

# Sustav za dehidraciju etilnog alkohola

---

Lončar, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:212731>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Goran Lončar**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

doc. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing.

Student:

Goran Lončar

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija te uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Nenadu Ferdelji na prihvaćanju mentorstva, na pomoći i praćenju te svim danim savjetima i prenesenom znanju koji su bili od pomoći prilikom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se roditeljima i sestri na potpori i razumijevanju tijekom cijelog školovanja.

Također, zahvaljujem se tvrtki Probotica koja je omogućila i prihvatila ovaj projekt vezan uz moj rada te tijekom izrade ovog rada puno pridonijela svojim savjetima.

Goran Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove.

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Goran Lončar**

JMBAG: **0035224843**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sustav za dehidraciju etilnog alkohola**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ethyl alcohol dehydration system**

Opis zadatka:

Korisno otapalo (alkohol) dobiveno procesom destilacije sadrži u sebi, volumno, oko 4-5% vode. Takvo otapalo potrebno je dehidrirati odnosno odvojiti vodu koristeći tehnologiju molekularnih sita. Proces dehidracije počinje u isparivaču unutar kojeg dolazi do isparavanja alkohola čija se para vodi u adsorbere s ciljem uklanjanja vode. Adsorber je dio opreme unutar kojeg se nalaze molekularna sita, koja u toku procesa adsorbiraju vlagu iz isparene smjese. Sljedeći korak u procesu je ponovna kondenzacija sada čistog alkohola, pothlađivanje do 30 °C, te njegovo pohranjivanje u pripadajuće IBC spremnike. Budući da molekularna sita imaju određeni kapacitet vlage koji mogu privući na sebe, potrebno ih je s vremenom regenerirati. Sama regeneracija odvija se na način da se u adsorberu postigne vakuum, te uslijed vakuuma i visoke temperature, dolazi do izdvajanja adsorbirane vlage na molekularnim sitima. Izdvojenu vlagu je, također, potrebno naknadno pothladiti kako bi se pohranila u spremnike. Kako je proces dehidracije kontinuiran, potrebno je napraviti sustav s dva adsorbere, tako da se jedan regenerira dok drugi dehidrira alkohol. Pri tome treba voditi računa da se ta dva pod procesa i fizički odvoje pravilnim rasporedom zaporne armature.

Tehnički podaci:

- Kapacitet dehidracije: 400 kg/h
- Korisno otapalo: etanol
- Maksimalni radni tlak: 5 bar
- Ogrjevni medij: suhozasićena vodena para tlaka 5 bar
- Maksimalni protok ogrjevnog medija: 300 kg/h
- Rashladni medij u kondenzatoru: voda, 28/36 °C
- Maksimalni protok rashladne vode: 10000 kg/h

U sklopu rada je potrebno:

- Pregled stanja tehnologija dehidracije alkohola
- Izraditi P&ID dijagram procesa
- Odabrati i dimenzionirati dehidratore u procesu
- Izraditi toplinski proračun i tehničke crteže kondenzatora

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2022.

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
2. VRSTE DEHIDRACIJE ETILNOG ALKOHOLA .....	2
2.1. Promjena tlaka destilacije .....	2
2.2. Dodavanje treće komponente smjese etanola i vode .....	3
2.3. Adsorpcija .....	4
3. SUSTAV ZA DEHIDRACIJU ETILNOG ALKOHOLA ADSORCIJOM.....	5
3.1. Opis sustava .....	5
3.1.1. Molekularna sita.....	6
3.1.2. Adsorber.....	7
3.1.3. Proračun adsorbera.....	8
3.1.3.1. Određivanje mase molekularnih sita.....	8
3.1.3.2. Određivanje pada tlaka adsorbera.....	10
3.2. Vakuum pumpa s tekućim prstenom.....	11
4. KONDENZATOR ETILNG ALKOHOLA .....	12
4.1. Termodinamički proračun kondenzatora .....	13
4.1.1. Broj cijevi izmjenjivača .....	13
4.1.2. Koeficijenti prijelaza topline.....	14
4.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode .....	14
4.1.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani etanola .....	15
4.2. Proračun duljine i promjera izmjenjivača .....	19
4.2.1. Duljina izmjenjivača .....	19
4.2.2. Promjer plašta izmjenjivača .....	20
4.3. Proračun priključaka kondenzatora.....	21
4.3.1. Dimenzioniranje priključka za dovod pare .....	21
4.3.2. Dimenzioniranje priključaka za odvod kondenzata .....	22
4.3.3. Dimenzioniranje priključka za dovod i odvod vode .....	23
4.4. Proračun čvrstoće izmjenjivača .....	24
4.4.1. Definiranje konstrukcijskih parametara .....	24
4.4.2. Proračun cilindričnog plašta izmjenjivača .....	25
4.4.3. Proračun čvrstoće oko najvećeg izreza na cilindričnom plaštu .....	27
4.4.4. Proračun čvrstoće podnice (bez izreza) izvrgnute unutrašnjem tlaku.....	29
4.4.4.1. Potrebna debljina stijenke kalote .....	29
4.4.4.2. Potrebna debljina stijenke torusa .....	30
4.4.4.3. Provjera podnice na elastično ulubljivanje .....	32
4.4.5. Proračun čvrstoće podnice (s izrezima) izvrgnute unutrašnjem tlaku .....	32

---

4.4.5.1. Potrebna debljina stijenke kalote .....	33
4.4.5.2. Potrebna debljina stijenke torusa .....	33
4.4.6. Proračun čvrstoće cijevne stijene.....	35
4.4.7. Proračun sile u vijcima.....	36
4.4.7.1. Najmanja sila u vijcima za radno stanje i promjer vijaka.....	37
4.4.7.2. Najmanja sila u vijcima za ispitno stanje i promjer vijaka .....	38
4.4.7.3. Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje i promjer vijaka .....	39
4.4.8. Proračun čvrstoće prirubnice .....	40
4.4.8.1. Presjek A-A prirubnice .....	41
4.4.8.2. Presjek B-B prirubnice.....	42
4.4.8.3. Presjek C-C prirubnice.....	43
4.4.9. Proračun cijevnog snopa na izvijanje .....	44
4.4.10. Proračun zavara cijevnog snopa sa cijevnom stijenkom.....	46
4.5. Proračun pada tlaka izmjenjivača .....	47
4.5.1. Pad tlak vode u cijevima .....	47
4.5.2. Pad tlaka etilnog alkohola .....	49
4.6. Vrsta i klasa kondenzatora .....	51
Radni medij voda .....	51
Radni medij etilni alkohol:.....	51
4.7. Tehnički opis kondenzatora etilnog alkohola .....	52
4.7.1. Pločasti izmjenjivač .....	53
5. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55
PRILOZI.....	56

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Molekula etanola.....	1
Slika 2. Dehidracija s promjenom tlaka destilacije .....	2
Slika 3. Dehidracija s dodavanjem treće komponente .....	3
Slika 4. Aktivni ugljen (lijevo) [5] .....	4
Slika 5. Silikagel (desno) [5].....	4
Slika 6. Molekularna sita [5] .....	4
Slika 7. Adsorpcijski sustav za dehidracije etilnog alkohola .....	6
Slika 8. Adsorber [9] .....	7
Slika 9. Vakuum pumpa s tekućim prstenom [11] .....	11
Slika 10. Raspored cijevi.....	20
Slika 11. Plašt izmjenjivača .....	25
Slika 12. Priključak za dovod pare.....	27
Slika 13. Graf oslabljena oko najvećeg izreza [6].....	28
Slika 14. Podnica DN 200 .....	29
Slika 15. Graf za koeficijent beta [6] .....	31
Slika 16. Podnica s utorima za priključke .....	32
Slika 17. Graf oslabljenja stijenke torusa [6] .....	34
Slika 18. Cijevna stijena.....	35
Slika 19. Faktor sigurnosti i pomoćne vrijednosti [6].....	37
Slika 20. Prirubnica .....	40
Slika 21. Graf umanjenja promjera za vijke [6] .....	40
Slika 22. Presjek A-A prirubnice .....	41
Slika 23. Presjek B-B prirubnice.....	42
Slika 24. Presjek C-C prirubnice.....	43
Slika 25. Površina opterećenja zavara.....	46
Slika 26. Dijagram kategorije kondenzatora [6] .....	51
Slika 27. Pločasti izmjenjivač [14].....	53



## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- GL-2023 P&ID dijagram sustava za dehidraciju etilnog alkohola
- GL-2023-00 Kondenzator etilnog alkohola
- GL-2023-01 Plašt
- GL-2023-02 Podnica s priključkom
- GL-2023-03 Cijevna stijena
- GL-2023-04 Brtva
- GL-2023-05 Zaštitna ploča za paru

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_i$	$m^2$	Površina izmjenjivača
$A_c$	$m^2$	Površina poprečnog presjeka cijevi
$A_p$	$m^2$	Površina poprečnog presjeka plašta
$a_1$	mm	Udaljenost težišta prirubnice
$b_D$	mm	Korisna širina brtve
$c_{p,w,m,i}$	$\text{kJ/kgK}$	Specifični toplinski kapacitet vode pri srednjoj temperaturi
$c_1$	mm	Dodatak za odstupanje materijala za šavne cijevi
$c_2$	mm	Dodatak zbog smanjena debljine trošenjem i korozijom
$d_a$	m	Promjer adsorbera
$d_{\check{c}}$	m	Ekvivalentni promjer čestice molekularnih sita
$d_D$	mm	Korisna širina brtve
$D_{\text{ekv}}$	m	Ekvivalentni promjer strujanja etilnog alkohola
$D_{\text{kalote}}$	mm	Promjer kalote
$d_k$	mm	Promjer vijka
$d_{p,i}$	mm	Promjer teoretskog priključka za odvod etilnog alkohola
$d_{p,u}$	mm	Promjer teoretskog priključka za dovod etilnog alkohola
$d_{p,w}$	mm	Promjer teoretskog priključka za dovode i odvod vode
$D_v$	mm	Vanjski promjer cijevi plašta
$d_v$	mm	Vanjski promjer cijevi vode za hlađenje
$d_{v,D}$	mm	Vanjski promjer brtve
$d_{v,e,i}$	mm	Vanjski promjer priključka za odvod etilnog alkohola
$d_{v,e,u}$	mm	Vanjski promjer priključka za dovod etilnog alkohola
$d_{v,w}$	mm	Vanjski promjer priključaka za dovod i odvod vode
$D_u$	mm	Unutarnji promjer cijevi plašta
$d_u$	mm	Unutarnji promjer cijevi vode za hlađenje
$d_{u,D}$	mm	Unutarnji promjer brtve
$d_{u,e,i}$	mm	Unutarnji promjer priključka za odvod etilnog alkohola
$d_{u,e,u}$	mm	Unutarnji promjer priključka za dovod etilnog alkohola
$d_{u,w}$	mm	Unutarnji promjer priključaka za dovod i odvod vode
$f$	-	Pomoćna veličina
$f_a$	$\text{N/mm}^2$	Proračunsko naprezanje
$f_d$	$\text{N/mm}^2$	Proračunska čvrstoća

$F_{DV}$	N	Ugradbena sila na prirubnici
$F_K$	N	Dopuštena sila izvijanja
$F_R$	N	Sila naprezanja u zavaru
$F_{SB}$	N	Radna sila na prirubnici
$F_{SB,i}$	N	Ispitna sila na prirubnici
$F_t$	N	Sila uslijed toplinskih dilatacija
$f_{test}$	N/mm <sup>2</sup>	Ispitna čvrstoća
$f_1$	mm	Geometrijski faktor za trokutasti prolaz
$f_2$	mm	Geometrijski faktor za broj prolaza
$g$	m/s <sup>2</sup>	Ubrzanje zemljine sile teže
$h_f$	mm	Širina prirubnice
$h_{m,s}$	m	Visina fluidiziranog sloja
$h_{sz}$	kJ/kg	Entalpija suhozasićene pare etanola
$h_{vk}$	kJ/kg	Entalpija vrele kapljevine etanola
$I$	mm <sup>4</sup>	Aksijalni moment tromosti
$i$	-	Broj iteracija
$k_v$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prolaza topline vanjske površine
$Li$	m	Duljina izmjenjivača
$l_k$	mm	Slobodna duljina izvijanja
$l_0$	mm	Maksimalna duljina izvijanja
$n$	-	Broj cijevi
$Nu_w$	-	Nusseltov broj
$OTL$	mm	Ekvivalenti promjer izmjenjivača,
$q$	mm	Debljina zavara
$q_{m,e}$	kg/s	Maseni protok etilnog alkohola
$q_{m,w}$	kg/s	Maksimalni protok vode
$q_{v,e}$	m <sup>3</sup> /s	Volumni protok etilnog alkohola
$q_{v,v}$	m <sup>3</sup> /s	Protočna količina vode
$P$	-	Broj prolaza
$p_e$	bar	Tlak etanola
$PT$	bar	Hidrostatski ispitni tlak
$Pr_{w,m,i}$	-	Prandtlov broj vode pri srednjoj temperaturi
$p_w$	bar	Tlak vode
$Re_i$	-	Reynoldsov broj
$Rp_{0,2, 20^\circ C}$	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalna granica razvlačenja pri 20° C
$Rp_{0,2, 100^\circ C}$	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalna granica razvlačenja pri 100° C
$R_m 20^\circ C$	N/mm <sup>2</sup>	Najmanja vrijednost vlačne čvrstoće pri 20° C
$s$	mm	Potrebna debljina stijenke plašta izvrnutog radnom tlaku
$s_c$	mm	Potrebna debljina cijevne stijene

$s_{e,i}$	mm	Debljina stijenke izlaznog priključka etilnog alkohola
$s_{e,u}$	mm	Debljina stijenke ulaznog priključka etilnog alkohola
$s_i$	mm	Potrebna debljina stijenke
$s_p$	mm	Debljina stijenke plašta
$s_{PT}$	mm	Potrebna debljina stijenke plašta izvrnutog ispitnom tlaku
$s_{p,w}$	mm	Debljina stijenke ulaznog i izlaznog priključka vode
$s_w$	m	Debljina stijenke cijevi vode za hlađenje
$t$	mm	Razmak između cijevi
$V_c$	m <sup>3</sup>	Volumen cijevi
$V_{m,s}$	m <sup>3</sup>	Volumen fluidiziranog sloja
$V_p$	m <sup>3</sup>	Volumen plašta
$V_{prirubnice}$	m <sup>3</sup>	Volumen prirubnice
$V_{podnice}$	m <sup>3</sup>	Volumen podnice
$w$	m/s	Dostrujna brzina
$W_{DV}$	mm <sup>3</sup>	Moment otpora zbog ugradbene sile
$w_{ekv}$	m/s	Ekvivalentna brzina strujanja etilnog alkohola izvan cijevi
$w_{izr,e,i}$	m/s	Stvarna izlazna brzina etilnog alkohola
$w_{izr,e,u}$	m/s	Stvarna ulazna brzina etilnog alkohola
$w_{izr,w}$	m/s	Stvarna ulazna i izlazna brzina vode
$w_{pret,e,i}$	m/s	Pretpostavljena izlazna brzina etilnog alkohola
$w_{pret,e,u}$	m/s	Pretpostavljena ulazna brzina etilnog alkohola
$w_{pret,w}$	m/s	Pretpostavljena ulazna i izlazna brzina vode
$w_s$	m/s	Protustrujna brzina etilnog alkohola
$W_{SB}$	mm <sup>3</sup>	Moment otpora uslijed radne sile
$W_{SB,i}$	mm <sup>3</sup>	Moment otpora uslijed ispitne sile
$w_{stv}$	m/s	Stvarna brzina vode u cijevima
$x_a$	-	Adsorpcijska izoterma
$x_u$	-	Udio etanola u ulaznoj struji
$x_i$	-	Udio etanola u izlaznoj struji
$\alpha_c$	C <sup>-1</sup>	Toplinska vodljivost cijevi
$\alpha_p$	C <sup>-1</sup>	Toplinska vodljivost plašta

$\alpha_{v,i}$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline etilnog alkohola
$\alpha_{v,k}$	W/m <sup>2</sup> K	Smanjeni koeficijent prijelaza topline
$\alpha_{u,w,i}$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline vode
$\Delta h$	kJ/kg	Razlika entalpija etanola
$\Delta p_a$	Pa	Pad tlaka u adsorberu
$\Delta p_l$	Pa	Linijski pad tlaka u cijevima
$\Delta p_p$	Pa	Pad tlaka u etilnog alkohola
$\Delta p_{pr,p}$	Pa	Pad tlaka zbog naglog proširenja
$\Delta p_{pr,s}$	Pa	Pad tlaka zbog naglo suženja
$\Delta p_{pl,ko}$	Pa	Pad tlaka u plaštu
$\Delta p_w$	Pa	Pad tlaka u vode
$\Delta x$	-	Promjena sadržaja vode
$\Delta t_m$	°C	Manja temperaturna razlika
$\Delta t_v$	°C	Veća temperaturna razlika
$\Delta \vartheta_m$	-	Srednja logaritamska temperatura
$\vartheta_{pk}$	°C	Temperatura pothlađene kapljevine etanola
$\vartheta_{pohl}$	°C	Temperatura pothlađenja etanola
$\varepsilon$	-	Poroznost molekularnih sita
$\vartheta_{k,e}$	°C	Temperatura kondenzacije etanola
$\vartheta_{m,i}$	°C	Srednja temperatura vode
$\vartheta_{sv,i}$	°C	Pretpostavljena temperatura vanjske stijenke-kondenzacijski dio
$\vartheta_{sr,i}$	°C	Srednja temperatura stijenke cijevi i etanola
$\vartheta_w'$	°C	Ulazna temperatura vode
$\vartheta_w''$	°C	Izlazna temperatura vode
$\lambda$	-	Vitkost štapa
$\lambda_{\check{c}}$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti čelika
$\lambda_{k,i}$	W/mK	Toplinska vodljivost kondenzata
$\lambda_p$	-	Koeficijent trenja
$\lambda_{w,m,i}$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti vode pri srednjoj temperaturi

$\mu_{k,i}$	Pas	Dinamička viskoznost kondenzata etilnog alkohola
$\mu_e$	Pas	Dinamička viskoznost pare etilnog alkohola
$\xi_{pr,i}$	-	Koeficijent trenja na izlaznom priključku vode
$\xi_{pr,p}$	-	Koeficijent trenja zbog naglog proširenja
$\xi_{pr,s}$	-	Koeficijent trenja zbog naglog suženja
$\xi_{pr,ul}$	-	Koeficijent trenja na ulaznom priključku vode
$\rho$	kg/ m <sup>3</sup>	Gustoća etilnog alkohola
$\rho_{e,u}$	kg/ m <sup>3</sup>	Ulazna gustoća etilnog alkohola
$\rho_{e,i}$	kg/ m <sup>3</sup>	Izlazna gustoća etilnog alkohola
$\rho_{k,i}$	kg/ m <sup>3</sup>	Gustoća kondenzata
$\rho_e$	kg/ m <sup>3</sup>	Gustoća pare etilnog alkohola
$\rho_{w,m,i}$	kg/ m <sup>3</sup>	Gustoća vode pri srednjoj temperaturi
$\rho_{\delta}$	kg/ m <sup>3</sup>	Nasipna gustoća molekularnih sita
$\tau$	s	Vrijeme zasićenja adsorbenta
$\nu$	-	Koeficijent zavara za bešavne cijevi
$\nu_A$	-	Koeficijent oslabljenja
$\nu_e$	m <sup>2</sup> /s	Kinematička viskoznost etilnog alkohola
$\Phi_k$	kW	Toplinski učinak kondenzatora
$\Phi_{ko,i}$	kW	Toplinski tok po jedinici duljine
$\Psi$	-	Sfericitet molekularnih sita

## SAŽETAK

U sklopu završnog rada bilo je potrebno izraditi dijelove sustava za dehidraciju etilnog alkohola. Adsorber i kondenzator su dijelovi sustava za dehidraciju etilnoga alkohola koje je bilo potrebno obuhvatiti proračunom. Adsorber je uređaj unutar kojeg se nalaze molekularna sita koja služe za dehidraciju para etilnog alkohola sa čistoće 95% na čistoću 99,6%. Za potrebe proračuna izrađen je termodinamički proračun i proračun čvrstoće kondenzatora (Shell-tube) etilnog alkohola. Kondenzator se hladi vodom početne temperature 28°C. Na kraju rada je prikazan P&ID dijagram procesa. P&ID dijagram je grafički prikaz procesa u kojem je prikazana sva oprema zajedno sa mjernim instrumentima i regulacijom potrebnom za funkcioniranje procesa.

Ključne riječi: dehidracija, adsorber, molekularna sita, kondenzator, termodinamički proračun, proračun čvrstoće, P&ID dijagram.

## **SUMMARY**

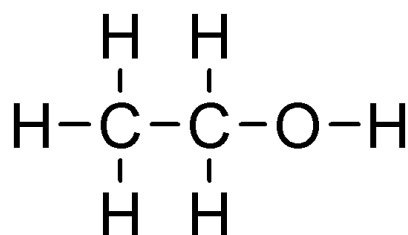
The aim of this paper was to construct a part of ethyl alcohol dehydration system with calculations of the adsorber and condenser. An adsorber is a device that contains molecular sieves which improve ethanol purity by dehydrating it from 95% to 99,6% volumetric purity. thermodynamic calculation and strength calculation were conducted for ethyl alcohol shell-tube condenser. The condenser is water cooled with the initial water temperature being 28°C. At the end of the paper a P&ID diagram containing all of the procesing equiment, measuring instruments and regulations necessary for optimal system functionig is shown.

