

# Termodinamička analiza električne komorne peći za toplinsku obradu

---

**Kuzminski, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:735885>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Kuzminski**

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Filip Kuzminski

Zagreb, 2023. godina.

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

Zahvaljujem se majci Džeraldini i ocu Damiru na podršku u svim mogućim oblicima kroz studij i prije studija. Hvala mojim sestrama, djevojci i prijateljima što su bili uz mene.

Veliko hvala Udruzi mehatroničara i svim udrugarima, nadam se da ćemo uskoro i zakaliti koji dio robota...

Zahvaljujem se ovim putem i mentoru koji je uvijek bio prisutan za sva moja pitanja.

Hvala i jednoj gospođi, koja mi je samo radi moje znatiželje približila lončarstvo i rad s glinom i inspirirala izradu ove peći.

Filip Kuzminski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Kuzminski**

JMBAG: **0035219953**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Termodinamička analiza električne komorne peći za toplinsku obradu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Thermodynamic analysis of an electric chamber furnace for heat treatment**

Opis zadatka:

Komorne električne peći pripadaju najviše korištenom tipu peći u toplinskoj obradi za radne temperature do 1000 °C. Njihova energetska učinkovitost u prijenosu toplinske energije na ugrijavane predmete ovisi o nizu utjecajnih čimbenika ovisnih o konstrukciji komore, debljini i vrsti toplinske izolacije, izvedbi električnih grijača, cirkulaciji zaštitne atmosfere, masi, volumenu i površini predmeta te njihovom razmještanju u peći. U teorijskom dijelu rada treba opisati komornu električnu peć kao toplinski sustav, postaviti bilancu toplinskog toka te opisati glavne konstrukcijske dijelove peći.

U eksperimentalnom dijelu rada treba dimenzionirati radnu komoru i toplinsku izolaciju male električne peći bez zaštitne atmosfere, za nazivnu snagu 3 kW i radnu temperaturu do 950 °C, uz uvjet da je temperatura vanjske površine peći manja od 50 °C. Crtežom u CAD programu prikazati glavne konstrukcijske elemente peći i predložiti sustav za automatsku regulaciju temperature peći.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

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.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. JEDNOKOMORNA ELEKTRIČNA PEĆ .....	2
2.1. Konstrukcijski elementi jednokomornih električnih peći .....	2
2.2. Peć kao termodinamički sustav .....	5
2.2.1. Provođenje topline kroz krutine, kapljevine i plinove .....	5
2.2.2. Konvekcija kapljevutih i plinovutih čestica.....	6
2.2.3. Zračenje topline.....	7
2.3. Vatrostalni materijali.....	8
2.3.1. Klasifikacija vatrostalnih keramičkih materijala.....	8
2.3.1.1. Alumosilikati .....	9
2.3.1.2. Aluminati.....	9
2.3.1.3. Silikati .....	9
2.3.1.4. Vatrostalni materijali na bazi ugljika .....	9
2.3.1.5. Silicijev karbid i karborund.....	9
2.3.1.6. Vatrostalni materijali na bazi cirkonija .....	10
2.3.2. Izolacijski materijali.....	10
2.3.3. Oblikovanje toplinske izolacije peći .....	11
2.4. Elektrootporno grijanje .....	12
2.4.1. Materijali elektrootpornih grijača.....	12
2.4.2 Ograničenja upotrebe elektrootpornih grijača iz skupine metalnih legura .....	13
2.4.3. Montaža grijača .....	14
2.5. Zaštitna atmosfera u komori peći .....	15
2.6. Mjerenje temperature u komori peći .....	16
2.6.1. Promjena otpora metala promjenom temperature .....	17
2.6.2. Termočlanci.....	17
2.6.2.1. Standardne oznake termoparova .....	18

---

2.6.2.2. Konstrukcija termopara .....	19
2.6.3. Radijacijska pirometrija .....	21
2.6.4. Ostali načini mjerenja temperature .....	21
2.7. Regulacija temperature.....	22
3. KONSTRUKCIJA PEĆI .....	24
3.1 Proračun i odabir grijaćih elemenata peći .....	25
3.1.1. Matematički model za proračun snage grijača.....	25
3.1.2. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 9 kW.....	30
3.1.3. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 15 kW.....	33
3.1.4. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 24 kW.....	37
3.1.5. Analiza rezultata proračuna grijača.....	39
3.2 Odabir materijala za izradu toplinske izolacije i oplata peći.....	42
3.3. Određivanje radnog volumena i debljine stijenke peći .....	45
3.4 Konstrukcijsko rješenje .....	49
3.5. Električna shema spajanja .....	51
4. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53
PRILOZI.....	55

---

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1 Električna komorna peć Nabatherm N 87/H priključne snage 25 kW [1] .....	2
Slika 2.2 Jednocomorna mala električna peć proizvođača Lindberg [2] .....	3
Slika 2.3 Jednocomorna mala električna peć proizvođača ThermoFisher [3] .....	3
Slika 2.4 Prijenos topline u peći [6] .....	8
Slika 2.5 Toplinska provodnost keramičkih materijala u ovisnosti o temperaturi [4] .....	11
Slika 2.6 Standardni oblici vatrostalnih i izolacijskih materijala [4] .....	12
Slika 2.7 Načini savijanja grijača u obliku žice [8].....	15
Slika 2.8 Mjerenje temperature u peći pirometarskim termoparom [4].....	18
Slika 2.9 Konstrukcija termopara [4] .....	20
Slika 3.1 Keramičke cijevi s visokim postotkom Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> koriste se kao nosači grijaćih elemenata [10] .....	27
Slika 3.2 Grijaći element omotan oko keramičke cijevi [11].....	28
Slika 3.3 Dozvoljeno površinsko opterećenje u ovisnosti o temperaturi i načinu montaže grijaćeg elementa u peć [8] .....	29
Slika 3.4 Približne vrijednosti snage u ovisnosti o volumenu peći [6] .....	40
Slika 3.5 Raspored temperatura od unutrašnjosti peći do okoliša [15].....	45
Slika 3.6 Peć sa zatvorenim vratima .....	49
Slika 3.7 Peć s otvorenim vratima.....	49
Slika 3.8 Jedan red grijača omotanog oko keramičke cijevi .....	50
Slika 3.9 Peć s vidljivim slojevima .....	50



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1: Usporedba komercijalno dostupnih peći [1,3,2] .....	4
Tablica 2.2 Metalne legure elektrootpornih grijača [4].....	14
Tablica 2.4 Termoparovi prema skupinama s radnim temperaturama [4] .....	19
Tablica 3.1 Konstante KANTHAL A-1 žice za tri različita promjera [7].....	27
Tablica 3.2 Konstante za peć od 9 kW .....	30
Tablica 3.3 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 1,6mm .....	30
Tablica 3.4 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 1,6 mm .....	31
Tablica 3.5 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 2,0 mm .....	31
Tablica 3.6 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 2,0 mm .....	32
Tablica 3.7 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 3,0 mm .....	32
Tablica 3.8 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 3,0 mm .....	33
Tablica 3.9 Konstante za peć od 15 kW .....	33
Tablica 3.10 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 1,6 mm .....	34
Tablica 3.11 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 1,6 mm .....	34
Tablica 3.12 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 2,0 mm .....	35
Tablica 3.13 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 2,0 mm .....	35
Tablica 3.14 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 3,0 mm .....	36
Tablica 3.15 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 3,0 mm .....	36
Tablica 3.16 Konstante za peć od 24 kW .....	37
Tablica 3.17 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 1,6 mm .....	37
Tablica 3.18 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 2.0 mm .....	38
Tablica 3.19 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 3.0 mm .....	38
Tablica 3.20 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 24kW i promjer žice grijača 3,0 mm .....	39
Tablica 3.21 Karakteristike materijala Termobeton K-7 [12].....	43
Tablica 3.22 Karakteristike materijala Izolacijska opeka SL 5/90 [13].....	43

---

Tablica 3.23 Karakteristike materijala Vatrostalni mort MZ-36 [14] .....	44
--	----

---

## POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Z-FK-S-01            Jednokomorna električna peć

Z-FK-S-02            Shema spajanja

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
A	m <sup>2</sup>	površina
a	m	širina unutrašnjosti peći
b	m	visina unutrašnjosti peći
c	m	dubina unutrašnjosti peći
I	A	jakost električne struje
I <sub>f</sub>	A	fazna struja
I <sub>l</sub>	A	fazni napon
K <sub>S</sub>	V/K	Seebeckov koeficijent
U	V	napon
U <sub>f</sub>	V	fazni napon
U <sub>l</sub>	V	linijski napon
P	W	snaga
P <sub>20</sub>	W	snaga sustava pri 20°C
P <sub>1200</sub>	W	snaga sustava pri 1200°C
Q	J	toplina
R	Ω	otpor
R <sub>t</sub>	Ω	otpor platine na nekoj temperaturi
R <sub>o</sub>	Ω	otpor platine na ledištu vode ( 0°C)
T	K	temperatura u Kelvinima
t	s	vrijeme
V	m <sup>3</sup>	volumen
Θ	W	toplinski tok
α	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prijelaza topline
δ	mm	debljina stijenke
φ	°	fazni pomak
λ	W/mK	toplinska provodnost
v	°C	temperatura u Celzijusima

**SAŽETAK**

U radu je opisana električna komorna peć za toplinsku obradu i njezini dijelovi. Opisane su termodinamičke pojave prisutne kod zagrijavanja peći, sistematizirani su vatrostalni materijali za izradu peći i materijali za elektrootporne grijače. Objašnjen je izbor plinske zaštitne atmosfere u peći te načini mjerenja i regulacije temperature. U praktičnom djelu rada dimenzionirani su ključni elementi male električne peći bez zaštitne atmosfere. Razrađene su konstrukcijske varijante i predstavljen je CAD model peći snage 15 kW i volumena komore 88 L zajedno sa shemom spajanja grijača i regulatora temperature.

Ključne riječi: komorna električna peć, toplinska obrada, kaljenje, žarenje, regulacija temperature

**SUMMARY**

In this paper an electric chamber furnace for heat treatment is described along with its parts. Thermodynamic phenomenons linked to heating of furnace are explained and refractory materials for construction and electric heating element materials are systematised. The choice of atmosphere within the furnace is explained along with methods of measuring and regulating temperature within the furnace. In experimental part of the paper key elements of a small electric furnace without protecting atmosphere are dimensioned. Production options are considered, then CAD model of a 15 kW furnace with chamber volume of 88 L along with electric schematics for connecting the heating elements and temperature regulator is presented.

Key words: electric chamber furnace, heat treatment, tempering, annealing, temperature regulation

# **TEORETSKI DIO**

## **1. UVOD**

Komorna električna peć jedna je od najčešće korištenih peći za toplinsku obradu metala. Moguća je izvedba u volumenima radne komore od nekoliko litara do nekoliko kubičnih metara. Ispravnim izborom izolacije i grijaćih elemenata u peći je moguće postići temperature do 1700°C.

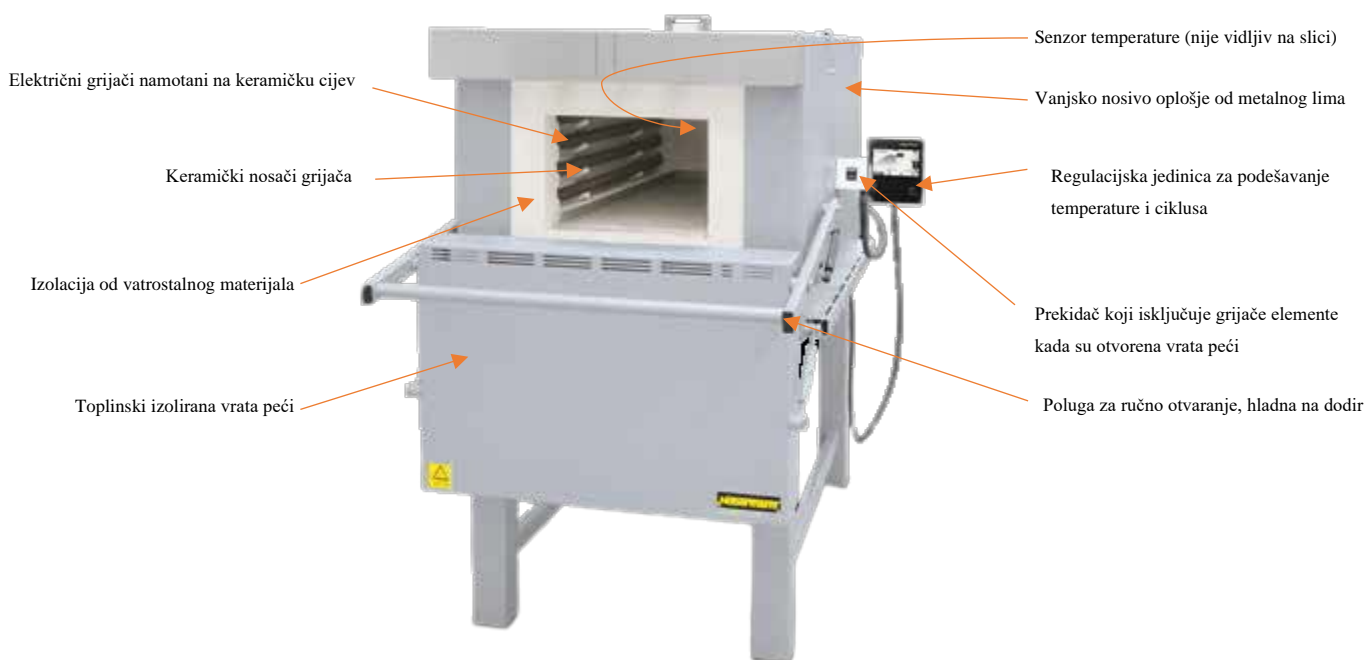
U radu će se opisati i usporediti konstrukcijske izvedbe i svojstva materijala za izradu jednokomorne električne peći za toplinsku obradu radne temperature do 1200 °C. Na temelju I. glavnog stavka postaviti će se toplinska bilanca peći i proračun grijača, dimenzija toplinske izolacije i CAD model jednokomorne električne peći.



## 2. JEDNOKOMORNA ELEKTRIČNA PEĆ

### 2.1. Konstrukcijski elementi jednokomornih električnih peći

Na donjoj slici (slika 1) prikazana je uobičajena izvedba jednokomorne električne peći s glavnim konstrukcijskim elementima. U radnoj komori peći volumena 87 lit. nalaze se elektrootporni grijači i termopar za mjerenje temperature. Komora je sa svih strana obložena vatrostalnim materijalom dobrih izolacijskih svojstava, a vatrostalni materijal zaštićen je metalnom oplatom izvana. Vrata peći otvaraju se na način da ne ugrožavaju operatera i opremljena su prekidačem koji gasi grijače elemente dok peć nije zatvorena. Temperatura se podešava na regulacijskoj jedinici, koja regulira temperaturu paljenjem i gašenjem grijačih elemenata.



**Slika 2.1** Električna komorna peć Nabatherm N 87/H priključne snage 25 kW [1]

U Tablica 2.1 uspoređene su jednokomorne električne peći sa Slika 2.1, Slika 2.2 i Slika 2.3. Sve tri peći služe za generičku toplinsku obradbu i u sličnom su području snage, veličine i

karakteristika. U njima se može postići radna temperaturu do 1200 °C, odnosno 1280°C za Nabatherm-ovu peć.



**Slika 2.2** Jednocomorna mala električna peć proizvođača Lindberg [2]



**Slika 2.3** Jednocomorna mala električna peć proizvođača ThermoFisher [3]

Iz tablice je vidljivo kako se trend industrije 4.0 i povezivanje strojeva na internet stvari (IoT) odrazio i na peći za toplinsku obradbu. Neke peći već pod standardnom opremom dolaze opremljene „pametnim“ regulatorima, čije je postavke moguće upravljati preko „pametnog“ telefona ili računala. Povijest toplinskih obrada i grafovi temperatura pohranjuju se na USB memoriju te je moguće praćenje greški ili optimizacija toplinske obrade. Na onim pećima koje nemaju u osnovnoj opremi regulatore sa sposobnosti za povezivanje u IoT sustave, moguće je ugraditi istu kao dodatnu opremu.

