 25 °C. Temperature destilata i džibre dobiju se interpolacijom podataka za liniju vrenja i liniju rošenja iz [10]:

$\vartheta_d$ = 79,239 °C ,

$\vartheta_s$ = 99,03 °C.

Očitane vrijednosti za proračun potrebnih entalpija:

- Spec. top. kap. vode pri 15 °C, $c_{pw1}$ = 4,1894 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 15 °C, $c_{pe1}$ = 2,45 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. vode pri 40 °C, $c_{pw2}$ = 4,1788 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 40 °C, $c_{pe2}$ = 2,7046 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za 15 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -26,8 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za 40 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -17,944 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{p1}$ = 2,01 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{f1}$ = 4,195 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{p2}$ = 1,809 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{f2}$ = 3,18 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 79,239 °C i $\xi_g$ = 0,78 kg/kg, $q_t$ = 11,905 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 99,03 °C i $\xi_s$ = 0,006 kg/kg, $q_t$ = 0 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap vode pri temp. džibre, $c_{ps1}$ = 4,2106 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap etanola pri temp. džibre, $c_{ps2}$ = 3,44 kJ/(kg K) [14]

Proračun entalpija:

- Entalpija komine prije deflegmatora (24), $h_{m1}$ = 32,83301 kJ/kg
- Entalpija komine nakon deflegmatora (24), $h_{m2}$ = 141,9577 kJ/kg
- Entalpija suhozasićene pare destilata (25), $h_g$ = 1427,787 kJ/kg

- Entalpija džibre (24), $h_s$ = 416,5178 kJ/kg
- Entalpija vrele kapljevine destilata, (24), $h_{vk}$ = 281,5791 kJ/kg

Sada se može izračunati toplinski tok koji komina prima u deflegmatoru:

$$\Phi_d = q_{mm}(h_{m2} - h_{m1}) = 151{,}562 \text{ kW}.$$

Proračun unutarnjeg koef. prijelaza topline:

- Srednja log. temperatura (26), $\Delta\vartheta_m$ = 50,71618 °C
- Promjer cijevi i pretpostavljena brzina strujanja, $d_u$ = 16 mm i $w_{pret}$ = 0,8 m/s
- Površina (27), $A_C$ = 0,000201 m$^2$
- Srednja temp. za koju se očitavaju svojstva (28), $\vartheta_m$ = 27,5 °C
- Broj cijevi (32), $N$ = 10,548
- Broj stvarnih cijevi, $N_s$ = 11
- Brzina strujanja komine (33), $w_u$ = 0,76715 m/s
- Reynoldsov broj (34), $Re$ = 6733,512
- Nuseltsov broj (35), $Nu$ = 49,93038
- Koeficijent prijelaza topline na strani komine (36), $\alpha_u$ = 693,4861 W/(m$^2$ K)

Proračun vanjskog koef. prijelaza topline:

- Razlika entalpija, $\Delta h$ = 1146,208 kJ/kg
- Temp. vanjske stijenke (39), $\vartheta_{sv}$ = 72,9604 °C
- Toplinski tok po jed. duljine (38), $\phi_L$ = 1516,644 W/m
- Koeficijent prijelaza topline na strani destilata (37), $\alpha_v$ = 3844,374 W/(m$^2$ K)

Proračun površine i duljine štedne grijalice:

- Koef. prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu (40), $k_v$ = 475,9455 W/(m$^2$ K)
- Površina štedne grijalice (41), $A_g$ = 6,278944 m$^2$
- Duljina štedne grijalice (42), $L_g$ = 4,5424 m

### 3.2.3. Treći slučaj

Temperaturna razlika između početne temperatura komine i temperature komine nakon štedne grijalice je 45 °C. Temperature destilata i džibre dobiju se interpolacijom podataka za liniju vrenja i liniju rošenja iz [10]:

$\vartheta_d$ = 79,239 °C ,

$\vartheta_s$ = 99,03 °C.

Očitane vrijednosti za proračun potrebnih entalpija:

- Spec. top. kap. vode pri 15 °C, $c_{pw1}$ = 4,1894 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 15 °C, $c_{pe1}$ = 2,45 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. vode pri 60 °C, $c_{pw2}$ = 4,1829 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri 60 °C, $c_{pe2}$ = 2,948 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za 15 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -26,8 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za 60 °C i $\xi$ = 0,122954 kg/kg, $q_t$ = -10,74 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{p1}$ = 2,01 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. vode pri temp. zasićenja, $c_{f1}$ = 4,195 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{p2}$ = 1,809 kJ/(kg K) [14]
- Spec. top. kap. etanola pri temp. zasićenja, $c_{f2}$ = 3,18 kJ/(kg K) [14]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 79,239 °C i $\xi_g$ = 0,78 kg/kg, $q_t$ = 11,905 kJ/kg [Tablica 2]
- Izotermna top. mj. za $\vartheta_s$ = 99,03 °C i $\xi_s$ = 0,006 kg/kg, $q_t$ = 0 kJ/kg [Tablica 2]
- Spec. top. kap vode pri temp. džibre, $c_{ps1}$ = 4,2106 kJ/(kg K) [5]
- Spec. top. kap etanola pri temp. džibre, $c_{ps2}$ = 3,44 kJ/(kg K) [14]

Proračun entalpija:

- Entalpija komine prije deflegmatora (24), $h_{m1}$ = 32,83301 kJ/kg
- Entalpija komine nakon deflegmatora (24), $h_{m2}$ = 231,1239 kJ/kg
- Entalpija suhozasićene pare destilata (25), $h_g$ = 1427,787 kJ/kg

- Entalpija džibre (24), $h_s$ = 416,5178 kJ/kg
- Entalpija vrele kapljevine destilata, (24), $h_{vk}$ = 281,5791 kJ/kg

Sada se može izračunati toplinski tok koji komina prima u deflegmatoru:

$$\Phi_d = q_{mm}(h_{m2} - h_{m1}) = 275{,}404 \text{ kW}.$$

Proračun unutarnjeg koef. prijelaza topline:

- Srednja log. temperatura (26), $\Delta\vartheta_m$ = 37,32361 °C
- Promjer cijevi i pretpostavljena brzina strujanja, $d_u$ = 16 mm i $w_{pret}$ = 0,8 m/s
- Površina (27), $A_C$ = 0,000201 m$^2$
- Srednja temp. za koju se očitavaju svojstva (28), $\vartheta_m$ = 37,5 °C
- Broj cijevi (32), $N$ = 10,6473
- Broj stvarnih cijevi, $N_s$ = 11
- Brzina strujanja komine (33), $w_u$ = 0,774347 m/s
- Reynoldsov broj (34), $Re$ = 8243,233
- Nuseltsov broj (35), $Nu$ = 59,18877
- Koeficijent prijelaza topline na strani komine (36), $\alpha_u$ = 821,4292 W/(m$^2$ K)

Proračun vanjskog koef. prijelaza topline:

- Razlika entalpija, $\Delta h$ = 1146,208 kJ/kg
- Temp. vanjske stijenke (39), $\vartheta_{sv}$ = 74,13445 °C
- Toplinski tok po jed. duljine (38), $\phi_L$ = 1297,503 W/m
- Koeficijent prijelaza topline na strani destilata (37), $\alpha_v$ = 4045,428 W/(m$^2$ K)

Proračun površine i duljine štedne grijalice:

- Koef. prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu (40), $k_v$ = 553,2798 W/(m$^2$ K)
- Površina štedne grijalice (41), $A_g$ = 13,33649 m$^2$
- Duljina štedne grijalice (42), $L_g$ = 9,64804 m

**Tablica 4. Dimenzije štedne grijalice u ovisnosti o temperaturi komine**

| Početna temperatura komine [°C] | Temperatura komine prije ulaska u kolonu [°C] | Površina štedne grijalice [$m^2$] | Duljina štedne grijalice [m] |
|---|---|---|---|
| 15 | 25 | 2,378015 | 1,720331 |
| 15 | 40 | 6,278944 | 4,5424 |
| 15 | 60 | 13,33649 | 9,64804 |

Mora se paziti na iznos temperature koju komina poprima nakon štedne grijalice jer se iz [Tablica 4] vidi da se s povećanjem temperature dobije porast površine i duljine štedne grijalice, a pri konstruiranju sustava destilacije mora se paziti da nam dimenzije štedne grijalice ne budu prevelike ovisno o raspoloživom prostoru za smještaj aparata. Odabrana temperatura komine prije ulaska u rektifikacijsku kolonu će iznositi $\vartheta''_m = 25$ °C te će se s daljnji proračun provoditi s dobivenim podacima na temelju te temperature.

### 3.3. Određivanje broja plitica u koloni

Proračun će se provoditi za tri različita iznosa refluksa s ciljem analize iznosa toplinskih tokova koji se dovode, odnose odvode od rektifikacijske kolone te potrošnju rashladnog i ogrjevnog medija. Postupak određivanja teorijskog broja plitica je objašnjen u poglavlju 2.4.5. te će se prema navedenim jednadžbama izračunati specifične vrijednosti koje su potrebne za konstrukciju $\psi_D$ - $\psi_F$ dijagrama, a vrijede za sva tri slučaja.

Karakteristika komine dobije se preko (20):

$$m = \frac{h_g - h_{m2}}{h_g - h_{vk}} = 1{,}179051.$$

Iznos min. refluksa dobije se iz jednadžbe (13) za $\psi_F = 0$ kmol/kmol i $\psi_D = 0{,}435$ kmol/kmol (sjecište pravca jačanja za minimalni refluks i osi koja označuje molni udio etanola u pari):

$$\varphi_{Rmin} = 0{,}335692 \text{ kmol/kmol}.$$

Biti će potrebno prebaciti molarni refluks u maseni preko sljedećeg izraza:

$$\varphi_{\mathrm{m}} = \varphi_{\mathrm{R}} \frac{M_{\mathrm{R}}}{M_{\mathrm{g}}}, \tag{43}$$

pri čemu se $M_{\mathrm{R}}$ odnosi na molarnu masu refluksa.

Rashladni učin deflegmatora sveden na kg destilata jednak je:

$$\phi_{\mathrm{r}} = \varphi_{\mathrm{m}}\left(h_{\mathrm{g}} - h_{\mathrm{vk}}\right), \tag{44}$$

a tada je rashladni učin deflegmatora:

$$\Phi_{\mathrm{r}} = q_{\mathrm{mg}}\phi_{\mathrm{r}}, \tag{45}$$

Toplinski učin kotlića sveden na kg džibre dobije se sređivanjem jednadžbe (9):

$$\phi_{\mathrm{i}} = \frac{\xi_{\mathrm{m}} - \xi_{\mathrm{s}}}{\xi_{\mathrm{g}} - \xi_{\mathrm{m}}}\left(h_{\mathrm{g}} + (\phi_{\mathrm{r}} - \phi_{\mathrm{d}}) - h_{\mathrm{m1}}\right) + h_{\mathrm{s}} - h_{\mathrm{m1}}, \tag{46}$$

pri čemu je $\phi_{\mathrm{d}}$ specifični toplinski tok predgrijavanja komine, a tada je toplinski učin kotlića:

$$\Phi_{\mathrm{i}} = q_{\mathrm{ms}}\phi_{\mathrm{i}}. \tag{47}$$

Potrebni maseni protok pare za zagrijavanje:

$$q_{\mathrm{mp}} = \frac{q_{\mathrm{ms}}\phi_{\mathrm{i}}}{r_{\mathrm{p}}}, \tag{48}$$

pri čemu je $r_{\mathrm{p}}$ specifična toplina isparivanja suhozasićene vodene pare, a uzima se vrijednost $r_{\mathrm{p}}$ = 2107,92 kJ/kg iz [5] za tlak $p$ = 5 bar.