Key words: dehidration, adsorber, molecular sieves, condenser, thermodynamic calculation, calculation of the strength, P&ID diagram



## 1. UVOD

Etanol( $C_2H_5OH$ ) je jedan od članova alkoholnih skupina. Etilni alkohol je alkohol s masenim udjelom etanola većim od 99% koji se upotrebljava u industrijske svrhe. U farmaceutskoj industriji se koristi za proizvodnju lijekova i dezinfekcijskih sredstava. Prisutan je i u automobilskoj industriji kod motora s unutarnjim izgaranjem gdje se dodaje benzinu s ciljem povećanja oktanskog broja i smanjenja emisija.



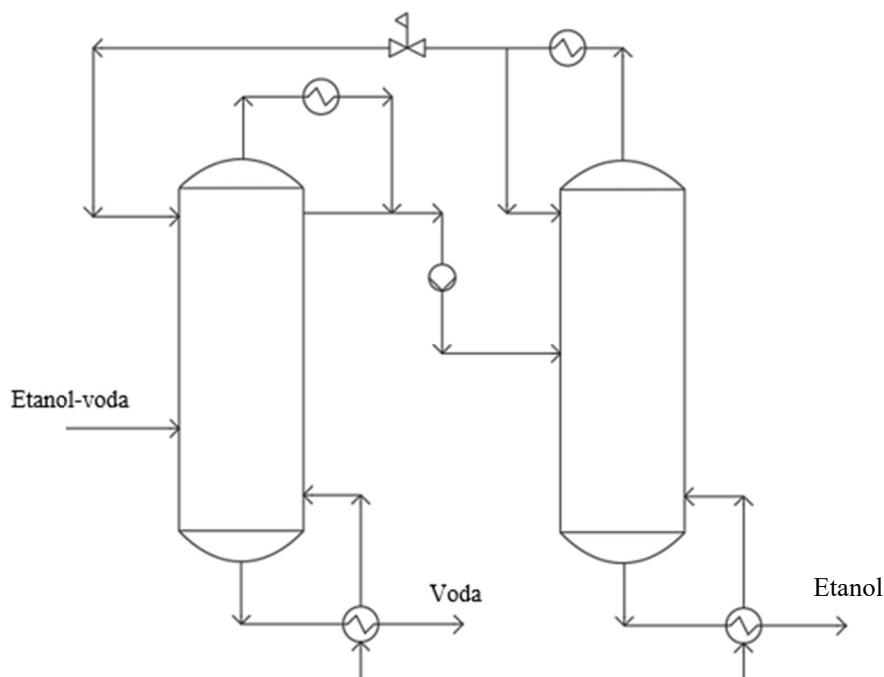
Slika 1. Molekula etanola

Pri sobnoj temperaturi je bezbojan, jako zapaljiv, bez karakterističnog mirisa i higroskopian. Čisti etilni alkohol se ne smije konzumirati jer može uzrokovati sljepoću ili čak smrt. Dobro se miješa s vodom pa njih dvoje zajedno tvore azeotropne smjese. Azeotropna smjesa je smjesa koja isparava pri stalnoj temperaturi i tlaku, to vrenje rezultirat će pojavi pare koja će biti istog sastava kao i kapljevina. Smjesa etanol-voda je azeotropna smjesa pri volumnom omjeru 95,6% etanola i 4,4% vode. Specifičnost azeotropnih smjesa je u tome što se ne mogu razdvojiti u destilacijskim kolonama nego treba koristiti složenije postupke.

## 2. VRSTE DEHIDRACIJE ETILNOG ALKOHOLA

### 2.1. Promjena tlaka destilacije

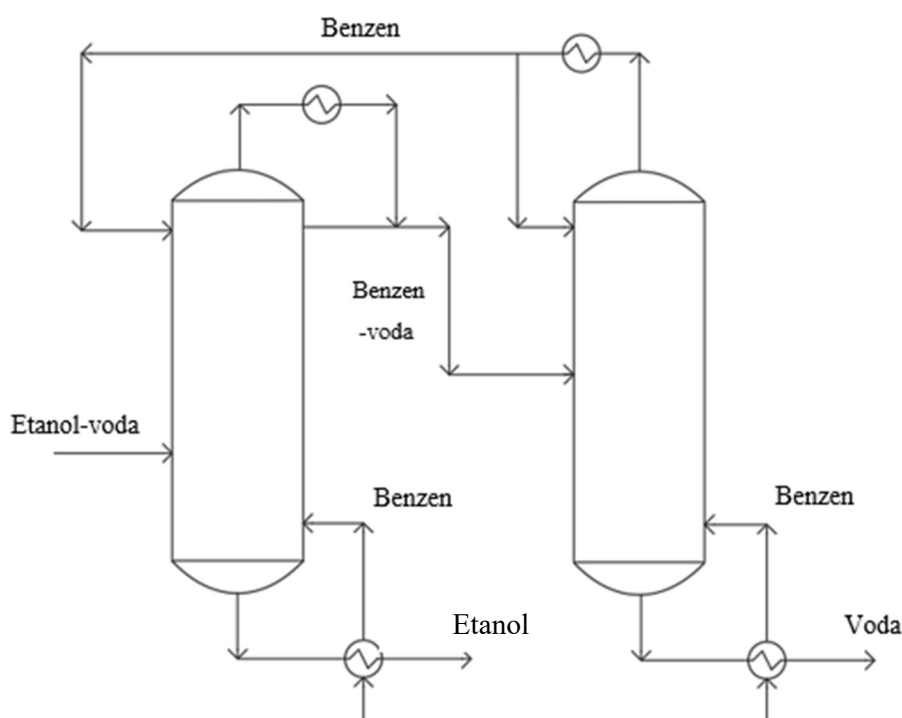
Destilacija smjese etanola i vode s promjenom tlaka omogućuje proizvodnju etanola velike čistoće. Azeotropna koncentracija smjese etanola i vode se mijenja promjenom tlaka. Smanjivanje tlaka može dovesti do porasta azeotropne koncentracije na vrijednost jedan. S porastom tlaka destilacije azeotropna koncentracija se smanjuje. Proces se provodi na način da se u destilacijskoj koloni pri normalnom tlaku dobije što veća moguća koncentracija etanola. Nakon toga se smjesa etanola i vode tlači na veći tlak s ciljem dobivanja manje azeotropne koncentracije no što bi to bilo moguće dobiti pri uvjetima normalnog tlaka. Na kraju se dobivena mješavina dovodi u destilacijsku kolonu gdje se postiže željeni sastav.



Slika 2. Dehidracija s promjenom tlaka destilacije

## 2.2. Dodavanje treće komponente smjesi etanola i vode

Drugi način razdavanja azeotropnih smjesa je pomoću dodavanja treće lakše hlapljive komponente. Najčešća komponenta koja se dodaje smjesi etanola i vode je benzen. Novonastala smjesa ima temperaturu vrenja  $64,9^{\circ}\text{C}$ . Proces se provodi tako da se iz smjese etanola, vode i benzena najprije odvoji etanol. Nakon toga se iz smjese benzena i vode odvaja voda kako bi se benzen mogao opet upotrebljavati u procesu razdvajanja. Mana ovog postupka razdavanja je potreba za trećom komponentom (benzen) i još jedna destilacijska kolona za potrebe razdvajanje vode iz benzena koja će utjecati na dodatnu potrošnju energija.



Slika 3. Dehidracija s dodavanjem treće komponente

## 2.3. Adsorpcija

Postupak razdavanja adsorpcijom jedan je od najučinkovitijih način razdavanja vode iz etanola. Razlog tome je taj što za potrebe dobivanja čistog etanola nije potreban veliki utrošak energije. Adsorpcija je proces odvajanja čestica voda pomoću krutih tijela iz pare. Koristi se za izdvajanje tvari koje se nalaze u malim količinama u smjesi te za tvari za koje ne postoji drugačiji način da se izdvoje. Tvari koje se upotrebljavaju za dehidraciju moraju imati veću poroznost kako bi na sebe mogle privući čestice vode. Najčešće upotrebljavane tvari za dehidraciju su aktivni ugljen, silika gel i molekularna sita. Aktivni ugljeni su u obliku granula koje se dobivaju suhom destilacijom voća, drva ili kostiju. Silika gel su granule osušenog hidrogela silicijeve kiseline. Molekularna sita su zeoliti s kristalnom rešetkom i velikim šupljinama koje ispunjavaju molekule vode.



Slika 4. Aktivni ugljen (lijevo) [5]



Slika 5. Silikagel (desno) [5]

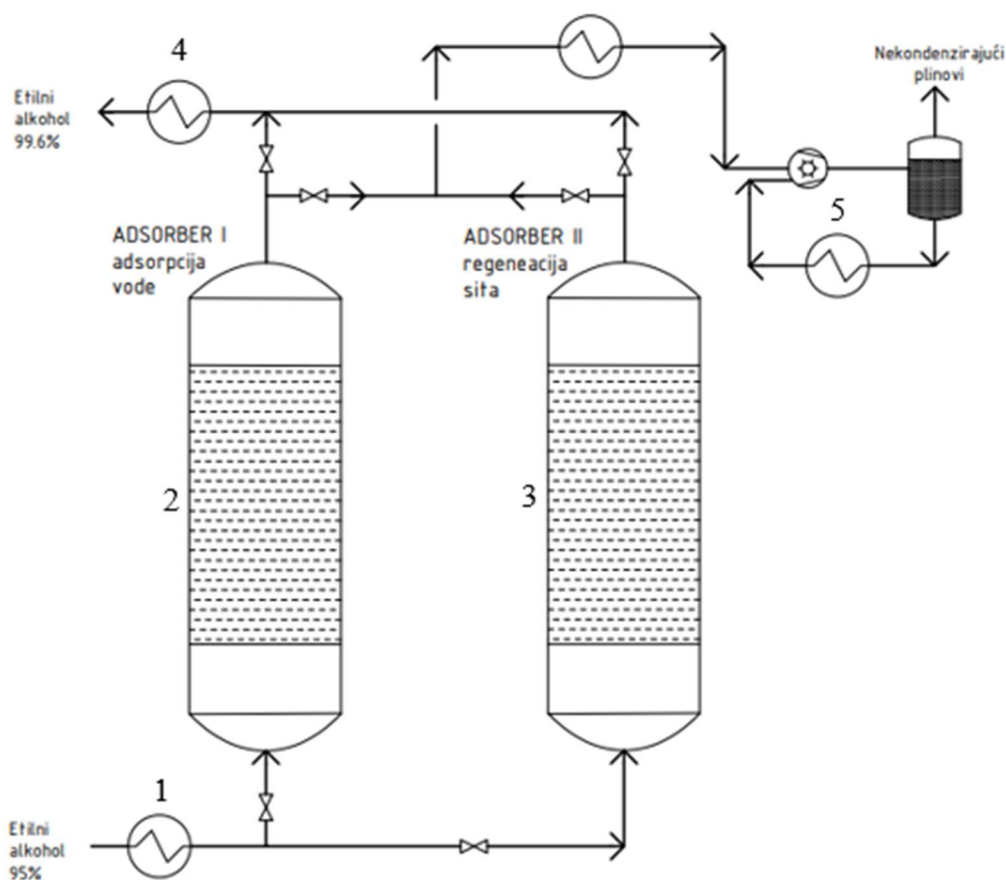


Slika 6. Molekularna sita [5]

## 3. SUSTAV ZA DEHIDRACIJU ETILNOG ALKOHOLA ADSORCIJOM

### 3.1. Opis sustava

Etilni alkohol koji ulazi u sustav dobiven destilacijom s volumnim postotkom etanola od 95%, odnosno u sadrži sebi 5% vode. Pošto je alkohol azeotropna smjesa ne može se postići veća čistoća destilacijom pa se mora upotrijebiti sustav koji adsorpcijom uklanja vodu iz etanola. Proces započinje tako da se tekući etilni alkohol pomoću pumpe dovodi u isparivač(1) gdje u potpunosti isparava. Zatim se pare etilnog alkohola kroz cjevovod dovode do adsorbera(2) koji u sebi sadrži molekularna sita koja privlače molekule vode i zadržavaju ih na sebi. U industrijske svrhe se zbog što veće korisnosti sustava koristi kontinuiran proces s dva adsorbera. Adsorberi su spojeni na način da jedan adsorber služi za dehidraciju etilnog alkohola, a drugi se adsorber za to vrijeme regenerira(3). Nakon izlaska iz adsorbera čisti etilni alkohol se odvodi u kondenzator(4) gdje se pothlađuje i odvodi u spremnike na skladištenje. Molekularna sita se moraju nakon nekog vremena regenerirati jer su se zasitila molekulama vode. Regulacija regeneracije se vrši tako da se najprije preko zaporne armature zatvori usis u adsorber te se u njemu postigne vakuum pomoću vakuum pumpe s tekućim prstenom(5). Pri nekoj temperaturi i tlaku bit će određena količina molekula vode koje u plinovitom stanju mogu biti adsorbirane na molekularna sita. Sa snižavanjem tlaka, odnosno postizanjem vakuuma smanjit će se količina molekula vode koja mogu biti adsorbirane u molekularna sita. Taj postupak će dovesti do regeneracije molekularnih sita tako što će se s površine molekularnih sita molekule vode desorbirati. Sve komponente sustava za dehidraciju etilnog alkohola i njihov međusobni položaj bit će prikazane u P&ID dijagramu procesa.



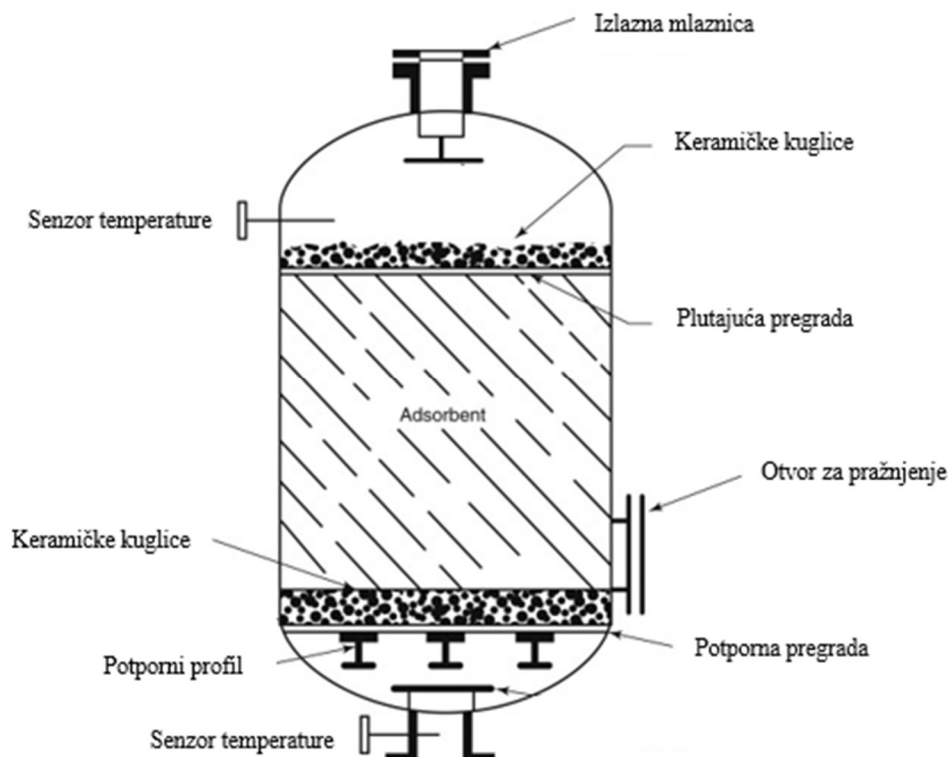
Slika 7. Adsorpcijski sustav za dehidracije etilnog alkohola

### 3.1.1. Molekularna sita

Molekularna sita su zeoliti s kristalnom rešetkom i velikim šupljinama koje ispunjavaju molekule vode. Molekularna sita 3A su mješavina sintetskih zeolita i prirodnih veziva. Kemijski ne reagiraju sa aluminijem, pocinčanim čelikom i plastikom. Najvažnije karakteristike zeolita su: visoka sposobnost adsorpcije vode, granule bez slomljenih čestica, niske elektrostatičke vrijednosti i niskog udjela prašine. Molekularna sita su ekološki prihvatljiva i ekonomična jer se mogu regenerirati. Regeneracija se vrši tako da se postigne vakuum te uslijed visoke temperature dolazi do izdavanja vlage iz molekularnih sita.

### 3.1.2. Adsorber

Adsorber je uređaj koji u sebi sadrži molekularna sita koja adsorbiraju vodu iz etilnog alkohola. Vrste adsorbera koje postoje su: adsorber s fiksnim slojem, adsorber s fluidiziranim slojem, adsorpcija kapljevnom, rotacijski i membranski adsorber. Adsorberi se dijele prema načinu smještanja molekularnih sita na: vertikalni ili horizontalni. Adsorber je spremnik u kojem se nalaze molekularna sita i dijelovi kao što su: nosač fluidiziranog sloja, ulaznih i izlaznih priključaka, medija za potporu fluidiziranog sloja, osjetnika temperature i tlaka. Nosač fluidiziranog sloja mora izdržati masu adsorbenta i mora se moći pomicati uslijed toplinskih dilatacija. Ulazne i izlazne mlaznice, pregrade služe kako bi se postigao ravnomjerni protok kroz molekularna sita. Medij za potporu fluidiziranog sloja služi kao zaštitni sloj i sredstvo za distribuciju protoka smjese.



Slika 8. Adsorber [9]

### 3.1.3. Proračun adsorbera

Proračun adsorbera se provodi tako da se najprije odredi masa molekularni sita. Nakon toga se odredi volumen fluidiziranog sloja molekularnih sita. Volumen fluidiziranog sloja je potreban kako bi se mogla odrediti visina spremnika koja je potrebna za proračun pada tlaka. Pad tlaka adsorbera se izračuna tako da se najprije odredi kakvo je strujanje fluida (laminarno ili turbulentno), a zatim se koristi model za izračun pada tlaka za taj slučaj.

Proračun adsorbera je rađen po knjizi Mehaničke operacije autora Vladimira Koharića.[6]

#### 3.1.3.1. Određivanje mase molekularnih sita

Protustrujna brzina etilnog alkohola:  $(0,1 < w_s < 0,5)$

Odabrana je brzina:  $w_s = 0,35$  m/s

Maseni protok etilnog alkohola:  $q_{m,e} = 1,111$  kg/s

Gustoća etilnog alkohola ( $p_e = 5$  bar;  $T_e = 126^\circ\text{C}$ ):  $\rho = 7,625$  kg/m<sup>3</sup>

Poroznost molekularnih sita:  $\varepsilon = 0,4$  [5]

Adsorpcijska izoterma:  $x_a = 0,2$  [5]

Vrijeme zasićenja adsorbenta:  $\tau = 3600$  s

Udio etanola u ulaznoj struji:  $x_u = 0,95$

Udio etanola u izlaznoj struji:  $x_i = 0,996$

Nasipna gustoća molekularnih sita:  $\rho_s = 760$  kg/m<sup>3</sup> [11]

Ekvivalentni promjer čestice:  $d_c = 0,0026$  m [11]

Dinamička viskoznost etilnog alkohola ( $p_e = 5$  bar;  $T_e = 126^\circ\text{C}$ ):  $\mu_e = 0,0000117$  Pas

Sfericitet molekularnih sita:  $\Psi = 0.85$

Volumni protok etilnog alkohola:

$$q_{v,e} = \frac{q_{m,e}}{\rho}$$

$$q_{v,e} = \frac{1.111}{7.625} = 0.1457 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Potreban promjer adsorbera:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 * q_{v,e}}{\pi * \varepsilon * w_s}}$$

$$d_a = \sqrt{\frac{4 * 0.1457}{\pi * 0.4 * 0.35}} = 0.28611 \text{ m}$$

Promjena udjela vode :

$$\Delta x = x_i - x_u = 0.996 - 0.95 = 0.046 \text{ kg}_w/\text{kg}_e$$

Količinski protok vode:

$$q_{v,v} = \Delta x * q_{v,e}$$

$$q_{v,v} = 0.046 * 1.111 = 0.00511 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Masa molekularnih sita:

$$m_{m,s} = \frac{q_{v,v} * \tau}{x_a}$$

$$m_{m,s} = \frac{0.00511 * 3600}{0.2} = 91.98 \text{ kg}$$

Masa potrebna za dehidraciju etilnog alkohola pri vremenu zasićenja od 3600 sekundi je **91.98 kg** molekularnih sita.

