

# PROJEKTIRANJE I IZRADA KUĆIŠTA MIKRO PLINSKE TURBINE SPM 5

---

**Hajdinjak, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:346036>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-11**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROJEKTIRANJE I IZRADA KUĆIŠTA**

**MIKRO PLINSKE TURBINE SPM 5**

Rijeka, rujan 2024.

Dominik Hajdinjak

0069085676

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni preddiplomski studij strojarstva

Završni rad

**PROJEKTIRANJE I IZRADA KUĆIŠTA MIKRO PLINSKE  
TURBINE SPM 5**

Mentor: Prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Rijeka, rujan 2024.

Dominik Hajdinjak

0069085676

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZVEDBI RADA

Izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod nazivom: „Kućište mikro plinske turbine SPM 5“ uz pomoć navedene literature u sklopu završnog rada te uz stručnu pomoć i pod nadzorom mentora izv. prof. dr. sc. Tomislava Senčića.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Senčiću na pruženom znanju tijekom studija, kao i na korisnim savjetima, potpori i motivaciji za vrijeme izrade završnoga rada.

Zahvaljujem se i svojim roditeljima i sestri na njihovoj velikoj podršci tijekom studiranja. Hvala i svim mojim prijateljima, te kolegama s posla koji su bili uz mene i učinili moj studentski život nezaboravnim.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. MIKRO PLINSKA TURBINA .....	2
2.1. Ključne značajke i primjene mikro plinskih turbina .....	2
2.2. Dijelovi mikro plinske turbine .....	3
2.2.1. Kompresor .....	3
2.2.2. Komora izgaranja .....	4
2.2.3. Turbina .....	6
3. MIKRO PLINSKA TURBINA SPM5 .....	8
3.1. Tehnički opis .....	8
3.1.1. ECU .....	10
3.1.2. GSU .....	10
3.1.3. Spojke .....	12
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN MIKRO PLINSKE TURBINE .....	14
5. KUĆIŠTE MIKRO PLINSKE TURBINE .....	23
5.1. Zadaci zaštitnoga kućišta .....	23
5.2. Određivanje dimenzija kućišta i predmontaža .....	24
5.3. Postupak izrade kućišta .....	25
5.3.1. Korišteni materijali .....	25
5.3.2. Korišteni strojevi .....	27
5.3.3. Postupak izrade .....	29
5.3.4. Dijelovi kućišta .....	30
6. ZAKLJUČAK .....	35
7. LITERATURA .....	36
8. SAŽETAK .....	38
9. POPIS PRILOGA .....	39

## 1. UVOD

Toplinski su strojevi neizostavna potreba ljudske civilizacije. Njihov zadatak, pretvorba kemijske energije goriva u mehanički rad, olakšao je i ubrzao čovjekov život. Osnovna podjela toplinskih strojeva je na pogonske strojeve i radnje strojeve. Također, moguća je podjela i po principu rada, točnije volumetrijski i dinamički strojevi. Toplinski strojevi koje svakodnevno koristimo su strojevi poput klipnog motora s unutarnjim izgaranjem ili kompresora.

Udaljimo li se od laičkog pogleda na promet i zastarjelu industriju, susresti ćemo mnogo kompleksnije strojeve. Plinska turbina je toplinski stroj koji nam i nije svakodnevno „na dohvat ruke“, a često smo energijski opskrbljeni zahvaljujući njoj. Plinska turbina je motor s unutarnjim izgaranjem. Glavni dijelovi plinske turbine su kompresor koji usisava i tlači zrak te komora izgaranja u kojoj stlačeni zrak iz kompresora uz gorivo ekspandira te plinovi izgaranja predaju svoju kinetičku energiju lopaticama same turbine. Neke od prednosti plinskih turbina su mala masa naspram specifične snage, korištenje različitih goriva, niska cijena po kilovatu snage i mnoge druge. Moguće mane su nizak stupanj djelovanja, veliki gubici i opterećenja, visoke temperature i visok broj okretaja koji je često nepotreban te ga je potrebno reducirati reduktorom.

Mikro plinske turbine su manje izvedbe standardnih plinskih turbina, ali izlazna snaga je u intervalu od 1 kW do 200 kW. Smanjenjem dimenzija stroja pada i iskoristivost, no maksimalna brzina okretaja pogonskog vratila iznosi čak 120 000 okretaja u minuti.

Za potrebe pisanja ovog rada izrađen je tehnički opis i termodinamički proračun mikro plinske turbine Jet Cat SPM5. Osmišljeno je i projektirano kućište probnog stola koji omogućuje zaštitu od buke, izlaz ispušnih plinova, usis zraka te pristup turbini. Izrađen je sklopni nacrt kućišta sa probnim stolom te potrebni radionički nacrti kućišta.

## **2. MIKRO PLINSKA TURBINA**

Mikro plinska turbina vrsta je plinskoturbinskog motora koji je dizajniran za relativno malu proizvodnju energije ili pogonske primjene. Za razliku od velikih industrijskih plinskih turbina koje se koriste u elektranama i zrakoplovstvu, mikro plinske turbine obično se koriste u decentraliziranoj proizvodnji električne energije, kogeneraciji (kombinirana toplina i energija) i određenim primjenama u zrakoplovstvu.

### **2.1. Ključne značajke i primjene mikro plinskih turbina**

Mikro plinske turbine karakterizira njihova mala fizička veličina i manja izlazna snaga u usporedbi s većim plinskim turbinama. Često se smatraju prikladnima za distribuiranu proizvodnju energije. Koriste se za proizvodnju električne energije za razne primjene, kao što su stambena, komercijalna i industrijska proizvodnja električne energije. Mogu se koristiti kao samostalni generatori ili kao dio kombiniranog sustava topline i električne energije, gdje se otpadna toplina iz ispušnih plinova turbine hvata i koristi za grijanje ili hlađenje.

Kogeneracijski sustavi s mikro plinskim turbinama daju i električnu i toplinsku energiju, povećavajući ukupnu energetska učinkovitost iskorištavanjem otpadne topline koja bi inače bila izgubljena.

Mikro plinske turbine nalaze primjenu u industrijama poput nafte i plina, proizvodnje i podatkovnih centara, gdje pouzdana proizvodnja električne energije i toplinske energije na licu mjesta može biti korisna.

Koriste se u malim zrakoplovnim aplikacijama, uključujući bespilotne letjelice zbog svoje kompaktne veličine i male težine.

Dok pojedinačne mikro plinske turbine mogu imati nižu učinkovitost u usporedbi s većim turbinama, njihova prednost leži u njihovoj sposobnosti da na licu mjesta daju snagu i toplinu uz manje gubitke prijenosa.

Mogu raditi na različitim gorivima, uključujući prirodni plin, dizel, zrakoplovni kerozin, pa čak i biogoriva, pružajući fleksibilnost u odabiru goriva na temelju dostupnosti i cijene.

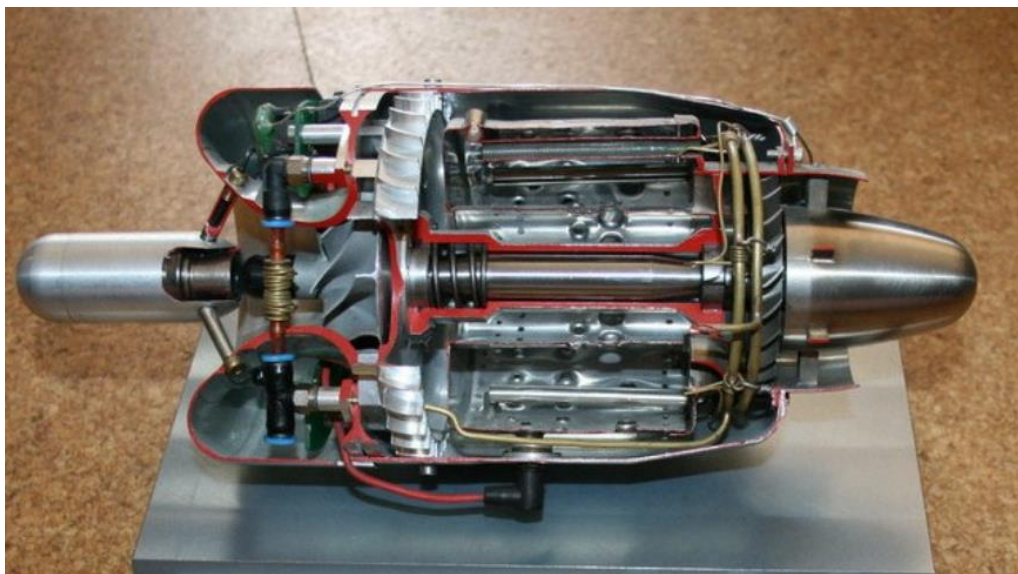
Što se tiče utjecaja na okoliš, mikro plinske turbine mogu imati niže emisije u usporedbi s konvencionalnim motorima s unutarnjim izgaranjem, osobito kada rade pri stalnom opterećenju.



Njihova vrijednost je značajna u udaljenim područjima ili područjima izvan mreže gdje je pristup pouzdanoj električnoj mreži ograničen.

## 2.2. Dijelovi mikro plinske turbine

Mikro plinska turbina sastoji se od triju glavnih dijelova. Redoslijedom kako se kreće fluid to su kompresor, komora izgaranja i turbina. Na Slici 2.1. [1] presjeka plinske turbine moguće je vidjeti i ostale dijelove.



*Slika 2.1. Presjek mikro plinske turbine*

Kao i u svakom toplinskom stroju u kojem se odvija izgaranje, i u mikro plinskoj turbini potreban je pomoćni sustav kako bi funkcionirala.

### 2.2.1. Kompresor

Kompresor je radni stroj koji usisava plin te mu povećava tlak. Kompresori se mogu podijeliti na dinamičke i volumetrijske.

U dinamičke kompresore ubrajaju se:

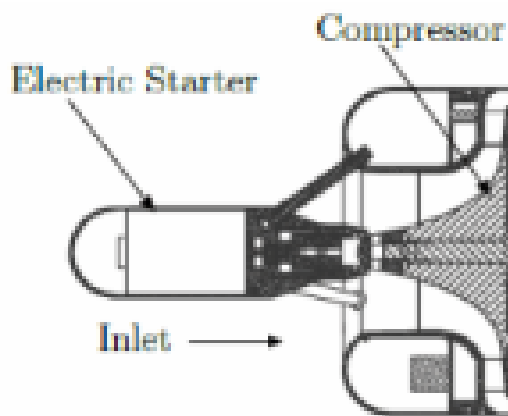
- ejektor

- radijalni i
- aksijalni kompresori.

Volumetrijski kompresori dijele se na:

- rotorne i
- stapne kompresore.

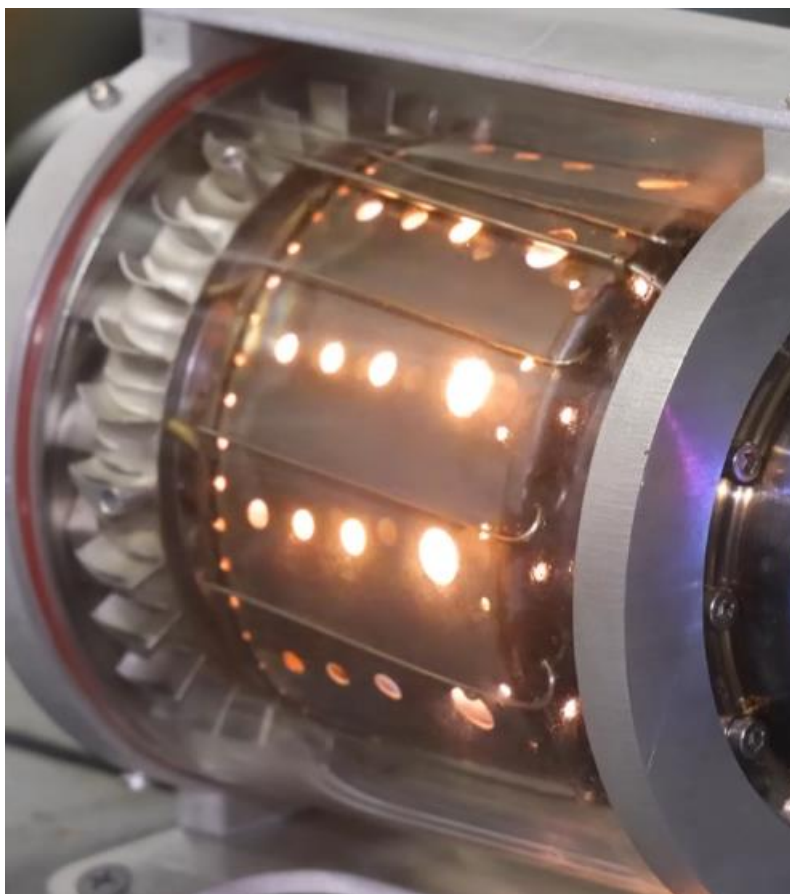
Vrsta kompresora kod mikro plinske turbine SPM5 je radijalni kompresor. Nalazi se na samom početku plinske turbine te usisava zrak iz atmosfere. Usisavajući zrak, podiže mu tlak te ga šalje u komoru izgaranja [2]. Slika 2.2. [3] predstavlja ilustraciju presjeka ulaznog dijela mikro plinske turbine.



*Slika 2.2. Ilustracija presjeka ulaznog dijela mikro plinske turbine*

### 2.2.2. Komora izgaranja

U komori izgaranja odvija se termodinamički proces. Zrak stlačen pomoću radijalnog kompresora ulazi u komoru izgaranja te se tako miješa s gorivom. Gorivo izgara, plinovi izgaranja ekspaniraju te strujanjem kroz turbinu predaju energiju lopaticama. Na Slici 2.3. [4] vidljiv je presjek stvarne komore izgaranja.