Potrebni maseni protok rashladne vode:

$$q_{\mathrm{mw}} = \frac{\Phi_{\mathrm{r}} - \Phi_{\mathrm{d}}}{h_{\mathrm{w1}} - h_{\mathrm{w2}}}, \tag{49}$$

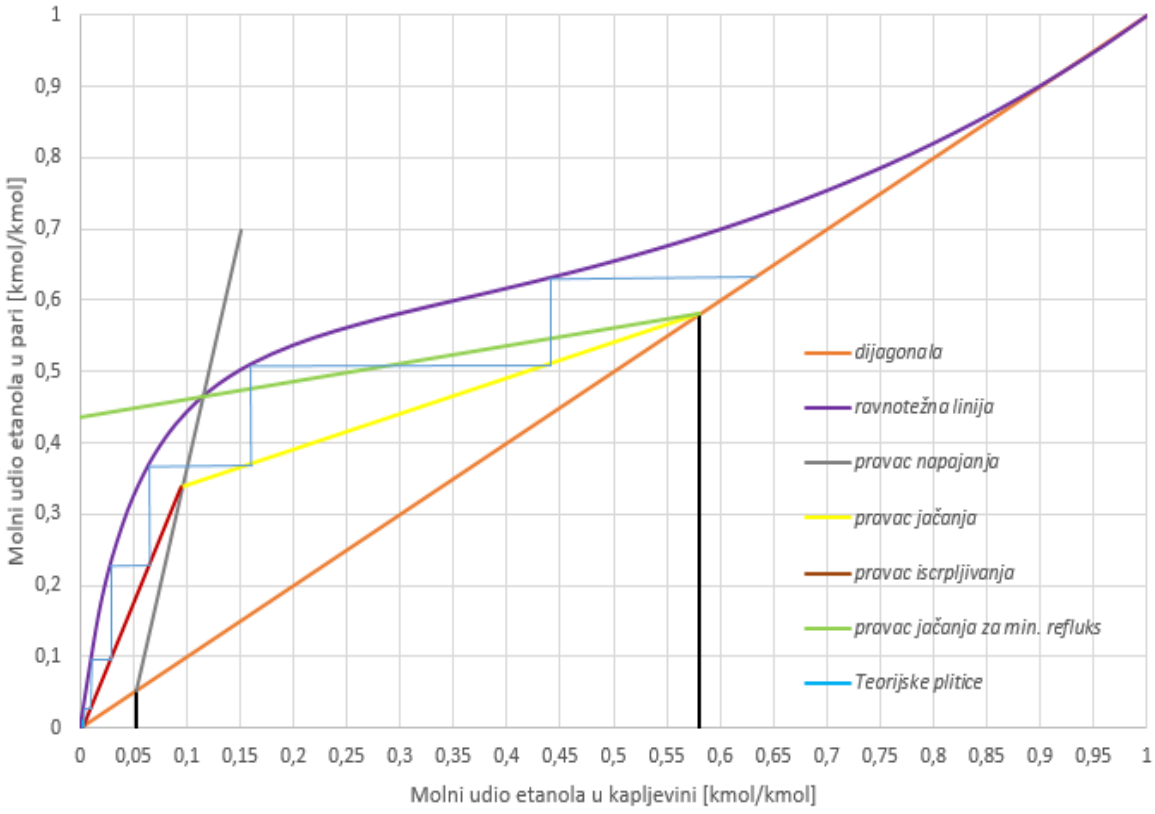
gdje je $h_{\mathrm{w1}}$ ulazna, a $h_{\mathrm{w2}}$ izlazna entalpija entalpija vode. Ulazna temperatura vode je 15 °C, a smije se smije zagrijati za 10 °C, dok se entalpije računaju prema izrazu za čistu tvar:

$$h = c\vartheta. \tag{50}$$

### 3.3.1. Prvi slučaj

Za prvi slučaj uzima se vrijednost refluksa koja je tri puta veća od minimalnog. Takva vrijednost se u praksi nikada ne primjenjuje, ali tu se uzima kako bi se pokazala međusobna ovisnost refluksa o broju plitica te toplinskih tokova u rektifikacijskoj koloni.

$$\varphi_R = 3\varphi_{Rmin} = 1{,}0071 \text{ kmol/kmol}$$




**Slika 17. McCabe – Thieleov dijagram za prvi slučaj**

Za prvi slučaj potrebne su 3 plitice za kolonu za iscrpljivanje i 2 plitice za kolonu za jačanje.

Proračun potrebnih vrijednosti:

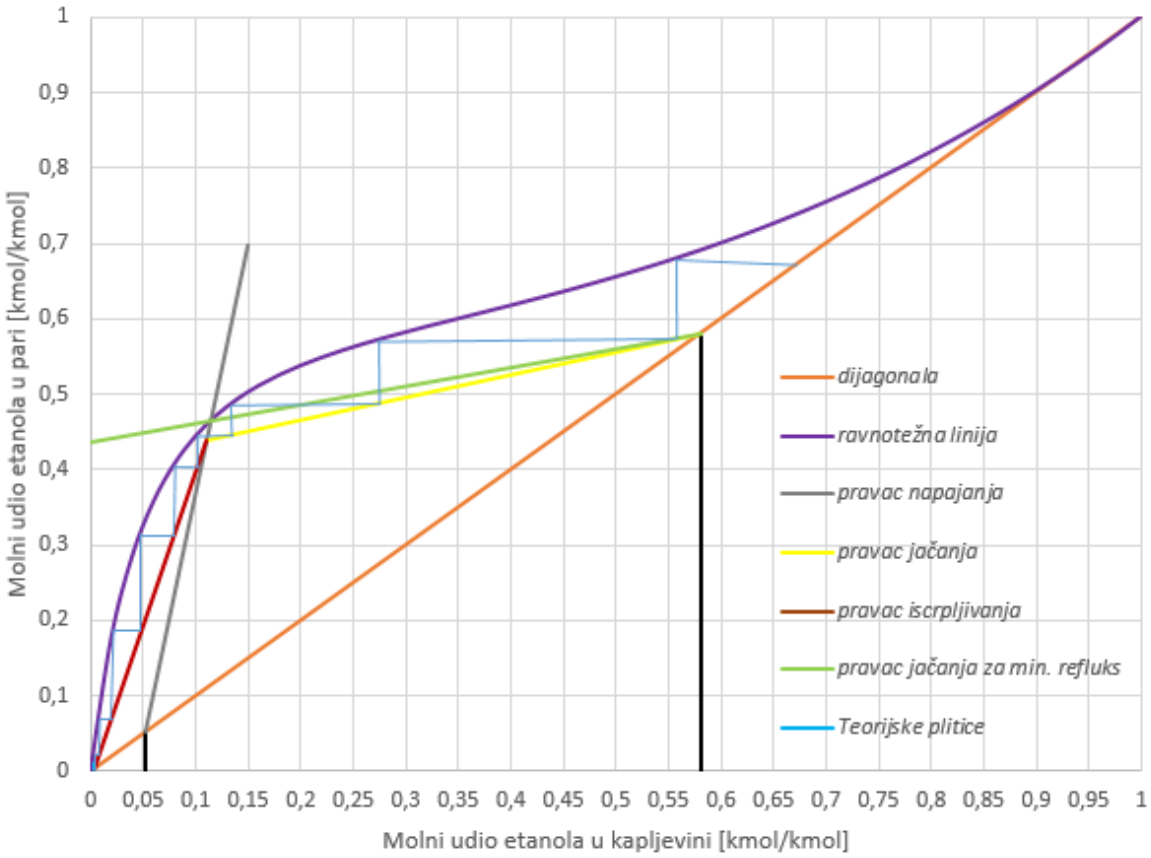
- Molni udio etanola u refluksu, $\psi_R \approx 0{,}5$ kmol/kmol
- Molarna masa refluksa (22), $M_R = 32{,}045$ kg/kmol
- Maseni refluks (43), $\varphi_m = 0{,}94038$ kg/kg
- Rashladni učin deflegmatora sveden na kg destilata (44), $\phi_r = 1077{,}871$ kJ/kg
- Rashladni učin deflegmatora (45), $\Phi_r = 226{,}2079$ kW

- Toplinski učin kotlića sveden na kg džibre (46), $\phi_i$ = 816,1 kJ/kg
- Toplinski učin kotlića (47), $\Phi_i$ = 692,1834 kW
- Maseni protok pare za zagrijavanja (48), $q_{mp}$ = 0,3284 kg/s
- Maseni protok rashladne vode (49), $q_{mw}$ = 3,97393 kg/s

### 3.3.2. Drugi slučaj

Za drugi slučaj uzima se donja granica refluksa, a ona je 30% veća od minimalnog.

$$\varphi_R = 1{,}3\varphi_{Rmin} = 0{,}4364 \text{ kmol/kmol}$$




**Slika 18. McCabe – Thieleov dijagram za drugi slučaj**

Za drugi slučaj potrebne su 5 plitice za kolonu za iscrpljivanje i 3 plitice za kolonu za jačanje.

Proračun potrebnih vrijednosti:

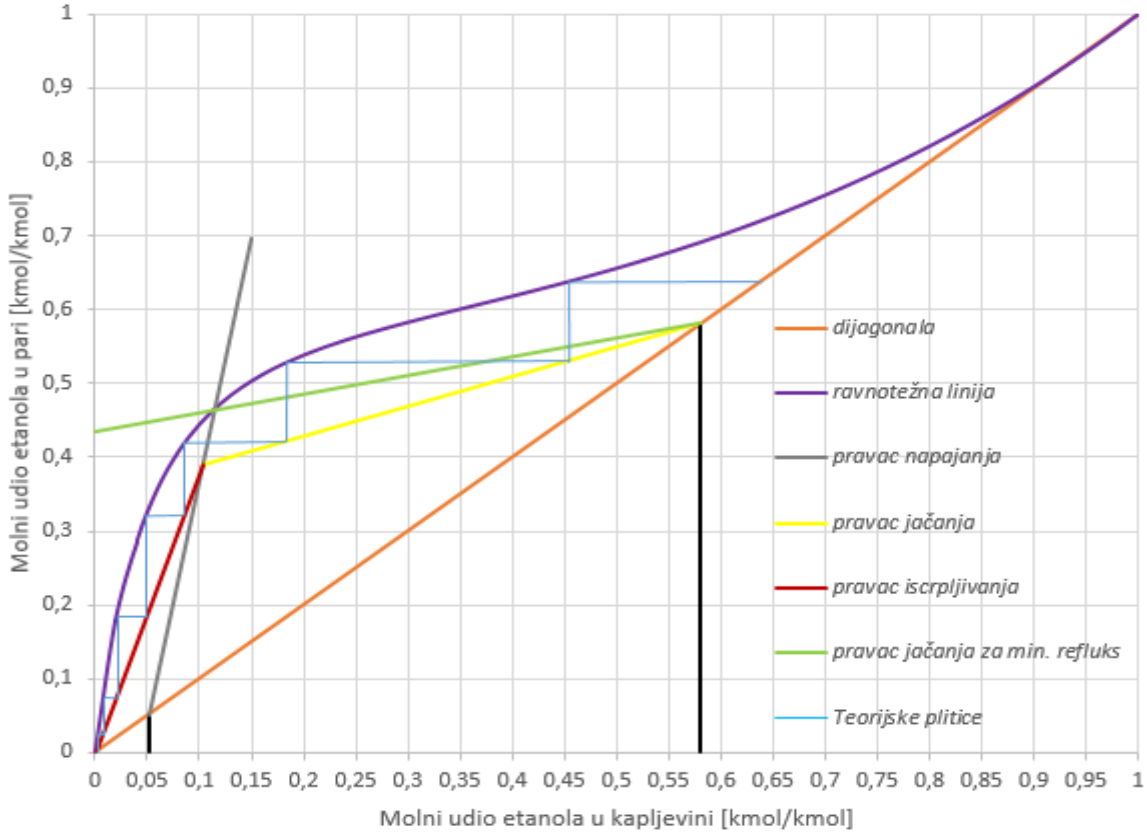
- Molni udio etanola u refluksu, $\psi_R \approx 0{,}5$ kmol/kmol
- Molarna masa refluksa (22), $M_R$ = 32,045 kg/kmol

- Maseni refluks (43), $\varphi_m$ = 0,407498 kg/kg
- Rashladni učin deflegmatora sveden na kg destilata (44), $\phi_r$ = 467,0772 kJ/kg
- Rashladni učin deflegmatora (45), $\Phi_r$ = 98,0234 kW
- Toplinski učin kotlića sveden na kg džibre (46), $\phi_i$ = 707,3795 kJ/kg
- Toplinski učin kotlića (47), $\Phi_i$ = 599,971 kW
- Maseni protok pare za zagrijavanja (48), $q_{mp}$ = 0,2846 kg/s
- Maseni protok rashladne vode (49), $q_{mw}$ = 0,898667 kg/s

### 3.3.3. Treći slučaj

Za treći slučaj uzima se dvostruko veća vrijednost od minimalnog refluksa.

$$\varphi_R = 2\varphi_{Rmin} = 0{,}671384 \text{ kmol/kmol}$$




**Slika 19. McCabe – Thieleov dijagram za treći slučaj**

Za treći slučaj potrebne su 4 plitice za kolonu za iscrpljivanje i 2 plitice za kolonu za jačanje.

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Molni udio etanola u refluksu, $\psi_R \approx 0{,}5$ kmol/kmol
- Molarna masa refluksa (22), $M_R = 32{,}045$ kg/kmol
- Maseni refluks (43), $\varphi_m = 0{,}62692$ kg/kg
- Rashladni učin deflegmatora sveden na kg destilata (44), $\phi_r = 718{,}5804$ kJ/kg
- Rashladni učin deflegmatora (45), $\Phi_r = 150{,}8053$ kW
- Toplinski učin kotlića sveden na kg džibre (46), $\phi_i = 752{,}147$ kJ/kg
- Toplinski učin kotlića (47), $\Phi_i = 637{,}9406$ kW
- Maseni protok pare za zagrijavanja (48), $q_{mp} = 0{,}30264$ kg/s
- Maseni protok rashladne vode (49), $q_{mw} = 2{,}160726$ kg/s

### 3.3.4. Usporedba dobivenih rezultata i efikasnost kolone

**Tablica 5. Broj plitica, toplinski tok i potrošnja medija u ovisnosti o iznosu refluksa**

| | Refluks [kmol/kmol ] | 0,4364 | 0,671384 | 1,007076 |
|---|---|---|---|---|
| Broj plitica | Kolona za iscrpljivanje | 5 | 4 | 3 |
| | Kolona za jačanje | 3 | 2 | 2 |
| | Ukupan broj | 8 | 6 | 5 |
| Toplinski tok [kW] | Deflegmator | 98,02342 | 150,8053 | 226,2079 |
| | Kotlić | 599,971 | 637,9406 | 692,1834 |
| Potrošnja medija [kg/s] | Ogrjevna para | 0,2846 | 0,30264 | 0,3284 |
| | Rashladna voda | 0,898667 | 2,160726 | 3,97393 |

[Tablica 4] prikazuje porast iznosa toplinskog toka koji se odvodi u deflegmatoru i toplinskog toka koji se dovodi džibri kao i povećanje utroška rashladnog odnosno ogrjevnog medija. Također se iz navedene tablice može primijetiti da se s povećanjem iznosa refluksa smanjuje potrebni broj plitica. Najveći broj plitica biti će za najmanji refluks ($1{,}3\varphi_{\mathrm{Rmin}}$), a najmanji za najveći refluks ($3\varphi_{\mathrm{Rmin}}$), ali će i najmanji broj plitica rezultirati s najvećom energetskom potrošnjom. Ukoliko usporedimo prvi ($3\varphi_{\mathrm{Rmin}}$) i treći($2\varphi_{\mathrm{Rmin}}$) slučaj može se zaključiti da je broj plitica približno identičan, ali su toplinski tokovi kao i utrošak rashladne voda te ogrjevne pare veći u slučaju većeg iznosa refluksa pa se zato za daljnju analizu uzima treći slučaj.