Volumen fluidiziranog sloja:

$$V_{m,s} = \frac{m_{m,s}}{\rho_\partial}$$

$$V_{m,s} = \frac{91.98}{760} = 0.12103 \text{ m}^3$$

Visina fluidiziranog sloja:

$$h_{m,s} = \frac{4 * V_{m,s}}{\pi * d_a^2}$$

$$h_{m,s} = \frac{4 * 0.12103}{\pi * 0.28611^2} = 1.883 \text{ m}$$

### 3.1.3.2. Određivanje pada tlaka adsorbera

Potrebno je odrediti režim strujanja:

- Re manji od 20 – laminarno strujanje
- Re veći od 1000 – turbulentno strujanje
- Re između 20 i 1000 – prijelazno područje

$$Re = \frac{d_{\check{c}} * w_s}{\nu_e}$$

$$Re = \frac{0.0026 * 0.35}{0.00000153} = 595$$

Pošto je Reynoldsov broj između 20 i 1000 strujanje je u prijelaznom području. Za prijelazno područje ne postoji točan model za izračuna pada tlaka pa se koristi Ergunova jednadžba koja se primjenjuje za cjelokupno područje.

Pad tlaka(Ergunova jednadžba) :

$$\Delta p_a = 150 * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \frac{\mu_e * w * h_{m,s}}{(\Psi * d_{\check{c}})^2} + 1,75 * \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} * \frac{\mu_e * w * h_{m,s}}{\Psi * d_{\check{c}}}$$

Dostrujna brzina:

$$w = \varepsilon * w_s$$

$$w = 0.4 * 0.35 = 0.14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta p_a = 150 * \frac{(1 - 0.4)^2}{0.4^3} * \frac{0.0000117 * 0.14 * 1.883}{(0.85 * 0.0026)^2} +$$

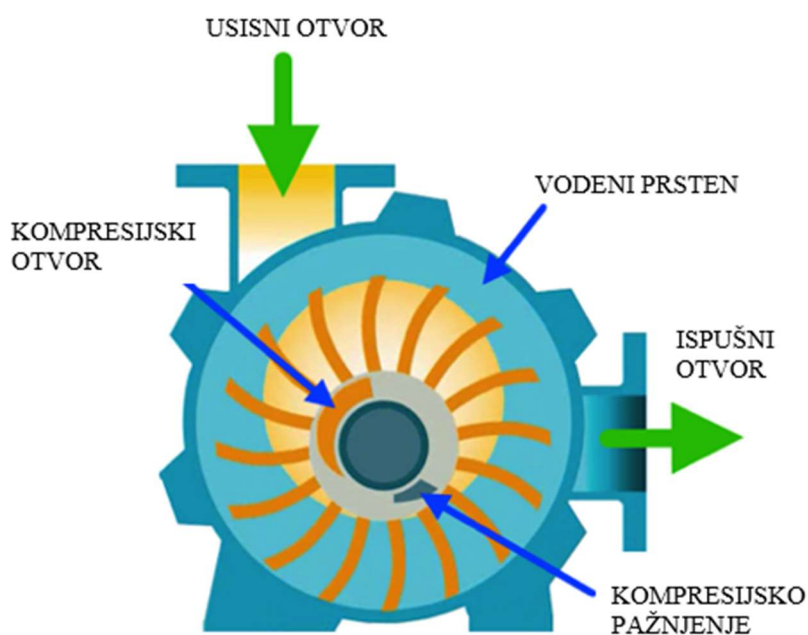
$$1,75 * \frac{1 - 0.4}{0.4^3} * \frac{0.0000117 * 0.14 * 1.883}{0.85 * 0.0026}$$

$$\Delta p_a = 532,86 \text{ Pa}$$

Pad tlaka u adsorberu iznosi: **532,86 Pa ili 0.0053286 bar-a.**

### 3.2. Vakuum pumpa s tekućim prstenom

Princip rada pume s tekućim prstenom je jednostavan. Rotor je smješten ekscentrično i za rad pumpe je potrebno dovođenje vode koja služi kao brtvilo. Tijekom vrtnje rotora dovodi se voda koja se centrifugalnim silama izbacuje prema stijenci kućišta. Praznina stvorena između rotora i vode zadržava plin. Tijekom putovanja kroz ekscentrično smješten rotor stvara se podtlak koji uvlači i komprimira plin. Zatim se komprimiran plin zajedno s vodom izbacuje kroz ispušni otvor. Prednost u korištenju vakuum pumpe s tekućim prstenom je u tome što nema trošenja jer voda sprječava oštećenje lopatica rotora. Svi dijelovi potrebni za rad vakuum pumpe s tekućim prstenom prikazani su u P&ID dijagramu procesa.



Slika 9. Vakuum pumpa s tekućim prstenom [11]

## 4. KONDENZATOR ETILNG ALKOHOLA

### Zadani podaci:

Radni medij primar: Etanol

Maseni protok etanola:  $q_{m,e} = 381,6 \text{ kg/h} = 0,106 \text{ kg/s}$

Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_{k,e} = 125,27 \text{ °C}$

Ulazna entalpija etanola( $p_e = 5 \text{ bar}$ ;  $\vartheta_e = 126 \text{ °C}$ ):  $h_{e,1} = 905,741 \text{ kJ/kg}$

Izlazna temperatura etanola:  $\vartheta_{e,2} = 120 \text{ °C}$

Izlazna entalpija etanola( $p_e = 5 \text{ bar}$ ;  $\vartheta_{e,2} = 120 \text{ °C}$ ):  $h_{e,2} = 132,98 \text{ kJ/kg}$

Tlak etanola:  $p_e = 5 \text{ bar}$

Radni medij sekundar: Voda

Ulazna temperatura vode :  $\vartheta_w' = 28 \text{ °C}$

Izlazna temperatura vode:  $\vartheta_w'' = 36 \text{ °C}$

Maksimalni protok vode:  $q_{m,w} = 10000 \text{ kg/h}$

Tlak vode:  $p_w = 5 \text{ bar}$

## 4.1. Termodinamički proračun kondenzatora

Termodinamički proračun kondenzatora etilnog alkohola provodi se tako da se najprije odredi potreban broj cijevi u kojima struji voda i koeficijenti prijelaza topline s unutrašnje i vanjske strane stijenke cijevi. Zatim se odredi potrebna površina cijevi za izmjenu topline koje je potrebna za izračun duljine cijevi kondenzatora.

### 4.1.1. Broj cijevi izmjenjivača

Srednja temperatura vode,  $\vartheta_m = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

Toplinska svojstva vode za temperaturu  $\vartheta_m = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ :

Gustoća vode,  $\rho_{w,m} = 995,2051 \text{ kg/m}^3$

Specifični toplinski kapacitet vode,  $c_{p,w,m} = 4,1783 \text{ kJ/kgK}$

Koeficijent toplinske vodljivosti vode,  $\lambda_{w,m} = 0,617598 \text{ W/mK}$

Dinamička viskoznost vode,  $\mu_{w,m} \times 10^6 = 764,41 \text{ Pas}$

Prandltov broj,  $Pr_{w,m} = 5,174$

Veća temperaturna razlika:

$$\Delta t_v = \vartheta_k - \vartheta_w' = 125,27 - 28 = 97,27 \text{ }^\circ\text{C}$$

Manja temperaturna razlika:

$$\Delta t_m = \vartheta_k - \vartheta_w'' = 125,27 - 36 = 89,27 \text{ }^\circ\text{C}$$

Srednja logaritamska temperatura:

$$\Delta \vartheta_m = \frac{\Delta t_{v1} - \Delta t_{m1}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{v1}}{\Delta t_{m1}}\right)}$$

$$\Delta \vartheta_m = \frac{97,27 - 89,27}{\ln\left(\frac{97,27}{89,27}\right)} = 93,213 \text{ }^\circ\text{C}$$

Odabirana dimenzija izlazni priključaka su cijevi DN 10 [1]

Cijevi DN 10 imaju sljedeće dimenzije:

Vanjski promjer cijevi  $d_v = 16 \text{ mm}$

Unutarnji promjer cijevi  $d_u = 12,4 \text{ mm}$

Debljina stijenke cijevi  $s_w = 2 \text{ mm}$

Toplinski učinak kondenzatora:

$$\Phi_k = q_{m,e} * (h_{e,1} - h_{e,2})$$

$$\Phi_k = 0,106 * (905,741 - 131,98) = 82,01 \text{ kW}$$

Maseni protok vode:

$$q_{m,w} = \frac{\Phi_k}{c_{p,w,m} * (\vartheta_w'' - \vartheta_w')}$$

$$q_{m,w} = \frac{82,01}{4,1783 * (36 - 28)} = 2,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 8833 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Brzina vode u cijevima ( preporučeno 0,5 – 1,5 m/s),

Odabrana je brzina  $w_{\text{pret}} = 0,55 \text{ m/s}$  jer se za tu brzinu najbolje napravi raspored cijevi.

Broj cijevi:

$$n = \frac{4 * q_{m,w}}{w_{\text{pret}} * d_u^2 * \pi * \rho_{w,m}}$$

$$n = \frac{2,45 * 4}{0,55 * 0,0124^2 * 995,2051 * \pi} = 37,1 \approx 37$$

Stvarna brzina vode u cijevima:

$$w_{\text{stv}} = \frac{4 * q_{m,w}}{n * d_u^2 * \pi * \rho_{w,m}}$$

$$w_{\text{stv}} = \frac{2,45 * 4}{37 * 0,0124^2 * 995,2051 * \pi} = 0,5515 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 4.1.2. Koeficijenti prijelaza topline

### 4.1.2.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Reynoldsov broj:

$$Re_w = \frac{w_{\text{stv}} * d_u * \rho_{w,m}}{\mu_{w,m}}$$

$$Re_w = \frac{0,5515 * 0,0124 * 995,2051}{761,41 * 10^{-6}} = 8904$$

Pomoćna veličina:

$$f = \left( 1,5635 * \ln \left( \frac{Re_w}{7} \right) \right)^{-2}$$

$$f = \left( 1,5635 * \ln \left( \frac{8904}{7} \right) \right)^{-2} = 0,00801$$

Nusseltov broj:

$$Nu_w = \frac{\frac{f}{2} * (Re_w - 1000) * Pr_{w,m}}{1 + 12,7 * \sqrt{\frac{f}{2}} * \left( Pr_{w,m}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

$$Nu_w = \frac{\frac{0,00801}{2} * (8904 - 1000) * 5,174}{1 + 12,7 * \sqrt{\frac{0,00801}{2}} * \left( 5,174^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} = 62,95$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode:

$$\alpha_{u,w} = \frac{Nu_w * \lambda_{w,m}}{d_u}$$

$$\alpha_{u,w} = \frac{62,95 * 0,617598}{0,0124} = 3135,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### 4.1.2.2. Koeficijent prijelaza topline na strani etanola

Ubrzanje zemljine sile teže:  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$

Entalpija suhozasićene pare ( $p_e = 5 \text{ bar}$ ):  $h_{sz} = 905,71 \text{ kJ/kg}$

Entalpija vrele kapljevine ( $p_e = 5 \text{ bar}$ ):  $h_{vk} = 150,198 \text{ kJ/kg}$

Toplinska provodnost čelika:  $\lambda_{\xi} = 58 \text{ W/(mK)}$

Koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji pare na stijenci cijevi se određuje iterativnim postupkom. Pretpostavljena je temperatura vanjske stijenske cijevi te se s tom temperaturom ulazimo u proračun za koeficijenta prijelaza topline, zatim se odredi toplinski tok po jedinici duljine, a iz njega dobije nova temperatura stijenske. Postupak se ponavlja dok dobivena razlika između temperature stijenske i pretpostavljene temperature stijenske manja od  $0,001^\circ\text{C}$ . Zbog ponavljanja postupka u radu je prikazana prva i posljednja iteracija.

Razlika entalpija:

$$\Delta h = h_{sz} - h_{vk}$$

$$\Delta h = 905,71 - 150,198 = 755,512 \text{ kJ/kg}$$

### 1. iteracija :

Pretpostavljena temperatura vanjske stijenke:  $\vartheta_{sv,1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Srednja temperatura:

$$\vartheta_{sr,1} = \frac{100 + 125,27}{2} = 112,635 \text{ }^\circ\text{C}$$

Gustoća kondenzata:  $\rho_{k,m,1} = 699,95 \text{ kg/m}^3$

Toplinska vodljivost kondenzata:  $\lambda_{k,m,1} = 0,1491 \text{ W/(mK)}$

Dinamička viskoznost kondenzata:  $\mu_{k,m,1} = 0,000269 \text{ Pas}$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{v,1} = \sqrt[4]{\frac{\rho_{k,m,1}^2 * \lambda_{k,m,1}^3 * g * \Delta h}{4 * \mu_{k,m,1} * (\vartheta_k - \vartheta_{sv,1}) * d_v}} * n_k^{-\frac{1}{4}} =$$

$$\alpha_{v,1} = \sqrt[4]{\frac{699,95^2 * 0,1491^3 * 9,80665 * 755,512 * 10^3}{4 * 0,000269 * (125,27 - 100) * 0,016}} * 5^{-\frac{1}{4}} =$$

$$\alpha_{v,1} = 1554,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplinski tok po jedinici duljine:

$$\Phi_{ko,1} = \frac{2 * \pi * \Delta\vartheta_m}{\frac{1}{\alpha_{u,w} * r_u} + \frac{1}{\lambda_c} \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_{v,1} * r_v}}$$

$$\Phi_{ko,1} = \frac{2 * \pi * 93,213}{\frac{1}{3135,11 * 0,0062} + \frac{1}{58} \ln\left(\frac{0,008}{0,0062}\right) + \frac{1}{1554,12 * 0,008}}$$

$$\Phi_{ko,1} = 4358,88 \text{ W/m}$$



Izračunata temperatura vanjske stijenke:

$$\vartheta_{sv,2} = \vartheta_k - \frac{\Phi_{ko,1}}{2 * \pi * r_v * \alpha_{v,1}}$$

$$\vartheta_{sv,2} = 125,27 - \frac{4358,88}{2 * \pi * 0,008 * 1554,12} = 70,396 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 8. iteracija:

Pretpostavljena temperatura vanjske stijenke:  $\vartheta_{sv,8} = 64,799 \text{ } ^\circ\text{C}$

Srednja temperatura:

$$\vartheta_{sr,8} = \frac{64,799 + 125,27}{2}$$

$$\vartheta_{sr,8} = 95,068 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Gustoća kondenzata:  $\rho_{k,m,8} = 719,802 \text{ kg/m}^3$

Toplinska vodljivost kondenzata:  $\lambda_{k,m,8} = 0,1519 \text{ W/(mK)}$

Dinamička viskoznost kondenzata:  $\mu_{k,m,8} = 0,0003482 \text{ Pas}$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{v,8} = \sqrt[4]{\frac{\rho_{k,m,8}^2 * \lambda_{k,m,8}^3 * g * \Delta h}{4 * \mu_{k,m,8} * (\vartheta_k - \vartheta_{sv,8}) * d_v}} * n_k^{-\frac{1}{4}} =$$

$$\alpha_{v,8} = \sqrt[4]{\frac{719,82^2 * 0,1519^3 * 9,80665 * 755,512 * 10^3}{4 * 0,0003482 * (125,27 - 64,799) * 0,016}} * 5^{-\frac{1}{4}} =$$

$$\alpha_{v,8} = 1257,35 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Toplinski tok po jedinici duljine:

$$\Phi_{ko,8} = \frac{2 * \pi * \Delta\vartheta_m}{\frac{1}{\alpha_{u,w} * r_u} + \frac{1}{\lambda_{\xi}} \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_{v,8} * r_v}}$$

$$\Phi_{ko,8} = \frac{2 * \pi * 93,213}{\frac{1}{3135,11 * 0,0062} + \frac{1}{58} \ln\left(\frac{0,01}{0,008}\right) + \frac{1}{1257,35 * 0,008}}$$

$$\Phi_{ko,8} = 3826,43 \text{ W/m}$$

Izračunata temperatura vanjske stijenke:

$$\vartheta_{sv,8} = \vartheta_k - \frac{\Phi_{ko,8}}{2 * \pi * r_v * \alpha_{v,8}}$$

$$\vartheta_{sv,8} = 125,27 - \frac{3826,43}{2 * \pi * 0,008 * 1469,69} = 64,799 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Koeficijent prijelaza topline je smanjene za 40% zbog nekondenzirajućih plinova koji se mogu naći u izmjenjivaču.

$$\alpha_{v,k} = \alpha_{v,8} * 0,6$$

$$\alpha_{v,k} = 754,135 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## 4.2. Proračun duljine i promjera izmjenjivača

### 4.2.1. Duljina izmjenjivača

Koeficijent prolaza topline s obzirom na vanjsku površinu:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{u,w} * r_u} + \frac{1}{\lambda_c} \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_{v,k} * r_v}}$$

$$k_v = \frac{1}{\frac{0,01}{3135,11 * 0,008} + \frac{0,01}{58} \ln\left(\frac{0,01}{0,008}\right) + \frac{1}{754,135}}$$

$$k_v = 563,695 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Površina cijevi u kondenzatorskom dijelu:

$$A_i = \frac{\Phi_{ko} * 1000}{k_{v,ko} * \Delta\vartheta_m}$$

$$A_i = \frac{82,01 * 1000}{735,93 * 93,21} = 1,539 \text{ m}^2$$

Površina izmjenjivača u kondenzatorskom dijelu:

Broj prolaza:  $P = 1$

Duljina izmjenjivača u dijelu:

$$L_i = \frac{A_i}{d_v * P * n * \pi}$$

$$L_i = \frac{1,539}{0,016 * 1 * 37 * \pi} = 0,8266 \text{ m}$$

Odabrana je duljina cijevi **1 metar**.

## 4.2.2. Promjer plašta izmjenjivača

Geometrijski faktor za trokutasti prolaz:  $f_1 = 1,1$  mm

Geometrijski faktor za broj prolaza:  $f_2 = 0$  mm

Razmak između cijevi:

$$t = (1,5 - 2,5) \times d_v = 1,82 \times 16 = 29 \text{ mm}$$

Ekvivalentni promjer izmjenjivača:

$$OTL = \sqrt[2]{f_1 * n * t^2 + f_2 * n^{0,5} * t + d_v}$$

$$OTL = \sqrt{1,1 * 37 * 29^2 + 0 * \sqrt{37} * 29 + 16}$$

$$OTL = 185,1 \text{ mm}$$

Odabrana je šavna cijev DN 200 za plašt.[1]

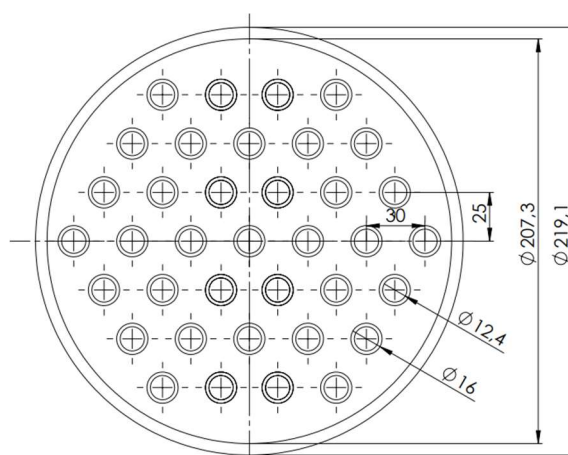
Dimenzije cijevi DN 200 su:

- vanjski promjer plašta,  $D_v = 219,1$  mm
- unutarnji promjer plašta,  $D_u = 207,3$  mm
- debljina stijenke plašta,  $s_p = 5,9$  mm

Uvjet omjera duljine i promjera izmjenjivača mora biti između tri i sedam.

$$3 < \frac{L_i}{D_v} = \frac{1000}{219,1} < 7 \quad 3 < 4,56 < 7$$

Omjera duljine i promjera izmjenjivača iznosi 3,77 pa je zadani uvjet zadovoljen.