*Slika 2.3. Presjek stvarne komore izgaranja*

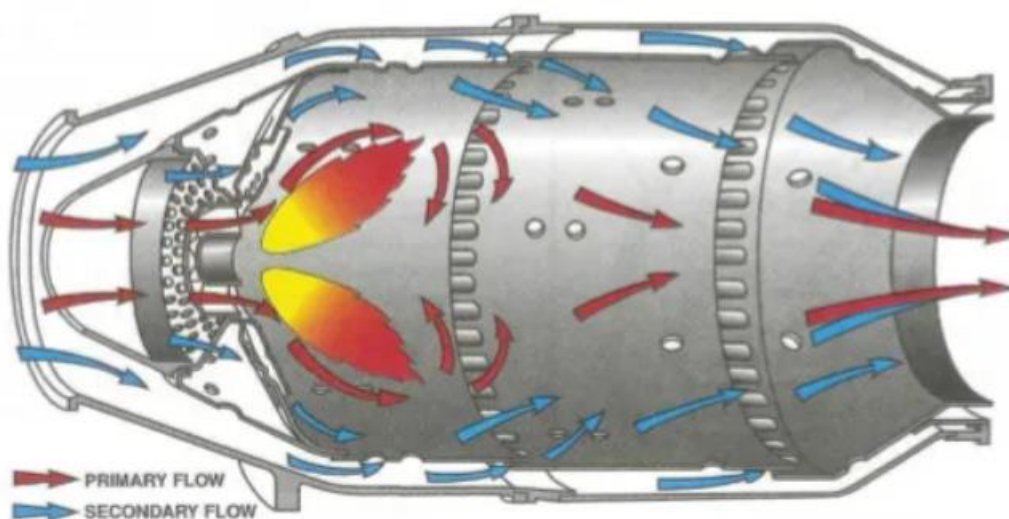
Vrlo je važno miješanje zraka sa samim gorivom. Kod motora s unutarnjim izgaranjem to se izvodi uz pomoć rasplinjača, a kasnije injektorima. Kod plinske turbine taj se proces izvodi uz pomoć oblika same komore izgaranja. Zrak koji napušta stražnji dio visokotlačnog kompresora ima preveliku brzinu za izgaranje. Difuzorski dio nakon kompresora smanjuje brzinu zraka prije ulaska u komoru za izgaranje, što je i dalje prebrzo. Ulaskom zraka u komoru, on se dijeli na primarni, sekundarni i tercijarni tok. Primarni zrak (oko 18 %) ulazi u cijev plamena, dok ostatak prolazi između cijevi plamena i vanjskog kućišta.

Primarni zrak prolazi kroz zone smanjenja brzine i vrtložne lopatice, što stvara nisku brzinu zraka koja omogućuje stabilno izgaranje. Sekundarni zrak (oko 20 %) ulazi kroz otvore uz primarnu zonu, potpomažući potpuno izgaranje goriva. Konačno, tercijarni zrak hladi plinove prije ulaska u turbinu.

Komora se dijeli na dva kanala za primarni i sekundarni zrak. Njihov je zadatak smanjiti brzinu strujanja zraka kako bi mogli izvesti miješanje s gorivom. Primarni zrak prolazi kroz tako oblikovane rešetke stvarajući vrtlog. Sekundarni zrak koji struji po oplošju komore izgaranja izlazi

iz kanala te se miješa s primarnim zrakom. Takvo miješanje struja primarnog i sekundarnog zraka smanjuje brzinu strujanja sveukupnog zraka te je pogodno za dodavanje samog goriva.

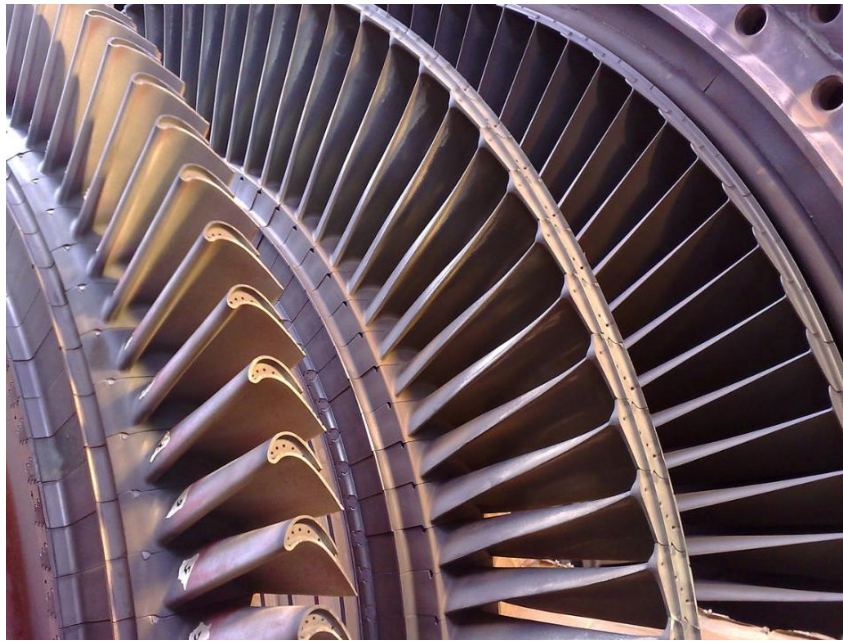
Nakon paljenja gorive smjese, čiji plinovi izgaranja dostižu temperature i više od tališta samog materijala komore izgaranja i lopatica turbine, potrebno je osigurati da plamen i plinovi izgaranja ne dotiču površinu stjenke komore i lopatica. Za to je zaslužan sekundarni zrak. On izlazi iz kanala strujeći i stvarajući film između površine stjenke i plamena [2]. Na Slici 2.4. [5] ilustriran je tok strujanja zraka u komori izgaranja.



*Slika 2.4. Ilustracija toka strujanja zraka u komori izgaranja*

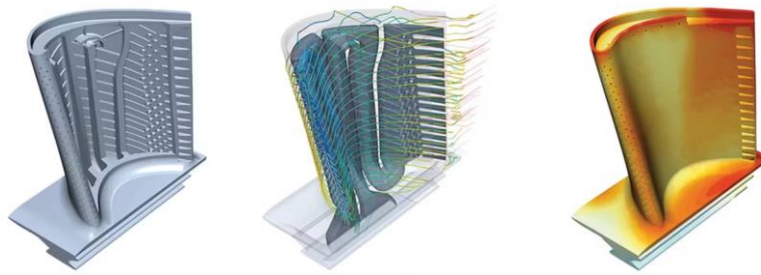
### 2.2.3. Turbina

Turbina je toplinski stroj koji pretvara energiju fluida u mehanički rad. Prolaskom fluida kroz lopatice statora i rotora ostvaruje se pokretanje lopatica, točnije vratila. Na drugom kraju vratila je rotor kompresora. Riječ je o zatvorenom krugu u kojem kompresor tlači zrak u komoru izgaranja, a komora izgaranja stvara plinove izgaranja koji pokreću turbinu. Slika 2.5. prikazuje lopatice rotora [6].



*Slika 2.5. Lopatice rotora*

Temperatura plinova izgaranja viša je od temperature tališta materijala od kojeg je izrađena turbina. Posebna izvedba izrade lopatica omogućila je da plinovi izgaranja uopće ne dolaze u kontakt s površinom stjenke. To je izvedeno tako da kroz lopatice prolaze kanali kroz koje struji zrak sve do površine te stvara tanki film oko lopatice [2]. Slika 2.6. prikazuje presjek lopatice rotora [7].



*Slika 2.6. Presjek lopatice rotora*

### 3. MIKRO PLINSKA TURBINA SPM5

SPM5 je, između ostalog, mikro plinska turbina projektirana za pokretanje brodova na daljinsko upravljanje. Slika 3.1. prikazuje mikro plinsku turbinu JatCat SPM5 [8].



*Slika 3.1. Mikro plinska turbina JatCat SPM 5*

#### 3.1. Tehnički opis

Turbina proizvodi veliku snagu u odnosu na njene male dimenzije i masu. Glavni dijelovi su elektromotor koji pokreće vratilo na kojem su rotor kompresora, a na drugom kraju turbina pokretana plinovima izgaranja. Ova plinska turbina ima dvije neovisne turbine (nisu spojene vratilom). Gore spomenuta se koristi za pokretanje kompresora dok druga turbina na izlaznom vratilu pokreće reduktor. Gotovo sva energija pokretanja dolazi iz komore izgaranja, osim kod startanja kada koristimo elektromotor. Reduktor koristimo kako bismo smanjili nepotrebno veliki

broj okretaja izlaznog vratila te povećali moment. Iako malo kućište daje prednost kod ugradnje, ipak ima i mane kao što su prekomjerno zagrijavanje dijelova [2].

Karakteristike SPM5 su [9]:

- snaga: približno 6 kW
- masa: 2,9 kg (težina: 650 g, ne uključuje ECU, ventile, bateriju, kablove i crijeva)
- dužina: 375 mm
- visina: 160 mm
- širina: 100 mm
- promjer: 83 mm
- brzina: 50 000 - 175 000 okr/min
- izlazna brzina: 25 000 okr/min
- izlazna temperatura: 480...730 °C
- potrošnja goriva: približno 260 ml/min
- gorivo: kerozin
- podmazivanje: 5 % sintetičkog ulja u gorivu
- omjer reduktora: 3,6:1.

Za funkcionalnost plinske turbine je potreban još niz ostali komponenti.

Komponente su:

- spremnik plinskog goriva
- filteri
- elektromagnetski ventil
- plinska turbina
- elektromotor
- reduktor
- dovod kerozina
- upravljačko računalo ECU V6.0
- pumpa goriva
- litijaska baterija
- upravljačka jedinica GSU

### 3.1.1. ECU

ECU (Electronic Control Unit) je glavna upravljačka komponenta. ECU pomoću senzora spojenih na turbinu i na njene priključne komponente prikuplja podatke te ujedno i upravlja plinskom turbinom. Senzori mjere brzinu vrtnje, temperaturu ispušnih plinova te kontroliraju elektromagnetski ventil goriva i pumpu goriva čime se upravlja količinom ubrizgavanja goriva. Slika 3.2. prikazuje ECU V6.0 [10].

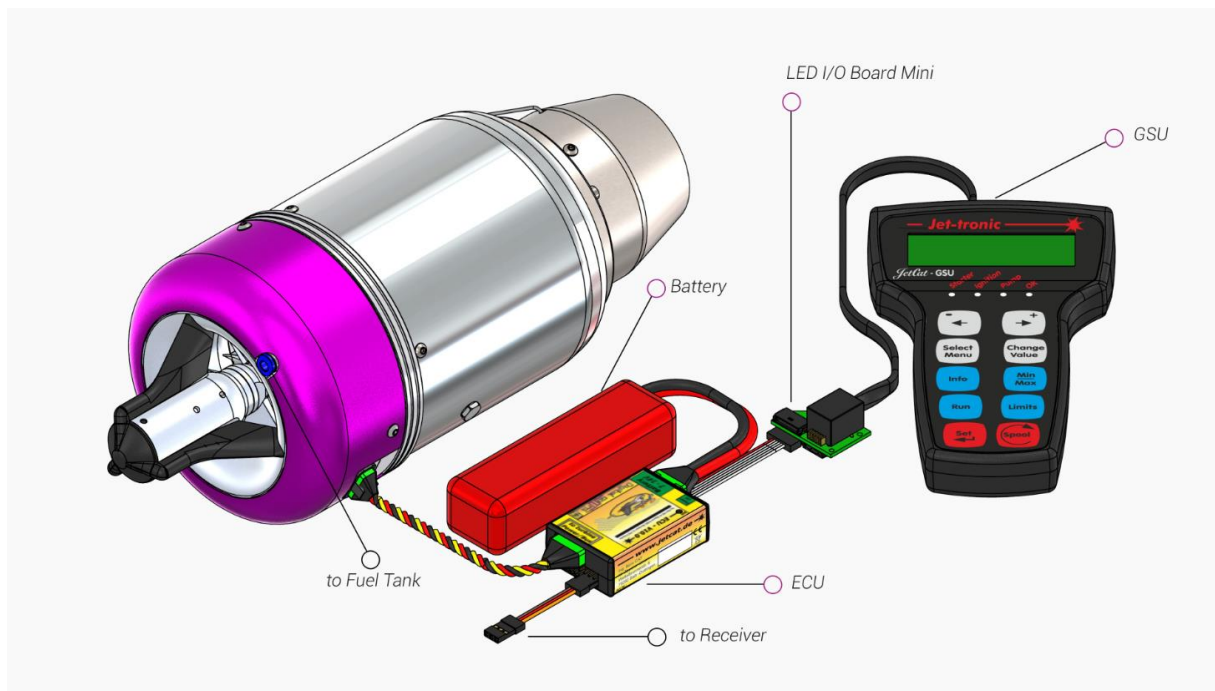


Slika 3.2. ECU V6.0

### 3.1.2. GSU

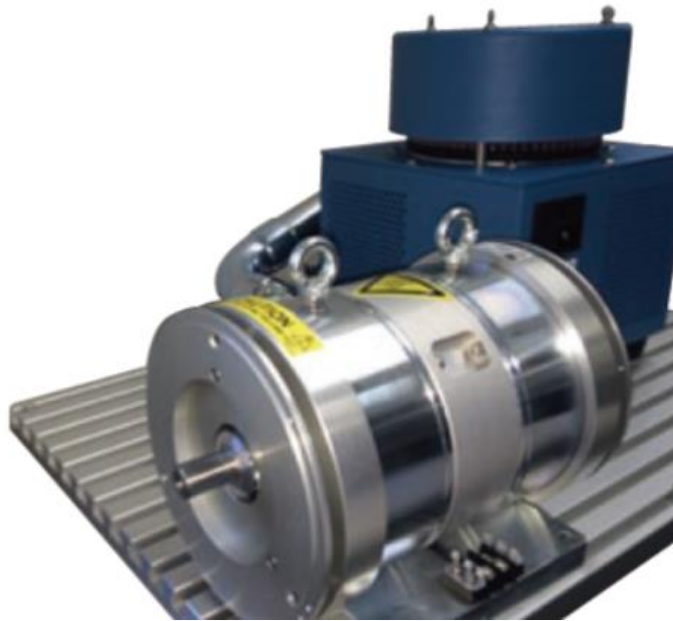
GSU (Ground Support Unit) je digitalni upravljač koji prikazuje i upravlja radnim parametrima koje dobiva od ECU-a. GSU upravlja ECU-om koji dalje upravlja samom turbinom. Na displeju možemo očitati: temperaturu, okretaje i napon baterije [9]. Slika 3.3. prikazuje spajanje GSU-a i ECU-a [11].





*Slika 3.3. Prikaz spajanja GSU-a i ECU-a*

Kada je riječ o izlaznoj snazi i momentu plinske turbine, misli se na izlazno vratilo. Ono mora imati sustav kočenja kako bi imalo otpor i sigurnost funkcioniranja turbine. U ovom slučaju na izlazno vratilo ugrađena je histerezna kočnica. Ona radi na principu magnetskog polja. Sastoji se od: glavčine, rotora, statora, vratila, ležajeva, zavojnice. Kočnica se aktivira pomoću električne struje preko elektromagneta. Zbog nastalog elektromagnetskog polja rotor se opire rotiranju. Kočnica je namijenjena brzinama vrtnje do 12000 okr/min dok je brzina vrtnje izlaznog vratila veća, oko 19400 okr/min. Kako bi izlaznom vratilu smanjili brzinu, okretanja, ugrađuje se reduktor. Kočnici je ugrađen i sustav hlađenja zrakom [9]. Slika 3.4. prikazuje histereznu kočnicu BHB-24B [12].