[Slika 17], [Slika 18] i [Slika 19] prikazuju teorijske plitice, a koristeći jednadžbu (21) dobije se realni broj plitica. Kako bi dobili iznos stupnja iskoristivosti plitica koristi se O'Connelov izraz za efikasnost kolone koji glasi [7]:

$$\eta = 0{,}503(\mu_{\mathrm{L}}\alpha_{\mathrm{s}})^{-0{,}226}\,, \tag{51}$$

pri čemu je $\mu_{\mathrm{L}}$ srednja dinamička viskoznost kapljevine u koloni koja se dobije za srednju vrijednost između temperature na vrhu kolone (destilat) i temperature na dnu kolone (džibra), a $\alpha_{\mathrm{s}}$ je srednja relativna hlapivost.

Temperatura na vrhu kolone iznosi $\vartheta_{\mathrm{d}} = 79{,}239$ °C, a na dnu $\vartheta_{\mathrm{s}} = 99{,}03$ °C. Srednja temperatura je tada 89,1345 °C, a dinamička viskoznost kapljevine očitava se iz [Tablica 3] i ona je jednaka 0,494599 mPas.

Relativna hlapivost računa se kao:

$$\alpha = \frac{\psi_{\mathrm{df}}}{\psi_{\mathrm{fd}}}\,, \tag{52}$$

gdje je $\psi_{\mathrm{df}}$ molni udio etanola u pari, a $\psi_{\mathrm{fd}}$ molni udio etanola u kapljevini. To su podaci za ravnotežnu liniju smjese etanol-voda koji su očitani iz [10].

Srednja relativna hlapivost dobije se sljedećim postupkom:

uzima se npr. $\psi_{\mathrm{fd}} = 0{,}02$ kmol/kmol pa se za tu vrijednost očitava $\psi_{\mathrm{df}}$ i prema (52) izračuna relativna hlapivost. Zatim se uzima sljedeća vrijednost s konstantnim korakom od $\psi_{\mathrm{fd}} = 0{,}02$ kmol/kmol te očitavaju vrijednosti $\psi_{\mathrm{df}}$ i računaju hlapivosti za svaki korak dok se ne postigne jednakost $\psi_{\mathrm{fd}} = \psi_{\mathrm{df}}$, a to će se desiti za iznos 1 kmol/kmol. Kada se dobiju odgovarajuća rješenja može se izračunati srednja relativna hlapivost prema izrazu:

$$\alpha_s = \frac{\sum \alpha}{50} . \quad (53)$$

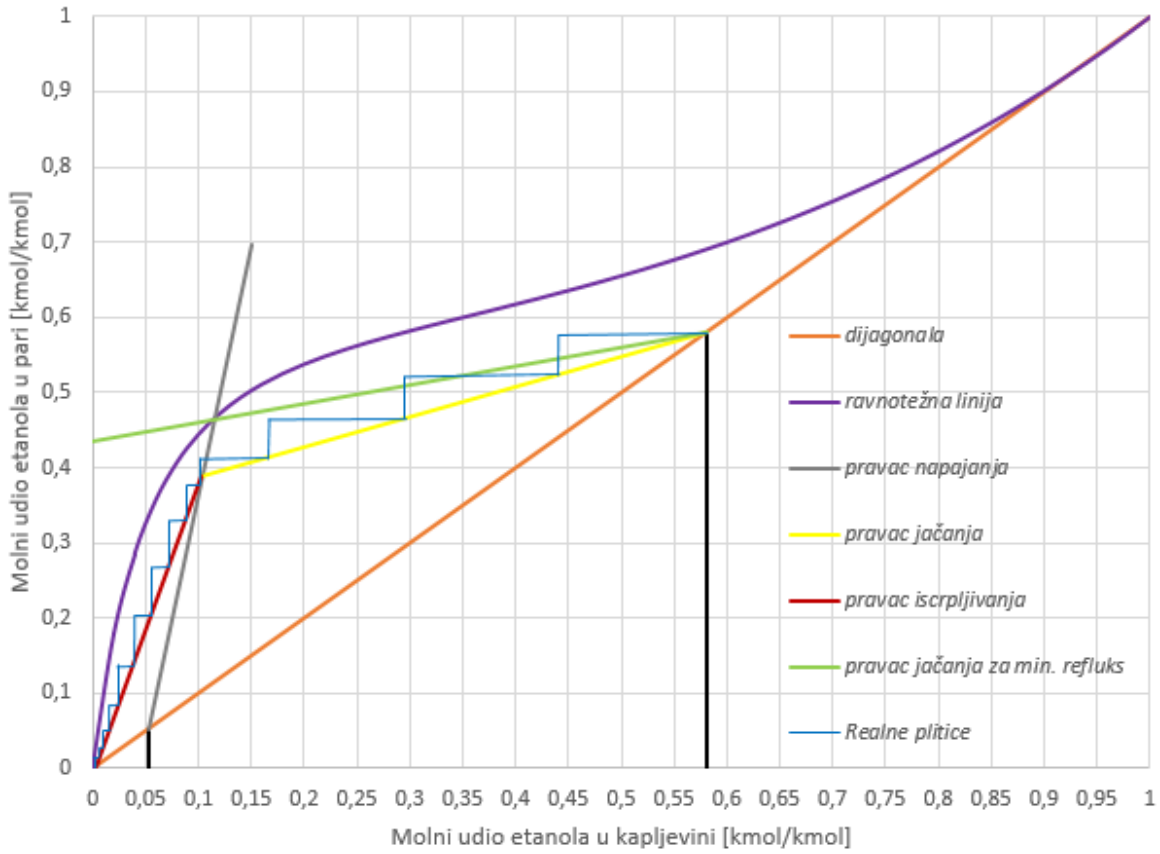
Uvrštavajući relativne hlapivosti u jedn. (53) dobije se $\alpha_s = 2{,}021029$.

Sada se može dobiti stupanj iskoristivosti plitica prema (51):

$$\eta = 0{,}503(\mu_L \alpha_s)^{-0{,}226} \approx 0{,}5 ,$$

a primjenom (21) i stvarni broj plitica:

$$n_s = \frac{n_t}{\eta} = 12.$$

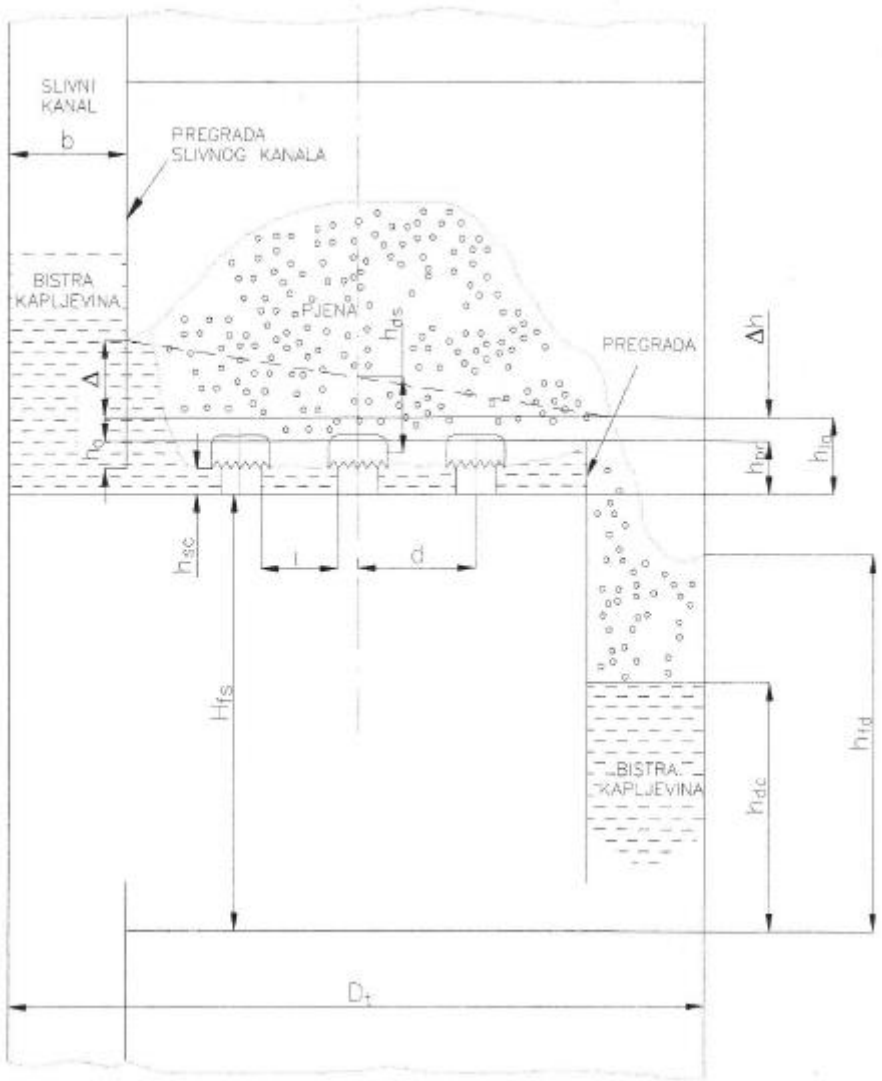



**Slika 20. McCabe – Thieleov dijagram za treći slučaj s realnim pliticama**

# 4. ODREĐIVANJE DIMENZIJA KOLONE I GEOMETRIJSKIH KARAKTERISTIKA PLITICA

Najveći broj suvremenih postupaka za dimenzioniranje plitica temelji se na klasičnom modelu plitice (u ovom slučaju plitice sa zvonima) prema [Slika 21]. Kapljevina s gornje plitice dotječe na pliticu iz preljeva. Pare, koje dolaze s donje plitice, raspršuju kapljevinu na sitne kapljice ili stvaraju pjenu. Raspršena kapljevina ili pjena teče preko plitice i ulijeva se u preljev u kojem se pare odvajaju od kapljevine koja odlazi na pliticu ispod, a para na pliticu iznad.

Plitice koje će se koristiti u ovom radu su plitice sa zvonima, a proračun se provodi s obzirom na najvišu pliticu u koloni. Proračun dimenzioniranja kolone i plitica proveden je prema Fairu.




**Slika 21. Hidraulički model plitice sa zvonima**

### 4.1. Određivanje promjera kolone

Kako bi se odredio promjer kolone, potrebno je proračunati ukupnu površinu plitice. Ukupna površina plitice sastoji se od neto površine i površine preljeva. Neto površina je površina plitice na kojoj se odvija izmjena topline i tvari između kapljevine na plitici i uzlazne pare, a površina preljeva je dio presjeka kolone niz koji se kapljevina spušta na pliticu i s kojega kapljevina odlazi s plitice.

Ukupna površina plitice je:

$$A_{\mathrm{T}} = A_{\mathrm{N}} + A_{\mathrm{D}}, \tag{54}$$

pri čemu je $A_{\mathrm{N}}$ neto površina plitice, a $A_{\mathrm{D}}$ je površina preljeva.

Neto površina plitice računa se preko sljedećeg izraza:

$$A_{\mathrm{N}} = \frac{Q_{\mathrm{D}}}{(0{,}75U'_{\mathrm{N}})}, \tag{55}$$

gdje je $Q_{\mathrm{D}}$ volumni protok pare, a $U'_{\mathrm{N}}$ stvarna brzina pare pri kojoj dolazi do plavljenja poda.

Volumni protok pare može se dobiti ukoliko je poznat maseni protok i gustoća pare na vrhu kolone, a jednak je:

$$Q_{\mathrm{D}} = \frac{q_{\mathrm{mDj}}}{\rho_{\mathrm{D}}}. \tag{56}$$

Gustoća pare se približno može izračunati koristeći jednadžbu stanja idealnog plina, a glasi:

$$\rho_{\mathrm{D}} = \frac{pM_{\mathrm{g}}}{R_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{d}}}, \tag{57}$$

pri čemu je $p$ radni tlak kolone i jednak je 1,013 bar, $M_{\mathrm{g}}$ molarna masa destilata, $R_{\mathrm{m}}$ opća plinska konstanta, a $T_{\mathrm{d}}$ se odnosi na temperaturu destilata.

Ukoliko se postavi molna bilanca na zadnju pliticu u koloni za jačanje, dobije se jednakost:

$$q_{\mathrm{nDj}} = q_{\mathrm{ng}} + q_{\mathrm{nFj}}, \tag{58}$$

u kojoj je $q_{\mathrm{ng}}$ molni protok destilata, a $q_{\mathrm{nFj}}$ molni protok kapljevine (refluksa).

