

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tomislav Stošić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Tomislav Stošić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru Prof. dr. sc. Damiru Doviću na pruženoj pomoći u izradi ovog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji koji su mi omogućili školovanje na potpori i razumijevanju tijekom cijelog studija te djevojci Tereziji na najvećoj podršci i motivaciji.

Tomislav Stošić



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: Tomislav Stošić JMBAG: 0035219820

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Filmski uparivač za proces prerade mlijeka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Falling film evaporator for dairy processing**

Opis zadatka:

Potrebno je konstruirati filmski uparivač koji se koristi u odabranom procesu prerade mlijeka. Uparivač je potrebno izvesti kao jednostupanjski s termokompresijom supare:

- kapacitet uređaja: 1100 kg/h ugušćenog soka
- pogonska energija: zasićena vodena para parametara prema izboru, električna energija 400 V/50 Hz

Potrebno je:

- odabrati i opisati proces obrade mlijeka te definirati njegove radne parametre
- izraditi analizu potrošnje energije po 1 kg proizvoda varirajući temperature uparivanja i količinu supare radi odabira parametara rada s najmanjom potrošnjom pogonske energije
- provesti izračun ukupnih troškova pogona za sve analizirane varijante
- provesti potpuni termodinamički proračun svih elemenata uređaja
- odrediti potrebne proračune čvrstoće filmskog uparivača
- izraditi radionički crtež filmskog uparivača
- izraditi shemu spajanja, automatske regulacije i upravljanja

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKE OSNOVE PROIZVODNJE UPARENOG MLIJEKA	3
2.1. Vrste uparivača u mliječnoj industriji	3
2.1.1. Cirkulacijski uparivač	3
2.1.2. Uparivači s padajućim filmom.....	4
2.1.2.1. Pločasti uparivač s padajućim filmom	4
2.1.2.2. Cijevni uparivač s padajućim filmom.....	5
2.2. Proizvodnja uparenog mlijeka	6
3. ANALIZA SUSTAVA UPARIVANJA	8
3.1. Određivanje bilancnih krugova uparivača	8
3.2. Određivanje temperature uparivanja	10
3.3. Proračun barometričkog kondenzatora	14
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN.....	16
4.1. Snaga uparivača	16
4.2. Prijelaz topline na unutrašnjoj stjenki cijevi	16
4.3. Prijelaz topline na vanjskoj stjenki cijevi	18
4.4. Površina uparivača	20
5. DIMENZIONIRANJE PRIKLJUČAKA	21
5.1. Dimenzioniranje priključaka za dovod i odvod pare	21
5.2. Dimenzioniranje priključaka za dovod i odvod mlijeka	22
5.3. Dimenzioniranje priključaka za odvod kondenzata	23
6. PRORAČUN ČVRSTOĆE.....	25
6.1. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka – norma M.E2.253.....	25
6.2. Proračun izreza u plaštu izloženom djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256.....	27
6.3. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju vanjskog tlaka prema normi M.E2.254.....	28
6.3.1. Tlak pri elastičnom ulubljivanju	28
6.3.2. Tlak pri plastičnom ulubljivanju	29
6.4. Proračun podnica izvrgnutih unutrašnjem tlaku prema normi M.E2.252.....	29
6.4.1. Potrebna debljina torusnog dijela podnice.....	30

6.4.2.	Potrebna debljina kalotnog dijela podnice	31
6.4.3.	Provjera na elastično ulubljenje	31
6.5.	Proračun podnica izvrgnutih vanjskom tlaku prema normi M.E2.252	31
6.6.	Proračun cijevne stijenke prema normi M.E2.259	32
6.6.1.	Potrebna debljina cijevne stijenke	32
6.6.2.	Provjera učvršćenja cijevi	33
6.6.3.	Kontrola na izvijanje	33
6.7.	Odabir brtve za prirubnički spoj	34
6.8.	Proračun vijaka prema normi M.E2.257	34
6.8.1.	Sile u kružnom vijčanom spoju s brtvom unutar kruga provrta	34
6.8.1.1.	Najmanja sila u vijcima za radno stanje	34
6.8.1.2.	Najmanja sila u vijcima za ispitno stanje	35
6.8.1.3.	Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje	35
6.8.2.	Proračun promjera vijaka	36
6.8.2.1.	Promjer vijaka za radno stanje	36
6.8.2.2.	Promjer vijaka za ispitno stanje	36
6.8.2.3.	Promjer vijaka za ugradbeno stanje	37
6.9.	Proračun ravne prirubnice prema normi M.E2.258	37
7.	ZAKLJUČAK	39
	LITERATURA	40
	PRILOZI	41

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Cirkulacijski uparivač [1].....	4
Slika 2.2	Pločasti uparivač [1].....	5
Slika 2.3	Cijevni uparivač [1].....	6
Slika 2.4	Shema proizvodnje nezaslađenog uparenog mlijeka [1].....	7
Slika 3.1	Bilanci krugovi uparivača [2].....	8
Slika 3.2	Shema barometričkog kondenzatora [2].....	14

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Povećanje temperature uparivanja.....	11
Tablica 3.2 Smanjenje temperature ogrjevne pare	13
Tablica 3.3 Optimizacija procesa	14
Tablica 3.4 Potrošnja rashladne vode	15

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

P00	Filmski uparivač
P01	Cijev
P02	Cijevna stjenka
P04	Ravna prirubnica gornja
P05	Podsklop gornje podnice
P06	Pregrada
P07	Ravna prirubnica donja
P09	Podsklop donje podnice
P18	Podsklop podnice separatora
P19	Distribucijska ploča
P21	Sekundarna distribucijska ploča
P99	Shema spajanja i regulacije

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline
ζ		Koeficijent lokalnog gubitka
η		Stupanj djelovanja kompresora
ϑ	°C	Temperatura
λ	W/mK	Koeficijent toplinske provodnosti
λ		Stupanj viskoznosti
μ	Pa · s	Dinamička viskoznost
ξ	kg _{suha tvar} /kg _{otopina}	Koncentracija suhe tvari
ρ	kg/m ³	Gustoća
Φ	W	Toplinski tok
A	m ²	Površina presjeka
b	mm	Debljina cijevne stjenke
c	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
c_1	m	Dodatak za dopušteno odstupanje materijala
c_2	m	Dodatak zbog smanjenja debljine
D_v	m	Vanjski promjer plašta
D_u	m	Unutrašnji promjer plašta
d_v	m	Vanjski promjer cijevi
d_u	m	Unutrašnji promjer cijevi
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
F_K	N	Dozvoljena sila izvijanja
F_{RB}	N	Sile u vijku
f_d	N/mm ²	Proračunska čvrstoća
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
g	m	Minimalna debljina šava
H	m	Visina
h	J/kg	Entalpija

h_F	m	Visina oboda prirubnice
k	W/m ² K	Koeficijent prolaza topline
L	m	Dužina
z		Broj cijevi
Nu		Nusseltov broj
p	Pa	Tlak
q_m	kg/s	Maseni protok
Q_v	m ³ /s	Volumni protok
R	m	Radijus kalote
r	m	Radijus torusnog dijela
Re		Reynoldsov broj
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja materijala
s	m	Debljina stjenka cijevi
S		Stupanj sigurnosti
s_A	m	Debljina stjenke oko izreza
$s_{plašt}$	m	Debljina stjenke plašta
S_K		Sigurnost na ulubljenje
T	K	Termodinamička temperatura
v		Koeficijent zavarenog spoja
v_A		Koeficijent izreza
w	m/s	Brzina strujanja

INDEKSI

r – ulaz

a – izlaz

g – ogrjevna para

rv – rashladna voda

k – kondenzat

SAŽETAK

Završni rad prikazuje konstrukciju cijevnog uparivača s padajućim filmom. Uređaj treba izvesti u jednom stupnju s mehaničkom termokompresijom supare. Analizira se potrošnja energije i potrebna ogrjevna površina uparivača. Određuju se optimalne temperature ogrjevnog medija (pare) i grijanog medija (mlijeka) u svrhu najmanjih pogonskih troškova. Proveden je termodinamički proračun i proračun čvrstoće. Rad sadrži radioničke crteže dijelova uparivača, sklopni crtež te shemu spajanja i regulacije.

Ključne riječi: uparivač mlijeka, filmski uparivač

SUMMARY

The final thesis presents the design of a tubular falling film evaporator. The device is designed to operate in a single stage with mechanical vapor recompression. Energy consumption and the required heating surface of the evaporator are analyzed. Optimal temperatures for the heating medium (steam) and the heated medium (milk) are determined to minimize operating costs. Thermodynamic calculation and strength calculation have been carried out. The work includes workshop drawings of the evaporator parts, an assembly drawing, and a piping and instrumentation diagram.

Key words: milk evaporator, falling film evaporator

1. UVOD

Uparivanje se može odvijati šaržno i kontinuirano. Šaržno uparivanje koristi se u kućanstvima, npr. pri kuhanju pekmeza, umaka od rajčice i slično. S druge strane, kontinuirano uparivanje se redovito koristi u industrijskim procesima. Cilj uparivanja može biti dobivanje čiste suhe tvari, otapala ili povećanje koncentracije suhe tvari u otopini. Postoje razna industrijska rješenja za uparivanje. Tako razlikujemo duplikator, Robertov uparivač, centrifugalni uparivač, tip Luwa, uparivač s padajućim i uspinjućim filmom, pločasti uparivač i druge. Najčešći ogrjevni medij je zasićena vodena para zbog velike specifične topline kondenzacije, visokog koeficijenta prijelaza topline, kemijske neutralnosti i niske potrošnje. Ogrjevni mediji mogu biti i električna energija, dimni plinovi, vrela kapljevina vode i pare drugih kapljevina.

Potrebno je konstruirati jednostupanjski filmski uparivač za preradu mlijeka u odabranom procesu prerade mlijeka. Odabran je proces proizvodnje nezaslađenog uparenog mlijeka (*eng. unsweetened evaporated milk*) što znači da se mlijeko uparuje sa koncentracije $\xi_r = 12,35\%$ na koncentraciju $\xi_a = 26\%$. Standardizirano mlijeko ulazi u uparivač, distribuira se ravnomjerno po unutarnjoj stijenci snopa cijevi smještenog u plaštu uparivača i prima toplinu koju odaje ogrjevna para koja prolazi kroz plašt uparivača i pritom kondenzira. Tako uparivač funkcionira kao izmjenjivač topline. Uslijed prijenosa topline, iz otopine isparuje otapalo koje se također naziva supara. Supara u sebi ne sadrži suhu tvar i u radu se poistovjećuje s vodenom parom. Radi uštede ogrjevne pare, dio supare koja je odvojena od proizvoda u separatoru prolazi kroz elektromotorom pogonjen mehanički turbokompresor (*eng. mechanical vapour recompression*) gdje se pregrijava i vraća u plašt uparivača, što znači da je svježa ogrjevna para potrebna za pogon isključivo za pokretanje procesa, a glavina potrošne energije je električna energija za pogon elektromotora. Kako bi se zaštitila organoleptička svojstva mlijeka, uparivanje se odvija u vakuumu pri sniženoj temperaturi u odnosu na uparivanje pri atmosferskom tlaku. Suparu koja se odvaja iz kruga treba kondenzirati u barometričkom kondenzatoru.

U 2. poglavlju opisani su postupci prerade mlijeka od sirovog mlijeka do konačnog proizvoda; uparenog mlijeka i mlijeka u prahu. Potom je u 3. poglavlju analiziran sustav uparivanja potrebnim energetskim i masenim bilancama, prikazan utjecaj temperature uparivanja na snagu mehaničkog turbokompresora i odabran proces s optimalnom potrošnjom energije. Nakon toga, u 4. poglavlju, uparivač je termodinamički proračunat pa je poznata potrebna ogrjevna površina i posljedično vrijeme zadržavanja otapala u izmjenjivaču koje ne smije prelaziti 100 sekundi

kako mlijeko ne bi zagaralo na donjem dijelu snopa cijevi gdje je film najtanji. Slijedi proračun čvrstoće gdje se u 5. poglavlju provjerava zadovoljava li uparivač zahtjeve pri radnom i ispitnom tlaku. Na kraju, u 6. poglavlju proračunat je pad tlaka kroz uparivač.

Materijal uparivača je nehrđajući čelik Č.4580 (DIN 1.4301 X5CrNi1810), dobrih mehaničkih svojstava, često korišten u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji zbog otpornosti na koroziju i djelovanje kiselina.

2. TEORIJSKE OSNOVE PROIZVODNJE UPARENOG MLIJEKA

Mlijeko i mliječne sirovine uparuju se s ciljem da bi se:

- snizila cijena sušenja
- inducirala kristalizacija
- reducirali troškovi pohrane i transporta
- povećala mikrobiološka i kemijska stabilnost.

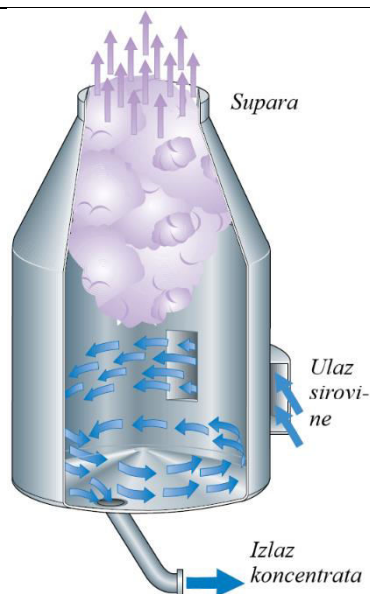
Uparivanje je nužno za proizvodnju uparenog mlijeka, zaslađenog kondenziranog mlijeka i koncentriranog jogurta. Također je važan korak u proizvodnji mliječnih proizvoda u prahu kao što su mlijeko i sirutka u prahu, a time i proteina sirutke te kazeina. Tada se uparuje do maksimalno postizive koncentracije od 40-50 % pri kojoj poluproizvod ima dovoljnu viskoznost za uspješno uparivanje. Kristalizacija pogoduje proizvodnji laktoze iz sirutke ili njenog permeata. Otopine koje se uparuju su punomasno ili obrano mlijeko i sirutka.

2.1. Vrste uparivača u mliječnoj industriji

U industriji prerade mlijeka i mliječnih proizvoda, konstrukcija uparivača dijeli se na cirkulacijske uparivače i uparivače s padajućim filmom koji mogu biti u pločastoj ili cijevnoj izvedbi. U idućim pasusima ukratko će se opisati njihove značajke i princip rada.

2.1.1. Cirkulacijski uparivač

Cirkulacijski uparivači koriste se kada je potreban nizak stupanj koncentracije, a protok ugušćenog proizvoda mali. Na primjer, kod proizvodnje jogurta, omjer između koncentracije suhe tvari ulaza i izlaza iznosi između 1,1 i 1,25. Temperatura predgrijanog mlijeka (obično u pločastom izmjenjivaču topline) na ulazu je 90°C. Otopina velikom brzinom ulazi u uparivač tangencijalno pri čemu se stvara tanki sloj na unutarnjoj stijenci uparivača. Dio otapala isparava i izlazi kroz gornji otvor na kondenzator. Kako se brzina po obodu smanjuje, djelomično ugušćen proizvod skuplja se na dnu i odlazi prema vakuum posudi pri čemu se odvajaju zrak i nekondenzirajući plinovi. Većina proizvoda recirkulira natrag u uparivač radi daljnjeg ugušćivanja pa je omjer protoka kroz vakuum posudu obično 4 do 5 puta veći u odnosu na protok ugušćenog proizvoda.



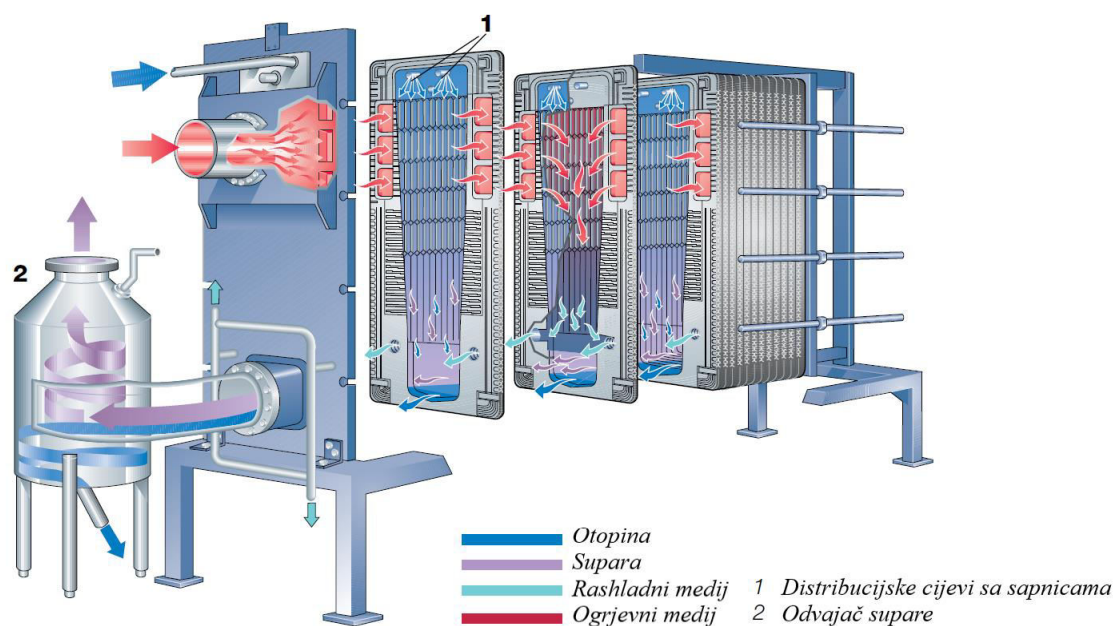
Slika 2.1 Cirkulacijski uparivač [1]

2.1.2. Uparivači s padajućim filmom

Uparivači s padajućim filmom najčešće su korišteni tipovi uparivača u mliječnoj industriji. Sirovina ulazi u uparivač s gornje strane, distribuira se u tankom sloju i gravitacijski otječe po ogrjevnoj površini. Ogrjevna površina može biti u obliku ploča ili cijevi od nehrđajućeg čelika. Ploče su spojene u paketu sa filmom na jednoj, a ogrjevnom parom na drugoj strani. Kod cijevne izvedbe, film se formira na unutrašnjosti cijevnog snopa okruženog parom. Sirovina je prethodno zagrijana pa iz predgrijača protiče u distribucijski sustav. Vakuum u uparivaču omogućuje željenu temperaturu uparivanja ispod 100 °C.

2.1.2.1. Pločasti uparivač s padajućim filmom

Na slici 2.2 prikazan je pločasti uparivač s padajućim filmom. Otopina se distribuira pomoću dvije cijevi koje prolaze kroz snop ploča. Za svaku ploču predviđena je sapnica koja distribuira otopinu u tankom filmu po ogrjevnoj površini. Cilj je da film bude jednake debljine po cijeloj duljini ploče kako bi se izbjeglo naglo isparivanje pri distribuciji. To se postiže suženjem oplošja ogrjevne površine pri otjecanju. Pošto se povećava udio supare tijekom uparivanja, potrebno je osigurati dovoljno prostora za njeno odvođenje da povećanje brzine i pada tlaka ne bi povećalo potrebnu površinu za uparivanje na željenu koncentraciju. Supara se od ugušćenog proizvoda odvaja u ciklonskom separatoru na izlazu iz uparivača. Vrijeme zadržavanja otopine u ovom tipu uparivača je kraće nego kod ostalih tipova, a temperaturni profil nizak, što je velika prednost zbog toplinske osjetljivosti mlijeka.