Slika 10. Raspored cijevi

## 4.3. Proračun priključaka kondenzatora

### 4.3.1. Dimenzioniranje priključka za dovod pare

Pretpostavljena ulazna brzina pare etilnog alkohola  $w_{pret,e,u} = 4,5$  m/s

Maseni protok etilnog alkohola,  $q_{m,e} = 0,106$  kg/s

Gustoća pare etilnog alkohola na ulazu u kondenzator:  $\rho_{e,u} = 7,655$  kg/m<sup>3</sup>

Površina priključka za dovod para etilnog alkohola:

$$A_{p,e,u} = \frac{q_{m,e}}{\rho_{e,u} * w_{pret,e,u}}$$

$$A_{p,e,u} = \frac{0,106}{7,655 * 4,5} = 0,003077 \text{ m}^2$$

Promjer teoretskog priključka za dovod pare:

$$d_{p,u} = \sqrt{\frac{4 * A_{p,e,u}}{\pi}}$$

$$d_{p,u} = \sqrt{\frac{4 * 0,003077}{\pi}} * 1000 = 61,81 \text{ mm}$$

Odabirana dimenzija ulaznog priključka je cijev DN65 [1]

Cijev DN65 ima sljedeće dimenzije:

-vanjski promjer ulaznog priključka etilnog alkohola  $d_{v,e,u} = 76,1$  mm

-unutarnji promjer ulaznog priključka etilnog alkohola  $d_{u,e,u} = 70,3$  mm

-debljina stijenke ulaznog priključka etilnog alkohola  $s_{e,u} = 2,9$  mm

Izračunata stvarna ulazna brzina etilnog alkohola:

$$w_{izr,e,u} = \frac{4 * q_{m,e}}{\rho_{e,u} * \pi * d_u^2}$$

$$w_{izr,e,u} = \frac{4 * 0,106}{7,655 * \pi * 0,0703^2} = 3,57 \text{ m/s}$$

### 4.3.2. Dimenzioniranje priključaka za odvod kondenzata

Pretpostavljena izlazna brzina pare etilnog alkohola  $w_{pret,e,i} = 1,5$  m/s

Maseni protok etilnog alkohola  $q_{m,e} = 0,106$  kg/s

Gustoća kondenzata etilnog alkohola na izlazu iz kondenzatora:  $\rho_{e,i} = 768,073$  kg/m<sup>3</sup>

Površina priključka za dovod para etilnog alkohola:

$$A_{p,e,i} = \frac{q_{m,e}}{\rho_{e,i} * w_{pret,e,i}}$$

$$A_{p,e,i} = \frac{0,106}{768,073 * 1,5} = 0,000092 \text{ m}^2$$

Promjer priključka za odvod kondenzata etilnog alkohola:

$$d_{p,i} = \sqrt{\frac{4 * A_{p,e,i}}{2 * \pi}}$$

$$d_{p,i} = \sqrt{\frac{4 * 0,000092}{2 * \pi}} * 1000 = 7,65 \text{ mm}$$

Odabirana dimenzija izlazni priključaka su cijevi DN10 [1]

Cijevi DN10 imaju sljedeće dimenzije:

- vanjski promjer izlaznih priključaka etilnog alkohola  $d_{v,e,i} = 16$  mm
- unutarnji promjer izlaznih priključaka etilnog alkohola  $d_{u,e,i} = 12,4$  mm
- debljina stijenke izlaznih priključaka etilnog alkohola  $s_{e,i} = 1,8$  mm

Izračunata stvarna izlazna brzina etilnog alkohola:

$$w_{izr,e,i} = \frac{4 * q_{m,e}}{\rho_{e,i} * \pi * 2 * d_u^2}$$

$$w_{izr,e,i} = \frac{4 * 0,106}{768,073 * \pi * 2 * 0,0124^2} = 0,57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### 4.3.3. Dimenzioniranje priključka za dovod i odvod vode

Pretpostavljena brzina vode,  $w_{\text{pret,w}} = 2 \text{ m/s}$

Maseni protok vode,  $q_{m,w} = 2,45 \text{ kg/s}$

Gustoća vode na ulazu i izlazu iz kondenzatora  $\rho_w = 995,205 \text{ kg/m}^3$

Površina priključaka za dovod i odvod vode:

$$A_{p,w} = \frac{q_{m,w}}{\rho_{w,m,1} * w_{\text{pret,w}}}$$

$$A_{p,w} = \frac{2,45}{995,205 * 2} = 0,00123 \text{ m}^2$$

Promjer priključaka za dovod i odvod vode:

$$d_w = \sqrt{\frac{4 * A_{p,w}}{\pi}}$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4 * 0,00123}{\pi}} * 1000 = 39,57 \text{ mm}$$

Odabirana dimenzija za ulazni i izlazni priključak vode je cijev DN 40 [1]

Cijev DN50 ima sljedeće dimenzije:

- vanjski promjer ulaznih i izlaznih priključaka vode  $d_{v,w} = 48,3 \text{ mm}$
- unutarnji promjer ulaznih i izlaznih priključaka vode  $d_{u,w} = 43,1 \text{ mm}$
- debljina stijenke ulaznih i izlaznih priključaka vode  $s_{p,w} = 2,6 \text{ mm}$

Izračunata stvarna ulazna i izlazna brzina vode:

$$w_{\text{izr,w}} = \frac{4 * q_{m,w}}{\rho_{w,m,1} * \pi * d_{u,w}^2}$$

$$w_{\text{izr,w}} = \frac{4 * 2,45}{995,205 * \pi * 0,0431^2} = 1,69 \text{ m/s}$$

## 4.4. Proračun čvrstoće izmjenjivača

### 4.4.1. Definiranje konstrukcijskih parametara

„**Proračunska temperatura** je prema pravilniku o tlačnoj opremi temperatura koja ne smije biti manja od najveće dozvoljene temperature. Najveću dozvoljenu temperaturu određuje proizvođač.“ [6]

„**Proračunski tlak** je prema pravilniku o tlačnoj opremi koji ne smije biti manji od najvećeg dozvoljenog radnog tlaka PS koji se može pojaviti u izmjenjivaču.“ [6]

„**Proračunska čvrstoća** je prema pravilniku o tlačnoj opremi čvrstoća koju mora zadovoljavati propisane uvjete ovisno o vrsti odabranog materijala za izradu spremnika.“ [6]

„**Hidrostatski ispitni tlak** je tlak onog koji odgovara maksimalnom opterećenju kojem je oprema podvrgnuta u radu, uzimajući u obzir najveći dopušteni tlak i najveću dopuštenu temperaturu, pomnožen s koeficijentom 1,25 ili najveći dopušteno tlak pomnoženo s koeficijentom 1,43. Odabire se veća od gornje dvije vrijednosti.“ [8]

EN. 14310 (AISI 301) je odabrani materijal plašta, podnica i cijevne stijene.

Konvencionalna granica razvlačenja pri 20° C,  $R_{p0.2, 20^{\circ}C} = 195 \text{ N/mm}^2$  [1]

Konvencionalna granica razvlačenja pri 200° C,  $R_{p0.2, 200^{\circ}C} = 115 \text{ N/mm}^2$  [1]

Najmanja vrijednost vlačne čvrstoće pri 20° C,  $R_{m, 20^{\circ}C} = 500 \text{ N/mm}^2$  [1]

Proračunski tlak je tlak pri temperaturi zasićenja  $\vartheta_k = 125,27^{\circ}C$  i iznosi 5 bara.

Proračunska čvrstoća pri 200°C:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0.2, 200^{\circ}C}}{1,5}; \frac{R_{m, 20^{\circ}C}}{2,4}\right)$$

$$f_d = \min\left(\frac{115}{1,5}; \frac{500}{2,4}\right) = 76,66 \text{ N/mm}^2$$



Proračunska čvrstoća pri 20°C:

$$f_a = \min\left(\frac{R_{p0.2,20^\circ C}}{1,5}; \frac{R_{m,20^\circ C}}{2,4}\right)$$

$$f_a = \min\left(\frac{195}{1,5}; \frac{500}{2,4}\right) = 130 \text{ N/mm}^2$$

Hidrostatski ispitni tlak:

$$PT = \max\left(1,25 * p_d * \frac{f_a}{f_d}; 1,43 * PS\right)$$

$$PT = \max\left(1,25 * 5 * \frac{130}{76,66}; 1,43 * 5\right) = 10,6 \text{ bar}$$

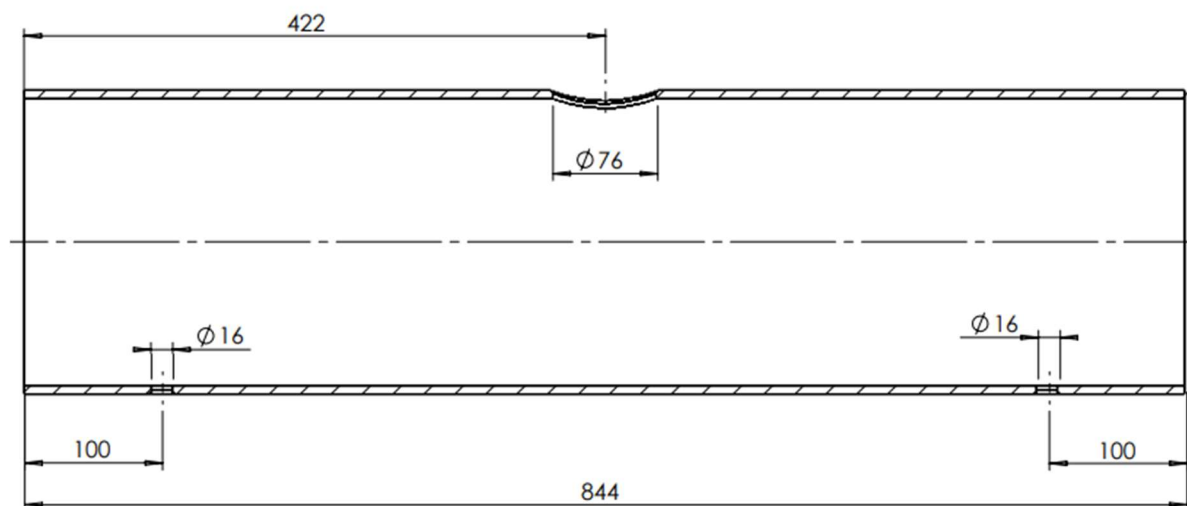
Ispitna čvrstoća:

$$f_{test} = \frac{R_{p0.2,20^\circ C}}{1,05}$$

$$f_{test} = \frac{195}{1,05} = 185,72 \text{ N/mm}^2$$

#### 4.4.2. Proračun cilindričnog plašta izmjenjivača

Proračun cilindričnih plašteva opterećenih unutarnjim tlakom se izvodi prema normi HRN M.E.2.253.



Slika 11. Plašt izmjenjivača

Norma se primjenjuje u području gdje je odnos vanjskog i unutarnjeg promjera plašta manji od 1,2.

$$\frac{D_v}{D_u} < 1,2$$

$$\frac{D_v}{D_u} = \frac{219,1}{207,3} = 1,057$$

$$1,057 < 1,2$$

Omjer vanjskog i unutarnjeg promjera plašta je manji od 1,2 pa se norma može primijeniti.

Potrebna debljina stijenke:

$$s_i = \frac{D_v * p_t}{20 * f_d * v + p_t}$$

$$s_i = \frac{219,1 * 5}{20 * 1 * 76,66 + 5} = 0,71 \text{ mm}$$

Koeficijent zavara za bešavne cijevi:  $v = 1$

Dodatna debljina stijenke  $c_1'$  kod limova za čiji je promjer vanjske stijenke između 130 mm i 320 mm i debljina stijenke je manja od 5% vanjskog promjera iznosi 12,5%.

Dodatak za odstupanje materijala za šavne cijevi:

$$c_1 = (s_i + c_2) * \frac{c_1'}{100 - c_1'}$$

$$c_1 = (0,71 + 1) * \frac{12,5}{100 - 12,5} = 0,25 \text{ mm}$$

Dodatak zbog smanjena debljine trošenjem i korozijom:  $c_2 = 1 \text{ mm}$

Potrebna debljina stijenke cilindričnog plašta izvrnutog unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_v * p_t}{20 * f_d * v + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{219,1 * 5}{20 * 76,66 * 1 + 5} + 1 + 0,25 = 1,96 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke plašta iznosi 5,9 milimetara i zadovoljava uvjet jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 1,96 milimetara.

Potrebna debljina stijenke cilindričnog plašta izvrnutog unutrašnjem ispitnom tlaku:

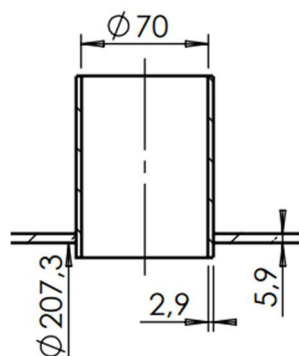
$$s_{PT} = \frac{D_v * p_{PT}}{20 * f_{test} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{219,1 * 10,6}{20 * 185,72 * 1 + 10,6} + 1 + 0,25 = 1,87 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke plašta iznosi 5,9 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 1,87 milimetara.

#### 4.4.3. Proračun čvrstoće oko najvećeg izreza na cilindričnom plaštu

Proračun čvrstoće oko najvećeg izreza na cilindričnom plaštu rađen je prema normi **HRN M.E2.256**.



Slika 12. Priključak za dovod pare

Uvjet koji se mora ostvariti kako bi se norma mogla premjerivati.

$$0,001 < \frac{s_p - c_1 - c_2}{D_v} < 0,1$$

$$0,001 < \frac{5,9 - 1 - 0,25}{219,1} < 0,1$$

$$0,001 < 0,021 < 0,1$$

Koeficijent oslabljena izrezom se očitava iz dijagrama a dan je funkcijom:

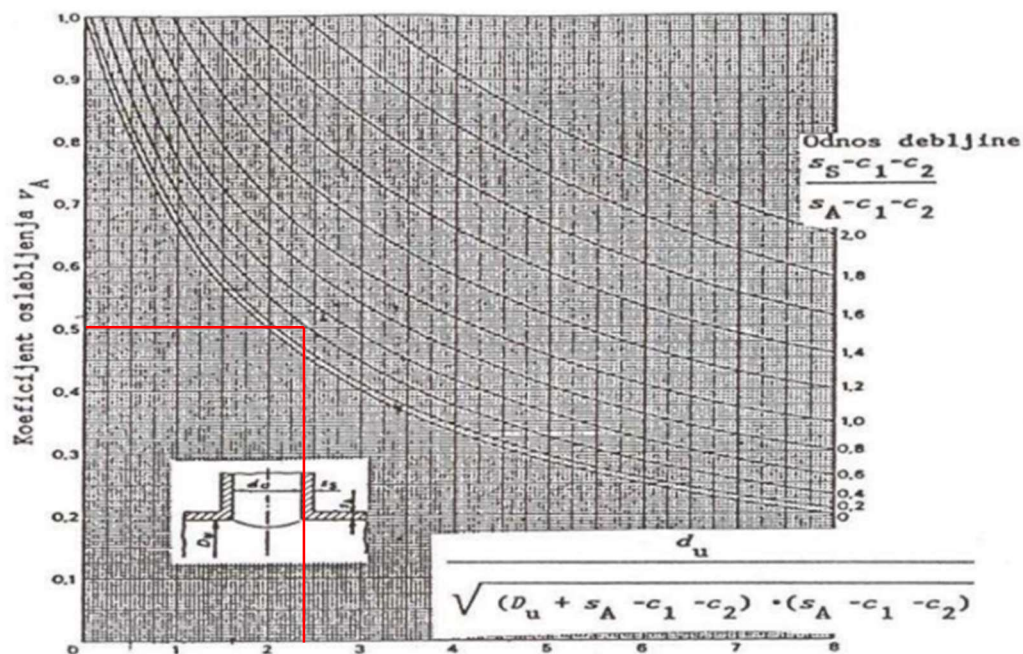
$$v = f \left( \frac{s_{e,u} - c_1 - c_2}{s_p - c_1 - c_2}, \frac{d_{e,u}}{\sqrt{(D_u - s_p - c_1 - c_2) * (s_p - c_1 - c_2)}} \right)$$

Koeficijent:

$$\frac{s_{e,u} - c_1 - c_2}{s_p - c_1 - c_2} = \frac{2,9 - 1 - 0,25}{5,9 - 1 - 0,25} = 0,355$$

Koeficijent:

$$\frac{d_{e,u}}{\sqrt{(D_u - s_p - c_1 - c_2) * (s_p - c_1 - c_2)}} = \frac{70}{\sqrt{(207,3 - 5,9 - 1 - 0,25) * (5,9 - 1 - 0,25)}} = 2,29$$



Slika 13. Graf oslabljena oko najvećeg izreza [6]

Koeficijent oslabljenja očitano iz grafa iznosi  $v_A = 0,51$

Potrebna debljina stijenke oko najvećeg izreza izvrnutog unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_v * p_t}{20 * f_d * v + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{219,1 * 5}{20 * 76,66 * 0,51 + 5} + 1 + 0,25 = 2,65 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke plašta iznosi 5,9 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 2,65 milimetara.

Potrebna debljina stijenke oko najvećeg izreza izvrnutog unutrašnjem ispitnom tlaku:

$$s_{PT} = \frac{D_v * p_{PT}}{20 * f_{test} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{219,1 * 10,6}{20 * 185,72 * 0,51 + 10,6} + 1 + 0,25 = 2,47 \text{ mm}$$

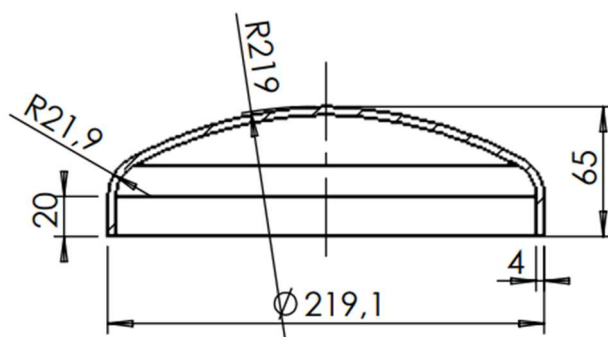
Debljina odabrane stijenke plašta iznosi 5,9 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 2,47 milimetara.

#### 4.4.4. Proračun čvrstoće podnice (bez izreza) izvrnute unutrašnjem tlaku

Proračun čvrstoće podnice se provodi po normi **HRN M.E2.252**.

Odabrana je standardna podnica prema DIN 28011

Odabrana je plitka podnica DN 200 – 219,1 x 5,9 mm.



Slika 14. Podnica DN 200

##### 4.4.4.1. Potrebna debljina stijenke kalote

Promjer kalote:

$$D_{kalote} = 2 * (R_k + s_k)$$

$$D_{kalote} = 2 * (219,1 + 4) = 446,2 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke kalote podložene unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_{\text{kalote}} * p_t}{40 * f_d * \nu + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{446,2 * 5}{40 * 76,66 * 1 + 5} + 1 + 0,25 = 1,97 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke kalote iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 1,97 milimetara.

Potrebna debljina stijenke kalote podložene unutrašnjem ispitnom tlaku:

$$s_{PT} = \frac{D_{\text{kalote}} * p_{PT}}{40 * f_{\text{test}} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{446,2 * 10,6}{40 * 185,72 * 1 + 10,6} + 1 + 0,25 = 1,88 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke kalote iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 1,88 milimetara.

#### 4.4.4.2. Potrebna debljina stijenke torusa

Koeficijent podnice  $\beta$ :

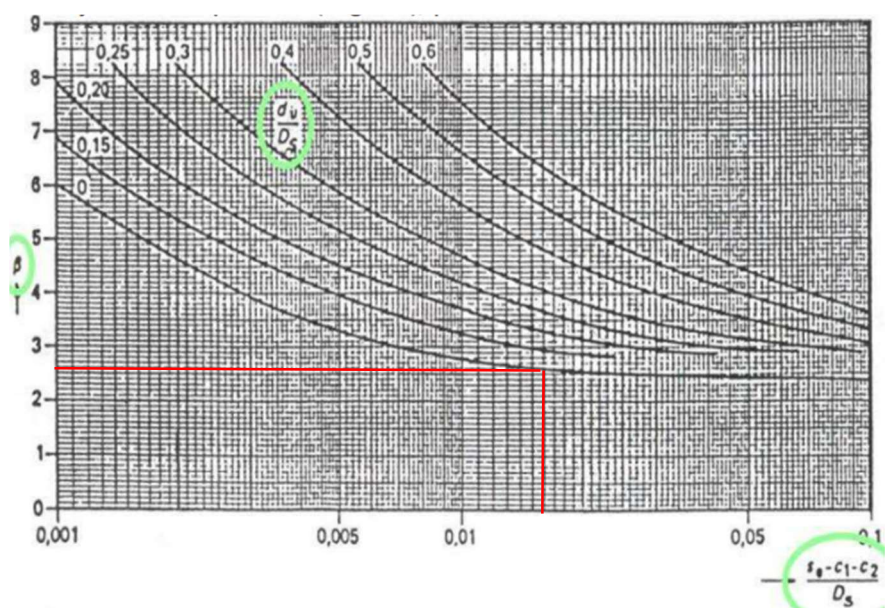
$$\beta = f\left(\frac{d_u}{D_v}, \frac{s_{po} - c_1 - c_2}{D_v}\right)$$

$$\frac{d_u}{D_v} = 0 - \text{nema izreza}$$

$$0,001 < \frac{s_{po} - c_1 - c_2}{D_v} < 0,1$$

$$0,001 < \frac{4 - 0,25 - 1}{219,1} < 0,1$$

$$0,001 < 0,0126 < 0,1$$



Slika 15. Graf za koeficijent beta [6]

Koeficijent  $\beta$  očitano iz grafa iznosi 2,8.

Potrebna debljina stijenke torusa podložene unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_v * p_t * \beta}{40 * f_d * \nu + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{219,1 * 5 * 2,8}{40 * 76,66 * 1 + 5} + 1 + 0,25 = 2,25 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke torusa iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 2,25 milimetara.

Potrebna debljina stijenke torusa podložene unutrašnjem ispitnom tlaku:

$$s_{PT} = \frac{D_v * p_{PT} * \beta}{40 * f_{test} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{219,1 * 10,6 * 2,8}{40 * 185,72 * 1 + 10,6} + 1 + 0,25 = 2,12 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke torusa iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 2,12 milimetara.

