

UNIVERZA V LJUBLJANI  
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA MATERIALE IN METALURGIJO

**OPTIMIRANJE TOPLOTNOTEHNIČNIH KARAKTERISTIK  
IZMENJEVALCA TOPLOTE**

DIPLOMSKO DELO

ŠPELA JERAJ

LJUBLJANA, OKTOBER 2015

UNIVERSITY OF LJUBLJANA  
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGY

**OPTIMISATION OF THERMOTECHNICAL  
CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGER**

DIPLOMA WORK

ŠPELA JERAJ

LJUBLJANA, OCTOBER 2015

## **PODATKI O DIPLOMSKEM DELU**

Število listov: 49

Število strani: 36

Število slik: 19

Število preglednic: 6

Število literaturnih virov: 28

Število prilog: 4

Študijski program: Inženirstvo materialov (UNI)

### **Komisija za zagovor diplomskega dela:**

Predsednik: *red. prof. dr. Milan Bizjak*

Mentor: *red. prof. dr. Borut Kosec*

Somentor: /

Član: *doc. dr. Blaž Karpe*

Delovni somentor: *Bojan Rajakovič*

Ljubljana, .....

Diplomsko delo je bilo izvedeno pod mentorstvom red. prof. dr. Boruta Kosca.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi pomagali pri nastanku diplomske naloge. Posebna zahvala gre moji družini, še posebej staršema, ki sta me podpirala in vzpodbujala skozi vsa leta študija. Za koristne napotke in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Borutu Koscu in delovnemu somentorju Bojanu Rajakoviču. Zahvala tudi doc.dr. Blažu Karpetu za pregled diplomskega dela in koristne nasvete.

Zahvaljujem se vsem sodelavcem ACRONI d.o.o. in PROTAC d.o.o., ki so mi pomagali pri izdelavi diplomskega dela.

Delo je bilo izvedeno v okviru programa: Po kreativni poti do praktičnega znanja 2014 - NOVA GENERACIJA MALOLEGIRANA VISOKOTRDNEGA JEKLA.

## Izвлеček

V največjem slovenskem proizvajalcu jekla družbi Acroni d.o.o. Jesenice uporabljajo za ogrevanje jeklenih slabov pred postopkom vročega valjanja potisno peč proizvajalca RUST. Proizvodnja jekla in posledično potisna peč RUST v ACRONI d.o.o. deluje kontinuirno praktično 365 dni v letu, 24 ur na dan, potisna peč je kurjena z zemeljskim plinom in je največji potrošnik zemeljskega plina v družbi.

Določena rešitev navedenih problemov je pred leti z nadgradnjo potisne peči s konvektivnim cevni rekuperatorjem proizvajalca KEU GmbH bistveno povečala energetska učinkovitost agregata in zmanjšala problem ekologije. Pri zadnji rekonstrukciji potisne peči leta 2006 in 2007 se karakteristik rekuperatorja ni izboljšalo, kljub izboljšavi karakteristik peči. Zato je bil osnovni cilj diplomskega dela v osnovi izvedenih toplotno tehničnih meritev, študije obstoječe konstrukcije rekuperatorja, modelov in izračunov poiskati, in predlagati konkretno inženirsko rešitev, ki bi omogočila znižanje temperature dimnih plinov na izhodu iz rekuperatorja.

V delu je prikazana razdelitev in analiza izmenjevalcev toplote s poudarkom na trenutnem stanju tehnike na obravnavanem področju industrijskih izmenjevalcev toplote. Podrobneje je predstavljena in opisana je potisna peč RUST instalirana v ACRONI d.o.o. in mehanizmi prenosa toplote v njej. V nadaljevanju so podani in interpretirani parametri in stanje porabe zemeljskega plina na agregatu s podatki za leto 2012. Predstavljen in analiziran je konvektivni rekuperator proizvajalca KEU GmbH s podarkom na analizi geometrije, dimenzij in materialov cevi.

V neposrednem industrijskem okolju so bile izvedene meritve temperatur dimnih plinov in zraka na vstopu in izstopu iz rekuperatorja.

Kot glavni del našega dela je bil izveden kontrolni preračun in ocena stanja obstoječega konvektivnega cevne rekuperatorja proizvajalca KEU GmbH na potisni peči Rust. Glede na izračunane parametre izmenjevalca toplote je izbira materialov cevi več kot ustrezna. Izmerjene oziroma izračunane temperature dimnih plinov oziroma zraka pa v obravnavanem primeru ne odstopajo bistveno od optimalnih.

**Ključne besede:** rekuperator, potisna peč, prenos toplote, temperatura, dimni plini, zrak

## **Abstract**

The largest Slovenian steel producer Acroni Ltd. Jesenice used for heating the steel slab prior to the hot rolling pusher furnace - manufacturer RUST. Production of steel and pusher furnace - manufacturer pushed operates in Acroni Ltd. continuously 365 days a year, 24 hours a day, pusher furnace is fired with natural gas and is the largest consumer of natural gas in society.

Certain solutions to those problems a few years ago to upgrade the pusher furnace with convective heat exchanger tube producer EU Commission GmbH significantly increase the energy efficiency of the unit and reduce the problem of ecology. The last reconstruction of the pusher furnace in 2006 and 2007, did not improve the characteristics of the furnace, despite the improvement of the characteristics of the furnace.

Therefore the basic aim of the thesis is basically conducted heat technical measurements, studies of existing structures recuperator, designs and calculations to find and propose specific engineering solutions, which would allow a reduction in flue gas temperature at the outlet of the heat recovery unit.

The work shows the distribution and analysis of heat exchangers with an emphasis on the current state of the art in this field of industrial heat exchangers.

The work shows the distribution and analysis of heat exchangers with an emphasis on the current state of the art in this field of industrial heat exchangers . More information is presented and described the pusher furnace RUST installed in the Acroni Ltd. and heat transfer mechanisms in it. Below we are given and interpreted parameters and the state 's natural gas consumption on aggregate data for 2012. It presented and analyzed the convective heat exchanger manufacturer EU Commission GmbH with a focus on the analysis of the geometry, dimensions and materials pipes. In the immediate industrial environment were conducted measurements of temperature flue gas and air inlet and outlet of the heat recovery unit.

As a major part of our work has been implemented control calculation and assessment of the state of the existing convective heat recovery pipe producer GmbH EU commission to push furnace RUST. Depending on the calculated parameters of the heat exchanger tubes, the choice of materials more than the corresponding.

Measured or calculated temperature flue gas or air in the present case do not differ significantly from optimal.

Keywords: heat exchanger, pusher furnace, heat transfer, temperature, flue gases, air

## Kazalo

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Uvod .....                                             | 1  |
| 2.    | Izmenjevalci toplote .....                             | 3  |
| 2.1   | Izvedbe izmenjevalcev toplote .....                    | 3  |
| 2.1.1 | Rekuperatorji .....                                    | 3  |
| 2.1.2 | Regeneratorji .....                                    | 4  |
| 2.1.3 | Mešalni prenosnik toplote .....                        | 5  |
| 2.1.4 | Zahteve izmenjevalca toplote .....                     | 6  |
| 2.1.5 | Izbira izmenjevalca toplotnega .....                   | 7  |
| 3.    | Predstavitev potisne peči RUST .....                   | 8  |
| 4.    | Zemeljski plin .....                                   | 12 |
| 5.    | Cevni rekuperator za predgrevanje zraka .....          | 14 |
| 5.1   | Varovalna veriga za zaščito rekuperatorja .....        | 17 |
| 5.2   | Materiali cevi rekuperatorja .....                     | 18 |
| 6.    | Meritve temperatur .....                               | 20 |
| 7.    | Kontrolni preračun in ocena stanja rekuperatorja ..... | 23 |
| 8.    | Zaključki .....                                        | 28 |
| 9.    | Literatura .....                                       | 29 |
| 10.   | Priloge .....                                          | 31 |

## Kazalo slik

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Slika 1:</b> Potisna peč RUST v Acroni d.o.o. po izvedeni zadnji rekonstrukciji 2006/2007.....                                                  | 1  |
| <b>Slika 2:</b> Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST v ACRONI d.o.o. ....                                                  | 2  |
| <b>Slika 3:</b> Shema rekuperatorja .....                                                                                                          | 2  |
| <b>Slika 4:</b> Cevni rekuperator (levo), shema cevnega rekuperatorja (desno).....                                                                 | 3  |
| <b>Slika 5:</b> Shema rekuperatorja <sup>[1]</sup> .....                                                                                           | 4  |
| <b>Slika 6:</b> Shema regenerotorja <sup>[1]</sup> .....                                                                                           | 4  |
| <b>Slika 7:</b> Primerjava rekuperator : regenerotor <sup>[2], [3]</sup> .....                                                                     | 5  |
| <b>Slika 8:</b> Hladilni stolp za ohlajevanje vode <sup>[1]</sup> .....                                                                            | 6  |
| <b>Slika 9:</b> Shematski prikaz potisne peči RUST v Acroni d.o.o. pred zadnjo rekonstrukcijo.....                                                 | 8  |
| <b>Slika 10:</b> Mehanizmi prenosa toplote v peči <sup>[4]</sup> .....                                                                             | 10 |
| <b>Slika 11:</b> Sankeyev diagram porabe toplote v potisni peči RUST v Acroni d.o.o. <sup>[4]</sup> .....                                          | 11 |
| <b>Slika 12:</b> Certifikat kakovosti s podatki zemeljskega plina (kemična sestava, vsebnost žvepla, rosišče, kurilnost, ...) <sup>[5]</sup> ..... | 12 |
| <b>Slika 13:</b> Poraba zemeljskega plina na potisni peči za obdobje od 1.1.2012 do 15.3.2012 <sup>[5]</sup> .....                                 | 13 |
| <b>Slika 14:</b> Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST. ....                                                                | 14 |
| <b>Slika 15:</b> Notranjost in cevi cevnega rekuperatorja.....                                                                                     | 15 |
| <b>Slika 16:</b> Sistem za nadzor peči. ....                                                                                                       | 20 |
| <b>Slika 17:</b> Virtualna shema peči z rekuperatorjem in šaržo ter glavnimi točkami nadzora. ....                                                 | 20 |
| <b>Slika 18:</b> Meniji, ki so na voljo v nadzornem sistemu za spremljanje in nadzor procesa. ....                                                 | 21 |
| <b>Slika 19:</b> Meritev temperature dimnih plinov na izstopu iz rekuperatorja.....                                                                | 22 |

## Kazalo tabel

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Tehnične karakteristike potisne peči RUST' pred in po rekonstrukciji 2006/2007. ....     | 9  |
| <b>Tabela 2:</b> Podatki o zmogljivosti rekuperatorja <sup>[6]</sup> .....                                | 16 |
| <b>Tabela 3:</b> Toplotna prevodnost jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup> .....                  | 18 |
| <b>Tabela 4:</b> Specifična toplota jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup> .....                   | 19 |
| <b>Tabela 5:</b> Temperaturni razteznostni koeficient jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup> ..... | 19 |
| <b>Tabela 6:</b> Meritve temperatur dimnih plinov in zraka na vstopu in izstopu iz rekuperatorja. ....    | 22 |

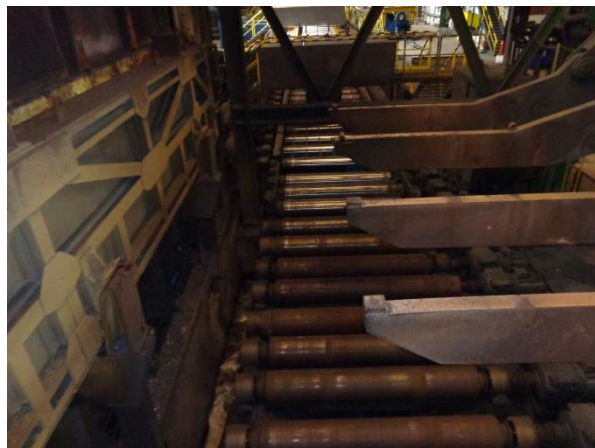
## Kazalo prilog

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>PRILOGA 1:</b> Delavniška risba postavitve potisne peči – Projektivni biro Železarne Jesenice..        | 32 |
| <b>PRILOGA 2:</b> Vzdolžni prerez potisne peči po rekonstrukciji 2006/07.....                             | 34 |
| <b>PRILOGA 3:</b> Cevni rekuperator za predgrevanje zraka (ICE Industrietechnik GmbH,<br>17.08.2004)..... | 36 |
| <b>PRILOGA 4:</b> Popravilo rekuperatorja KEU(ICE Industrietechnik GmbH, 02.06.1999).....                 | 38 |

## 1. Uvod

V največjem slovenskem proizvajalcu jekla, jeklarski družbi Acroni d.o.o. Jesenice, uporabljajo za ogrevanje jeklenih slabov pred postopkom vročega valjanja potisno peč (Slika 1) proizvajalca RUST. Proizvodnja jekla in posledično potisni peči RUST se v ACRONI d.o.o. deluje kontinuirno praktično 365 dni v letu, 24 ur na dan.