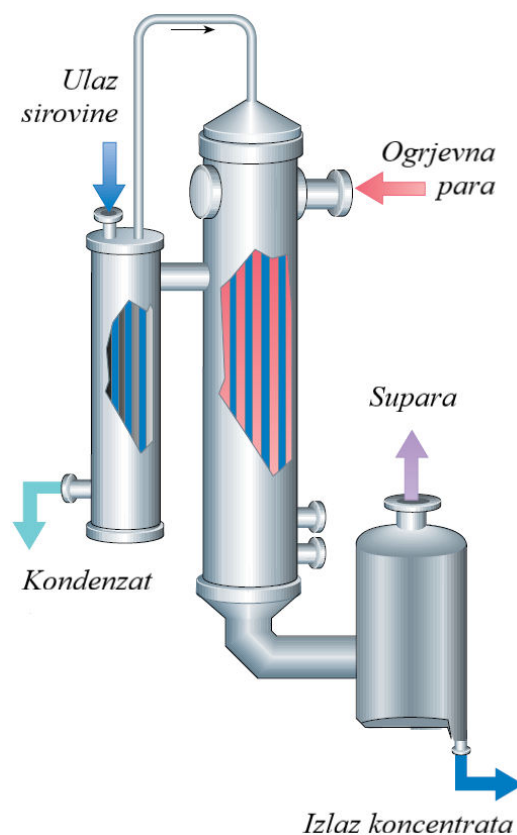


Slika 2.2 Pločasti uparivač [1]

2.1.2.2. Cijevni uparivač s padajućim filmom

Primjer cijevnog uparivača s padajućim filmom prikazan je na slici 2.3. Kako je već objašnjeno u uvodu, mlijeko se distribuira po unutarnjem obodu snopa cijevi okruženih parom. Velik izazov pri konstrukciji predstavlja zahtjev za ravnomjernom distribucijom otopine svakoj cijevi. Kada bi distribucija bila neravnomjerna, neke cijevi bi bile preopterećene, a neke ne bi imale svrhu pa bi potrebna površina bila puno veća, a usto bi iz svake cijevi izlazila otopina različite koncentracije. Postoji više tehničkih rješenja tog problema. Jedno od njih je postavljanje perforirane ploče konstruirane na način da se mlazovi kroz njih distribuiraju između cijevi. Još jedno rješenje koje se koristi u specijalnim slučajevima je proširenje cijevi na vrhu. Otopina se distribuira jednoliko tako što se mlijeko preljeva preko cijevi kada dosegne dovoljnu razinu. Separator supare može se nalaziti ispod kalandrije (dijela uparivača sa plaštom i snopom cijevi), što bi bila američka konfiguracija ili iznad (europska konfiguracija). Može

biti integriran uz kalandriju ili odvojen kao zasebna posuda. U radu će biti konstruiran ovakav tip uparivača.



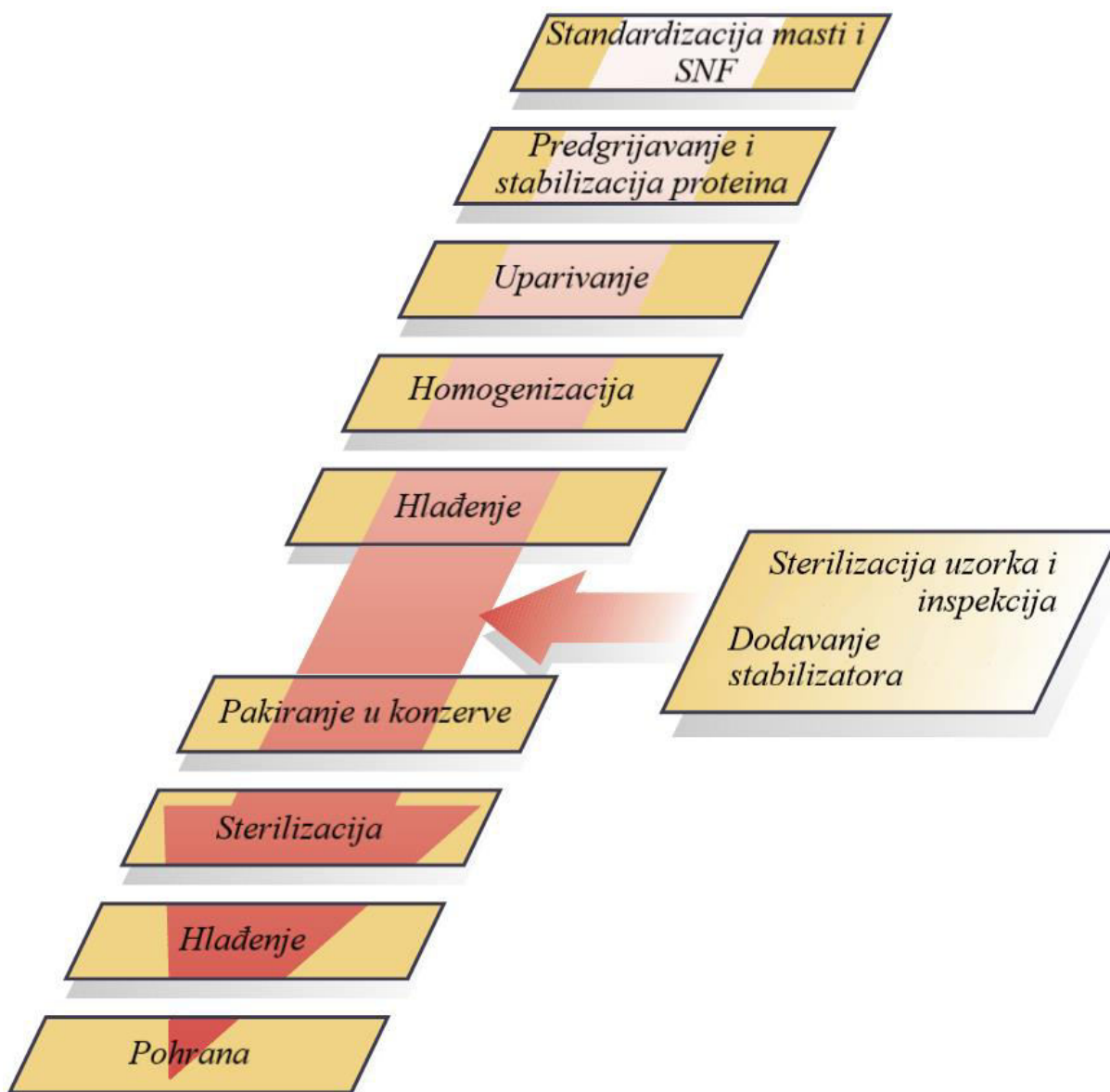
Slika 2.3 Cijevni uparivač [1]

2.2. Proizvodnja uparenog mlijeka

Sirovo mlijeko iz farme nema jedinstveni, već samo okvirni sastav. Zato prvo prolazi kroz standardizaciju gdje se postavlja željeni omjer mliječne masti i nemasne suhe tvari (*SNF, eng. solids-non-fat*). Upareno mlijeko ima 8% mliječne masti i 18% nemasne suhe tvari pa je takav i omjer u standardiziranom mlijeku; 8:18. Da bi se uništili mikro-organizmi i poboljšala koagulacijska stabilnost, mlijeko prolazi kroz intenzivno toplinsko tretiranje. U pločastom ili cijevnom izmjenjivaču topline mlijeko se zagrijava na 100-120 °C i zadržava jednu do tri minute, nakon čega se hladi na oko 70 °C i takvo ulazi u uparivač.

Uparivanje se odvija na temperaturi između 65 i 70 °C. Uparivanje na višoj temperaturi nije dozvoljeno radi opasnosti od zagaranja, a temperatura ispod 65 °C pogodna je za razmnožavanje spora i bakterija što se želi izbjeći. Nakon uparivanja na $\xi_a = 26\%$, koncentrirano mlijeko se homogenizira u homogenizatoru na tlaku 125-250 bar. Cilj je raspršiti čestice mliječne masti i spriječiti njihovo sjedinjenje pri sterilizaciji. Mlijeko se zatim hladi na oko 14 °C ako se odmah pakira ili 5-8 °C ako se pohranjuje radi sterilizacije uzorka. Dodaju se

stabilizatori ukoliko je potrebno i provjerava sadržaj suhe tvari. Slijedi pakiranje mlijeka u konzerve, sterilizacija na 110-120 °C u trajanju 15-20 minuta, hlade i pohranjuju. Na temperaturi ispod 15 °C upareno mlijeko je gotovo trajno, a kvaliteta konačnog proizvoda se ispituje 10-14 dana nakon pohrane. Slika 2.4 prikazuje shemu proizvodnje nezaslađenog uparenog mlijeka.



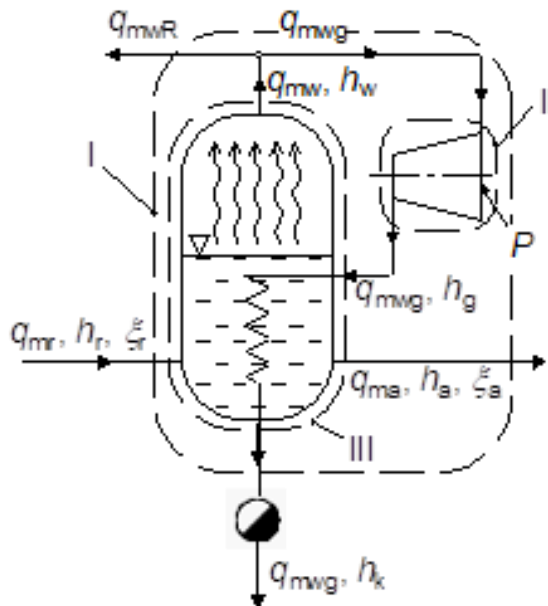
Slika 2.4 Shema proizvodnje nezaslađenog uparenog mlijeka [1]

3. ANALIZA SUSTAVA UPARIVANJA

U radu će se analizirati i konstruirati jednostupanjski cijevni uparivač s padajućim filmom. Postupak uparivanja opisan je u uvodu, a uparivač opisan u odjeljku 2.1.2. Prije ulaska u uparivač svježe mlijeko se predgrijava u pločastom izmjenjivaču topline na temperaturu zasićenja ϑ_r . Nakon izmjenjivača mlijeko prolazi kroz redukcijski ventil i prigušuje se s atmosferskog tlaka na tlak zasićenja p_r . Potom se mlijeko distribuira ravnomjerno po cijevima i prima toplinu od pregrijevane ogrjevne pare temperature ϑ_{gs} na tlaku p_g . Suhozasićena para na tom tlaku je na temperaturi ϑ_d . Ogrjevna para kondenzira u uparivaču predajući latentnu toplinu mlijeku te izlazi iz uparivača kao vrela kapljevina. uparivanje traje do koncentracije $\xi_a = 26\%$. Dio supare odvaja se u barometrički kondenzator, a dio odvodi u mehanički kompresor gdje komprimira na tlak i temperaturu ogrjevne pare i služi kao ogrjevni medij za uparivanje.

3.1. Određivanje bilancnih krugova uparivača

Na početku proračuna potrebno je odrediti zamišljene granice sustava, to jest bilancne krugove potrebne za dobivanje odgovarajućih jednadžbi s kojima će se računati potrebni maseni i energetski tokovi. Bilancni krugovi ilustrirani su na slici 3.1 gdje su:



Slika 3.1 Bilancni krugovi uparivača [2]

Protoci:

$q_{m,r}$ – protok svježeg mlijeka

$q_{m,a}$ – protok uparenog mlijeka

$q_{m,w}$ – protok supare

$q_{m,wR}$ – protok supare koja se izbacuje

$q_{m,wg}$ – protok ogrjevnice pare

Koncentracije:

ξ_r – koncentracija svježeg mlijeka

ξ_a – koncentracija uparenog mlijeka

Entalpije:

h_r – entalpija svježeg mlijeka

h_a – entalpija uparenog mlijeka

h_w – entalpija supare

h_g – entalpija ogrjevnice pare

h_k – entalpija kondenzata ogrjevnice pare

Bilanci krug III – bilanca ukupnog masenog toka (3.1) i suhe tvari (3.2):

$$q_{m,r} = q_{m,w} + q_{m,a} \quad (3.1)$$

$$q_{m,r} \cdot \xi_r = q_{m,a} \cdot \xi_a \quad (3.2)$$

Bilanci krug II – bilanca snage kompresora (3.3):

$$P = q_{m,w} \cdot (h_g - h_w) \quad (3.3)$$

Bilanci krug I – bilanca energije (3.4):

$$q_{m,r} \cdot h_r = q_{m,wR} \cdot h_w + q_{m,wg} \cdot h_k + q_{m,a} \cdot h_a \quad (3.4)$$

Protok supare koja izlazi iz uparivača jednak je zbroju protoka supare za kompresor i viška koji se izbacuje:

$$q_{m,w} = q_{m,wg} + q_{m,wR} \quad (3.5)$$

U zadatku su zadane masene koncentracije ulaza i izlaza te maseni protok na izlazu:

$$\frac{\xi_r}{\xi_a} = \frac{0,1235}{0,26}$$

$$q_{m,a} = 1100 \frac{kg}{h}$$

koji uvršteni u jednadžbu (3.2) daju iznos masenog protoka na ulazu, a jednadžba (3.1) daje protok supare.

$$q_{m,r} = 2315,79 \frac{kg}{h}$$

$$q_{m,w} = 1215,79 \frac{kg}{h}$$

3.2. Određivanje temperature uparivanja

Temperatura na izlazu iz predgrijača, odnosno ulazu u uparivač fiksna je i iznosi:

$$\vartheta_r = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izraz za specifični toplinski kapacitet svježeg mlijeka izračunat je prema [3]:

$$c_{p,r} = 0,002814 \cdot \vartheta_r + 3,824 = 4,00691 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \quad (3.6)$$

Specifični toplinski kapacitet uparenog mlijeka računat će se za ϑ_a prema [4]:

$$c_{p,a} = (1,4017 + 1,1 \times 10^{-3} \cdot \vartheta_a - 5,9399 \times 10^{-6} \cdot \vartheta_a^2)/1000 \quad (3.7)$$

Slijede izrazi potrebni za računanje entalpija mlijeka na ulazu i izlazu te supare:

$$h_r = c_{p,r} \cdot \vartheta_r \quad (3.8)$$

$$h_a = c_{p,a} \cdot \vartheta_a \quad (3.9)$$

Temperaturna depresija $\Delta\vartheta$, odnosno temperatura pregrijanja mlijeka, pošto se uparivanje odvija na temperaturi većoj od temperature zasićenja otopine, kod mlijeka iznosi 1 °C.

Entalpija supare h_w dobivena je pomoću dodatka *COOLPROP* za *Excel* te će varirati ovisno o temperaturi uparivanja i temperaturi ogrjevne pare.

Entalpija kondenzata ogrjevne pare računa se kao:

$$h_k = c_{p,k} \cdot \vartheta_r \quad (3.10)$$

Preostalo je provjeriti temperaturu pregrijane pare ϑ_{g_s} . Tlak p_r određen je temperaturom zasićenja otopine ($\vartheta_a - \Delta\vartheta$), a p_g temperaturom zasićenja supare ϑ_g . U analizi se koristila entropija kao pomoćna veličina kako bi se dobila entalpija $h_{g,iz}$ kada bi kompresija bila izentropska. Navedene veličine računate su pomoću *Excel* dodatka *COOLPROP*, a mogu se naći i u toplinskim tablicama ili Mollierovom dijagramu za vodenu paru. Pretpostavljen je izentropski koeficijent $\eta_{iz} = 0,9$ iz čega slijedi:

$$\Delta h = \frac{h_{g,iz} - h_w}{\eta_{iz}} \quad (3.11)$$

$$h_g = h_w + \Delta h \quad (3.12)$$

ϑ_{g_s} se zatim jednostavno određuje iz h_g i p_g .

U inicijalnom proračunu odabrane su okvirne temperature uparivanja tipične za uparivanje mlijeka. Zatim su temperature varirane kako bi se otkrio utjecaj na potrošnju energije i potrebnu ogrjevnu površinu uparivača. Treba naglasiti kako je površina izračunata za iskustveni

koeficijent prijenosa topline, $k_v = 2 \frac{kW}{m^2K}$. Taj će se koeficijent detaljno računati u idućem poglavlju. Tablica 3.1. prikazuje utjecaj temperature uparivanja:

	REFERENTNI SLUČAJ	POVEĆANJE TEMPERATURE UPARIVANJA		
ϑ_a	70	72	75	°C
h_a	164.8755	169.5862	176.6523	kJ/kg
h_w	2624.385	2627.805	2632.909	kJ/kg
ϑ_g	78	78	78	°C
p_r	29875.98	32575.22	37008.87	Pa
s_w	7.768889	7.739222	7.695547	kJ/(kgK)
p_g	43702.97	43702.97	43702.97	Pa
$h_{g,iz}$	2686.87	2675.828	2659.873	kJ/kg
Δh	69.42784	53.35892	29.95983	kJ/kg
h_g	2693.812	2681.164	2662.868	kJ/kg
ϑ_{gs}	105.40	98.95	89.66	°C
$c_{p,k}$	4.195408	4.195408	4.195408	kJ/kgK
h_k	327.2418	327.2418	327.2418	kJ/kg
q_{mw}	1215.789	1215.789	1215.789	kg/h
q_{mwg}	1170.012	1180.267	1195.497	kg/h
q_{mwR}	45.77714	35.52226	20.29243	kg/h
P	23.44712	17.49383	9.949136	kW
φ_g	769.1436	771.738	775.6208	kW
A_g	37.34252	42.62143	56.86607	m ²

Tablica 3.1 Povećanje temperature uparivanja

Povećanje temperature uparivanja povoljno utječe na smanjenje pogonskih troškova kompresora. Razlog leži u tome da je tlak p_r izravna posljedica temperature uparivanja. Povećanjem temperature uparivanja, povećava se i tlak, a tlak ogrjevne pare ostaje

nepromijenjen. Tako je kompresijski omjer mehaničkog kompresora manji. Dakako, potreban je veći protok supare kroz kompresor što ne utječe toliko bitno na snagu kompresora. Pritom je potrebno manje supare odvoditi na kondenzator, što je također poželjno. Proces je naj način teorijski moguće optimizirati dokle god ima supare na raspolaganju, a u praksi dokle se poštuje dovoljna temperaturna razlika. S druge strane, za uparivanje pri višem tlaku potreban je veći toplinski tok. Uz to, manja temperaturna razlika rezultirat će većom potrebnom ogrjevnom površinom uparivača.