#### 4.4.4.3. Provjera podnice na elastično ulubljivanje

Modul elastičnosti čelika:  $E_{\check{c},200^{\circ}\text{C}} = 200\,000\text{ N/mm}^2$

$$\frac{s_{po} - c_1 - c_2}{D_v} = \frac{4 - 0,25 - 1}{219,1} = 0,0126$$

$$\frac{p_b}{E_{\check{c}}} * 10^5 = 4800 * \frac{s_{po} - c_1 - c_2}{D_v} - 8,2$$

$$\frac{p_b}{E_{\check{c}}} * 10^5 = 4800 * 0,0126 - 8,2 = 52,28 \text{ bar}$$

Tlak ulubljenja:

$$p_b = * \frac{E_{\check{c}}}{10^5} = 52,28 * \frac{200000}{10^5} = 104,56 \text{ bar}$$

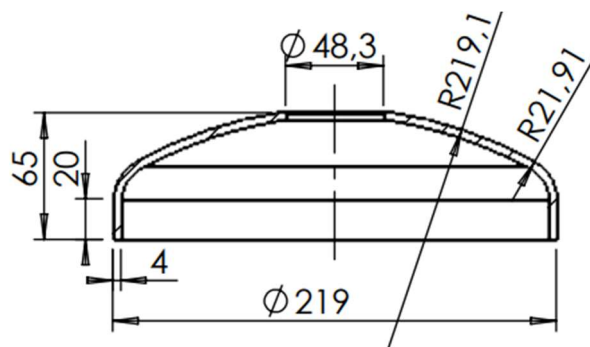
$$p_b \geq 1,5 * p$$

$$104,56 \geq 1,5 * 5$$

$$104,56 \geq 7,5$$

Tlak ulubljenja je veći od 50% povećanog radnog tlaka te je s time uvjet zadovoljen.

#### 4.4.5. Proračun čvrstoće podnice (s izrezima) izvrgnute unutrašnjem tlaku



Slika 16. Podnica s utorima za priključke

Proračun podnice s izrezima se provodi po normi **HRN M.E2.256** kada su izrezi unutar  $0,6 \times D_v$ .



Odabrana je standardna podnica prema DIN 28011

Odabrana je plitka podnica DN 200 – 219,1 x 4 mm.

#### 4.4.5.1. Potrebna debljina stijenke kalote

Potrebna debljina stijenke kalote podložene unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_{\text{kalote}} * p_t}{40 * f_d * \nu + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{446,2 * 5}{40 * 76,66 * 1 + 5} + 1 + 0,25 = 1,98 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke kalote iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 1,98 milimetara.

Potrebna debljina stijenke kalote podložene unutrašnjem ispitnom tlaku:

$$s_{PT} = \frac{D_{\text{kalote}} * p_{PT}}{40 * f_{\text{test}} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{446,2 * 10,6}{40 * 185,72 * 1 + 10,6} + 1 + 0,2 = 1,89 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke kalote iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 1,89 milimetara.

#### 4.4.5.2. Potrebna debljina stijenke torusa

Uvjet koji se mora ostvariti kako bi se norma mogla premjerivati.

$$0,001 < \frac{s_p - c_1 - c_2}{D_v} < 0,1$$

$$0,001 < \frac{4 - 1 - 0,25}{219,1} < 0,1$$

$$0,001 < 0,0126 < 0,1$$

Koeficijent oslabljena izrezom se očitava iz dijagrama a dan je funkcijom:

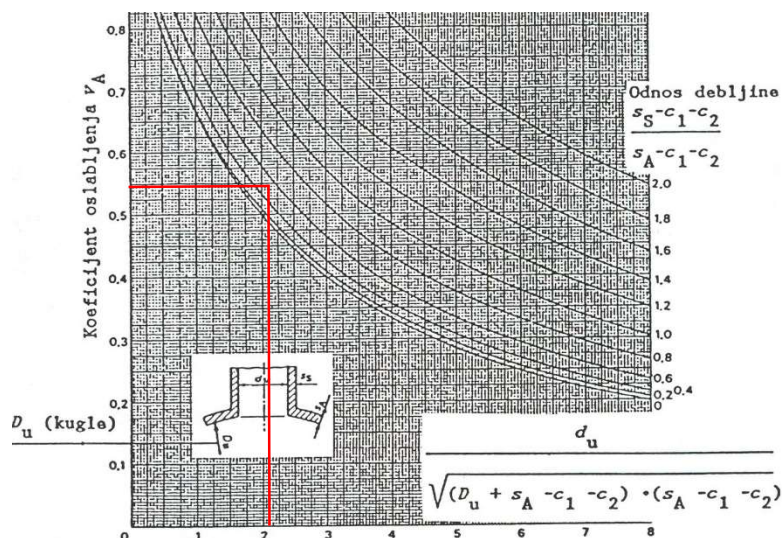
$$v = f\left(\frac{s_{w,u} - c_1 - c_2}{s_p - c_1 - c_2}, \frac{d_{w,u}}{\sqrt{(D_u - s_p - c_1 - c_2) * (s_p - c_1 - c_2)}}\right)$$

Koeficijent:

$$\frac{s_{w,u} - c_1 - c_2}{s_p - c_1 - c_2} = \frac{2,6 - 1 - 0,25}{4 - 1 - 0,25} = 0,495$$

Koeficijent:

$$\frac{d_{w,u}}{\sqrt{(D_u - s_p - c_1 - c_2) * (s_p - c_1 - c_2)}} = \frac{48,3}{\sqrt{(207,3 - 4 - 1 - 0,25) * (4 - 1 - 0,25)}} = 2,04$$



Slika 17. Graf oslabljenja stijenke torusa [6]

Koeficijent oslabljenja očitano iz grafa iznosi  $v_A = 0,575$  [6]

Potrebna debljina stijenke torusa podložene unutrašnjem radnom tlaku:

$$s = \frac{D_v * p_t}{40 * f_d * v + p_t} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{446,2 * 5 * 3,2}{40 * 76,66 * 0,575 + 5} + 1 + 0,25 = 2,52 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke torusa iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 2,52 milimetara.

Potrebna debljina stijenke torusa podložene unutrašnjem ispitnom tlaku:

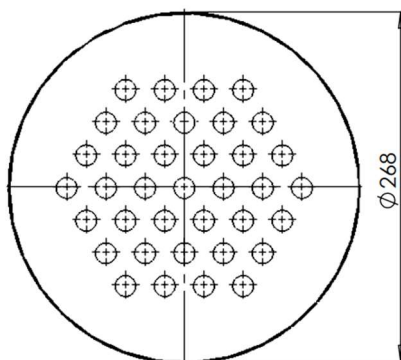
$$s_{PT} = \frac{D_v * p_{PT}}{40 * f_{test} * \nu + p_{PT}} + c_1 + c_2$$

$$s_{PT} = \frac{446,2 * 10,34}{40 * 185,72 * 0,575 + 10,34} + 1 + 0,25 = 2,33 \text{ mm}$$

Debljina odabrane stijenke torusa iznosi 4 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 2,33 milimetara.

#### 4.4.6. Proračun čvrstoće cijevne stijenke

Proračun čvrstoće podnice se provodi po normi **HRN M.E2.259**.



Slika 18. Cijevna stijena

Proračunski promjer izveden iz solidworks-a:  $d_2 = 20 \text{ mm}$

Potrebna debljina cijevne stijenke podložene unutrašnjem radnom tlaku:

$$s_c = 0,4 * d_2 * \sqrt{\frac{p_t}{10 * f_d}}$$

$$s_c = 0,4 * 20 * \sqrt{\frac{5}{10 * 76,66}}$$

$$s_c = 0,64 < 10 \text{ mm}$$

Debljina odabrane cijevne stijenke iznosi 10 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za radni tlak koja iznosi 0,64 milimetara.

Potrebna debljina cijevne stijenke podložene unutrašnjem ispitnom tlaku:

$$s_c = 0,4 * d_2 * \sqrt{\frac{p_{PT}}{10 * f_{test}}}$$

$$s_c = 0,4 * 20 * \sqrt{\frac{10,34}{10 * 185,72}}$$

$$s_c = 0,59 < 10 \text{ mm}$$

Debljina odabrane cijevne stijenke iznosi 10 milimetara i zadovoljava jer je veća od potrebne debljine stijenke za ispitni tlak koja iznosi 0,59 milimetara.

#### 4.4.7. Proračun sile u vijcima

Proračun čvrstoće prirubnice se provodi po normi **HRN M.E2.257**.

Odabrani su vijci razreda čvrstoće 5.6 [1]:

Vlačna čvrstoća,  $R_m = 500 \text{ N/mm}^2$

Konvencionalna granica razvlačenja,  $R_{p0,2} = 300 \text{ N/mm}$

Odabrana klingeritna brtva:

Unutarnji promjer brtve,  $d_{u,D} = 219,1 \text{ mm}$

Vanjski promjer brtve:  $d_{v,D} = 268 \text{ mm}$

Srednji promjer brtve:  $d_D = 243,55 \text{ mm}$

Korisna širina brtve:

$$b_D = \frac{d_{v,D} - d_{u,D}}{2}$$

$$b_D = \frac{268 - 219,1}{2} = 24,45 \text{ mm}$$

Debljina brtve,  $s_b = 3 \text{ mm}$

Proračun čvrstoće vijaka se mora provesti osim na ispitno i radno opterećenje još i na ugradbeno opterećenje. Ugradbeno opterećenje je je opterećenje prije djelovanja tlaka, odnosno prije početka rada kondenzatora.

#### 4.4.7.1. Najmanja sila u vijcima za radno stanje i promjer vijaka

Sila uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB} = \frac{p_t * \pi * d_{u,p}^2}{40}$$

$$F_{RB} = \frac{5 * \pi * 219,1^2}{40} = 18852 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

$$F_{FB} = \frac{p_t * \pi * (d_d^2 - d_{u,p}^2)}{40}$$

$$F_{FB} = \frac{5 * \pi * (243,55^2 - 219,1^2)}{40} = 4442 \text{ N}$$

Sila u brtvi:

Koeficijent  $S_D = 1,2$

Koeficijent brtve za radno stanje:

$$k_1 = 1,3 * b_D$$

$$k_1 = 1,3 * 24,45 = 31,79 \text{ mm}$$

$$F_{DB} = \frac{p_t * \pi * d_d * S_D * k_1}{10}$$

$$F_{DB} = \frac{5 * \pi * 243,55 * 1,2 * 31,79}{10} = 14562 \text{ N}$$

Ukupna sila:

$$F_{SB} = F_{RB} + F_{FB} + F_{DB}$$

$$F_{SB} = 18852 + 4442 + 14562 = 37856 \text{ N}$$

Stanje i kvaliteta obrade	Materijali s poznatom granicom plastičnosti i sigurnosti prema granici elastičnosti odnosno $\sigma_B/100000$		Materijali bez poznate granice s faktorom sigurnosti prema prekidnoj čvrstoći
	kod elastičnih vijaka	kod vijaka s punim tijelom	
<b>RADNO STANJE</b>	<b>S = 1.5</b>	<b>S = 1.8</b>	<b>S = 5.0</b>
$\varphi = 0.75$	Z = 1.60	Z = 1.75	Z = 2.91
$\varphi = 1.00$	Z = 1.38	Z = 1.51	Z = 2.52
<b>UGRADNO I ISPITNO STANJE</b>	<b>S = 1.1</b>	<b>S = 1.3</b>	<b>S = 3.0</b>
$\varphi = 0.75$	Z = 1.37	Z = 1.49	Z = 2.26
$\varphi = 1.00$	Z = 1.18	Z = 1.29	Z = 1.95

Slika 19. Faktor sigurnosti i pomoćne vrijednosti [6]

Pomoćna veličina,  $Z = 1,51$

Faktor površine obrađene skidanjem strugotina,  $\varphi = 1$

Promjer vijka:

$$d_k = Z * \sqrt{\frac{F_{SB}}{Rp_{0.2} * n}}$$

$$d_k = 1,51 * \sqrt{\frac{37856}{300 * 12}} = 4,89 \text{ mm}$$

$$Z * \sqrt{\frac{F_{SB}}{Rp_{0.2} * n}} < 20 \text{ mm dodatak vijku iznosi: } c_5 = 3 \text{ mm}$$

$$d_k = 4,89 + 3$$

$$d_k = 7,89 \text{ mm}$$

#### 4.4.7.2. Najmanja sila u vijcima za ispitno stanje i promjer vijaka

**Sila uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:**

$$F_{RB,i} = \frac{p_{PT} * \pi * d_{u,p}^2}{40}$$

$$F_{RB,i} = \frac{10,34 * \pi * 219,1^2}{40} = 38985 \text{ N}$$

**Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:**

$$F_{FB,i} = \frac{p_{PT} * \pi * (d_d^2 - d_{u,p}^2)}{40}$$

$$F_{FB,i} = \frac{10,34 * \pi * (243,55^2 - 219,1^2)}{40} = 9005 \text{ N}$$

**Sila u brtvi:**

Koeficijent  $S_D = 1,2$

Koeficijent brtve za radno stanje:

$$F_{DB,i} = \frac{p_{PT} * \pi * d_d * S_D * k_1}{10}$$

$$F_{DB,i} = \frac{10,34 * \pi * 243,55 * 1,2 * 31,79}{10} = 30113 \text{ N}$$

**Ukupna sila:**

$$F_{SB,i} = F_{RB,i} + F_{FB,i} + F_{DB,i}$$

$$F_{SB,i} = 38985 + 9005 + 30113 = 78103 \text{ N}$$

Pomoćna veličina,  $Z = 1,29$

Faktor površine obrađene skidanjem strugotina,  $\varphi = 1$

Promjer vijka:

$$d_k = Z * \sqrt{\frac{F_{SB,i}}{Rp_{0.2} * n}}$$

$$d_k = 1,29 * \sqrt{\frac{78103}{300 * 12}} = 6 \text{ mm}$$

#### 4.4.7.3. Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje i promjer vijaka

$$k_0 * K_D = 200 * \sqrt{\frac{b_D}{s_D}}$$

$$k_0 * K_D = 200 * \sqrt{\frac{24,45}{2}} = 699,29 \text{ N/mm}$$

$$F_{DV} = \pi * d_d * K_D * k_0$$

$$F_{DV} = \pi * 243,55 * 699,29 = 535051 \text{ N}$$

Ako je sila pri ugradbenom stanju veća od  $F_{SB}$  i  $F_{DV}$  sila se može zamijeniti sa:

$$F_{DV} = 0,2 * F_{DV} + 0,8 * \sqrt{F_{SB} * F_{DV}}$$

$$F_{DV} = 0,2 * 535051 + 0,8 * \sqrt{37856 * 535051} = 220866 \text{ N}$$

Pomoćna veličina,  $Z = 1,51$

Faktor površine obrađene skidanjem strugotina,  $\varphi = 1$

Promjer vijka:

$$d_k = Z * \sqrt{\frac{F_{DV}}{Rp_{0.2} * n}}$$

$$d_k = 1,29 * \sqrt{\frac{220866}{300 * 12}} = 10,10 \text{ mm}$$

**Odabrani su vijci M 20 5.6. [1]**

#### 4.4.8. Proračun čvrstoće prirubnice

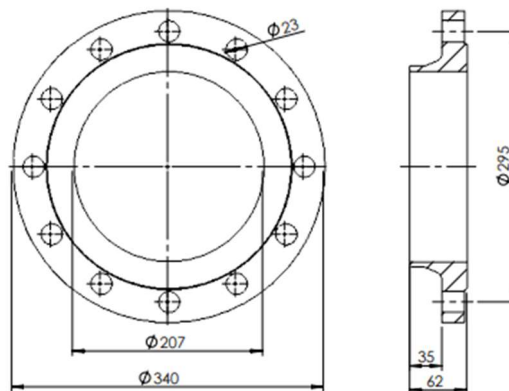
Proračun čvrstoće prirubnice se provodi po normi **HRN M.E2.258**.

Odabrana je prirubnica s grlom za zavarivanje DN 200 prema DIN 2633 PN16.

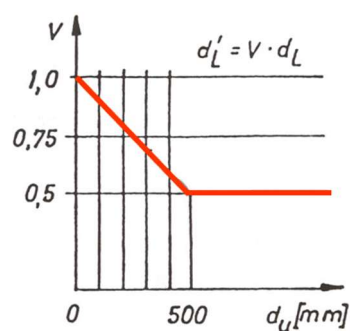
Unutarnji promjer prirubnice:  $d_{u,p} = 207,3 \text{ mm}$

Promjer brtvene površine:  $d_{4,p} = 268 \text{ mm}$

Broj rupa za vijke:  $n_v = 12$



Slika 20. Prirubnica



Slika 21. Graf umanjenja promjera za vijke [6]

Faktor umanjenja promjera rupe za vijke:  $v = 0,8$

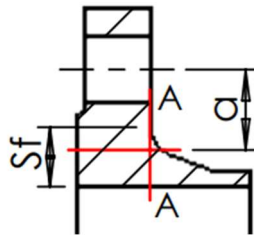
Umanjeni promjer za vijke:

$$d'_L = v * d_L$$

$$d'_L = 0,8 * 23 = 18,4 \text{ mm}$$



#### 4.4.8.1. Presjek A-A prirubnice



Slika 22. Presjek A-A prirubnice

#### Moment otpora zbog radne sile

Debljina prirubnice na prijelaznom dijelu,  $s_F$ :

$$s_F = \frac{d_3 - d_1}{2} + s_p$$

$$s_F = \frac{235 - 219,1}{2} + 5,9 = 13,85 \text{ mm}$$

Udaljenost težišta:

$$a = \frac{k - d_u - s_F}{2}$$

$$a = \frac{295 - 207,3 - 13,85}{2} = 36,93 \text{ mm}$$

Proračunska dvostruka širina prirubnice:

$$b = D_p - d_u - 2 * d_L$$

$$b = 340 - 207,3 - 2 * 18,4 = 95,9 \text{ mm}$$

Pomoćna vrijednost:

$$Z = (d_u + s_F) * s_F^2$$

$$Z = (207,3 + 13,85) * 13,85^2 = 42422 \text{ mm}^3$$

Moment otpora uslijed djelovanja radne sile:

$$W_{SB} = \frac{F_{SB}}{f_d} * a$$

$$W_{SB} = \frac{37856}{76,66} * 36,93 = 18237 \text{ mm}^3$$

Moment otpora uslijed djelovanja ispitne sile:

$$W_{SB,i} = \frac{F_{SB,i}}{f_{test}} * a$$

$$W_{SB,i} = \frac{78103}{185,72} * 36,93 = 15531 \text{ mm}^3$$

Moment otpora uslijed djelovanja ugradbene sile:

$$a_u = \frac{K - d_d}{2}$$

$$a_u = \frac{295 - 243,55}{2} = 25,73 \text{ mm}$$

$$W_{DV} = \frac{F_{DV}}{f_{test}} * a_u$$

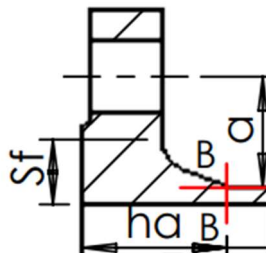
$$W_{DV} = \frac{220866}{185,72} * 25,73 = 25392 \text{ mm}^3$$

$$W = \max(W_{SB}, W_{SB,i}, W_{DV}) = 30599 \text{ mm}^3$$

$$h_f = \sqrt{\frac{1,27 * W - Z}{b}} = \sqrt{\frac{1,27 * 30599 - 42422}{95,9}} = // < b' = 24 \text{ mm}$$

Presjek A-A zadovoljava jer je dobiven iracionalan broj za visinu prirubnice.

#### 4.4.8.2. Presjek B-B prirubnice



Slika 23. Presjek B-B prirubnice

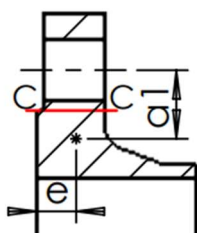
$$h_A = 70 - 16 = 54 \text{ mm}$$

$$1. \text{ uvjet: } 0,5 \leq \frac{h_A - h_F}{h_F} \leq 0,1 \rightarrow 0,5 \leq \frac{54 - 26}{26} \leq 0,1 \rightarrow 0,5 \leq 1,08 \leq 0,1$$

$$2. \text{ uvjet: } 0,1 \leq \frac{s_1 + s_F}{b} \leq 0,3 \rightarrow 0,1 \leq \frac{6,3 + 15,8}{106,8} \leq 0,3 \rightarrow 0,1 \leq 0,21 \leq 0,3$$

Prvi uvjet se nalazi izvan traženih granica što znači da ne treba provjeravati presjek B-B.

## 4.4.8.3. Presjek C-C prirubnice



Slika 24. Presjek C-C prirubnice

Udaljenost težišta:

$$a_1 = \frac{d_3 - d_u}{2} + \frac{k - d_3}{2}$$

$$a_1 = \frac{235 - 207,3}{2} + \frac{295 - 235}{2} = 43,85 \text{ mm}$$

Moment otpora uslijed djelovanja radne sile:

$$W_{SB} = \frac{F_{SB}}{f_d} * a_1$$

$$W_{SB} = \frac{37856}{76,66} * 43,85 = 21654 \text{ mm}^3$$

Moment otpora uslijed djelovanja ispitne sile:

$$W_{SB,i} = \frac{F_{SB,i}}{f_{test}} * a_1$$

$$W_{SB,i} = \frac{78103}{185,72} * 43,85 = 18441 \text{ mm}^3$$

Moment otpora uslijed djelovanja ugradbene sile:

$$W_{DV} = \frac{F_{DV}}{f_{test}} * a_1$$

$$W_{DV} = \frac{220866}{185,72} * 43,85 = 52148 \text{ mm}^3$$

$$W = \max(W_{SB}, W_{SB,i}, W_{DV}) = 52148 \text{ mm}^3$$

$$h_f = \sqrt{\frac{4 * W}{\pi * (d_{v,p} - 2 * d'_L)}} = \sqrt{\frac{4 * 52148}{\pi * (340 - 2 * 18,4)}} = 14,79 < b' = 24 \text{ mm}$$

Presjek C-C zadovoljava jer je potrebna širina presjeka 14,79 milimetara, uzeta je širina 24 milimetra.