Potisna peč je kurjena z zemeljskim plinom in je največji potrošnik zemeljskega plina v družbi. Pretvorba kemične energije, akumulirane v zemeljskem plinu v uporabno obliko energije se vrši z zgorevanjem, pri čemer nastajajo različni zgorevalni produkti. Zgorevalni produkti v večji meri onesnažujejo okolje, poleg tega je problem tudi njihova visoka temperatura, kar je v povezavi resen ekološki, energetski, ekonomski in posledično tudi možen socialni problem.



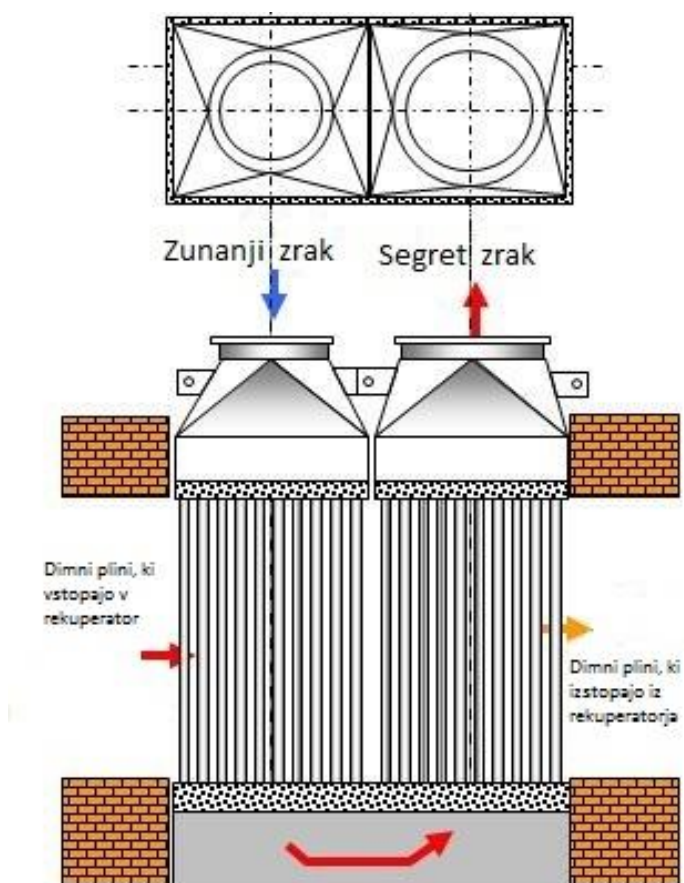
**Slika 1:** Potisna peč RUST v Acroni d.o.o. po izvedeni zadnji rekonstrukciji 2006/2007.

Določena rešitev navedenih problemov je pred leti z nadgradnjo potisne peči s konvektivnim cevnim rekuperatorjem proizvajalca KEU GmbH (Slika 2) bistveno zmanjšala problem ekologije in povečala energetske učinkovitost agregata. Pri zadnji rekonstrukciji potisne peči se karakteristik rekuperatorja ni izboljšalo, kljub izboljšavi karakteristik peči. Zato je bil osnovni cilj

diplomskega dela v osnovi izvedenih toplotno tehničnih meritev, študije obstoječe konstrukcije rekuperatorja, modelov in izračunov poiskati, in predlagati konkretno inženirsko rešitev, ki bi omogočila znižanje temperature dimnih plinov na izhodu iz rekuperatorja.



**Slika 2:** Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST v ACRONI d.o.o.



**Slika 3:** Shema rekuperatorja.

## 2. Izmenjevalci toplote

V nadaljevanju dela bom primerjala glavna tipa izmenjevalcev oziroma prenosnikov toplote: regeneratorje in rekuperatorje. Prikazana bo razdelitev in analiza izmenjevalcev toplote s poudarkom na trenutnem stanju tehnike na obravnavanem področju industrijskih izmenjevalcev toplote <sup>[1]</sup>.

### 2.1 Izvedbe izmenjevalcev toplote

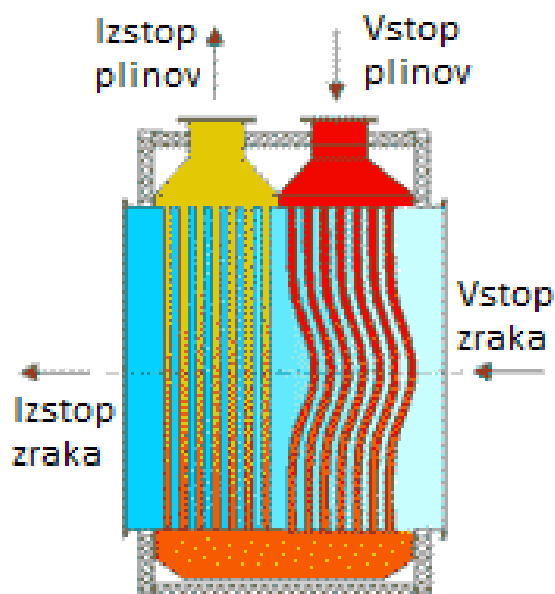
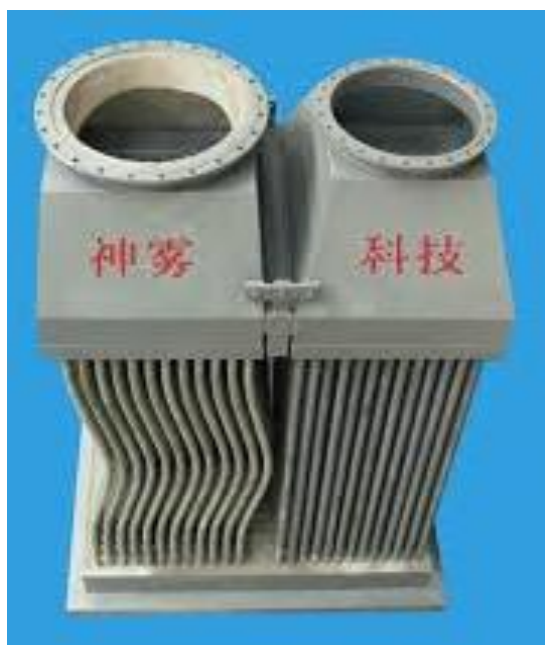
Izmenjevalec oziroma prenosnik toplote je naprava, v kateri prenašamo toplotno energijo prvega fluida (tekočine oziroma plina) na nek drug fluid in ga s tem ogrevamo, hladimo, uparjamo ali kondenziramo.

Prenos toplote lahko poteka na tri osnove načine; ustrezno temu razlikujemo tri izvedbe prenosnikov toplote:

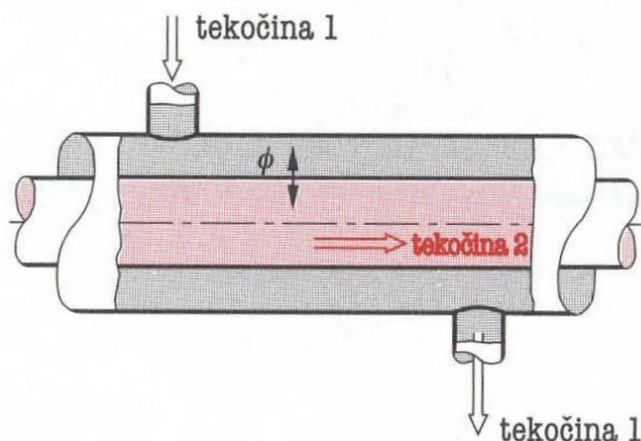
- Rekuperator
- Regenerator
- Mešalni prenosnik toplote.

#### 2.1.1 Rekuperatorji

Rekuperatorji so prenosniki toplote, ki jih sestavljata dva sistema, po možnosti tankostenskih cevi ali kanalov (Slika 4). V prvem sistemu se pretaka tekočina z višjo, v drugem pa tekočina z nižjo temperaturo. Po zakonih o prenosu toplote teče toplotna energija s kraja z višjo temperaturo na kraj z nižjo temperaturo (Slika 5). Primer: parni kotel, oljni hladilnik. Okolica prenosnika toplote je lahko tudi prvi od obeh sistemov. Primeri: grelna telesa, uparjalniki, kondenzatorji <sup>[1]</sup>.



**Slika 4:** Cevni rekuperator (levo), shema cevnega rekuperatorja (desno).

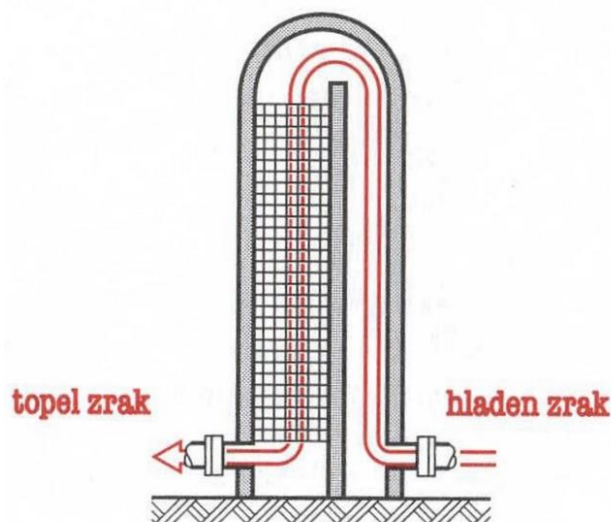


Slika 5: Shema rekuperatorja <sup>[1]</sup>.

### 2.1.2 Regeneratorji

Zrak lahko ogrevamo v zračnem ogrevalniku (Cowper). Hladen zrak prihaja v predhodno ogrevan sistem kanalov, kjer sprejme toplotno energijo in ogret izstopa. S tem do določene mere ohlajuje kanalski sistem. Po zapori hladnega zraka se vodi v napravo vroči plin iz plavža, ki tam odda svojo toplotno energijo in jo ogreje.

Če vzporedno uporabljamo dva zračna ogrevalnika, lahko nepretrgano izkoriščamo odvečno toploto iz visoke peči. Tak način prenosa toplote, kjer se sistem izmenično ogreva, potem pa prevzeto toplotno energijo oddaja hladnemu pritekajočemu zraku, imenujemo regenerativni prenos toplote, prenosniki toplote pa se imenujejo regeneratorji. (Slika 6) <sup>[1]</sup>.



Slika 6: Shema regeneratorja <sup>[1]</sup>.

Ker gre za zbiranje toplote, je po prvem glavnem zakonu termodinamike zbrana toplota  $Q$  izračunana po enačbi (1):

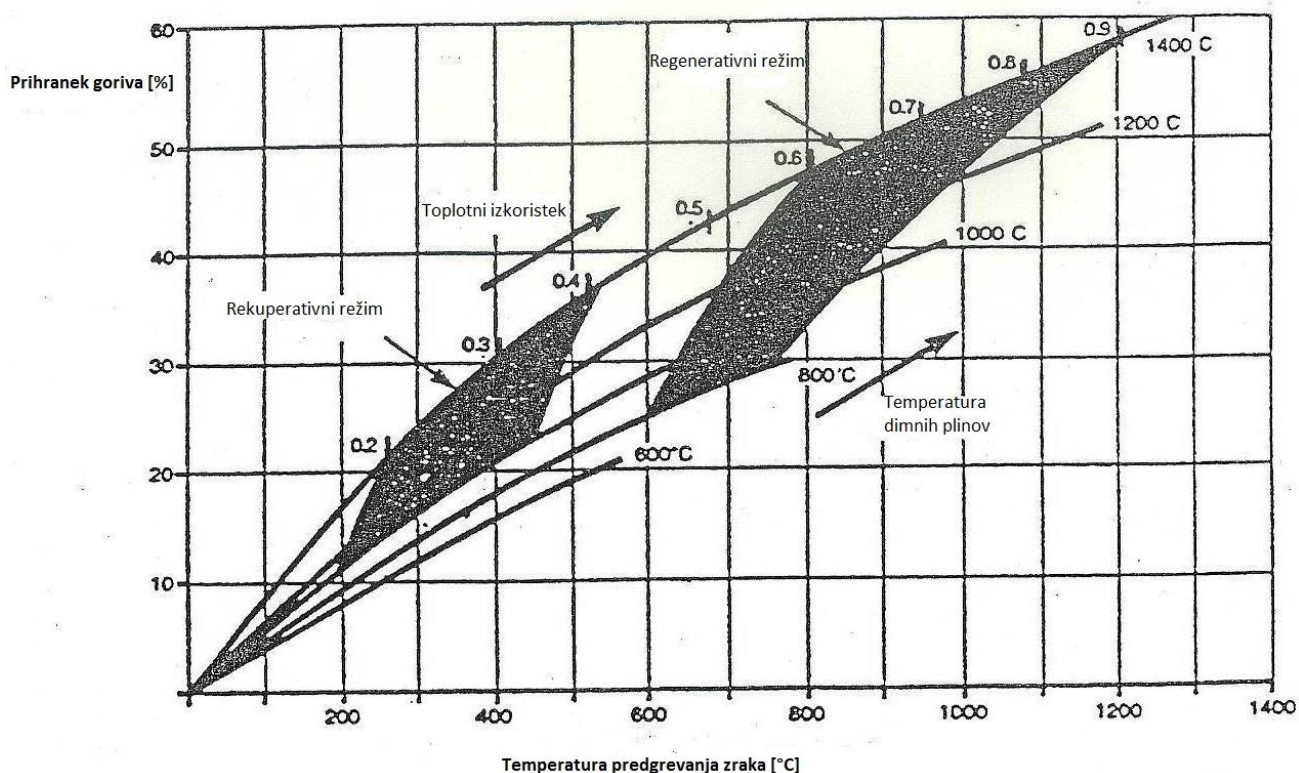
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \text{ [J, kJ]} \quad (1)$$