Tablica 3.2. prikazuje utjecaj temperature ogrjevne pare:

	REFERENTNI SLUČAJ	SMANJENJE TEMPERATURE OGRJEVNE PARE		
ϑ_a	70	70	70	°C
h_a	164.8755	164.8755	164.8755	kJ/kg
h_w	2624.385	2624.385	2624.385	kJ/kg
ϑ_g	78	76	74	°C
p_r	29875.98	29875.98	29875.98	Pa
s_w	7.768889	7.768889	7.768889	kJ/(kgK)
p_g	43702.97	40238.84	37008.87	Pa
$h_{g,iz}$	2686.87	2672.809	2658.846	kJ/kg
Δh	69.42784	53.8044	38.29046	kJ/kg
h_g	2693.812	2678.189	2662.675	kJ/kg
ϑ_{gs}	105.3981	97.19951	89.058	°C
$c_{p,k}$	4.195408	4.194013	4.192684	kJ/kgK
h_k	327.2418	318.745	310.2586	kJ/kg
q_{mw}	1215.789	1215.789	1215.789	kg/h
q_{mwg}	1170.012	1173.546	1177.052	kg/h
q_{mwR}	45.77714	42.24317	38.73733	kg/h
P	23.44712	17.53943	12.51941	kW
φ_g	769.1436	769.1436	769.1436	kW

A_g	37.34252	46.62055	62.37218	m ²
----------------------	----------	----------	----------	----------------

Tablica 3.2 Smanjenje temperature ogrjevnice pare

Smanjenje temperature ogrjevnice pare ima slične posljedice za sustav uparivanja. U ovom se slučaju smanjuje tlak ogrjevnice pare, kompresijski omjer, a time i potrebna snaga kompresora. Ovdje se potrebni toplinski tok ne mijenja, ali je svejedno potrebna veća ogrjevna površina iz istog razloga kao u prošlom slučaju.

U dodatku za *Excel*, *Solveru*, optimiziran je proces uparivanja za slučaj minimalne snage kompresora i minimalne ogrjevne površine. Pritom su zadani rubni uvjeti temperature uparenog mlijeka između 66 i 75 °C i temperature suhozasićene pare pri tlaku pregrijane pare 70 i 80 °C. Cilj je i smanjiti temperaturu pregrijane pare koja ulazi u uparivač radi opasnosti od zagaranja pa je dodatni uvjet za slučaj minimalne ogrjevne površine da temperatura pregrijane pare bude manja od one u referentnom slučaju. Dodatni uvjet za slučaj minimalne snage kompresora je najmanja temperaturna razlika između uparenog mlijeka i suhozasićene pare od 4 °C s ciljem osiguranja prijenosa topline. U daljnjem proračunu će se koristiti podaci iz stupca za P_{min} prikazanog u Tablici 3.3.

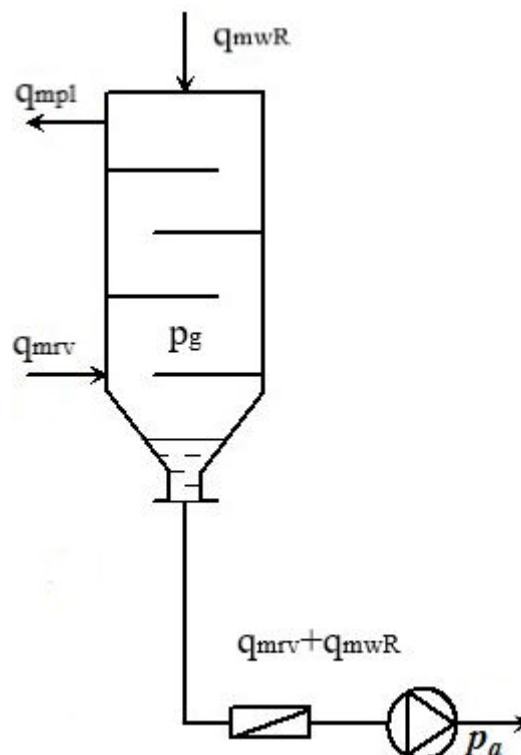
	A_{g,min}	P_{min}	
ϑ_a	71.78104	73.78051	°C
h_a	169.0705	173.78	kJ/kg
h_w	2627.431	2630.838	kJ/kg
ϑ_g	79.41499	77.78064	°C
p_r	32270.02	35148.87	Pa
s_w	7.742448	7.713182	kJ/(kgK)
p_g	46302.44	43311.19	Pa
h_{g,iz}	2686.889	2664.77	kJ/kg
Δh	66.06416	37.70287	kJ/kg
h_g	2693.495	2668.541	kJ/kg
ϑ_{gs}	105.3939	92.50509	°C
c_{p,k}	4.196436	4.195252	kJ/kgK
h_k	333.2599	326.3094	kJ/kg

q_{mw}	1215.789	1215.789	kg/h
q_{mwg}	1176.677	1189.702	kg/h
q_{mwR}	39.11222	26.08739	kg/h
P	21.59339	12.45977	kW
φ_g	771.4542	774.0437	kW
A_g	36.15854	51.20047	m ²

Tablica 3.3 Optimizacija procesa

3.3. Proračun barometričkog kondenzatora

Na slici 3.2 nalazi se shema barometričkog kondenzatora. Supara koja nije potrebna za vođenje procesa mora se zbrinuti na odgovarajući način zbog mogućeg štetnog utjecaja na okoliš. To će se postići kondenzacijom u barometričkom kondenzatoru na način da se supara miješa s rashladnom vodom i kondenzira do stanja vrele kapljevine. Rashladna voda je na temperaturi $\vartheta_{rv} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 3.2 Shema barometričkog kondenzatora [2]

Maseni protok nekondenzirajućih plinova $q_{m,pl}$ je u odnosu na ostale protoke zanemariva. Energijska bilanca barometričkog kondenzatora glasi:

$$q_{m,wR} \cdot h_w + q_{m,rv} \cdot h_{rv} = (q_{m,wR} + q_{m,rv}) \cdot h_{kw} \quad (3.13)$$

U Tablici 3.2 prikazana je potreba za rashladnom vodom za svaki analizirani slučaj.

	(kg/h) q_{mr}
REF	473.3752
Tablica 3.1	353.4325
	190.9973
Tablica 3.2	436.8246
	400.5661
Tablica 3.3	390.7775
	251.0641

Tablica 3.4 Potrošnja rashladne vode

U slučaju P_{min} vidljivo je da je potrebno najmanje rashladne vode za barometrički kondenzator. Troškovi električne energije i rashladne vode jedini su u procesu. Postoji i trošak svježe pare za pokretanje procesa, ali je u ovom radu zanemaren.

4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

Prema preporuci [5] za isparivačke cijevi odabrane su inox šavne cijevi $\phi 38 \times 2,6$ mm.

- vanjski promjer cijevi: $d_v = 38$ mm
- debljina stijenke cijevi: $s = 2,6$ mm
- unutarnji promjer cijevi: $d_v = d_v - 2 \cdot s = 32,8$ mm
- toplinska provodnost cijevi [6]: $\lambda_{inox} = 17 \frac{W}{m \cdot K}$

Prema [7], preporučena duljina cijevi je 3,5-12 m. U proračunu će se nakon određivanja koeficijenta prolaza topline odabrati broj cijevi dovoljan za uspješnu izmjenu topline.

4.1. Snaga uparivača

Snaga uparivača definirana je razlikom entalpije ogrjevnice pare na ulazu i njenog kondenzata na izlazu iz uparivača:

$$\Phi_g = q_{m,wg} \cdot (h_g - h_k) \quad (4.1)$$

$$\Phi_g = 774,044 \text{ kW}$$

4.2. Prijelaz topline na unutrašnjoj stjenki cijevi

Prije proračuna koeficijenta prijelaza topline na strani mlijeka potrebno je odrediti svojstva otopine na ulazu i izlazu s ogrjevnih površina.

Gustoća mlijeka na ulazu [8]:

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (4.2)$$

gdje indeks i označava komponente mlijeka (proteini, masti, ugljikohidrati, voda, minerali).

$$\rho_i = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 \quad (4.3)$$

koeficijenti b_0 , b_1 , b_2 mogu se pronaći u navedenoj literaturi.

$$\rho_r = 1022,33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Gustoća mlijeka na izlazu računa se po istom postupku iz [8]:

$$\rho_r = 1047,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Koeficijent toplinske provodnosti mlijeka na ulazu [9]:

$$\lambda = (326,58 + 1,0412T - 3,37 \times 10^{-3}T^2)(4,6 \times 10^{-1} + 5,4 \times 10^{-1}x_w)1,73 \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

$$\lambda_r = 0,6136 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Koeficijent toplinske provodnosti mlijeka na izlazu prema istoj formuli:

$$\lambda_a = 0,5726 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Dinamička viskoznost mlijeka na ulazu [10]:

$$\mu = (0,9565 - 1,3004 \times 10^{-3}T + 1,9580 \times 10^{-4}T^2) + x_{fat}(0,4766 - 1,144 \times 10^{-2} + 7,2642 \times 10^{-5}T^2) \quad (4.5)$$

$$\mu_r = 0,001693 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Dinamička viskoznost mlijeka na izlazu [11]:

$$\mu = 1000\mu_w \cdot e^{\left(\frac{\sum A_i x_i}{x_w}\right)} \quad (4.6)$$

$$A_{fat} = 3,46 - 0,025T + 1,6 \times 10^{-4}T^2 \quad (4.7)$$

$$A_{proteins} = 15,367 - 0,175T + 0,0017T^2 \quad (4.8)$$

$$A_{lactose} = 3,35 - 0,025T + 1,6 \times 10^{-4}T^2 \quad (4.9)$$

$$\mu_a = 0,00072 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

U proračunu će se koristiti srednje vrijednosti svojstava otopine:

$$c_{p,o} = \frac{c_{p,r} + c_{p,a}}{2} = 3,1832 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_o = \frac{\rho_r + \rho_a}{2} = 1034,77 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\lambda_o = \frac{\lambda_r + \lambda_a}{2} = 0,5931 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\mu_o = \frac{\mu_r + \mu_a}{2} = 0,00188 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Također su potrebne vrijednosti gustoća supare i njenog kondenzata:

$$\rho_l = 975,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_v = 0,231 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Prosječna brzina mlijeka u cijevi:

$$\omega_0 = \frac{q_{mr}}{\rho_0 \cdot d_u^2 \pi \cdot z} = 0,00135 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.10)$$

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{c_{p,o} \cdot \mu_o}{\lambda_o} = 10,1053 \quad (4.11)$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_0 \cdot d_u \cdot w_0}{\mu_o} = 24,3791 \quad (4.12)$$

Nusseltov broj [5]:

$$Nu = \sqrt{\left(0,9 \cdot Re^{-\frac{1}{3}}\right)^2 + \left(0,00622 Re^{0,4} \cdot Pr^{0,65}\right)^2} = 0,3262 \quad (4.13)$$

Koeficijent prijelaza topline prema [5]:

$$\alpha_u = \frac{\lambda_o \cdot Nu}{\left(\frac{\mu_o}{\rho_o} \cdot \frac{1}{g}\right)^{\frac{1}{3}}} = 2778,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.14)$$

Kako ne bi došlo do zagaranja mlijeka na stjenki cijevi, moramo kontrolirati debljinu filma s i vrijeme zadržavanja t [12]:

$$s = \left(\frac{3 \cdot q_{mr}}{z \cdot \pi \cdot d_u \cdot \mu_o}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,29 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Dopušteno vrijeme zadržavanja [13] iznosi 5-100 s:

$$t = \frac{s \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{q_{mr}} = 29,54 \text{ s} \quad (4.16)$$

Vrijeme zadržavanja zadovoljava uvjet.

4.3. Prijelaz topline na vanjskoj stjenki cijevi

Potrebno je odrediti svojstva ogrjevne pare i njenog kondenzata. Para ulazi u uparivač u pregrijanom stanju na temperaturi $\vartheta_{gs} = 92,51 \text{ }^\circ\text{C}$, a u proračunu će se računati svojstva za suhozasićenu paru i vrelu kapljevino pri istom tlaku i temperaturi $\vartheta_g = 77,78 \text{ }^\circ\text{C}$. Time se ide na stranu sigurnosti, a cijevi su svejedno orošene vrelom kapljevino, tako da će koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi biti dovoljno točan za dimenzioniranje uređaja.

Slijedeće vrijednosti svojstava dobivene su u Excelu pomoću dodatka COOLPROP, a mogu se potražiti i u toplinskim tablicama.

Gustoća ogrjevne pare:

$$\rho_g = 0,2698 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Gustoća kondenzata ogrjevne pare:

$$\rho_k = 973,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Specifični toplinski kapacitet kondenzata ogrjevne pare:

$$c_{p,k} = 4195,25 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Koeficijent toplinske provodnosti kondenzata ogrjevne pare:

$$\lambda_k = 0,6654 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Dinamička viskoznost kondenzata ogrjevne pare:

$$\mu_k = 0,000364 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci izračunat je iterativnim postupkom u kojem je pretpostavljena temperatura vanjske stijenske cijevi.

Izrazi u iterativnom postupku su izjednačeni toplinski tokovi:

$$\alpha_v \cdot (\vartheta_g - \vartheta_s) = \frac{(\vartheta_s - \vartheta_a)}{\frac{d_v}{\alpha_u \cdot \alpha_u} + 2 \cdot \lambda_{inox} \cdot \ln\left(\frac{d_v}{d_u}\right)} \quad (4.17)$$

i izraz za koeficijent prijelaza topline na vanjskoj cijevi [5]:

$$\alpha_v = 0.943 \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_k \cdot (\rho_k - \rho_d) \cdot (h_{gd} - h_k + 0.68 \cdot c_{p,k} \cdot (\vartheta_g - \vartheta_s)) \cdot \lambda_k^3}{\mu_k \cdot (\vartheta_g - \vartheta_s) \cdot L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.18)$$

Iterativnim postupkom vrijednosti nepoznanica brzo konvergiraju i nakon pet iteracija zabilježena su rješenja:

$$\vartheta_s = 77,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_v = 8128,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

4.4. Površina uparivača

Preostaje izračunati koeficijent prolaza topline i potrebnu ogrjevnu površinu uparivača te odrediti broj uparivačkih cijevi u snopu.

Koeficijent prolaza topline:

$$k_v = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + 2 \cdot \lambda_{inox} \cdot \ln\left(\frac{d_v}{d_u}\right) + \frac{1}{\alpha_v}} = 1419,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.19)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura izmjenjivača:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_g - \vartheta_r) - (\vartheta_g - \vartheta_a)}{\ln\left(\frac{\vartheta_g - \vartheta_r}{\vartheta_g - \vartheta_a}\right)} = 7,56 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.20)$$

Potrebna ogrjevna površina:

$$A_{v,potr} = \frac{1000 \cdot \Phi_g}{k_v \cdot \Delta\vartheta_m} = 72,14 \text{ m}^2 \quad (4.21)$$

Odabran broj cijevi:

$$z = 136$$

Ogrjevna površina:

$$A_v = d_v \cdot \pi \cdot L \cdot z = 73,06 \text{ m}^2 \quad (4.22)$$

5. DIMENZIONIRANJE PRIKLJUČAKA

5.1. Dimenzioniranje priključaka za dovod i odvod pare

U gornjem dijelu plašta dovodi se ogrjevnja para. Odvodi se na izlazu iz separatora. Prvo se pretpostavlja brzina strujanja radi dobivanja potrebnog unutarnjeg promjera za tu brzinu. Zatim se odabire normirana cijev za priključak i računa stvarna brzina koja treba biti približna pretpostavljenoj.

Pretpostavljena brzina pare na ulazu u plašt:

$$w'_{pr} = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Potreban unutarnji promjer priključka na plaštu:

$$d_{u,pr,g} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,wg}}{\pi \cdot w'_{pr} \cdot \rho_g}} = 0,2166 \text{ m} \quad (5.1)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 219,1 \times 8$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 219,1 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 8 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 203,1 \text{ mm}$$

Stvarna brzina pare u priključku:

$$w_{pr,g} = \frac{4 \cdot q_{m,wg}}{\pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_g} = 39,46 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.2)$$

Na priključak se zavaruje ravna prirubnica DN200; PN6 [15].

Potrební unutarnji promjer priključka na separatoru:

$$d_{u,pr,s} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,w}}{2 \cdot \pi \cdot w'_{pr} \cdot \rho_v}} = 0,1631 \text{ m} \quad (5.3)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 168,3 \times 7,1$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 168,3 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 7,1 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 154,1 \text{ mm}$$

Stvarna brzina pare u priključku:

$$w_{pr,s} = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{2 \cdot \pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_v} = 38,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.4)$$

Potrebni unutarnji promjer priključka na izlazu pare:

$$d_{u,pr,s} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,w}}{\pi \cdot w'_{pr} \cdot \rho_v}} = 0,2307 \text{ m} \quad (5.5)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 273 \times 8,8$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 273 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 8,8 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 255,4 \text{ mm}$$

Stvarna brzina pare u priključku:

$$w_{pr,s} = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{\pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_v} = 28,56 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.6)$$

Na priključak se zavaruje ravna priрубnica DN250; PN6 [15].

5.2. Dimenzioniranje priključaka za dovod i odvod mlijeka

Istim postupkom kao u točki 5.1, određujemo priključak za dovod i odvod mlijeka.

Pretpostavljena brzina mlijeka na ulazu u uparivač:

$$w'_{pr,r} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Potreban unutarnji promjer priključka:

$$d_{u,pr,r} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,r}}{2 \cdot \pi \cdot w'_{pr,r} \cdot \rho_r}} = 0,0283 \text{ m} \quad (5.7)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 32 \times 2$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 32 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 2 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 28 \text{ mm}$$

Stvarna brzina mlijeka u priključku:

$$w_{pr,r} = \frac{4 \cdot q_{m,r}}{2 \cdot \pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_r} = 1,02 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.8)$$

Na priključak se zavaruje prirubnica s grlom za zavarivanje DN32; PN6 [15].

Pretpostavljena brzina mlijeka na izlazu iz uparivača:

$$w'_{pr,a} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Potreban unutarnji promjer priključka:

$$d_{u,pr,a} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,a}}{\pi \cdot w'_{pr,a} \cdot \rho_a}} = 0,0193 \text{ m} \quad (5.9)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 25 \times 2$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 25 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 2 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 21 \text{ mm}$$

Stvarna brzina mlijeka u priključku:

$$w_{pr,a} = \frac{4 \cdot q_{m,a}}{\pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_a} = 0,84 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.10)$$

Na priključak se zavaruje prirubnica s grlom za zavarivanje DN32; PN6 [15].

5.3. Dimenzioniranje priključaka za odvod kondenzata

Istim postupkom određujemo priključak za odvod kondenzata.

Pretpostavljena brzina kondenzata na izlazu iz uparivača:

$$w'_{pr,k} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Potreban unutarnji promjer priključka:

$$d_{u,pr,k} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{m,wg}}{\pi \cdot w'_{pr,k} \cdot \rho_l}} = 0,0208 \text{ m} \quad (5.11)$$

Odabrana je bešavna cijev DIN 2462 $\phi 25 \times 2$ mm [15]:

$$d_{v,pr} = 25 \text{ mm}$$

$$s_{pr} = 2 \text{ mm}$$

$$d_{u,pr} = 21 \text{ mm}$$

Stvarna brzina kondenzata u priključku:

$$w_{pr,k} = \frac{4 \cdot q_{m,wg}}{\pi \cdot d_{u,pr}^2 \cdot \rho_l} = 0,98 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.12)$$

Na priključak se zavaruje ravna prirubnica DN25; PN6 [15].