Koristeći jedn. (12) može se dobiti iznos molnog protoka refluksa, a zatim uvrštavajući poznate podatke u (58) i primjenom izraza (23) dobije se maseni protok pare na zadnjoj plitici kolone za jačanje koji nam je potreban za proračun volumnog protoka pare.

Stvarna brzina pare jednaka je 70%-tnom iznosu (korekcija zbog stvaranja pjene na plitici) brzine pare:

$$U'_{\mathrm{N}} = 0{,}7U_{\mathrm{N}}, \tag{59}$$

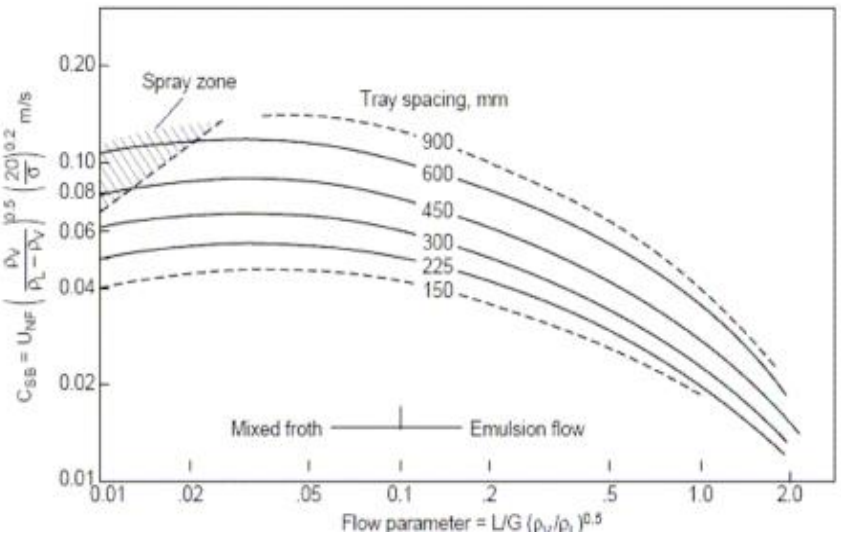
Brzina pare proračuna se prema:

$$U_{\mathrm{N}} = C_{\mathrm{SB}}\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{F}}-\rho_{\mathrm{D}}}{\rho_{\mathrm{D}}}}\,, \tag{60}$$

gdje $\rho_{\mathrm{F}}$ označuje gustoću kapljevite smjese etanol-voda, a dobije se iz [Tablica 3]. Koeficijent $C_{\mathrm{SB}}$ je Souders-Brownova konstanta koja ovisi o parametru protoka i razmaku između plitica te se očitava iz grafa prikazanog na [Slika 22].

Parametar protoka definira se kao:

$$F_{\mathrm{LV}} = \frac{q_{\mathrm{mFj}}}{q_{\mathrm{mDj}}}\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{D}}}{\rho_{\mathrm{F}}}}\,. \tag{61}$$




**Slika 22. Fairova korelacija za plavljenje - ovisnost koeficijenta $C_{\mathrm{SB}}$ o parametru protoka i razmaku između plitica [4]**

Površina preljeva računa se preko sljedećeg izraza:

$$A_{\mathrm{D}} = \frac{Q_{\mathrm{F}}}{u'_{\mathrm{L}}}\,, \tag{62}$$

gdje je $Q_{\mathrm{F}}$ volumni protok kapljevine, a $u'_{\mathrm{L}}$ stvarna brzina kapljevine u preljevu.

Volumni protok kapljevine u preljevu može se dobiti ukoliko je poznat maseni protok i gustoća kapljevine (refluksa) na vrhu kolone, a jednak je:

$$Q_{\mathrm{F}} = \frac{q_{\mathrm{mFj}}}{\rho_{\mathrm{F}}}\,. \tag{63}$$

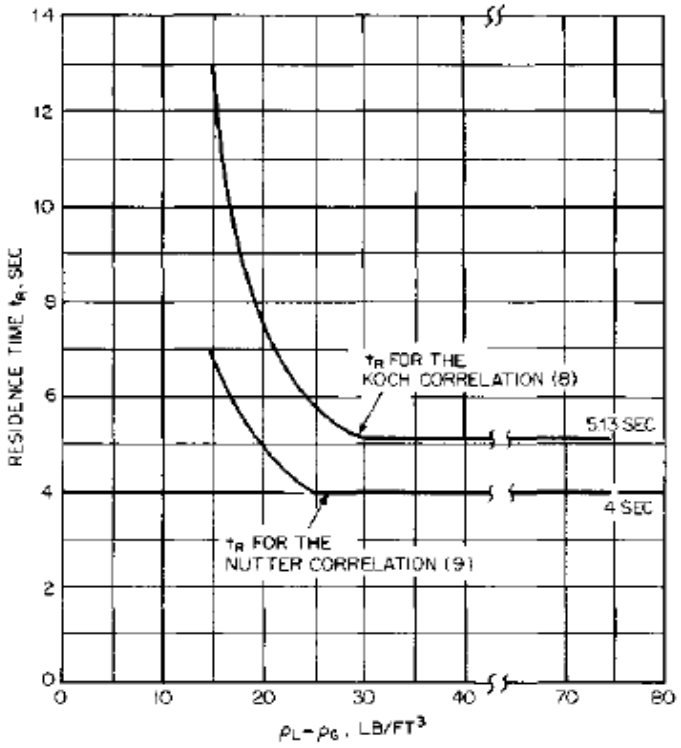
Stvarna brzina kapljevine jednaka je 70%-tnom iznosu maksimalne dopuštene brzine kapljevine u preljevu:

$$u'_{\mathrm{L}} = 0{,}7u_{\mathrm{Lmax}}. \tag{64}$$

Maksimalna dopuštena brzina kapljevine u preljevu računa se prema sljedećem izrazu:

$$u_{\mathrm{Lmax}} = \frac{T_{\mathrm{S}}}{t_{\mathrm{R}}}\,, \tag{65}$$

pri čemu je *T*s odabrani razmak između plitica, a $t_{\mathrm{R}}$ je vrijeme zadržavanja kapljevine u preljevu, a očitava se iz [Slika 23].




**Slika 23. Vrijeme zadržavanja kapljevine u ovisnosti o gustoći pare i kapljevine [4]**

Nakon proračuna svih potrebnih vrijednosti može se izračunati potrebni promjer kolone:

$$D_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{4A_{\mathrm{T}}}{\pi}}\,. \tag{66}$$

Sada se mogu iz [6] odabrati dimenzije cijevi (bešavna ili šavna) prema normama te se poslije odabranih mjera može izračunati nova površina kolone, a ujedno i neto površina kao i površina preljeva koja je približno jednaka 16%-tnoj neto površini.

Nova površina kolone iznosi:

$$A'_{\mathrm{T}} = \frac{D_{\mathrm{u}}^2 \pi}{4}\,, \tag{67}$$

a ukoliko se već spomenuta jednakost:

$$A'_{\mathrm{D}} = 0{,}16 A_{\mathrm{N}}\,, \tag{68}$$

uvrsti u (54) i dodatnim sređivanjem dobije se nova neto površina plitice:

$$A'_{\mathrm{N}} = \frac{A_{\mathrm{T}}}{1{,}16}\,. \tag{69}$$

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Gustoća pare (57), $\rho_{\mathrm{D}}$ = 1,186578 kg/m$^3$
- Molni protok refluksa (12), $q_{\mathrm{nFj}}$ = 14,78071 kmol/h
- Maseni protok refluksa (23), $q_{\mathrm{mFj}}$ = 473,6479 kg/h
- Molni protok pare (58), $q_{\mathrm{nDj}}$ = 36,79601 kmol/h
- Maseni protok pare (23), $q_{\mathrm{mDj}}$ = 1262,757 kg/h
- Volumni protok pare (56), $Q_{\mathrm{D}}$ = 0,295611 m$^3$/s
- Gustoća kapljevine, $\rho_{\mathrm{F}}$ = 776,2051 kg/m$^3$ [Tablica 3]
- Parametar protoka (61), $F_{\mathrm{LV}}$ = 0,014665
- Odabrana visina između plitica, $T_{\mathrm{s}}$ = 0,4 m
- Souders-Brownova konstanta, $C_{\mathrm{SB}}$ = 0,078 [Slika 22]
- Brzina pare (60), $U_{\mathrm{N}}$ = 1,993437 m/s
- Stvarna brzina pare (59), $U'_{\mathrm{N}}$ = 1,395406 m/s
- Neto površina plitice (55), $A_{\mathrm{N}}$ = 0,282462 m$^2$
- Volumni protok kapljevine (63), $Q_{\mathrm{F}}$ = 0,00017 m$^3$/s
- Vrijeme zadržavanja kapljevine u preljevu, $t_{\mathrm{R}}$ = 5,13 s [Slika 23]
- Maksimalna dopuštena brzina kapljevine u preljevu (65), $u_{\mathrm{Lmax}}$ = 0,077973 m/s

- Stvarna brzina kapljevine u preljevu (64), $u'_L$ = 0,054581 m/s
- Površina preljeva (62), $A_D$ = 0,003106 $m^2$
- Ukupna potrebna površina kolone (54), $A_T$ = 0,2856 $m^2$
- Potrebni promjer kolone (66), $D_T$ = 0,603 m

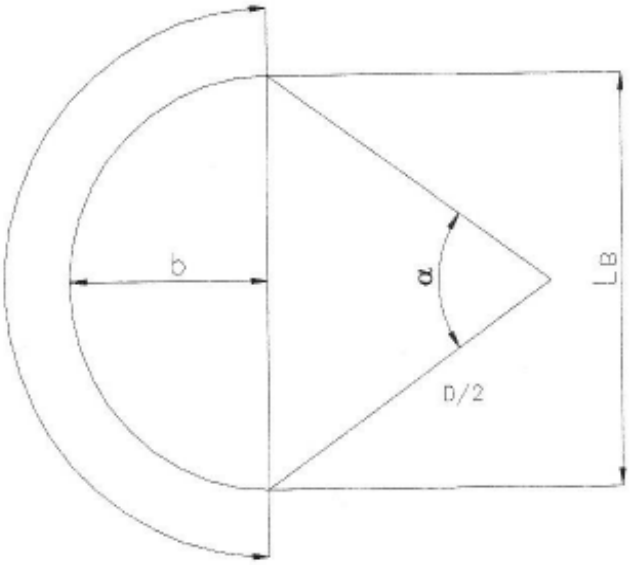
Odabrane dimenzije kolone iz [6] – čelična šavna cijev:

- Vanjski promjer, $D_v$ = 0,711 m
- Debljina stjenke, $s$ = 0,0045 m
- Unutarnji promjer, $D_u$ = 0,702 m

Proračun novih površina:

- Površina kolone (67), $A'_T$ = 0,387047 $m^2$
- Neto površina (69), $A'_N$ = 0,333662 $m^2$
- Površina preljeva (68), $A'_D$ = 0,026693 $m^2$

## 4.2. Određivanje dimenzija brane




**Slika 24. Kružni odsječak s pripadajućim dimenzijama brane**

Poznavajući površinu preljeva kapljevine mogu se izračunati dimenzije (širina i duljina) brane preko geometrijskog odnosa kružnog odsječka prikazanog na [Slika 24].

Primjenjujući [Slika 24] za određivanje površine preljeva i dodatnim sređivanjem jednadžbe može se odrediti kut $\alpha$:

$$A_{\mathrm{D}} = \frac{\left(\frac{D_{\mathrm{u}}}{2}\right)^2}{2}\left[\frac{\pi\alpha}{180^0} - \sin(\alpha)\right]. \tag{70}$$

Zatim je moguće odrediti širinu brane:

$$b_{\mathrm{b}} = \frac{D_{\mathrm{u}}}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right], \tag{71}$$

kao i duljinu preko sljedećeg izraza:

$$L_{\mathrm{b}} = 2\frac{D_{\mathrm{u}}}{2}\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \tag{72}$$

Maksimalni put strujanja kapljevine računa se prema:

$$L_{\mathrm{uk}} = D_{\mathrm{u}} - 2b_{\mathrm{b}}. \tag{73}$$

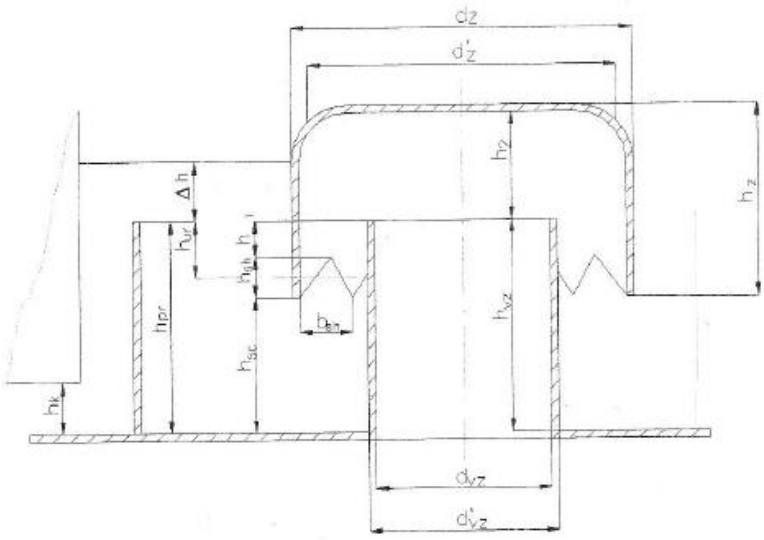
Proračun potrebnih vrijednosti:

- Kut (70), $\alpha$ = 81,493 °C
- Širina brane (71), $b_{\mathrm{b}}$ = 0,085 m
- Duljina brane (72), $L$ = 0,4582 m
- Maksimalni put strujanja kapljevine (73), $L_{\mathrm{uk}}$ = 0,53184 m

### 4.3. Geometrijske karakteristike zvona i određivanje njihova rasporeda

Kao što je ranije navedeno, odabrane su plitice sa zvonima, a glavni razlog njihove primjene jest curenje. Curenje znači da dio kapljevine ne prelazi preko plitice i kroz preljev na donju pliticu, već izravno protječe kroz otvore u protustruji s parom. Kapljevina koja curi kroz otvore na plitici, zaobilazi primarnu kontaktnu zonu te, iako i tom prilikom dolazi do izmjene tvari između pare i kapljevine, ta je izmjena tvari mala i time se smanjuje djelotvornost plitice.