*Slika 3.4. Histerezna kočnica BHB-24B*

### 3.1.3. Spojke

Sam sklop plinske turbine i njenih komponenti čine i spojke. Ugrađene su dvije spojke. Prva se nalazi na izlazu iz reduktora plinske turbine i na ulazu u drugi reduktor, dok se druga nalazi na izlazu iz vanjskog neovisnog reduktora i ulaza u histereznu kočnicu. Obje spojke su kandžaste spojke. One su dizajnirane kao spojke opće namjene. U stanju su ublažiti umjereno udarna opterećenja, prigušiti niske razine vibracija i prilagoditi slučajno odstupanje. Slika 3.5. prikazuje kandžaste spojke, a slika 3.6. aluminijsku kandžastu spojku [13].



*Slika 3.5. Kandžaste spojke*



*Slika 3.6. Aluminijaska kandžasta spojka*

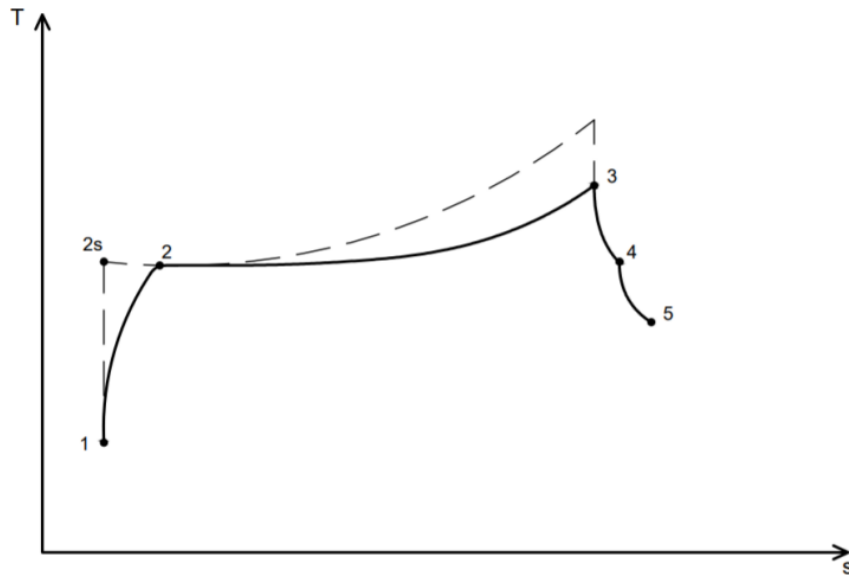
#### 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN MIKRO PLINSKE TURBINE

U katalogu mikro plinske turbine nalaze se podatci za JetCat SPM5 i prikazani su u Tablici 4.1. [8].

Naziv	Oznaka	Veličina	Mjerna jedinica
Minimalna brzina vrtnje prvog vratila	$n_{1,min}$	50000	okr/min
Maksimalna brzina vrtnje prvog vratila	$n_{1,max}$	170000	okr/min
Prijenosni omjer reduktora	$i$	3,6	/
Minimalna brzina vrtnje izlaznog vratila	$n_{2,min}$	3300	okr/min
Maksimalna brzina vrtnje izlaznog vratila	$n_{2,max}$	19400	okr/min
Temperatura izlaznih plinova	$T'_5$	480-730	°C
Omjer tlakova	$\beta$	2	/
Ukupni maseni protok	$\dot{m}$	0,14	kg/s
Snaga na izlaznom vratilu	$P$	6	kW
Okretni moment	$M$	392	Ncm
Minimalna potrošnja goriva	$\dot{m}_{g,min}$	95	ml/min
Maksimalna potrošnja goriva	$\dot{m}_{g,max}$	260	ml/min

Tablica 4.1. Karakteristike mikro plinske turbine JetCat SPM5

Daljnji tijek proračuna vrši se prema zbirci zadataka [14], to jest sukladno Braytonovu otvorenom plinskom ciklusu. Na Slici 4.2. prikazan je T-s dijagram s označenim karakterističnim točkama koje će se odrediti kroz ovaj proračun.



Slika 4.2. T-s dijagram s karakterističnim točkama termodinamičkog procesa

Kompresor usisava zrak sobne temperature i atsfosferskom tlaku koji iznose:

$$T_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

Omjer tlakova je omjer tlaka na ulazu u i na izlazu kompresora:

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$p_2 = \beta \cdot p_1$$

$$p_2 = 2 \cdot 1 = 2 \text{ bar}$$

Za izračun temperature nakon adijabatske ekspanzije potreban je eksponent  $\kappa$ , gdje su  $c_{p,z1}$  specifični toplinski kapacitet zraka a  $R_{p,z}$  plinska konstanta zraka:

$$\kappa = \frac{c_{p,z1}}{c_{p,z1} + R_{p,z}}$$

$$\kappa = \frac{1008}{1008 - 287}$$

$$\kappa = 1,4$$

Temperatura nakon adijabatske ekspanzije:

$$T_{2s} = T_1 \cdot \beta_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_{2s} = 293,15 \cdot 2^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$T_{2s} = 357,35 \text{ K}$$

Za izračun stvarne temperature u točki 2 na izlazu iz kompresora potreban je stupanj djelovanja  $\eta_K$ :

$$\eta_K = 0,78$$

Stvarna temperatura u točki 2 na izlazu iz kompresora:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\varepsilon_K}$$

$$T_2 = 293,15 + \frac{357,35 - 293,15}{0,78}$$

$$T_2 = 375,46 \text{ K}$$

Za izračun tlaka ispušnih plinova nakon komore izgaranja potreban je pretpostavljeni pad tlaka koji iznosi:

$$\Delta p = 17\% = 0,17$$

Izračun tlaka nakon komore izgaranja  $p_3$ :

$$p_3 = p_2 \cdot (1 - \Delta p)$$

$$p_3 = 2 \cdot (1 - 0,17)$$

$$p_3 = 1,66 \text{ bar}$$

Maksimalna potrošnja kerozina  $\dot{m}_g$ :

$$\dot{m}_g = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Izračun masenog protoka potrebnog zraka:

$$\dot{m}_z = \dot{m} - \dot{m}_g$$

$$\dot{m}_z = 0,14 - 3,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\dot{m}_z = 0,136 \text{ kg/s}$$

Za izračun dovedene topline potrebna je donja ogrjevna moć  $H_d$ :

$$H_d = 42,8 \text{ MJ/s}$$

Za izračun dovedene topline gorivom potreban je stupanj djelovanja komore izgaranja:

$$\eta_{KI} = 0,8$$

Izračun topline dovedene gorivom:

$$Q_{dov} = \dot{m}_g \cdot H_d \cdot \varepsilon_{KI}$$

$$Q_{dov} = 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot 42,8 \cdot 0,8$$

$$Q_{dov} = 0,119 \text{ MJ/s}$$

Specifični toplinski kapacitet  $c_{p,z2}$  pri temperaturi od 1100 K:

$$c_{p,z2} = 1155 \text{ J/kgK}$$

Izračun temperature plinova izgaranja na ic<sub>p,z2</sub>zlazu iz komore izgaranja:

$$Q_{dov} = (\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot (T_3 - T_2)$$

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_{dov}}{(\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot c_{p,z2}}$$

$$T_3 = 375,46 + \frac{0,119 \cdot 10^6}{0,14 \cdot 1155}$$

$$T_3 = 1113,2 \text{ K}$$



Snaga kompresora iznosi:

$$P_K = \dot{m}_z \cdot c_{p,z1} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$P_K = 0,136 \cdot 1,008 \cdot (375,46 - 293,15)$$

$$P_K = 11,33 \text{ kW}$$

Preko snage kompresora može se dobiti  $T_4$ :

$$P_K = P_{T1} = (\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot c_{p,dp} \cdot (T_3 - T_4)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{P_K}{(\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot c_{p,dp}}$$

$$T_4 = 1113,2 - \frac{11,33}{0,14 \cdot 1,155}$$

$$T_4 = 1043,15 \text{ K}$$

Plinska konstanta za ispušne plinove  $R_{d,p}$ :

$$R_{d,p} = 287 \text{ J/kg}$$

Adijabatski eksponent ispušnih plinova:

$$\kappa_{d,p} = \frac{c_{p,dp}}{c_{p,dp} + R_{d,p}}$$

$$\kappa_{d,p} = \frac{1155}{1155 - 287}$$

$$\kappa_{d,p} = 1,33$$

Izračun tlaka  $p_4$ :

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{\kappa_{d,p}-1}{\kappa_{d,p}}}$$

$$p_4 = 1,66 \cdot \left(\frac{1043,15}{1113,2}\right)^{\frac{1,33-1}{1,33}}$$

$$p_4 = 1,63 \text{ bar}$$

Tlak ispušnih plinova  $p_5$  na izlazu iz turbine približan je atmosferskom tlaku  $p_1$ :

$$p_5 \approx p_1 = 1 \text{ bar}$$

Izračun izlazne temperature nakon adijabatske ekspanzije:

$$T_{5s} = \frac{T_4}{\left(\frac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{\kappa_{d,p}-1}{\kappa_{d,p}}}}$$

$$T_{5s} = \frac{1043,15}{\left(\frac{1,63}{1}\right)^{\frac{1,33-1}{1,33}}}$$

$$T_{5s} = 924,06 \text{ bar}$$

Stupanj djelovanja turbine  $\varepsilon_T$ :

$$\eta_T = 0,78$$

Izračun izlazne temperature  $T_5$ :

$$T_{5s} = T_4 - (T_4 - T_{5s}) \cdot \eta_T$$

$$T_{5s} = 1043,15 - (1043,15 - 924,06) \cdot 0,78$$

$$T_{5s} = 950,26 \text{ K}$$

Temperatura izlaznih plinova je u intervalu zadanom od strane proizvođača:

$$480 \text{ }^\circ\text{C} < 677 \text{ }^\circ\text{C} < 730 \text{ }^\circ\text{C}$$

Snaga turbine na izlaznom vratilu:

$$P_{T2} = (\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot c_{p,dp} \cdot (T_4 - T_5)$$

$$P_{T2} = 0,14 \cdot 1,155 \cdot (1043,15 - 950,26)$$

$$P_{T2} = 15,02 \text{ kW}$$

Dobivena snaga više nego duplo premašuje vrijednost iz kataloga (6 kW).

Stoga ponavljamo izračun s novim pretpostavljenim stupnjem djelovanja turbine  $\eta_T$ :

$$\eta_T = 0,34$$

Izračun nove izlazne temperature  $T_5$ :

$$T_{5s} = T_4 - (T_4 - T_{5s}) \cdot \varepsilon_T$$

$$T_{5s} = 1043,15 - (1043,15 - 924,06) \cdot 0,34$$

$$T_{5s} = 1002,66 \text{ K}$$

Nova snaga turbine na izlaznom vratilu:

$$P_{T2} = (\dot{m}_z + \dot{m}_g) \cdot c_{p,dp} \cdot (T_4 - T_5)$$

$$P_{T2} = 0,14 \cdot 1,155 \cdot (1043,15 - 1002,66)$$

$$P_{T2} = 6,55 \text{ kW}$$

Nakon nekoliko iteracija, namještanja stupnja djelovanja turbine te daljnjim proračunom snage turbine dobila se snaga približna onoj u katalogu zadanoj od strane proizvođača.

Stupanj iskoristivosti mikro plinske turbine iznosi:

$$\eta = \frac{P_{T2}}{Q_{dov}}$$

$$\eta = \frac{6,55}{0,119 \cdot 10^3}$$

$$\eta = 0,0550$$

$$\eta = 5,50 \%$$

## 5. KUĆIŠTE MIKRO PLINSKE TURBINE

Mikro turbina ugrađena je na pomičnom metalnom stolu. Uz samo plinsku turbinu na postolju su i reduktori, histerezna kočnica, spojke, elektronička instalacija (GSU, ECU, kablovi za povezivanje), dovod goriva i dovod vode. Ranije je rečeno kako se plinska turbina okreće u rasponu od 50 000...175 000 okr/min. Možemo reći da se ne susrećemo svaki dan s takvom brzinom. Na primjer, broj okretaja motora s unutarnjim izgaranjem je u intervalu od 1 000...13 000 okr/min, što je 10 puta manje od plinske turbine.

Iako je izvedba plinske turbine malih dimenzija, ne može se reći kako dijelovi male mase ne predstavljaju opasnost uzme li se u obzir brzina kojom se gibaju.

Kako bi se osobe koje rukuju turbinom donekle zaštitile, osmišljeno je i izrađeno zaštitno kućište. Drugi razlog izrade kućišta je i sama zaštita plinske turbine, njenih dijelova, ponajviše elektroničke instalacije i cijevi za gorivo i vodu od samih promatrača. Instalacije su prilično izložene, a sama površina postolja je gotovo u cijelosti ispunjena komponentama.

### 5.1. Zadatci zaštitnoga kućišta

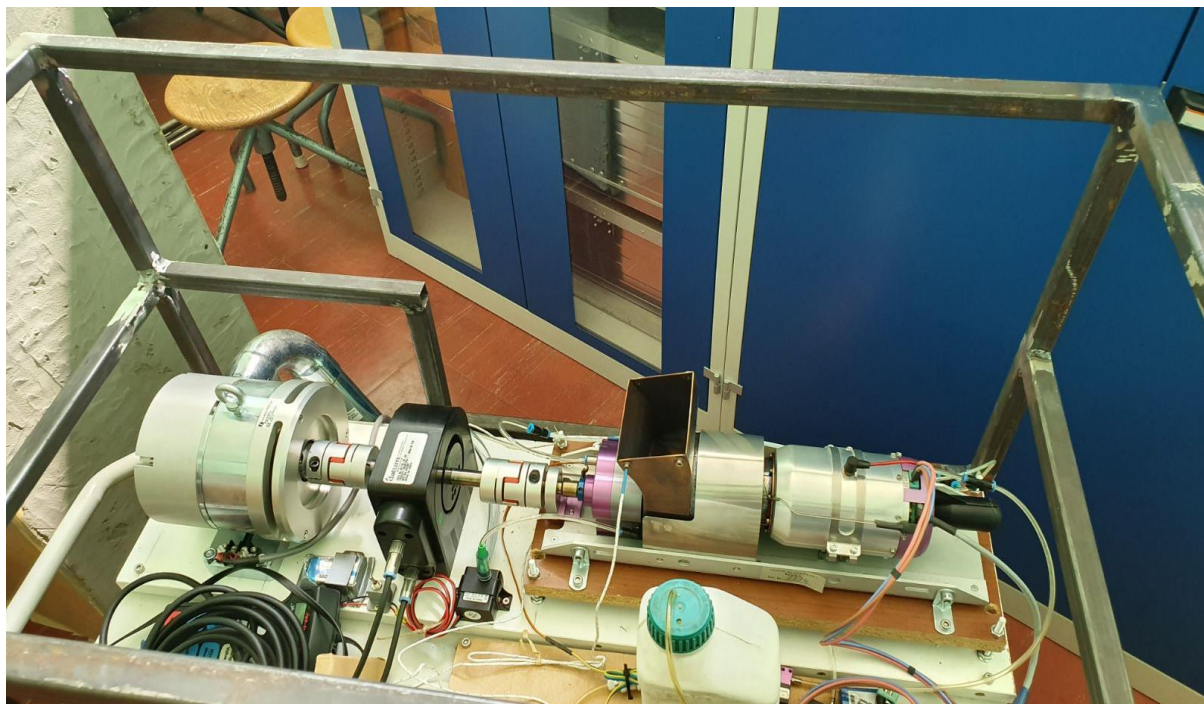
Zaštitno kućište je vrlo korisno te ima višestruke zadatke.