Za odvod kondenzata odabrana je ista cijev, a na priključak se zavaruje ravna prirubnica DN25; PN6 [15].

6. PRORAČUN ČVRSTOĆE

6.1. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka – norma M.E2.253

Najveća temperatura koja se pojavljuje u aparatu je 92,51 °C. Sukladno tome, a radi jednostavnosti podataka i sigurnosti uzeta je proračunska temperatura kao prva veća djeljiva s 10:

$$\vartheta_d = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Proračunski tlak je zbog potreba CIP sustava koji se obično ugrađuju u uparivače:

$$p_d = PS = 4,2 \text{ bar}$$

Materijal plašta je Inox čelik Č.4580 (DIN 1.4301 X5CrNi1810) sljedećih svojstava [7]:

$$\text{naprezanje tečenja pri okolišnoj temperaturi: } R_{p0,2/20^\circ\text{C}} = 200 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{naprezanje tečenja pri radnoj temperaturi: } R_{p0,2/100^\circ\text{C}} = 162,375 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{granica čvrstoće pri okolišnoj temperaturi: } R_{m20} = 500 \text{ N/mm}^2$$

Proračunska čvrstoća pri radnoj temperaturi:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/100^\circ\text{C}}}{1,5}; \frac{R_{m20}}{2,4}\right) = 104,66 \text{ N/mm}^2$$

Proračunska čvrstoća pri ispitnoj (okolišnoj) temperaturi:

$$f_i = \min\left(\frac{R_{p0,2/20^\circ\text{C}}}{1,5}; \frac{R_{m20}}{2,4}\right) = 133,33 \text{ N/mm}^2$$

Hidrostatski ispitni tlak:

$$PT = p_i = \max\left(1,25 \cdot p_d \cdot \frac{f_i}{f_d}; 1,43 \cdot PS\right) = 6,69 \text{ bar}$$

Dimenzije plašta koji je izrađen savijanjem lima:

$$\text{vanjski promjer: } D_v = 788 \text{ mm}$$

$$\text{debljina stjenke: } s = 14 \text{ mm}$$

unutarnji promjer: $D_u = 760 \text{ mm}$

Uvjet primjene norme:

$$\frac{D_v}{D_u} = 1,037 < 1,2$$

Dodatak za dopušteno odstupanje materijala (M.E2.250):

$$c_1 = 0,35 \text{ mm}$$

Dodatak zbog smanjenja debljine stijenke korozijom i trošenjem (feritni čelik):

$$c_2 = 1 \text{ mm}$$

Koeficijent zavarenog spoja:

$$\nu = 1$$

Stupanj sigurnosti za materijal pri proračunskoj temperaturi (M.E2.250):

$$S = 1,5$$

Stupanj sigurnosti za materijal pri ispitnom tlaku (M.E2.250):

$$S' = 1,1$$

Potrebna debljina stijenke plašta pri radnom tlaku p_d :

$$s = \frac{D_v \cdot p_d}{20 \cdot \frac{R_{p0,2/100^\circ\text{C}}}{S} \cdot \nu + p_d} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{788 \cdot 4,2}{20 \cdot \frac{162,375}{1,5} \cdot 1 + 4,2} + 0,35 + 1 = 2,93 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke plašta pri ispitnom tlaku PT:

$$s = \frac{D_v \cdot PT}{20 \cdot \frac{R_{p0,2/20^\circ\text{C}}}{S'} \cdot \nu + PT} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{788 \cdot 6,69}{20 \cdot \frac{200}{1,1} \cdot 1 + 6,69} + 0,35 + 1 = 2,80 \text{ mm}$$

Odabrana debljina stijenke je veća od potrebne debljine što znači da je plašt dobro dimenzioniran.

6.2. Proračun izreza u plaštu izloženom djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256

Uvjet primjene norme:

$$0,002 \leq \frac{s - c_1 - c_2}{D_v} \leq 0,1$$

$$0,002 \leq \frac{14 - 0,35 - 1}{1000} \leq 0,1$$

$$0,002 \leq 0,01605 \leq 0,1$$

Uvjet zadovoljava.

Određivanje koeficijenta oslabljenja izrezom v_a prema normi M.E2.256 pomoću grafa:

$$v_a = f\left(\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2}; \frac{d_{u_pr_d}}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}}\right)$$

$$\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} = \frac{8 - 0,35 - 1}{14 - 0,35 - 1} = 0,5257$$

$$\frac{d_{u_pr_d}}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} = \frac{203,1}{\sqrt{(760 + 14 - 0,35 - 1) \cdot (14 - 0,35 - 1)}} = 2,0543$$

$$v_A = 0,62$$

Potrebna debljina stijenke plašta oko izreza pri radnom tlaku p_d :

$$s = \frac{D_v \cdot p_d}{20 \cdot \frac{R_{p0,2/100^\circ\text{C}}}{S} \cdot v_A + p_d} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{788 \cdot 4,2}{20 \cdot \frac{162,375}{1,5} \cdot 0,62 + 4,2} + 0,35 + 1 = 3,89 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke plašta oko izreza pri ispitnom tlaku PT:

$$s = \frac{D_v \cdot PT}{20 \cdot \frac{R_{p0,2/20^\circ C}}{S'} \cdot 0,48 + PT} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{788 \cdot 6,69}{20 \cdot \frac{200}{1,1} \cdot 0,62 + 6,69} + 0,35 + 1 = 3,68 \text{ mm}$$

Plast nije potrebno dodatno ojačavati jer je debljina stijenke plašta veća od potrebne debljine stijenke oko izreza.

6.3. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju vanjskog tlaka prema normi M.E2.254

Uvjet primjenjivosti norme:

$$\frac{D_v}{D_u} = \frac{788}{760} = 1,037 < 1,2$$

Uvjeti korištenja dijagrama iz norme:

$$\frac{D_v}{L} = \frac{788}{4500} = 0,6229 < 5 \qquad \frac{D_v}{100(s_A - c_1 - c_2)} = \frac{788}{100(14 - 0,35 - 1)} = 0,6229 < 10$$

6.3.1. Tlak pri elastičnom ulubljanju

Modul elastičnosti čelika[17]:

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Poissonov koeficijent [17]:

$$\nu = 0,3$$

Faktor sigurnosti u odnosu na elastično ulubljanje:

$$S_k = 3$$

Očitano iz dijagrama 6 iz norme:

$$\frac{p_{kr} S_k}{E} = 9,65$$

$$p_{kr} = 6,76 \text{ bar} < PT$$

6.3.2. Tlak pri plastičnom ulubljivanju

Odstupanje od kružnog oblika:

$$u = 1,5\%$$

Očitano iz dijagrama 6 iz norme:

$$\frac{10 \cdot p_{kr}}{f_d} = 1,4$$

$$p_{kr} = 14,65 \text{ bar} < p_d$$

Debljina plašta je zadovoljava da ne dođe do ulubljivanja.

6.4. Proračun podnica izvrnutih unutrašnjem tlaku prema normi M.E2.252

Odabrana je duboka podnica $\phi 762 \times 6$ mm prema DIN 28013 [15]. Materijal podnice je Inox čelik Č. 4580 (DIN 1.4301 X5CrNi1810). Dimenzije plitke podnice:

Vanjski promjer podnice:

$$D_{v,podnica} = 762 \text{ mm}$$

Debljina stijenke podnice:

$$S_{podnica} = 6 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer podnice:

$$D_{u,podnica} = 750 \text{ mm}$$

Polumjer kalote:

$$R = 0,8 \cdot D_{v,podnica} = 609,6 \text{ mm}$$

Polumjer torusnog dijela:

$$r = 117,35 \text{ mm}$$

Visina cilindričnog dijela podnice:

$$3 \cdot s \leq h_1 \leq 150$$

$$18 \text{ mm} \leq 55 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm}$$

Visina iznad cilindričnog dijela:

$$h_2 = 0,255 \cdot D_{v,podnica} - 0,635 \cdot s = 190,5 \text{ mm}$$

Uvjet primjene norme:

$$0,002 \leq \frac{s - c_1 - c_2}{D_{v,podnica}} \leq 0,1$$

$$0,002 \leq 0,006102 \leq 0,1$$

Koeficijent oblika podnice β očitano iz norme iz dijagrama 8:

$$\beta = 2,2$$

6.4.1. Potrebna debljina torusnog dijela podnice

Koeficijent zavarenog spoja za jednodijelne podnice:

$$\nu = 1$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice pri radnom tlaku:

$$s = \frac{D_{v,podnica} \cdot p_d \cdot \beta}{40 \cdot \frac{R_{p0,2/100^\circ C}}{S} \cdot \nu} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{762 \cdot 4,2 \cdot 2,2}{40 \cdot \frac{157}{1,50} \cdot 1} + 0,35 + 1 = 3,03 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice pri ispitnom tlaku:

$$s = \frac{D_{v,podnica} \cdot PT \cdot \beta}{40 \cdot \frac{R_{p0,2/20^\circ C}}{S'}} \cdot \nu + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{762 \cdot 6,69 \cdot 2,9}{40 \cdot \frac{200}{1,10} \cdot 1} + 0,35 + 1 = 2,89 \text{ mm}$$

6.4.2. Potrebna debljina kalotnog dijela podnice

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice pri radnom tlaku:

$$s = \frac{D_{kalote} \cdot p_d}{40 \cdot \frac{R_{p0,2/100^\circ C}}{S} \cdot \nu + p_d} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{1219,2 \cdot 4,2}{40 \cdot \frac{157}{1,50} \cdot 1 + 4,2} + 0,35 + 1 = 2,57 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice pri ispitnom tlaku:

$$s = \frac{D_{kalote} \cdot PT}{40 \cdot \frac{R_{p0,2/20^\circ C}}{S'} \cdot \nu + PT} + c_1 + c_2$$

$$s = \frac{1219,2 \cdot 6,69}{40 \cdot \frac{200}{1,10} \cdot 1 + 6,69} + 0,35 + 1 = 2,47 \text{ mm}$$

6.4.3. Provjera na elastično ulubljunje

Minimalni tlak ulubljivanja:

$$p_{Bmin} = 1,5 \cdot p_d = 1,5 \cdot 4,2 = 6,3 \text{ bar}$$

Određivanje tlaka ulubljivanja:

$$p_B = f\left(\frac{s - c_1 - c_2}{D_v}\right) = f(0,003814)$$

Radna točka izlazi iz dijagrama, što znači da debljina stijenke zadovoljava uvjete.

6.5. Proračun podnica izvrnutih vanjskom tlaku prema normi M.E2.252

Stupanj sigurnosti:

$$S_k = 3 + 0,002 \cdot \left(\frac{S_{podnica} - c_1 - c_2}{R}\right)^{-1} = 3 + 0,002 \cdot \left(\frac{6 - 0,35 - 1}{609,6}\right)^{-1} = 3,26$$

$$p_{ok} < 3,66 \cdot \frac{E}{S_k} \cdot \left(\frac{S_{podnica} - c_1 - c_2}{R} \right)^2 = 13,71 \text{ bar}$$

Podnica zadovoljava uvjete djelovanja vanjskog tlaka.

6.6. Proračun cijevne stijenke prema normi M.E2.259

6.6.1. Potrebna debljina cijevne stijenke

Cijevna stjenka služi za učvršćenje i pozicioniranje uparivačkog cijevnog snopa, a sekundarna uloga je distribucija mlijeka u isti. Izrađenja je bušenjem slijepe prirubnice. Osim pozicija uvrta s navojem, za navojne šipke koje na donjoj stjenki nose pregrade, a na gornjoj sekundarnu distribucijsku ploču, cijevne stjenke su iste. Materijal je Inox čelik Č. 4580 (DIN 1.4301 X5CrNi1810). Dimenzije su:

$$D = 890 \text{ mm}$$

$$k = 845 \text{ mm}$$

$$b = 30 \text{ mm}$$

$$d_2 = 22 \text{ mm}$$

Najveći promjer upisanog kruga u presjek cijevnog snopa:

$$d_{max} = 114,59 \text{ mm}$$

Potrebna debljina cijevne stijenke pri radnom tlaku:

$$b_{min} = 0,4 \cdot d_{max} \cdot \sqrt{\frac{p_d \cdot S}{10 \cdot R_{p0,2/100^\circ C}}}$$

$$b_{min} = 0,4 \cdot 114,59 \cdot \sqrt{\frac{4,2 \cdot 1,5}{10 \cdot 157}} = 2,90 \text{ mm}$$

Potrebna debljina cijevne stijenke pri ispitnom tlaku:

$$b_{min} = 0,4 \cdot d_{max} \cdot \sqrt{\frac{PT \cdot S'}{10 \cdot R_{p0,2/20^\circ C}}}$$

$$b_{min} = 0,4 \cdot 114,59 \cdot \sqrt{\frac{6,69 \cdot 1,1}{10 \cdot 200}} = 2,78 \text{ mm}$$

6.6.2. Provjera učvršćenja cijevi

Potrebno je odrediti minimalnu potrebnu širinu zavara kojim se cijevi spajaju sa cijevnom stijenkom.

Površina opterećenja:

$$A_R = t^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} = 57^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{38^2 \cdot \pi}{4} = 1679,60 \text{ mm}^2$$

Sila u cijevi:

$$F_R = p_d \cdot A_R = 4,2 \cdot 10^5 \cdot 0,00077894 = 705,433 \text{ N}$$

Potrebna širina zavara:

$$g = 0,4 \cdot \frac{F_R \cdot S}{d_v \cdot R_{p0,2/82^\circ\text{C}}} = 0,1064 \text{ mm}$$

6.6.3. Kontrola na izvijanje

Udaljenost pregrade od stjenke:

$$l_0 = 225 \text{ mm}$$

Slobodna duljina izvijanja:

$$l_k = 0,7 \cdot l_0 = 0,7 \cdot 225 = 157,5 \text{ mm}$$

Stupanj vitkosti:

$$\lambda = \frac{4 \cdot l_k}{\sqrt{d_v^2 + d_u^2}} = \frac{4 \cdot 157,5}{\sqrt{38^2 + 32,8^2}} = 12,55$$

$$\lambda_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{k}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210000}{157}} = 114,90$$

Za $\lambda < \lambda_0$ vrijedi sljedeći izraz za određivanje dopuštene sile izvijanja:

$$F_K = \frac{R_{p0,2/100^\circ C}}{S} \cdot \pi \cdot \frac{d_v^2 - d_u^2}{4} \cdot \left[1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \left(1 - \frac{S}{3} \right) \right]$$

$$F_K = \frac{157}{1,5} \cdot \pi \cdot \frac{38^2 - 32,8^2}{4} \cdot \left[1 - \frac{12,55}{114,90} \left(1 - \frac{1,5}{3} \right) \right] = 28611,69 \text{ N}$$

$F_K > F_R$ - zadovoljava

6.7. Odabir brtve za prirubnički spoj

Kako bi se spriječilo prodiranje i izlaženje medija izvan aparata u okoliš potrebno je umetnuti brtvu između ravne stijenke i slijepe prirubnice (cijevne stijene). Odabrana je brtva od klingerita sljedećih dimenzija:

vanjski promjer brtve:	$d_{2b} = 800 \text{ mm}$
unutarnji promjer brtve:	$d_{1b} = 760 \text{ mm}$
debljina brtve:	$s_b = 4 \text{ mm}$

6.8. Proračun vijaka prema normi M.E2.257

6.8.1. Sile u kružnom vijčanom spoju s brtvom unutar kruga provrta

6.8.1.1. Najmanja sila u vijcima za radno stanje

Sile uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB r} = \frac{p_d \cdot \pi \cdot D_u^2}{40} = \frac{4,2 \cdot \pi \cdot 750^2}{40} = 185550 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

Srednji promjer brtve:

$$d_{mb} = \frac{d_{2b} + d_{1b}}{2} = \frac{800 + 760}{2} = 780 \text{ mm}$$

$$F_{FB r} = \frac{p_d \cdot \pi \cdot (d_{mb}^2 - D_u^2)}{40} = \frac{4,2 \cdot \pi \cdot (780^2 - 750^2)}{40} = 15141 \text{ N}$$

Sila u brtvi:

Koeficijent brtve za radno stanje:

$$b_d = \frac{d_{2b} - d_{1b}}{2} = \frac{800 - 760}{2} = 20 \text{ mm}$$

$$k_1 = 1,3 \cdot b_d = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ mm}$$

$$S_D = 1,2$$

$$F_{DBr} = \frac{p_d}{10} \cdot \pi \cdot d_{mb} \cdot S_D \cdot k_1 = \frac{4,2}{10} \cdot \pi \cdot 780 \cdot 1,2 \cdot 19,526 = 32111 \text{ N}$$

Najmanja sila u vijcima za radno stanje:

$$F_{SBr} = F_{RB r} + F_{FB r} + F_{DB r}$$

$$F_{SBr} = 185550 + 15141 + 32111 = 217661 \text{ N}$$

6.8.1.2. Najmanja sila u vijcima za ispitno stanje

Sile uslijed djelovanja tlaka na gornju površinu:

$$F_{RB i} = \frac{PT \cdot \pi \cdot D_u^2}{40} = \frac{6,69 \cdot \pi \cdot 750^2}{40} = 295462 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom:

$$F_{FB i} = \frac{PT \cdot \pi \cdot (d_{mb}^2 - D_u^2)}{40} = \frac{6,69 \cdot \pi \cdot (780^2 - 750^2)}{40} = 24110 \text{ N}$$

Sila u brtvi:

$$F_{DB i} = \frac{PT}{10} \cdot \pi \cdot d_{mb} \cdot S_D \cdot k_1 = \frac{6,69}{10} \cdot \pi \cdot 780 \cdot 1,2 \cdot 26 = 51132 \text{ N}$$

Najmanja sila u vijcima za radno stanje:

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

$$F_{SB i} = 295462 + 24110 + 51132 = 370704 \text{ N}$$

6.8.1.3. Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje

Iz Tablice 1 – svojstva brtvi norma M.E2.257:

$$k_0 \cdot K_d = 200 \cdot \sqrt{\frac{b_d}{s_b}} = 200 \cdot \sqrt{\frac{20}{4}} = 447,21 \text{ N/mm}$$

$$F_{DV*} = \pi \cdot d_{mb} \cdot k_0 \cdot K_D = \pi \cdot 780 \cdot 447,21 = 1095871 \text{ N}$$

U slučaju da je ovako izračunata sila pri ugradbenom stanju, veća od izračunate sile pri radnom stanju ($F_{DV^*} > F_{SB r}$) kod brtvi od mekog materijala prethodni izraz zamjenjuje se sa:

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

$$F_{DV} = 0,2 \cdot 1095871 + 0,8 \cdot \sqrt{217661 \cdot 1095871} = 609889 \text{ N}$$

6.8.2. Proračun promjera vijaka

Odabran je razred čvrstoće vijaka 5.6:

$$\text{granica tečenja pri okolišnoj temperaturi: } R_{e/20^{\circ}\text{C}} = 300 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{granica tečenja pri radnoj temperaturi: } R_{e/100^{\circ}\text{C}} = 270 \text{ N/mm}^2$$

6.8.2.1. Promjer vijaka za radno stanje

Pomoćna vrijednost Z očitana je za površine obrađene skidanjem strugotinama i vijke s punim tijelom:

$$Z = 1,51$$

Određivanje koeficijenta c_s za radno stanje:

$$Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB r}}{R_{\frac{e}{100^{\circ}\text{C}}} \cdot N_v}} = 1,51 \cdot \sqrt{\frac{84743,98}{270 \cdot 16}} = 10,72 \text{ mm} < 20 \text{ mm}$$

$$c_s = 3 \text{ mm}$$

Promjer vijaka za radno stanje:

$$d_{s,r} = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB r}}{R_{e_v 100^{\circ}\text{C}} \cdot N_v}} + c_s = 10,72 + 3 = 13,72 \text{ mm}$$

6.8.2.2. Promjer vijaka za ispitno stanje

Pomoćna vrijednost Z_i očitana je za površine obrađene skidanjem strugotinama i vijke s punim tijelom:

$$Z_i = 1,29$$

Promjer vijaka za ispitno stanje:

$$d_{s,i} = Z_i \cdot \sqrt{\frac{F_{SBi}}{R_{\frac{e}{20}^{\circ}C} \cdot N_v}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{370704}{300 \cdot 16}} = 11,34 \text{ mm}$$

6.8.2.3. Promjer vijaka za ugradbeno stanje

Pomoćna vrijednost Z_{ug} očitana je površine obrađene skidanjem strugotina i vijke s punim tijelom:

$$Z_{ug} = 1,29$$

$$d_{s,ug} = Z_{ug} \cdot \sqrt{\frac{F_{DV}}{R_{\frac{e}{20}^{\circ}C} \cdot N_v}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{609889}{300 \cdot 16}} = 14,54 \text{ mm}$$

Odabrani vijci M27 zadovoljavaju.