Na plitici statički tlak kapljevine „tjera“ kapljevinu kroz otvore. Strujanje pare kroz otvore djeluje suprotno i zadržava kapljevinu na plitici. Sila strujanja para koja zadržava kapljevinu na plitici može se izraziti padom tlaka pare na plitici. Curenje, dakle nastaje kada tlak stupca kapljevine postane veći od pada tlaka pare na plitici, a taj problem se može ukloniti primjenom plitica sa zvonima kod kojih je curenje zanemarivo malo.




**Slika 25. Poprečni presjek zvona s označenim dimenzijama**

Odabrane dimenzije zvona:

- Vanjski promjer zvona, $d_z$ = 60 mm
- Unutarnji promjer zvona, $d'_z$ = 56,8 mm
- Debljina stijenke zvona, $s_1$ = 1,6 mm

Odabrane dimenzije vrata zvona:

- Vanjski promjer vrata zvona, $d'_{vz}$ = 44 mm
- Unutarnji promjer vrata zvona, $d_{vz}$ = 35,65 mm
- Debljina stijenke vrata zvona, $s_2$ = 4,175 mm

Kako bi se izračunao potreban broj zvona na plitici, mora se znati površina jednog vrata zvona kao i površina koju zauzimaju svi vratovi zvona na plitici.

Površina jednog vrata zvona dobije se preko sljedeće jednadžbe:

$$A_{\mathrm{vz}} = \frac{d_{\mathrm{vz}}^2 \pi}{4}, \tag{74}$$

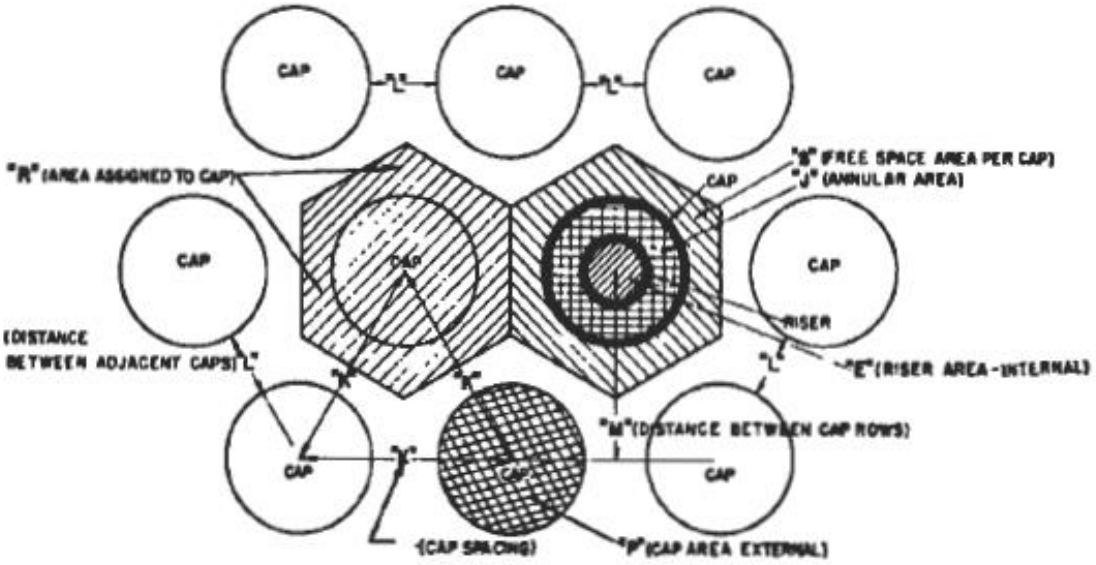
a površina koju zauzimaju svi vratovi zvona na plitici jednak je 10%-tnoj neto površini:

$$A'_{\mathrm{vz}} = 0{,}1 A'_{\mathrm{N}}. \tag{75}$$

Kada su poznate navedene površine može se dobiti potreban broj zvona na plitici prema sljedećem izrazu:

$$n_{\mathrm{z}} = \frac{A'_{\mathrm{vz}}}{A_{\mathrm{vz}}}\,. \tag{76}$$

Dobiveni broj zvona je približan iznos, a uvećava se ovisno o postavljenom rasporedu na plitici (želi se postići što ravnomjerniji raspored). Kako bi se zvona mogla što ravnomjernije rasporediti po neto površini, potrebno je odrediti veličine koje će biti prikazane u nastavku proračuna. Zvona se postavljaju tako da međusobno tvore jednakostranične trokute [Slika 26].




**Slika. 26 Raspored zvona [12]**

Prema [Slika 26] svakom zvonu na plitici pripada površina pravilnog šesterokuta sa stranicom duljine:

$$a = \frac{d_{\mathrm{z}}}{2} + 0{,}015. \tag{77}$$

Kada je poznat iznos stranice može se dobiti površina pravilnog šesterokuta:

$$A_{\check{\mathrm{s}}} = 6\left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)a^2, \tag{78}$$

a tada i površina pridružena svim zvonima:

$$A_{\mathrm{uk}} = n_{\mathrm{zs}} A_{\check{\mathrm{s}}}. \tag{79}$$

Kako bi se izračunao razmak između zvona, potrebna je visina jednakostraničnog trokuta:

$$h_{\Delta} = a\sin(60^0), \tag{80}$$

a razmak između zvona tada je jednak:

$$d_{\mathrm{r}} = 2h. \tag{81}$$

Odmah se može dobiti i razmak zvona prema sljedećoj jednakosti:

$$L_{\mathrm{z}} = d_{\mathrm{r}} - d_{\mathrm{z}}. \tag{82}$$

**Tablica 6. Preporučene vrijednosti dimenzija zvona**

| Razmak između donjeg ruba zvona i plitice, $h_{sc}$ [mm] | Visina zareza na zvonima, $h_{sh}$ [mm] | Širina zareza, $b_{sh}$ [mm] | Visina $h_1$ [mm] |
|---|---|---|---|
| 0 - 10 | 10 - 50 | 2 - 7 | 20 - 30 |

Potrebno je proračunati razinu tekućine iznad brane prema:

$$\Delta h_{\mathrm{t}} = \sqrt[3]{(\frac{Q_{\mathrm{F}}}{1{,}85L_{\mathrm{pc}}})^2}\ , \tag{83}$$

pri čemu je $Q_F$ volumni protok kapljevine izračunat u 4.1., a $L_{pc}$ je opseg preljevne cijevi.

Preljevna cijev nije kružnog oblika, već ima oblik kružnog odsječka pa je potrebno dobiti promjer cijevi koja je površinom ekvivalentna preljevnoj, a izraz glasi:

$$d_{\mathrm{ek}} = \sqrt{\frac{4A'_{\mathrm{D}}}{\pi}}\ . \tag{84}$$

Sada je moguće izračunati opseg preljevne cijevi:

$$L_{\mathrm{pc}} = d_{\mathrm{ek}}\pi, \tag{85}$$

a uz sve poznate podatke može se dobiti već spomenuta visina tekućine iznad brane prema (83).

Sljedeća bitna dimenzija jest visina uronjavanja zvona koja se računa prema jednadžbi:

$$h_{\mathrm{ur}} = h_1 + \frac{2}{3} h_{\mathrm{sh}}, \tag{86}$$

Uz poznatu visinu uronjavanja zvona, visinu zareza na zvonima te razmak između donjeg ruba zvona i poda, moguće je izračunati i potrebnu visinu brane:

$$h_{\mathrm{pr}} = h_{\mathrm{ur}} + \frac{1}{3} h_{\mathrm{sh}} + h_{\mathrm{sc}}, \tag{87}$$

a tada i duljinu vrata zvona koje će biti iste duljine kao i visina brane:

$$h_{\mathrm{vz}} = h_{\mathrm{pr}}. \tag{88}$$

Visina od vrha do tjemena zvona približno je četiri puta manja od promjera zvona:

$$h_2 = \frac{d_{\mathrm{z}}}{4}. \tag{89}$$

Sada kada su poznate vrijednosti visine brane, razmaka između donjeg ruba zvona i poda te visina od vrha zvona do tjemena zvona može se proračunati i visina zvona prema:

$$h_{\mathrm{z}} = h_{\mathrm{pr}} + h_2 - h_{\mathrm{sc}}. \tag{90}$$

Preostaje još samo jedna potrebna dimenzija, a to je potopljenost pregrade preljevnog kanala $h_{\mathrm{k}}$, a ona će iznositi $h_{\mathrm{k}}$ = 30 mm.

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Površina jednog vrata zvona (74), $A_{\mathrm{vz}}$ = 0,000998 m$^2$
- Površina koju zauzimaju svi vratovi zvona (75), $A'_{\mathrm{vz}}$ = 0,033366 m$^2$
- Potreban broj zvona (76), $n_{\mathrm{z}}$ = 33,42698
- Stvarni broj zvona, $n_{\mathrm{zs}}$ = 35
- Duljina stranice pravilnog šesterokuta (77), $a$ = 0,045 m
- Površina pravilnog šesterokuta (78), $A_{\mathrm{š}}$ = 0,005261 m$^2$
- Površina pridružena svim zvonima (79), $A_{\mathrm{uk}}$ = 0,184139 m$^2$
- Visina jednakostraničnog trokuta (80), $h_{\Delta}$ = 0,038971 m
- Razmak između zvona (81), $d_{\mathrm{r}}$ = 0,078 m
- Razmak zvona (82), $L_{\mathrm{z}}$ = 0,018 m

- Razmak između donjeg ruba zvona i plitice, $h_{sc}$ = 0,01 m [Tablica 6]
- Visina zareza na zvonima, $h_{sh}$ = 0,02 m [Tablica 6]
- Širina zareza, $b_{sh}$ = 0,005 m [Tablica 6]
- Visina $h_1$ = 0,025 m [Tablica 6]
- Ekvivalentni promjer (84), $d_{ek}$ = 0,184354 m
- Opseg preljevne cijevi (85), $L_{pc}$ = 0,57917 m
- Razina tekućine iznad brane (83), $\Delta h_t$ = 0,002925 m
- Visina uronjavanja zvona (86), $h_{ur}$ = 0,038333 m
- Visina brane (87), $h_{pr}$ = 0,055 m
- Duljina vrata zvona (88), $h_{vz}$ = 0,055 m
- Visina od vrha do tjemena zvona (88), $h_2 \approx$ 0,015 m
- Visina zvona (90), $h_z$ = 0,06 m
- Stvarna visina vrha do tjemena zvona, $h'_2$ = 0,0134 m (sklopni crtež)

## 4.4. Hidraulički proračun plitice

### 4.4.1. Faktor odnošenja kapljevine parom

Odnošenje je posljedica nepotpunog fizičkog odvajanja kapljica iz pare u prostoru između plitica. Odnošenje se ne može izbjeći, ali se može održati u prihvatljivim granicama. Kapljevina koju para odnošenjem dovode na gornju pliticu sadrži više teže hlapivih komponenti, tako da usporava prijenos mase između pare i kapljevine i time smanjuje djelotvornost plitica. Kapljice također mogu sadržavati i nehlapive nečistoće te time onečišćavati vršni produkt kolone.

Odnošenje raste s porastom brzine pare i to proporcionalno potenciji brzine od 2 do 5. U nekim slučajevima zapaženo je da 10 % povećan protok para povećava odnošenje i do 10 puta. Odnošenje opada povećanjem razmaka između plitica, a raste povećanjem promjera otvora.

Kako bi se očitao faktor odnošenja kapljevine parom mora se imati na raspolaganju iznos parametra strujanja kapljevine i pare koji je ranije izračunat i postotak pare pri kojoj dolazi do potapanja poda.