Tablica 2.1: Usporedba komercijalno dostupnih peći [1,3,2]

Proizvođač i model	Nabertherm N 41/H	LindbergMPH 51862	ThermoFisher Scientific BF51542C
Kapacitet u L	40	88	23
Unutrašnje dimenzije, ŠxDxV	350x500x250	356x406x610	368x267x241
Vaujske dimenzije, ŠxDxV	1040x1180x1340	864x889x1041	787x711x724
Priključna snaga	15 kW	16 kW	6.2 kW
Maksimalna radna temp.	1280 °C	1200°C	1200°C
Grijanje	3 strane: bočni zidovi i donja strana	4 strane: bočni zidovi, donja i gornja strana	4 strane: bočni zidovi, donja i gornja strana
Grijaći elementi	Omotani oko keram. cijevi, zaštićeni SiC pločon	ugrađeni u MoSi2 ploče	ugrađeni u MoSi2 ploče
Konstrukcija zida	2 različita vatrootalna mat. + oplata od čelika	MoSi2 ploče s grijacima, drugi sloj izolacije + oplata od čelika	MoSi2 ploče od keramičkih vlakna
Vrata	Otvaranje prema dolje ili gore, moguće pneumatsko	Otvaranje prema dolje, opruga	Otvaranje prema dolje, opruga
Regulacija temperature	+/- 10 °C, PID kontroler sa ekranom na dodir, izrada ciklusa pomoću MS Excela, kontrola i praćenje preko pametnog telefona	PID kontrola temperature, odgađanje paljenja, automatsko gašenje	PID kontrola,
Ostale karakteristike	Prigušivači i opruga na mehanizmu otvaranja/zatvaranja Vrata od nehrđajućeg č. radi koroz. postojanosti Otvor za ispušne plinove na bočnoj strani	Zaštita od previsoke temperature ili zarubavanja regulacijskog sustava	Solid-state prekidači, ON/OFF sklopka Prozor za gledanje unutrašnjosti peći Inconel®ploča na dnu za zaštitu od izlivanja
Dodatna oprema	Dodatni senzor temperature Kutija za plinsku atmosferu nezapaljivim plinovima Otvori za ulaz zaštitnog plina Zaštita od previsoke temperature	Moguće ručno programiranje predgrijavanja Ethernet komunikacija IoT Kontrola atmosfere	Programibilni kontroler Kontroler s RS485 i RS232 komunikacijom

## 2.2. Peć kao termodinamički sustav

U električnoj komornoj peći odvija se pretvorba električne energije u toplinsku. Toplinska energije pretvorena iz električne na grijačima peći prema Jouleovom zakonu ovisi o kvadratu jakosti struje, električnom otporu grijača i vremenu grijanja.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.1)$$

Električni otpor grijača ovisi o materijalu grijača, njihovoj duljini i površini poprečnog presjeka. Povišenjem temperature grijača stvara se toplinski gradijent u komori peći.

Toplina se širi trima osnovnim načinima: provođenjem (kondukcijom), konvekcijom (komešanjem) i zračenjem (radijacijom) kako je shematski prikazano na slici (Slika 2.4). One se u procesu zagrijavanja u peći javljaju istovremeno. Ako u peći nema ventilatora niti prisilnog protoka plinova u volumenu komore je prisutna slobodna konvekcija, Ako je u peći instaliran ventilator zagrijavanje je brže nego kod peći s mirujućim zrakom ili zaštitnom atmosferom, jer se u komori prijenos topline obavlja prisilnom konvekcijom.

### 2.2.1. Provođenje topline kroz krutine, kapljevine i plinove

Neposrednim dodirrom dvaju tijela prenosi se toplina s toplijeg na hladnije tijelo, odnosno dijelove tijela.

U komornim pećima provođenje topline je prisutno na više mjesta istovremeno:

- Prijelaz topline s grijača na tijelo u kontaktu s grijačem, odnosno na utor u kojem se nalazi grijač, keramička cijev oko koje je omotan grijač ili keramički nosač na kojeg je ovješena grijač. Ovaj način prijelaza topline u toplinskoj peći je zapravo nepogodan i nastoji se smanjiti. Kada je grijač nekim svojim djelom u kontaktu s npr. utorom, na tom djelu grijača dolazi do povišenja temperature zbog nemogućnosti prijelaza dovoljne količine toplinske energije na okolinu. Na tom mjestu grijač je opterećen više nego npr. na mjestu gdje je slobodno ovješena i gdje može radijacijom prenositi toplinu okolini. Takve grijače treba opteretiti manjom snagom, što smanjuje korisnost peći (omjer toplinske energije predane predmetima i električne energije dovedene na grijače peći). Izborom ovješanih grijača eliminira se dodir s drugim tijelima i grijači mogu biti jače opterećeni [4].
- Prijelaz topline sa zagrijane peći na hladni radni komad u dodiru s dnom peći pojavljuje se kad se na dno zagrijane peći postavi obradak sobne temperature. Ovaj način prijelaza topline je također nepogodan zbog neravnomjernog zagrijavanja obratka i nastoji se izbjeći tehnikama šaržiranja i upotrebom mrežastih posuda od nehrđajućih čelika.

Ovisno o materijalu obratka i peći, površina u kontaktu će se brže ili sporije zagrijavati od ostatka obratka koji prima toplinu konvekcijom i zračenjem, pa može doći do izvitoperenja i nepovratnih promjena oblika.

- Prijelaz topline kroz stijenku peći prema okolini pojavljuje se kad iz zagrijane unutrašnjosti peći toplina prolazi prema okolini kroz stijenku peći. Stijenka peći se obično sastoji od više slojeva toplinske izolacije debljine nekoliko desetaka centimetara (za manje peći) i vanjskog metalnog plašta. Toplina iz unutrašnjosti peći prelazi iz jednog sloja izolacije u drugi ovisno o toplinskom otporu izolacije. Vanjska temperatura peći s tzv. hladnim zidom iznosi do 50 °C, a u unutrašnjosti komore mogu se ostaviti temperature do 1700 °C. Kod peći je dio topline koji tako prelazi prema van gubitak, pa se nastoji smanjiti izborom optimalne vrste i debljine izolacije.

### **2.2.2. Konvekcija kapljevutih i plinovutih čestica**

Prijenos topline konvekcijom odvija se intermolekularno i komešanjem različito temperiranih čestica tekućine. Različito temperirane čestice fluida na svojim putanjama dolaze u međusobni dodir i predaju toplinu. Ako je strujanje fluida uvjetovano samo različitom gustoćom čestica fluida (uzgon), pretežito radi njihove temperaturne razlike, govori se o slobodnoj ili prirodnoj konvekciji. Ako je strujanje tekućine potaknuto nametnutom razlikom tlakova (ventilator, pumpa...) govori se o prijenosu topline prinudnom ili prisilnom konvekcijom [5].

Unutar peći konvekcija se pojavljuje u tri slijedeća oblika:

- Slobodna konvekcija unutar peći koja je prisutna kod peći koje nemaju ugrađeni ventilator. Intenzitet slobodnog strujanja zraka ili zaštitne atmosfere ovisi o gustoći, toplinskoj vodljivosti, toplinskom kapacitetu i dinamičkom viskozitetu fluida, odnosno plinske atmosfere unutar peći. Slobodnom konvekcijom zagrijava se obradak i hladniji dijelovi peći.
- Prisilna konvekcija unutar peći prisutna kod je u pećima s ventilatorom. Cirkulacijom zraka ili zaštitne atmosfere omogućuje se ravnomjernija raspodijela temperature u peći, što je posebno bitno kod većih šarži. Uglavnom se koristi kod većih peći ili onih koje se zagrijevaju na niže temperature, radi složene izvedbe ventilatora u visokotemperaturnim pećima.
- Slobodna konvekcija na vanjskoj stijenci (plaštu) peći zajedno uz prijenos topline zračenjem predaje toplinu okolini i predstavlja toplinski gubitak peći.

Prijenos topline konvekcijom u unutrašnjosti peći ovisi o nizu utjecajnih čimbenika, među kojima se ističu:

- gustoća fluida
- toplinska provodnost fluida
- toplinski kapacitet fluida
- dinamički viskozitet fluida
- temperatura stijenke, obradka i površine grijača

### **2.2.3. Zračenje topline**

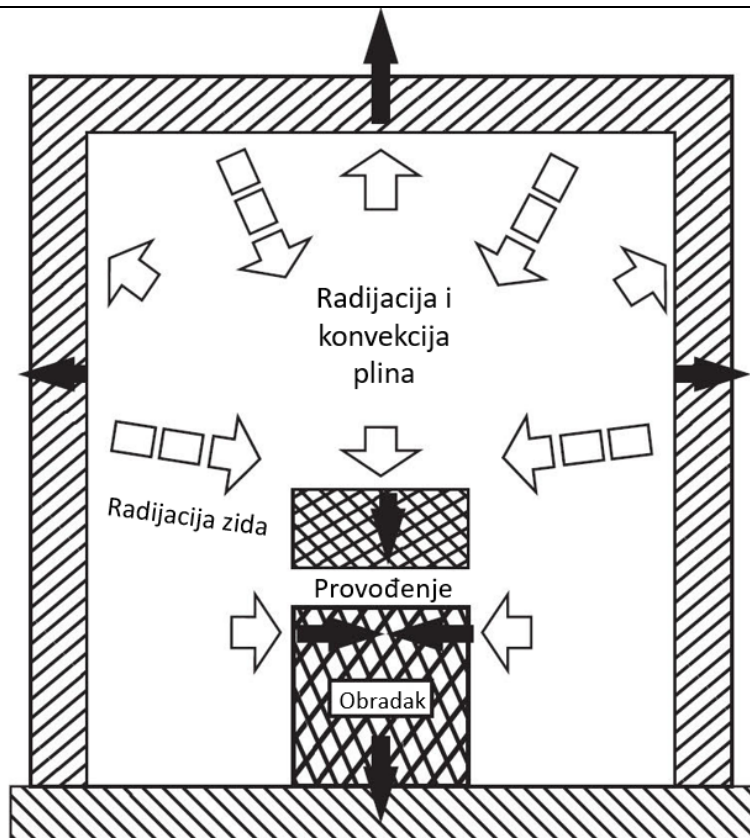
Prijenos topline zračenjem odvija se u obliku toplinskih zraka koje se prenose u formi elektromagnetskih valova. Za ovakav prijenos topline nije potreban materijalni posrednik. Zračenjem toplina ne prelaziti isključivo u smjeru temperaturnog gradijenta, već se prijenos topline pojavljuje između površina više i niže temperature [5].

Prijenos topline zračenjem kod peći se pojavljuje u slijedećim oblicima:

- Zračenje žice ili tijela električnog grijača koje zagrijava zidove peći, obradak i unutrašnjost komore peći. Ovo je primarni način prijenosa topline s grijača.
- Zračenje zidova peći i dijelova peći prema unutra koje zagrijava obradak i ostale dijelove peći.
- Zračenje vanjskih površina peći prema okolišnom prostoru, koje predstavlja toplinske gubitke i treba ga smanjiti, npr. bojom niskog faktora emisivnosti.

Toplinski tok izmijenjen zračenjem između dva tijela različitih temperatura ovisi o:

- emisijskom faktoru površina tijela
- temperaturama tijela
- površinama tijela i njihovom međusobnom prostornom položaju (vidljivosti)



Slika 2.4 Prijenos topline u peći [6]

### 2.3. Vatrostalni materijali

Osnovna karakteristika materijala za izradu vruće komore bilo kakve peći jest da može izdržati radnu temperaturu peći. Uz to ostala ključna svojstva jesu: toplinska vodljivost, električna vodljivosti (otpornost), poroznost, faktor toplinskog širenja, i dr.. Za povišene temperature peći (do 1000 °C) pogodni su keramički i metalni materijali, a za postizanje temperatura viših od 1000 °C potrebni su vatrostalni keramički materijali.

#### 2.3.1. Klasifikacija vatrostalnih keramičkih materijala

Vatrootporni keramički materijali većinskim djelom se sastoje od neorganskih oksida i njihovih smjesa, a dijele se u tri skupine: kiseli, neutralni i lužnati. Poredani, od kiselijih do lužnatijih, tu su slijedeći materijali:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{CaO}$ .

U konstrukciji komornih peći najviše se koristi oksidna keramika alumosilikata, čisti aluminij oksid, aluminati, čisti silicij oksida te neoksidna keramika silicij karbida. Na slici (Slika 2.5) prikazano je svojstvo toplinske vodljivosti u ovisnosti o temperaturi nekoliko vatrostalnih materijala.

### 2.3.1.1. Alumosilikati

Sastoje se pretežno od silicijevog ( $\text{SiO}_2$ ) i aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) u različitim omjerima. Zajedno tvore 3 različite faze: tridimit, kristobalit i mulit, koje mogu biti stabilne redom do  $1470\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1723\text{ }^\circ\text{C}$  i  $1850\text{ }^\circ\text{C}$ . U stvarnosti su maksimalne temperature peći izrađenih od ovih materijala za oko  $150\text{ }^\circ\text{C}$  niže. Alumosilikati se koriste i kao materijal za izolaciju uz visoku poroznost i posljedično nisku toplinsku vodljivost, te im je zbog toga i niža čvrstoća [4].

### 2.3.1.2. Aluminati

Sastoje se od aluminijevog oksida u količini od 48 do 99%, a ostatak čini mulit, bauksit i gline. Viši postotak aluminijevog oksida daje bolju temperaturnu postojanost. Kod radnih temperatura do  $1800\text{ }^\circ\text{C}$ , upotreba aluminata je jedini izbor. Uz to, aluminati imaju dobra mehanička svojstva i povoljnu električnu vodljivost pri visokim temperaturama (izolatori su) i neporozni su. Koriste se za izolaciju, za potporu grijaćih elemenata [4].

### 2.3.1.3. Silikati

Silikati sadrže visok postotak silicijevog oksida (94-98%), a ostatak čine  $\text{TiO}_2$  i  $\text{CaO}$  do 1.5-2.5% te  $\text{FeO}$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u tragovima. Imaju dobru otpornost na kiselu trosku, mogu se koristiti do  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ , najčešće u pećima za taljenja stakla. U obliku taljenih silikata dobivenih iz taljenog kvarca, koriste se za laboratorijsku opremu do  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  radi otpornosti na većinu kemikalija (osim jakih kiselina). [4]

### 2.3.1.4. Vatrostalni materijali na bazi ugljika

Ugljične elemente moguće je koristiti čak do  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , no samo u atmosferama gdje nema kisika. Zato ih se primjenjuje samo u vakuumskim pećima ili pećima s inertnom atmosferom gdje ne mogu oksidirati [4].

### 2.3.1.5. Silicijev karbid i karborund

Silicijev karbid ( $\text{SiC}$ ) pripada u specijalne vatrostalne elemente, a koristi se za izradu dijelova peći kada je potrebno postići temperature do  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ . Također se može koristiti za izradu grijaćih elemenata do  $1550\text{ }^\circ\text{C}$ . Vrlo je tvrd i čvrst, no ima visoku toplinsku vodljivost. Zbog inertnosti  $\text{SiC}$ , kao vezivo se koriste glinice ili silicijev nitrid [4].



---

### 2.3.1.6. Vatrostalni materijali na bazi cirkonija

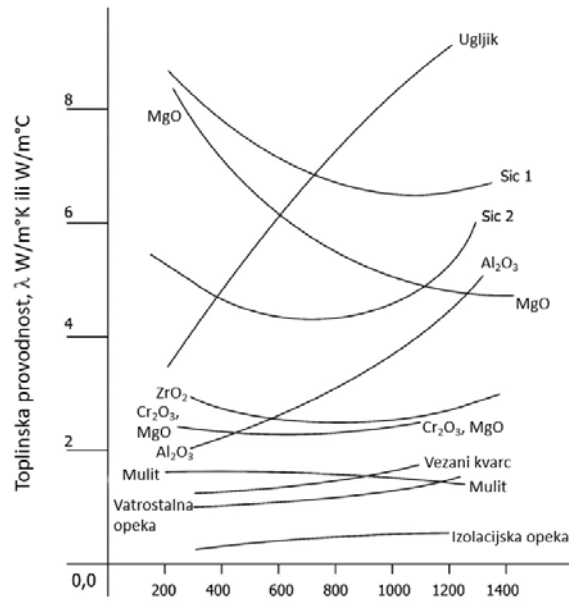
Vatrostalni materijali od čistog cirkonijevog oksida ( $ZrO_2$ ) imaju vrlo visoko talište (2680 °C). Tijekom ugrijavanja dolazi do iznenadnih promjena u dimenzijama, pa je potrebno pravilno izvesti konstrukciju kako ne bi došlo do pucanja. Koriste se samo u specijalnim slučajevima zbog visoke cijene i nepraktičnosti.

### 2.3.2. Izolacijski materijali

Tijekom zagrijavanja obradaka, temperatura u unutrašnjosti peći viša je od temperature vanjske stijenske peći. Toplina pohranjena u zidovima s gledišta procesa zagrijavanja predmeta je izgubljena toplina. Ona se ipak može smanjiti upotrebom toplinski izolacijskih materijala, odnosno materijala s niskom toplinskom provodnošću. Bitno je napomenuti da toplinska provodnost mora ostati niska i na povišenim temperaturama, a isto tako da materijal bude postojan na višim temperaturama te da mu mehanička svojstva ne padnu ispod kritične razine. Neki izolacijski materijali niti nemaju mogućnost mehaničkog opterećivanja, poput azbesta, staklenih i keramičkih vlakana ili drva.

Mehanički opteretivi izolacijski materijali dobivaju se iz vatrostalnih alumosilikatnih materijala uz osiguravanje poroznosti. Nije ih moguće koristiti na jednako visokim temperaturama kao neporozne istog sastava pa se ne mogu koristiti za unutrašnju stijenkku peći. Za njihovu upotrebu u pećima s radnom temperaturom iznad 1000 °C potrebno je zaštititi ih dodatnom stijenkkom koja može izdržati više temperature, adekvatne debljine kako bi na kontaktnoj površini s poroznim alumosilikatima temperatura ostala ispod 1000 °C.