6.9. Proračun ravne prirubnice prema normi M.E2.258

Cijevna stijenka (ravna prirubnica) izrađena je od Inox čelik Č. 4580 (DIN 1.4301 X5CrNi1810). Dimenzije ravne prirubnice:

$$D_{v,pr} = 890 \text{ mm}$$

$$D_{u,pr} = 750 \text{ mm}$$

$$k = 846 \text{ mm}$$

$$N_v = 16 \quad \text{– broj vijaka M20}$$

$$d_2 = 22 \text{ mm}$$

Pomoćna vrijednost Z:

$$Z = (D_{u,pr} + s_{podnica}) \cdot s_{podnica}^2 = (750 + 6) \cdot 6^2 = 27216 \text{ mm}^3$$

Krak sile:

za radno i ispitno stanje:

$$a = \frac{k - D_{u,pr} - s_{podnica}}{2} = \frac{846 - 750 - 6}{2} = 45 \text{ mm}$$

za ugradbeno stanje:

$$a_D = \frac{k - d_{mb}}{2} = \frac{846 - 780}{2} = 33 \text{ mm}$$

Moment otpora prirubnice:

za radno stanje:

$$W_r = \frac{F_{SBr} \cdot S \cdot a}{R_{p0,2/100^\circ C}} = \frac{217661 \cdot 1,5 \cdot 45}{157} = 93580,33 \text{ mm}^3$$

za ispitno stanje:

$$W_i = \frac{F_{SBi} \cdot S' \cdot a}{R_{p0,2/20^\circ C}} = \frac{370704 \cdot 1,1 \cdot 45}{200} = 91749,11 \text{ mm}^3$$

za ugradbeno stanje:

$$W_{ug} = \frac{F_{DV} \cdot S' \cdot a_D}{R_{p0,2/20^\circ C}} = \frac{609889 \cdot 1,1 \cdot 33}{200} = 110694,87 \text{ mm}^3$$

Koeficijent za izračun umanjenog promjera rupa za vijke je očitano iz dijagrama u normi:

$$\nu = 0,5$$

Umanjeni promjer rupa za vijke:

$$d_2' = \nu \cdot d_2 = 0,5 \cdot 22 = 11 \text{ mm}$$

Korisna dvostruka širina prirubnice:

$$b = D - D_{u,pr} - 2 \cdot d_2' = 890 - 750 - 2 \cdot 11 = 118 \text{ mm}$$

Potrebna visina oboda prirubnice:

$$h_{F,min} = \sqrt{1,42 \cdot \left(\frac{W_{ug} - Z}{b}\right)} = \sqrt{1,42 \cdot \left(\frac{110694,87 - 27216}{118}\right)} = 31,70 \text{ mm}$$

Izabrana širina prirubnice:

$$h_F = 65 \text{ mm} > h_{F,min}$$

7. ZAKLJUČAK

Uparivanje je u prehrambenoj industriji široko zastupljen proces i od velike važnosti. Pri projektiranju i konstrukciji uparivača nužno je dobro poznavanje prirode procesa. U industriji se, zbog visokih kapaciteta, uparivanje provodi kontinuirano. Vrsta, viskoznost, osjetljivost, kapacitet i tražena koncentracija proizvoda određuju tip uparivača. Najčešće izvedbe uparivača u mliječnoj industriji jesu cirkulacijski uparivač korišten za niske kapacitete, te filmski uparivači koji mogu biti pločasti ili cijevni s uspinjućim ili, mnogo češće, padajućim filmom. Pritom film klizi niz površinu unutarnje stjenke cijevi i isparava prilikom zagrijavanja cijevi ogrjevnom parom u plaštu. Uparivač mlijeka može dati konačni proizvod (upareno mlijeko) ili prethoditi sušenju, to jest proizvodnji mlijeka u prahu. Glavni zahtjevi uparivanja mlijeka su zadržavanje organoleptičkih svojstava i sprječavanje zagaranja, što se postiže sniženjem temperature uparivanja nametanjem vakuuma.

U radu je provedena analiza uparivanja u jednom stupnju s korištenjem mehaničkog kompresora pare. Utvrđeno je da je pri projektiranju procesa najbolje pronaći kompromis između minimalnih vrijednosti potrebne ogrjevne površine i snage za pogon kompresora. Veći kompresijski omjeri, a time i razlike temperatura mlijeka i pare, idu u prilog nižim investicijskim, a manji pogonskim troškovima.

Konstruiran je cijevni uparivač s padajućim filmom za slučaj minimalne potrebne snage kompresora. Zatim je u termodinamičkom proračunu izračunat koeficijent prolaza topline. Potom je uređaj proračunat na čvrstoću. Rad je potkrijepljen tehničkom dokumentacijom i shemom spajanja i regulacije. Predlaže se ugradnja CIP (*clean-in-place*) sustava za čišćenje uparivača.

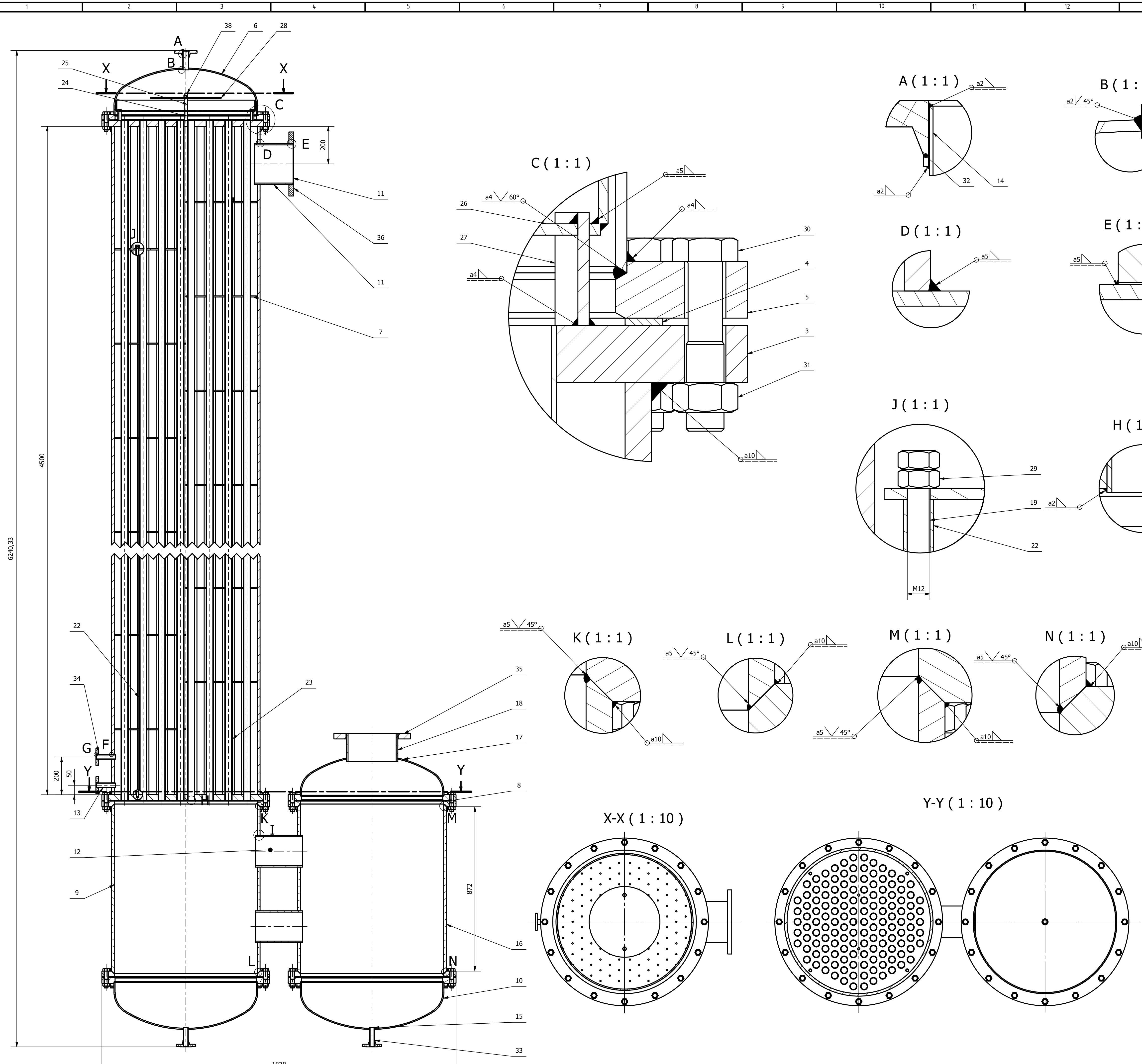
LITERATURA

- [1] Tetra Pak Processing Systems AB, Dairy Processing Handbook, Lund, Sweden, 1995
- [2] Andrassy, M.; Toplinske operacije, FSB Zagreb, 2013
- [3] A.J. Bertsch, A. Lelubre, M. Cavarroc: The specific heat capacity of whole and skimmed milk between 50 and 140° C, *Le Lait* 62/615-616, 1982
- [4] Luis A. Minim, Jane S. R. Coimbra, Valéria P. R. Minim, and Javier Telis-Romero, *Journal of Chemical & Engineering Data* 47 (6), 1488-1491, 2002
- [5] VDI Heat Atlas 2010
- [6] Pieter Walstra, Jan T. M. Wouters, Tom J. Geurts: Dairy Science and Technology, Taylor & Francis Group, 2006
- [7] Valentas K. J., Rotstein E., Singh R. P.; Handbook of food engineering practice, SAD, 1997
- [8] Zacharias B. Maroulis, George D. Saravacos: Food process design, Marcel Dekker, New York, 2003
- [9] Riedel, L. Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Zuckerlösungen, Fruchtsäften und Milch. *Chemie Ingenieur Technik*, 21: 340-341, 1949
- [10] Kessler, H. G. Food and Bioprocess Engineering: Dairy Technology. Verlag A. Kessler, Munich, Germany, 2002
- [11] Ken R. Morison , Jack P. Phelan & Chris G. Bloore, Viscosity and Non-Newtonian Behaviour of Concentrated Milk and Cream, *International Journal of Food Properties*, 164, 882-894, 2013
- [12] Evaporator Handbook, SPX Corporation, 2008
- [13] Donald R. Woods; Rules of Thumb in Engineering Practice, 2007
- [14] Thome R.J.; Fundamentals of Condensation on Tubes and Tube Bundles; Chapter VII.; Swiss Federal Institute of Technology Lausanne
- [15] TEHNIČKI PRIRUČNIK ZA PROCESNU INDUSTRIJU, IPIM d.o.o., Zagreb, 1993
- [16] https://www.pxgroup.com/sites/default/files/304_1.pdf
- [17] Kraut B.; Strojarski priručnik, Zagreb 1975

PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija

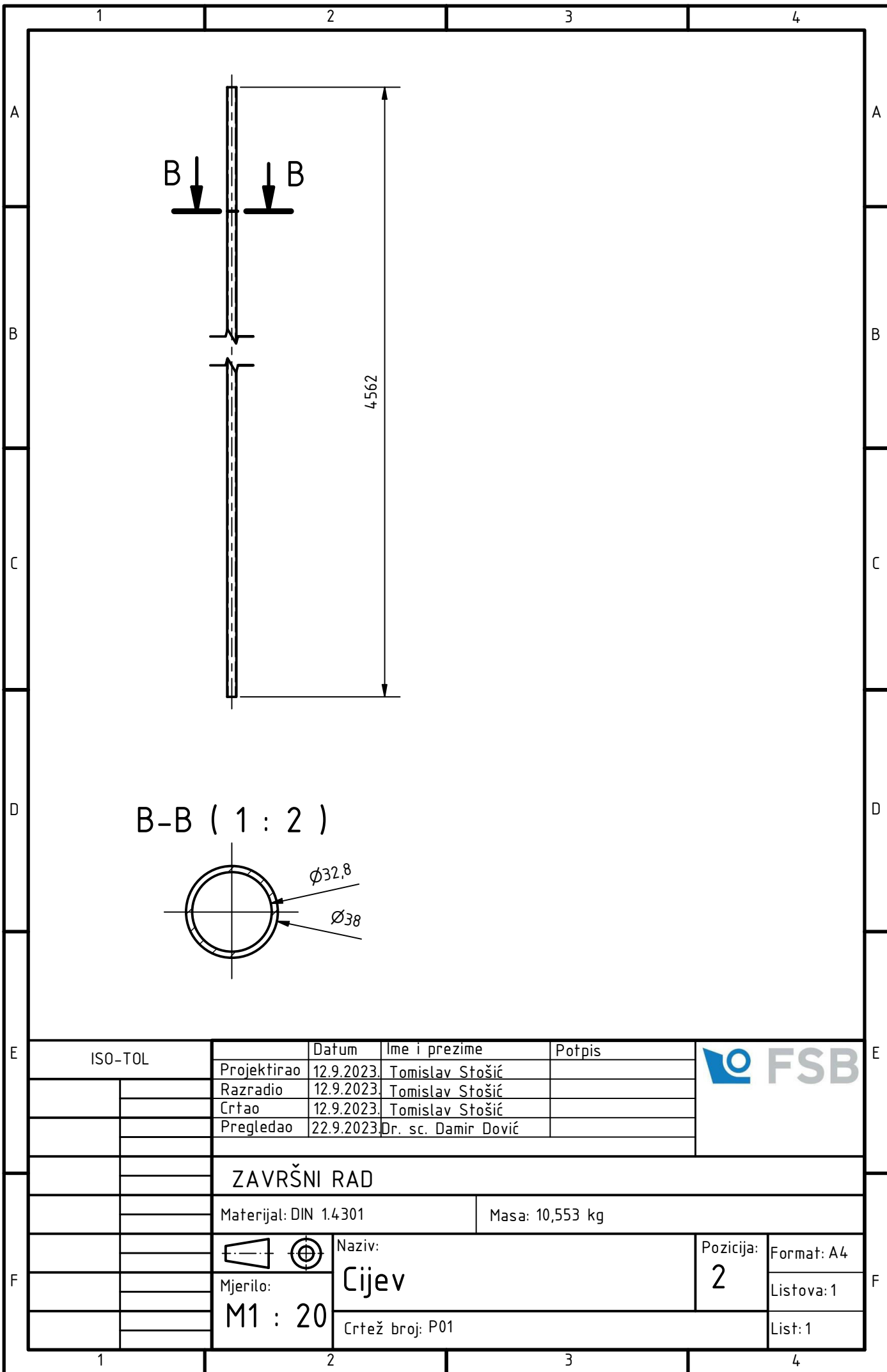
PRILOG TEHNIČKA DOKUMENTACIJA



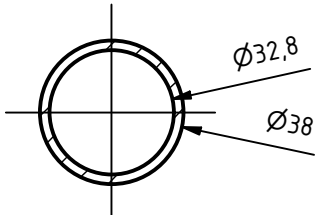
Matica s kapičom	38	2	DIN 1.4301	DIN 1587	M12	0,028 kg
Navojna šipka kraća	37	2	DIN 1.4301	DIN 976-1	M12x150	0,136 kg
Ravna prirubnica 200	36	1	DIN 1.4301	DIN EN 1092-1	Ø340x26	9,921 kg
Ravna prirubnica 250	35	1	DIN 1.4301	DIN EN 1092-1	Ø405x29	14,479 kg
Ravna prirubnica 20	34	2	DIN 1.4301	DIN 2573	Ø90x14	0,599 kg
Prirubnica s grlom 25	33	2	DIN 1.4301	DIN 2631	Ø120x35	0,778 kg
Prirubnica s grlom 32	32	2	DIN 1.4301	DIN 2631	Ø120x35	1,090 kg
Matica M20	31	80	DIN 1.4301	DIN 934	M20	0,068 kg
Vijak M20x90	30	80	DIN 1.4301	DIN EN ISO 4015	M20x90	0,277 kg
Matica M12	29	8	DIN 1.4301	DIN 934	M12	0,018 kg
Sekundarna distribucijska ploča	28	1	DIN 1.4301	P21	Ø355x5	4,406 kg
Nosač distribucijske ploče	27	2	DIN 1.4301	P20	Ø710x6x30°	0,540 kg
Distribucijska ploča	26	1	DIN 1.4301	P19	Ø742x61	24,982 kg
Odstojna cijev 64	25	1	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø16x64	0,030 kg
Odstojna cijev 48	24	1	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø16x48	0,022 kg
Odstojna cijev - 594	23	2	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø16x594	0,409 kg
Odstojna cijev - 494	22	28	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø16x494	0,043 kg
Odstojna cijev - 344	21	2	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø16x344	0,237 kg
Navojna šipka srednja	20	2	DIN 1.4301	DIN 976-1	M12x3880	3,737 kg
Navojna šipka dulja	19	2	DIN 1.4301	DIN 976-1	M12x4130	3,511 kg
Izlazna cijev pare	18	1	DIN 1.4301	DIN2462	Ø273x150	8,765 kg
Podnica separatora	17	1	DIN 1.4301	P13	Ø762x180,84	29,241 kg
Plasť separatora	16	1	DIN 1.4301	P12	Ø788x852	236,256 kg
Cijev za odvod kondenzata	15	2	DIN 1.4301	DIN2462	Ø25x100	0,116 kg
Cijev za dovod mlijeka	14	2	DIN 1.4301	DIN2462	Ø32x100	0,151 kg
Ispusna cijev	13	2	DIN 1.4301	DIN2462	Ø25x100	0,116 kg
Cijev separatora	12	2	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø168,3x250	7,191 kg
Cijev ulaza pare	11	1	DIN 1.4301	DIN 2462	Ø219,1x205	8,701 kg
Podnica donja	10	2	DIN 1.4301	P09	Ø762x254,87	36,053 kg
Plasť dna	9	1	DIN 1.4301	P08	Ø788x852	236,256 kg
Ravna prirubnica donja	8	4	DIN 1.4301	P07	Ø890x30	37,078 kg
Pregrada	7	16	DIN 1.4301	P06	Ø752x6	6,947 kg
Podnica	6	2	DIN 1.4301	P05	Ø762x254,87	36,038 kg
Ravna prirubnica gornja	5	5	DIN 1.4301	P04	Ø890x30	40,801 kg
Brtva	4	5	KLINGERIT	P03	Ø800x4	0,245 kg
Cijevna stjenka	3	2	DIN 1.4301	P02	Ø890x30	110,728 kg
Cijev	2	136	DIN 1.4301	P01	Ø12x4562	10,553 kg
Plasť uparivača	1	1	DIN 1.4301	P15	Ø788x4500	1221,146 kg