$m$  ... masa

$c$  ... masni tok

$\Delta\theta$  ... temperaturna razlika

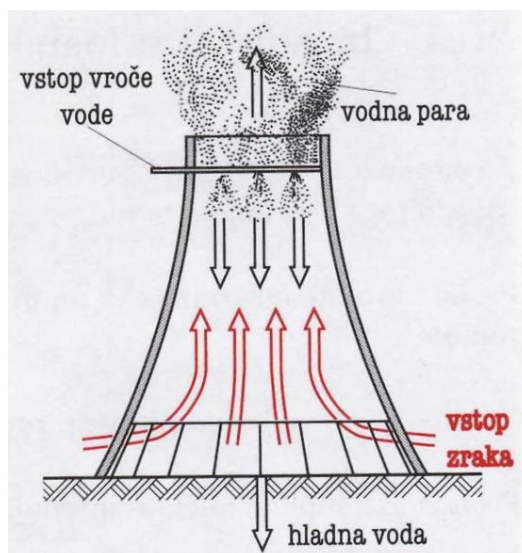
Akumulacijska peč je prav tak regenerator, na primer z nočno akumulacijo. Cenejši nočni električni tok pretvarjamo v toplotno energijo, ki jo izrabimo podnevi. Na sliki 7 je prikazana primerjava med rekuperatorjem in regeneratorjem, ki sta jo v svoji študiji izvedla Colin in Ward <sup>[2]</sup>, <sup>[3]</sup> in je pomemben podatek pri izbiri in dimenzioniranju izmenjevalcev toplote.



Slika 7: Primerjava rekuperator : regenerator <sup>[2]</sup>, <sup>[3]</sup>.

### 2.1.3 Mešalni prenosnik toplote

Slika kaže hladilni stolp (Slika 8), ki ga uporabljamo za ohlajevanje vode, npr. hladilne vode iz kondenzatorja parne ali hladilne naprave. Hladilna voda se razpršena v drobne kapljice giblje nasprotno (v protitoku) hladnem zraku, ki se zaradi izhlapevanja manjše količine vode ohlaja. Manjši del vode torej izstopa na zgornjem delu hladilnega stolpa, glavni del pa je ohlajen na dnu spet na voljo. Hladilni stolp je mešalni prenosnik toplote.



**Slika 8:** Hladilni stolp za ohlajevanje vode <sup>[1]</sup>.

#### 2.1.4 Zahteve izmenjevalca toplote

Izmenjevalec oziroma prenosnik toplote mora izpolnjevati cel niz zahtev. V naslednjih alinejah so navedene zahteve izmenjevalca toplot:

- visoka toplotna prevodnost
- padec tlaka
- zanesljivost in pričakovana življenjska doba
- visoka kakovost izdelka in varno obratovanje
- združljivost materiala s procesnimi tekočinami
- priročna velikost, preprosta za instalacijo, zanesljiva za uporabo
- preprosto za vzdrževanje in servisiranje
- lahki v teži ampak močni v konstrukciji, da prenesejo procesne obremenitve
- enostavnost izdelave
- nizka cena
- možnost popravil.

### 2.1.5 Izbira izmenjevalca toplotnega

Snovalec oziroma konstruktor glede na dano aplikacijo določi vrsto oziroma tip izmenjevalca toplote. Pri izbiri se upošteva več kriterijev, kot so vrsta oziroma tip fluida, tlaki, temperature, toplota in cena.

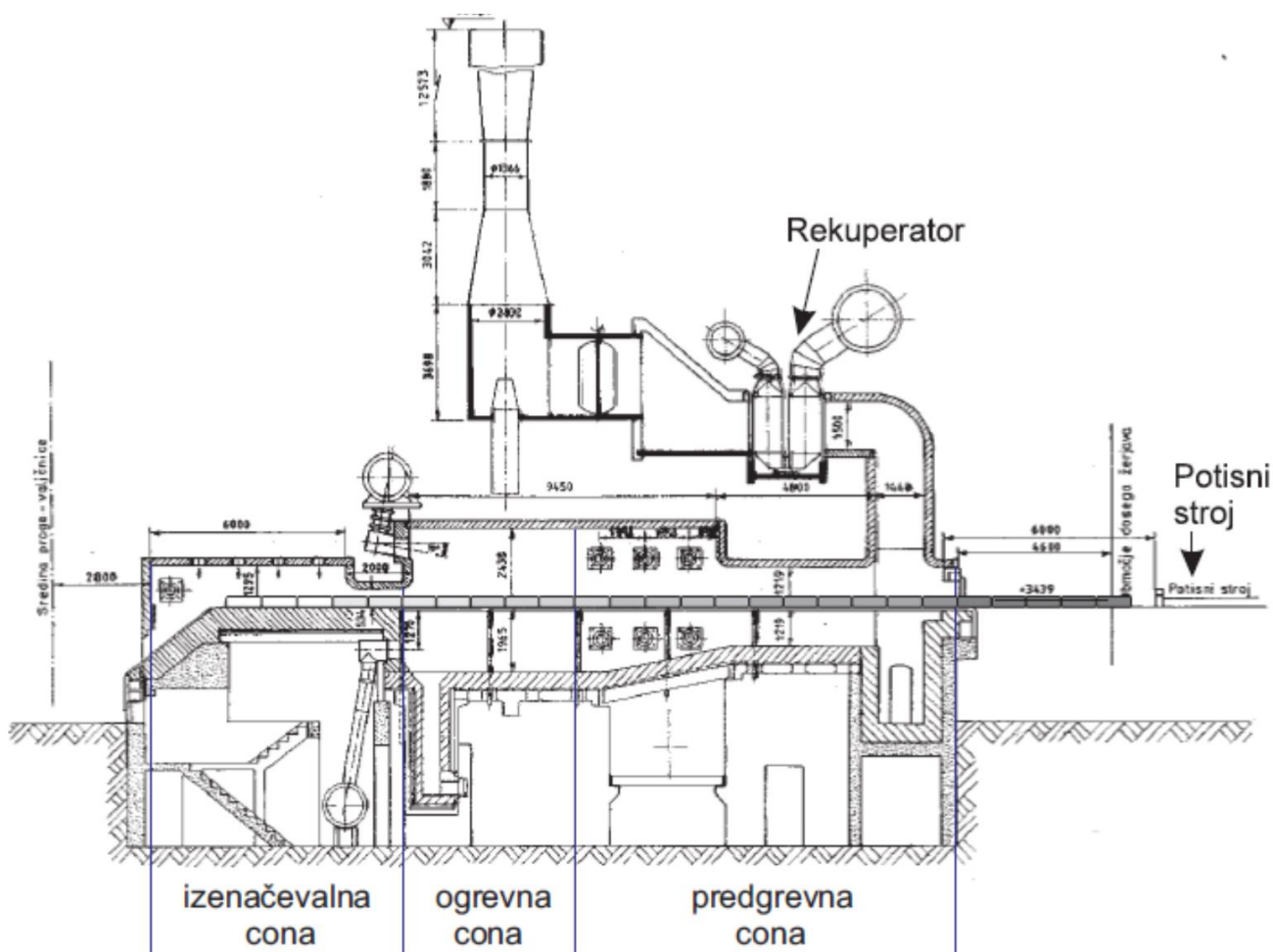
Samo izbiro oziroma načrtovanje lahko opišemo in izvedemo v okviru naslednjih desetih točk:

1. materiali
2. delovni tlak in temperatura
3. hitrosti in režim toka fluida
4. toplotna učinkovitost
5. padec tlaka
6. faze in vrste fluidov
7. vzdrževanje, pregledovanje, čiščenje, popravljanje, podaljševanje življenjske dobe
8. ekonomičnost
9. tehnike izdelave
10. izbira tipa oziroma enote za namen aplikacije.

### 3. Predstavitev potisne peči RUST

Potisna peč RUST instalirana v Vroči valjarni Acroni d.o.o. je bila zgrajena leta 1963 in je bila v začetnem obdobju kurjena z mazutom (PRILOGA 1). Od sredine osemdesetih let je peč kurjena z zemeljskim plinom.

Na peči je bilo od njene postavitve izvedenih več rekonstrukcij (Slika 9), zadnja v letih 2006 in 2007. Poglavitni vzrok za investicijo je bila potreba po višji produktivnosti peči in odprava površinskih napak na spodnji površini slabov, ki so nastale zaradi visokih površinskih pritiskov ob nagibu slaba tik pred spustom po drči na valjčno mizo.



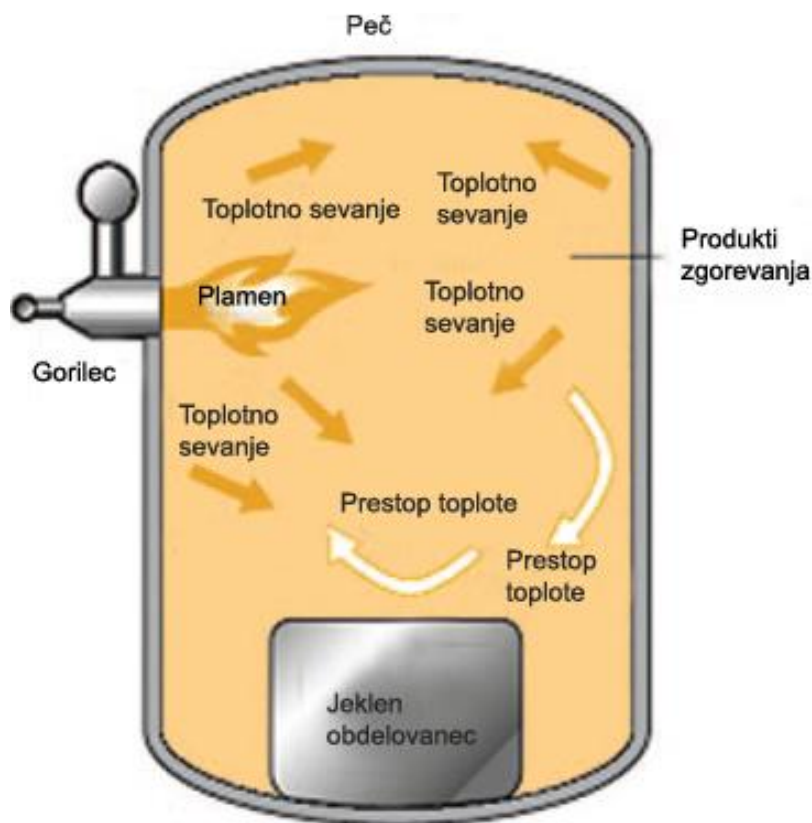
**Slika 9:** Shematski prikaz potisne peči RUST v Acroni d.o.o. pred zadnjo rekonstrukcijo.

V tabeli 1 so zbrane tehnične karakteristike potisne peči neposredno pred zadnjo rekonstrukcijo (Slika 9) in po izvedeni zadnji rekonstrukciji (PRILOGA 2).