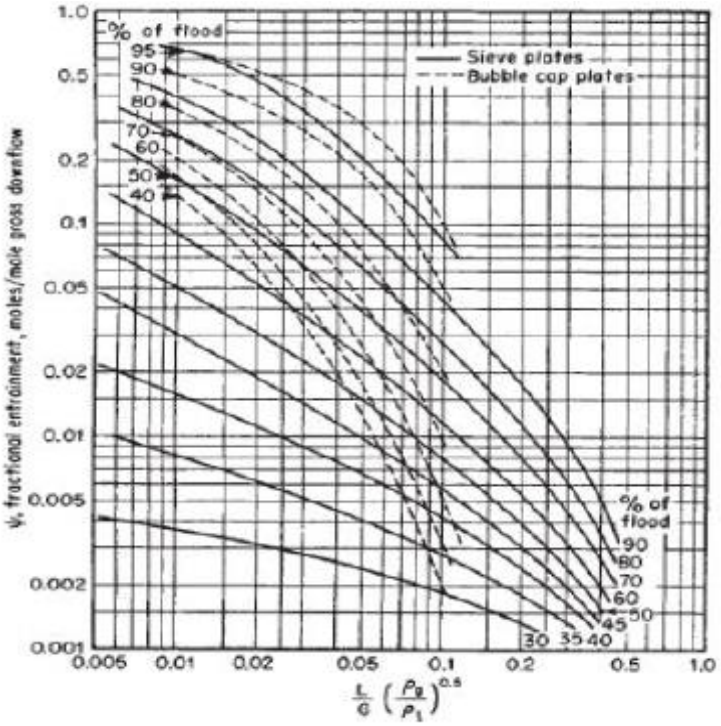
Postotak pare pri kojoj dolazi do potapanja poda se dobije kao omjer brzine pare svedenu na neto površinu i stvarne brzine pare:

$$\frac{U_{\mathrm{ns}}}{U'_{\mathrm{N}}} \,. \tag{91}$$

Iznos stvarne brzine pare je poznat od ranije, a brzina pare svedena na neto površinu jednaka je:

$$U_{\mathrm{ns}} = \frac{Q_{\mathrm{D}}}{A'_{\mathrm{N}}} \,. \tag{92}$$

Sada se iz [Slika 27] može očitati faktor odnošenja kapljevine parom.




**Slika 27. Fairova korelacija za procjenu faktora odnošenja kapljevine parom [4]**

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Brzina pare svedena na neto površinu (92), $U_{\mathrm{ns}}$ = 0,899234 m/s
- Postotak pare pri kojoj do potapanja poda (91), $U_{\mathrm{ns}}/U'_{\mathrm{N}}$ = 63,491 %
- Faktor odnošenja kapljevine parom, $\psi_{\mathrm{kp}}$ = 0,15 kmol/kmol [Slika 27]

### 4.4.2. Hidraulički gradijent kapljevine na podu

Nekorigirani hidraulički gradijent iterativno se računa prema sljedećoj jednakosti:

$$1{,}317\sqrt{\Delta'}\left\{\Delta'\left(\frac{3N_\mathrm{r}}{2}-1\right)+3N_\mathrm{r}[h_\mathrm{io}+h_\mathrm{sc}(R_\mathrm{rc}-1)]\right\}=\frac{N_\mathrm{r}\sqrt{N_\mathrm{r}}Q_\mathrm{F}}{C_\mathrm{D}L_\mathrm{c}}\,, \tag{93}$$

pri čemu je $N_\mathrm{r}$ broj redova zvona okomitih na smjer strujanja kapljevine, $h_\mathrm{io}$ visina bistre kapljevine pri preljevnoj pregradi, $R_\mathrm{rc}$ udaljenost između ulaznih cijevi, $C_\mathrm{D}$ bezdimenzijski faktor hidrauličkog gradijenta, a $L_\mathrm{c}$ je umnožak srednjeg broja zvona po redovima i razmaka zvona.

Visina bistre kapljevine pri preljevnoj pregradi dobije se preko sljedećeg izraza:

$$h_\mathrm{io}=h_\mathrm{pr}+\Delta h_\mathrm{t}. \tag{94}$$

Udaljenost između cijevi računa se kao:

$$R_\mathrm{rc}=\frac{d_\mathrm{r}-\frac{d_\mathrm{vz}}{2}}{L_\mathrm{z}}\,. \tag{95}$$

Umnožak srednjeg broja zvona po redovima i razmaku zvona:

$$L_\mathrm{c}=N_\mathrm{sr}L_\mathrm{z}, \tag{96}$$

pri čemu je srednji broj zvona jednak:

$$N_\mathrm{sr}=\frac{n_\mathrm{zs}}{N_\mathrm{r}}\,. \tag{97}$$

Kada su poznati svi podaci, uvrštavaju se u (93) kako bi se dobio hidraulički gradijent koji je zatim potrebno korigirati koristeći korekcijski faktor $C_\mathrm{v}$:

$$\Delta=\Delta' C_\mathrm{v}. \tag{98}$$

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Visina bistre kapljevine (94), $h_\mathrm{io}$ = 0,057925 m
- Udaljenost između cijevi (95), $R_\mathrm{rc}$ = 3,1111
- Srednji broj zvona (97), $N_\mathrm{sr}$ = 7
- Umnožak srednjeg broja zvona po redovima i razmaka zvona (96), $L_\mathrm{c}$ = 0,126 m
- Bezdimenzijski faktor hidrauličkog gradijenta, $C_\mathrm{D}$ = 0,129 [12]

- Nekorigirani hidraulički gradijent (93), $\Delta' = 0{,}005297$ m
- Korekcijski faktor, $C_v = 0{,}4$ [12]
- Hidraulički gradijent (98), $\Delta = 0{,}002119$ m

### 4.4.3. Pad tlaka pare

Padovi tlaka pare izražavaju se u milimetrima. Prvo je potrebno proračunati pad tlaka kroz suha zvona, a ono se sastoji od pada tlaka kroz ulazne cijevi i pada tlaka kroz zaokretni kružni kanal. Pad tlaka kroz ulazne cijevi račune se prema:

$$h_{\mathrm{r}} = 1{,}173609971 \left(\frac{d_{\mathrm{vz}}}{\rho_{\mathrm{F}}}\right)\left(\sqrt{\rho_{\mathrm{D}}}\frac{Q_{\mathrm{D}}}{A_{\mathrm{r}}}\right)^{2{,}09}, \tag{99}$$

pri čemu se oznaka $A_r$ odnosi na površinu ulaznih cijevi, a jednaka je:

$$A_{\mathrm{r}} = n_{\mathrm{zs}}\frac{d_{\mathrm{vz}}^2}{4}, \tag{100}$$

Pad tlaka kroz zaokretni kružni kanal dobije se preko sljedeće jednakosti:

$$h_{\mathrm{ra}} = 0{,}196945951\frac{1}{\rho_{\mathrm{F}}}\left(\frac{2a_{\mathrm{r}}^2}{a_{\mathrm{cr}}a_{\mathrm{c}}}\sqrt{\rho_{\mathrm{D}}}\frac{Q_{\mathrm{D}}}{A_{\mathrm{r}}}\right)^{1{,}71}. \tag{101}$$

U jednadžbi (101) navedene su tri površine, a to su površina kružnog pojasa između zvona i ulazne cijevi, površina unutarnjeg presjeka zvona te unutarnja površina vrata zvona.

Površina unutarnjeg presjeka vrata zvona računa se kao:

$$a_{\mathrm{r}} = \frac{d_{\mathrm{vz}}^2\pi}{4}. \tag{102}$$

Površina kružnog pojasa između zvona i ulazne cijevi jednaka je:

$$a_{\mathrm{cr}} = \frac{(d_{\mathrm{z}}'^2 - d_{\mathrm{vz}}'^2)\pi}{4}, \tag{103}$$

a površina unutarnjeg presjeka zvona:

$$a_{\mathrm{c}} = \frac{d_{\mathrm{z}}'^2\pi}{4}. \tag{104}$$

Sada se uz poznate vrijednosti padova tlaka može izračunati pad tlaka kroz suha zvona:

$$h_{\mathrm{cd}} = h_{\mathrm{r}} + h_{\mathrm{ra}}. \tag{105}$$

Sada je potrebno proračunati srednju dinamičku potopljenost proreza na zvonima kako bi se dobio pad tlaka kroz propuhanu kapljevinu:

$$h_{\mathrm{Ds}} = h_{\mathrm{ur}} + \Delta h_{\mathrm{t}} + \frac{\Delta_{\mathrm{H}}}{2}, \tag{106}$$

pri čemu je $\Delta_H$ je hidraulički gradijent koji se određuje prema tipu zvona, a iznosi:

$$\Delta_H = 0{,}001245 \text{ m}.$$

Pad tlaka kroz propuhanu kapljevinu jednak je:

$$h_{\mathrm{al}} = \beta h_{\mathrm{Ds}}, \tag{107}$$

$\beta$ je faktor aeracije koji se očitava iz [7], a iznosi $\beta = 0{,}52$.

Uz poznate vrijednosti pada tlaka kroz suha zvona i pada tlaka kroz propuhanu kapljevinu, može se izračunati pad tlaka pri strujanju s plitice na pliticu prema:

$$h_{\mathrm{t}} = h_{\mathrm{cd}} + h_{\mathrm{sh}} + h_{\mathrm{al}}, \tag{108}$$

Još preostaje proračunati faktor rasporeda pare:

$$R_{\mathrm{VD}} = \frac{\Delta_{\mathrm{H}}}{h_{\mathrm{c}}}, \tag{109}$$

pri čemu $h_c$ označuje pad tlaka na zvonu, a jednak je sumi padova tlaka kroz ulaznu cijevi, zaokretni kanal i kružni pojas između zvona:

$$h_{\mathrm{c}} = h_{\mathrm{cd}} + h_{\mathrm{sh}}. \tag{110}$$

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Površina ulaznih cijevi (100), $A_r = 0{,}053219$ m$^2$
- Pad tlaka kroz ulazne cijevi (99), $h_r = 0{,}002864$ m
- Površina unutarnjeg presjeka vrata zvona (102), $a_r = 0{,}000998$ m$^2$
- Površina kružnog pojasa između zvona i ulazne cijevi (103), $a_{cr} = 0{,}001013$ m$^2$
- Površina unutarnjeg presjeka zvona (104), $a_c = 0{,}002534$ m$^2$
- Pad tlaka kroz zaokretni kružni kanal (101), $h_{ra} = 0{,}003573$ m
- Pad tlaka kroz suha zvona (105), $h_{cd} = 0{,}006437$ m
- Srednja dinamička potopljenost proreza na zvonima (106), $h_{Ds} = 0{,}041881$ m
- Pad tlaka kroz propuhanu kapljevinu (107), $h_{al} = 0{,}021778$ m
- Pad tlaka pri strujanju s plitice na pliticu (108), $h_t = 0{,}048215$ m
- Pad tlaka na zvonu (110), $h_c = 0{,}026437$ m
- Faktor rasporeda pare (109), $R_{VD} = 0{,}047094$

### 4.4.4. Proračun silaznog kanala

Potrebno je proračunati pad tlaka uslijed strujanja kapljevine ispod pregrade silaznog kanala koristeći sljedeću jednadžbu:

$$h_{\mathrm{Da}} = 1{,}27 * 10^{-5} \left(\frac{Q_{\mathrm{F}} * 3600}{A_{\mathrm{Da}}}\right)^2, \tag{111}$$

pri čemu je $A_{da}$ slobodna površina ispod pregrade preljevnog kanala:

$$A_{\mathrm{Da}} = L_{\mathrm{b}} h_{\mathrm{k}}. \tag{112}$$

Zatim se može izračunati i visina bistre kapljevine u preljevnom kanalu kao:

$$h_{\mathrm{dc}} = h_{\mathrm{t}} + h_{\mathrm{pr}} + \Delta h_{\mathrm{t}} + h_{\mathrm{Da}}. \tag{113}$$

Biti će potrebno proračunati stvarnu visinu zapjenjene kapljevine u preljevnom kanalu. Ona se određuje pomoću rel. gustoće pjene u preljevnom kanalu koja se računa prema idućem izrazu:

$$y_{\mathrm{f}} = \mathrm{e}^{-12{,}55 C_{\mathrm{SB}}^{0{,}91}}. \tag{114}$$

Sljedeći bitan podatak za proračun stvarne visine zapjenjene kapljevine jest pomoćni faktor $C_o$ koji se dobije kao:

$$C_{\mathrm{o}} = 0{,}0327 + 0{,}0286\mathrm{e}^{-137{,}8 h_{\mathrm{pr}}}, \tag{115}$$

te opterećenje segmentne pregrade kapljevinom:

$$\sigma_{\mathrm{L}} = \frac{Q_{\mathrm{F}} * 3600}{L_{\mathrm{b}}}, \tag{116}$$

Sada kada su poznati svi potrebni parametri, može se izračunati visina bistre kapljevine u preljevnom kanalu koristeći sljedeći izraz:

$$h_{\mathrm{L}} = y_{\mathrm{f}} \left[h_{\mathrm{pr}} + 15{,}33 C_{\mathrm{o}} \left(\frac{\sigma_{\mathrm{L}}}{3600 * y_{\mathrm{f}}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]. \tag{117}$$

Može se dobiti i odnos visine kanala i zapjenjene kapljevine:

$$\frac{h_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{s}}} * 100. \tag{118}$$

Pretpostavljeno vrijeme zadržavanja propuhane mase u preljevnom kanalu prema [Slika 23] iznosilo je 5,13 sekundi, a sada se uz poznate podatke može izračunati stvarno (realno) vrijeme zadržavanja prema idućoj jednakosti:

$$t'_{\mathrm{R}} = \frac{A'_{\mathrm{D}} h_{\mathrm{dc}}}{Q_{\mathrm{F}}}. \tag{119}$$

Proračun potrebnih vrijednosti:

- Slobodna površina ispod pregrade slivnog kanala (112), $A_{Da}$ = 0,013746 m$^2$

- Pad tlaka uslijed strujanja kapljevine ispod pregrade slivnog kanala (111), $h_{Da}$ = 0,025027 mm
- Visina bistre kapljevine u slivnom kanalu (113), $h_{dc}$ = 0,106165 m
- Relativna gustoća pjene u slivnom kanalu (114), $y_f$ = 0,291842
- Pomoćni faktor (115), $C_o$ = 0,032715
- Opterećenje segmentne pregrade kapljevinom (116), $\sigma_L$ = 1,33174 $m^3$/(h m)
- Visina bistre kapljevine u slivnom kanalu (117), $h_L$ = 0,017766 m
- Odnos visine kapljevine i zapjenjene kapljevine (118), $h_L/T_s$ = 4,44139 %
- Stvarno vrijeme zadržavanja propuhane mase u slivnom kanalu (119), $t'_R$ = 16,719 s

Sve proračunate vrijednosti u poglavljima 4.1. do 4.4. prikazane su na [Slika 21].