Zadatci zaštitnoga kućišta su:

- zaštita promatrača od mogućih letećih fragmenata tokom havarije
- zaštita same turbine i njenih komponenti
- osigurati mjesta na kućištu za usis i ispuh
- osigurati transparentnost minimalno jedne stranice kućišta
- osigurati ulaze za kablove i cijevi koje se nalaze izvan postolja plinske turbine
- osigurati rastavlјivost, minimalno jedan revizijski otvor.

## 5.2. Određivanje dimenzija kućišta i predmontaža

Prvi korak u izradi kućišta je uzimanje mjera postojećeg stola na kojem se nalazi turbina. Nakon izrade podkonstrukcije (rešetkastog kaveza) predmontiran je isti te su uzete ostale mjere kao što su pozicija otvora za usis, ispuh te cijevi za hlađenje kočnice na stranicama kućišta. Na slici 5.1. prikazana je faza predmontaže podkonstrukcije kućišta.



*Slika 5.1. Predmontaža podkonstrukcije kućišta*

### 5.3. Postupak izrade kućišta

#### 5.3.1. Korišteni materijali

Odabrani materijal za izradu kućišta je čelična cijev kvadratnog oblika, inox cijev fleksibilnog, pocinčani lim i pleksiglas. U tablici 5.2. nalaze se mjere i ukupna količina određenog materijala.

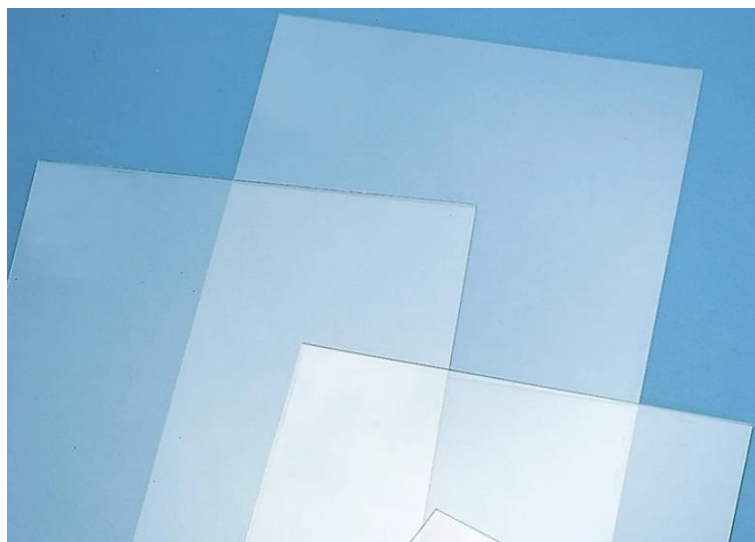
<b>materijal</b>	<b>mjere (mm)</b>	<b>ukupno</b>
kvadratna čelična cijev	20x20x2	12 m
inox cijev fleksibilna (r)	125	1 m
pocinčani lim	4000x1000x2,5	4 m <sup>2</sup>
pleksiglas	1250x500x4	0,6 m <sup>2</sup>

*Tablica 5.2. Korišteni materijali, mjere i ukupna količina materijala*

Na slikama 5.3. [15], 5.4. [16], 5.5. [17] i 5.6. [18] nalaze se korišteni materijali.



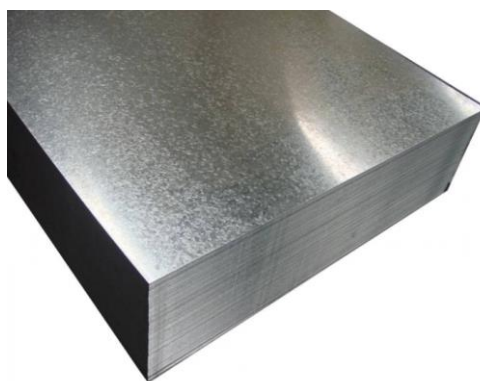
*Slika 5.3. Kvadratna cijev (20x20x2)*



*Slika 5.4. Pleksiglas*



*Slika 5.5. Inoks fleksibilna cijev*



*Slika 5.6. Pocinčani lim*



### 5.3.2. Korišteni strojevi

Strojevi korišteni u izradi kućišta vlasništvo su tvrtke JEDRO d.o.o. smještenoj na Čavlima i nalaze se u pogonu tvrtke.

Strojevi korišteni u izradi su:

- aparat za zavarivanje HUGONG INVERMIG 500 MIG/REL (Slika 5.7.)
- tračna pila ADAL HB 250 C MANUAL (Slika 5.8.)
- hidraulične škare za lim LVD HSL 40/6 (Slika 5.9.)

Fotografije je snimio autor.



*Slika 5.7. Aparat za zavarivanje HUGONG INVERMIG 500 MIG/REL*



*Slika 5.8. Tračna pila ADAL HB 250 C MANUAL*



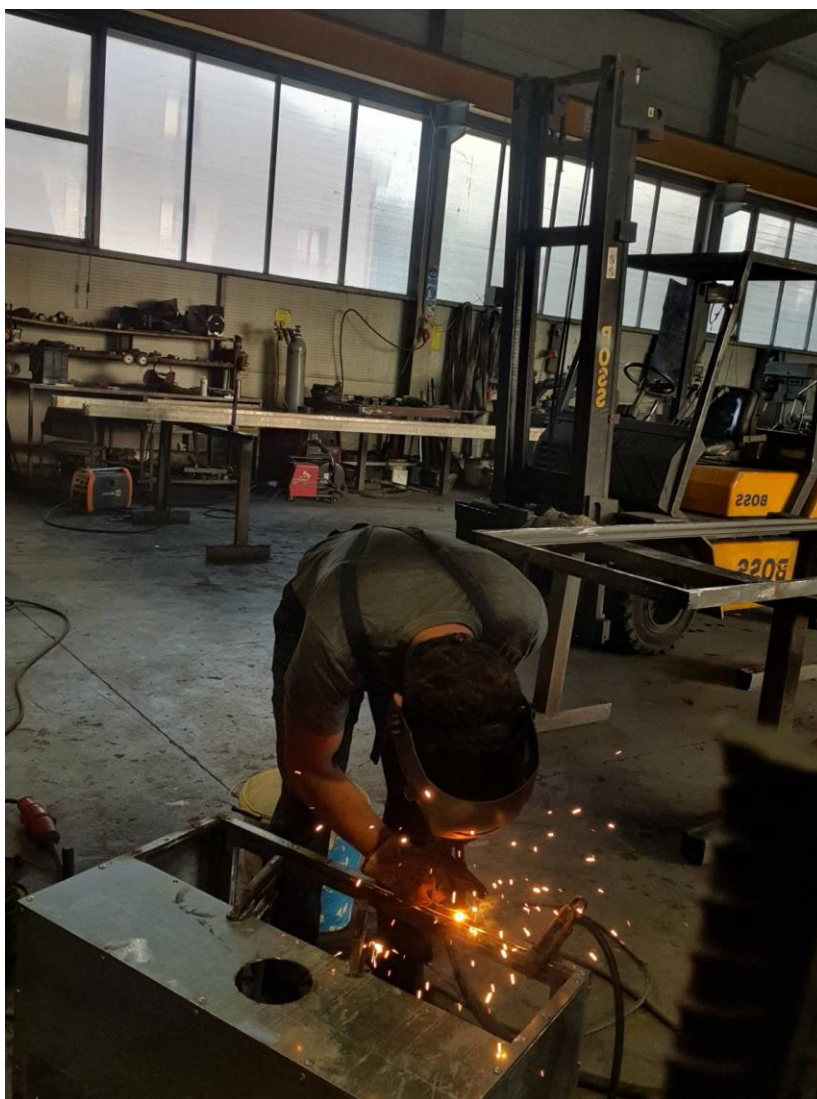
*Slika 5.9. Hidraulična škare za lim LVD HSL 40/6*

### 5.3.3. Postupak izrade

Izrada kućišta provela se u više operacija. U prvoj fazi pristupilo se rezanju cijevi. Cijevi izrezane po mjeri varene su u oblik kvadra čiji su bridovi ujedno i bridovi kućišta. Tako dobivena konstrukcija učvršćuje se varenjem cijevi, horizontalno i vertikalno.

Sljedeća faza je zatvaranje stranica limom te bušenje i rezanje otvora za reviziju, usis, ispuh, cijev za hlađenje kočnice te ugradnja transparentne strane kućišta.

Ostali dijelovi kao što su redukcija za ispuh i ručke za transport također su pričvršćene postupcima rezanja, bušenja i varenja. Na slici 5.10. prikazana je izvedba jedne operacije.



*Slika 5.10. Varenje*

#### 5.3.4. Dijelovi kućišta

Provedenim operacijama izrađeni su sljedeći dijelovi kućišta:

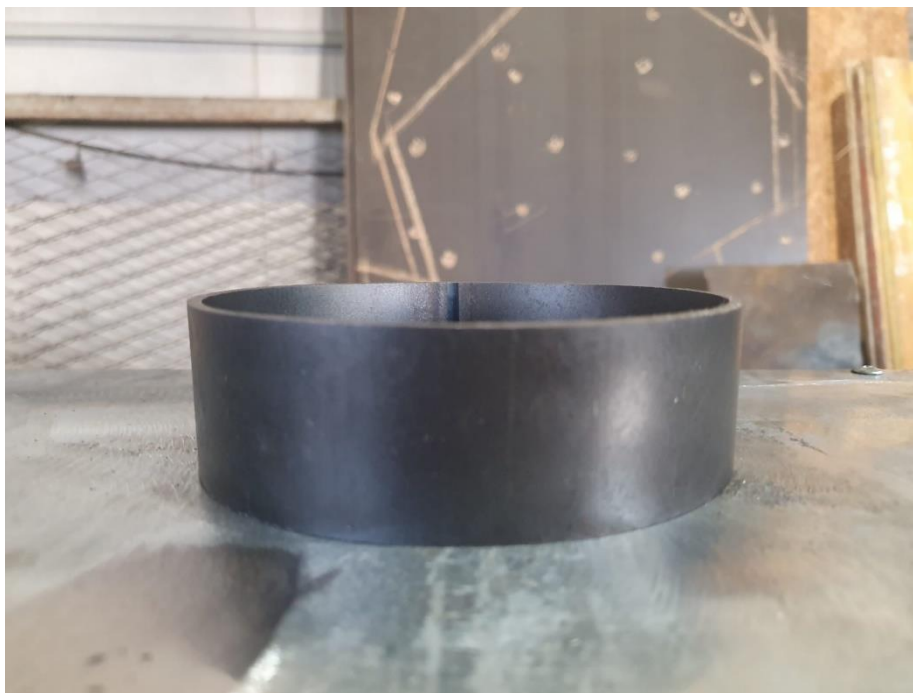
- otvor za usis (slika 5.11.)
- redukcija za auspuh (slika 5.12.)
- izlaz auspuha na vanjskoj strani kućišta (slika 5.13.)
- revizijski otvor (slika 5.14.)
- poklopac revizijskog otvora (slika 5.15.)
- otvor za cijev hlađenja histerezne kočnice (slika 5.16.)
- ručka za transport (slika 5.17.)
- stranica kućišta od pleksiglasa (slika 5.18.)



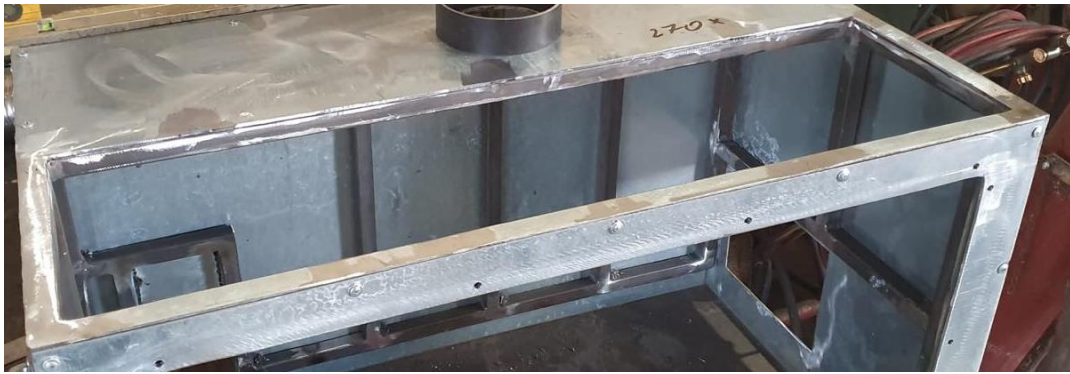
*Slika 5.11. Otvor za usis*



*Slika 5.12. Redukcija za auspuh*



*Slika 5.13. Izlaz auspuha na vanjskoj strani kućišta*



*Slika 5.14. Revizijski otvor*



*Slika 5.15. Poklopac revizijskog otvora*



*Slika 5.16. Otvor za cijev hlađenja histerezne kočnice*



*Slika 5.17. Ručka za transport*



*Slika 5.18. Stranica kućišta od pleksiglasa*



## 6. ZAKLJUČAK

Mikro plinske turbine karakterizira njihova mala fizička veličina i manja izlazna snaga u usporedbi s većim plinskim turbinama. Često se smatraju prikladnima za distribuiranu proizvodnju energije. Koriste se za proizvodnju električne energije za razne primjene, kao što su stambena, komercijalna i industrijska proizvodnja električne energije. Mogu se koristiti kao samostalni generatori ili kao dio kombiniranog sustava topline i električne energije, gdje se otpadna toplina iz ispušnih plinova turbine hvata i koristi za grijanje ili hlađenje.