**Tabela 1:** Tehnične karakteristike potisne peči RUST pred in po rekonstrukciji 2006/2007.

|                              |                   |        | Po rekonstrukciji 2006/7                       | Pred rekonstrukcijo |
|------------------------------|-------------------|--------|------------------------------------------------|---------------------|
| Koristna dolžina             |                   |        | 24 m                                           | 22,86 m             |
| Notranja širina              |                   |        | 6500 mm                                        | 6000 mm             |
| Maksimalna kapaciteta        |                   |        | 80 t/h<br>(za konstrukcijska jekla do 100 t/h) | 80 t/h              |
| Dolžina zakladanja slabov    |                   |        | 1740 do 5800 mm                                | 1740 do 5800 mm     |
| Širina slabov                |                   |        | do 2060 mm                                     | 850 do 1560 mm      |
| Debelina slabov              |                   |        | 160 do 250 mm                                  | 160 do 250 mm       |
| Masa slabov                  |                   |        | do 17000 kg                                    | 2000 do 12000 kg    |
| Gorivo                       |                   |        | zemeljski plin                                 | zemeljski plin      |
| Moč gorilnikov               | predgrejna cona   | zgoraj | 6 x 1150 kW                                    | 6 X 1000 kW         |
|                              |                   | spodaj | 6 x 1550 kW                                    | 6X 1335 kW          |
|                              | ogrevna cona      | zgoraj | 6 x 1550 kW                                    | 6 X 1525 kW         |
|                              |                   | spodaj | 6 x 2300 kW                                    | 6 X 2000 kW         |
|                              | izenačevalna cona | zgoraj | 16 x 700 kW                                    | 8 X 300 kW          |
|                              |                   | spodaj | 8 x 990 kW                                     | 8 X 300 kW          |
| Temperatura ogrevanja slabov |                   |        | 1150 do 1310 °C                                | 1150 do 1310 °C     |
| Ritem potiskanja slabov      |                   |        | 5 do 18 minut                                  | 5 do 18 minut       |

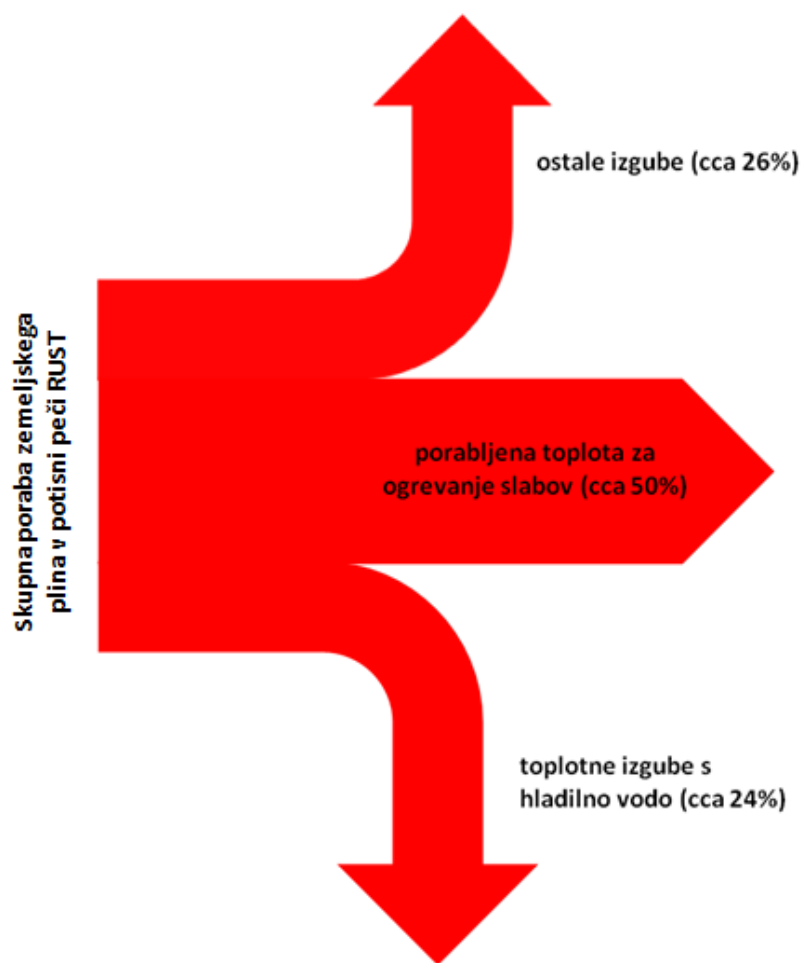
Na sliki 10 je na relativno enostaven način prikazan način ogrevanja jeklenih slabov oziroma prenosa toplote v potisni peči. Mehanizma prenosa toplote na obdelovanec (v našem primeru jeklen slab) sta prestop toplote in toplotno sevanje. S toplotnim sevanjem se prenese več toplote na jeklo. Gre za toplotno sevanje sten peči na jeklo, manjši delež prispeva tudi toplotno sevanje vročih dimnih plinov. Tudi pri prestopu toplote gre za manjši delež prenosa toplote na jeklen slab v peči.



**Slika 10:** Mehanizmi prenosa toplote v peči <sup>[4]</sup>.

Izvedena študija porabe energije in energentov na potisni peči Rust za leto 2012 je pokazala, da je v povprečju potrebno za ogretje tone jekla v potisni peči RUST cca. 825 MJ toplote oziroma 24,3 m<sup>3</sup> zemeljskega plina, kar pomeni, da je bil ob povprečni specifični porabi zemeljskega plina 48,9 m<sup>3</sup>/t v letu 2012 izkoristek potisne peči RUST enak 49,6 % <sup>[5]</sup>.

Na sliki 11 je prikazan Sankeyev diagram porabe toplotne energije v potisni peči RUST v Acroni d.o.o.. Za ogrevanje jeklenih slabov se porabi skoraj polovica celotne dovedene energije. Preostala polovica (izgube) pa se porazdeli na: 1. izgube s hladilno vodo, ki so odvisne od debeline in kvalitete izolacijskega materiala na drsnih ceveh, letnega časa oziroma vstopne temperature ter pretoka vode, in 2. ostale izgube, ki predstavljajo izgube toplote skozi stene peči (ki so ravno tako odvisne od debeline in kvalitete izolacije sten), sevanje toplote skozi odprtine peči v okolico, temperature okolice ter izgube toplote z izpustom vročih dimnih plinov skozi dimnik, katerih toploto lahko izkoristimo z rekuperatorjem.



**Slika 11:** Sankeyev diagram porabe toplote v potisni peči RUST v Acroni d.o.o.<sup>[4]</sup>.

## 4. Zemeljski plin

Zemeljski plin ima pomemben delež v energetskega sistemu. Sestava zemeljskega plina ni konstantna, za zemeljski plin, ki ga uporablja ACRONI d.o.o. na svojih agregatih velja, da ima visoko vsebnost metana, kar povečuje kakovost (Slika 12). Spodnja meja kurilnosti znaša 34100 kJ/m<sup>3</sup>.

Pretvorba kemične energije akumulirane v zemeljskem plinu v uporabno obliko energije se vrši z zgorevanjem, pri čemer nastajajo različni zgorevalni produkti. Zgorevalni produkti v večji ali manjši meri onesnažujejo okolje, kar je danes v svetu zelo velik in resen problem.

### QUALITY CERTIFICATE

#### 1. CHEMICAL COMPOSITION

|      |                   |      |       |
|------|-------------------|------|-------|
| C1   | METHANE           | %VOL | 96,43 |
| C2   | ETHANE            | %VOL | 1,75  |
| C3   | PROPANE           | %VOL | 0,56  |
| I-C4 | ISO-BUTANE        | %VOL | 0,08  |
| N-C4 | N-BUTANE          | %VOL | 0,09  |
| I-C5 | ISO-PENTANE       | %VOL | 0,02  |
| N-C5 | N-PENTANE         | %VOL | 0,01  |
| C6+  | HEXANES AND HEAV. | %VOL | 0,01  |
| CO2  | CARBON DIOXIDE    | %VOL | 0,25  |
| N2   | NITROGEN          | %VOL | 0,80  |
| O2   | OXYGEN            | %VOL | 0,00  |

#### 2. SULPHUR CONTENT

|                   |            |     |
|-------------------|------------|-----|
| HYDROGEN SULFIDE  | MG/M3 (20) | 0,0 |
| MERCAPTAN SULPHUR | MG/M3 (20) | 0,0 |
| TOTAL SULPHUR     | MG/M3 (20) | 0,0 |

#### 3. DEW POINTS

|                     |           |              |           |
|---------------------|-----------|--------------|-----------|
| WATER               |           |              |           |
| METERED VALUE AT    | 50,1 BAR  | 51,09 KG/CM2 | -14,4 °C  |
| DETERMINED VALUE AT | 41,20 BAR | 42,00 KG/CM2 | -16,14 °C |
| DETERMINED VALUE AT | 39,20 BAR | 40,00 KG/CM2 | -16,6 °C  |

|                  |          |              |          |
|------------------|----------|--------------|----------|
| HYDROCARBONS     |          |              |          |
| METERED VALUE AT | 49,4 BAR | 50,37 KG/CM2 | -11,0 °C |

#### 4. CALORIFIC VALUE

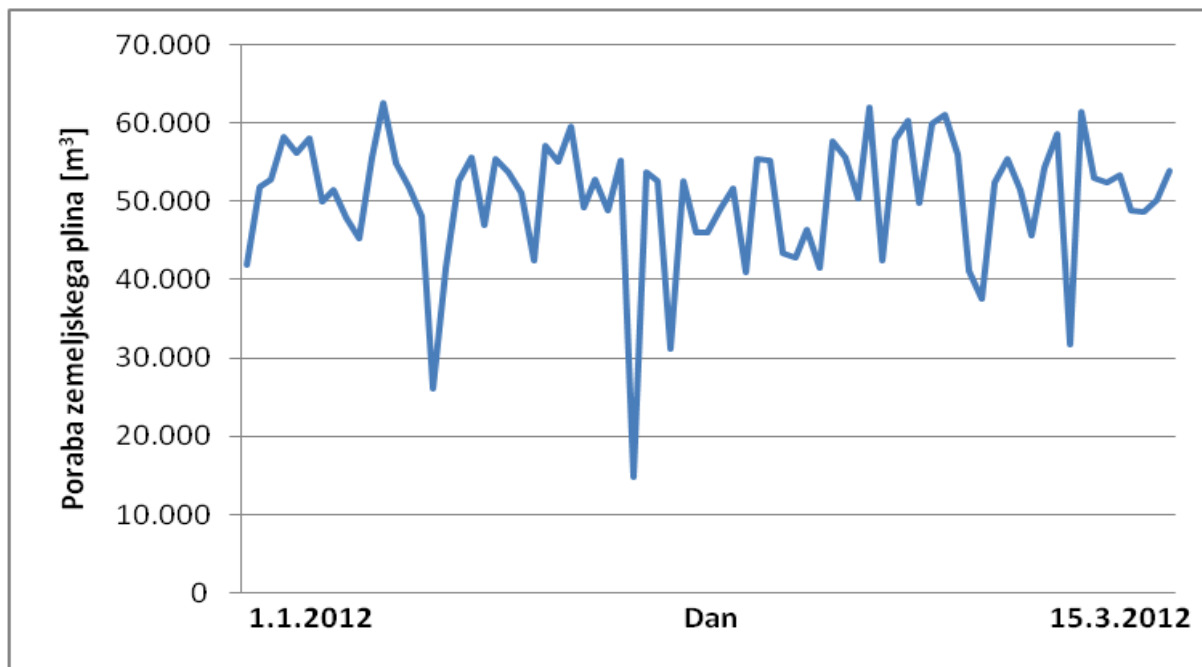
|                            |       |        |         |       |
|----------------------------|-------|--------|---------|-------|
| NET CALORIFIC VALUE (20)   | KJ/M3 | 33.934 | KCAL/M3 | 8.105 |
| GROSS CALORIFIC VALUE (20) | KJ/M3 | 37.719 | KCAL/M3 | 9.009 |

#### 5. DENSITY

|                   |       |          |
|-------------------|-------|----------|
| DENSITY           | KG/M3 | 0,6962   |
| SPEC. GRAVITY     | REL   | 0,5780   |
| CONVERSION FACTOR |       | 0,931778 |

**Slika 12:** Certifikat kakovosti s podatki zemeljskega plina (kemična sestava, vsebnost žvepla, rosišče, kurilnost, ...) <sup>[5]</sup>.

Za potrebe analize in preračuna rekuperatorja za predgrevanje zraka smo uporabili vrednosti porabe zemeljskega plina na največjem potrošniku zemeljskega plina na potisni peči RUST v največjem slovenskem proizvajalcu jekla ACRONI d.o.o. za časovno obdobje 1. januar 2011 – 15. marec 2012 (Slika 13).