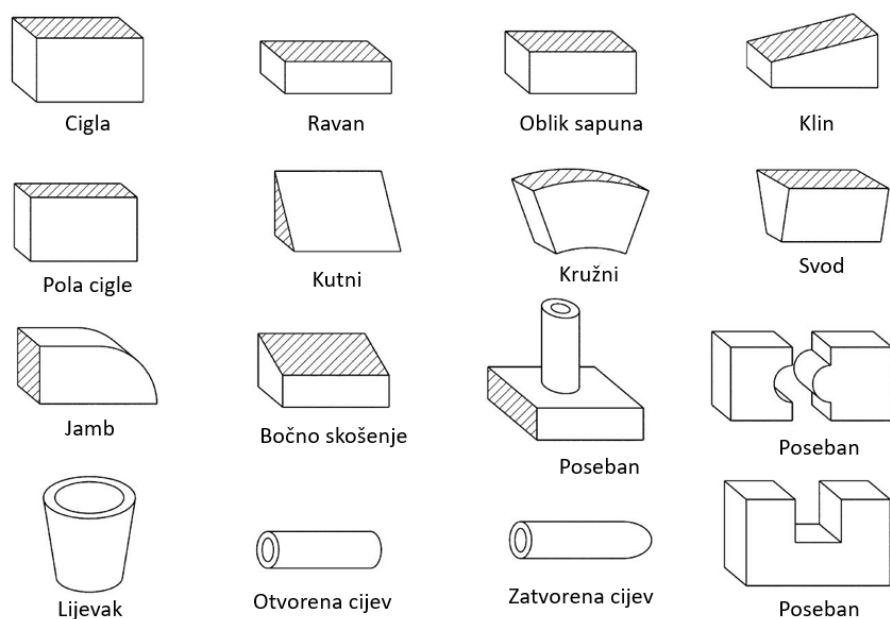
Vrlo povoljna izolacijska svojstva imaju vlaknasti materijali u obliku keramičke, kamene i mineralne vune. Keramičke vune mogu se koristiti i za unutrašnju vruću stijenkku, dok je najviša dopuštena temperatura za kamene i mineralne vune 700°C [4].



Slika 2.5 Toplinska provodnost keramičkih materijala u ovisnosti o temperaturi [4]

### 2.3.3. Oblikovanje toplinske izolacije peći

Najzastupljeniji postupak proizvodnje standardnih oblika vatrostalnih materijala je izrada oblika izolacijskog elementa pod visokim pritiskom ( $\sim 200 \text{ N/mm}^2$ ) u kalupu. U posljednje vrijeme komercijalno se koristi i proces izostatskog prešanja. Osnovni oblik dostupan diljem svijeta je standardna cigla dimenzija  $230 \times 115 \times 65 \text{ mm}$  [4]. Ostali standardni oblici prikazani su grafički (Slika 2.6).



**Slika 2.6** Standardni oblici vatrostalnih i izolacijskih materijala [4]

## 2.4. Elektrootporno grijanje

Kada električna struja prolazi kroz materijal, radi otpora materijala se dio energije pretvara u toplinu. Na tom principu moguće je kontrolirano zagrijavati predmete. Zagrijavanje se može provesti direktno ili indirektno. U direktnom zagrijavanju struja prolazi kroz predmet i električna energija se pretvara u toplinsku radi električnog otpora predmeta. Za takvo zagrijavanje potrebno je imati tijelo koje je električki vodljivo, ali isto tako je potrebno prilagoditi parametre struje, napona i frekvencije kako bi se dobili željeni rezultati. U konstrukciji jednokomornih peći koristi se indirektno zagrijavanje, gdje se tijelo zagrijava bez direktnog kontakta s grijačem, odnosno izvorom struje, o kojem će se dalje govoriti.

### 2.4.1. Materijali elektrootpornih grijača

Elektrootporni grijači mogu biti od metalni i nemetalnih materijala. Metalni elektrootporni grijači su posebno razvijene legure (ili u specijalnim slučajevima čisti materijali) dostupne u obliku okrugle ili kvadratne žice koja se savija u željeni oblik i takva postavlja u peć. Grijači od nemetalnih materijala dolaze u gotovim oblicima, kao šipke ili u obliku slova U.

Ne postoji univerzalno rješenje koje bi zadovoljilo potrebe svih vrsti peć jer postojanost grijača ovisi o više faktora. Svojstva koja grijači trebaju imati jesu slijedeća [4]:

- Visoko talište
- Postojanost u atmosferi peći

- Relativno konstantan otpor unutar radnog temperaturnog raspona
- Mogućnost deformiranja u željene oblike ili dostupnost oblika
- Otpornost na toplinski umor

Elektrootporni materijali za grijače peći mogu se podijeliti u slijedeće četiri skupine:

- Metalne legure: Fe-Cr-Al ili Ni-Cr-Al legure, mogu se koristiti od 1000 °C do 1400 °C. One su najčešći i najjeftiniji materijali za grijače peći.
- Vatrostalni metali: volfram, molibden, tantalum, mogu se koristiti od 1500 °C do 2000 °C.
- Plemeniti metali i legure: platina i legura platine i rodija, mogu se koristiti od 1200 °C do 1800 °C.
- Nemetalni materijali:– silicijev karbid ili molibdenov disilicid, mogu se koristiti od 1200 °C do 1750 °C.

U ovom radu u daljnjim poglavljima govorit će se o elektrootpornim grijačima iz skupine metalnih legura, iako su prakse konstruiranja slične i kod drugih skupina.

#### **2.4.2 Ograničenja upotrebe elektrootpornih grijača iz skupine metalnih legura**

Metalne legure elektrootpornih grijača pri povišenim temperaturama stvaraju sloj oksida na svojoj površini, koji ih štiti od daljnje oksidacije. Sloj oksida treba biti otporan na difuziju plinova i metalnih iona, treba biti kompaktan, a ujedno tanak i dobro vezan s materijalom grijača, kako ne bi došlo do odvajanja njegovog pri promjenama temperature. Sastav i svojstva oksida ovise o materijalu grijača, a uglavnom se radi o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  oksidima.

Faktori koji utječu na smanjenje životnog vijeka grijača iz skupine metalnih legura jesu slijedeći [4,7]:

- Potporni materijal – mora biti pažljivo odabran pošto je u direktnom kontaktu s legurom grijača. Treba imati najmanje 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u sastavu. Za više temperature, potreban je viši postotak. Sadržaj nevezanog kvarca u materijalu mora biti čim niži. Ne smije se koristiti vodeno staklo kao vezivo u potpornim materijalima.
- Vodena para – skraćuje životni vijek
- Halogeni elementi – fluor, klor, brom, jod, koji napadaju metalne legure grijača na niskim temperaturama
- Sumpor – FeCrAl legure su relativno stabilne u nereducirajućim atmosferama, NiCr nisu otporne na sumpor u atmosferi

- Soli i oksidi – soli alkalnih metala, spojevi s borom u visokim koncentracijama oštećuju leguru grijača
- Metali – grijači trebaju biti zaštićeni od prskanja rastaljenih metala koji reagiraju s legurama grijača
- Ostalo – Kontaminanti od rukovanja (potrebno nositi rukavice), kontaminacija s materijala koji se zagrijava (potrebno osigurati čiste površine materijala prije ulaska u peć)

U Tablica 2.2 su prikazana svojstva metalnih legura elektrootpornih grijača.

**Tablica 2.2 Metalne legure elektrootpornih grijača [4]**

Sastav %	Komercijalni naziv	Maksimalna radna temperatura °C (Zrak)	Dostupni oblici	Oblikovanje	Električni otpor (20°) $\Omega\text{cm} \times 10^6$	Atmosfera i korisna temperatura °C
22 Cr, 5.8 Al Fe - Rem	Kanthal A1 Kanthal AF	1400	šipka, žica, traka	savijanje, rezanje, zavarivanje	145	Vlažan zrak, dušik, vodik, egzotermno 1100-1200 reducirajuće 1050-1200, vakuum-1100
22 Cr, 5.3 Al Fe - Rem	Kanthal A	1400 (1300)	- -	- -	139	- -
22 Cr, 4.8 Al Fe - Rem	Kanthal D	1300 (1200)	- -	- -	135	Vlažan zrak, dušik, vodik, vakuum-1050
20 Cr 80 Ni	Nikrothal 80+, Brightroy Nichrome	1200	- -	- -	109	Vodik 1250, neutralno reducirajuće 900-1100
15 Cr, 25 Fe, 60 Ni	Nikrothal 60+, Brightroy B Nichrome	1250	- -	- -	111	Vlažan zrak 1100, dušik, neutralni vodik 1200
20 Cr, 45 Fe, 35 Ni	thal 40+, Brightroy F Nich	1100	- -	- -	104	Vlažan zrak 1050 neutraloi, egzotermno 1050, vodik-115

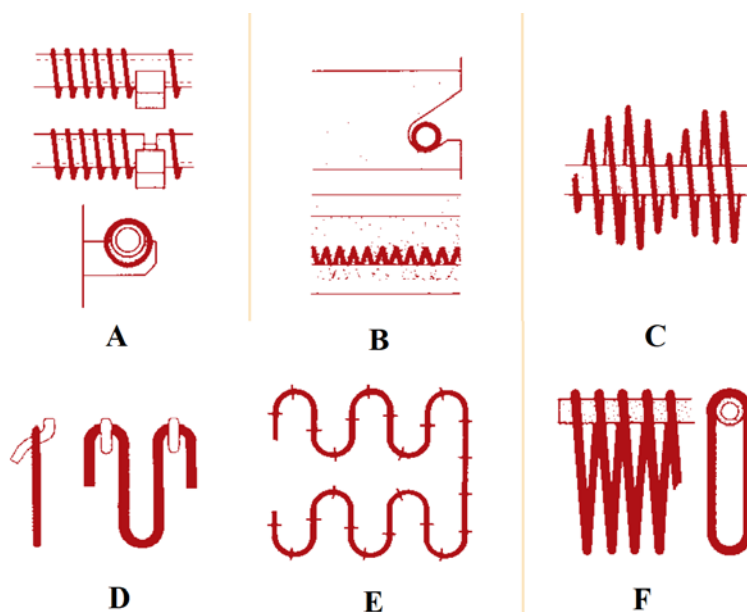
### 2.4.3. Montaža grijača

Jednokomorna peć ima šest zasebnih površina koje su prikladne za postavljanje grijača. Postoje izvedbe peći (uglavnom snage iznad 60 kW) kod kojih se grijači elementi nalaze sa svih strana radne komore. Kod manjih peći grijači se gotovo uvijek nalaze na bočnim stranicama i na dnu peći. Obično se grijači stavljaju na tri plohe, zato što koriste trofazni izvor struje pa kako bi podjednako opteretili svaku fazu koriste tri grijača jednakih ili sličnih karakteristika.

Na prednjoj strani peći nastoji se izbjeći stavljanje elemenata jer to može predstavljati sigurnosni problem za operatera peći te komplicira izvedbu radi dovoda električne struje na pomična vrata. Stražnja strana komore peći se nastoji izbjeći radi mogućnosti oštećivanja elemenata tijekom stavljanja šarže u peć. Gornja strana komore peći predstavlja problem za

održavanje peći ako dođe do pucanja grijaćeg elementa, čime može doći do kratkog spoja ili spajanja obratka na visoki napon. Donja strana (dno) komore peći također predstavlja problem za održavanje peći jer se na nju se stavljaju obradci pa je potrebna određena zaštita grijača koja mora biti dovoljne nosivosti.

Kako bi se grijačima osigurao dugi životni vijek, potrebno ih je adekvatno dimenzionirati. Za jednaku snagu (jednaki otpor uz isti napon i struju) i duži životni vijek (odnosno manju toplinsku opterećenost grijača) nastoji se primijeniti grijače većeg promjera (što smanjuje otpor i opterećenje grijača) i veće dužine (što povećava otpor). Kako bi se mogli montirati u peć, moraju se na određeni način savinuti. Grijači u obliku žice se savijaju u spirale i montiraju na keramičke cijevi ili u utore (Slika 2.7: A, B, C), a grijači većeg promjera se pretežito vješaju na keramičke držače (Slika 2.7: D, E, F). Bitno je napomenuti da se montiranjem grijača na načine D, E, F Slika 2.7, zbog „slobodnijeg“ prijelaza topline, grijači mogu više opteretiti, od 3 do 6 W/cm<sup>2</sup> površine grijača, dok se oblici A i B mogu opteretiti s 2 do 4 W/cm<sup>2</sup> [8].



Slika 2.7 Načini savijanja grijača u obliku žice [8]

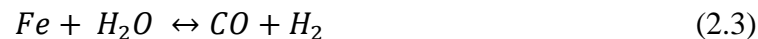
## 2.5. Zaštitna atmosfera u komori peći

Peć bez kontrolirane atmosfere sadrži zrak, odnosno nevezani kisik, vlagu, CO i CO<sub>2</sub>. Većina metala i legura u takvoj atmosferi oksidira, neki tako da stvaraju stabilni oksidni sloj koji štiti od daljnje oksidacije (aluminij, nehrđajući čelici), dok ugljični čelici i mjedi tvore okside koji rastu i otpadaju, ne štiteći materijal od danje oksidacije. Kako bi se spriječila oksidacija materijala, potrebno je osigurati reducirajuću ili neutralnu plinsku zaštitnu atmosferu.

Kemijske reakcije oksidacije kod čelika su:



i



Uz to, površina čelika se u ovisnosti o sastavu atmosfere i temperaturi pougličavajućih i razugličavajućih plinova, . Koliko će ugljika aktivna plinska atmosfera primiti ili predati predmetima ovisi o C-potencijalu atmosfere i postotku ugljika u čeliku. Reakcije s ugljikom iz čelika i plinskom atmosferom su:



Reakcija vodenog plina događa se u atmosferama koje sadrže CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i H<sub>2</sub>, a konstanta ravnoteže reakcije ovisi o temperaturi:



Za izbor optimalne plinske zaštitne atmosfere, njezin kemijski sastav i ravnoteža plinskih komponenti ne smije izazvati oksidaciju, a odnos komponenti koje razugličuju ili pougličuju površinu mora biti takav da ne dođe ni do razugliččenja niti do pougliččenja, ako se to ne želi. Za dobivanje željenog sastava plinske atmosfere, potrebno je konstituente dobiti reakcijom u generatorima atmosfere, koji se onda s plinom nosačem, obično dušikom, ubacuju u komoru peći. Moguće je i direktno ubrizgavati plinove u komoru iz plinskih spremnika, što je dugoročno skuplja opcija. Svakako je potrebno mjeriti sadržaj atmosfere i ventilima regulirati sastav, a uz to je potrebno na izlazu peći izgarati otrovne produkte atmosfere kako ne bi došlo do otrovanja ili gušenja radnika u pogonu [4].

## 2.6. Mjerenje temperature u komori peći

Kako bi se postigla odgovarajuća temperatura toplinske obrade i održala tijekom cijelog postupka na zadanoj vrijednosti nužno je provesti mjerenje i regulaciju temperature. U prošlosti nisu postojali sofisticirani elektronički mjerni instrumenti, a kovači i kalioči su ipak kovali i otvrdnjavali čelike na vrlo kvalitetnoj razini. Zagrijavali su ih na otvorenom plamenu i znali su je li na potrebnoj temperaturi prateći boju. Svako tijelo zrači energiju, a kod nekih tijela i temperaturama je ta energija vidljiva radi emitiranja elektromagnetskih valova u vidljivom spektru. Uz to, kovači i alatničari su već od početaka primjene kovanog željeza u Starom vijeku shvatili kako se površina metala pri različitim temperaturama oboji, zbog stvaranja oksida, a

isto tako su temperaturu mjerili magnetom jer su primijetili kako na povišenim temperaturama čelik gubi feromagnetna svojstva, iako nisu u to vrijeme znali prave razloge ove pojave, a niti kako se zove ta temperatura [9].

Danas se u obrtničkom kovanju i kaljenju i još ponegdje koristi vizualna procjena temperature na temelju boje zagrijane površine, dok se u industrijskoj primjeni toplinske obrade primjenjuju normama propisane metode mjerenja temperature utemeljene na promjeni električnog otpora metala s promjenom temperature, električnom potencijalu stvorenom radom termočlanaka (tzv. Seebeckov efekt) i mjerenju toplinskog zračenja emitiranog s ugrjane površine predmeta pirometrima i termografskim kamerama. Mjerenje temperature dijeli se na termometriju, koja mjeri temperature niže od 400°C (pomoću termometara) i pirometriju koja se bavi mjerenjem viših temperatura (pomoću pirometara i termokamera) [4].