Mikro plinska turbina sastoji se od triju glavnih dijelova. Redosljedom kako se kreće fluid to su kompresor, komora izgaranja i turbina.

SPM5 je mikro plinska turbina projektirana, između ostalog, za pokretanje brodova na daljinsko upravljanje. Komponente su: spremnik plinskog goriva, filteri, elektromagnetski ventil, plinska turbina, elektromotor, reduktor, dovod kerozina, upravljačko računalo ECU V6.0, pumpa goriva, litijaska baterija i upravljačka jedinica GSU.

Nakon izrade termodinamičkog proračuna zaključuje se kako je stupanj iskoristivosti mikro plinske turbine  $\eta = 5,50 \%$ .

Za potrebe ovog završnog rada osmišljeno je i izrađeno kućište za mikro plinsku turbinu koja se nalazi na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Mikro turbina ugrađena je na pomičnom metalnom stolu, a uz nju su na postolju su i reduktori, histerezna kočnica, spojke, elektronička instalacija (GSU, ECU, kablovi za povezivanje), dovod goriva i dovod vode.

Razlozi izrade kućišta su zaštita osoba koje rukuju turbinom, ali i sama zaštita plinske turbine, njenih dijelova, ponajviše elektroničke instalacije i cijevi za gorivo i vodu od samih promatrača. Instalacije su prilično izložene, a sama površina postolja je gotovo u cijelosti ispunjena komponentama. Provedenim operacijama izrađeni su sljedeći dijelovi kućišta: otvor za usis, redukcija za auspuh, izlaz auspuha na vanjskoj strani kućišta, revizijski otvor, poklopac revizijskog otvora, otvor za cijev hlađenja histerezne kočnice, ručka za transport i stranica kućišta od pleksiglasa.

Prije same montaže kućište je obojano i pripremljeno za proces montaže.

## 7. LITERATURA

- [1] „Cross section of a typical micro turbojet engine (MTE)“, s interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-typical-micro-turbojet-engine-MTE-A-radial-compressor-rotor-B\\_fig1\\_308712590](https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-typical-micro-turbojet-engine-MTE-A-radial-compressor-rotor-B_fig1_308712590), preuzeto 14. 8. 2024.
- [2] Senčić T.: Skripta iz kolegija „Toplinski strojevi i uređaji“
- [3] Large J., Pesyridis, A.: Investigation of Micro Gas Turbine Systems for High Speed Long Loiter Tactical Unmanned Air Systems, Aerospace, svibanj 2019.
- [4] „Watch What Happens Inside a Transparent Jet Engine While It Runs“, s interneta, <https://www.thedrive.com/news/youtuber-builds-a-transparent-jet-engine-to-show-us-how-it-works>, preuzeto 14. 8. 2024.
- [5] „Combustion system — Gas turbine engine“, s interneta, <https://medium.com/@nasermahmud747/combustion-system-gas-turbine-engine-6fb19b5f164c>, preuzeto 14. 8. 2024.
- [6] GlobalSpec, s interneta, [https://www.globalspec.com/learnmore/electrical\\_electronic\\_components/power\\_generation\\_storage/microturbines](https://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/power_generation_storage/microturbines), preuzeto 18. 8. 2024.
- [7] „Simcenter STAR-CCM+ Helps Energy Consultancy Firm Improve Gas Turbine Blade Cooling“, s interneta, <https://www.ascend-tech.com/blog/simcenter-star-ccm-helps-energy-consultancy-firm-improve-gas-turbine-blade-cooling>, preuzeto 18. 8. 2024.
- [8] „SPM5“, s interneta, <https://www.jetcat.de/en/products/>, preuzeto 18. 8. 2024.
- [9] JetCat, katalog, ožujak 2017., <https://www.jetcat.de/jetcat/Kataloge/JetCat%20ENGINES.pdf>
- [10] „ECU V6 Control Electronics“, s interneta, <https://jetcatturbinesamericas.com/products/ecu-v6-control-electronics-1>, preuzeto 18. 8. 2024.
- [11] „GSU-V2“, s interneta, <https://www.jetcat.de/en/products/produkte/jetcat/kategorien/Zubehoer/JetCat%20Elektronik>, preuzeto 19. 8. 2024.
- [12] Ventilator, zrakom hlađena histerezna kočnica "serija BHB", s interneta, [://www.toyo.co.jp/mecha/products/detail/BHB.html](http://www.toyo.co.jp/mecha/products/detail/BHB.html), preuzeto 20. 8. 2024.
- [13] „Kandžasta spojka GE-T, aluminij“, <https://www.haberkorn.com/hr/hr/strojni-elementi/industrijske-spojke/pogonske-spojke/kandzaste-spojke/51504-kandzasta-spojka-ge-t-aluminij/1>, preuzeto 20. 8. 2024.
- [14] Senčić, T.: Toplinski strojevi i uređaji, Zbirka zadataka, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2018.
- [15] Kantoflex kvadratna cijev, s interneta <https://www.bauhaus.hr/kvadratne-cijevi/kantoflex-kvadratna-cijev/p/10527129>, preuzeto 24. 8. 2024.

[16] „PVC ploča“, s interneta, <https://pevex.hr/pvc-ploca-gutta-guttaglis-hobi-staklo-2-0mm-50x125cm>, preuzeto 24. 8. 2024.

[17] „Dimovodna cijev fleksibilna“, s interneta, <https://pevex.hr/dimovodna-cijev-fleksibilna-alfi-130x2500mm>, preuzeto 24. 8. 2024.

[18] „Pocinčani lim“, s interneta, <https://gradja.hr/proizvod/pocincani-lim-2000x1000x055/>, preuzeto 24. 8. 2024.

## 8. SAŽETAK

Završni rad *Projektiranje i izrada kućišta mikro plinske turbine SPM 5* nudi pregled teoretskih znanja o mikro plinskim turbinama s naglaskom na mikro plinsku turbinu SPM5. Objašnjava se pojam, uporaba i primjenjivost mikro plinske turbine, a osim toga izrađen je i termodinamički proračun stupnja iskoristivosti same turbine. Za potrebe ovog završnog rada osmišljeno je i izrađeno kućište za mikro plinsku turbinu koja se nalazi na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Razlozi izrade kućišta su zaštita osoba koje rukuju turbinom, ali i sama zaštita plinske turbine. Provedenim operacijama izrađeni su svi dijelovi kućišta.

Ključne riječi: kućište, plinska turbina, termodinamički proračun, kompresor, komora izgaranja

## SUMMARY

*Designing and manufacturing of the micro gas turbine housing SPM 5* offers an overview of the theoretical knowledge of micro gas turbines with an emphasis on the micro gas turbine SPM5. The term, use and applicability of a micro gas turbine is explained, and in addition, a thermodynamic calculation of the degree of utilization of the turbine itself is made. For the purposes of this final work, a housing for a micro gas turbine, which is located at the Technical Faculty of the University of Rijeka, was designed and built. The reasons for making the housing are the protection of the people who operate the turbine, but also the protection of the gas turbine itself. All parts of the case were made by the performed operations.

Key words: housing, gas turbine, thermodynamic calculation, compressor, combustion chamber

## **9. POPIS PRILOGA**

Prilog 1: Radionički nacrt rešetke usisa

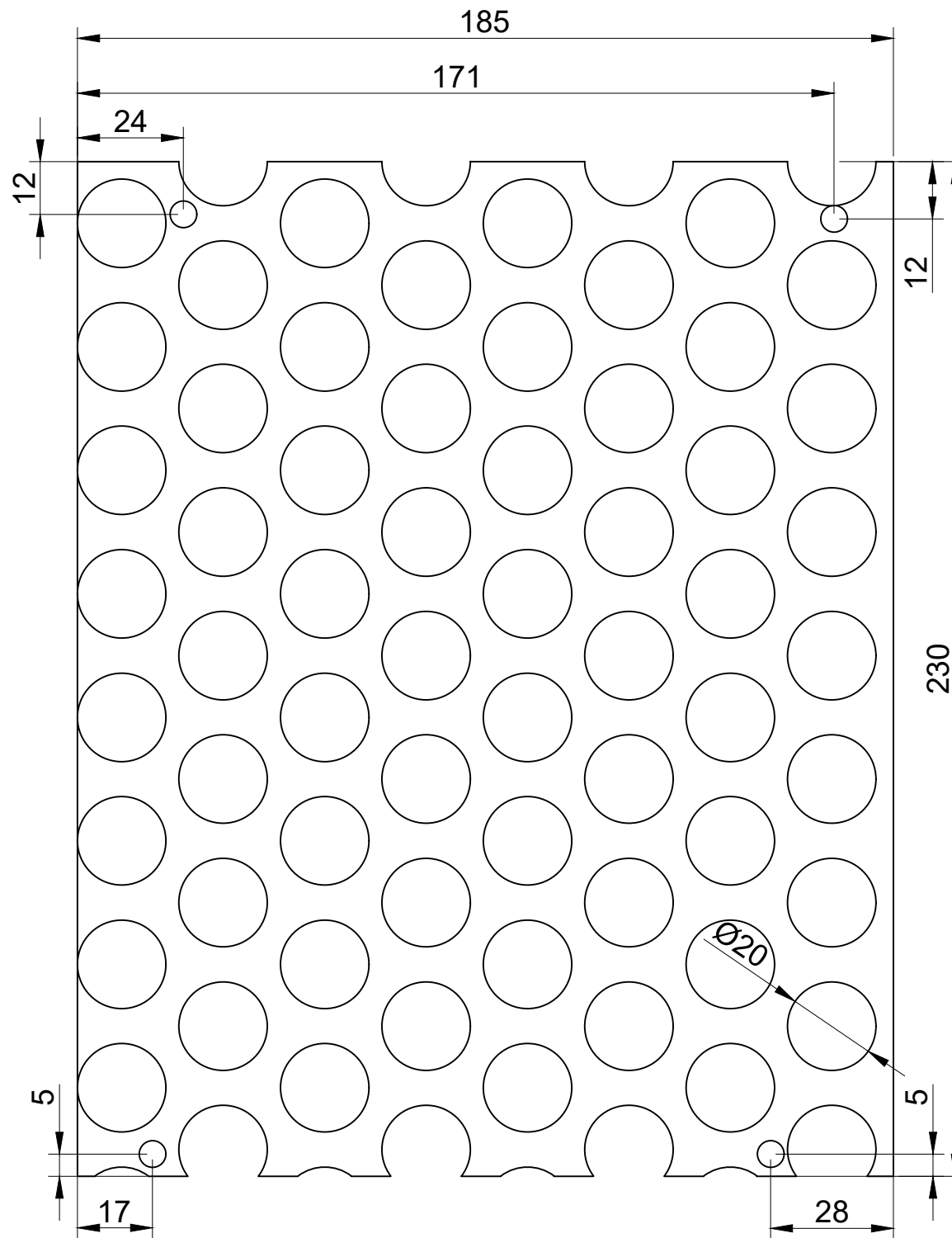
Prilog 2: Radionički nacrt redukcije ispuha