**Slika 13:** Poraba zemeljskega plina na potisni peči za obdobje od 1.1.2012 do 15.3.2012 <sup>[5]</sup>.

Proizvodnja jekla in posledično meritve porabe zemeljskega plina na potisni peči RUST se v ACRONI d.o.o. izvajajo kontinuirno 365 dni v letu, 24 ur na dan.

Na podlagi izvedenih meritev je bila proizvodnja na potisni peči v periodi 1.1. 2012 do 15. 3. 2012 80.864 ton jeklenih polizdelkov, poraba zemeljskega plina 3.775.750 m<sup>3</sup>.

V primeru izračunanih idealnih parametrov zgorevanja zemeljskega plina je celotna količina nastalih dimnih plinov, ki vsebujejo CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O znašala 10,8657 m<sup>3</sup>, količina CO<sub>2</sub> kot največjega onesnaževalca ozračja pa 1,0275 m<sup>3</sup> za 1 m<sup>3</sup> zemeljskega plina. Pri zgorevanju plina v potisni peči pogoji in s tem parametri zgorevanja niso idealni, zato so količine nastalih plinov seveda še večje od idealnih. Pogoji zgorevanja se spreminjajo v odvisnosti od množice parametrov (trenutna sestava zemeljskega plina, kvaliteta šarže, masa šarže, temperatura vpihanega zraka...), zato v inženirski praksi ni mogoče izdelati matematičnega modela, ki bi upošteval vse navedene parametre. Vrednosti, ki smo jo določili za primer sestave zemeljskega plina podane v certifikatu (Slika 8) in nam jih izračuna na Katedri za toplotno tehniko izvedeni matematični model in program so minimalne vrednosti nastalih dimnih plinov (emisij).

Tako so izračunane vrednosti za obdobje 1.1. 2012 do 15.3. 2012 41.026.166 m<sup>3</sup> nastalih dimnih plinov, od tega 3.887.135 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>. Glede na nastalo količino nastalih dimnih plinov in neprekinjeno delovanje je izračunana minimalna količina nastalih dimnih plinov 7,66 m<sup>3</sup>/s in če jo razdelimo na 4 enake izmenjevalne segmente rekuperatorja dobimo 1,92 m<sup>3</sup>/s.

## 5. Cevni rekuperator za predgrevanje zraka

Rekuperator KEU GmbH na potisni peči RUST v ACRONI d.o.o. je bil instaliran na peči ob preureditvi peči na zemeljski plin sredi osemdesetih let.. Pri zadnji rekonstrukciji potisne peči leta 2006 in 2007 na samem rekuperatorju ni bilo večjih posegov, posodobitev in izboljšav.

Edina (večja) posega v konstrukcijo in delovanje rekuperatorja sta bila l. 1999 in l. 2004: popravilo oziroma obnova in zamenjava dotrajanih in poškodovanih cevi in drugih sestavnih komponent. Posega sta v celoti dokumentirana, pomemben del dokumentacije pa je predstavljen tudi kot priloga (PRILOGA 3, PRILOGA 4).

Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST v ACRONI d.o.o. ter njegova shema delovanja sta prikazana v uvodnem poglavju.

Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH je namenjen izkoriščanju toplote dimnih plinov industrijskih peči s predgrevanjem za gorilnike peči dovedenega zraka za zgorevanje. Namenjen je za t.i. vgradnjo v dimovodni kanal (Slika 14).



**Slika 14:** Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST.

Izmenjava toplote se izvede v sistemu cevi, pri čemer struji zrak za zgorevanje skozi cevi, dimni plini industrijske peči pa okoli cevi. Ogrevni sistem je sestavljen iz dveh svežnjev cevi, ki so na eni strani direktno povezani z dovodom in odvodom zraka, na drugi strani pa preko pokrova, v katerem se preusmeri strujanje zrakotesno povezani med seboj (PRILOGA 1).

Jeklene cevi, ki so izdelane iz temperaturno obstojnih jekel, so na obeh koncih plinotesno zavarjene na jeklene plošče.

Cevi so upognjene v obliki glasbila lira (Slika 15, PRILOGA 3, PRILOGA 4), da lahko pri različnih raztezkih elastično kompenzirajo nastale napetosti. V ceveh so za povečanje turbulence vstavljena vrtilna telesa (turbolatorji). Na ta način se poveča prenos toplote na zračni strani in zniža temperatura sten cevi.



**Slika 15:** Notranjost in cevi cevnega rekuperatorja.

Rekuperator je viseče vgrajen v dimovodnem kanalu, tako da se ogrevni sistem lahko prosto razteza navzdol. Okoli nosilnega okvirja je nameščena tesnilna vrvica, ki preprečuje vdor sekundarnega zraka (zraka iz okolice) v dimni kanal. Karakteristike rekuperatorja oziroma podatki o njegovi zmogljivosti so zbrani v Tabeli 2. Posebno pomembno je navesti maksimalno temperaturo dimnih plinov, ki znaša 950 °C in maksimalno temperaturo zraka za zgorevanje, ki znaša 480 °C.

**Tabela 2:** Podatki o zmogljivosti rekuperatorja <sup>[6]</sup>.

|                                                       |                                                 |        |       |        |       |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|
| <b>Vrsta goriva</b>                                   | Zemeljski plin, $H_u = 34325,2 \text{ kJ/Nm}^3$ |        |       |        |       |
| <b>Količina goriva</b>                                | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          | 2.400  | 800   | 2.400  | 800   |
| <b>Razmernik zraka</b>                                | <b>N</b>                                        | 1,03   | 1,03  | 1,03   | 1,03  |
| <b>Količina dimnih plinov</b>                         | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          | 25.067 | 8.356 | 25.067 | 8.356 |
| <b>Izgube dimnih plinov</b>                           | <b>%</b>                                        | 10     | 10    | 10     | 10    |
| <b>Količine dimnih plinov</b>                         | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          | 22.560 | 7.520 | 22.560 | 7.520 |
| <b>Temperatura dimnih plinov</b>                      |                                                 |        |       |        |       |
| <b>Vstop</b>                                          | <b>°C</b>                                       | 900    | 800   | 870    | 770   |
| <b>Izstop</b>                                         | <b>°C</b>                                       | 525    | 375   | 455    | 375   |
| <b>Izguba tlaka</b>                                   | <b>Mm VS</b>                                    | 10,0   | 0,9   | 10     | 0,85  |
| <b>Količina zraka za zgorevanje</b>                   | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          | 22.610 | 7.537 | 22.610 | 7.535 |
| <b>Temperatura zraka za zgorevanje</b>                |                                                 |        |       |        |       |
| <b>Vstop</b>                                          | <b>°C</b>                                       | 20     | 20    | 20     | 20    |
| <b>Izstop</b>                                         | <b>°C</b>                                       | 450    | 490   | 430    | 450   |
| <b>Izguba tlaka</b>                                   | <b>Mm VS</b>                                    | 150    | 20    | 145    | 18    |
| <b>Zrak za odpihovanje</b>                            | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          |        | 900   |        | 300   |
| <b>Skupna količina zraka</b>                          | <b>m<sup>3</sup>/h</b>                          |        | 8.437 |        | 7.837 |
| <b>Kratkotrajne dopustne temperature (maksimalno)</b> |                                                 |        |       |        |       |
| <b>Na strani dimnih plinov</b>                        | <b>°C</b>                                       | 950    |       |        |       |
| <b>Na strani zraka</b>                                | <b>°C</b>                                       | 480    |       |        |       |

## 5.1 Varovalna veriga za zaščito rekuperatorja

Varovalna veriga ima nalogo zaščititi rekuperator pregretjem vseh vrst. Razen tega se prepreči obratovanje z redukcijsko pečno atmosfero.

Razlogi prekoračitve maksimalne dopustne temperature lahko nastopijo na različne načine. Kadar so zaradi v nadaljevanju navedenih vzrokov nevarnosti <sup>[6]</sup>:

- izpad električne energije
- prenizke količine zraka za rekuperatorjem
- prekoračitev maksimalnih temperatur dimnih plinov pred rekuperatorjem
- prekoračitev maksimalnih temperatur zraka za zgorevanje za rekuperatorjem in
- prenizke vrednosti kisika v dimnih plinih

presežene kritične končne vrednosti, sledi akustični in optični signal. Istočasno pritegne za alarme odločilni rele varovalno verigo in prekine fazo. Pri stanju brez električne energije se:

- avtomatsko zapre hitrozaporni magnetni ventil za dovod goriva (ventil je v primeru brez napajanja električne energije zaprt)
- avtomatsko odpre pnevmatski ventil, ki neodvisno od električnega omrežja, dovede komprimiran zrak, s čimer se odprejo vrta v dimovodnem kanalu za hladilni zrak
- avtomatsko odpre regulacijo tlaka v peči (v primeru, da je regulacija med rekuperatorjem in kaminom).

Rekuperator s sistemi razvoda zraka je računan za obratovanje pri višjih temperaturah in je temu optimalno konstruiran. Prekoračenje temperature lahko povzroči škode na vseh delih rekuperatorja. Da bi te temperature ne presegle v nadaljevanju navedene maksimalne vrednosti, se izvedejo ukrepi, ki v obliki varovalne verige z optičnim in akustičnim signalom pokažejo izvor napake in zaščitijo rekuperator:

- Temperatura dimnih plinov: max. 950 °C
- Temperatura zraka za zgorevanje: max. 480 °C

Varovalna veriga je projektirana tako, da pri v nadaljevanju navedenih vzrokih nevarnosti izklopi napravo oziroma preklopi na elektro agregat <sup>[6]</sup>:

- prekoračitev maksimalne temperature dimnih plinov  $T = 950\text{ °C}$
- prekoračitev maksimalne temperature zraka za zgorevanje  $T = 480\text{ °C}$
- izpad električne energije.

## 5.2 Materiali cevi rekuperatorja

Cevi rekuperatorja so izdelane iz treh temperaturno obstojnih jekel z oznakami 1.4720, 1.4749 in 1.0305. Vse v rekuperatorju KEU vgrajene cevi so enakih dimenzij (glej načrt – PRILOGA 3): zunanji premer cevi znaša  $\phi$  44,5 mm, debelina stene cevi je 2,5 mm, višina cevi 1,65 m ter dolžina upognjene cevi 1,739 m.

Gostote jekel so naslednje: 1.4720 7580 kg/m<sup>3</sup>, 1.4749 7470 kg/m<sup>3</sup> in 1.0305 7850 kg/m<sup>3</sup>. V Tabelah 3, 4 in 5 pa so zbrane njihove toplotne lastnosti: toplotna prevodnost, specifična toplota (srednja in absolutna) ter temperaturni razteznostni koeficient.

**Tabela 3:** Toplotna prevodnost jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup>.

| $\vartheta$ (°C) | 1.0305<br>$\lambda$ (W/m·K) | 1.4720<br>$\lambda$ (W/m·K) | 1.4749<br>$\lambda$ (W/m·K) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0                |                             |                             |                             |
| 20               | 56,9                        | 15,7                        | 14,2                        |
| 100              | 56,4                        | 17,1                        | 15,5                        |
| 200              | 53,5                        | 18,6                        | 17,0                        |
| 300              | 49,4                        | 20,0                        | 18,3                        |
| 400              | 45,2                        | 21,2                        | 19,7                        |
| 500              | 41,3                        | 22,3                        | 20,9                        |
| 600              | 37,6                        | 23,1                        | 21,9                        |
| 700              |                             | 23,8                        | 23,3                        |
| 800              |                             |                             | 24,6                        |
| 900              |                             |                             | 26,1                        |
| 1000             |                             |                             | 27,5                        |

**Tabela 4:** Specifična toplota jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup>.

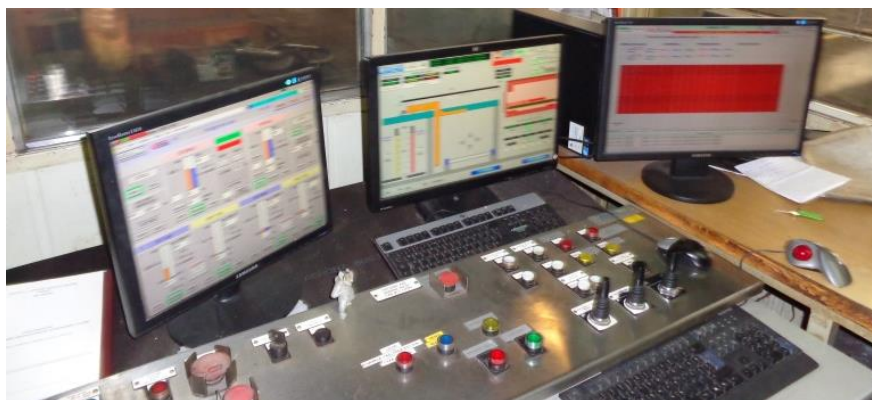
| <b>θ (°C)</b> | <b>1.0305</b>     |                               | <b>1.4720</b>     |                               | <b>1.4749</b>     |                               |
|---------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
|               | <b>c (J/kg·K)</b> | <b>c<sub>a</sub> (J/kg·K)</b> | <b>c (J/kg·K)</b> | <b>c<sub>a</sub> (J/kg·K)</b> | <b>c (J/kg·K)</b> | <b>c<sub>a</sub> (J/kg·K)</b> |
| <b>0</b>      | 456               | 451                           |                   |                               |                   |                               |
| <b>20</b>     | 461               | 461                           | 439               | 439                           | 457               | 457                           |
| <b>100</b>    | 479               | 496                           | 474               | 500                           | 498               | 534                           |
| <b>200</b>    | 499               | 533                           | 498               | 534                           | 534               | 583                           |
| <b>300</b>    | 517               | 568                           | 517               | 571                           | 555               | 616                           |
| <b>400</b>    | 536               | 611                           | 538               | 625                           | 577               | 644                           |
| <b>500</b>    | 558               | 677                           | 564               | 704                           | 605               | 877                           |
| <b>600</b>    | 587               | 778                           | 598               | 831                           | 648               | 771                           |
| <b>700</b>    |                   |                               | 647               | 1078                          | 656               | 664                           |
| <b>800</b>    |                   |                               |                   |                               | 657               | 660                           |
| <b>900</b>    |                   |                               |                   |                               | 657               | 662                           |
| <b>1000</b>   |                   |                               |                   |                               | 658               | 667                           |

**Tabela 5:** Temperaturni razteznostni koeficient jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749 <sup>[7]</sup>.