### **2.6.1. Promjena otpora metala promjenom temperature**

Za mnoge metale poznata je promjena otpora u ovisnosti u temperaturi, što je moguće koristiti za mjerenje temperature. Promjenu otpora moguće je vrlo precizno mjeriti Whitestone-ovim mostom. Obično se kao materijal kojem se mjeri otpor koristi platina. Tako je moguće vrlo precizno mjeriti temperature od 258 °C do 900°C. Odnos temperature i otpora platine je sljedeći [4]:

$$R_t = R_o(1 + A * T + B * T)^2 \quad (2.7)$$

gdje je

$R_t$  – otpor platine na nekoj temperaturi

$R_o$  – otpor platine na ledištu vode, 0°C

A i B – konstante vezane za konkretni termometar od platine

T – temperatura

Ovi termometri, iako vrlo precizni, radi osjetljivosti na rukovanje nisu rasprostranjeni u industriji, osim za posebne potrebe [4].

### **2.6.2. Termočlanci**

Termočlanci (termoparovi) su radi svoje praktičnosti vrlo brzo postali standard u mjerenju temperature u industriji. Rad im se temelji na Seebeck-ovom efektu, koji glasi: „U strujnom krugu napravljenom od dva različita metala, ako je jedan kraj na temperaturi  $T_1$ , a drugi na nižoj temperaturi  $T_2$ , javlja se elektromotorna sila proporcionalna razlici u temperaturama  $T_1 - T_2$ .“



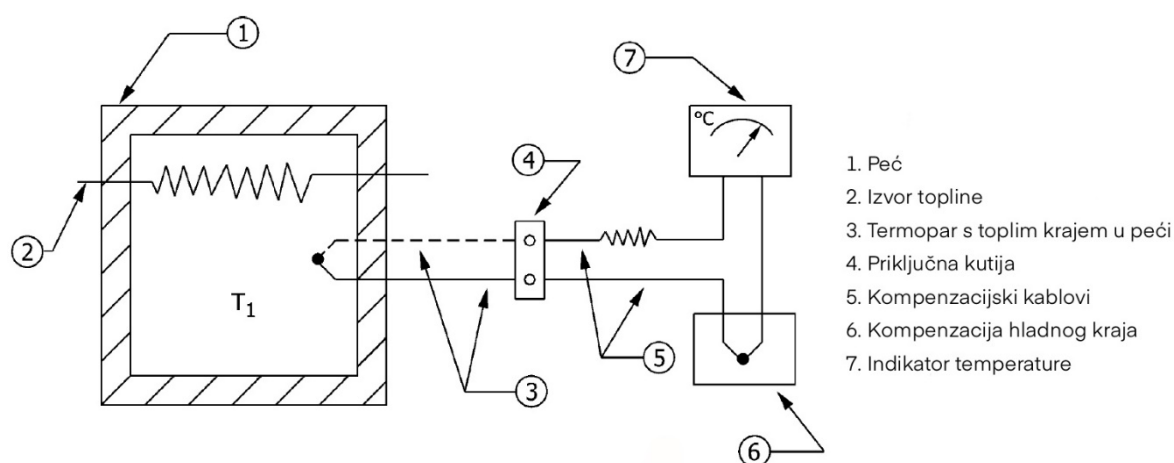
$$U = K_s(T_1 - T_2) \quad (2.8)$$

gdje je

$U$  – elektromotorna sila

$K_s$  – koeficijent proporcionalnost (Seebeckov koeficijent)

$T_1$  i  $T_2$  – temperature spojeva



**Slika 2.8** Mjerenje temperature u peći pirometarskim termoparom [4]

Termoparovi se mogu koristiti do temperature blizu talištu one legure s nižim talištem od kojeg je termopar izrađen. Obično se koriste od 150 °C do 100 °C niže od tališta [4]. Bitno je da elektromotorna sila bude dovoljno velika da bude mjerljiva i da njena ovisnost o temperaturi bude linearna. Ako nije linearna, potrebno je odgovarajućim algoritmom obrade podataka kompenzirati nelinearnosti.

#### 2.6.2.1. Standardne oznake termoparova

Danas su komercijalno dostupni termoparovi podijeljeni u skupine, koje se označavaju slovom. Svako slovo, odnosno skupina, ukazuje na ovisnost elektromotorne sile o temperaturi. Zato nije nužno da dva termopara iste oznake, a različitih proizvođača, imaju podjednake kemijske sastave. Prema skupinama su kalibrirane i regulacijske jedinice na koje se priključuju termoparovi, u koje je teoretski moguće uključiti termopar bilo kojeg oblika i proizvođača. Standardizirani su i načini baždarenja termoparova, odnosno referentne temperature. Neke od

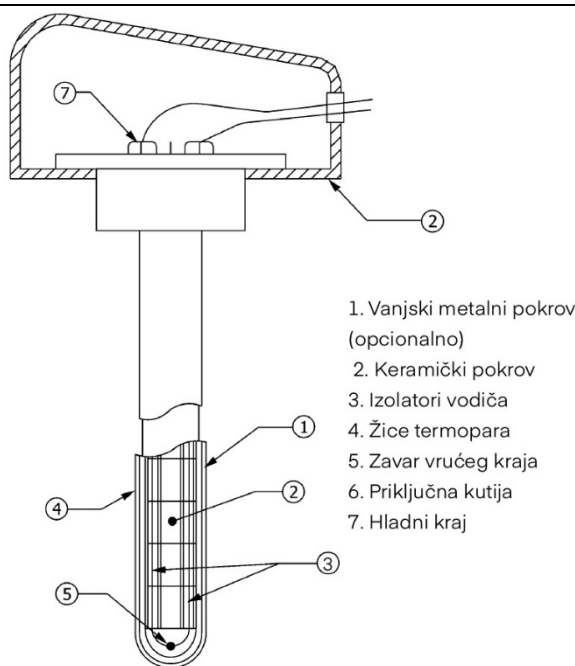
njih su vrelište kisika ( $-182.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), vrelište vode ( $100.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), talište srebra ( $960.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i talište zlata ( $1063.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). U Tablica 2.3 vidljiva su svojstva različitih termoparova prema njihovim oznakama.

**Tablica 2.3 Termoparovi prema skupinama s radnim temperaturama [4]**

Broj	Pozitivna žica (P)	Negativna žica (N)	Tradicionaln naziv	Međunarodna oznaka ASTM	Normalni domet temperature $^{\circ}\text{C}$	Povremena najviša radna temperatura
1.	Pt <sub>70</sub> Rh <sub>30</sub>	Pt <sub>94</sub> Rh <sub>6</sub>	plemenit	B	871-1705	1750
2.	Ni <sub>90</sub> Cr <sub>10</sub>	Ni <sub>45</sub> Cu <sub>55</sub> konstantan	običan	E	0-800	850
3.	Fe	Ni <sub>45</sub> Cu <sub>55</sub> konstantan	običan	J	0-700	760
4.	Ni <sub>90</sub> Cr <sub>10</sub> NICROSYL	Ni <sub>95</sub> Mn <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>	običan	K	0-1200	1260
5.	Ni <sub>84.5</sub> Cr <sub>14</sub> Si <sub>1.5</sub>	Ni <sub>95.5</sub> Si <sub>1.5</sub> Mn <sub>0.4</sub>	običan	N	0-1200	1260
6.	Pt <sub>87</sub> Rh <sub>13</sub>	Pt	plemenit	R	0-1500	1700
7.	Pt <sub>90</sub> Rh <sub>10</sub>	Pt	plemenit	S	0-1480	1700
8.	Cu	Ni <sub>45</sub> Cu <sub>55</sub>	običan	T	-184-+370	370
9.	W <sub>95</sub> Re <sub>5</sub>	W <sub>74</sub> Re <sub>26</sub>	-	Eksperimentalni vakuum	1000-2700	2800
10.	W	W <sub>74</sub> Re <sub>26</sub>	-	Eksperimentalni vakuum	1000-2600	2800
11.		Grafit	-	Vakuum	2000	2800

#### 2.6.2.2. Konstrukcija termopara

Termoparovi korišteni za mjerenje temperature u industrijskim pećima moraju izdržati agresivne atmosfere u kojima se nalaze. Ako legure od kojih su izrađeni nisu adekvatno zaštićene, termoparovi bi oksidirali ili korodirali u kratkom vremenu. Dio termopara koji se nalazi u peći umetnut je u keramičku ili metalnu cijev unutar koje se nalazi izolator, obično keramički prah. Prikaz tipične konstrukcije termopara prikazan je grafički (Slika 2.9).



**Slika 2.9** Konstrukcija termopara [4]

Za ostvarenje Seebeck-ovog efekta, jedan kraj termopara treba biti u peći, a drugi je potrebno držati izvan peći na konstantnoj temperaturi. Po dogovoru, termoparovi su kalibrirani tako da se hladni kraj drži na temperaturi  $0^{\circ}\text{C}$ . U industrijskom postrojenju to nije praktično, pa je potrebno na neki način kompenzirati razliku između stvarne temperature i temperature od  $0^{\circ}\text{C}$ . Ako je u Jednadžbi (2.8)  $T_1$  temperatura peći, a  $T_2$  temperatura hladnog kraja, termopar je baždaren s pretpostavkom da je  $T_2$  jednaka  $0^{\circ}\text{C}$ . Ako je ipak  $T_2$  na sobnoj temperaturi od  $23^{\circ}\text{C}$ , ispada da je razlika  $T_1$  i  $T_2$  manja, pa je tako manja i elektromotorna sila. Bitno je na neki način izvesti kompenzaciju, a u ovisnosti o traženoj preciznosti i cijeni treba odabrati odgovarajući postupak kompenzacije. Neki načini kompenzacije te razlike jesu slijedeći [4]:

- Pretpostaviti konstantnu temperaturu okoline (za sustave koji ne zahtijevaju potpunu preciznost) i pomaknuti kazaljku unaprijed tj. na prikazanu temperaturu
- Povezati kazaljku s bimetalnom oprugom da u ovisnosti o temperaturi okoline pomiče kazaljku
- Unutar mjernog instrumenta držati hladni kraj na temperaturi višoj od okolišne koristeći grijač i zasebni sustav održavanja konstante temperature (mala peć u mjernom instrumentu)
- Koristiti termistor (otpornik koji mijenja otpor ovisno o temperaturi) direktno spojen u strujni krug s termoparom

- Ostale naprednije metode

Uz to, potrebno je koristiti kompenzacijske kablove koje povezuju žice termopara s regulacijskom jedinicom. Žice termopara, koje zbog visoke cijene nije praktično dovesti direktno do regulacijske jedinice (one moraju moći izdržati temperaturu peći), na kraju termopara se spajaju s kompenzacijskim kablovima. Kompenzacijski kablovi su odabrani na način da proizvode jednaku elektromotornu silu kao i termopar na temperaturi od 50°C do 150°C, kolika može biti temperatura na kraju termopara.

### **2.6.3. Radijacijska pirometrija**

Elektromagnetna radijacija tijela na nekoj temperaturi može se izmjeriti senzorom ili usporediti s radijacijom tijela poznate temperature. Na ta dva principa se zasniva radijacijska pirometrija. Glavna prednost u odnosu na termoparove je što nema direktnog kontakta između mjernog instrumenta i vrućeg tijela, bitno je samo da su jedan vidljivi drugome. Uz to, vrijeme reakcije je nepostojeće, dok kod termoparova postoji određeno vrijeme potrebno da se temperatura tijela i termopara izjednače i pokazuju točnu vrijednost, što ovisi i o karakteristikama tijela i medija između njih. Iz tih razloga je radijacijska pirometrija rasprostranjena u praćenju procesa valjanja, ekstrudiranja, kovanja itd.

Ipak, za ispravno mjerenje potrebno je poznavati emisivnost mjerenog tijela. Isto tako, radi ograničenja dostupnih senzora, ne mogu biti mjerene sve valne duljine i cijena uređaja je prosječno viša nego cijena sustava s konvencionalnim termoparovima.

### **2.6.4. Ostali načini mjerenja temperature**

Neki od ovih načina mogu se koristiti za mjerenje niže temperatura, mjerenje viših temperatura, za kalibraciju drugih elemenata i slično. Neki od njih su slijedeći [4]:

- Boje za indicaciju temperature koje postizanjem točno određene temperature iščezavaju ili mijenjaju boju
- Bimetalni mjerni uređaji koji se temelje na principu spajanja dva tanka lima izrađena od legura različitog koeficijenta toplinskog širenja. Mogu se koristiti za mjerenje temperature ili za jednostavnu regulaciju grijanja.
- Jednokratni vrhovi koji se koriste za mjerenje temperature agresivnih medija poput rastaljenih metala preko 1500°C. Jednokratni su i jeftini.

- Pirometerski stošci – ne mjere direktno temperaturu već temperaturni ekvivalent koji ovisi o temperaturi i vremenu. Pri određenoj temperaturi, gube svoj oblik i pokazuju da je ta temperatura bila dostignuta.

## 2.7. Regulacija temperature

Za regulaciju temperature peći potrebno je odabrati regulacijski sklop . Za jednostavne i neprecizne peći nižih temperatura dovoljna je regulacija bimetalom, kod koje nije moguće izbjeći oscilacije i česta prekoračenja zadane temperature. Jednostavna regulacija tipična je za konvencionalne peći u kućanstvima.

Za toplinsku obradu metala, kao i sve ostale procese koji zahtijevaju zagrijavanje s određenom preciznošću, uobičajeno se koriste PID regulatori. Oni su danas najzastupljeniji na tržištu u primjeni i pristupačnih su cijena za regulaciju peći manje i veće instalirane snage. PID regulatori mogu pratiti promjenu temperature s vremenom i iz toga računati derivaciju  $dT/dt$  i integral  $\int T dt$  tijekom zadanog vremenskog intervala Derivacijski i integralni član povezani su s proporcionalnim članom.

PID regulator kontrolira otvaranje i zatvaranje strujnog kruga grijača pomoću tiristora, Solid State Relay-a ili drugih načina. Uključivanje i isključivanje grijača u PID regulacijskom sustavu pokreće se u točno određenim trenucima, prije nego što se dostigne željena temperatura, za razliku od regulatora koji isključuju grijače tek nakon postizanja temperature. Pošto je prelazak topline s grijača na prostor i senzor temperature tranzijentan proces, temperatura će nastaviti rasti neko vrijeme i nakon isključenja grijača, što PID regulator može „predvidjeti“.

# **EKSPERIMENTALNI DIO**

---

### 3. KONSTRUKCIJA PEĆI

Projektiranje peći obično počinje s potrebnim karakteristikama koje su usko vezane za njezinu svrhu. To su dimenzije i najviša radna temperatura. U današnjoj industriji nije više upitno može li se dovesti električna energija dovoljne snage do lokacije peći. Za industrijsku primjenu su konstruirane i izgrađene peći veličine obiteljske kuće i peći u kojima se može rastaliti npr. željezo u količinama od nekoliko tona. Ipak, u radu se ne projektira takva industrijska visokokapacitetna peć, već mala komorna električna peć.

U zadatku je zadana najviša temperatura peći od 950°C. U razradi proračuna peći koristit će se viša temperatura peći od 1200°C, kako bi se u peći mogla i sinterirati glinica. To će se koristiti povremeno, pa se očekuje dulji vijek trajanja grijača na nižim temperaturama do 950°C, koje će se koristiti za kaljenje i žarenje čelika.

Dimenzije peći nisu zadane, već će biti predmet proračuna, uz uvjet da se projektirana peć može koristiti u neindustrijskom postrojenju, odnosno da se može napajati iz trofaznog priključka s limitacijskom sklopkom od 50A.

Određeni elementi peći biti će odabrani prema dostupnosti na lokalnom tržištu. To su grijači, odnosno materijal izrade grijača i vatrostalni materijali za izradu peći.

Proračun i konstruiranje će teći na sljedeći način:

- Proračun i odabir grijaćih elemenata
- Odabir materijala za izradu peći
- Određivanje volumena komore peći i odabir debljine stijenki
- Konstrukcijsko rješenje male komorne peći
- Prijedlog sheme spajanja električnih i regulacijskih elemenata peći

### 3.1 Proračun i odabir grijaćih elemenata peći

#### 3.1.1. Matematički model za proračun snage grijača

Polazno ograničenje kod dimenzioniranja grijača električne peći je izvor električne struje s limitacijskim sklopkama 50 A. Limitacijske sklopke limitiraju ukupnu snagu priključenih trošila. Snaga simetričnog trofaznog sustava može se izraziti preko faznih ili linijskih vrijednosti:

$$P = 3 * U_f * I_f * \cos(\varphi) \quad (3.1)$$

$$P = \sqrt{3} * U_l * I_l * \cos(\varphi) \quad (3.2)$$

gdje je

$U_l$  – linijski napon, između dva vodiča mreže

$U_f$  – fazni napon, napon na trošilu

$I_l$  – linijska struja

$I_f$  – fazna struja, struja na trošilu

$P$  – ukupna snaga sustava

$\varphi$  – fazni pomak

Maksimalna snaga sustava čiji izvor ima linijski napon 400 V i maksimalnu dopuštenu linijsku struju 50 A za trošila s faznim pomakom 0 (otpornička trošila poput električnih grijača) je:

$$P = \sqrt{3} * 400 * 50 * \cos(0) = 34\,641\text{W} \quad (3.3)$$

Pretpostavlja se da je dio raspoložive snage rezerviran za trošila osim električne peći, stoga se za ta trošila rezervira 9 kW. Tako za rad peći preostaje 25 641 W. Uz konstantan napon, maksimalna linijska struja je:

$$I_l = \frac{25\,641}{\sqrt{3} * 400 * \cos(0)} = 37\text{ A} \quad (3.4)$$

Kod spajanja grijača moguće su dvije opcije: trokut (delta) spoj i zvijezda (Y) spoj.