Prilog 3: Radionički nacrt ručke za transport



Prilog 4: Radionički nacrt poklopca revizijskog otvora

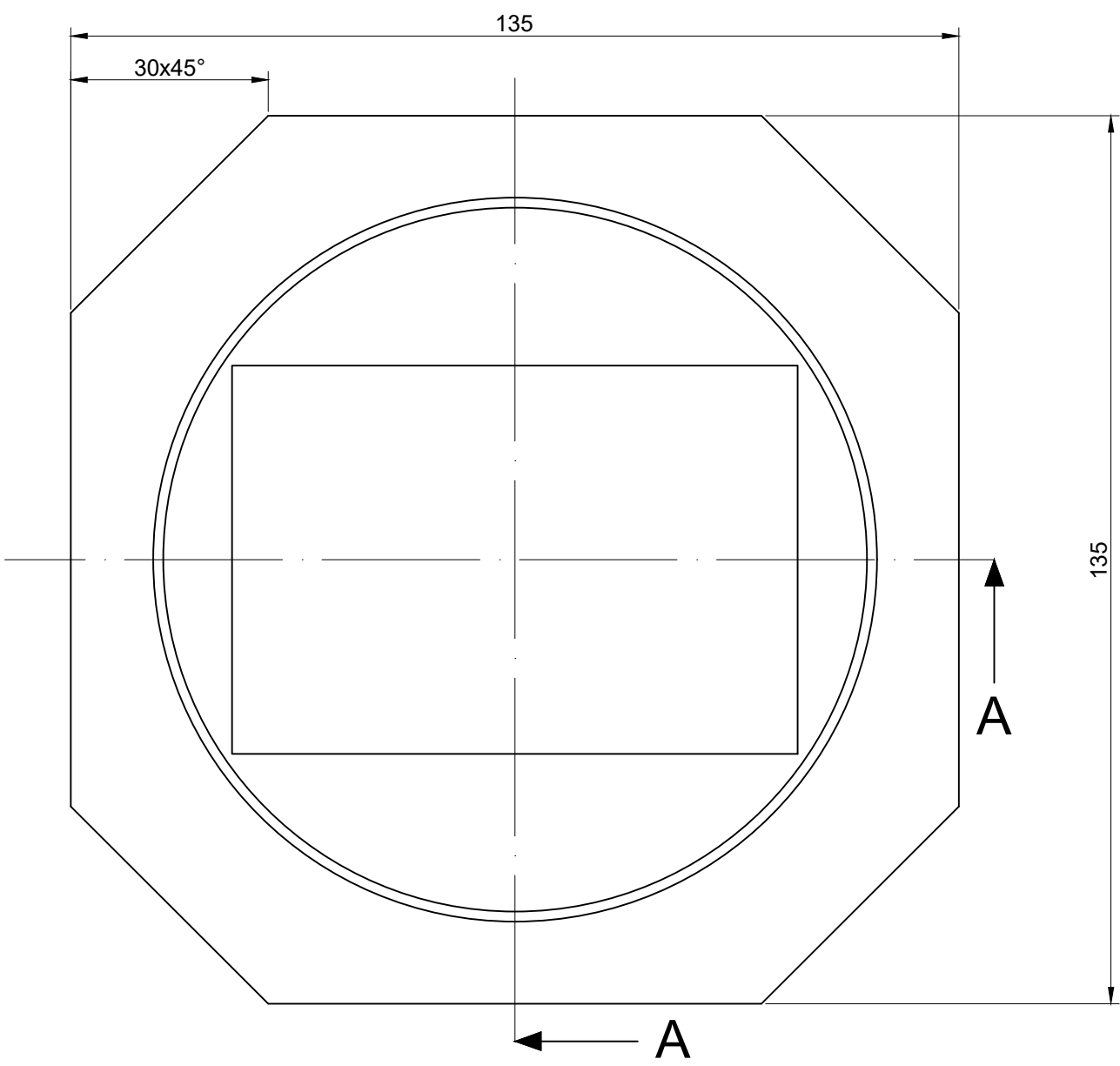
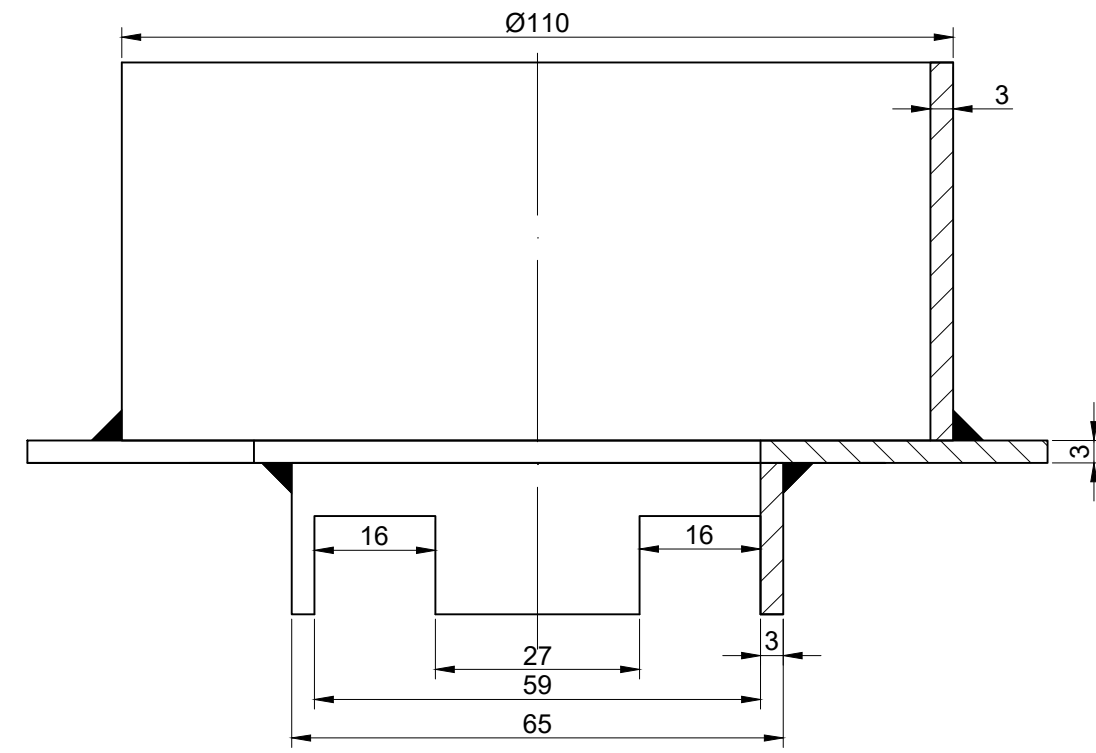
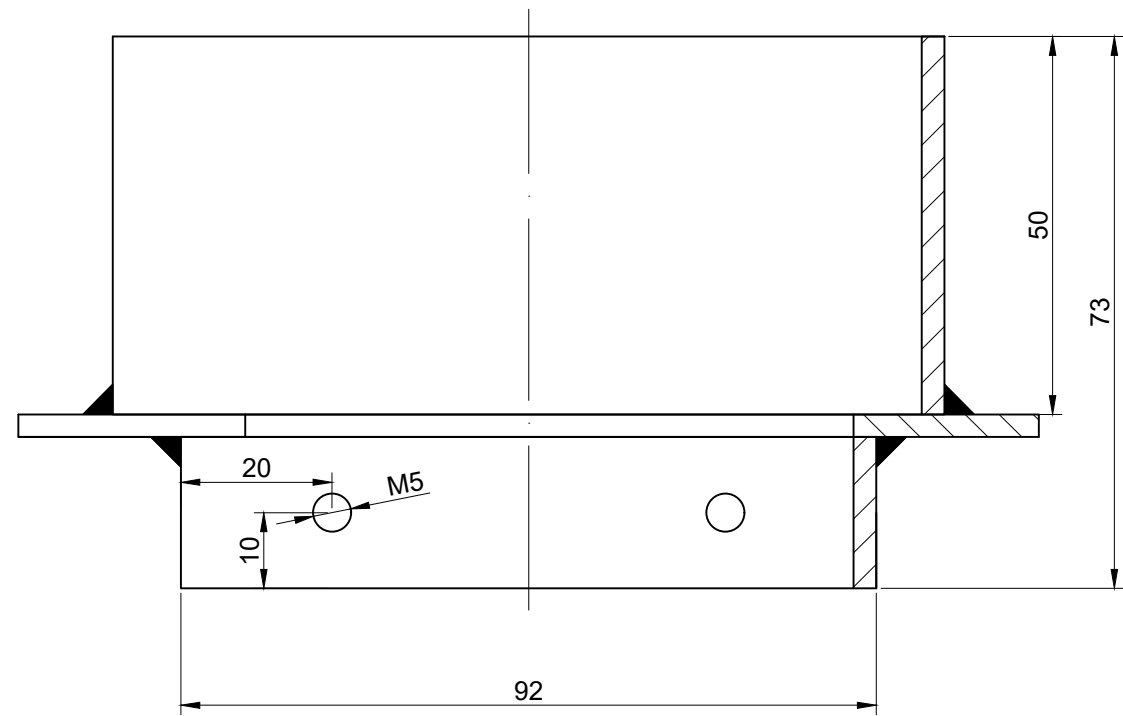
Prilog 5: Radionički nacrt potkonstrukcije

Prilog 6: Sklopni nacrt kućišta


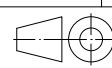


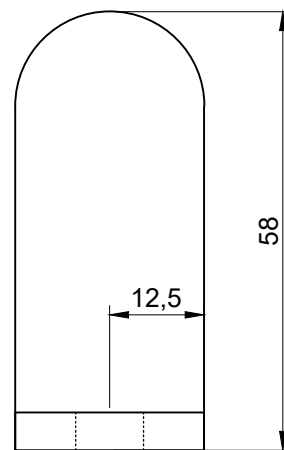
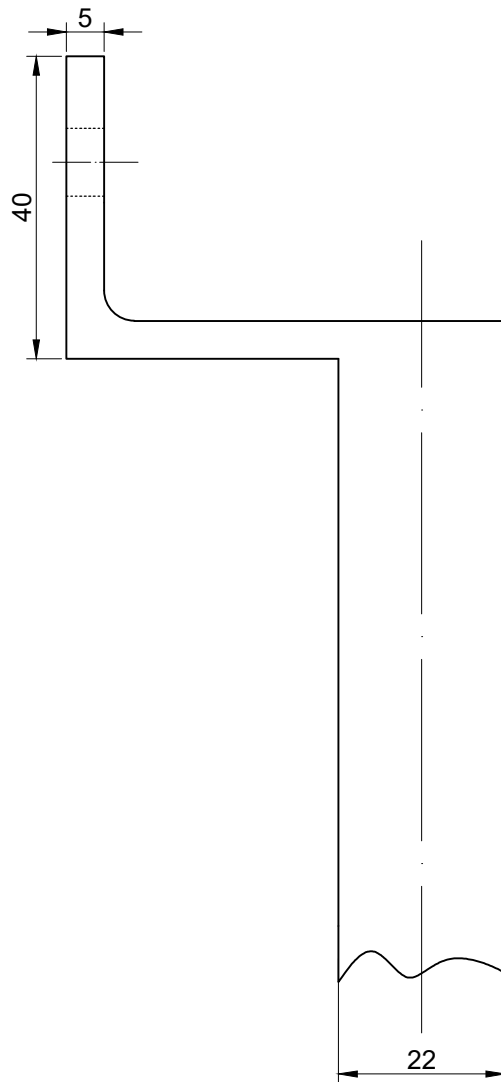
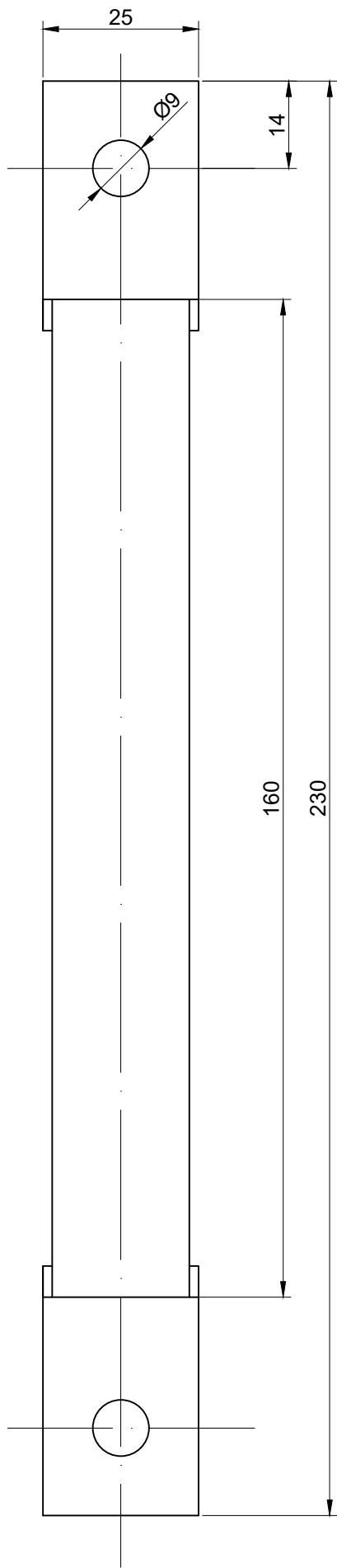
Napomena:  
-Koristiti perforirani lim debline 2,5



	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo:	
Nacrtao:	26.8.2024.	Dominik Hajdinjak		M 1 : 2	
Provjerio:					
Odobrio:					
 <p>Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RIJEKA, Vukovarska 58, HRVATSKA</p>		Označavanje zavora:	Površinska hrapavost:	Akad. god.: 2024.	
	Naziv dijela:	Rešetka usisa		Broj crteža: 1	List/listova:
				Program broj:	Format: A4



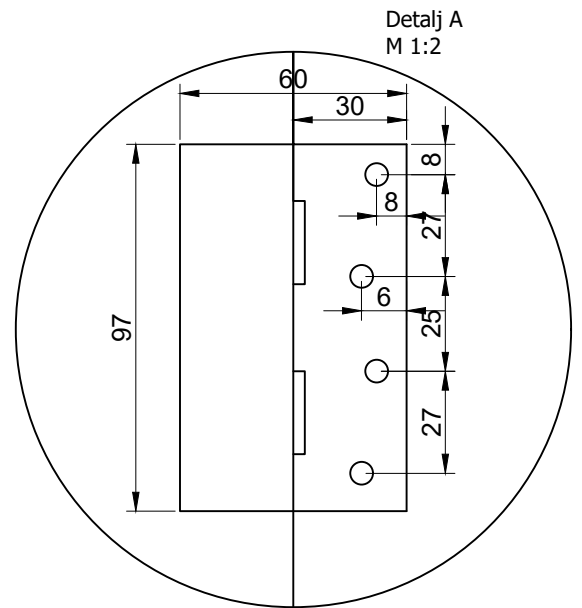
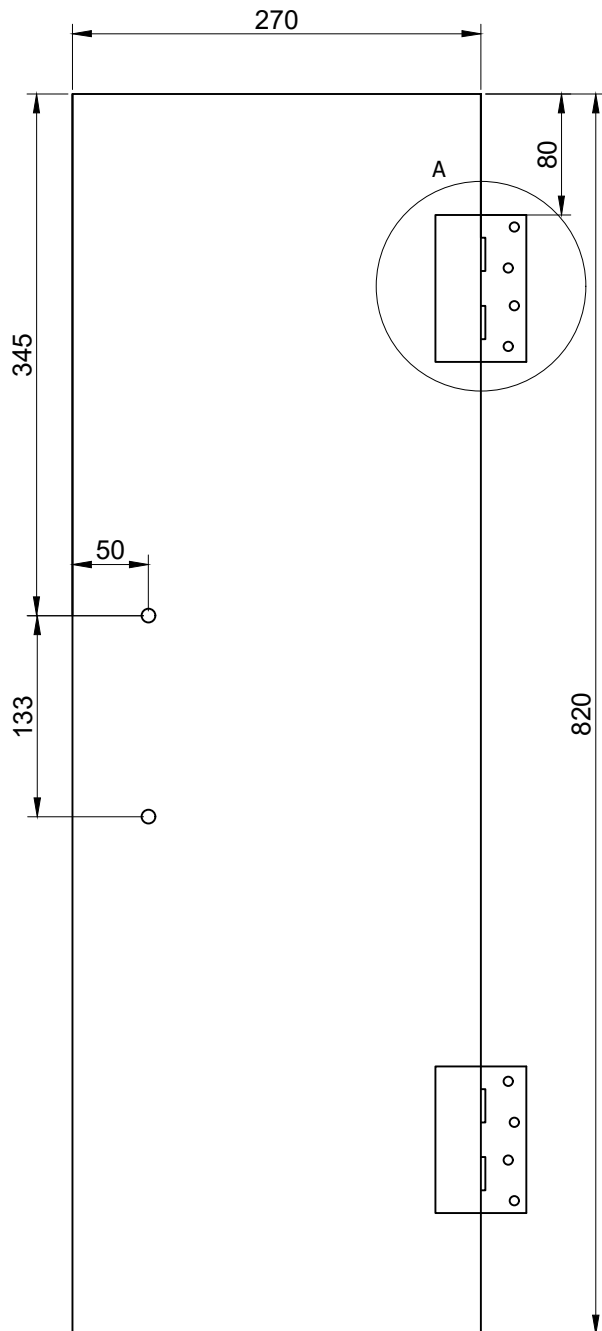
Napomena:  
 -Sve navoje urezati M5  
 -Sva skošenja izvesti 30x45°

	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo:
Nacrtao:	26.8.2024.	Dominik Hajdinjak		M 1 : 1
Provjerio:				
Odobrio:				
 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RIJEKA, Vukovarska 58, HRVATSKA	 Označavanje zavara:	Površinska hrapavost:	Akad. god.: 2024.	
	Naziv dijela: Redukcija ispuha	Broj crteža: 2	List/listova:	
		Program broj:	Format: A3	