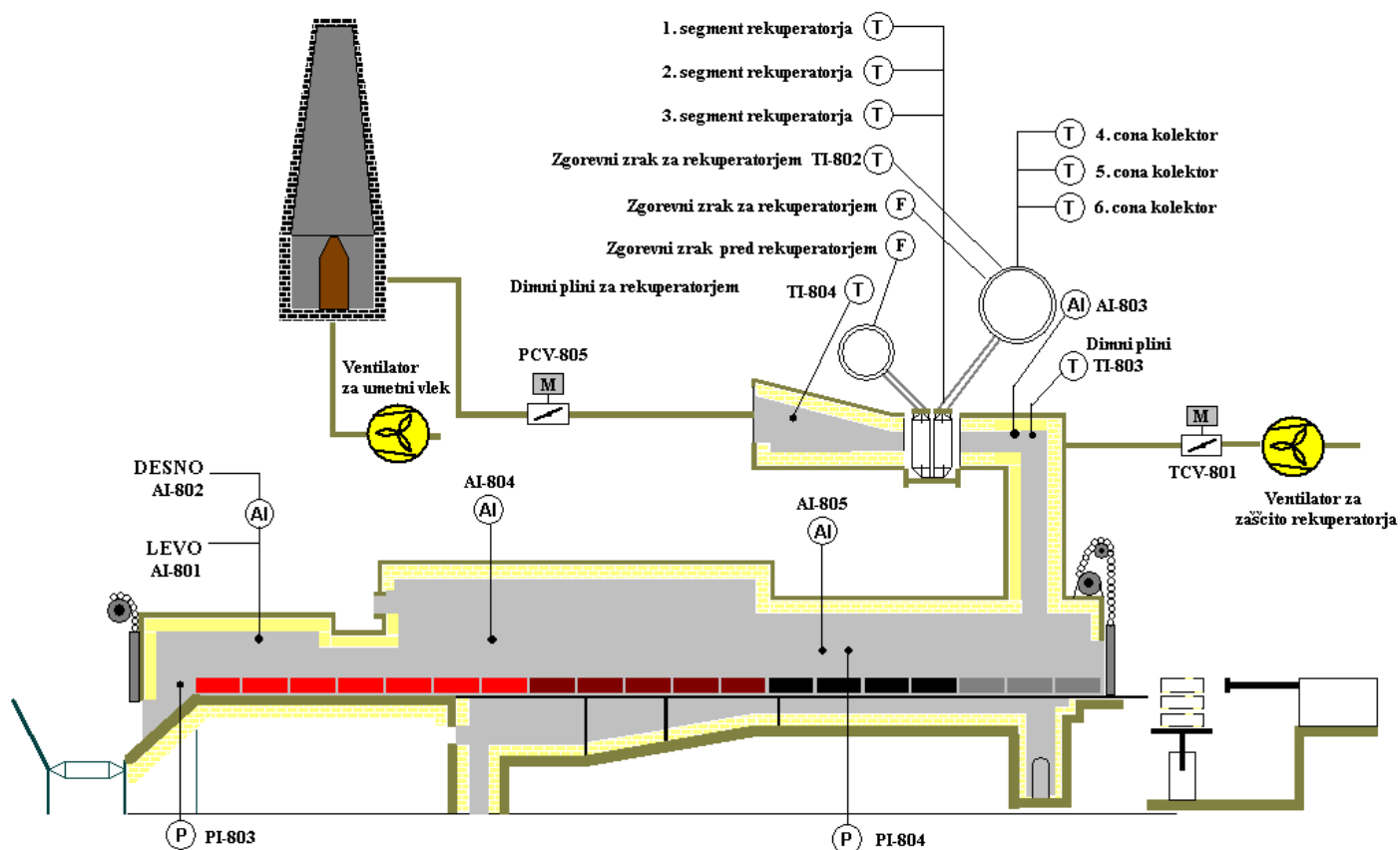
| <b>θ (°C)</b> | <b>1.0305</b>                |                              | <b>1.4720</b>                |                              | <b>1.4749</b>                |                              |
|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|               | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> | <b>α (10<sup>-6</sup>/K)</b> |
| <b>0</b>      | 11,7                         | 10,1                         |                              |                              |                              |                              |
| <b>20</b>     | 11,9                         | 10,2                         |                              |                              | 9,9                          |                              |
| <b>100</b>    | 12,5                         | 10,5                         |                              |                              | 10,3                         |                              |
| <b>200</b>    | 13,0                         | 10,9                         |                              |                              | 10,7                         |                              |
| <b>300</b>    | 13,6                         | 11,3                         |                              |                              | 11,1                         |                              |
| <b>400</b>    | 14,1                         | 11,6                         |                              |                              | 11,5                         |                              |
| <b>500</b>    | 14,5                         | 12,0                         |                              |                              | 11,8                         |                              |
| <b>600</b>    | 14,9                         | 12,2                         |                              |                              | 12,0                         |                              |
| <b>700</b>    |                              | 12,4                         |                              |                              | 12,4                         |                              |
| <b>800</b>    |                              |                              |                              |                              | 12,9                         |                              |
| <b>900</b>    |                              |                              |                              |                              | 13,4                         |                              |
| <b>1000</b>   |                              |                              |                              |                              | 14,0                         |                              |

## 6. Meritve temperatur

Meritve temperatur, tlakov in pretokov se kontinuirno izvajajo na potisni peči in izmenjevalcu toplote ter beležijo v sistemu. Operater ima na sistemu za nadzor peči ves čas vrednosti posameznih parametrov, da lahko uspešno nadzira in vodi procese ter ukrepa v primeru napak in nepredvidenih dogodkov (Sliki 16 in 17).

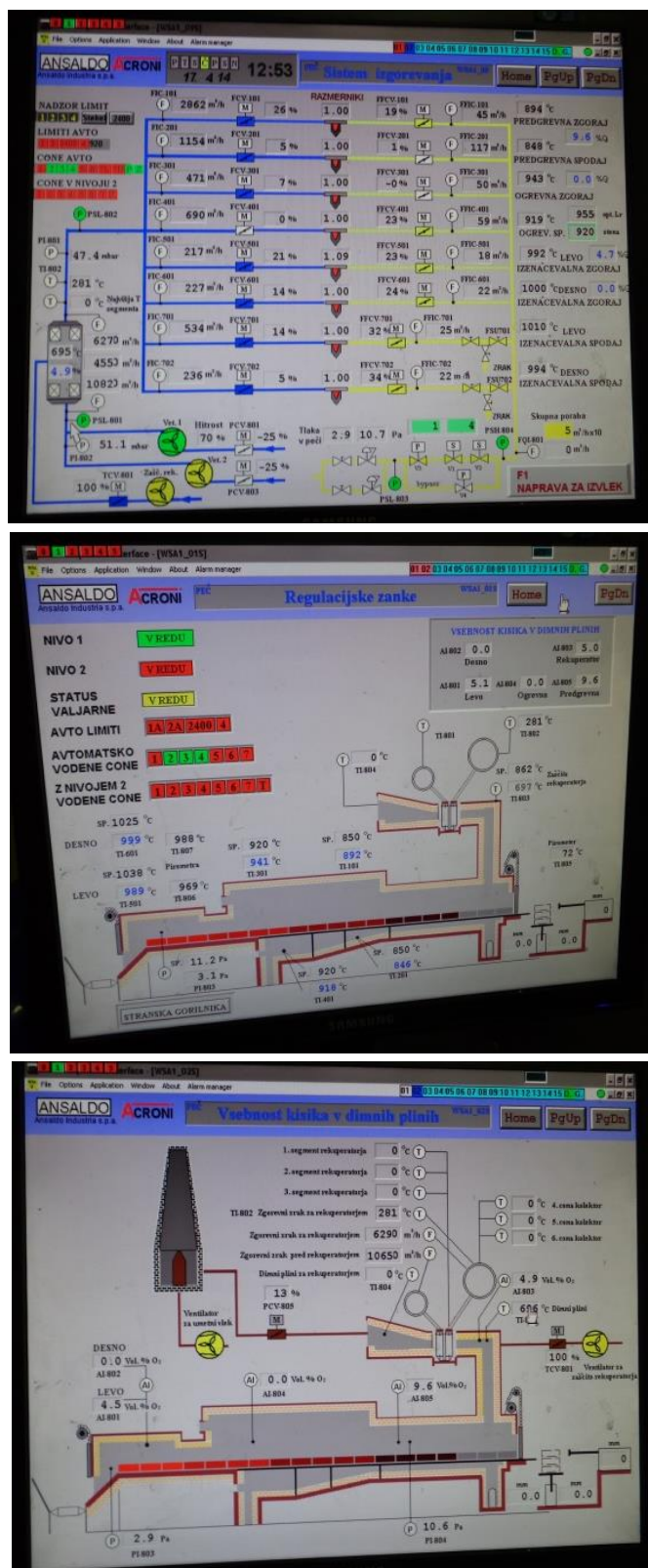


Slika 16: Sistem za nadzor peči.



Slika 17: Virtualna shema peči z rekuperatorjem in šaržo ter glavnimi točkami nadzora.

Na Sliki 18 so prikazani posamezni meniji, ki so na voljo v nadzornem sistemu za spremljanje in nadzor procesa.



Slika 18: Meniji, ki so na voljo v nadzornem sistemu za spremljanje in nadzor procesa.

Z ročnim merilnikom temperature (Slika 19) smo izmerili temperature dimnih plinov na vstopu in izstopu iz rekuperatorja ter temperaturo zraka na izhodu iz rekuperatorja. Rezultati izvedenih meritev so zbrani v Tabeli 6 in so nam v nadaljevanju služili kot vstopni podatki pri kontrolnem preračunu obravnavanega izmenjevalca toplote.



**Slika 19:** Meritev temperature dimnih plinov na izstopu iz rekuperatorja.

**Tabela 6:** Meritve temperatur dimnih plinov in zraka na vstopu in izstopu iz rekuperatorja.

| Čas                     | T zgorevanega zraka za rekuperatorjem | T dimnih plinov pred rekuperatorjem | T dimnih plinov za rekuperatorjem |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 10:23                   | 309                                   | 851                                 | 436                               |
| 10:50                   | 297                                   | 842                                 | 427                               |
| 11:06                   | 282                                   | 839                                 | 403                               |
| 11:26                   | 305                                   | 820                                 | 413                               |
| 11:43                   | 286                                   | 845                                 | 403                               |
| 11:57                   | 293                                   | 845                                 | 409                               |
| <i>Srednja vrednost</i> | 295                                   | 840                                 | 415                               |

## 7. Kontrolni preračun in ocena stanja rekuperatorja

Kot osnova za kontrolni preračun in oceno stanja obstoječega konvektivnega cevnega rekuperatorja proizvajalca KEU GmbH na potisni peči Rust nam je služil algoritem preračuna rekuperatorja z gladkimi cevmi, ki sta ga izvedla Popović in Raić in se je tokom petintridesetih let večkrat potrdil v inženirski praksi <sup>[8]</sup>.