Naziv dijela		Poz. Kom.	Materijal	Crtež broj	Norma	Sirove dimenzije	Proizvođač	Masa
ISO-TOL								
Projektiarao	12.9.2023	Tomislav Stošić		Potpis				
Razradio	12.9.2023	Tomislav Stošić		Potpis				
Crtao	12.9.2023	Tomislav Stošić		Potpis				
Pregledao	22.9.2023	Dr.sc. Damir Dović		Potpis				
ZAVRŠNI RAD								
Materijal:				Masa: N/A				
Mjerilo: M1 : 10		Naziv: FILMSKI UPARIVAČ			Pozicija: Format: A1			
Crtež broj: P00				Lisťova: 1				





B-B (1 : 2)



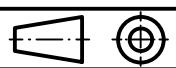
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	12.9.2023.	Tomislav Stošić	
Razradio	12.9.2023.	Tomislav Stošić	
Crtao	12.9.2023.	Tomislav Stošić	
Pregledao	22.9.2023.	Dr. sc. Damir Dović	



ZAVRŠNI RAD

Materijal: DIN 1.4301

Masa: 10,553 kg



Naziv: Cijev

Pozicija: 2

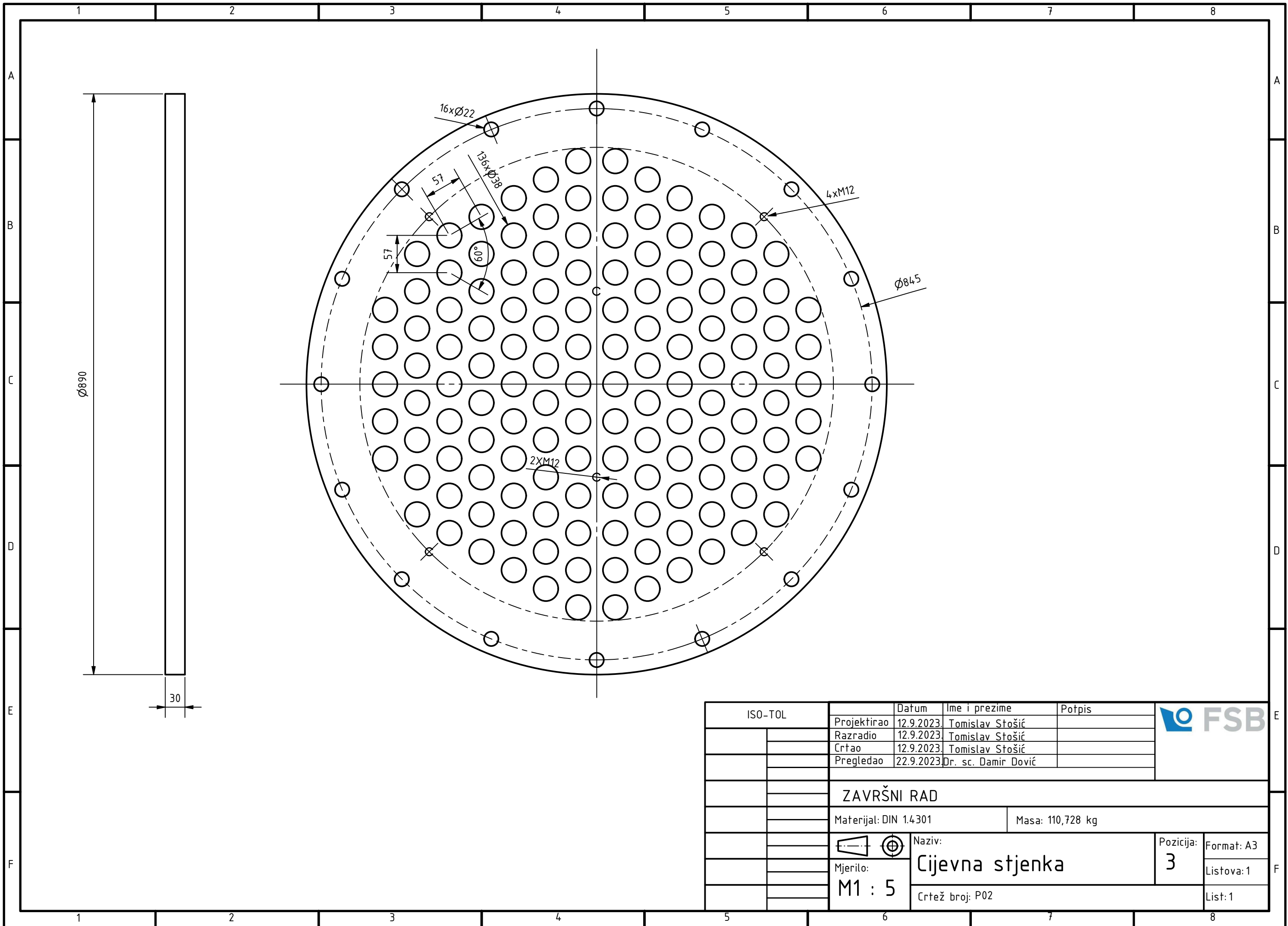
Mjerilo: M1 : 20

Crtež broj: P01

Format: A4
Listova: 1

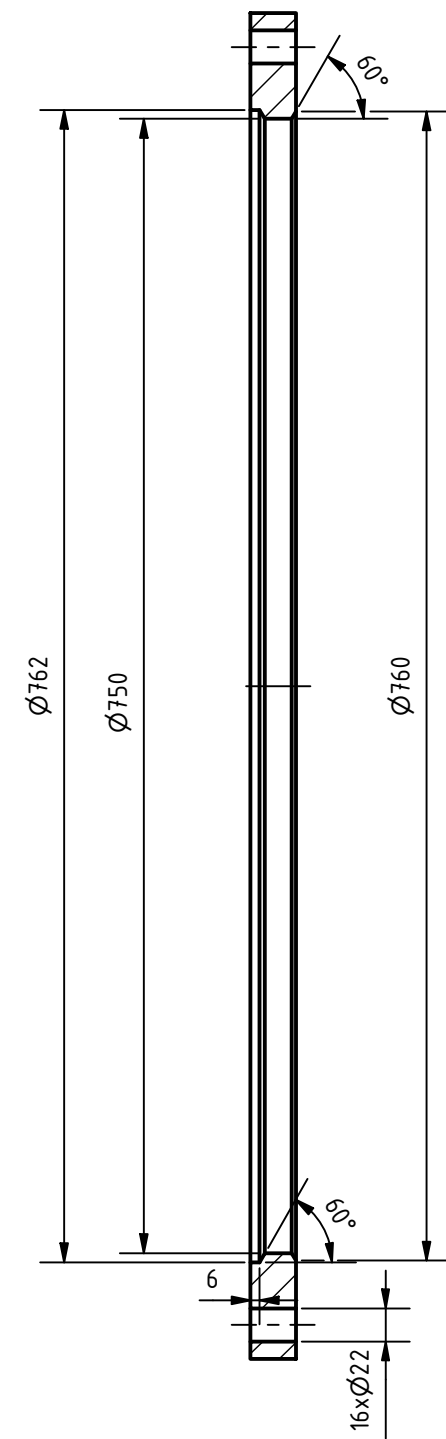
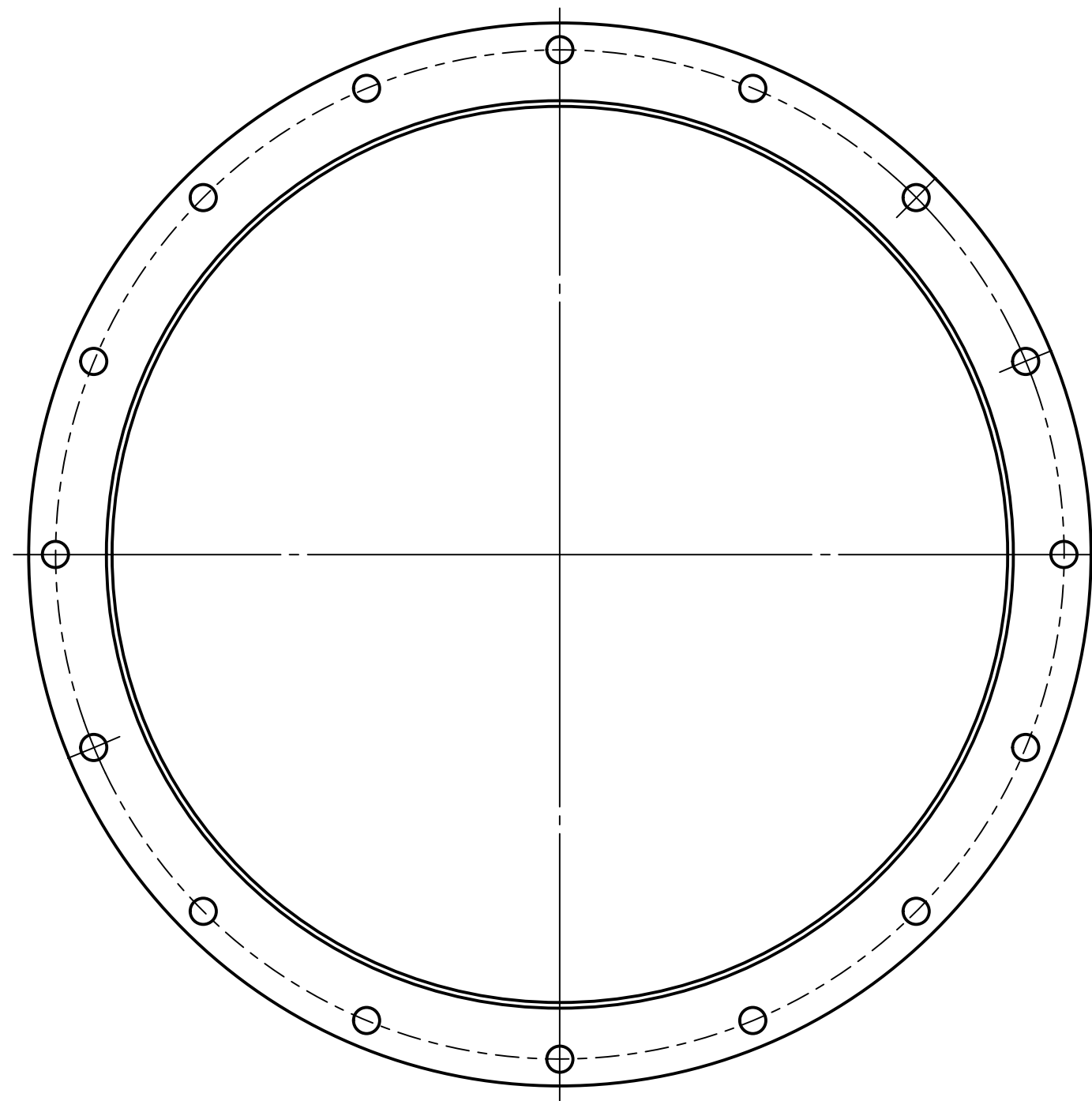
M1 : 20

List: 1

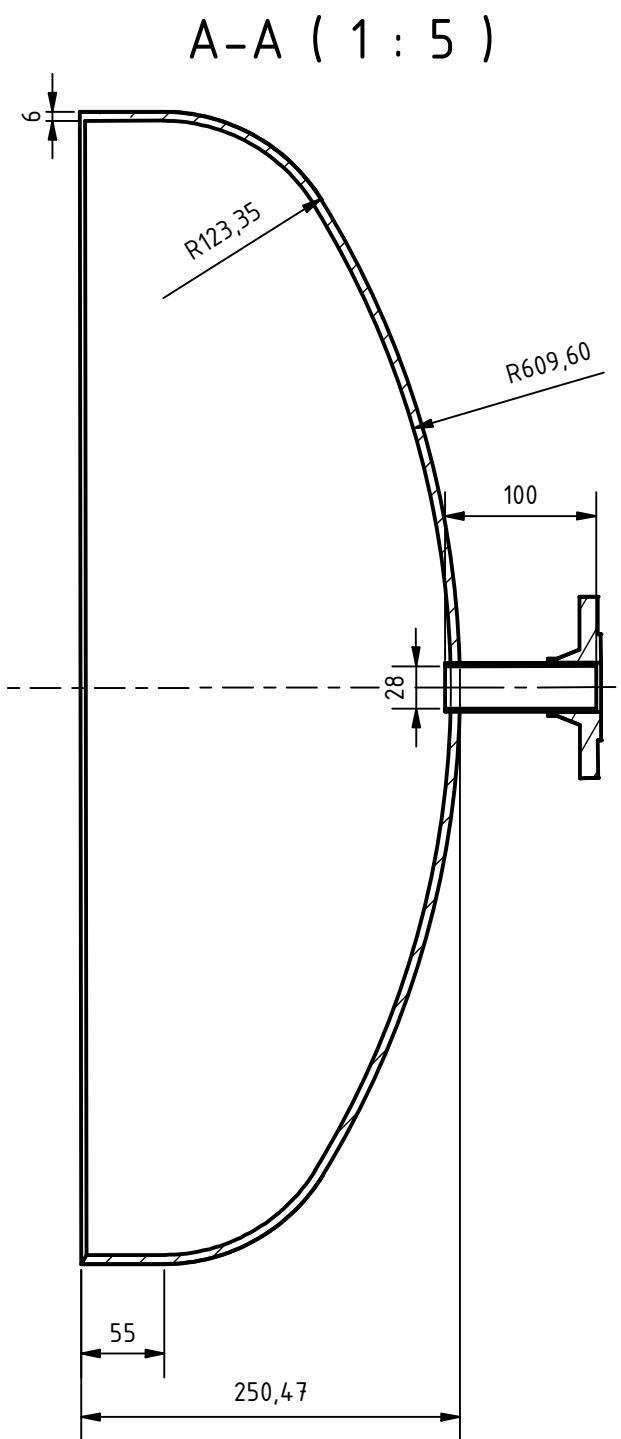
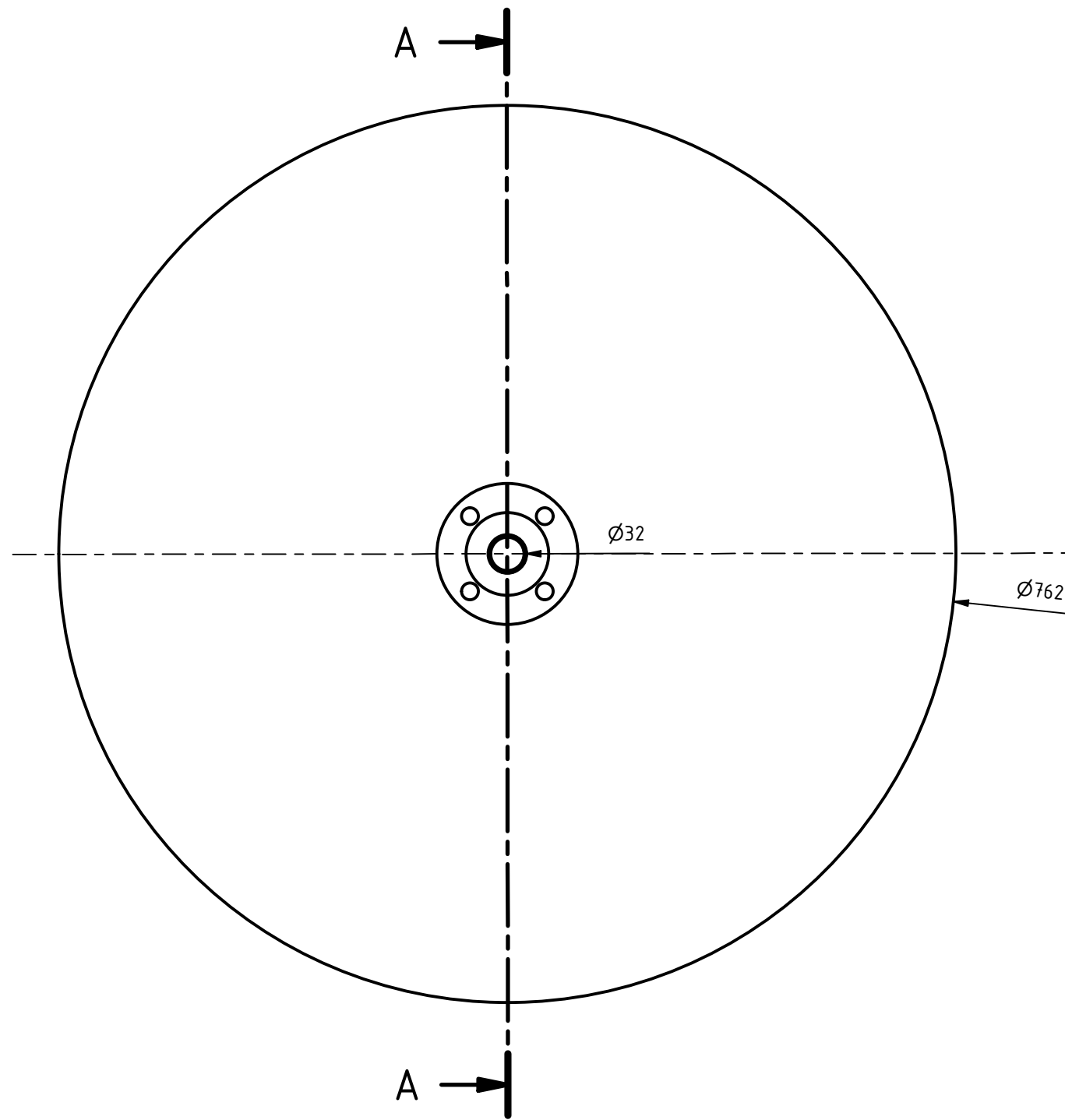


ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis
	Projektirao	12.9.2023. Tomislav Stošić	
	Razradio	12.9.2023. Tomislav Stošić	
	Crtao	12.9.2023. Tomislav Stošić	
	Pregledao	22.9.2023. Dr. sc. Damir Dović	
ZAVRŠNI RAD			
Materijal: DIN 1.4301		Masa: 110,728 kg	
			Pozicija: 3 Format: A3 Listova: 1
Naziv: Cijevna stjenka Mjerilo: M1 : 5 Crtež broj: P02			
			List: 1