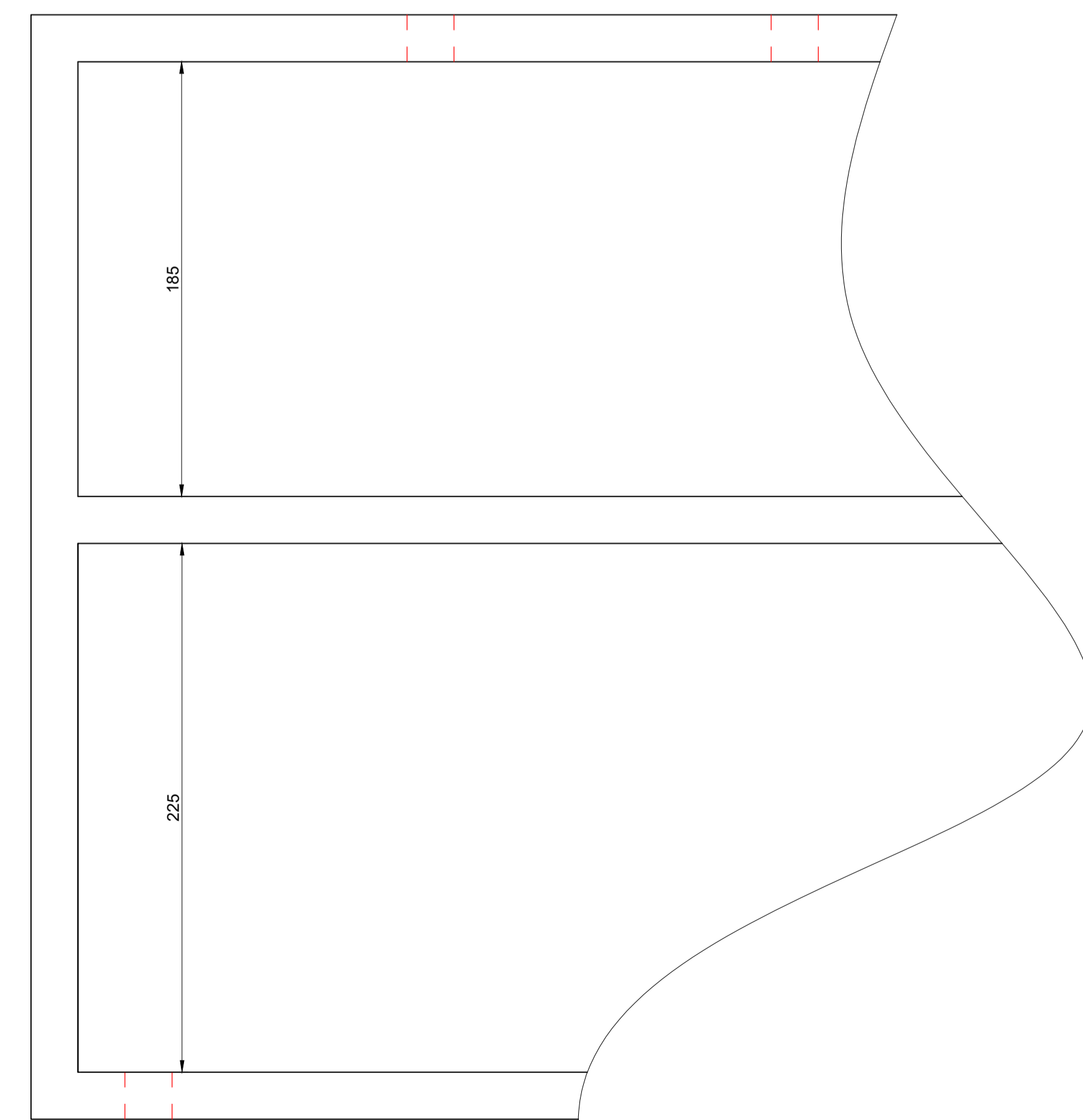
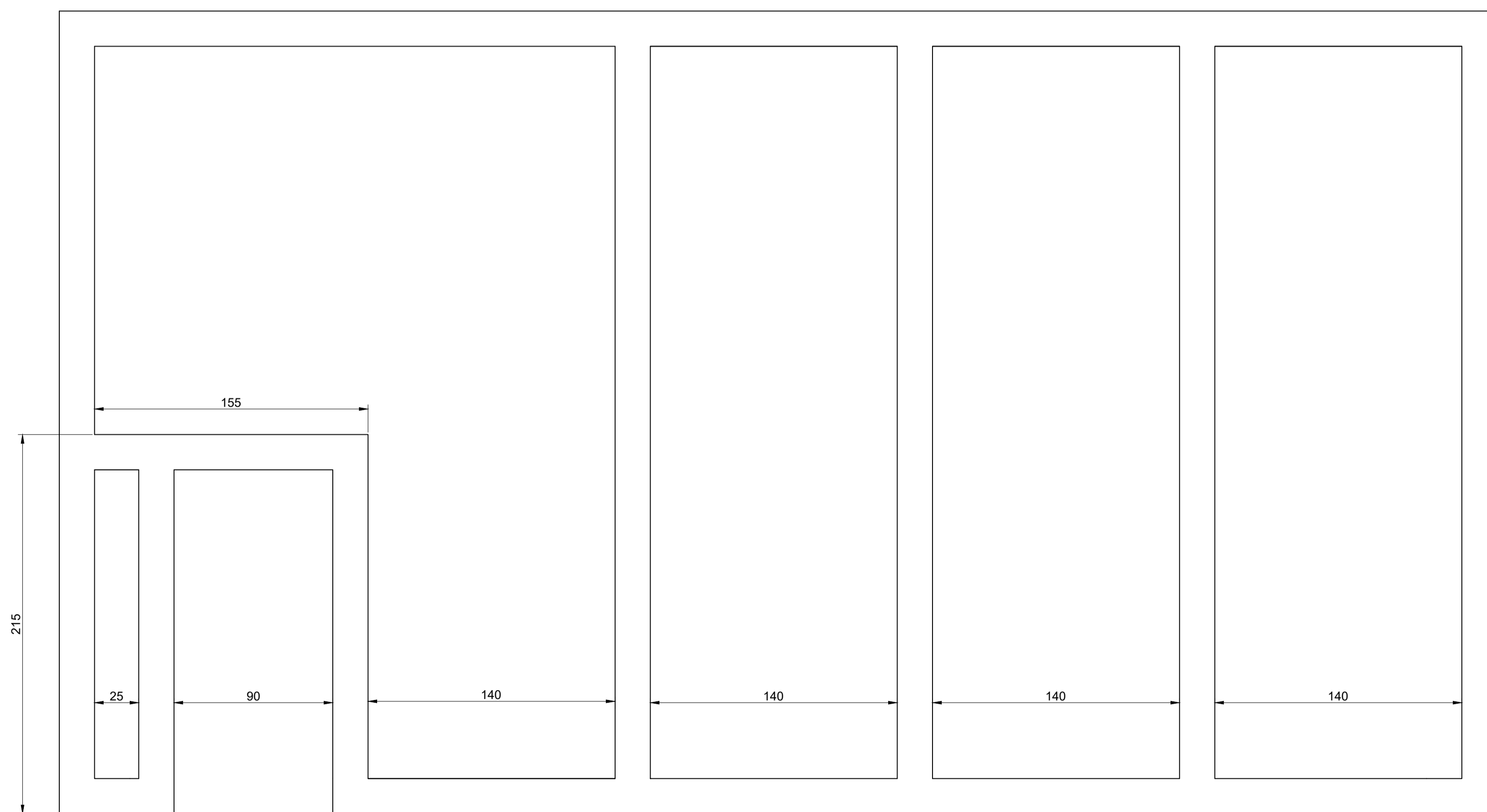
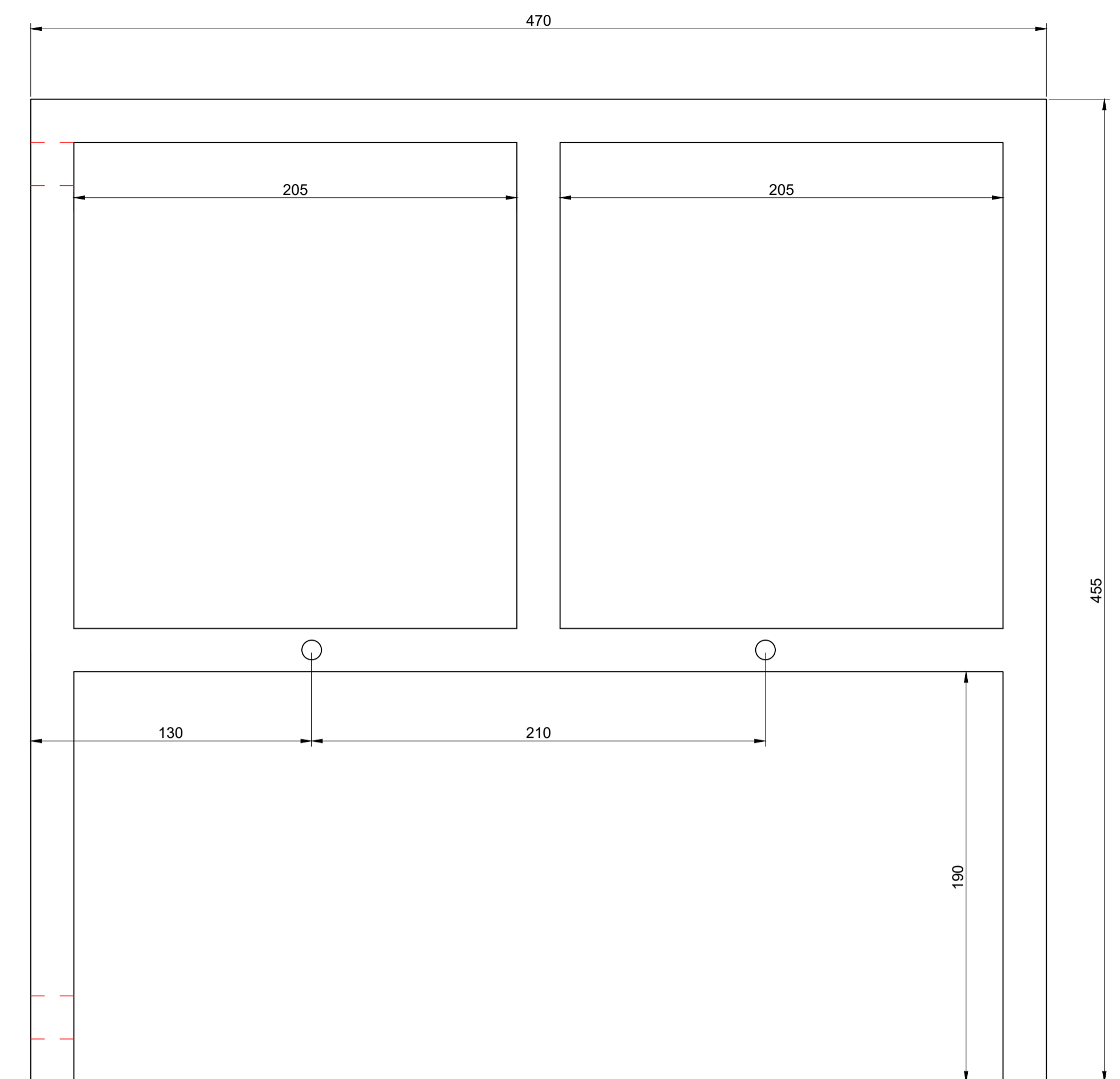
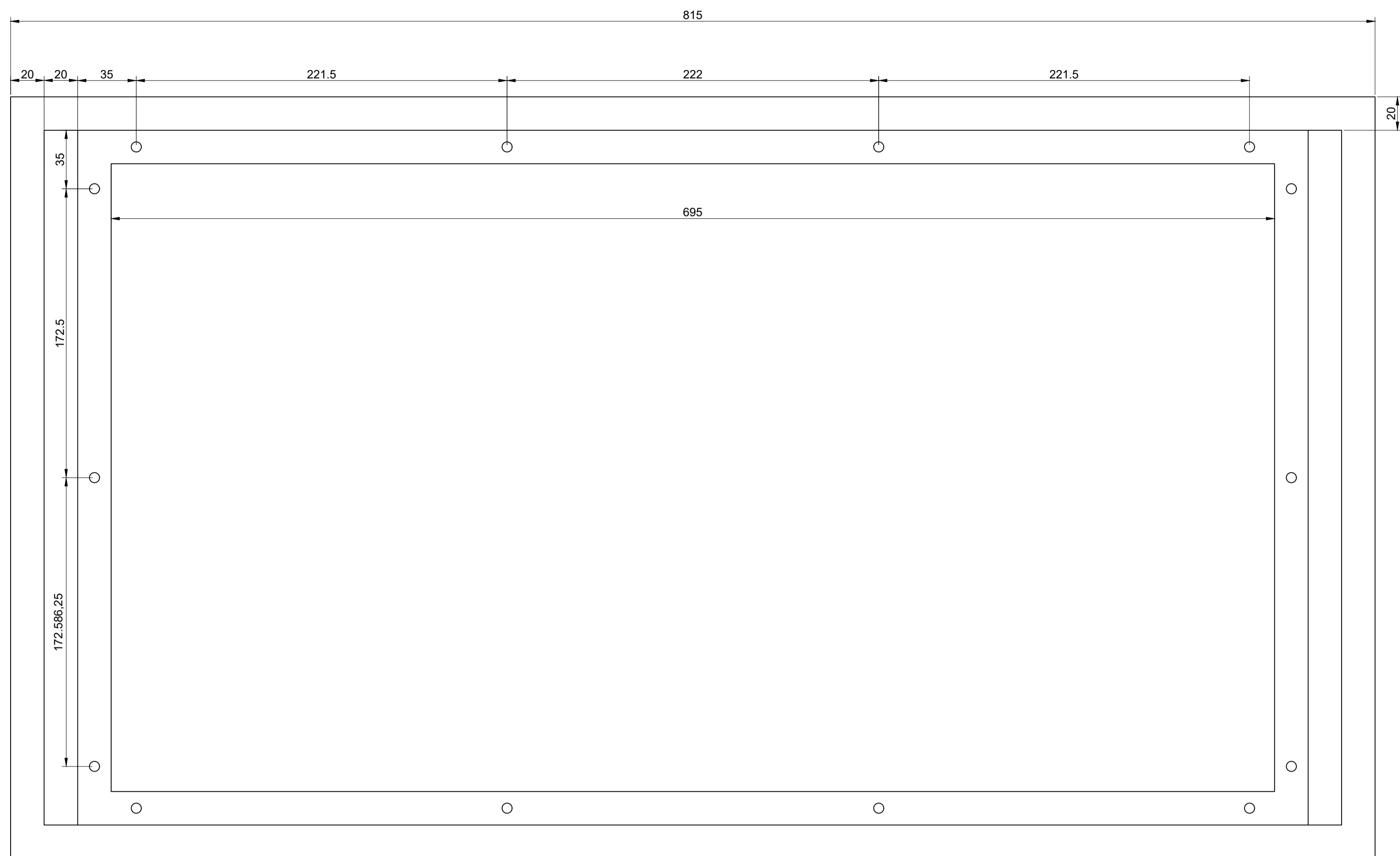
	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo:
Nacrtao:	26.8.2024.	Dominik Hajdinjak		M 1 : 1
Provjerio:				
Odobrio:				
 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET <small>51000 RJEKA, Vukovarska 58, HRVATSKA</small>	 Označavanje zavora:	Površinska hrapavost:	Akad. god.:	
	Naziv dijela:	Broj crteža:	List/listova:	
	Ručka za transport	3	Format:	
	Program broj:	A4		