Pri analizi in kontrolnem preračunu cevnega rekuperatorja za predgrevanje zraka na potisni peči so bili poleg geometrije in dimenzij rekuperatorja in njegovih sestavnih delov, lastnosti materialov, ter toplotnih lastnosti zemeljskega (kurilnega) plina, zraka ter nastalih dimnih plinov upoštevani naslednji parametri izračuna:

1. Količina hladnega zraka na vstopu na rekuperator:

$$V'_Z = 1,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Količina vročih dimnih plinov na vstopu v rekuperator:

$$V'_P = 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Temperatura vročega zraka na gorilnikih peči:

$$\vartheta_{ZG} = 265 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4. Temperatura dimnih plinov na vstopu v rekuperator:

$$\vartheta'_P = 840 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5. Začetna temperatura zraka (na vstopu v rekuperator):

$$\vartheta'_Z = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Opomba: Pri inženirskih pre(iz)računih izmenjevalcev toplote, se običajno uporabljajo oznake: indeks (Z) za zrak, indeks (P) za dimni plin in oznaki (') za vstop in (') za izstop iz izmenjevalca toplote.

Osnovna izračuna so t.i. osnovne dimenzije izmenjevalca toplote (površina za izmenjavo toplote).

Pri dimenzioniranju (novih) izmenjevalcev jih določimo na podlagi izračunov. V danem primeru rekuperatorja na potisni peči, pa so njegove dimenzije oziroma njegova površina za izmenjavo toplote okvirno določene; lahko pa spremenimo določene parametre, kot so npr. material določenih cevi, pretok plina oziroma zraka, temperature,...

Površina za izmenjavo toplote (A) rekuperatorja, je določena z entalpijo zraka na koncu predgrevanja (2), (3):

$$E''_Z = \alpha \cdot A \cdot \vartheta_{SR} [W] \quad (2)$$

oziroma

$$A = \frac{E''_Z}{\alpha \cdot \vartheta_{SR}} [m^2] \quad (3)$$

kjer sta:

$\vartheta_{SR}$  ... srednja logaritemska razlika (diferenca) temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha$  ... toplotna prehodnost (iz dimnega plina na zrak) [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ ]

Entalpija zraka na izhodu iz izmenjevalca toplote (rekuperatorja) (4):

$$E_Z'' = V_Z \cdot c_Z \cdot (\vartheta_Z'' - \vartheta_Z') [W] \quad (4)$$

Toplotna kapaciteta (vsebnost) zraka znaša  $c_Z = 1,35 \text{ kJ/m}^3\text{K}$  [8]. Temperatura (izmerjena) zraka na izhodu iz rekuperatorja je  $\vartheta_Z'' = 295 \text{ }^{\circ}\text{C}$  in je privzeta kot srednja vrednost izrednih temperaturnih meritev. Temperatura zraka na gorilniku je na podlagi izrednih inženirskih izračunov in eksperimentalnih meritev za cca. 10% (v danem primeru za  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nižja in okvirno znaša  $\vartheta_{ZG} = 265 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Začetna temperatura zraka pri vstopu v rekuperator pa je približno enaka kar temperaturi zraka v neposredni okolici in v danem primeru znaša  $\vartheta_Z' = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na podlagi navedenega je torej entalpija zraka na izhodu iz izmenjevalca (5):

$$E_Z'' = 1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,35 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot (295 - 20) = 464063 \text{ W} \quad (5)$$

Srednjo logaritemsko razliko temperatur ( $\vartheta_{SR}$ ) določimo (6):

$$\vartheta_{SR} = \frac{\vartheta_N - \vartheta_K}{\ln \frac{\vartheta_N}{\vartheta_K}} [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

V odvisnosti od največje in najmanjše temperaturne razlike temperatur zraka in dimnega plina, pri protismernem toku dimnega plina in zraka velja (7), (8):

$$\vartheta_N = \vartheta_p' - \vartheta_Z' = 840 - 295 = 545 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$\vartheta_K = \vartheta_p'' - \vartheta_Z'' = 415 - 20 = 395 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

Tako znaša srednja logaritemska razlika temperatur:

$$\vartheta_{SR} = 466 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

V splošnem primeru je koeficient prehoda toplote (toplotna prehodnost  $\alpha$ ) enak vsoti recipročnih (obratnih) vrednosti toplotnih uporov od dimnega plina in do zraka(9):

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_P} \cdot c_1 + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_Z} \cdot c_2} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (9)$$

Kjer pomenijo:

$\alpha_P, \alpha_Z$  ... toplotna prestopnost na strani dimnega plina oziroma zraka ( $\frac{W}{m^2K}$ )

$\delta$  ... debelina stene cevi (m)

$\lambda$  ... toplotna prevodnost cevi ( $\frac{W}{mK}$ )

$C_1, C_2$  ... korekturna faktorja odvisna od površine cevi (/)

Za kovinske rekuperatorje za predgrevanje zraka z gladkimi cevmi velja (10):

$$C_1 = 1, C_2 = 1 \quad \text{in} \quad \frac{\delta}{1} = 0 \quad (10)$$

(zanemarljiva toplotna upornost stene)

Sledi(11):

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_P} + \frac{1}{\alpha_Z}} = \frac{\alpha_Z \cdot \alpha_P}{\alpha_Z + \alpha_P} \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (11)$$

Hitrosti dimnih plinov oziroma zraka v rekuperatorju znašajo (približno):

$$v_P = 5 \frac{m}{s}$$

$$v_Z = 8 \frac{m}{s}$$

Površina (potrebna minimalna) kanalov za zrak in dimne pline (12), (13):

$$A_Z = \frac{V'_Z}{v_Z} = \frac{1,25}{8} = 0,15625 m^2 \quad (12)$$

$$A_P = \frac{V'_P}{v_P} = \frac{1,92}{5} = 0,384 m^2 \quad (13)$$

Število kanalov (cevi) je odvisno od premera cevi; v rekuperatorju so uporabljene standardne jeklene cevi iz jekel 1.0305, 1.4720 in 1.4749,  $\theta = 44,5 / 2,5$ .

Število kanalov (cevi) je v enem segmentu odvisno od premera cevi. Minimalno potrebno število cevi je (14):

$$\eta_P = \frac{A_P}{0,785 \cdot d^2} = \frac{0,384}{0,785 \cdot 00445^2} = 247 \quad (14)$$

Število cevi, ki jih vsebuje posamezen segment, je 280, torej popolnoma zadostuje zahtevam.

Sistem cevi je izveden v t.i. zaporednem razporedu v sistemu 14x10 cevi v vsakem od obeh delov posameznega segmenta. Iz načrta podatkov (PRILOGA 3, PRILOGA 4), določimo vrednosti  $S_1$  in  $S_2$ , kjer je  $S_1$  (m) razdalja med posameznimi središčnimi cevmi v prečni smeri,  $S_2$  (m) pa razdalja med posameznimi središčnimi cevmi v vzdolžni smeri. Vrednost  $S_1$  v našem primeru znaša 0,091 m,  $S_2$  pa 0,086 m.

Višina posameznega koridorja znaša (glej PRILOGA 1):

$$b = 1,65 \text{ m}$$

V primeru, da upoštevamo še upognjenost cevi je vrednost:

$$b = 1,739 \text{ m}$$

Toplotna prestopnost na strani zraka znaša <sup>[8]</sup>:

$$\alpha_z = 75 \frac{W}{m^2 K}$$

Na strani dimnih plinov pa <sup>[8]</sup>:

$$\alpha_p = 34 \frac{W}{m^2 K}$$

Koeficient prehoda toplote je torej (15):

$$\alpha = \frac{75 \cdot 34}{75 + 34} = 24,0 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (15)$$

Od tod lahko določimo potrebno površino za izmenjavo toplote rekuperatorja (16):

$$A = \frac{E_z''}{\alpha \cdot \vartheta_{SR}} = \frac{464063}{24 \cdot 466} = 41,5 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Dimenzije izmenjevalca so (glej PRILOGA 1):

- Višina cevi: 1,65 m
- Širina izmenjevalca: 0,955m; potrebno ji je dodati še debelino izolacije iz šamotne opeke (2 x 55mm) in dobimo celotno vrednost, ki je: 1,065 m
- Dolžina izmenjevalca toplote znaša: 2,120 m in ko ji prištejemo še debelino izolacije iz šamotne opeke (2 x 55mm), dobimo celotno dolžino enako: 2,230 m

Za izbiro materiala cevi je odločilen (merodajen) parameter srednja temperatura stene cevi ( $\vartheta_c$ ), ki jo določimo iz naslednjega izraza (17):

$$\vartheta_c = \vartheta_z + \frac{\vartheta_p - \vartheta_z}{1 + \frac{\alpha_z}{\alpha_p}} [^{\circ}C] \quad (17)$$

Kjer sta  $\vartheta_P$  in  $\vartheta_Z$  srednji temperaturi ( $^{\circ}\text{C}$ ) zraka oziroma dimnih plinov v rekuperatorju in ju določim po na podlagi naslednjih zvez (18), (19), (20):

$$\vartheta_Z = \frac{\vartheta'_Z + \vartheta''_Z}{2} = \frac{20 + 295}{2} = 158 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

in

$$\vartheta_P = \frac{\vartheta'_P + \vartheta''_P}{2} = \frac{840 + 415}{2} = 628 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (19)$$

ter

$$\vartheta_C = 158 + \frac{628 - 158}{1 + \frac{75}{34}} = 305 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

Glede na izračunano srednjo temperaturo sten cevi izmenjevalca toplote je izbira materialov cevi več kot ustrezna.

## 8. Zaključki

V največjem slovenskem proizvajalcu jekla družbi Acroni d.o.o. Jesenice uporabljajo za ogrevanje jeklenih slabov pred postopkom vročega valjanja potisno peč proizvajalca RUST. Proizvodnja jekla in posledično potisna peč RUST v ACRONI d.o.o. deluje kontinuirno praktično 365 dni v letu, 24 ur na dan, potisna peč je kurjena z zemeljskim plinom in je največji potrošnik zemeljskega plina v družbi. Določena rešitev navedenih problemov je pred leti z nadgradnjo potisne peči s konvektivnim cevnim rekuperatorjem proizvajalca KEU GmbH bistveno povečala energetske učinkovitost agregata in zmanjšala problem ekologije.

Pri zadnji rekonstrukciji potisne peči leta 2006 in 2007 se karakteristik rekuperatorja ni izboljšalo, kljub izboljšanju karakteristik peči. Zato je bil osnovni cilj diplomskega dela v osnovi izvedenih toplotno tehničnih meritev, študije obstoječe konstrukcije rekuperatorja, modelov in izračunov poiskati, in predlagati konkretno inženirsko rešitev, ki bi omogočila znižanje temperature dimnih plinov na izhodu iz rekuperatorja.

V diplomskem delu je prikazana razdelitev in analiza izmenjevalcev toplote s poudarkom na trenutnem stanju tehnike na obravnavanem področju industrijskih izmenjevalcev toplote.

Podrobneje je predstavljena in opisana je potisna peč RUST instalirana v ACRONI d.o.o. in mehanizmi prenosa toplote v njej.

V nadaljevanju so podani in interpretirani parametri in stanje porabe zemeljskega plina na agregatu s podatki porabe za leto 2012.

Predstavljen in analiziran je konvektivni rekuperator proizvajalca KEU GmbH s poudarkom na analizi geometrije, dimenzij in materialov cevi.

V neposrednem industrijskem okolju so bile izvedene meritve temperatur dimnih plinov in zraka na vstopu in izstopu iz rekuperatorja.

Kot glavni del našega dela je bil izveden kontrolni preračun in ocena stanja obstoječega konvektivnega cevnega rekuperatorja proizvajalca KEU GmbH na potisni peči Rust.

Glede na izračunane parametre izmenjevalca toplote je izbira materialov cevi več kot ustrezna. Izmerjene oziroma izračunane temperature dimnih plinov oziroma zraka pa v obravnavanem primeru ne odstopajo bistveno od optimalnih. Temperatura dimnih plinov na izstopu iz rekuperatorja znaša približno 400 °C, temperatura dimnih plinov na izstopu v okolje pa je seveda še občutno manjša in je tudi močno odvisna od temperature ozračja.