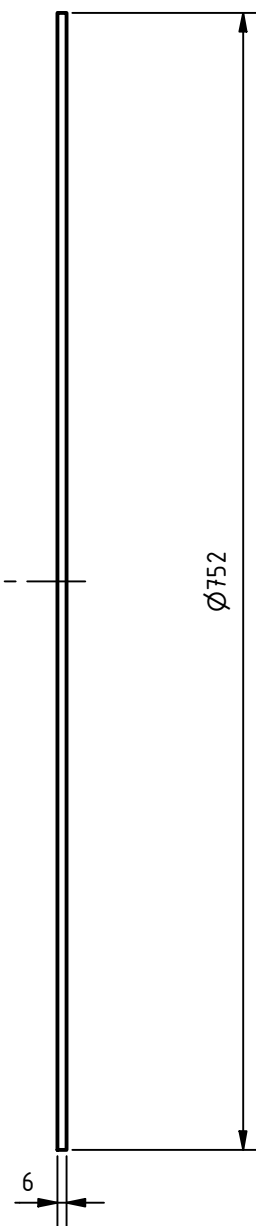
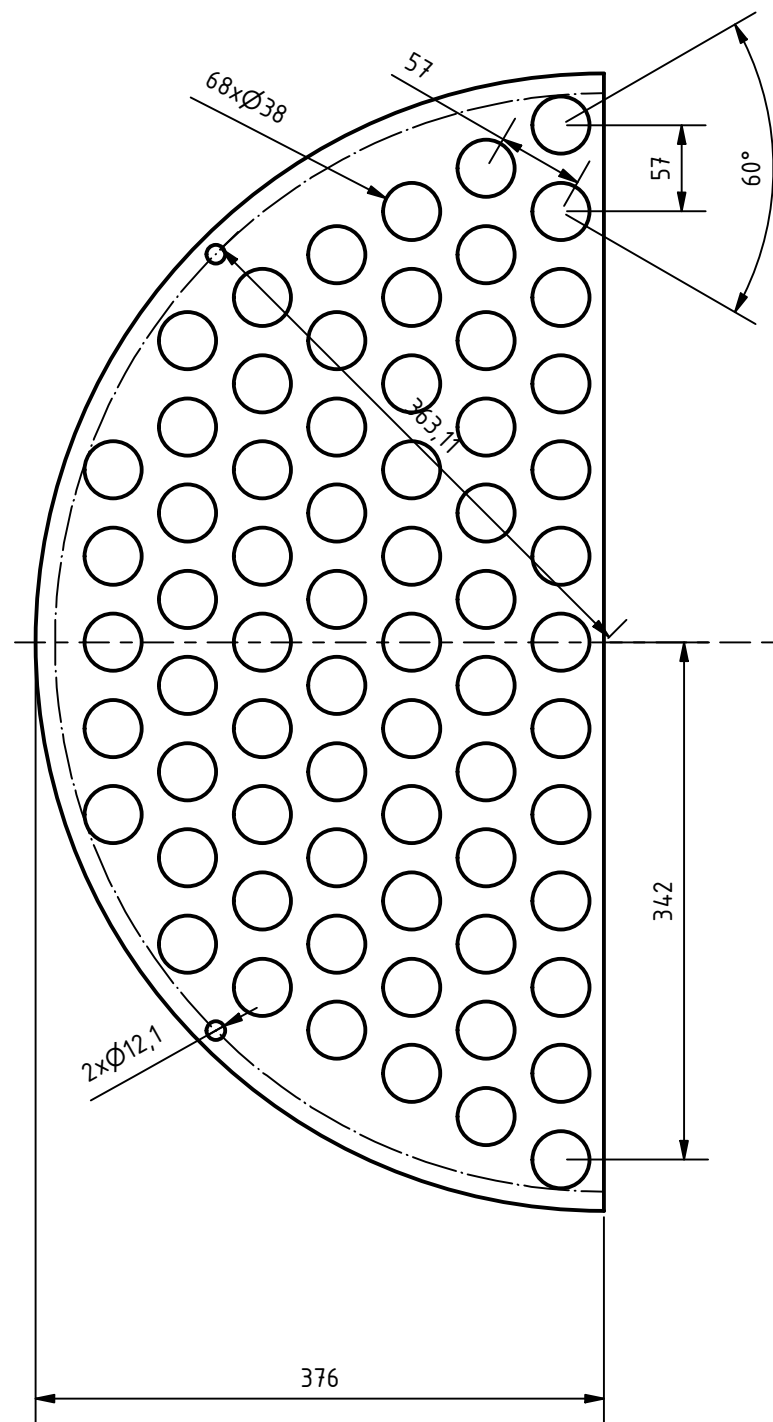



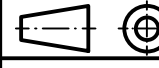
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Razradio	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Crtao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Pregledao	22.9.2023. Dr. sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal: DIN 1.4301			Masa: 40,801 kg	
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo:		Ravna prirubnica gornja		5
M1 : 5		Crtež broj: P04		Format: A3
				Listova: 1
				List: 1

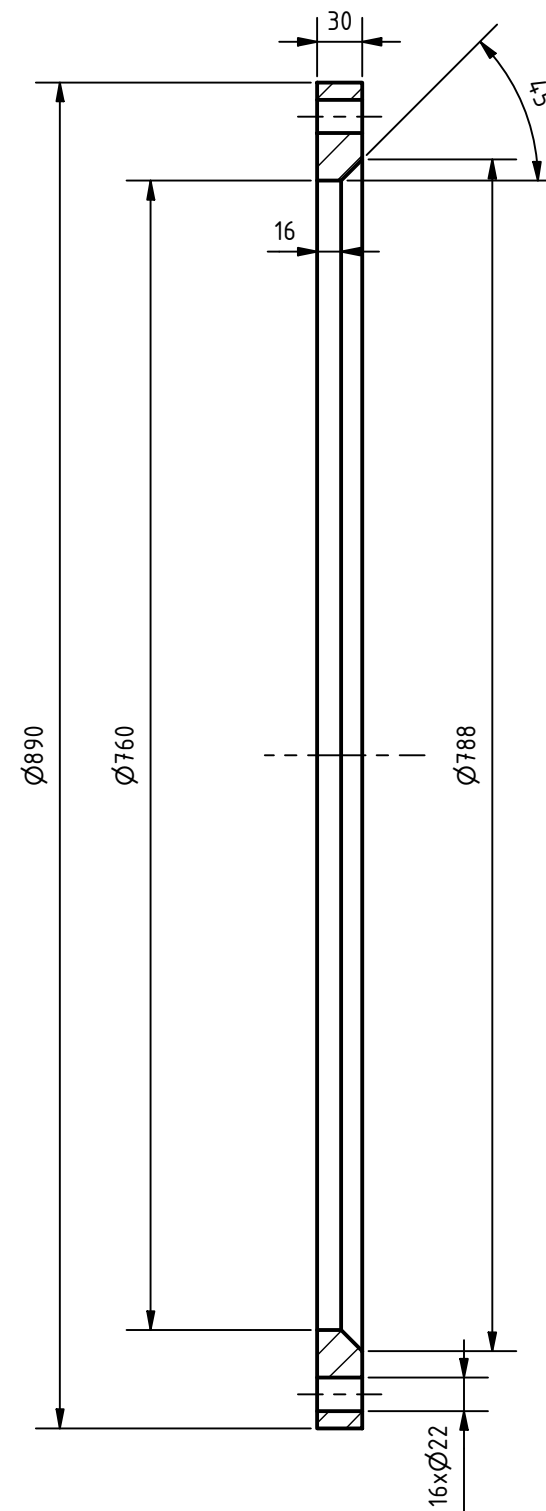
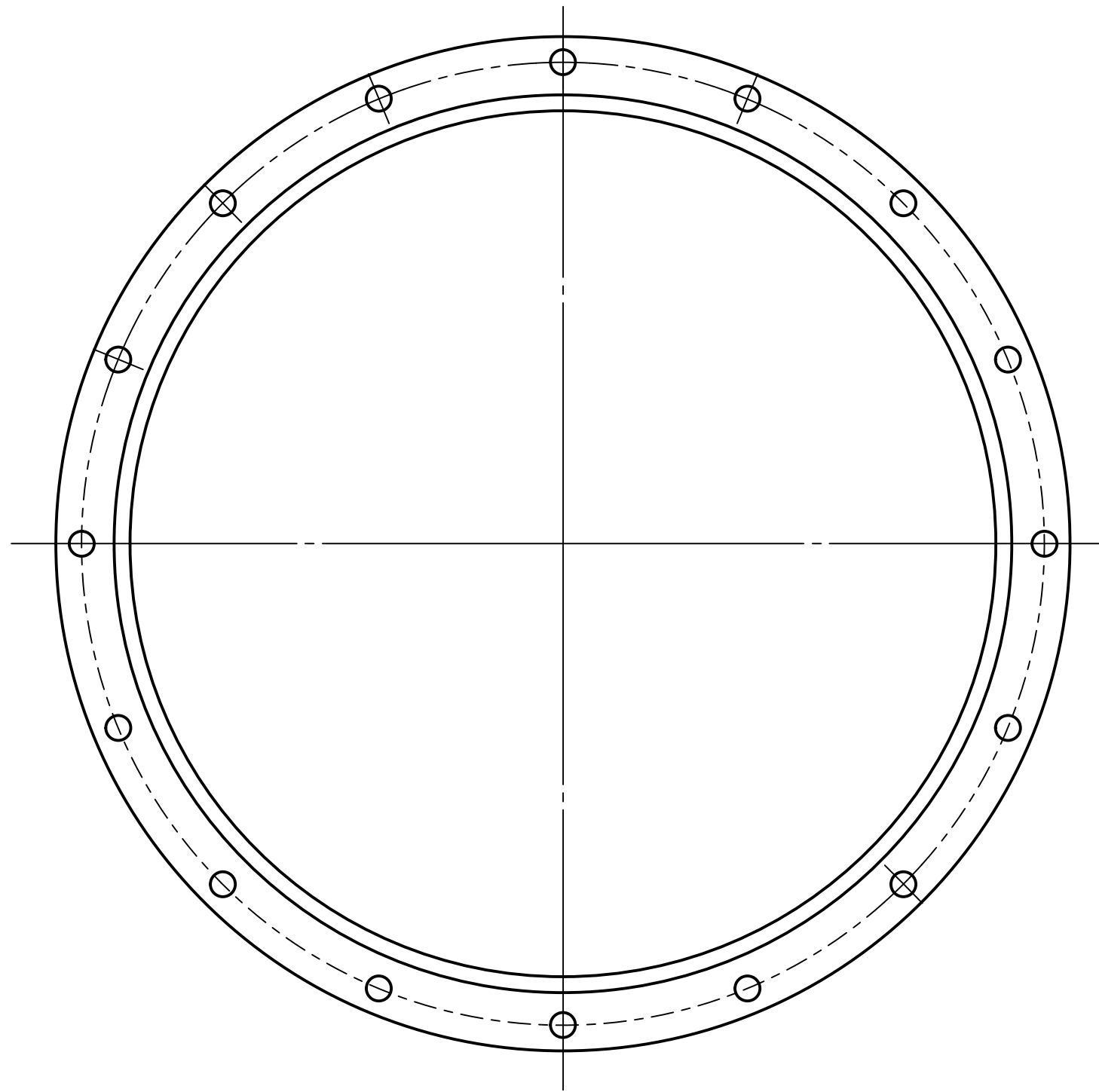


ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis
	Projektirao	22.9.2023 Tomislav Stošić	
	Razradio	22.9.2023 Tomislav Stošić	
	Crtao	22.9.2023 Tomislav Stošić	
	Pregledao	22.9.2023 Dr. sc. Damir Dović	
ZAVRŠNI RAD			
Materijal:		Masa: 37,278 kg	
Mjerilo:		Naziv:	Pozicija:
M1 : 5		Podsklop gornje podnice 6	
Crtež broj: P05		Listova: 1	
		List: 1	

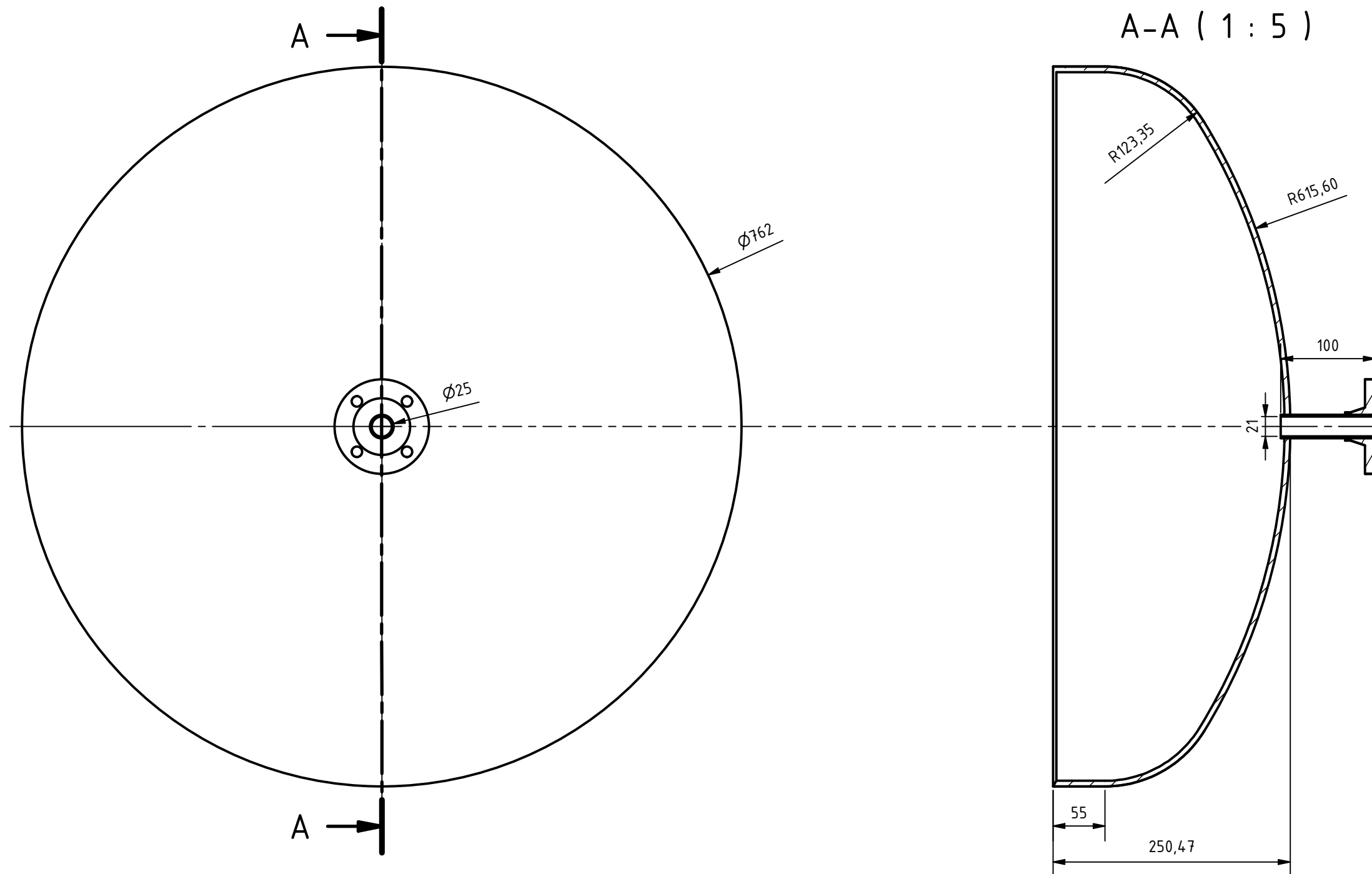



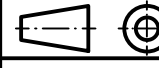


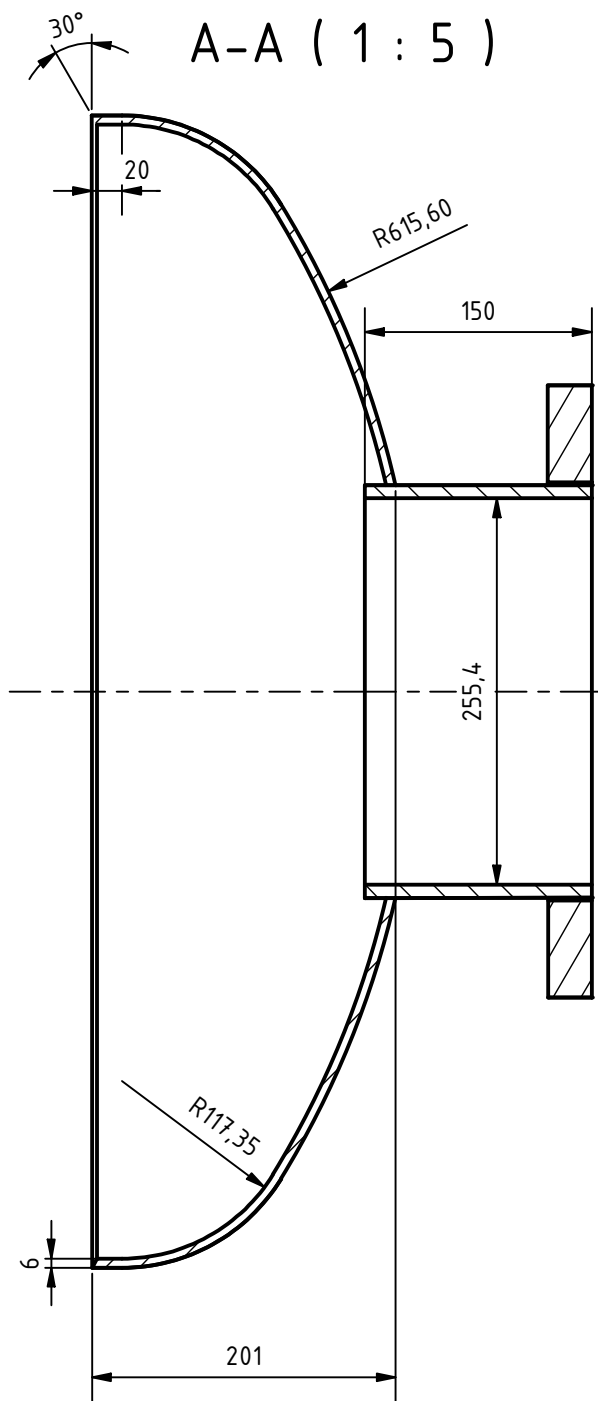
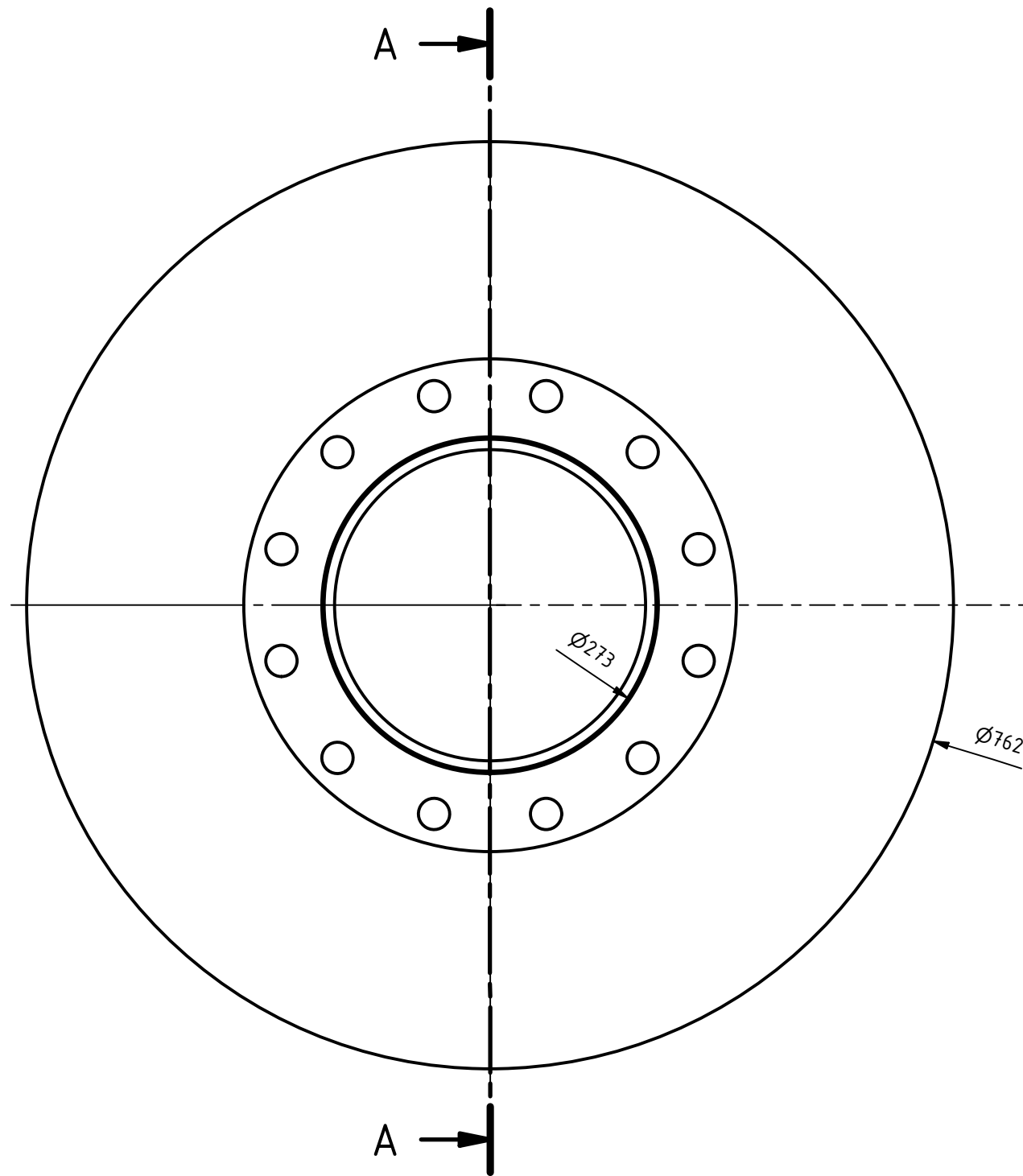
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Razradio	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Crtao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Pregledao	22.9.2023. Dr. sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal: DIN1.4301			Masa: 6,947 kg	
 Mjerilo: M1 : 5		Naziv: Pregrada		Pozicija: 7
Crtež broj: P06				Format: A3 Listova: 1 List: 1