### 4.5. Određivanje dimenzija priključaka kolone

Dimenzioniranje priključaka kolone vrši se tako da se s pretpostavljenom brzinom strujanja struje ulazi u izraz za proračun masenog toka iz kojeg se dobije površina priključka, a zatim i odgovarajući promjer. S odabranim dimenzijama priključaka iz [11] može se dobiti stvarna brzina strujanja pojedine struje.

Priključci koje je potrebno dimenzionirati su:

- priključak za dovod komine
- priključak za dovod refluksa
- priključak za odvod destilata
- priključak za odvod kapljevite džibre
- priključak za dovod parovite džibre

Pretpostavljene brzine strujanja kapljevine jest 0,8 m/s, a brzina strujanja pare 4,5 m/s.

Površina priključka dobije se preko sljedećeg izraza:

$$A_P = \frac{q_m}{\rho w_{pret}}, \tag{120}$$

pri čemu je $q_m$ maseni protok, $w_{pret}$ pretpostavljena brzina, a $\rho$ gustoća pojedine struje.

Sada se može dobiti i unutarnji promjer priključka preko:

$$d_P = \sqrt{\frac{4A_P}{\pi}}. \tag{121}$$

Izraz (120) služi za određivanje približnog iznosa promjera, a stvari promjer se očitava iz [11]. Kada su nam poznate dimenzije priključka, može se dobiti i stvarna brzina strujanja pojedine struje koristeći sljedeću jednadžbu:

$$w_{\mathrm{stv}} = \frac{4q_{\mathrm{m}}}{\rho \pi d_{\mathrm{u}}^2} \,. \tag{122}$$

Priključak za dovod komine:

- Maseni protok komine, $q_{\mathrm{mm}}$ = 1,3889 kg/s
- Gustoća komine, $\rho_{\mathrm{m}}$ = 820,4576 kg/m$^3$ [Tablica 3]
- Površina priključka za dovod komine (120), $A_{\mathrm{P}}$ = 0,002116 m$^2$
- Izračunati unutarnji promjer priključka za dovod komine (121), $d_{\mathrm{P}}$ = 51,906 mm

Priključak za dovod refluksa:

- Maseni protok refluksa, $q_{\mathrm{mr}}$ = 0,131569 kg/s
- Gustoća refluksa, $\rho_{\mathrm{r}}$ = 776,2051 kg/m$^3$ [Tablica 3]
- Površina priključka za dovod refluksa (120), $A_{\mathrm{P}}$ = 0,000212 m$^2$
- Izračunati unutarnji promjer priključka za dovod refluksa (121), $d_{\mathrm{P}}$ = 16,42474 mm

Priključak za odvod destilata:

- Maseni protok destilata, $q_{\mathrm{md}}$ = 0,209866 kg/s
- Gustoća destilata, $\rho_{\mathrm{d}}$ = 1,186578 kg/m$^3$
- Površina priključka za odvod destilata (120), $A_{\mathrm{P}}$ = 0,039304 m$^2$
- Izračunati unutarnji promjer priključka za odvod destilata (121), $d_{\mathrm{P}}$ = 223,7027 mm

Priključak za odvod džibre (vrela kapljevina) – džibra 1:

- Maseni protok džibre, $q_{\mathrm{ms}}$ = 1,179023 kg/s
- Gustoća komine, $\rho_{\mathrm{s}}$ = 958,41 kg/m$^3$ [5]
- Površina priključka za dovod komine (120), $A_{\mathrm{P}}$ = 0,001538 m$^2$
- Izračunati unutarnji promjer priključka za dovod komine (121), $d_{\mathrm{P}}$ = 44,2482 mm

Priključak za dovod džibre (suhozasićena para) – džibra 2:

- Maseni protok džibre, $q_{\mathrm{msD}} \approx$ 0,2856 kg/s
- Gustoća suhozasićene pare džibre, $\rho_{\mathrm{sD}} \approx$ 0,59812 kg/m$^3$ [5]
- Površina priključka za dovod komine (120), $A_{\mathrm{P}}$ = 0,1061 m$^2$
- Izračunati unutarnji promjer priključka za dovod komine (121), $d_{\mathrm{P}}$ = 367,54 mm

Nakon proračunatih unutarnjih promjera priključaka, koristeći [11] očitavaju se normirane dimenzije, a odabrane su bešavne čelične cijevi.

**Tablica 7. Dimenzije priključaka očitanih iz [11] i iznosi stvarnih brzina**

| | Vanjski promjer [mm] | Unutarnji promjer [mm] | Debljina stjenke [mm] | Stvarna brzina (121) [m/s] |
|---|---|---|---|---|
| Komina | 44,5 | 39,3 | 2,6 | 1,3955 |
| Refluks | 38 | 32,8 | 2,6 | 0,2006 |
| Destilat | 267 | 252,8 | 7,1 | 3,524 |
| Džibra 1 | 57 | 51,2 | 2,9 | 0,5975 |
| Džibra 2 | 267 | 252,8 | 7,1 | 9,512 |

# 5. ZAKLJUČAK

Jedan od ciljeva ovog rada bilo je prikazati ovisnost dimenzija (površina, duljina) štedne grijalice, odnosno deflegmatora s obzirom na temperaturu komine prije ulaska u rektifikacijsku kolonu. Naime, destilaciju je moguće provesti sa ili bez predgrijavanja komine, no opće je poznato da koristeći predgrijavanje komine smanjujemo potrebni maseni protok rashladne vode, kao i toplinski tok kotlića. Što se tiče dimenzija štedne grijalice, prikazano je da se s povećanjem željene temperature komine prije ulaska u kolonu povećava potrebna površina, odnosno duljina grijalice u kojemu se ostvaruje povrat topline. Maksimalna temperatura koja bi se teoretski mogla ostvariti jest temperatura pare destilata, ali to je hipotetski slučaj koji bi zahtijevao beskonačno veliku površinu grijalice, što je u praksi, naravno nemoguće.

Kasnije u radu provedena je ovisnost iznosa refluksa (oborine) i broja plitica, utroška rashladnog i ogrjevnog medija te iznosa potrebnih toplinskih tokova za nesmetano funkcioniranje sustava destilacije. Može se zaključiti da se s povećanjem refluksa potrebni broj plitica smanjuje, ali to rezultira povećanjem toplinskog toka kotlića te deflegmacije, kao i većim utroškom rashladne vode i ogrjevne pare. U procesnoj industriji, posebice u području destilacije, energetski troškovi su enormno veliki, pa se ovom analizom može zaključiti da se mora naći optimum između investicijskih i pogonskih troškova, što je jedan od najbitnijih zadataka inženjera procesne tehnike.

Nakon provedenog termodinamičkog proračuna kolone, bilo je potrebno odrediti dimenzije kolone kao i geometrijske karakteristike plitice te provesti hidrauličku analizu. Prva pomisao je bio izbor sitastih plitica, no jedan od najvećih problema sitastih plitica jest curenje koje smanjuje učinkovitost. Zatim, podaci za proračun plitica s ventilima je nedostupan, pa kako bi se eliminirali navedeni nedostaci, izabrane su plitice sa zvonima koje imaju srednje velik kapacitet i djelotvornost. Kako bi se proces određivanja plitica i dimenzioniranja pojednostavio, odabran je jedan stupanj pojenja, te je za pliticu napajanja odabrana najniža plitica kolone za jačanje.

Na kraju su izrađeni sklopni crteži zvona, postolja za plitice i rektifikacijske kolone koji se nalaze u prilogu.

# LITERATURA

[1] F. Bošnjaković: Nauka o toplini III, dio, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.

[2] A. Galović: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[3] M. Andrassy: Podloge za predavanje iz kolegija Toplinske operacije

[4] E. Beer: Destilacija, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 2006.

[5] B. Halasz, A. Galović, I. Boras: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.

[6] IPIM: Tehnički priručnik za procesnu industriju, IPIM, Zagreb, 1993.

[7] H. Z. Kister: Distillation Design, McGraw-Hill, New York, 1992.

[8] U. N. Gaitonde, D. D. Deshpande, S. P. Sukhatme: Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 17, No. 4, 1978.

[9] I.S. Khattab, F. Bandarkar, M. A. A. Fakhree, A. Jouyban: Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 29, No. 6, 2011.

[10] H. P. Henry, W. G. Don: Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition, McGraw-Hill, New York, 2007.

[11] K. Bojan: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.

[12] E. L. Ernest: Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Vol.2-Elsevier (1997.)

[13] http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical_Properties:_Ethanol

[14] https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-ethanol-Cp-Cv-isobaric-isochoric-ethyl-alcohol-d_2030.html

# PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija

| POPIS PRIKLJUČAKA | | |
|---|---|---|
| U | Odvod destilata | DN 250 |
| V | Dovod refluksa | DN 32 |
| W | Dovod komine | DN 40 |
| X | Dovod pogonske pare | DN 250 |
| Y | Odvod džibre | DN 50 |
| Z | Manloh | |

| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj Norma | Materijal | Sirove dimenzije Proizvođač | Masa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 32 | Priključak za manloh | 1 | - | S275 | Φ300x100 | |
| 31 | Pločica za vijak | 4 | DIN 433 | S275 | Φ50x4 | |
| 30 | Lim 2 za postolje plitica | 4 | - | S275 | - | |
| 29 | Lim 1 za postolje plitica | 1 | - | S275 | 654x205x10 | |
| 28 | Cijev 2 za postolje kolone | 1 | - | S275 | Φ711x775 | |
| 27 | Cijev 1 za postolje kolone | 1 | - | S275 | Φ1200x50 | |
| 26 | Matica 30 | 8 | DIN 934 | 5 | M30x24 | |
| 25 | Prirubnica za destilat | 1 | DIN 2573 | R-St 37-2 | Φ375x24 | |
| 24 | Priključak za destilat | 1 | - | S275 | Φ267x250 | |
| 23 | Podnica s otvorom za destilat | 1 | - | S275 | R715,5x4,5 | |
| 22 | Prirubnica za refluks | 1 | DIN 2573 | R-St 37-2 | Φ120x16 | |
| 21 | Priključak za refluks | 1 | - | S275 | Φ38x262 | |
| 20 | Pločica za vijak zvona | 840 | - | S275 | 35,65x1x12 | |
| 19 | Matica M8 | 420 | DIN 934 | 5 | M8x6,5 | |
| 18 | Vijak za zvono M8 | 420 | - | 5,6 | M8x60 | |
| 17 | Vrat zvona | 420 | - | S275 | Φ44x55 | |
| 16 | Zvono | 420 | - | S275 | Φ60x60 | |
| 15 | Šipka za plitice | 4 | - | S275 | Φ30x4952 | |
| 14 | Pločica za držač kolone | 3 | - | S275 | 135x150x200 | |
| 13 | Rebro za držač kolone | 3 | - | S275 | 100x20x165 | |
| 12 | Prirubnica za kominu | 1 | DIN 2573 | R-St 37-2 | Φ130x16 | |
| 11 | Priključak za kominu | 1 | - | S275 | Φ44,5x302 | |
| 10 | Brana za smirivanje toka | 1 | - | S275 | 581,3x4x55 | |
| 9 | Plitica | 12 | - | S275 | Φ702x5 | |
| 8 | Pregrada | 12 | - | S275 | 458,2x4x430 | |
| 7 | Prirubnica za parovitu džibru | 1 | DIN 2573 | R-St 37-2 | Φ375x24 | |
| 6 | Priključak za parovitu džibru | 1 | - | S275 | Φ267x250 | |
| 5 | Prirubnica za kapljevitu džibru | 1 | DIN 2573 | R-St 37-2 | Φ140x16 | |
| 4 | Priključak za kapljevitu džibru | 1 | - | S275 | Φ57x150 | |
| 3 | Podnica s otvorom za džibru | 1 | - | S275 | R715,5x4,5 | |
| 2 | Plašt kolone | 1 | - | S275 | Φ711x5160 | |
| 1 | Rebro za postolje kolone | 10 | - | S275 | 200x40x551 | |

**Napomena:**

Pozicija 2 - poprečni V zavar svakih 1500 mm

Pozicija 15 - na prvoj plitici pritegnuta maticom M30 s gornje strane koja je dodatno zavarena, a na ostalim plitica izvedba prema detalju I