Napomena:  
-Koristiti lim debljine 2.5 mm

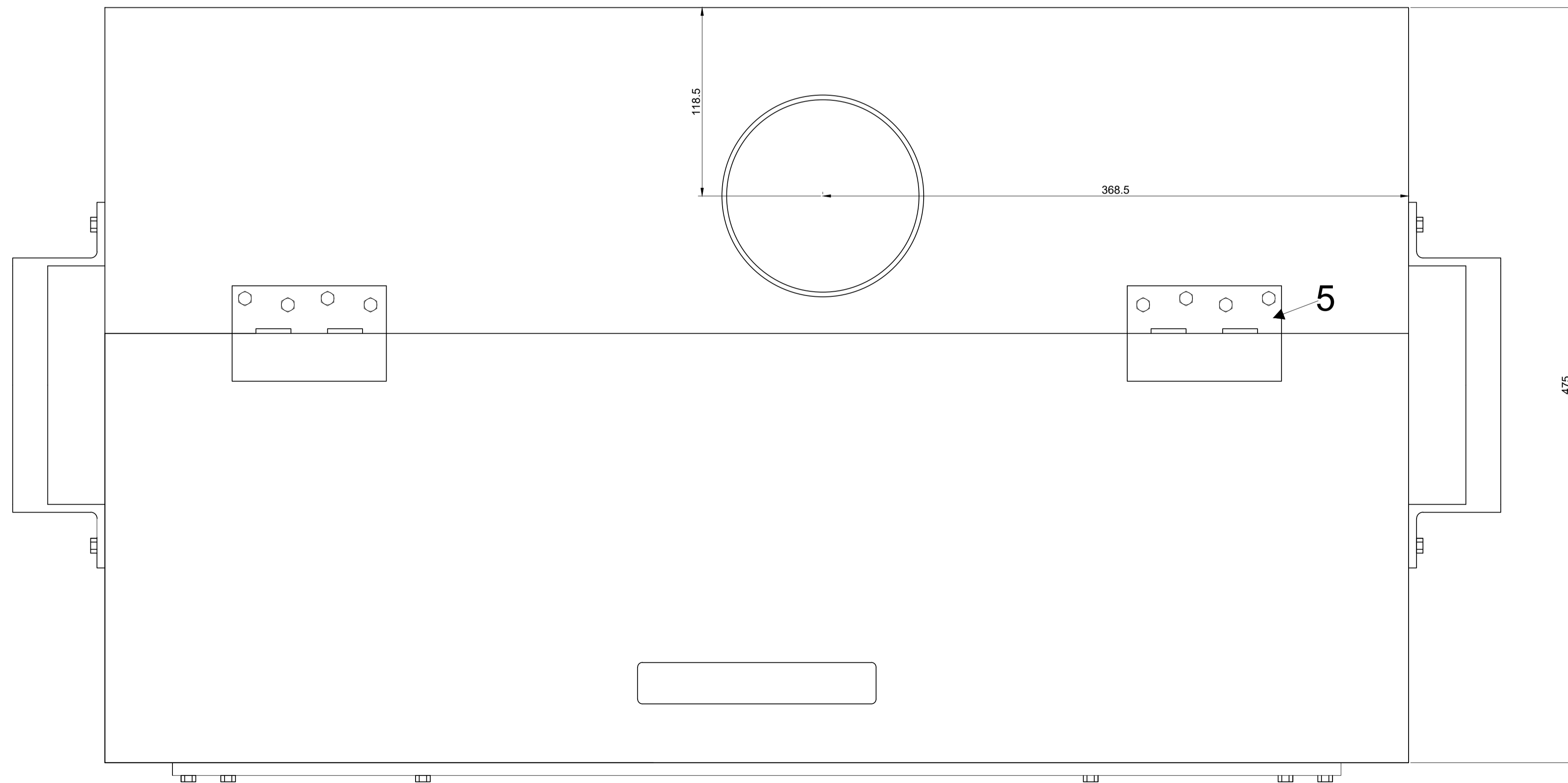
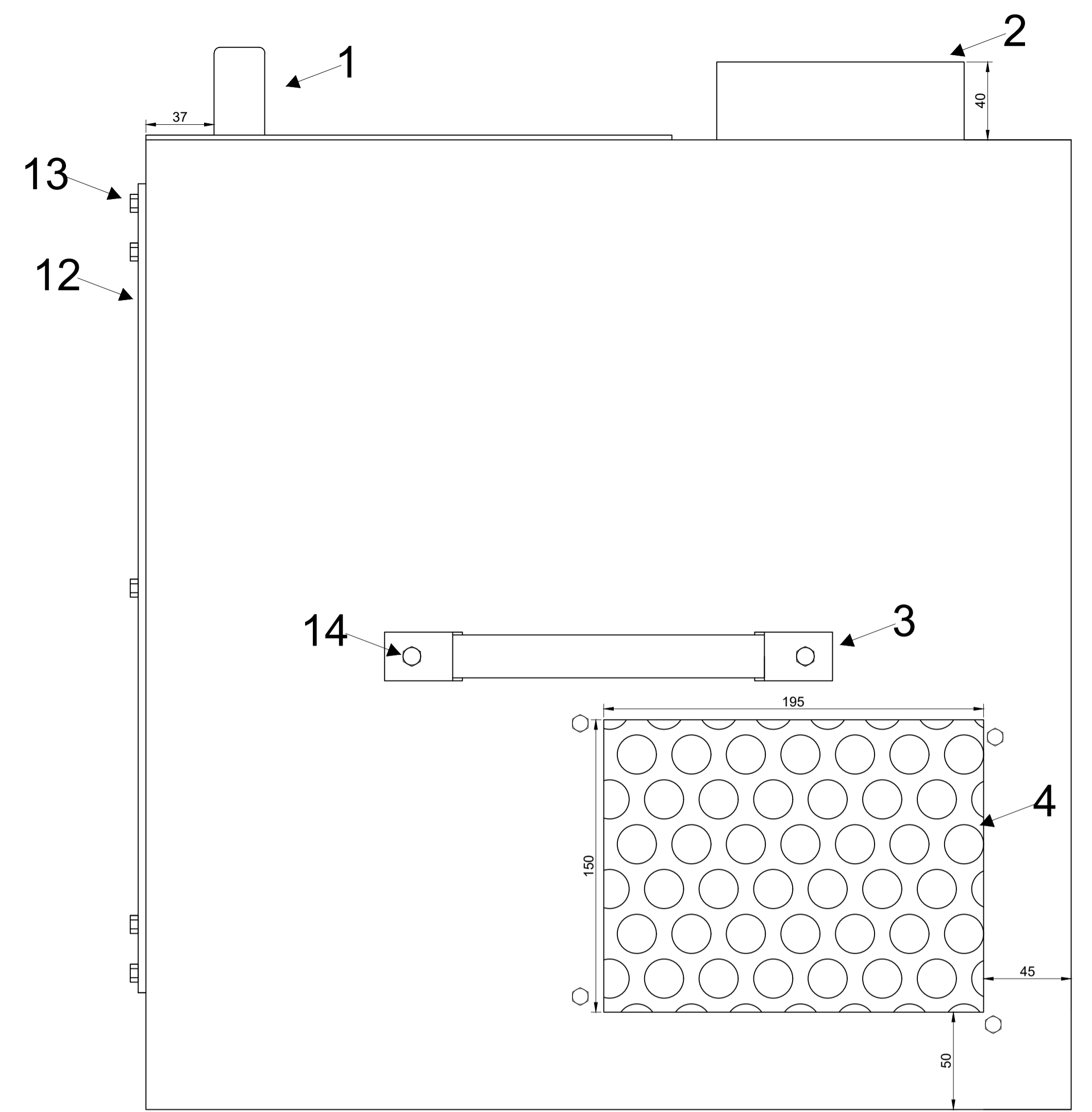
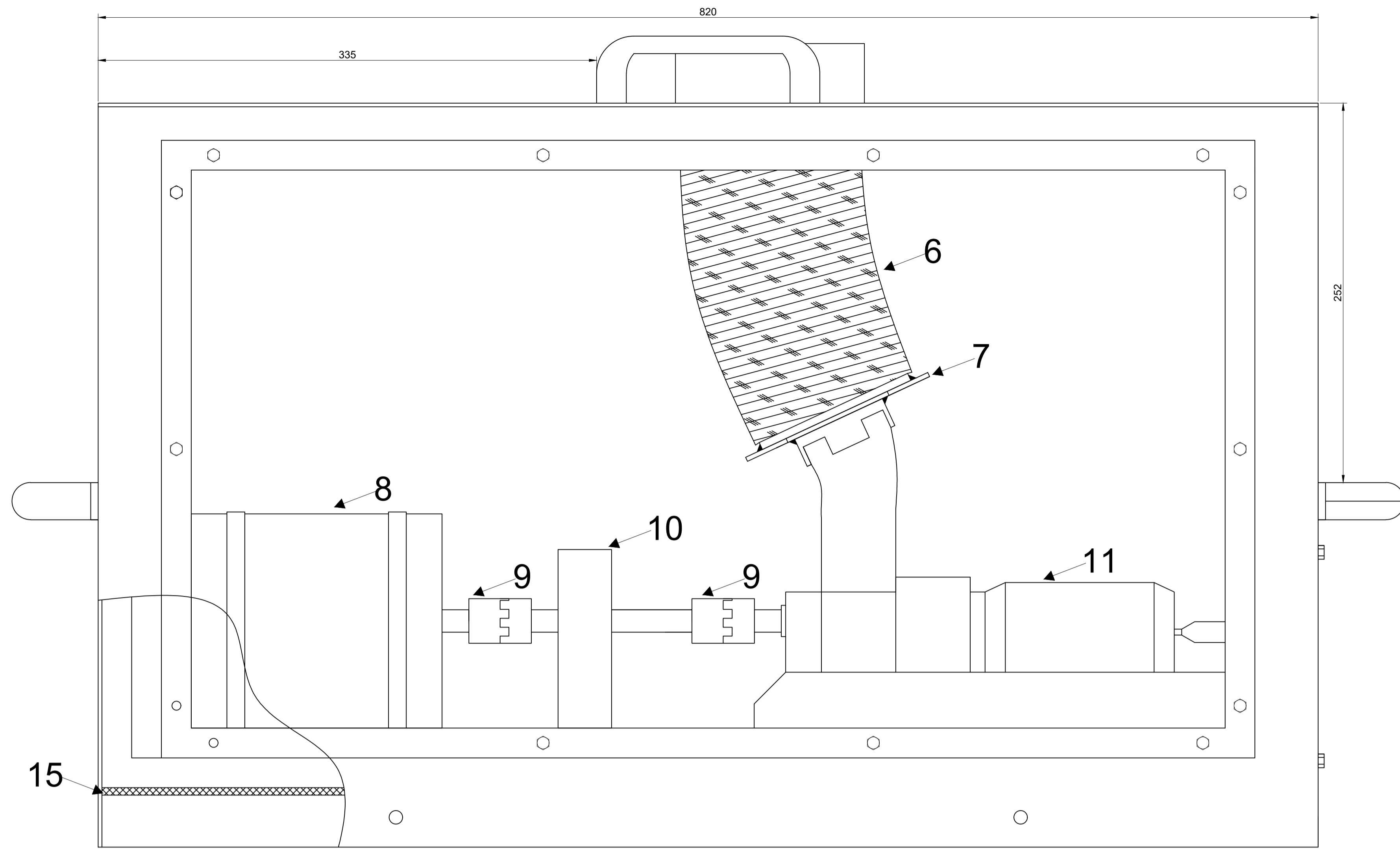
	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo:
Nacrtao:	26.8.2024.	Dominik Hajdinjak		M 1 : 5 (M 1 : 2)
Provjerio:				
Odobrio:				
 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET 51000 RLIJEKA, Vukovarska 58, HRVATSKA	 Označavanje zavora:	Površinska hrapavost:	Akad. god.: 2024.	
	Naziv dijela:	Broj crteža: 4	List/listova:	
	Poklopac revizijskog otvora	Program broj:	Format: A4	




Napomena:  
-Koristiti čeličnu cijev 20x20x2

	Datum	Ime i prezime	Potpis	Mjerilo:
Nacrtao:	26.8.2024.	Dominik Hajdinjak		M 1 : 2
Provjerio:				
Odobrio:				
	Označavanje zavora:	Površinska hrapavost:	Akad. god.:	
			2024.	
	Broj crteža:	Program broj:	List/listova:	
	5		Forma:	
			A1	





Poz.	Naziv dijela	Kom.	Materijal	Napomena
1	Ručka	1		
2	Cijev ispuha	1		
3	Ručka za transport	2		
4	Rešetka usisa	1		
5	Šarke	2		
6	Inoks cijev	1		
7	Redukcija ispuha	1		
8	Histerezna kočnica	1		
9	Kandžasta spojka	2		
10	Senzor momenta	1		
11	Mikro plinska turbina	1		
12	Pleksiglas	1		
13	Vijak M6	26		
14	Vijak M8	4		
15	Armirana guma	2		
Datum		Ime i prezime		Mjerilo:
Nacrtao: 26.8.2024.		Dominik Hajdinjak		M 1 : 2
Provjerio:				
Odobrio:				

 Sveučilište u Rijeci TEHNIČKI FAKULTET MEHANIČKI ODJEL	Označavanje zavarava:	Površinska hrapavost:	Akad. god.: 2024.
	Naziv dijela: Sklopni nacrt kućišta	Broj crteža: 6	List/listova: 6
		Program broj:	Format: A1