#### 4.4.9. Proračun cijevnog snopa na izvijanje

Proračun cijevnog snopa na izvijanje se provodi po normi **HRN M.E2.259**.

Aksijalni moment tromosti, I:

$$I = \frac{d_v^4 - d_u^4}{64} * \pi$$

$$I = \frac{16^4 - 12,4^4}{64} * \pi = 2057 \text{ mm}^4$$

Maksimalna duljina izvijanja:  $l_0 = 974 \text{ mm}$

Slobodna duljina izvijanja:

$$l_K = 0,5 * l_0$$

$$l_K = 0,5 * 974 = 487 \text{ mm}$$

Stupanj vitkosti  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{4 * l_K}{\sqrt{d_v^2 + d_u^2}}$$

$$\lambda = \frac{4 * 487}{\sqrt{16^2 + 12,4^2}} = 96,23$$

Stupanj vitkosti  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \pi * \sqrt{\frac{E_{\check{c},100^\circ C}}{K}}$$

$$\lambda_0 = \pi * \sqrt{\frac{196000}{195}}$$

$$\lambda_0 = 99,3$$

$\lambda \ll \lambda_0$  dopušten sila izvijanja se računa prema formuli:

$$F_k = \frac{K}{S} * \pi * \frac{d_v^2 - d_u^2}{4} * \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} * \left( 1 - \frac{S}{3} \right) \right)$$

$$F_k = \frac{195}{1,5} * \pi * \frac{16^2 - 12,4^2}{4} * \left( 1 - \frac{96,23}{99,3} * \left( 1 - \frac{1,5}{3} \right) \right) = 5447 \text{ N}$$

## Sile naprezanja uslijed toplinskih dilatacija

Modul elastičnosti cijevi,  $E_{c,200^{\circ}\text{C}} = 186000 \text{ N/mm}^2$  [1]

Modul elastičnosti plašta,  $E_{p,100^{\circ}\text{C}} = 194000 \text{ N/mm}^2$  [1]

Koeficijent toplinske rastezljivosti materijala cijevi,  $\alpha_c = 0,000012 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [1]

Koeficijent toplinske rastezljivosti materijala plašta,  $\alpha_p = 0,000014 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [1]

Temperatura stijenke cijevi:  $\vartheta_{sv,8} = 64,799 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura stijenke plašta izmjenjivača se

$$\begin{aligned}\vartheta_{sr,p} &= \vartheta_k - \Delta\vartheta_m \\ \vartheta_{sr,p} &= 125,27 - 93,21 = 32,06 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Površina poprečnog presjeka cijevi:

$$\begin{aligned}A_c &= \pi * \frac{(d_v^2 - d_u^2)}{4} \\ A_c &= \pi * \frac{(16^2 - 12,4^2)}{4} = 80,3 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Površina poprečnog presjeka plašta:

$$\begin{aligned}A_p &= \pi * \frac{(D_v^2 - D_u^2)}{4} \\ A_p &= \pi * \frac{(219,1^2 - 207,3^2)}{4} = 3952 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Sila uslijed toplinskih dilatacija:

$$\begin{aligned}F_t &= \frac{(\alpha_c * \vartheta_{sv,8} - \alpha_p * \vartheta_{sr,p}) * E_{c,200^{\circ}\text{C}} * A_c * E_{p,100^{\circ}\text{C}} * A_p}{E_{c,200^{\circ}\text{C}} * A_c + E_{p,100^{\circ}\text{C}} * A_p} \\ F_t &= \frac{(64,799 * 0,000012 - 0,000015 * 32,06) * 186000 * 80,3 * 196000 * 3952}{186000 * 80,3 + 196000 * 3952} \\ F_t &= 4817 \text{ N}\end{aligned}$$

Neće doći do izvijanja jer je dopuštena sila izvijanja manja od sile uslijed toplinskih dilatacija.

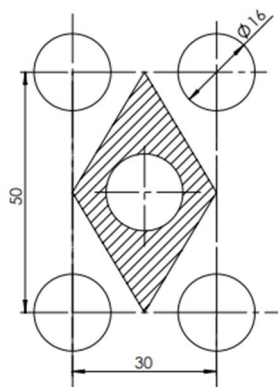
#### 4.4.10. Proračun zavora cijevnog snopa sa cijevnom stijenkom

Proračun čvrstoće zavora se provodi po normi **HRN M.E2.259**.

Površina opterećenja koja se odnosi na jednu cijev:

$$A_R = \frac{t * h}{2} - \frac{\pi * d_v^2}{4}$$

$$A_R = \frac{30 * 50}{2} - \frac{\pi * 16^2}{4} = 0,000549 \text{ m}^2$$



Slika 25. Površina opterećenja zavora

Sila na cijev uslijed radnog tlaka:

$$F_R = p_t * A_R$$

$$F_R = 5 * 10^5 * 0,000549 = 274,5 \text{ N}$$

Debljina zavora za radno stanje:

$$q = 0,4 * \frac{F_r + F_t}{d_v * f_d}$$

$$q = 0,4 * \frac{274,5 + 6198,68}{16 * 90,66}$$

$$q = 1,79 \text{ mm} < 3 \text{ mm}$$

Sila na cijev uslijed ispitnog tlaka:

$$F_{R,i} = p_{PT} * A_R$$

$$F_{R,i} = 10,34 * 10^5 * 0,000549 = 567,67 \text{ N}$$

Debljina zavara za ispitno stanje:

$$q = 0,4 * \frac{F_r}{d_s * f_{test}}$$

$$q = 0,4 * \frac{567,67}{16 * 223,81}$$

$$q = 0,063 \text{ mm} < 3 \text{ mm}$$

## 4.5. Proračun pada tlaka izmjenjivača

### 4.5.1. Pad tlak vode u cijevima

Gustoća vode,  $\rho_{w,m} = 995,2051 \text{ kg/m}^3$

Brzina vode u priključcima aparata:  $w_{izr,w} = 1,69 \text{ m/s}$

Brzina vode u cijevima:  $w_{stv} = 0,552 \text{ m/s}$

Unutarnji promjer cijevi:  $d_u = 12,4 \text{ mm}$

Unutarnji promjer ulaznih i izlaznih priključaka vode  $d_{u,w} = 43,1 \text{ mm}$

Ukupna duljina cijevi:  $L_i = 826,6 \text{ mm}$

Reynoldsov broj za vodu,  $Re_w = 8904$

Koeficijent trenja na ulaznom priključku,  $\xi_{pr,ul} = 0,5 [1]$

Koeficijent trenja na izlaznom priključku,  $\xi_{pr,izl} = 1 [1]$

Pad tlaka u priključcima:

$$\Delta p_{pr} = (\xi_{pr,ul} + \xi_{pr,iz}) \times \frac{\rho_{w,m} * w_{izr,w}^2}{2}$$

$$\Delta p_{pr} = (1 + 0,5) * \frac{995,2051 * 1,69^2}{2} = 2132 \text{ Pa}$$

Faktor trenja:

$$\lambda_{\Delta p} = \frac{1,325}{\left( \ln \left( \frac{k}{3,7 * d_u} + \frac{5,74}{Re_w^{0,9}} \right) \right)^2}$$

$$\lambda_{\Delta p} = \frac{1,325}{\left( \ln \left( \frac{0,002}{3,7 * 12,4} + \frac{5,74}{8904^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,032$$

Linijski pad tlaka:

$$\Delta p_l = \lambda * \frac{L_i}{d_u} * \frac{\rho_{w,m} * w_{stv}^2}{2}$$

$$\Delta p_l = 0,032 * \frac{826,6}{12,4} * \frac{995,2051 * 0,552^2}{2} = 324 \text{ Pa}$$

Površina cijevi:

$$A_c = \frac{d_u^2 * \pi}{4} = \frac{0,0124^2 * \pi}{4} = 0,000121 \text{ m}^2$$

Unutarnja površina prirubnice:

$$A_{pr} = \frac{d_{u,p}^2 * \pi}{4} = \frac{0,2073^2 * \pi}{4} = 0,0338 \text{ mm}^2$$

Koeficijent trenja zbog naglog proširenja poprečnog presjeka:

$$\xi_{pr,p} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

$$\xi_{pr,p} = \left(1 - \frac{0,000121}{0,0338}\right)^2 \approx 1$$

Koeficijent trenja zbog naglog smanjenja poprečnog presjeka:  $\xi_{pr,s} = 3$  [7]

Pad tlaka zbog promjene poprečnog presjeka:

$$\Delta p_{pis} = (\xi_{pr,p} + \xi_{pr,s}) * \frac{\rho_{w,m} * w_{stv}^2}{2}$$

$$\Delta p_{pis} = (1 + 3) * \frac{995,2051 * 0,552^2}{2} = 607 \text{ Pa}$$

Ukupni pad tlaka vode:

$$\Delta p_w = \Delta p_{pr} + \Delta p_l + \Delta p_{pis}$$

$$\Delta p_w = 2132 + 324 + 607 = 3063 \text{ Pa}$$



#### 4.5.2. Pad tlaka etilnog alkohola

Gustoća pare etilnog alkohola na ulazu u kondenzator:  $\rho_{e,u} = 7,655 \text{ kg/m}^3$

Gustoća kondenzata etilnog alkohola na izlazu iz kondenzatora:  $\rho_{e,i} = 768,073 \text{ kg/m}^3$

Srednja gustoća etilnog alkohola:  $\rho_{e,m} = 387,864 \text{ kg/m}^3$

Brzina pare etilnog alkohola na ulazu:  $w_{izr,e,u} = 3,57 \text{ m/s}$

Brzina kondenzata etilnog alkohola na izlazu:  $w_{izr,e,i} = 0,57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Koeficijent trenja na ulaznom priključku,  $\xi_{pr,ul} = 0,5 [1]$

Koeficijent trenja na izlaznom priključku,  $\xi_{pr,izl} = 1 [1]$

Pad tlaka na priključcima etilnog alkohola:

$$\Delta p_{pr,e} = \xi_{pr,ul} * \frac{\rho_{e,u} * w_{izr,e,u}^2}{2} + 2 * \xi_{pr,izl} * \frac{\rho_{e,i} * w_{izr,e,i}^2}{2}$$

$$\Delta p_{pr,e} = 0,5 * \frac{7,655 * 3,57^2}{2} + 2 * 1 * \frac{768,073 * 0,57^2}{2} = 274 \text{ Pa}$$

Ekvivalentni promjer kondenzatora:

$$D_{ekv} = \frac{D_u^2 - n * d_v^2}{D_u + n * d_v}$$

$$D_{ekv} = \frac{207,3^2 - 37 * 16^2}{207,3 + 37 * 16} = 41,91 \text{ mm}$$

Brzina strujanja u plaštu kondenzatora:

$$w_{ekv} = \frac{q_{m,e}}{\rho_e * \left( \frac{D_u^2 * \pi}{4} - n * \frac{d_u^2 * \pi}{4} \right)}$$

$$w_{ekv} = \frac{0,106}{387,864 * \left( \frac{0,2073^2 * \pi}{4} - 37 * \frac{0,016^2 * \pi}{4} \right)} = 0,011 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj u plaštu:

$$Re_p = \frac{w_{ekv} * D_{ekv} * \rho_{e,m}}{\mu_{e,m}}$$
$$Re_p = \frac{0,011 * 0,04191 * 387,86}{0,0000117} = 15283$$

Koeficijent trenja u plaštu:

$$\lambda_{pl} = (1,82 * \log(Re_p) - 1,64)^{-2}$$
$$\lambda_{pl} = (1,82 * \log(15283) - 1,64)^{-2} = 0,028$$

Pad tlaka u plaštu kondenzatora:

$$\Delta p_{pl,ko} = \lambda_{pl} * n * \frac{L_{ko}}{D_{ekv}} * \frac{\rho_{e,i} * w_{ekv}^2}{2}$$
$$\Delta p_{pl,ko} = 0,028 * 37 * \frac{826,6}{41,91} * \frac{387,864 * 0,011^2}{2} = 1 \text{ Pa}$$

Ukupni pad taka u plaštu:

$$\Delta p_p = \Delta p_{pl,ko} + \Delta p_{pr,e}$$
$$\Delta p_p = 274 + 1 = 275 \text{ Pa}$$

## 4.6. Vrsta i klasa kondenzatora

Radni medij voda

Radni tlak 5 bar.

$$V_w = V_{\text{cijevi}} + 2 * V_{\text{podnice}} + 2 * V_{\text{prirubnice}}$$

$$V_w = 3,81 + 4,05 + 2,01 = 9,96 \text{ l}$$

$$PS * V_w = 5 * 9,96 = 49,8 \text{ bar} * \text{l}$$

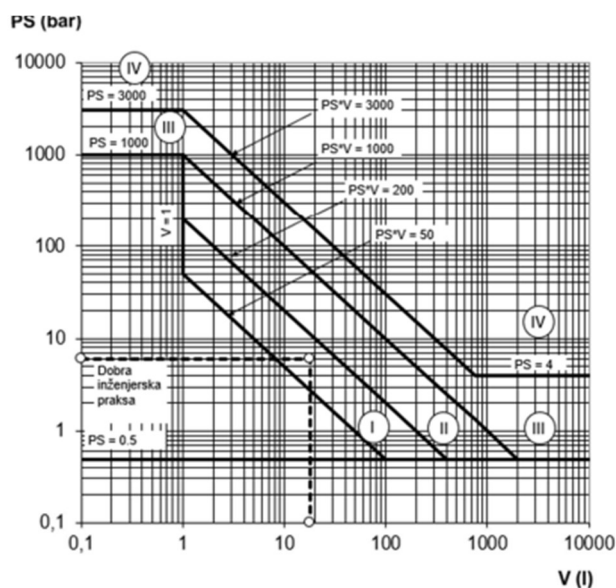
Radni tlak 5 bar.

Radni medij etilni alkohol:

$$V_p = V_{\text{plašt}} - V_{\text{cijevi}} + V_{\text{prik.pare}} + V_{\text{prik.konden.}}$$

$$V_p = 23,7 + 0,39 + 0,08 = 24,17 \text{ l}$$

$$PS * V_p = 5 * 24,17 = 120,85 \text{ bar} * \text{l}$$



Slika 26. Dijagram kategorije kondenzatora [6]

Radni medij voda spada u grupu 2.

Radni medij etilni alkohol spada u grupu 1.

Dijagram pokazuje da kondenzator spada u II kategoriju, a ocjena sukladnosti određena je prema modulima A2, D1, E1.

## 4.7. Tehnički opis kondenzatora etilnog alkohola

Kondenzator etilnog alkohola je izmjenjivač topline tipa Shell&Tube, toplinskog je učina 80,01 kW. Sastoji se od 37 čeličnih cijevi raspoređenih u trokutasti raspored sa dva prolaza. Etilni alkohol struji u plaštu, a u cijevima struji voda koja ulazi u kondenzator sa 28°C, a izlazi iz kondenzatora sa 36°C

Kondenzator etilnog alkohola se sastoji od slijedećih komponenti:

1. Dvije ravne prirubnice DN 40 koje se zavaruju na priključke za ulaz i izlaz rashladne vode
2. Dvije ravne prirubnice DN 10 koje se zavaruju na priključak za odvod kondenzata etanola
3. Ravna prirubnica DN 65 koja se zavaruje na priključak za dovod pare etilnog alkohola
4. Četiri prirubnica s grlom za zavarivanje DN 200 na koje se zavaruju podnice i plašt
5. Jedne plitke podnice DN 200 i jedne plitke podnice DN 200 s priključcima
6. Četiri plosnate brtve od klingerita
7. Plašta, koji je izveden kao čelična šavna cijev dimenzija  $\phi 219,1 \times 702,6$  mm
8. 37 čeličnih bešavnih cijevi DN 10 kroz koje struji voda
9. Dvije čelične bešavne cijevi DN 40 koje služe kao priključci za ulaz i izlaz rashladne vode
10. Jedne čelične bešavne cijevi DN 65 koje služe kao priključak za dovod pare etanola
11. Dvije čelične bešavne cijevi DN 10 koje služe kao priključci za odvod kondenzata etanola
12. Zaštitne ploče koja služi za usporavanje pare etilnog alkohola na ulazu u kondenzator
13. 24 vijaka M 20
14. 24 matica M 20 za osiguravanje vijčanog spoja
15. 2 U-vijaka
16. 8 matica M10 za osiguravanje vijčanog spoja

### 4.7.1. Pločasti izmjenjivač

Nakon kondenzacije Shell&tube izmjenjivaču etilni alkohol se pothlađuje u pločastom izmjenjivaču. Etilni alkohol se pothlađuje na 40°C s ciljem da se ne ošteti plastični spremnik u kojem se skladišti ili zbog sigurnosti od opekline kod ljudi. Pločasti izmjenjivač je odabran već gotov od proizvođača. [14]

Karakteristike pločastog izmjenjivača:

Toplinski učinak pločastog izmjenjivač iznosi 25 kW.

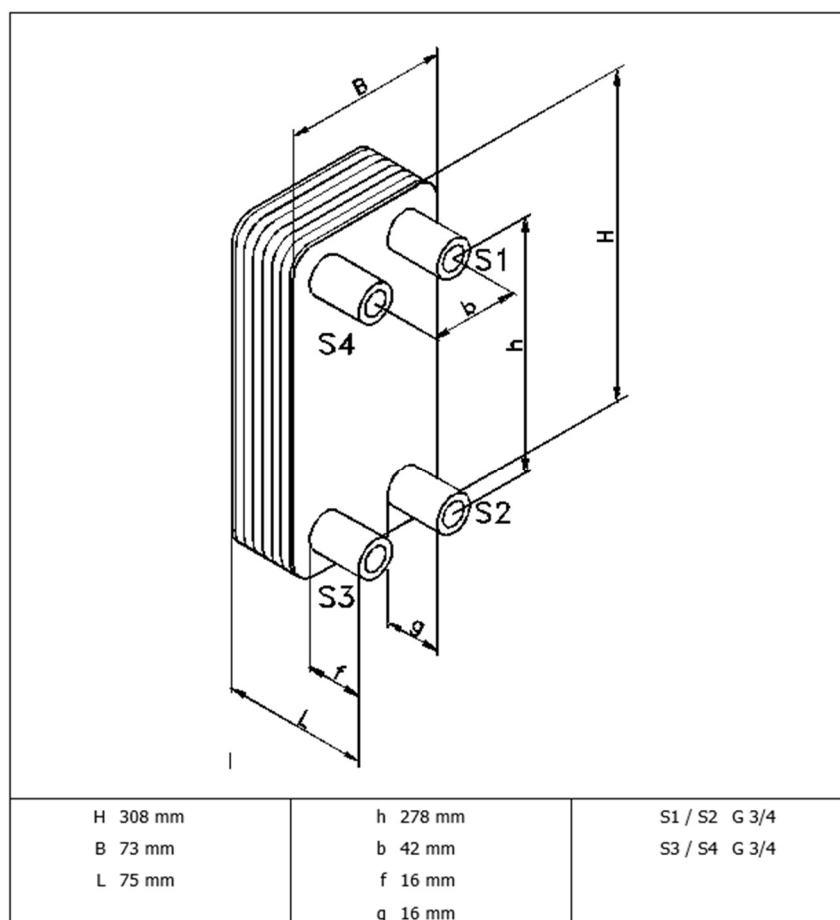
Broj ploča iznosi 24.

Maseni protok vode iznosi 0,6 kg/s.

Pad tlaka u izmjenjivaču iznosi 14,29 kPa.

Ispitni tlak iznosi 30 bar-a.

Radni temperaturni raspon iznosi od 0°C do 195°C.



Slika 27. Pločasti izmjenjivač [14]

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu projektiran je sustav za dehidraciju etilnog alkohola adsorpcijom. Proračunom je obuhvaćen kondenzator etilnog alkohola zajedno sa svim crtežima potrebnim za njegovu izradu. Proračun kondenzatora se sastoji od termodinamičkog proračuna i proračuna čvrstoće. U termodinamičkom proračunu je prikazan je potreban broj cijevi i duljina izmjenjivača potreba za izmjenu toplinskog toka. Proračun čvrstoće kondenzatora etilnog alkohola prikazuje da li je svaka komponenta kondenzatora dobro dimenzionirana. Kondenzator i ostali dijelovi sustava te njihov međusobni položaj prikazani su u P&ID dijagramu procesa. Adsorpcija vode iz smjese etanola i vode se vrši u adsorberu koji u sebi sadrži molekularna sita. Također je prikazan proračun mase molekularnih sita potrebne za dehidraciju etilnog alkohola. Regeneracija molekularnih sita se vrši pomoću vakuum pumpe s tekućim prstenom koja stvara podtlak i tako desorbira molekule vode iz površine molekularnih sita. Sustav za dehidraciju etilnog alkohola adsorpcijom ima svoje prednosti i mane. Prednosti sustava se kriju u maloj potrošnji toplinske energije i u molekularnim sitima. Molekularna sita su ekonomična i ekološki prihvatljiva zahvaljujući sposobnosti regeneracije. Mana molekularnih sita je u tome što su skupa i problem je kako ih zbrinuti nakon korištenja.