Pozicija 10 - raspored i dimenzije ozubljenja identičan poziciji 8 i ima ih 7

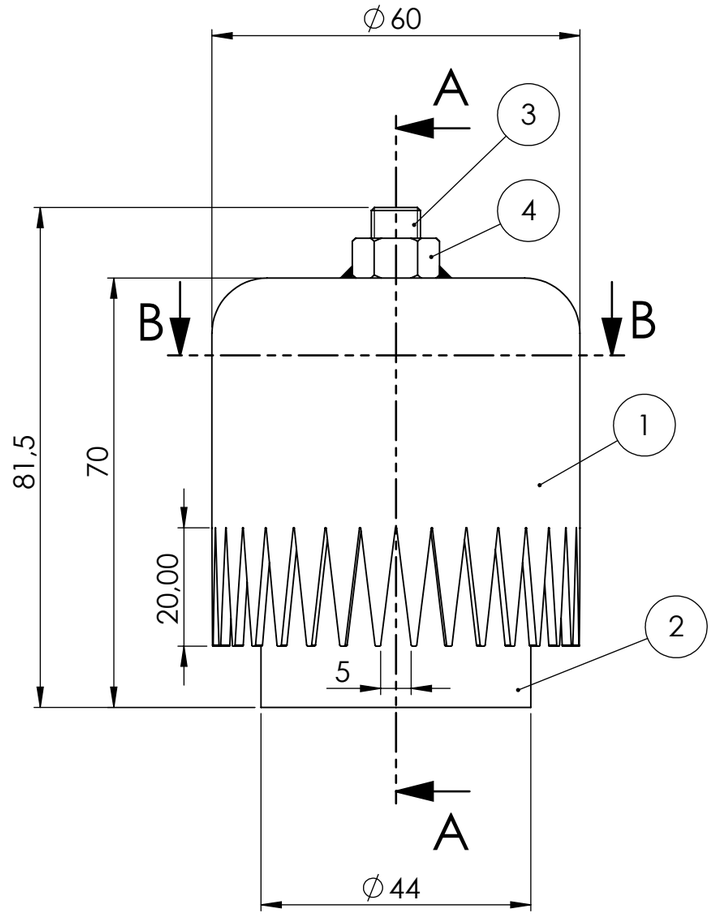
Spoj pozicija 18 i 20 prikazan je na sklopnom crtežu zvona

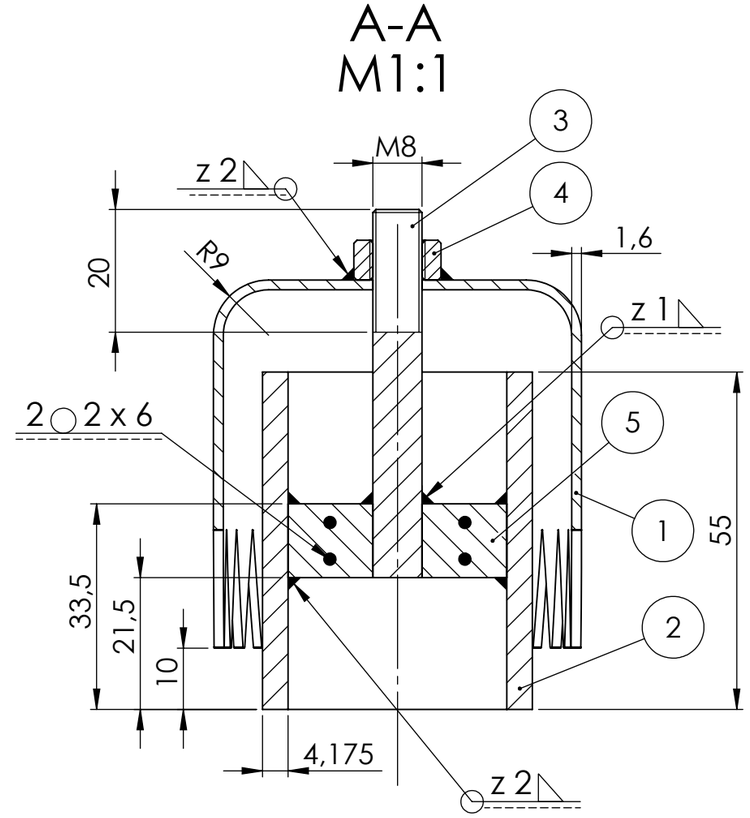
Izvedba postolja za kolonu - Pozicija 1 se zavari na poziciju 27 pa sve skupa na poziciju 28

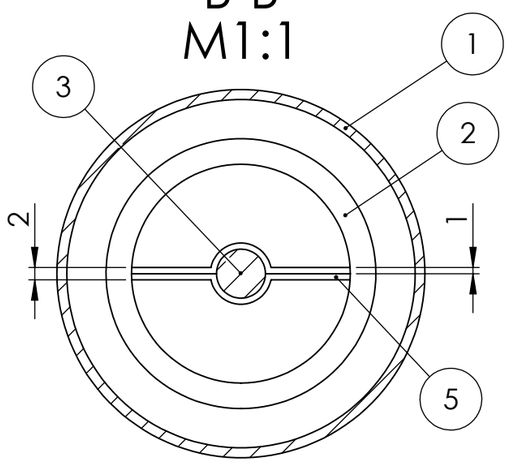
Spoj pozicija 29 i 30 prikazan je na sklopnom crtežu postolja za plitice

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | Potpis | |
| | Projektirao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | | FSB Zagreb |
| | Razradio | 13.02.2021. | Pavao Benčić | | |
| | Crtao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | | |
| | Pregledao | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | | |
| | Voditelj rada | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | | |
| ISO - tolerancije | Objekt: | | | Objekt broj: | |
| | | | | R. N. broj: | |
| | Napomena: | | | Smjer: Procesno-energetski | Kopija |
| | Materijal: | | Masa: | ZAVRŠNI RAD | |
| | Mjerilo originala M1:10 | | Naziv: Rektifikacijska kolona | Pozicija: | Format: A1 |
| | | | Crtež broj: | | Listova: 3 List: 1 |

Design by CADLab




| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj Norma | Materijal | Sirove dimenzije Proizvođač | Masa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | Pločica za vijak zvona | 2 | - | S275 | 35,65x1x12 | |
| 4 | Matica M8 | 1 | DIN 934 | 5 | M8x6,5 | |
| 3 | Vijak za zvono M8 | 1 | - | 5.6 | M8x60 | |
| 2 | Vrat zvona | 1 | - | S275 | Φ44x4,175 | |
| 1 | Zvono | 1 | - | S275 | Φ60x1,6 | |

| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | Potpis |
|---|---|---|---|---|
| | Projektirao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Razradio | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Crtao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Pregledao | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | |
| | Voditelj rada | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | |

FSB Zagreb

| ISO - tolerancije | Objekt: | Objekt broj: |
|---|---|---|
| | | R. N. broj: |
| | Napomena: | Smjer: Procesno-energetski |
| | Materijal: S275 / Masa: | ZAVRŠNI RAD |
| | Mjerilo originala M1:1 | Naziv: Sklop zvona |
| | | Crtež broj: |

Kopija

Pozicija:

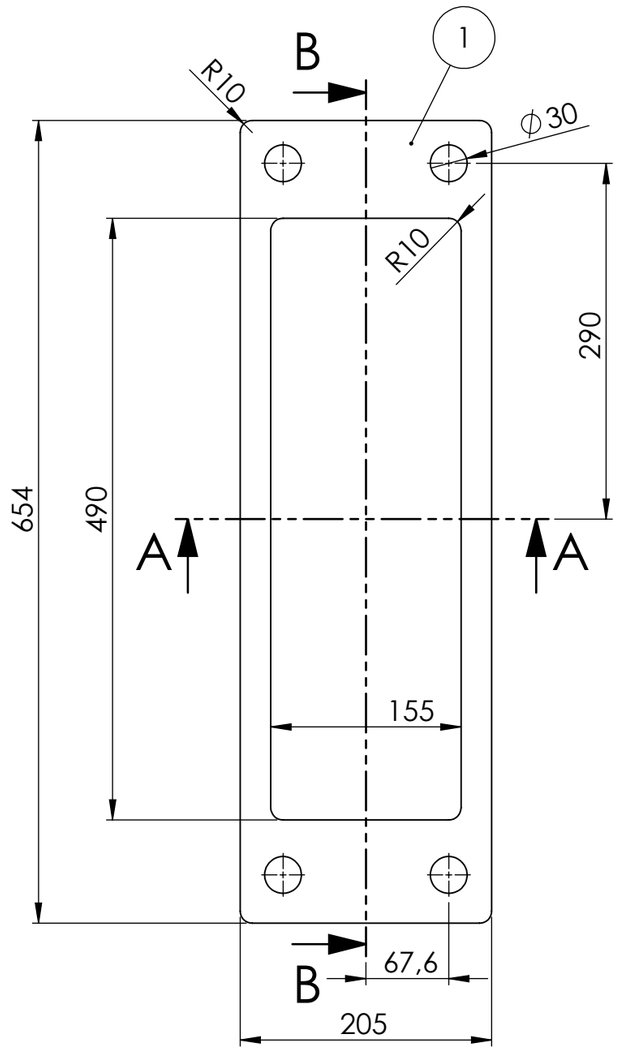
Format: A3

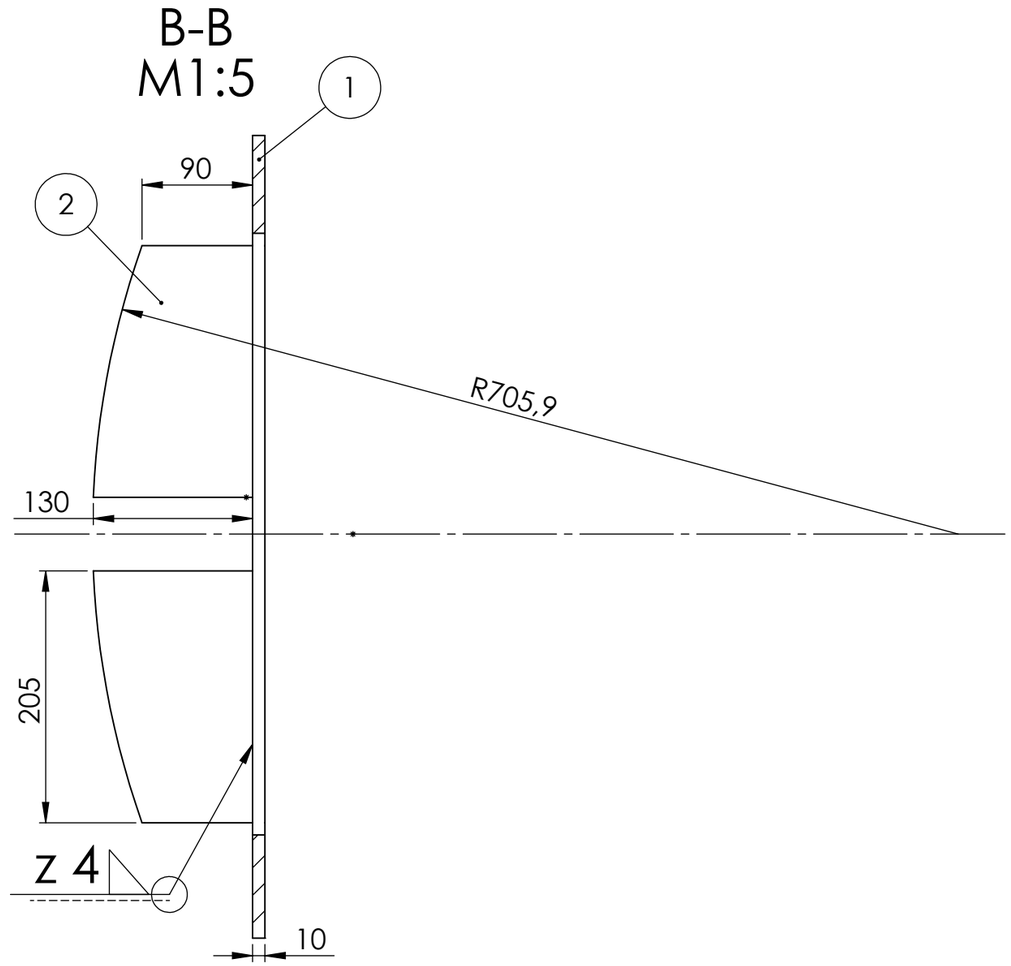
Listovara: 3

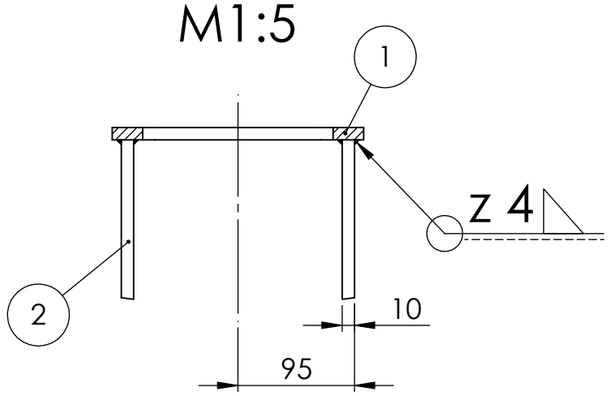
List: 2

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Design by CADLab




| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj / Norma | Materijal | Sirove dimenzije / Proizvođač | Masa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | Lim 2 za postolje plitica | 4 | - | S275 | - | |
| 1 | Lim 1 za postolje plitica | 1 | - | S275 | 654x205x10 | |

| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | Potpis |
|---|---|---|---|---|
| | Projektirao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Razradio | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Crtao | 13.02.2021. | Pavao Benčić | |
| | Pregledao | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | |
| | Voditelj rada | 13.02.2021. | Nenad Ferdelji | |

FSB Zagreb

| ISO - tolerancije | Objekt: | Objekt broj: |
|---|---|---|
| | | R. N. broj: |
| | Napomena: | Smjer: Procesno-energetski |
| | Materijal: S275 / Masa: | ZAVRŠNI RAD |
| | Mjerilo originala M1:5 | Naziv: Sklop postolja za plitice |
| | | Pozicija: |
| | | Crtež broj: |

Kopija

Format: A3

Listova: 3

List: 3

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Design by CADLab