Za trokut spoj vrijedi:

$$U_l = U_f \quad (3.5)$$

$$I_l = \sqrt{3} I_f \quad (3.6)$$

Vrijednosti faznog napona i fazne struje kod trokut spoja za ovaj slučaj su:



$$U_f = U_l = 400 \text{ V} \quad (3.7)$$

$$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}} = 21,36 \text{ A} \quad (3.8)$$

Kod zvijezda spoja vrijedi:

$$U_l = \sqrt{3} U_f \quad (3.9)$$

$$I_l = I_f \quad (3.10)$$

Vrijednosti kod spajanja u zvijezda spoj su:

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V} \quad (3.11)$$

$$I_f = I_l = 37 \text{ A} \quad (3.12)$$

Kod određenih sustava postoje razlozi zašto odabrati trokut ili zvijezda spoj. Kod elektrootpornih grijača razlog radi kojeg se teži trokut spoju je taj što je za manju jakost električne struje potreban vodič koji spaja grijač s izvorom električne struje manjeg poprečnog presjeka. Za trokut spoj bio bi dovoljan vodič poprečnog presjeka  $2.5 \text{ mm}^2$ , dok bi za zvijezda spoj bio potreban vodič presjeka  $4 \text{ mm}^2$  ili  $6 \text{ mm}^2$ . Za ovu peć odabrat će se trokut spoj.

Trošila u sustavu nastoje se dimenzionirati tako da budu simetrično opterećuju pojedine faze. Za simetrično opterećene električne grijače, maksimalna snaga po grijaču limitirana je na:

$$P_1 = \frac{25\,641}{3} = 8\,547 \text{ W} \quad (3.13)$$

Pod pojmom grijaćeg elementa podrazumijeva se kombinacija žice, odnosno materijala izrade i potpornih elemenata, odnosno vatrootpornih materijala i oblika kojim su grijači vezani za njih, koji su bili sistematizirani u prethodnim poglavljima. Sam odabir elemenata nije potpuno kvantificiran jer ovisi o mnogim faktorima, od potrebne performanse, cijene sirovog materijala, traženog životnog vijeka, uvjetima rada itd. Ne postoji izraz kojim bi se pretpostavio životni vijek grijača. Često je konačni odabir temeljen uvelike na iskustvu. Ono što je sigurno je da niže temperature grijača i veći promjeri žice znače dulji životni vijek grijača, ali i veću cijenu grijača.

Odabrani materijal grijaćeg elementa je Kanthal A-1 radi dostupnosti i zadovoljavajućih svojstava.

Kanthal A-1 je legura koja sadrži 22% Cr, 5.8% Al i 72,2% Fe s talištem na  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . U oksidirajućoj atmosferi može podnijeti temperature do  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , odnosno  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  ukoliko se radi o vlažnom zraku. Dostupan je u promjerima od  $0.05 \text{ mm}$  do  $10 \text{ mm}$  u obliku žice. Ima otpor od  $1.45 \text{ } \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$  pri  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

U nastavku će se prikazati metoda proračuna grijača i tablično prikazati rezultati za tri različita odabrana promjera grijača, 1,6 mm, 2,0 mm i 3,0 mm i za tri različite snage: 3000 W, 5000 W i 8000 W po grijaču. Razlog odabira navedenih kombinacija je da se prikaže koji se sve parametri mijenjaju promjenom kombinacije tražene snage i debljine žice grijača.

Vrijednosti konstanti za odabrane promjere žica su vidljive u tablici.

**Tablica 3.1** Konstante KANTHAL A-1 žice za tri različita promjera [7]

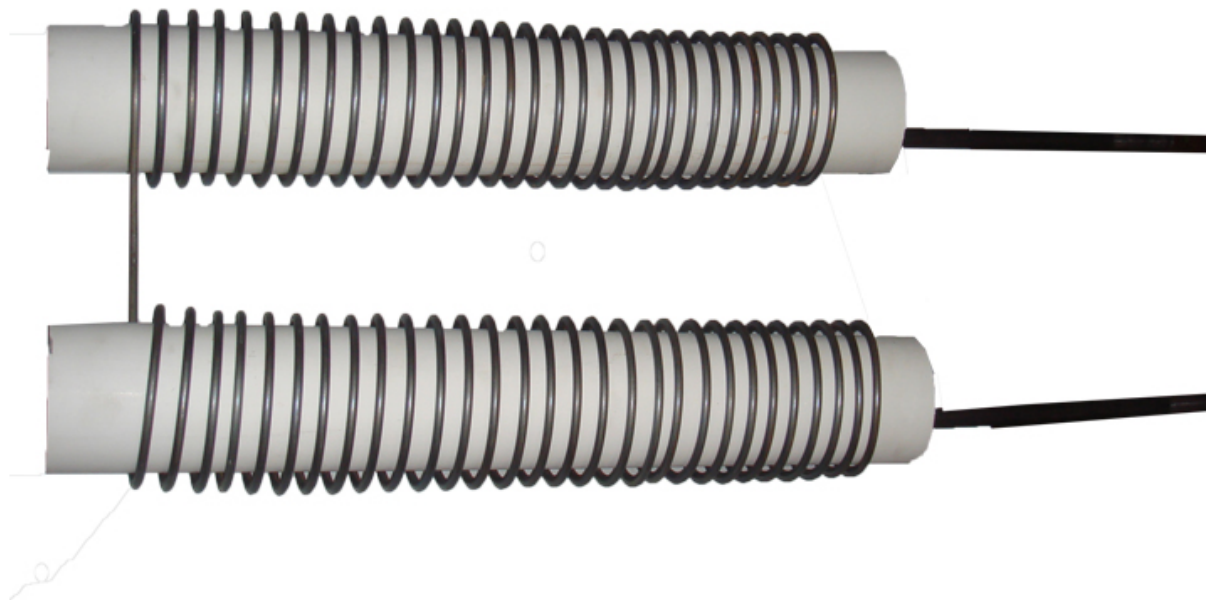
KANTHAL A-1	1.6mm žica	2.0mm žica	3.0mm žica
Masa po metru, g/m	14.3	22.3	50.2
Otpor po metru, $\Omega/m$	0.721	0.462	0.205
Površina grijača po metru, $cm^2/m$	50.3	62.8	94.2
Promjer spirale	21.6	27	39

Promjer spirale odnosi se na srednji promjer namotane žice grijača. Preporuka proizvođača je da je od 12 do 14 puta veći od promjera žice grijača [7]. Elementi se omotavaju oko keramičkih cijevi prikazanih na slici (Slika 3.1). One imaju standardni promjer, pa je promjer spirale dobiven kao zbroj promjera keramičke cijevi i promjera žice grijača.

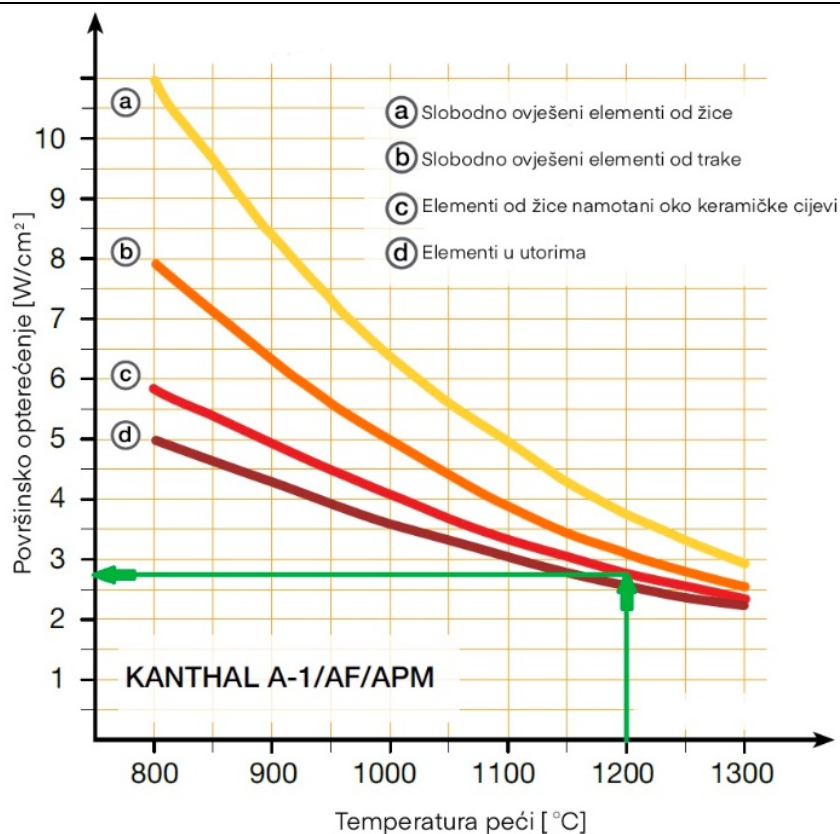


**Slika 3.1** Keramičke cijevi s visokim postotkom  $Al_2O_3$  koriste se kao nosači grijačkih elemenata [10]

Vrlo bitna vrijednost kod dimenzioniranja grijača je površinsko opterećenje grijača koje se izražava u  $\text{W}/\text{cm}^2$ , odnosno snazi grijača svedenu na površinu oplošja grijača. Površinsko opterećenje je određeno načinom montaže grijača u peć, što je za ovu peć omotavanjem oko keramičke cijevi i temperaturom peći, koja je  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Odabran je ovaj način montaže grijača kako bi se izbjegla potreba za izradom utora za držanje grijača. Omotavanjem oko keramičke cijevi dozvoljeno je više površinsko opterećenje (Slika 3.3) te nema ograničenja na materijal unutrašnje stijenke radi kompatibilnosti s materijalom grijača. Montaža vješanjem prikladna je za veće snage (Slika 2.7: D, E, F). Za ta ograničenja, maksimalno dopušteno opterećenje grijača je  $2.7\text{ W}/\text{cm}^2$  (Slika 3.3). Preporuka je stvarnu vrijednost držati nižom, radi duljeg radnog vijeka grijača.



**Slika 3.2** Grijači element omotan oko keramičke cijevi [11]



**Slika 3.3** Dozvoljeno površinsko opterećenje u ovisnosti o temperaturi i načinu montaže grijaćeg elementa u peć [8]

Za svaku kombinaciju u tablicama 3.2 do 3.20 se nalaze slijedeće vrijednosti za pojedini grijač (u peći se nalaze tri ista grijača):

- Električni otpor žice grijača
- Duljina žice za jedan grijač, koristeći vrijednost konstante žice iz tablice (Tablica 3.1)
- Površina žice grijača, koristeći vrijednost konstante žice iz tablice (Tablica 3.1)
- Površinsko opterećenje, koje se može izračunati s poznatom snagom i površinom grijača
- Zadovoljava li uvjet maksimalnog površinskog opterećenja od 2,7 W/cm<sup>2</sup>
- Broj namotaja grijača žice uz promjer spirale izabran iz tablice (Tablica 3.1)
- Minimalna i maksimalna duljina namotaja grijača (prema preporuci proizvođača korak spirale treba biti 1,2 do 2 puta veći od promjera žice grijača)
- Ukupna masa grijača

Za kombinacije koje zadovoljavaju, izračunate su duljine grijača kada se grijači podijele u više redova.

### 3.1.2. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 9 kW

U tablici (Tablica 3.2) prikazane su vrijednosti zajedničke svim promjerima žice kod peći od 9 kW. Manje vrijednosti struje grijača u odnosu na više snage rezultiraju većim potrebnim otporom grijača. Porastom promjera žice raste njena potrebna duljina i ukupna masa grijača, kao i cijena (Tablica 3.3, Tablica 3.5, Tablica 3.7). Potrebne duljine grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova za pojedinačni element prikazane su u tablicama (Tablica 3.4, Tablica 3.6 i Tablica 3.8).

**Tablica 3.2 Konstante za peć od 9 kW**

Konstante	
Napon, V	400
Ukupna snaga, W	9000
Broj grijača	3
Snaga jednog grijača, W	3000
Struja grijača, A	7,5
Maksimalno dopušteno površinsko opterećenje za 1200 °C, W/cm <sup>2</sup>	2,7

**Tablica 3.3 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 1,6mm**

Izračun	
OTPOR = $U \cdot U / P$ , $\Omega$	53,33
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	74,0
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, cm <sup>2</sup>	3720,8
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, W/cm <sup>2</sup>	0.8
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	1090,6
Minimalna duljina namotanog elementa, 1.2 * promjer žice * broj namotaja, mm	2094,0
Maksimalna duljina namotanog elementa, 2 * promjer žice * broj namotaja, mm	3490,0
Ukupna masa grijača, g	1057,8

**Tablica 3.4 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 1,6 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	2094	3490
2	1047	1745
3	698	1163,3
4	523,5	872,5
5	418,8	698
6	349	581,5

**Tablica 3.5 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 2,0 mm**

Izračun	
OTPOR = $U^2/P$ , $\Omega$	53,33
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	115,4
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $\text{cm}^2$	7249,6
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $\text{W}/\text{cm}^2$	0,4
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	1361,6
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	3267,9
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	5446,6
Ukupna masa grijača, g	2574,3

**Tablica 3.6 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 2,0 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	3267,9	5446,6
2	1634,0	2723,3
3	1089,3	1815,5
4	817,0	1361,6
5	653,6	1089,3
6	544,7	907,8

**Tablica 3.7 Proračun 9kW peći s promjerom žice grijača 3,0 mm**

Izračun	
OTPOR = $U^2/P, \Omega$	53,33
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	260,2
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $cm^2$	24507,3
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $W/cm^2$	0,1
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	2124,5
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	7648,1
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	12746,8
Ukupna masa grijača, g	13060,2

**Tablica 3.8 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 9kW i promjer žice grijača 3,0 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	7648,1	12746,8
2	3824,0	6373,4
3	2549,4	4248,9
4	1912,0	3186,7
5	1529,6	2549,4
6	1274,7	2124,5

### 3.1.3. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 15 kW

U tablici (Tablica 3.9) prikazane su vrijednosti zajedničke svim promjerima žice kod peći od 15 kW. Vidljivo je kako su je za veću snagu potrebne manja duljina i masa u odnosu na odabrane promjere kod peći od 9 kW (Tablica 3.10, Tablica 3.12, Tablica 3.14). Potrebne duljine grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova za pojedinačni element prikazane su u tablicama (Tablica 3.11, Tablica Tablica 3.13 i Tablica 3.15).

**Tablica 3.9 Konstante za peć od 15 kW**

Konstante	
Napon, V	400
Ukupna snaga, W	15000
Broj grijača	3
Snaga jednog grijača, W	5000
Struja grijača, A	12,5
Maksimalno dopušteno površinsko opterećenje za 1200 °C, W/cm <sup>2</sup>	2,7



**Tablica 3.10 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 1,6 mm**

Izračun	
OTPOR = $U \cdot U / P$ , $\Omega$	32,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	44,4
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $\text{cm}^2$	2232,5
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $\text{W}/\text{cm}^2$	2,2
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	654,4
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	1256,4
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	2094,0
Ukupna masa grijača, g	634,7

**Tablica 3.11 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 1,6 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	1256,4	2094,0
2	628,2	1047,0
3	418,8	698,0
4	314,1	523,5
5	251,3	418,8
6	209,4	349,0

**Tablica 3.12 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 2,0 mm**

Izračun	
OTPOR = $U \cdot U / P$ , $\Omega$	32,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	69,3
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $\text{cm}^2$	4349,8
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $\text{W}/\text{cm}^2$	1,1
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	817,0
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	1960,8
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	3267,9
Ukupna masa grijača, g	1544,6

**Tablica 3.13 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 2,0 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	1960,8	3267,9
2	980,4	1634,0
3	653,6	1089,3
4	490,2	817,0
5	392,2	653,6
6	326,8	544,7

**Tablica 3.14 Proračun 15kW peći s promjerom žice grijača 3,0 mm**

Izračun	
$OTPOR = U \cdot U / P, \Omega$	32,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	156,1
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $cm^2$	14704,4
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $W/cm^2$	0,3
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	1274,7
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	4588,9
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 \cdot \text{promjer žice} \cdot \text{broj namotaja}$ , mm	7648,1
Ukupna masa grijača, g	7836,1

**Tablica 3.15 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 15kW i promjer žice grijača 3,0 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	4588,9	7648,1
2	2294,4	3824,0
3	1529,6	2549,4
4	1147,2	1912,0
5	917,8	1529,6
6	764,8	1274,7

### 3.1.4. Proračun grijaćih elemenata peći ukupne snage 24 kW

U tablici (Tablica 3.16) prikazane su vrijednosti zajedničke svim promjerima žice kod peći od 24 kW. Za ovoliku snagu peći nije prikladno koristiti žice debljine 1,6 mm i 2,0 mm. Razlog tomu je preveliko površinsko opterećenje grijača, koje bi kod rada peći vrlo brzo dovelo do uništenja grijaćeg elementa (Tablica 3.17, Tablica 3.18). Grijače od žice 3,0 mm moguće je koristiti za peć od 24 kW, odnosno 8 kW po pojedinačnom grijaču (Tablica 3.19, Tablica 3.20).