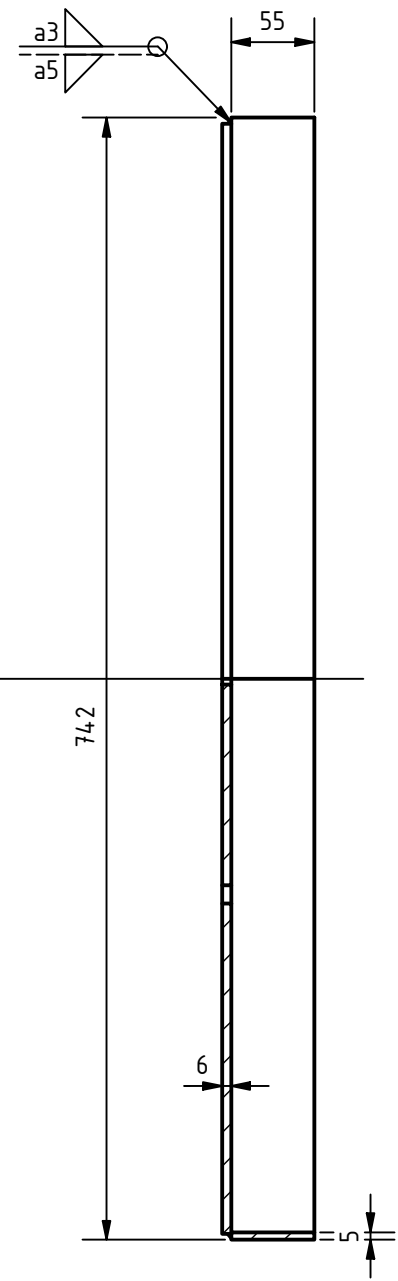
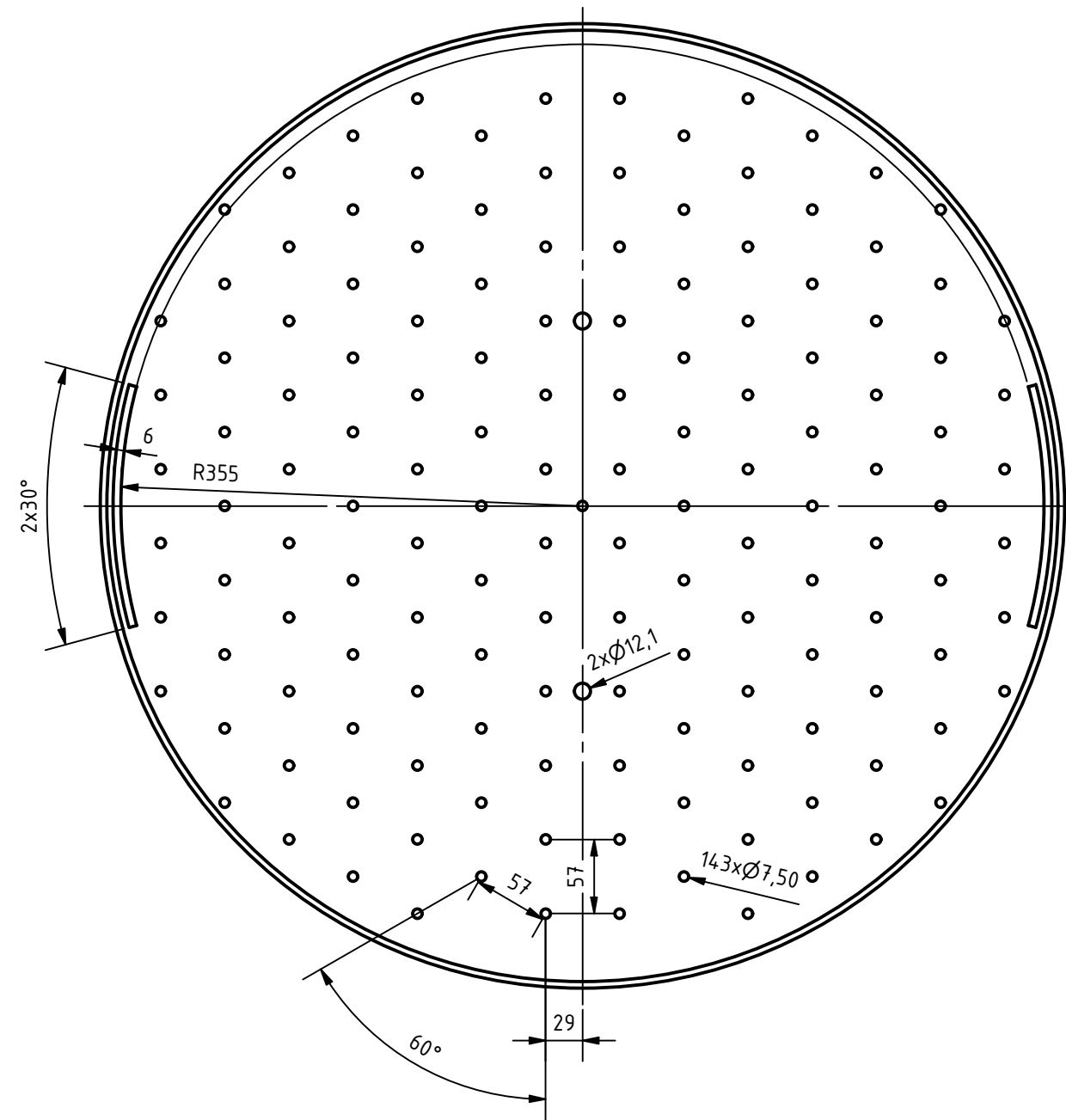
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Razradio	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Crtao	12.9.2023. Tomislav Stošić		
	Pregledao	22.9.2023. Dr.sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal: DIN 1.4301			Masa: 37,078 kg	
	 	Naziv:		Pozicija:
	Mjerilo:	Ravna prirubnica donja		8
	M1 : 5			
		Crtež broj: P07		Format: A3
				Listova: 1
				List: 1



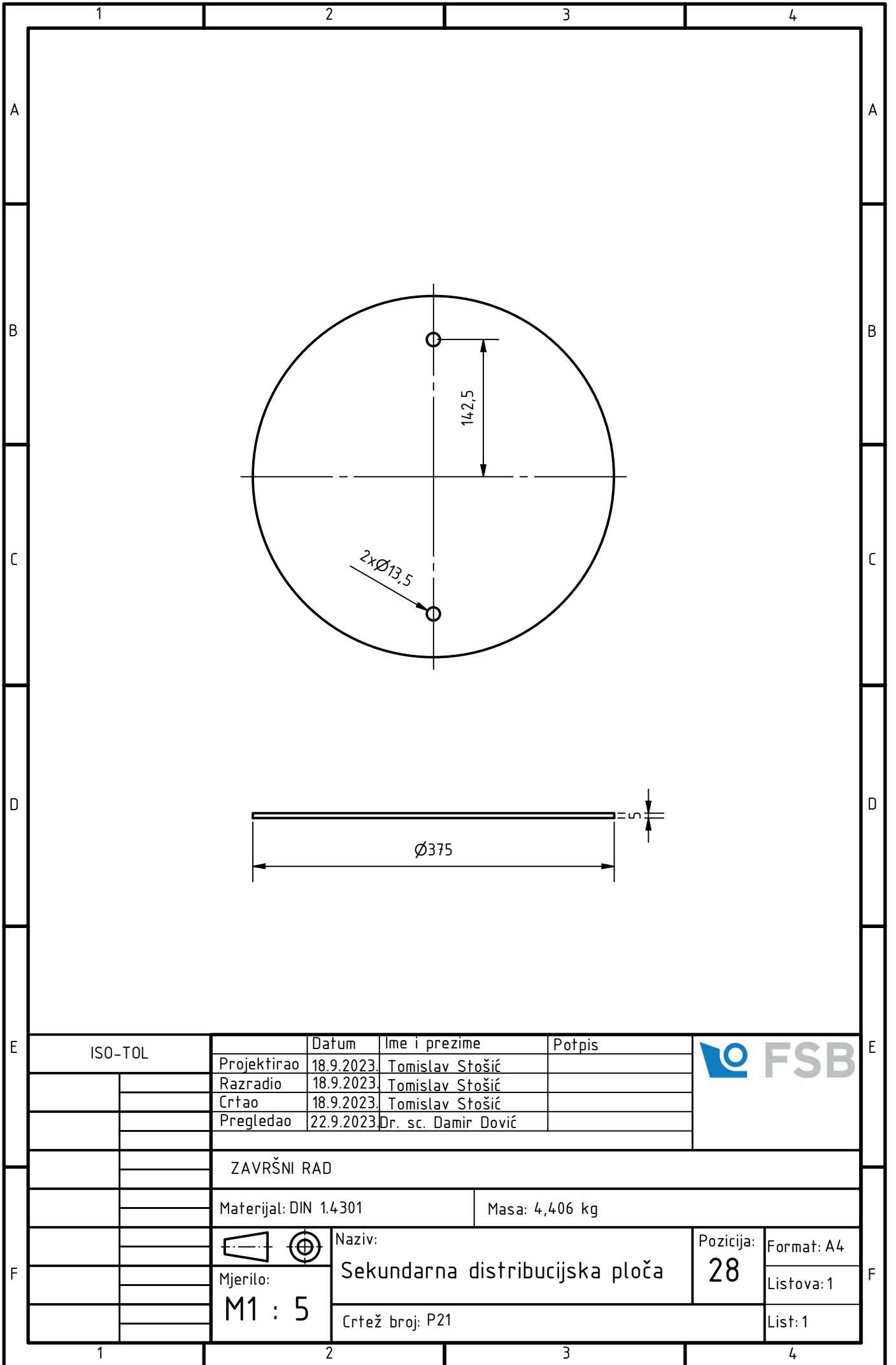
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Razradio	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Crtao	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Pregledao	22.9.2023. Dr. sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal:			Masa: 36,946 kg	
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo:		Podsklop donje podnice		10
M1 : 5		Crtež broj: P09		Format: A3
				Listova: 1
				List: 1



ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	22.9.2023 Tomislav Stošić		
	Razradio	22.9.2023 Tomislav Stošić		
	Crtao	22.9.2023 Tomislav Stošić		
	Pregledao	22.9.2023 Dr. sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal:			Masa: 52,484 kg	
		Naziv: Podsklop podnice separatora		Pozicija: 19
Mjerilo: M1 : 5		Crtež broj: P18		Format: A3
				Listova: 1
				List: 1



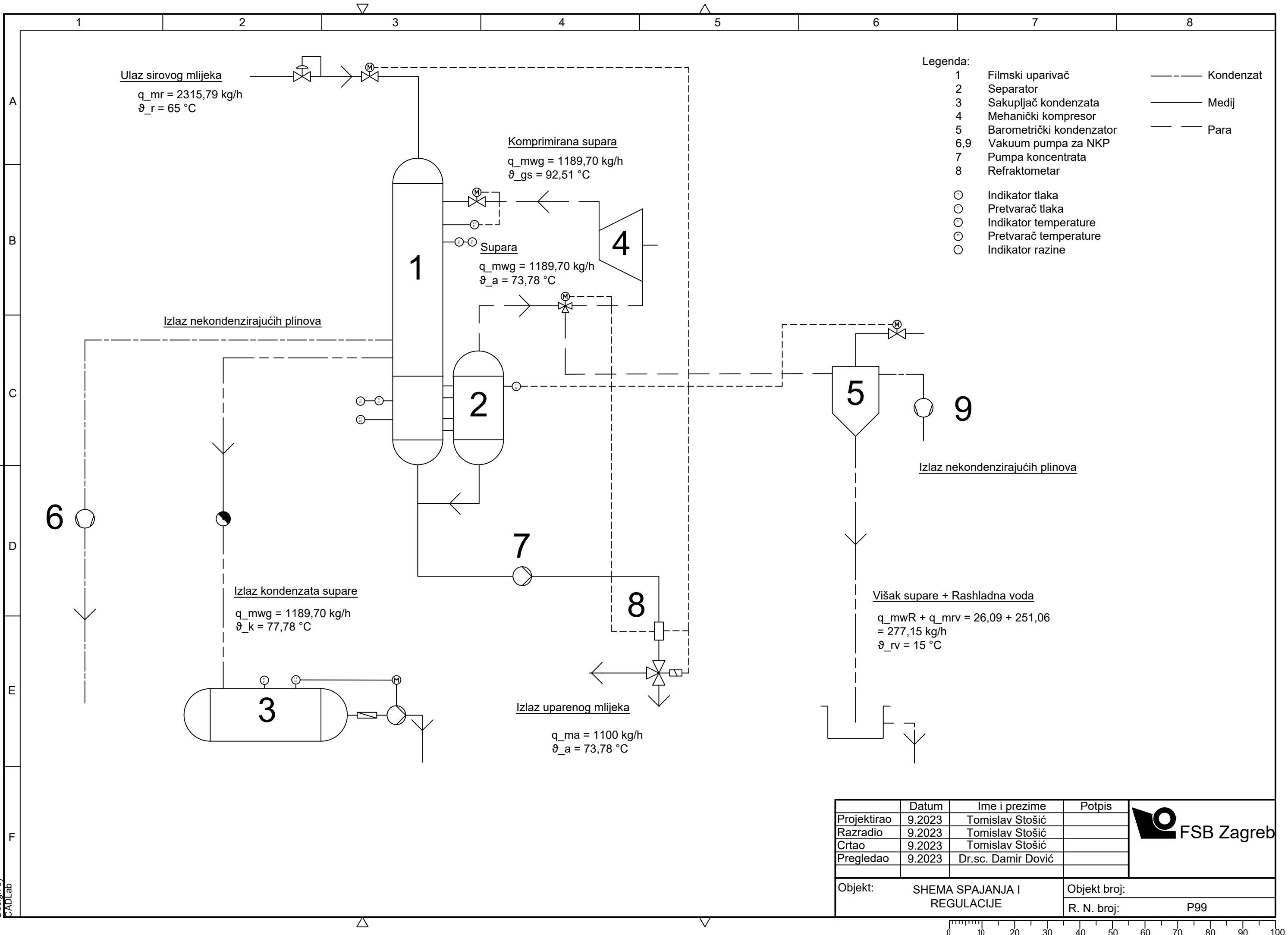
ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Razradio	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Crtao	18.9.2023. Tomislav Stošić		
	Pregledao	18.9.2023. Dr. sc. Damir Dović		
ZAVRŠNI RAD				
Materijal: DIN 1.4301			Masa: 24,982 kg	
				Naziv: Distribucijska ploča Pozicija: 26 Format: A3 Listova: 1
Mjerilo: M1 : 5		Crtež broj: P19		



ISO-TOL	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	18.9.2023.	Tomislav Stošić	
Razradio	18.9.2023.	Tomislav Stošić	
Crtao	18.9.2023.	Tomislav Stošić	
Pregledao	22.9.2023.	Dr. sc. Damir Dović	



ZAVRŠNI RAD			
Materijal: DIN 1.4301		Masa: 4,406 kg	
 Mjerilo: M1 : 5	 Naziv: Sekundarna distribucijska ploča		Pozicija: 28
	Crtež broj: P21		Format: A4
			Listova: 1
		List: 1	



- Legenda:**
- 1 Filmski uparivač
 - 2 Separator
 - 3 Sakupljač kondenzata
 - 4 Mehanički kompresor
 - 5 Barometrički kondenzator
 - 6,9 Vakuumpumpa za NKP
 - 7 Pumpa koncentrata
 - 8 Refraktometar
- Indikator tlaka
 - Pretvarač tlaka
 - Indikator temperature
 - Pretvarač temperature
 - Indikator razine
- Kondenzat
 - Medij
 - Para

Projekтирао	Datum	Ime i prezime	Potpis
Razradio	9.2023	Tomislav Stošić	
Crtao	9.2023	Tomislav Stošić	
Pregledao	9.2023	Dr.sc. Damir Dović	

Objekt:	SHEMA SPAJANJA I REGULACIJE	Objekt broj:	
		R. N. broj:	P99