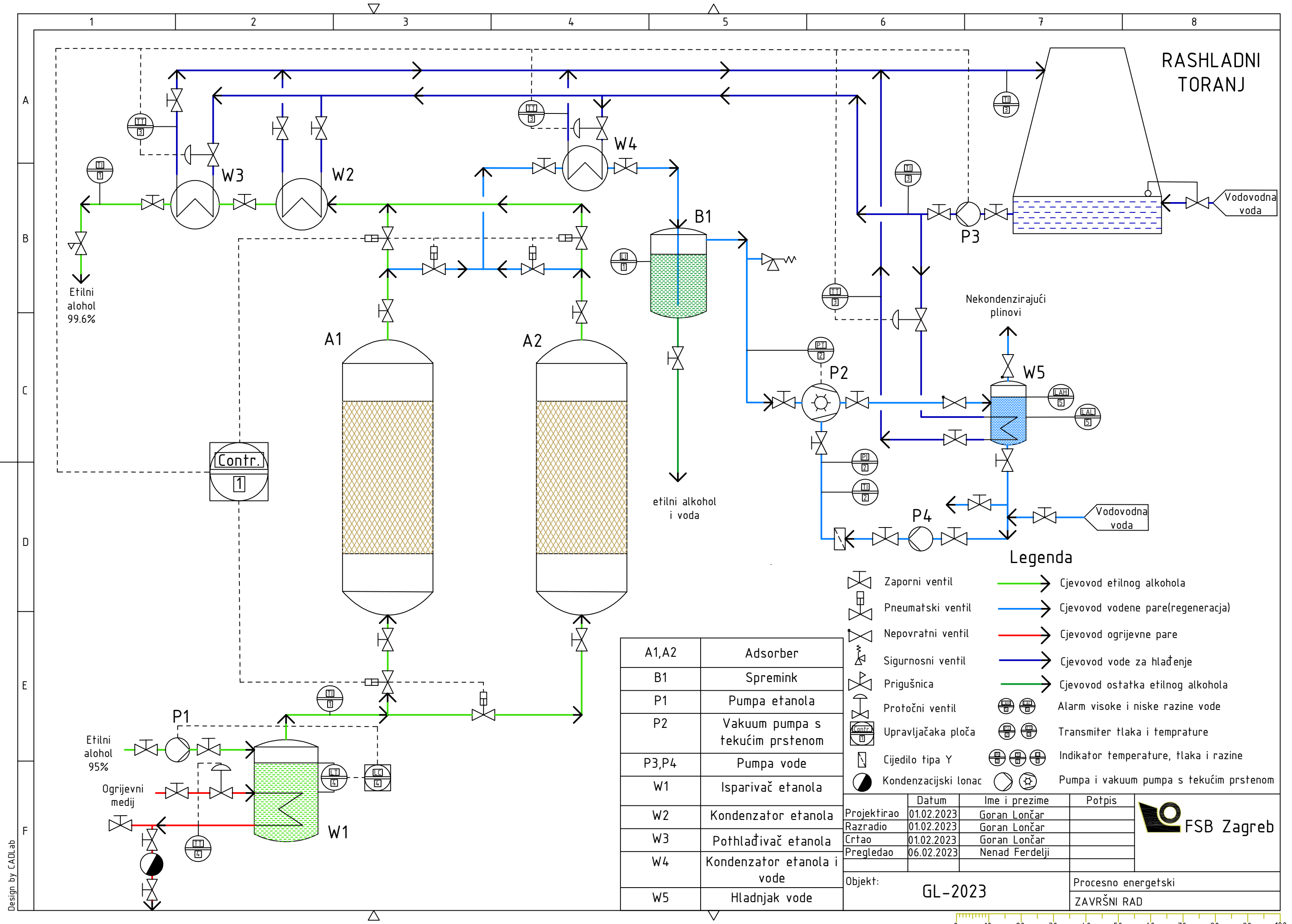
## LITERATURA

- [1] Kraut, B.: **Strojarski priručnik**, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Ferdelji N., **Predavanja iz kolegija Toplinske operacije**, FSB, Zagreb, 2022.
- [3] Bošnjaković F., **Nauka o toplini III. dio**, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [4] Koharić V., **Mehaničke operacije**, FSB, Zagreb, 1996.
- [5] Soldo V., **Predavanja iz kolegija Mehaničke operacije**, FSB, 2022.
- [6] Dović D. **Podloge iz kolegija Gradnja aparata**, FSB, 2022.
- [7] **VDI Heat Atlas**, Second Edition, 2010.
- [8] **Narodne novine**, web stranica:  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_02\\_20\\_426.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_02_20_426.html), veljača 2023.
- [9] **Hrvatska enciklopedija**, web stranica:  
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=4909>, siječanj 2023.
- [10] **ScienceDirect**, web stranica:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/adsorbers>, siječanj 2023.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bed-adsorbers>, siječanj 2023.
- [11] **Nedexgroup**, web stranica:  
<http://www.nedexgroup.com/lang2/urunler/nem-alici/zeolan-k>, siječanj 2023.
- [12] **The Compressed Air Blog**, web stranica:
- [13] <https://www.thecompressedairblog.com/how-it-works-liquid-ring-pump>, siječanj 2023.
- [14] **Tps thermal controls**, web stranica:  
<http://www.tpsthermalcontrols.com/products/292/>, veljača 2023.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija





**Legenda**

- Zaporni ventil
- Pneumatski ventil
- Nepovratni ventil
- Sigurnosni ventil
- Prigušnica
- Protočni ventil
- Upravljačka ploča
- Cijedilo tipa Y
- Kondenzacijski lonac
- Cjevovod etilnog alkohola
- Cjevovod vodene pare(regeneracija)
- Cjevovod ogrijevne pare
- Cjevovod vode za hlađenje
- Cjevovod ostatka etilnog alkohola
- Alarm visoke i niske razine vode
- Transmitter tlaka i temprature
- Indikator temperature, tlaka i razine
- Pumpa i vakuum pumpa s tekućim prstenom

A1,A2	Adsorber
B1	Spremnik
P1	Pumpa etanola
P2	Vakuum pumpa s tekućim prstenom
P3,P4	Pumpa vode
W1	Iparivač etanola
W2	Kondenzator etanola
W3	Pothlađivač etanola
W4	Kondenzator etanola i vode
W5	Hladnjak vode

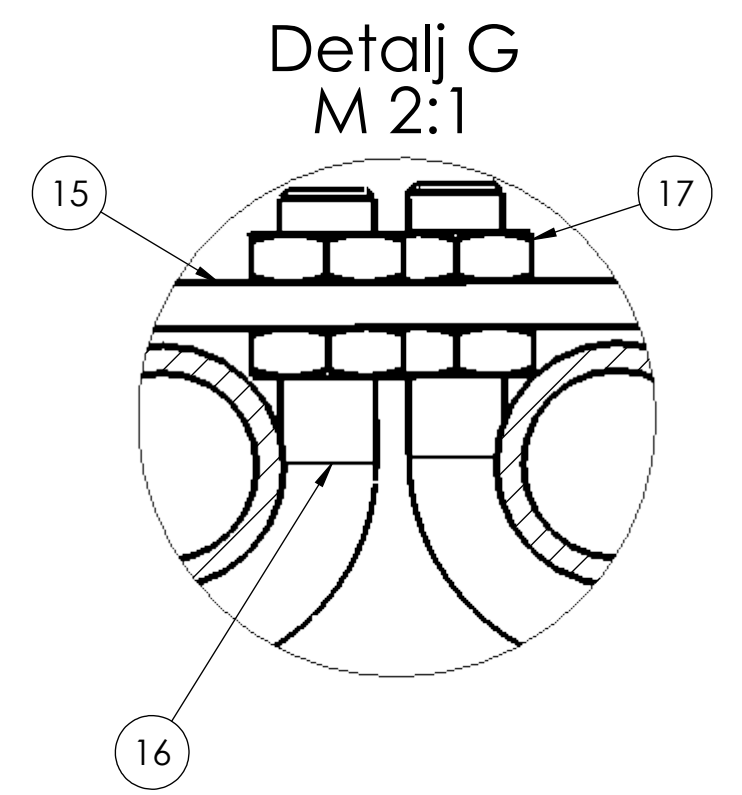
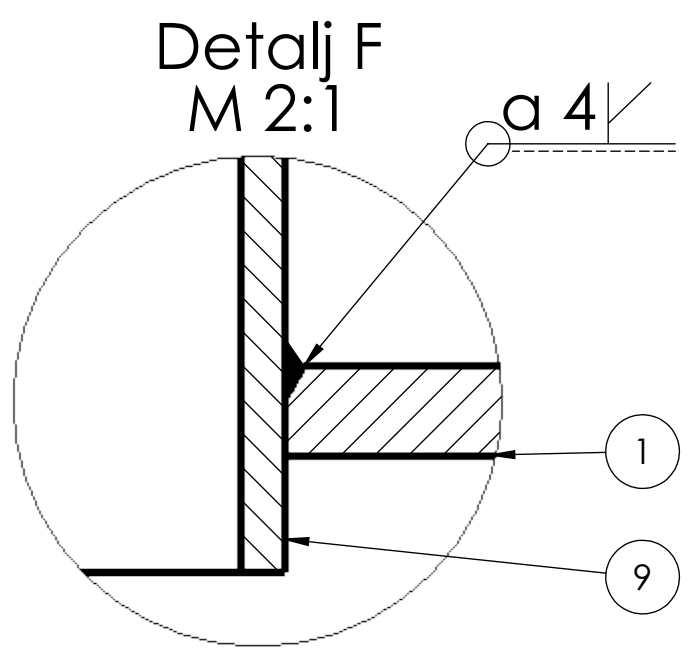
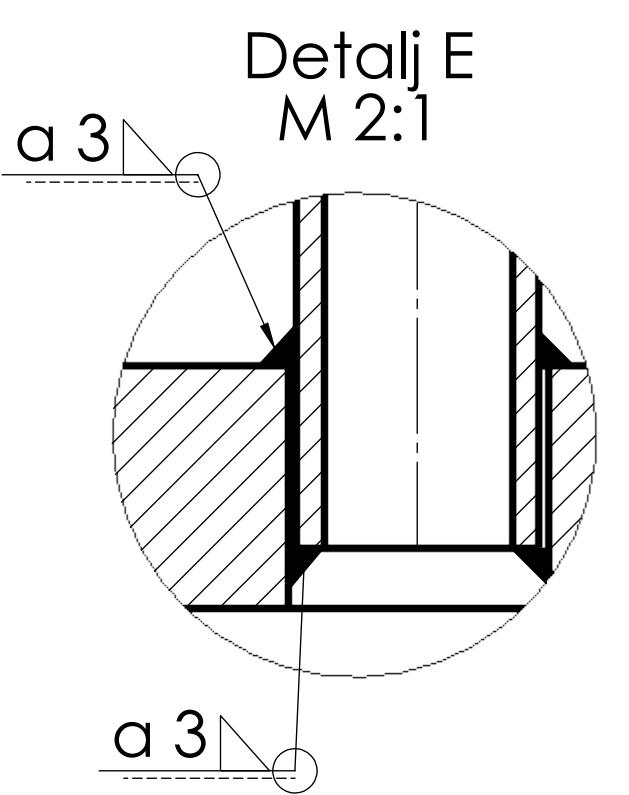
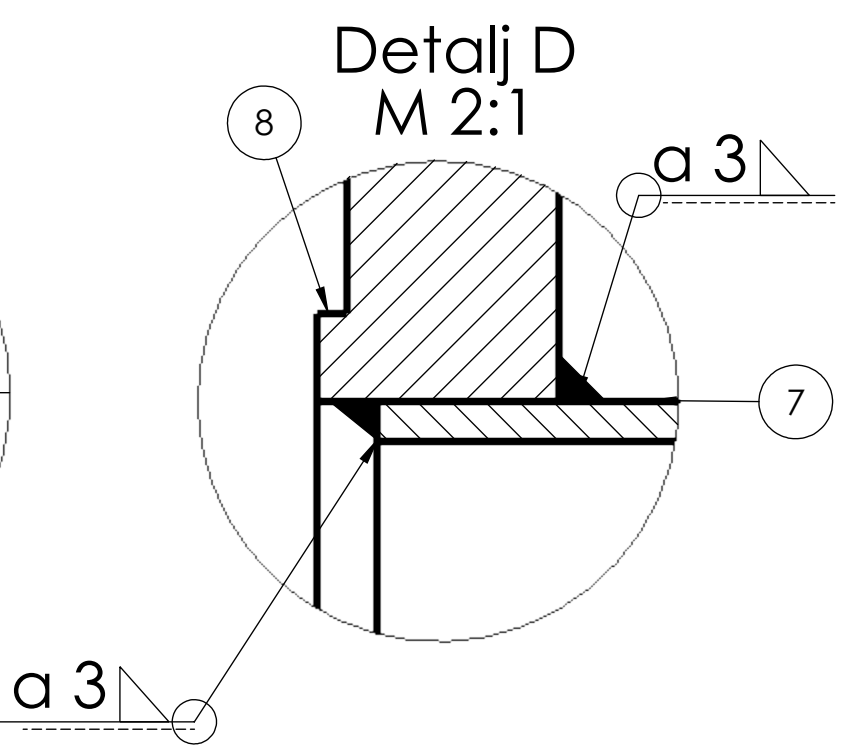
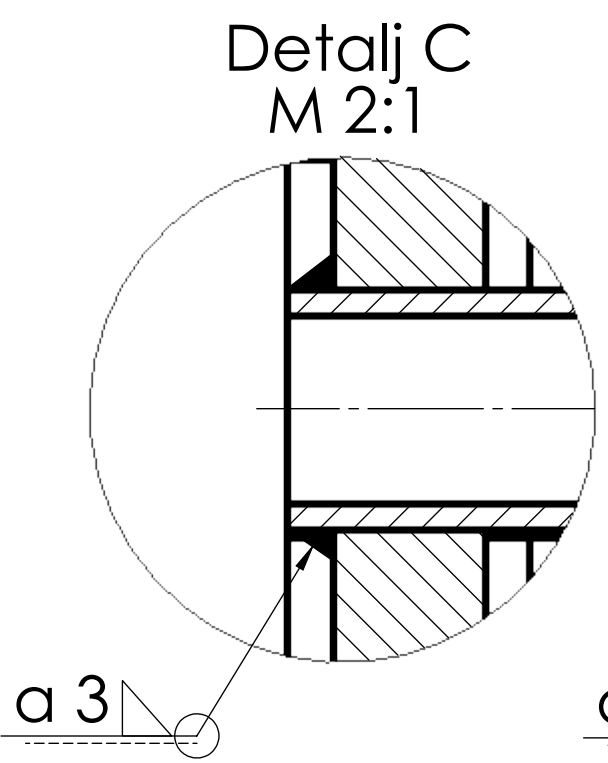
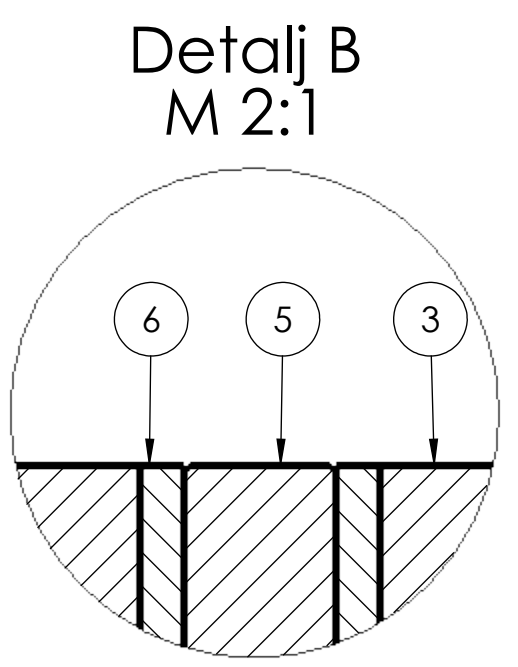
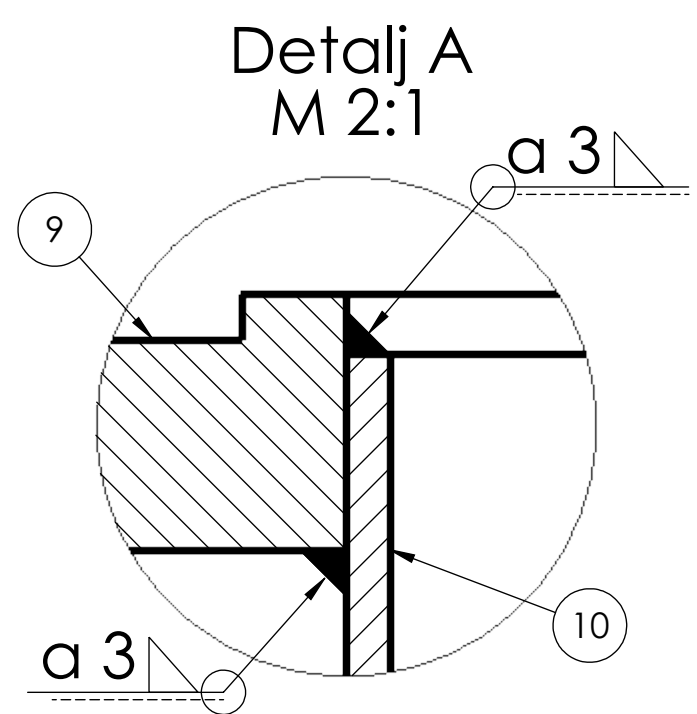
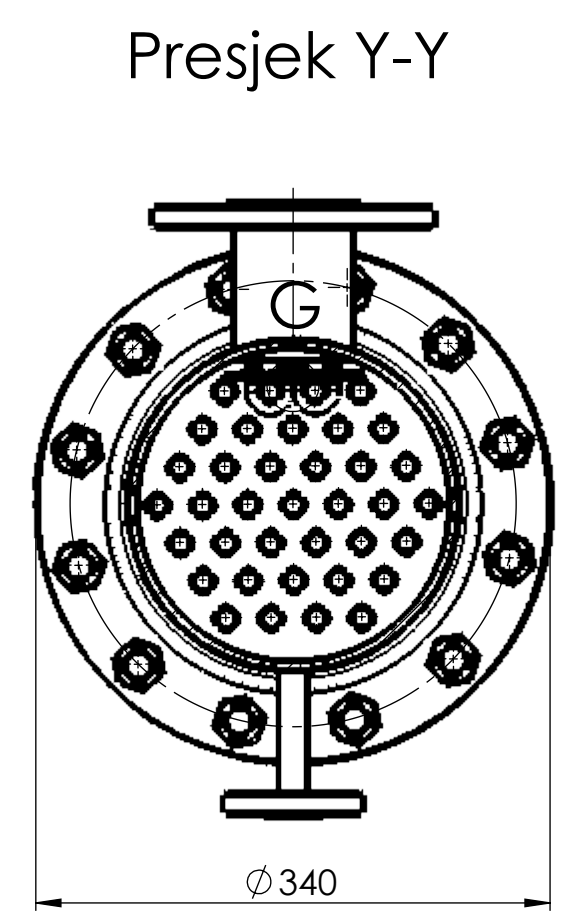
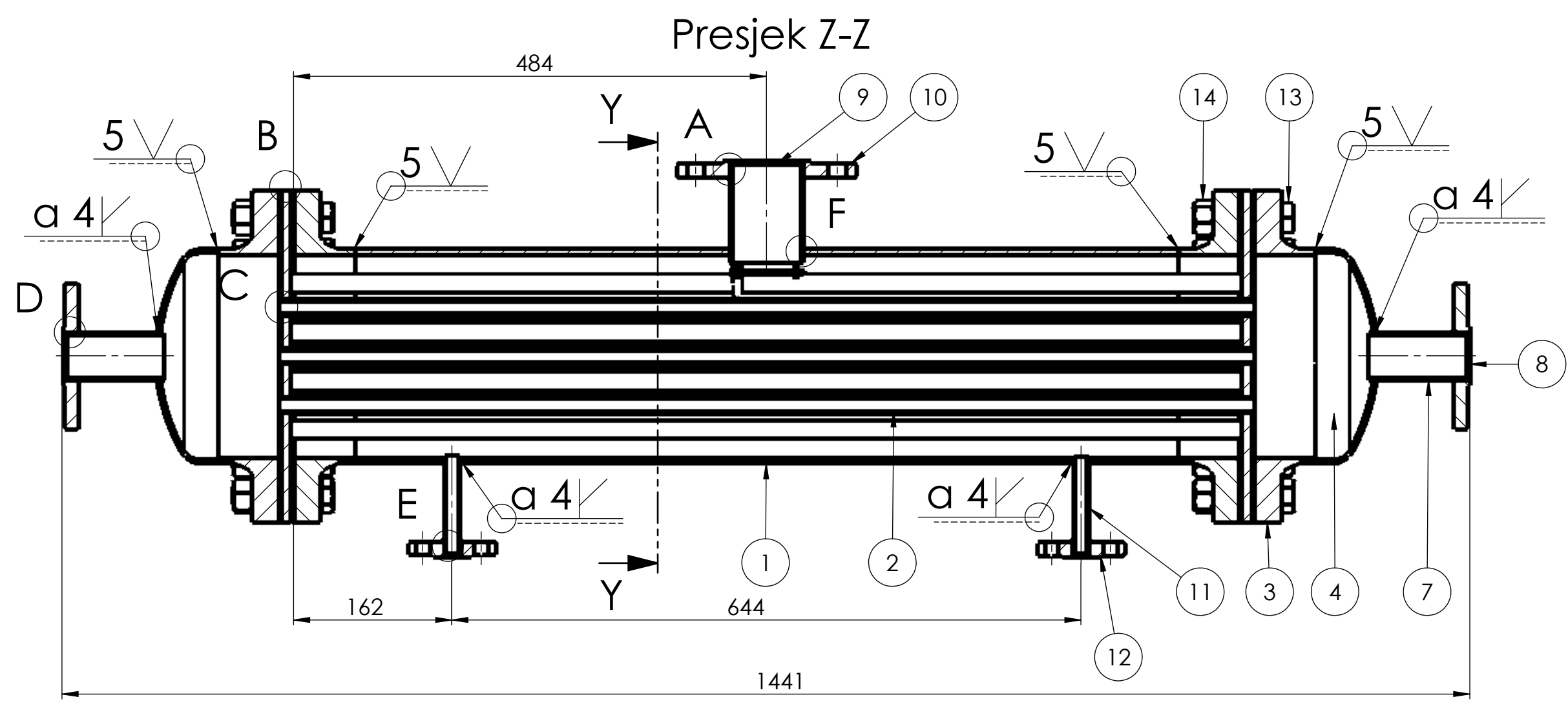
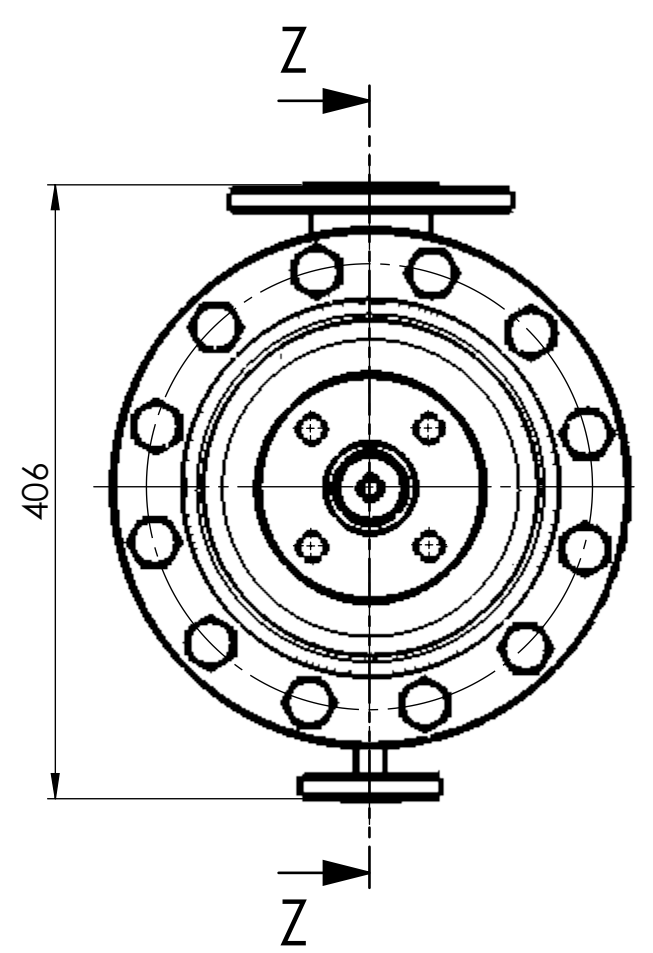
	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	01.02.2023	Goran Lončar	
Razradio	01.02.2023	Goran Lončar	
Crtao	01.02.2023	Goran Lončar	
Pregledao	06.02.2023	Nenad Ferdelji	