**Tablica 3.16 Konstante za peć od 24 kW**

Konstante	
Napon, V	400
Ukupna snaga, W	24000
Broj grijača	3
Snaga jednog grijača, W	8000
Struja grijača, A	20
Maksimalno dopušteno površinsko opterećenje za 1200 °C, W/cm <sup>2</sup>	2,7

**Tablica 3.17 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 1,6 mm**

Izračun	
OTPOR = $U^2/P$ , $\Omega$	20,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	27,7
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, cm <sup>2</sup>	1395,3
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, W/cm <sup>2</sup>	5,7
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	NE
Broj namotaja spirale	409,0
Minimalna duljina namotanog elementa, 1,2 * promjer žice * broj namotaja, mm	785,3
Maksimalna duljina namotanog elementa, 2 * promjer žice * broj namotaja, mm	1308,8
Ukupna masa grijača, g	396,7

**Tablica 3.18 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 2.0 mm**

Izračun	
OTPOR = $U^2/P$ , $\Omega$	20,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	43,3
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $\text{cm}^2$	2718,6
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $\text{W}/\text{cm}^2$	2,9
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	NE
Broj namotaja spirale	510,6
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	1225,5
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	2042,5
Ukupna masa grijača, g	965,4

**Tablica 3.19 Proračun 24kW peći s promjerom žice grijača 3.0 mm**

Izračun	
OTPOR = $U^2/P$ , $\Omega$	20,00
Duljina grijača(žice) = otpor / otpor po metru, metara	97,6
Površina grijača = duljina grijača * površina grijača po m, $\text{cm}^2$	9190,2
Površinsko opterećenje = snaga grijača / površina, $\text{W}/\text{cm}^2$	0,9
ZADOVOLJAVAJUĆE OPTEREĆENJE GRIJAČA	DA
Broj namotaja spirale	796,7
Minimalna duljina namotanog elementa, $1,2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	2868,0
Maksimalna duljina namotanog elementa, $2 * \text{promjer žice} * \text{broj namotaja}$ , mm	4780,1
Ukupna masa grijača, g	4897,6

**Tablica 3.20 Duljine gotovih grijaćih elemenata za peć od 24kW i promjer žice grijača 3,0 mm**

Duljina gotovih grijaćih elemenata u ovisnosti o broju redova, po grijaču		
Broj redova po grijaču	Duljina, od(min) do (max), mm	
1	2868,0	4780,1
2	1434,0	2390,0
3	956,0	1593,4
4	717,0	1195,0
5	573,6	956,0
6	478,0	796,7

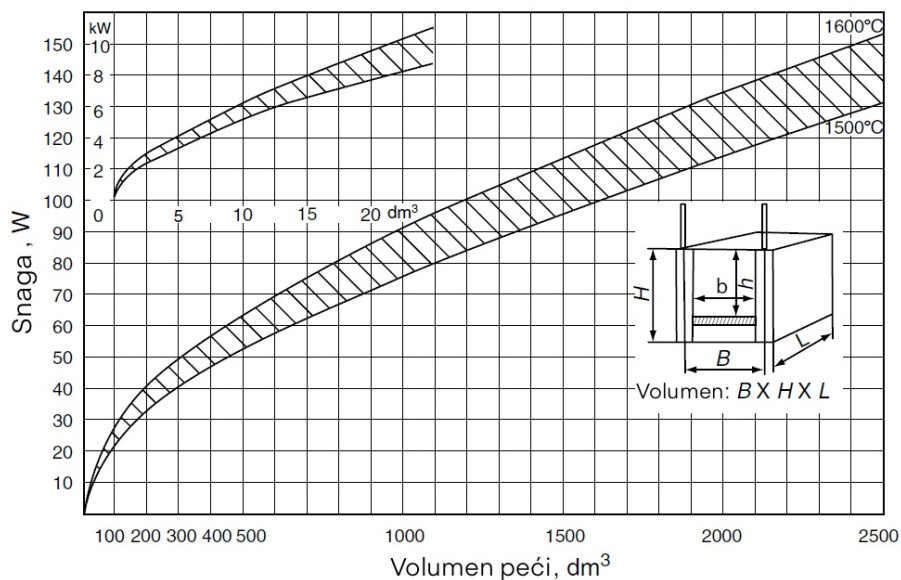
### 3.1.5. Analiza rezultata proračuna grijača

Vidljivo je iz tablica (Tablica 3.3, Tablica 3.5 i Tablica 3.7) kako za 9 kW peć sve tri debljine žice zadovoljavaju površinsko opterećenje koje je redom  $0,8 \text{ W/cm}^2$ ,  $0,4 \text{ W/cm}^2$  i  $0,1 \text{ W/cm}^2$  za žice 1,6 mm, 2,0 mm i 3,0 mm, dok je dopušteno opterećenje  $2,7 \text{ W/cm}^2$ . Ipak, takva kombinacija snage i debljine žice nije zadovoljavajuća. Razlog tomu leži u tablicama (Tablica 3.4, Tablica 3.6 i Tablica 3.8) i u slici (Slika 3.4). Vidljivo je kako je za snagu peći od 9kW približni volumen oko  $20 \text{ dm}^3$ . Ako se pretpostavi montaža grijača u 3 reda, duljina jedne stranice peći, odnosno dubina (ako su grijači montirani na gornju stranu i s bočne dvije strane) je od 698 mm za grijač od 1.6 mm žice do 4248mm za grijač od 3.0 mm žice, što bi dalo dimenzije peći 698 mm x 168 mm x 168 mm odnosno 4248 mm x 68 mm x 68 mm.

Druga varijanta grijača instalirane snage 9 kW je neizvediva radi duljine peći od 4 metara, a širinom i visinom niti 7 centimetara, uz što bi masa grijača iznosila 13 kilograma. Kako grijači imaju određenu debljinu i potrebno je napraviti razmak između pojedinih redova grijača, u 9 kW peći s 3.0 mm žicom ne bi bilo moguće ugraditi grijače, kada bi za 3 reda grijača debljine 39 mm uz razmak od 39 mm među grijačima bila potrebna širina i visina peći barem 234 mm.

Peć dimenzija 698 mm x 168 mm x 168 mm s grijačima promjera 1.6 mm bilo bi moguće izraditi, no iz tehničkih razloga nepraktičnosti izdužene peći (osim za posebne namjene) se opcija ne usvaja.

Za druge varijante broja redova grijača za 1,6 mm žicu postoje rješenja koja zadovoljavaju geometrijske i tehničke zahtjeve, no neće se razmatrati jer je grijač i dalje predimenzioniran prema dozvoljenom površinskom opterećenju.



**Slika 3.4** Približne vrijednosti snage u ovisnosti o volumenu peći [6]

Ako se promotre rezultati za peć od 15 kW iz tablica (Tablica 3.11, Tablica 3.13 i Tablica 3.15) vidljivo je kako sve tri debljine žice zadovoljavaju vrijednost površinskog opterećenja ( $2,2 \text{ W/cm}^2$ ,  $1,1 \text{ W/cm}^2$  i  $0,3 \text{ W/cm}^2$ ). Dubina peći, ovisna o broju redova grijaćih elemenata, ima pogodne vrijednosti za žicu od 1,6 mm i 2,0 mm, dok je za 3,0 mm žicu dubina peći prevelika, a i površinsko opterećenje je vrlo malo, odnosno grijač je predimenzioniran (Tablica 3.11, Tablica 3.13, Tablica 3.15).

Kod peći od 24 kW, grijači od žica 1,6 mm i 2,0 mm ne zadovoljavaju uvjet maksimalnog površinskog opterećenja. Za peć od 24 kW od odabranih moguće je koristiti samo 3,0 mm žicu, koja bi imala površinsko opterećenje od  $0,9 \text{ W/cm}^2$ , što je tri puta manje od maksimalnih  $2,7 \text{ W/cm}^2$ . Za peć od 24 kW koja je namijenjena temperaturama do  $1200 \text{ °C}$  bilo bi idealno odabrati neki promjer žice između 2,0 mm i 3,0 mm.

Za ostatak proračuna će se odabrati peć snage 15 kW koja će koristiti 3 jednaka grijača od žice 1,6 mm. Tako dimenzioniran grijač ima pogodnu površinsku opterećenost i geometrijski su pogodne duljine grijača (Tablica 3.11).

Snaga peći od 15kW za odabrani grijač određena je pri  $20 \text{ °C}$ . Pri višoj temperaturi, potrebno je uračunati porast otpora grijača, koji će dovesti do niže stvarne snage. Na  $1200 \text{ °C}$ , za odabrani

materijal, faktor porasta otpora iznosi 1,04. Dolazi do povećanja električnog otpora, što znači da će se uz konstantni napon smanjiti struja i posljedično smanjiti i snaga:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.14)$$

$$P_{20} = 3 * \frac{400^2}{32} = 15\,000\,W \quad (3.15)$$

$$P_{1200} = 3 * \frac{400^2}{32 * 1,04} = 14\,423\,W \quad (3.16)$$

Odabirom žice potrebno je još odabrati broj redova za pojedini grijači element. Broj redova odabrat će se kao parni broj, kako bi završetci žice grijača izlazili na istu stranu peći na koju i ulaze. To će biti stražnja strana peći, pa bi postavljanjem grijača na bočne strane i na gornju stranu peći bile određene i neke dimenzije, a to su:

- Dubina peći mora biti maksimalnog iznosa 523 mm uvećanog za nekoliko desetaka milimetara, koliko je potrebno za montažu grijača, ukoliko se odabere postavljanje grijača u 4 reda, a minimalnog iznosa 314 mm uvećanog za jednak iznos. Za različiti broj redova po grijaču, vidljive su i ostale vrijednosti u tablici (Tablica 3.11). Maksimalna dubina mogla bi biti i veća, no tada grijači ne bi bili jednako raspoređeni po dubini peći pa se prednja i stražnja površina ne bi ravnomjerno zagrijavali u odnosu na sredinu peći.
- Širini peći određena je minimalna vrijednost radi širine spirale grijača i potrebnog razmaka između njih, postavljenog na gornju stranu peći. Preporuka proizvođača je ostaviti razmak među grijačima barem u iznosu debljine grijača. Za grijač od žice 1.6mm promjera, promjer spirale je 21.6 mm, odnosno širina grijača 23.2m m. Za 4 reda grijača, minimalna širina peći iznosila bi:

$$4 * 23.2 \text{ (grijači)} + 3 * 23.2 \text{ (između grijača)} + 2 * 23.2 \text{ (do ruba peći)} = 208.8 \text{ mm}$$

- Visini peći jednak je zahtjev kao i širini peći te je minimalna visina jednaka minimalnoj širini, pošto se grijači montiraju na bočne stranice u jednakom broju redova kao i na gornjoj stranici. Tako je minimalna visina peći 208.8 mm.



Za minimalne vrijednosti, dobiva se unutrašnja dimenzija peći 320 mm x 210 mm x 210 mm, odnosno zapremnina od 14 L. Iz grafa (Slika 3.4) vidljivo je kako je za peć snage 15 kW prosječan volumen oko 50 L. Stvarni volumen peći biti će vjerojatno između 14 L i 50 L, a odredit će se u ostatku proračuna.

### 3.2 Odabir materijala za izradu toplinske izolacije i oplata peći

Peć će biti izvedena s dvije stijenke od vatrostalnog materijala i jednom stijenkom od čeličnog lima.

Prva stijenka, odnosno unutrašnja stijenka, mora biti od materijala koji je toplinski postojan na temperaturi većoj ili jednakoj 1200 °C. U nju se montiraju keramičke cijevi s grijačima. Ona nije direktno u kontaktu sa žicom grijača pa nema ograničenja vezano za sastav, radi reaktivnosti s materijalom grijača.

Druga stijenka ima ulogu izolacije i primarno su bitna njezina izolacijska svojstva. Izolacijski materijali korišteni za ovu svrhu, čak i kada im je sastav sličan materijalima korištenim za prvu stijenku, ne mogu izdržati tako visoke temperature. Zato je potrebno odrediti debljinu prve stijenke tako da u stacionarnom termodinamičkom stanju s unutrašnjosti peći na 1200 °C, dodirna temperatura između prve i druge stijenke ne prelazi kritičnu temperaturu druge stijenke.

Treća stijenka, čelična oplata, prisutna je radi svojih nosivih svojstava, kako bi podupirala težinu izolacijskih materijala i štitila peć izvana od eventualnih mehaničkih oštećenja. Kako je čelik dobro toplinski vodljiv materijal u odnosu na vatrostalne izolacijske materijale, razlika u temperaturi vanjske i unutrašnje površine čelične oplata je mala, no odabirom boje zaštitne prevlake moguće je smanjiti emisivnost i tako izgubljenu toplinu prema okolišu.

Prva selekcija materijala određena je zahtjevom na postupak proizvodnje elemenata peći. To se odnosi na to hoće li se elementi peći izrađivati postupcima odvajanja čestica iz gotovih elemenata, odnosno opeka ili će se materijal lijevati u kalupe radi dobivanja konačnog oblika. Za unutrašnju stijenku odlučeno je da će se izrađivati iz materijala koji je moguće lijevati, kako bi se mogli na jednostavan način izraditi utori za vješanje keramičkih cijevi za elemente. Za nju je potrebno proračunati minimalnu debljinu. Odabran materijal za lijevanje je Termobeton K-7 proizvođača Vatrostalac. Materijal je dostupan na lokalnom tržištu, što je bitno kako bi se izbjegli troškovi dostave iz inozemstva. Karakteristike materijala vidljive su u tablici (Tablica 3.21).

Vanjska stijenka može se izraditi od izolacijske opeke. Standardni oblik opeke pogodan je za izgradnju ove stijenke pošto u njoj nije potrebno izrađivati posebne utore. Provrta za izlaz

grijaćih elemenata mogu se lagano izraditi bušenjem. Za nju je također potrebno odrediti minimalnu debljinu. Odabrana je izolacijska opeka SL5/90 proizvođača Vatrostalac s karakteristikama iz tablice (Tablica 3.22).

Opeke se međusobno povezuju vatrostalnim mortom. Vatrostalnim mortom mogu se učvrstiti i unutrašnje ploče, ukoliko maksimalna dozvoljena temperatura morta to dozvoljava. Odabran je mort MZ-36 proizvođača Vatrostalac s karakteristikama prikazanim u tablici (Tablica 3.23).

**Tablica 3.21 Karakteristike materijala Termobeton K-7 [12]**

Materijal	Termobeton K-7
Norma	EN ISO 8894-1/2011
Kemijski sastav	66.88% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3.98% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 19.35% SiO <sub>2</sub> , 7.19% CaO, 1.64% TiO <sub>2</sub>
Granulacija	0-6mm
Max temp primjene	1660C
Gustoća EN 1094-4	2000 kg/m <sup>3</sup>
Toplinska provodljivost, W/mK	500 °C = 0.67 900 °C = 0.79
Linearno širenje na 1000C	+/- 0.1mm

**Tablica 3.22 Karakteristike materijala Izolacijska opeka SL 5/90 [13]**

Materijal	Izolacijska opeka SL 5/90
Norma	En ISO 8894-1/2011
Kemijski sastav	XRF EN ISO 12677 >28% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Dimenzija, mm	250x124x64
Max temp primjene, °C	1250
Gustoća EN 1094-4	550kg/m <sup>3</sup>
Toplinska provodljivost, W/mK	400 °C = 0.24 700 °C = 0.28 1100 °C = 0.33
Linearno širenje na 1000C	+/- 0.1mm

**Tablica 3.23 Karakteristike materijala Vatrostalni mort MZ-36 [14]**

Materijal	Vatrostalni mort MZ-36
Norma	EN ISO 8894-1/2011
Kemijski sastav	86% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0.44% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5.9% SiO <sub>2</sub>
Granulacija	0-1mm
Max temp primjene	1750C
Vrsta veziva	Keramičko

### 3.3. Određivanje radnog volumena i debljine stijenke peći

Za određivanje debljine stijenke peći provjeravat će se najnepogodniji uvjet, odnosno da je unutrašnjost peći na najvišoj radnoj temperaturi, 1200C, a vanjska stijenka na najvišoj dopuštenoj temperaturi vanjske stijenke, 50C. Toplinski tok, koji se izražava u W moguće je za zid od dvije stijenke izraziti kao:

$$\Theta = A * \frac{(\vartheta_u - \vartheta_{ok})}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (3.17)$$

gdje je

$\Theta$  – toplinski tok, W

A – površina, zbroj površina svih zidova

$\alpha_u$  – koeficijent konvektivnog prijelaza topline s unutrašnjeg zraka na unutrašnju stijenku peći

$\lambda_1$  – toplinska provodnost unutrašnje stijenke pri povišenoj temperaturi, W/mK

$\delta_1$  – debljina unutrašnje stijenke, mm

$\lambda_2$  – toplinska provodnost vanjske stijenke pri povišenoj temperaturi, W/mK

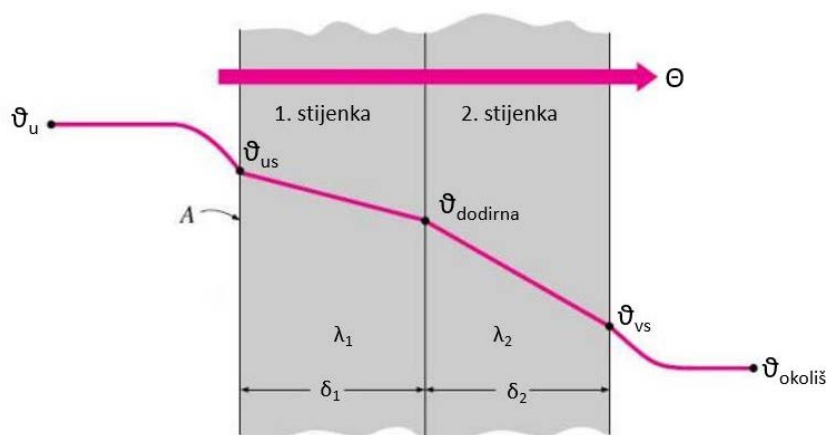
$\delta_2$  – debljina vanjske stijenke, mm

$\lambda_2$  – toplinska provodnost vanjske stijenke pri povišenoj temperaturi, W/mK

$\delta_2$  – debljina vanjske stijenke, mm

$\vartheta_u$  – temperatura unutrašnjosti peći

$\vartheta_{ok}$  – temperatura okoliša



Slika 3.5 Raspored temperatura od unutrašnjosti peći do okoliša [15]

U izrazu (3.17) veličine u nazivniku moguće je gledati kao otpore prijelazu topline kroz stijenku. Tako je  $\frac{1}{\alpha_u}$  otpor radi slobodne konvekcije unutar peći, radi kojeg je stijenka peći na nižoj temperaturi nego zrak unutar peći. To je istinito jedino ako se zanemari prijenos topline s grijača na zidove peći konvekcijom, radi kojeg temperatura može biti i viša nego kolika bi bila uzimajući u obzir samo prijelaz topline na zidove slobodnom konvekcijom. Kako je temperatura grijača viša od temperature unutrašnjosti peći, temperatura unutrašnje stijenke lokalno u blizini grijača može biti i viša od 1200 °C. Radi toga,  $\frac{1}{\alpha_u}$  će se zanemariti, a kao temperatura stijenke računat će se s vrijednosti od 1200 °C, koliko je temperatura zraka unutar peći. Zanemarivanjem  $\frac{1}{\alpha_u}$  povećat će se debljine prve i/ili druge stijenke, što ide na stranu sigurnosti.

Otpor prijelazu topline prema okolišu  $\frac{1}{\alpha_v}$  isto tako se može zanemariti te dobivena greška ide na stranu sigurnosti, odnosno podebljanja prve i/ili druge stijenke. Osim toga, u zadatku je zadana vrijednost temperature vanjske stijenke u iznosu 50 °C kao proračunsko ograničenje pa se tom pretpostavkom pad temperature i otpor prijelazu topline od vanjske stijenke prema okolišu ne razmatra.

Iako se konstrukcija peći sastoji i od trećeg sloja, čelične oplata, radi male debljine i visoke toplinske provodnosti, njezin otpor prijelazu topline će se također zanemariti, na stranu sigurnosti.

Tako izraz (3.17) postaje (3.18).

$$\theta = A * \frac{(\vartheta_{us} - \vartheta_{vs})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (3.18)$$

gdje je

$\vartheta_{us}$  – temperatura unutrašnje stijenke peći

$\vartheta_{vs}$  – temperatura vanjske stijenke peći

Ukoliko se u (3.18) žele izračunati vrijednosti debljina stijenki, potrebno je još odrediti vrijednost toplinskog toka i površine.

Toplinski tok u idealnom slučaju jednak je snazi grijača na radnoj temperaturi 1200 °C.

$$\theta = P_{1200} = 14\,423\,W \quad (3.19)$$

Površina svih zidova povezana je s unutrašnjim dimenzijama peći. Zato ih je potrebno prvo odrediti, pa po potrebi iterativno mijenjati dok se ne dođe do zadovoljavajuće debljine vanjske i unutrašnje stijenke.

Dosad spomenuti uvjeti su:

$$15 L < V = a * b * c < 50 L \quad (3.20)$$

gdje je

a – širina unutrašnjosti peći

b – visina unutrašnjosti peći

c – dubina unutrašnjosti peći

i uvjeti

$$a, b > 208 \text{ mm} \quad (3.21)$$

$$314 + 60 \text{ mm} < c < 523 + 60 \text{ mm} \quad (3.22)$$

Ukoliko se uvaži volumen od 50L, dubina peći od 550 mm te uvjet jednake širine i visine, dobivaju se vrijednosti širine i visine:

$$a = b = \sqrt{\frac{50 \text{ dm}^3}{5,5 \text{ dm}}} = 3,01 \text{ dm} = 301 \text{ mm} \approx 300 \text{ mm} \quad (3.23)$$

Površina zidova peći je:

$$A = 2 * a * b + 2 * b * c + 2 * a * c = 0,84 \text{ m}^2 \quad (3.24)$$

Kako u izrazu (3.18) postoje dvije nepoznanice, dvije debljine stijenki, potrebno je zasebno izračunati za jednu stijenku uz uvjet maksimalne dodirne temperature dviju stijenki. Dodirna temperatura u jednadžbi biti će jednaka temperaturi postojanosti izolacijskog materijala, umanjenoj za preporučenu vrijednost od 100 °C do 150 °C. Kako je maksimalna dopuštena temperatura za izolacijsku opeku 1250 °C (Tablica 3.22), računat će se s dodirnom temperaturom 1100 °C.

$$\theta = A * \frac{(\vartheta_{us} - \vartheta_{dodirna})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad (3.25)$$

$$14\,423 = 0,84 * \frac{(1200 - 1100)}{\frac{\delta_1}{0,79}} \rightarrow \delta_1 = 0,0046 \text{ m} = 4,6 \text{ mm} \quad (3.26)$$

Dobivena potrebna debljina stijenke je 4.6 mm. Radi tehničkih razloga, takva debljina stijenke je neizvediva, kako je i sama granulacija materijala 0-6 mm, pa se usvaja debljina unutrašnje stijenke od 40mm, čime će se osigurati mehanička stabilnost ploča unutrašnje stijenke.

$$\delta_1 = 0,04 \text{ m} = 40 \text{ mm} \quad (3.27)$$

Uz poznatu debljinu unutrašnje stijenke, u jednadžbi (3.18) ostaje samo jedna nepoznanica, a to je debljina vanjske stijenke, no prije toga potrebno je izračunati dodirnu temperaturu uz novu debljinu stijenke kako bi se mogao odabrati ispravna vrijednost toplinske provodljivosti:

$$14\,423 = 0,84 * \frac{(1200 - \vartheta_{dodirna})}{\frac{0,04}{0,79}} \rightarrow \vartheta_{dodirna} = 330,62 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

Za  $\lambda_2$  može se odabrati vrijednost 0,24 W/mK (Tablica 3.22).

Slijedi potrebna debljina stijenke  $\delta_2$ :

$$14\,423 = 0,84 * \frac{(1200 - 50)}{\frac{0,04 + \delta_2}{0,79 + 0,24}} \rightarrow \delta_2 = 0,0039 \text{ m} = 3,9 \text{ mm} \quad (3.29)$$

Potrebna debljina vanjske stijenke je 3,9 mm, no niti takva debljina stijenke ne može biti usvojena radi tehničkih razloga. Kako su dimenzije izolacijske opeke 250mm x 124mm x 64mm, usvaja se postavljanje opeke tako da debljina stijenke bude jednaka najkraćoj stranici opeke:

$$\delta_2 = 0,064 \text{ m} = 64 \text{ mm} \quad (3.30)$$

Uz odabrane vrijednosti izolacije, može se provjeriti kolika je moguća maksimalna vrijednost ukupne površine peći, ukoliko se ostale vrijednosti drže stalnima (toplinski tok, temperature vanjske i unutrašnje stijenke, dimenzije izolacije i vrijednosti  $\lambda$ ).

$$14\,423 = A * \frac{(1200 - 50)}{\frac{0,04 + 0,064}{0,79 + 0,24}} \rightarrow A = 3,98 \text{ m}^2 \quad (3.31)$$

Vidljivo je da je maksimalna površina svih zidova peći skoro 5 puta veća od početne. Ipak, to je maksimalna površina s neuračunatim prijelazom topline kroz rubove i kutove peći. Uz to postoje gubitci kroz otvore peći: nesavršeno zabrtvljena vrata i otvori za termopar i izlaz grijača. Ipak se početne dimenzije peći mogu povećati, pa će se usvojiti povećanje širine ( $a$ ) i visine ( $b$ ) peći s 300 mm na 400 mm, čime nova površina postaje:

$$A = 1,2 \text{ m}^2 \quad (3.32)$$

Volumen peći dimenzija 550 mm x 400 mm x 400 mm je 88 L.

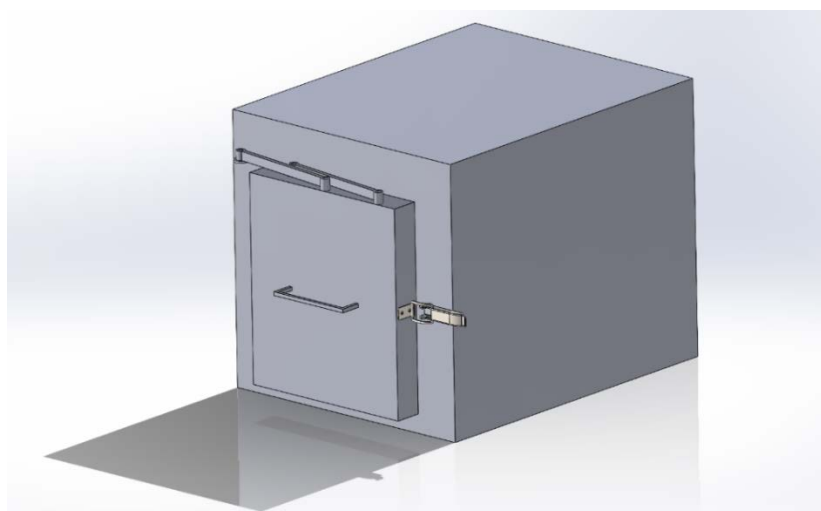
S novim vrijednostima, mogu se izračunati toplinski gubitci u idealnom slučaju, odnosno bez uključenih već spomenutih gubitaka.

$$\theta = 1,2 * \frac{(1200 - 50)}{\frac{0,04}{0,79} + \frac{0,064}{0,24}} = 4349 W \quad (3.33)$$

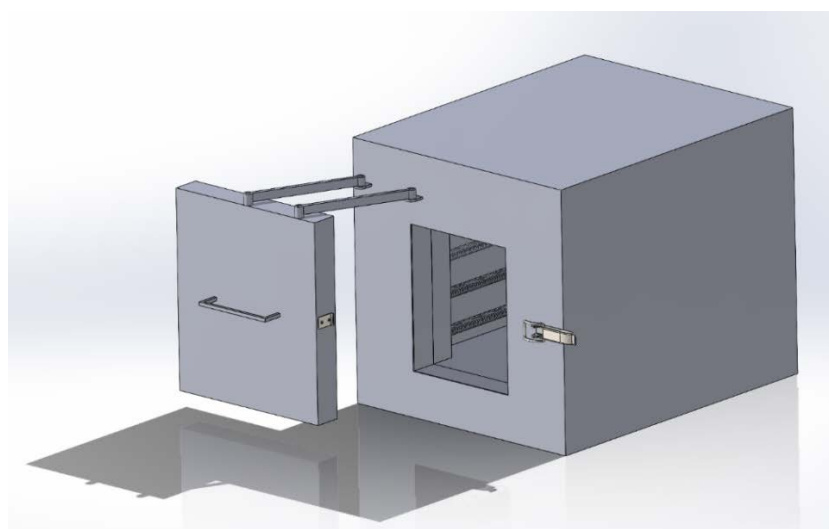
Predimenzioniranjem peći primjenom modela stacionarnog prolaza topline, osigurava se ravnomjerniji raspored temperature i brže zagrijavanje peći. Također se time pokrivaju već spomenuti gubitci.

### 3.4 Konstruktivsko rješenje

Na slikama ispod (Slika 3.6 i Slika 3.7) prikazan je model peći izvana sa zatvorenim, odnosno otvorenim vratima.



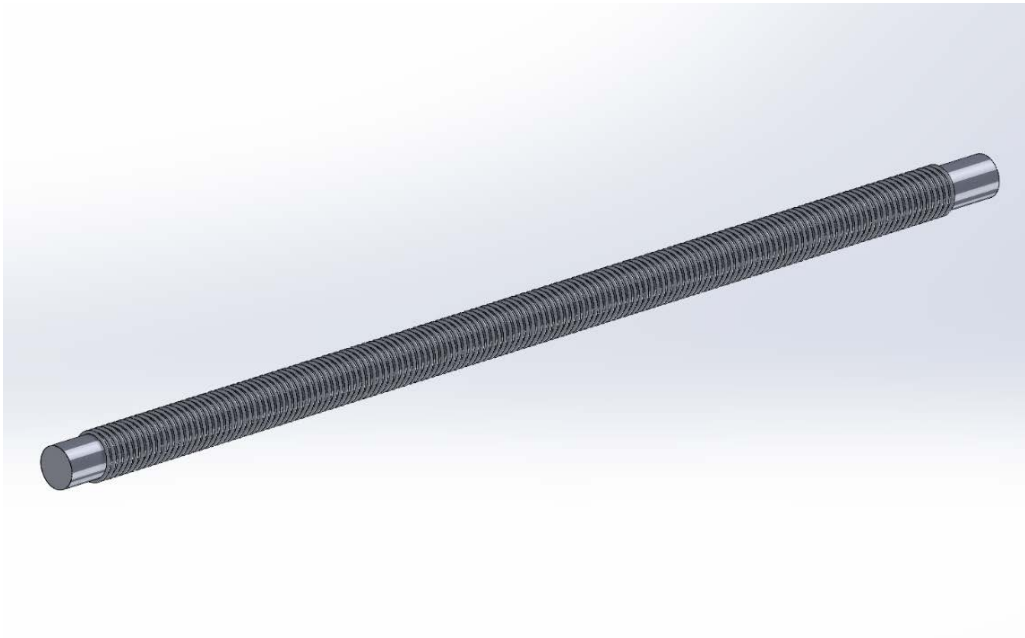
**Slika 3.6** Peć sa zatvorenim vratima



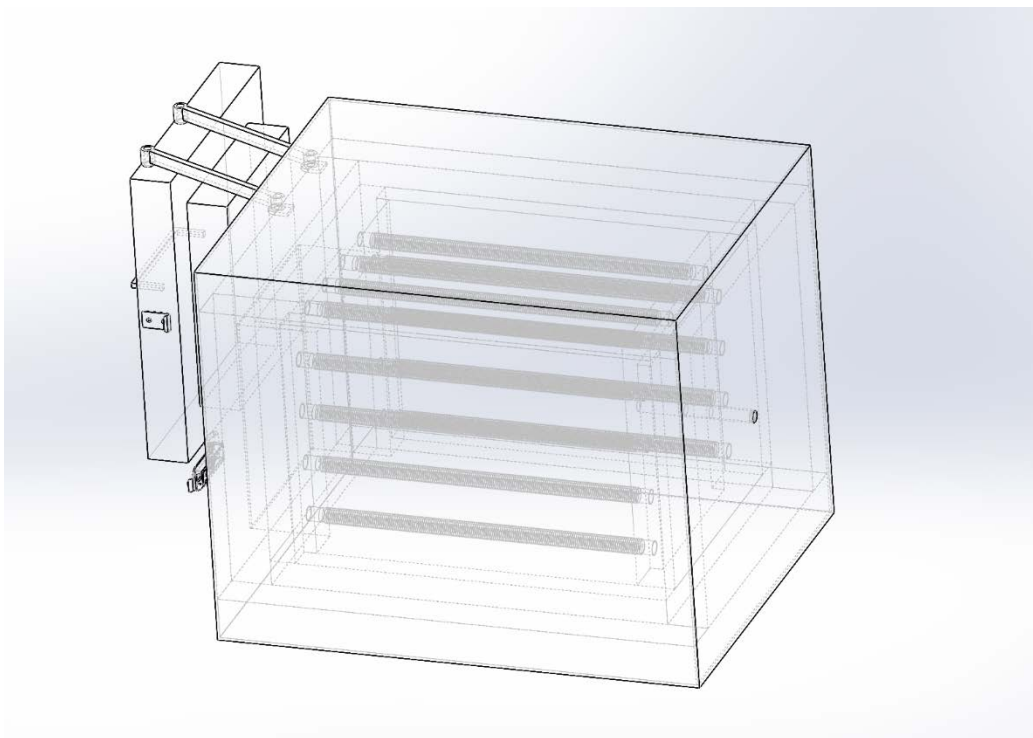
**Slika 3.7** Peć s otvorenim vratima



Slika 3.8 prikazuje jedan red grijača omotanog oko keramičke cijevi. Na slici ispod (Slika 3.9) vidljiva je unutrašnjost peći te dijelovi peći na kojima su postavljeni grijaći elementi. Na stražnjoj strani peći vidljiv je provrt na namjeren instalaciji termopara.