Objekt: **GL-2023**

Procesno energetski  
**ZAVRŠNI RAD**

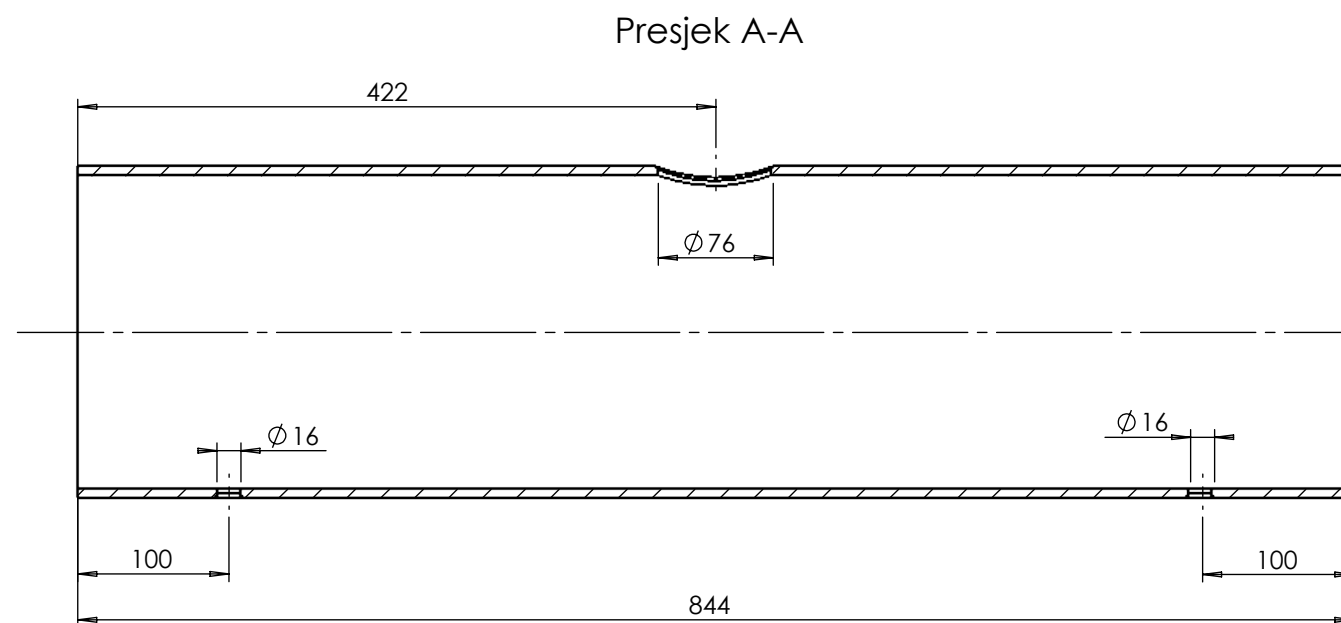
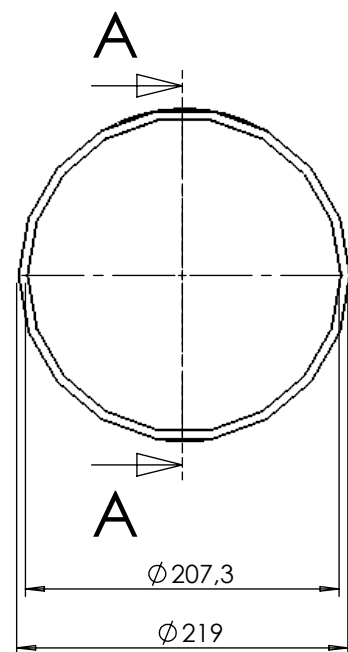




17	Matica-M6	8	DIN 24036	5	M6x2x4	
16	U vijak-M6	2	DIN 3570	5.6	M6x2x18	
15	Zaštitna ploča za paru	1	GL-2023-05	EN. 14310	76x93x3	
14	Matica-M20	24	DIN 4034	5	M20x3x20	
13	Vijak-M20	24	DIN 4016	5.6	M20x3x90	
12	Prirubnica-PN 16-DN 10	2	DIN 2543	EN. 14310	Ø 90x35	
11	Priključak za kondenzat-DN 10	2	DIN 2448	EN. 14310	Ø 16x100	
10	Prirubnica-PN 16-DN65	1	DIN 2543	EN. 14310	Ø 185x65	
9	Priključak za paru-DN 65	1	DIN 2448	EN. 14310	Ø 76,1x100	
8	Prirubnica-PN 10-DN 40	2	DIN 2576	EN. 14310	Ø 150x42	
7	Priključak za vodu-cijev DN 40	2	DIN 2448	EN. 14310	Ø 48,3x100	
6	Brtva	4	GL-2023-04	Klingerit	Ø 340x3	
5	Cijena stijena	2	GL-2023-03	EN. 14310	Ø 340x10	
4	Podnica s priključkom	2	GL-2023-02	EN. 14310	Ø 219,1x65	
3	Prirubnica-PN16-DN 200	4	DIN 2633	EN. 14310	Ø 340x70	
2	Cijevi-DN 10	37	DIN2448	EN. 14310	Ø 16x857	
1	Plast-cijev DN 200	1	GL-2023-01	EN. 14310	Ø 219,1x703	
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije	Masa
	Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis		
	Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar			
	Razradio	15.02.2023	Goran Lončar			
	Crtao	15.02.2023	Goran Lončar			
	Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji			

ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
		R. N. broj:			
Napomena:		Procesno energetska		Kopija	
Materijal:		Masa:		ZAVRŠNI RAD	
Mjerilo originala		Naziv:		Kondezator etanola	
M 1:5		Crtež broj:		GL-2023-00	
		Pozicija:		Format: A2	
				Listova: 1	
				List: 1	

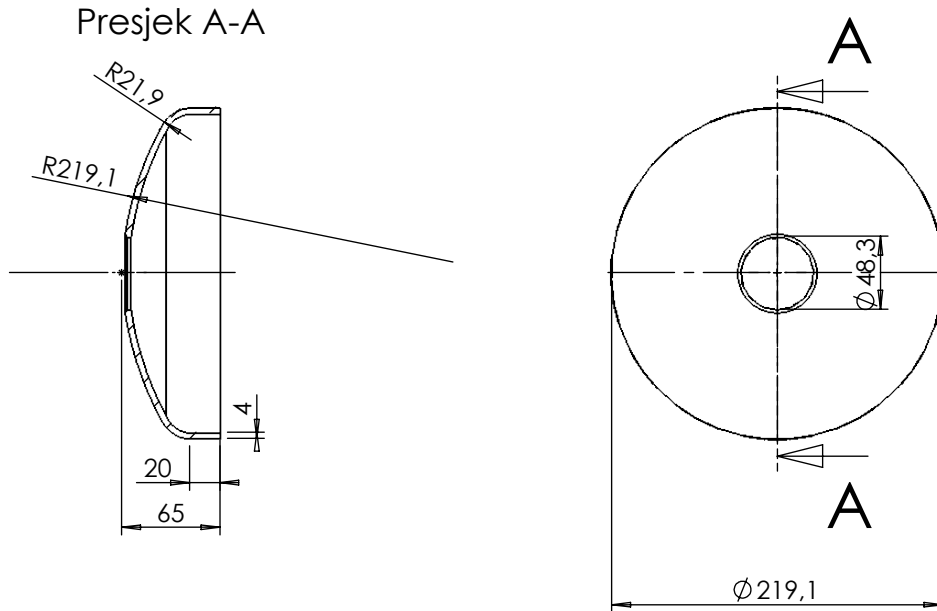




Utori za priključke imaju skošenja od 3 mm za zavare.

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar		
Razradio	15.02.2023	Goran Lončar		
Crtao	15.02.2023	Goran Lončar		
Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji		
Mentor				
Objekt:		Kondenzator etanola	Objekt broj: GL-2023-00	
			R. N. broj:	
Napomena:		Cijev DN 200	Procesno-energetski	Kopija
Materijal:		EN. 14310	Masa:	ZAVRŠNI RAD
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala		Plašt		1
M 1:5		Crtež broj:		GL-2023-01
				Format: A3
				Listova: 1
				List: 1

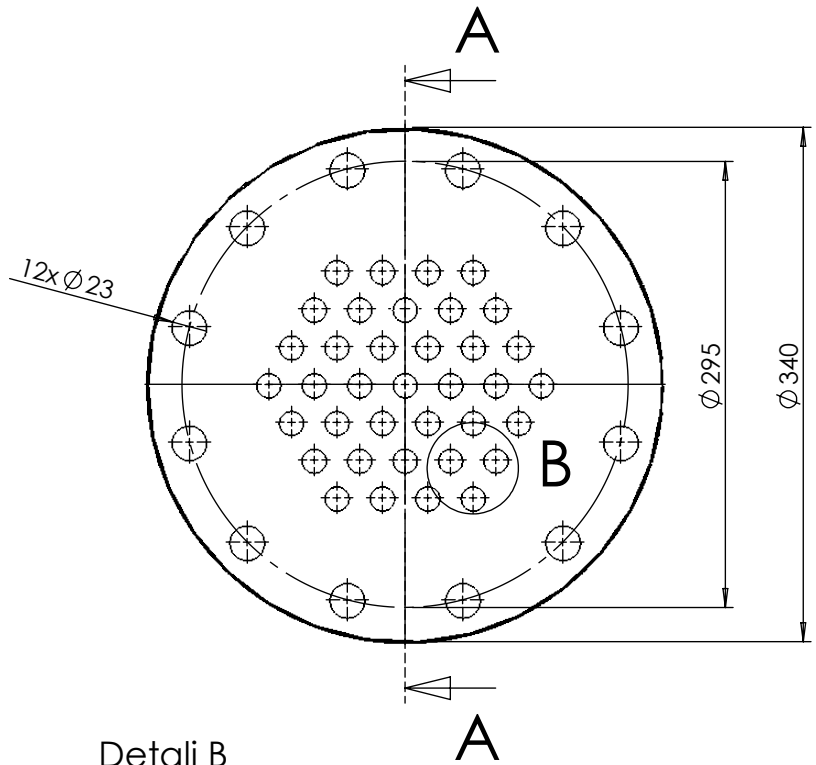
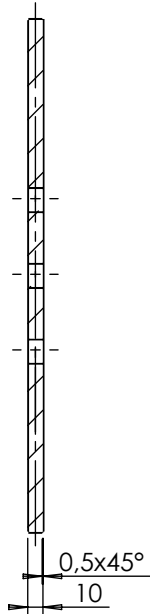




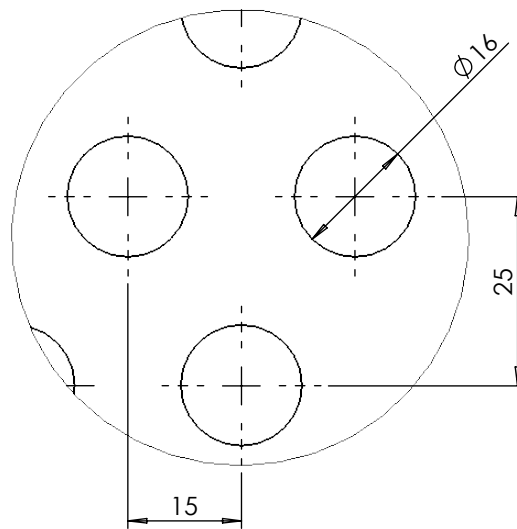
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar		
Razradio	15.02.2023	Goran Lončar		
Crtao	15.02.2023	Goran Lončar		
Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji		
Objekt: Kondenzator etanola			Objekt broj: GL-2023-00	
			R. N. broj:	
Napomena:			Procesno-energetski	Kopija
Materijal: EN. 14310	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: Podnica s priključkom		Pozicija: 4	
Crtež broj: GL-2023-02			Format: A4	Listova: 1
			List: 1	

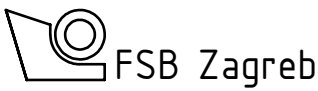

Design by CADLab

Presjek A-A

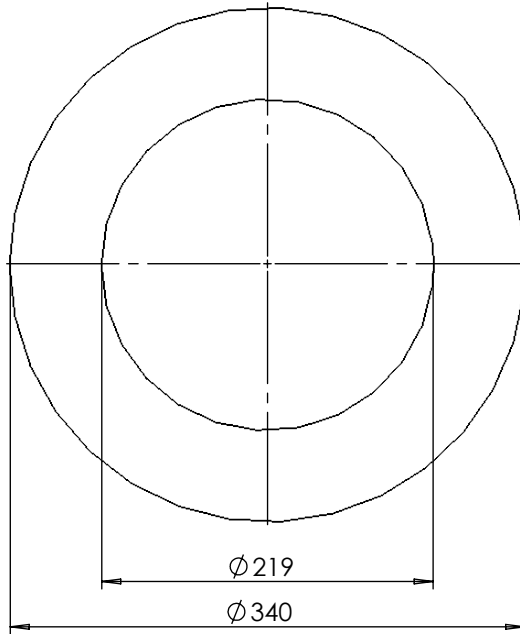


Detalj B  
M 1:1


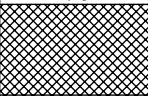
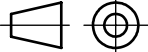


	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar		
Razradio	15.02.2023	Goran Lončar		
Crtao	15.02.2023	Goran Lončar		
Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji		
Objekt: Kondenzator etanola			Objekt broj: GL-2023-00	
			R. N. broj:	
Napomena: Procesno-energetski				Kopija
Materijal: EN. 14310	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 	Naziv: Cijevna stijena		Pozicija: 5	
Mjerilo originala M 1:5	Crtež broj: GL-2023-03		Listova: 1	
			List: 1	

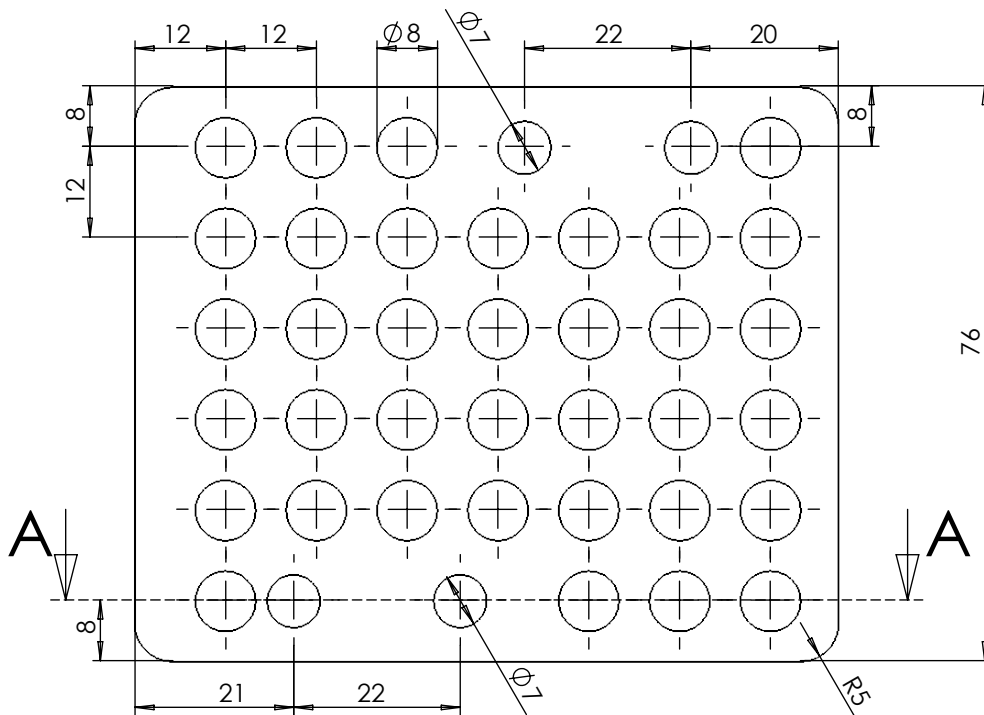
Design by CADLab



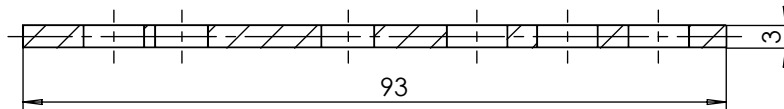
Debljina brtve je 3 mm


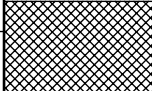
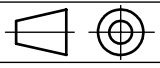
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>	
Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar			
Razradio	15.02.2023	Goran Lončar			
Crtao	15.02.2023	Goran Lončar			
Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji			
Objekt: Kondenztor etanola			Objekt broj: GL-2023-00		
			R. N. broj:		
Napomena:			Procesno-energestski	Kopija	
Materijal:	Klinterit	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: <b>Brtva</b>		Pozicija: <b>6</b>		Format: A4
Crtež broj: GL-2023-04					Listova: 1
				List: 1	

Design by CADLab



Presjek A-A



	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	15.02.2023	Goran Lončar		
Razradio	15.02.2023	Goran Lončar		
Crtao	15.02.2023	Goran Lončar		
Pregledao	16.02.2023	Nenad Ferdelji		
Objekt:		Kondenzator etanola		Objekt broj: GL-2023-00
				R. N. broj:
Napomena:			Procesno-energetski	Kopija
Materijal:	EN. 14310	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala M 1:1	Naziv:		Zaštitna ploča za paru	
Crtež broj:		GL-2023-05	Pozicija: 15	
				Format: A4
				Listova: 1
				List: 1

Design by CADLab