**Slika 3.8** Jedan red grijača omotanog oko keramičke cijevi



**Slika 3.9** Peć s vidljivim slojevima

### **3.5. Električna shema spajanja**

Glavni električni elementi bitni za rad peći su grijači, regulacijska jedinica i senzor temperature. Kako bi se oni povezali u cjelinu koja udovoljava i sigurnosnim mjerama, potrebni su još neki elementi, a to su:

- sklopke za uključivanje grijača kojima upravlja regulacijska jedinica
- prekidač za detekciju otvorenih vrata
- vodiči za spajanje na izvor električne struje
- keramičke stezaljke za povezivanje grijača i vodiča
- osiguravajuća sklopka
- uzemljeni vodič povezan sa svim metalnim dijelovima peći

Shema spajanja prikazana je u priloženoj dokumentaciji.

---

## 4. ZAKLJUČAK

U teoretskom djelu ovog rada objašnjeni su dijelovi električne komorne peći i njihove funkcije. Kritični elementi u konstrukciji i radu peći jesu vatrostalni materijali za toplinsku izolaciju, grijači i mjerno-regulacijski sustav peći.

U eksperimentalnom djelu rada prikazane su varijante elektrootpornih grijača za peć s tri jednaka grijača pojedinačnih snaga 3000 W, 5000 W i 8000 W te su proračunate izvedbe grijača sastavljenih od tri elektrootporne žice promjera 1,6 mm, 2,0 mm i 3,0 mm. Usvojena je varijanta elektrootpornog grijača koji koristi Kanthal A-1 žicu promjera 1,6 mm s pojedinačnom snagom 5000 W, odnosno ukupnom snagom peći 15 kW. Za odabranu snagu peći i uvjet maksimalne temperature u komori peći od 1200 °C, odabrani su materijali unutrašnje i vanjske stijenke peći te su dimenzionirane njihove potrebne debljine. Predložen je CAD model peći s dimenzijama komore 550 mm x 400 mm x 400 mm što rezultira volumenom komore od 88 L. Za spajanje regulatora temperature i grijača na trofazni izvor električne energije predložena je shema spajanja.

U budućim istraživanjima, nakon izrade peći, treba ispitati homogenost temperaturne raspodjele u komori peći, gubitke topline kroz toplinsku izolaciju i odrediti tehnički moguću brzinu zagrijavanja peći.

---

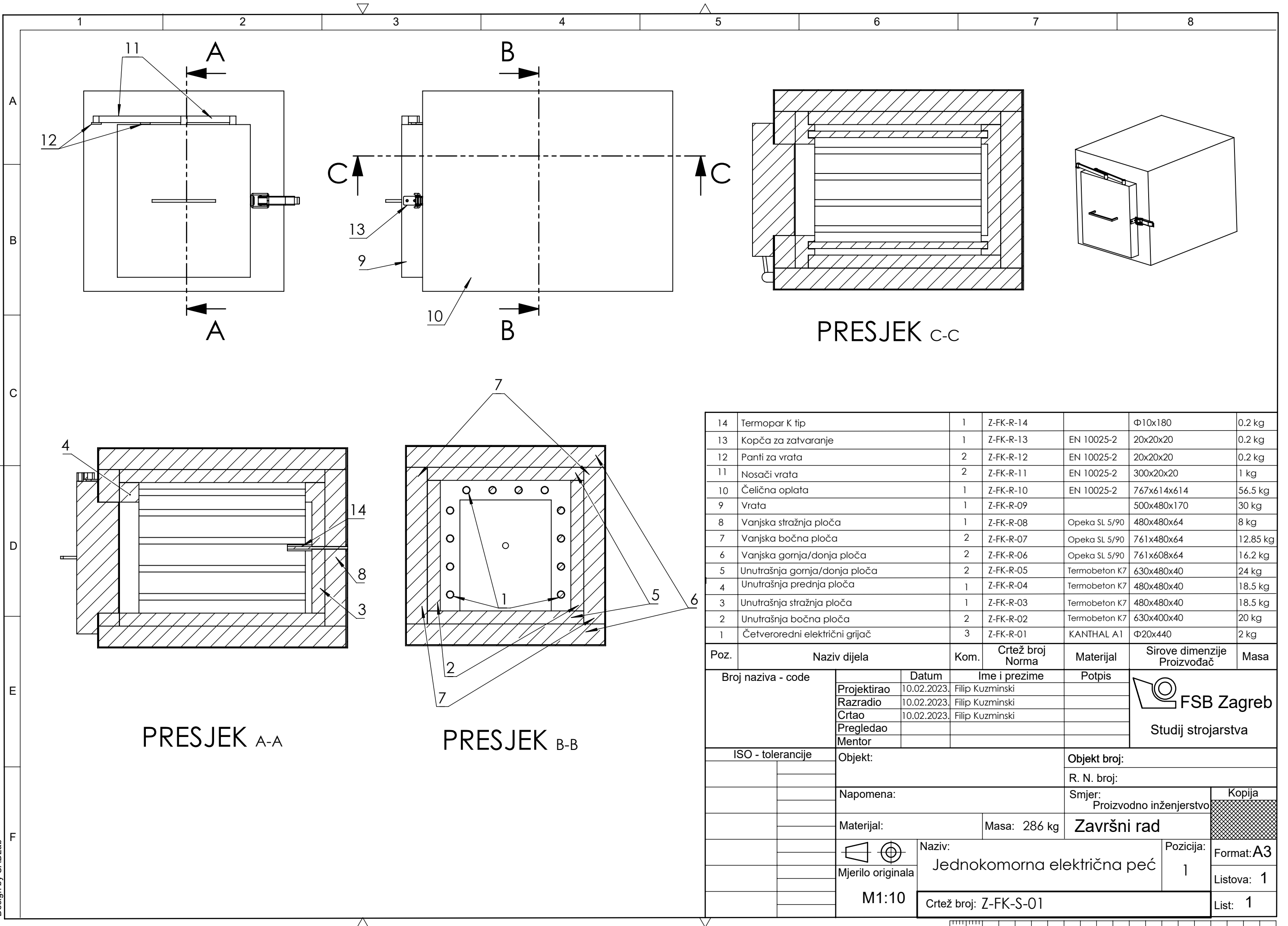
**LITERATURA**

- [1] GmbH N. Nabatherm. [Online]. Lilienthal: Nabertherm GmbH; 2022 [cited 2022 02 12. Available from: HYPERLINK "<https://nabertherm.com/en/downloads/catalogs>" <https://nabertherm.com/en/downloads/catalogs> .
- [2] LindbergMph. LindbergMph. [Online].; 2023 [cited 2023 02 12. Available from: HYPERLINK "<https://www.lindbergmph.com/data/uploads/contentblock/Brochures/Lindberg%20Box%201200%20Web.pdf>" <https://www.lindbergmph.com/data/uploads/contentblock/Brochures/Lindberg%20Box%201200%20Web.pdf> .
- [3] Thermofisher. Thermofisher. [Online]. Available from: HYPERLINK "<https://www.thermofisher.com/hr/en/home/life-science/lab-equipment/lab-ovens-furnaces/lab-furnaces/box-furnaces.html>" <https://www.thermofisher.com/hr/en/home/life-science/lab-equipment/lab-ovens-furnaces/lab-furnaces/box-furnaces.html> .
- [4] Deshmukh YV. Industrial heating : principles, techniques, materials, applications, and design Boca Raton: CRC Press; 2005.
- [5] Galović A. Termodinamika II. 3rd ed. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [6] Totten GE. Steel heat treatment equipment and process design. 2nd ed. Totten GE, editor. Boca Raton: CRC Press; 2007.
- [7] AB. K, editor. KANTHAL HANDBOOK Heating Alloys for Electric Household Appliances. 1st ed. Sweden: KANTHAL AB.; 2003.
- [8] AB K. Kanthal. [Online].; 2019 [cited 2023 2 10. Available from: HYPERLINK "[https://hi-tempproducts.com/wp-content/uploads/2019/03/1\\_Resistance-Heating-Alloys-and-Systems-for-Industrial-Furnaces-brochure.pdf](https://hi-tempproducts.com/wp-content/uploads/2019/03/1_Resistance-Heating-Alloys-and-Systems-for-Industrial-Furnaces-brochure.pdf)" [https://hi-tempproducts.com/wp-content/uploads/2019/03/1\\_Resistance-Heating-Alloys-and-Systems-for-Industrial-Furnaces-brochure.pdf](https://hi-tempproducts.com/wp-content/uploads/2019/03/1_Resistance-Heating-Alloys-and-Systems-for-Industrial-Furnaces-brochure.pdf) .
- [9] Bryson WE. Heat treatment Master control manual. 1st ed.: Hanser Publications; 2015.
- [10] Ravitera. Keramica. [Online].; 2023 [cited 2023 2 12. Available from: HYPERLINK "<https://keramica.info/>" <https://keramica.info/> .

- 
- [11] Controls IF&. Industrial Furnace & Controls. [Online].; 2023 [cited 2023 2 12. Available from:       HYPERLINK    "[https://indfurnace.com/kanthal\\_heating\\_element.html](https://indfurnace.com/kanthal_heating_element.html)" [https://indfurnace.com/kanthal\\_heating\\_element.html](https://indfurnace.com/kanthal_heating_element.html) .
- [12] d.o.o. V. POTVRDA O KVALITETI PROIZVODA Termobeton K-7. 2023. EN ISO 8894-1/2011.
- [13] d.o.o. V. POTVRDA O KVALITETI PROIZVODA Izolacijska opeka SL 5/90. 2023. EN ISO 8894-1/2011.
- [14] d.o.o. V. POTVRDA O KVALITETI PROIZVODA Vatrostalni mort MZ-36. 2023. EN ISO 8894-1/2011.
- [15] SlideToDoc. [Online].; 2023 [cited 2023 02 12. Available from:   HYPERLINK    "<https://slidetodoc.com/chapter-10-mechanisms-of-heat-transfer-introduction-heat/>" <https://slidetodoc.com/chapter-10-mechanisms-of-heat-transfer-introduction-heat/> .

## **PRILOZI**

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



PRESJEK C-C

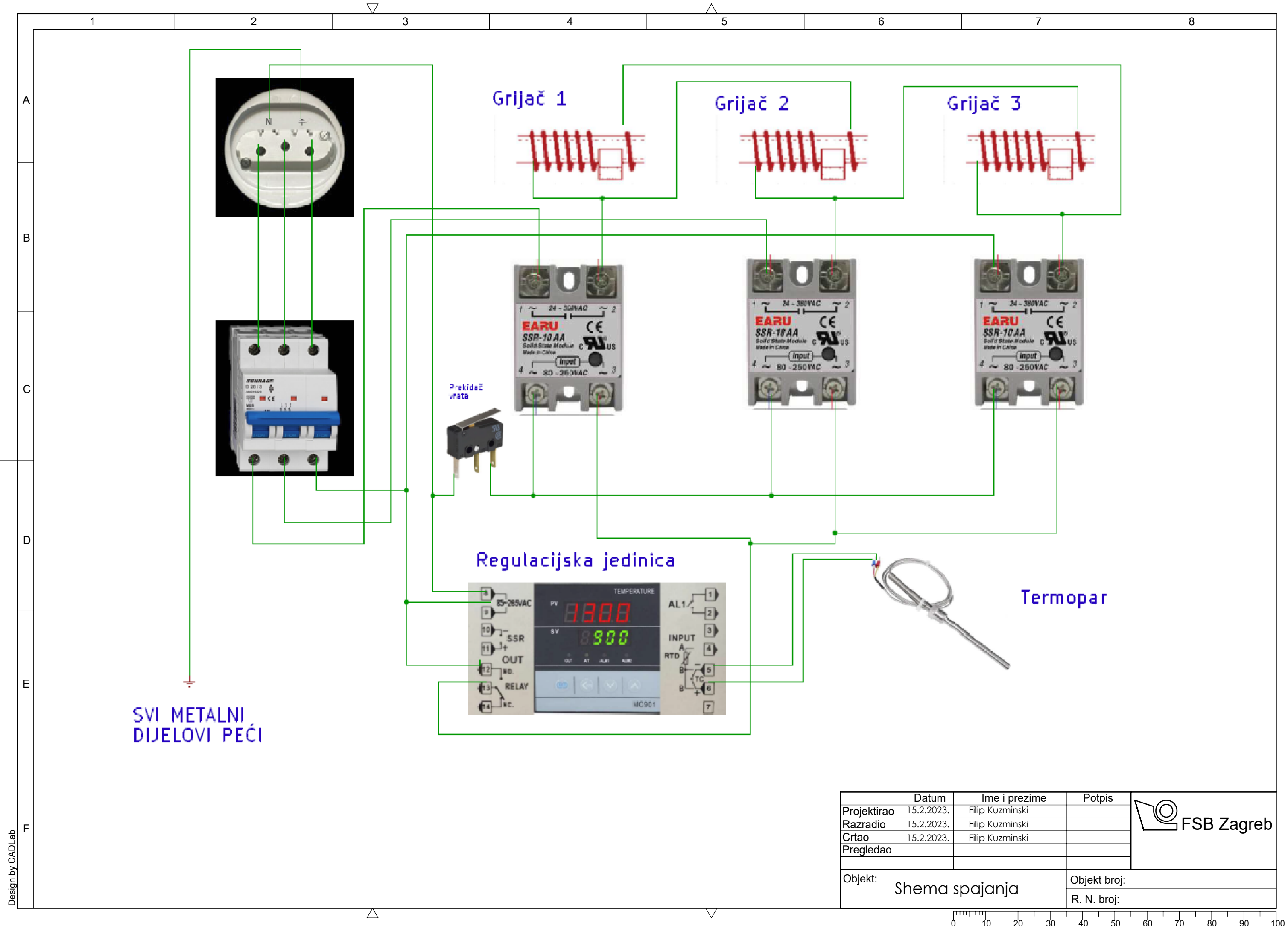
PRESJEK A-A

PRESJEK B-B

14	Termopar K tip	1	Z-FK-R-14		Φ10x180	0,2 kg
13	Kopča za zatvaranje	1	Z-FK-R-13	EN 10025-2	20x20x20	0,2 kg
12	Panti za vrata	2	Z-FK-R-12	EN 10025-2	20x20x20	0,2 kg
11	Nosači vrata	2	Z-FK-R-11	EN 10025-2	300x20x20	1 kg
10	Čelična oplata	1	Z-FK-R-10	EN 10025-2	767x614x614	56,5 kg
9	Vrata	1	Z-FK-R-09		500x480x170	30 kg
8	Vanjska stražnja ploča	1	Z-FK-R-08	Opeka SL 5/90	480x480x64	8 kg
7	Vanjska bočna ploča	2	Z-FK-R-07	Opeka SL 5/90	761x480x64	12,85 kg
6	Vanjska gornja/donja ploča	2	Z-FK-R-06	Opeka SL 5/90	761x608x64	16,2 kg
5	Unutrašnja gornja/donja ploča	2	Z-FK-R-05	Termobetone K7	630x480x40	24 kg
4	Unutrašnja prednja ploča	1	Z-FK-R-04	Termobetone K7	480x480x40	18,5 kg
3	Unutrašnja stražnja ploča	1	Z-FK-R-03	Termobetone K7	480x480x40	18,5 kg
2	Unutrašnja bočna ploča	2	Z-FK-R-02	Termobetone K7	630x400x40	20 kg
1	Četveroredni električni grijač	3	Z-FK-R-01	KANTHAL A1	Φ20x440	2 kg

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	 Studij strojarstva
Projektirao		10.02.2023.	Filip Kuzminski			
Razradio		10.02.2023.	Filip Kuzminski			
Crtao		10.02.2023.	Filip Kuzminski			
Pregledao						
Mentor						
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
					R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: Proizvodno inženjerstvo	
		Materijal:			Masa: 286 kg	Završni rad
		 Mjerilo originala			Naziv: <b>Jednocomorna električna peć</b> Pozicija: 1	
		M1:10			Crtež broj: Z-FK-S-01	
					Kopija Format: <b>A3</b> Listova: 1 List: 1	

Design by CADLab



SVI METALNI  
DIJELOVI PEĆI

Projekтираo	Datum	Ime i prezime	Potpis
Razradio	15.2.2023.	Filip Kuzminski	
Crtao	15.2.2023.	Filip Kuzminski	
Pregledao			

Objekt:	Shema spajanja	Objekt broj:	
		R. N. broj:	