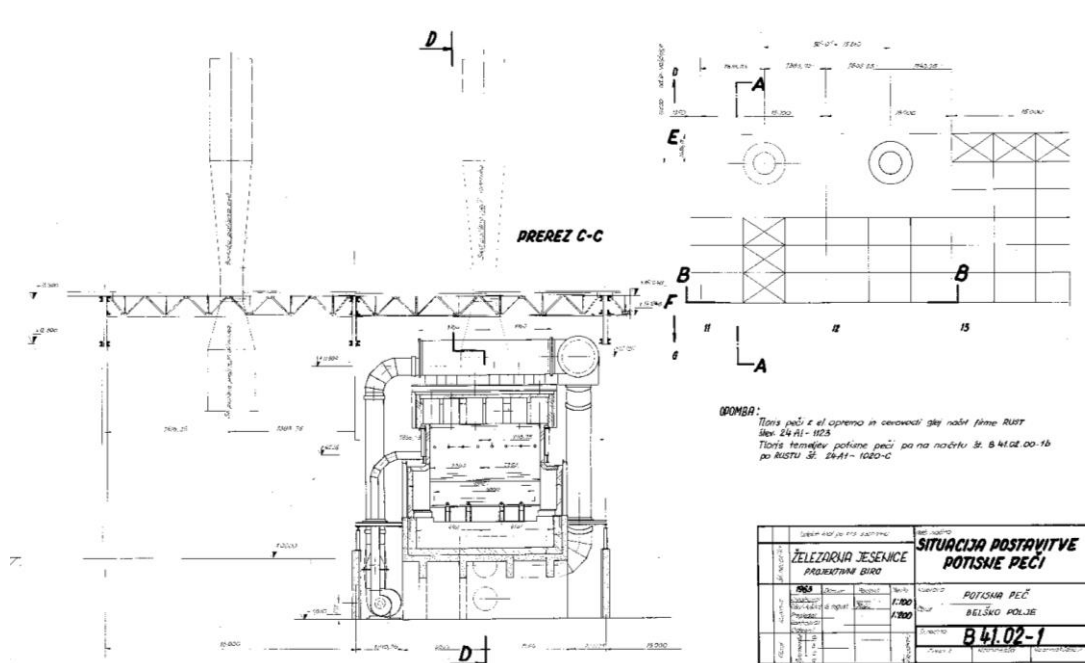
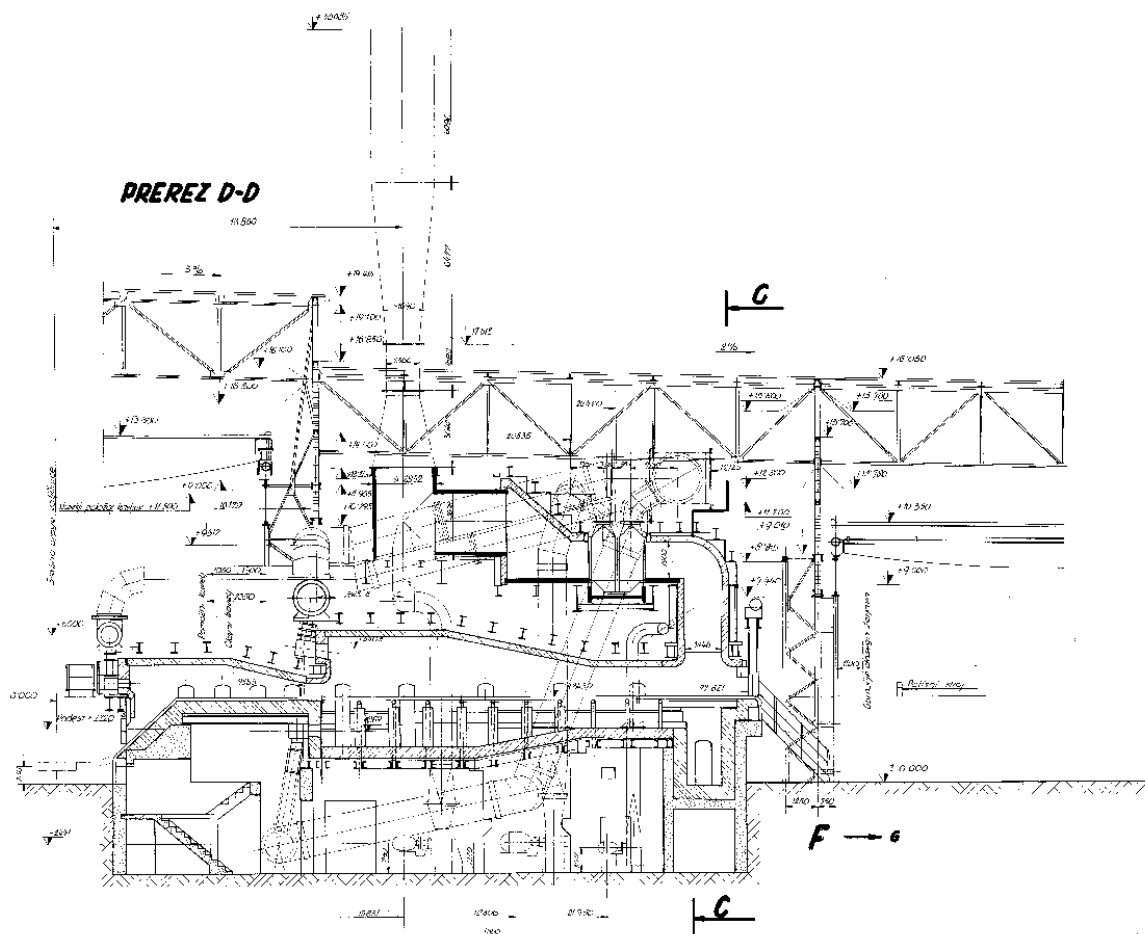
## 9. Literatura

1. Herr, H.: *Nauka o toploti*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1997.
2. Ward, J., Collin, R.: *Short Course on Industrial Furnace Technology*, Vol. 1, CENERTEC, Rio Tinto, 2002.
3. Ward, J., Collin, R.: *Short Course on Industrial Furnace Technology*, Vol. 2, CENERTEC, Rio Tinto, 2002.
4. Rajakovič, B.: *Analiza procesa ogrevanja jeklenih slabov v potisni peči*, Diplomsko delo, 46 str., Ljubljana, 2013.
5. Iskra, M.: *Optimiranje porabe in zgorevanja zemeljskega plina*, Diplomsko delo, Ljubljana 2012
6. *Cevni rekuperator za predgrevanje zraka za vgradnjo v dimovodni kanal*, ICE Industrietechnik
7. *Physikalische Eigenschaften von Stählen, STHAL – EISEN Werkstoff blätter (SEW) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*, Düsseldorf, 1992, stran 4, 11.
8. Popović, Z., Raić, K.: *Peći i projektovanje u metalurgiji*, Naučna knjiga, Univerzitet u Beogradu, Tehnilosko-metalurški fakultet, Beograd, 1988.
9. Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J., Garwey, J. R.: *Industrial Furnaces*, Sixth edition, New Jersey, 2004.
10. Jang, Y. H., Lee, D. E., Kim, C., Kim, M. Y.: *Prediction of Furnace Heat Transfer and its Influence on the Steel Slab Heating and Skid Mark Formation in a Reheating Furnace*, ISIJ International, 2008, Vol. 48 (2008), No. 10, pp. 1325 – 1330.
11. Mullinger, P., Jenkins, B.: *Industrial and proces furnaces*, Oxford, 2008.
12. Duraković, J., Šestić, M.: *Toplotehnika*, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2011.
13. Volkov-Husović, T. D., Raić, K. T.: *Metalurške peći*, Savez inženjera metalurgije Srbije, Beograd, 2010.
14. Jocić, B.: *Jekla in železove zlitine*, BIO – TOP d.o.o., Dobja vas, 2008.
15. Tehniška založba Slovenije, *Metalurški priročnik*, Ljubljana, 1972.
16. Zongyu, L.: *Computer simulation of the push-type slab reheating furnace*, The University of British Columbia, 1986.
17. Barr, P. V.: *The Development, Verification, and Application of a Steady-State Thermal Model for the Pusher-Type Reheat Furnace*, Metallurgical and materials transactions, Volume 26B, August 1995.
18. Geoplin d.o.o. Ljubljana, *Varnostni list Ljubljana* : Geoplin d.o.o. Ljubljana, 2010.
19. GmbH, Dunaj, 2004, stran 3.
20. Heiligenstadt, W.: *Waermetechnische Rechnungen fuer Industrieoefen*, Stahleisen Verlag, Duesseldorf, 1969.
21. Pavlin, F., Čebren, G.: *Izkoriščanje toplote dimnih plinov valjarniških in kovaških peči*, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1984.

22. Kosec, B., Kolenko, T.: *Model temperaturnega polja v ingotu pravokotnega vzdolžnega prereza*, RMZ - Materials and geoenvironment, Vol. 46, No. 4, 661-668, 1999.
23. Totten, G. E., Howes, M.A.H.: *Steel heat treatment handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, 1997.
24. Mullinger, P., Jenkins, B.: *Industrial and Process Furnaces – Principles, Design and Operation*, Butterworth – Heinemann, Amsterdam, 2008.
25. Trinks, W., Mawhinney, M.H., Shannon, R.A., Reed, R.J., Garvey, J.R.: *Industrial Furnaces*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
26. Duraković, J., Šestić, M.: *Toplotehnika – Zbirka zadataka sa teorijom*, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2011.
27. Thomas, L.C.: *Heat Transfer*, Prentice Hall, New Jersey, 1992.
28. Michalski, L., Eckersdorf, K., McGhee, J.: *Temperature Measurement*, John Wiley & Sons, Chichester, 1991.

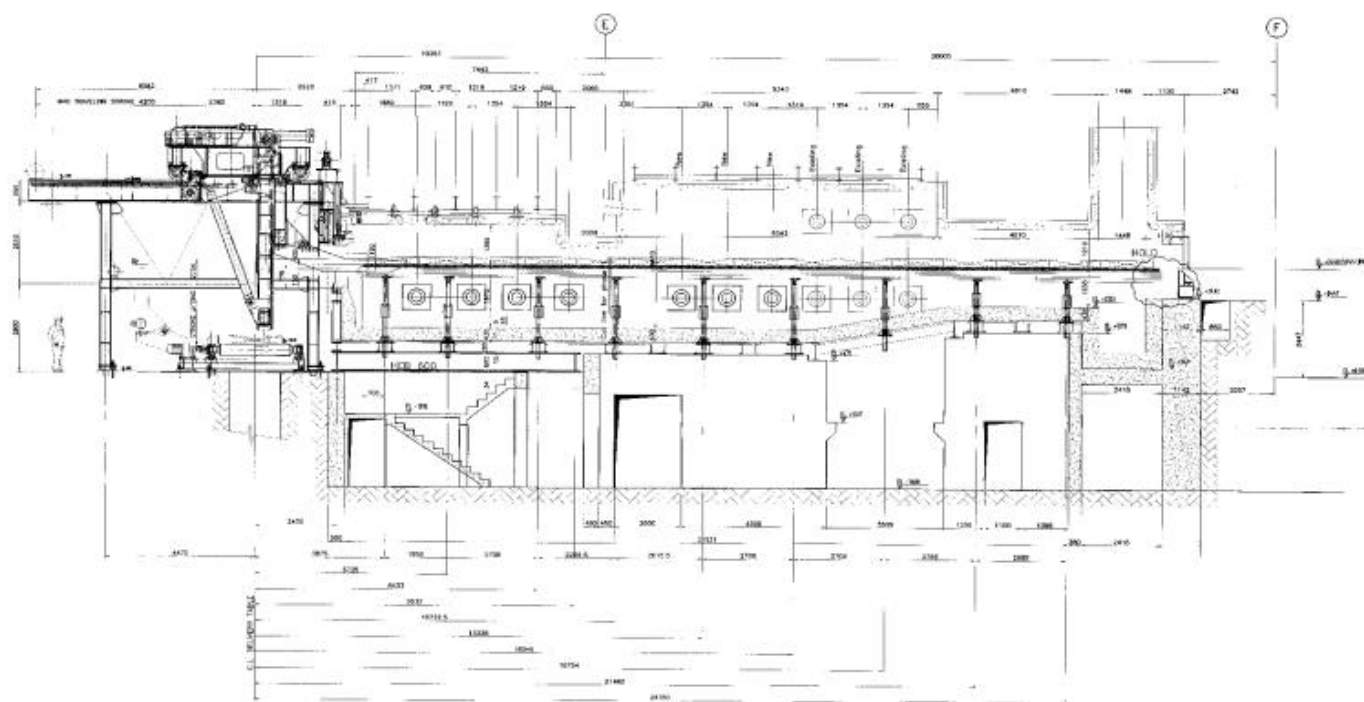
## 10. Priloge

**PRILOGA 1:** : Delavniška risba postavitve potisne peči – Projektivni biro Železarne Jesenice.

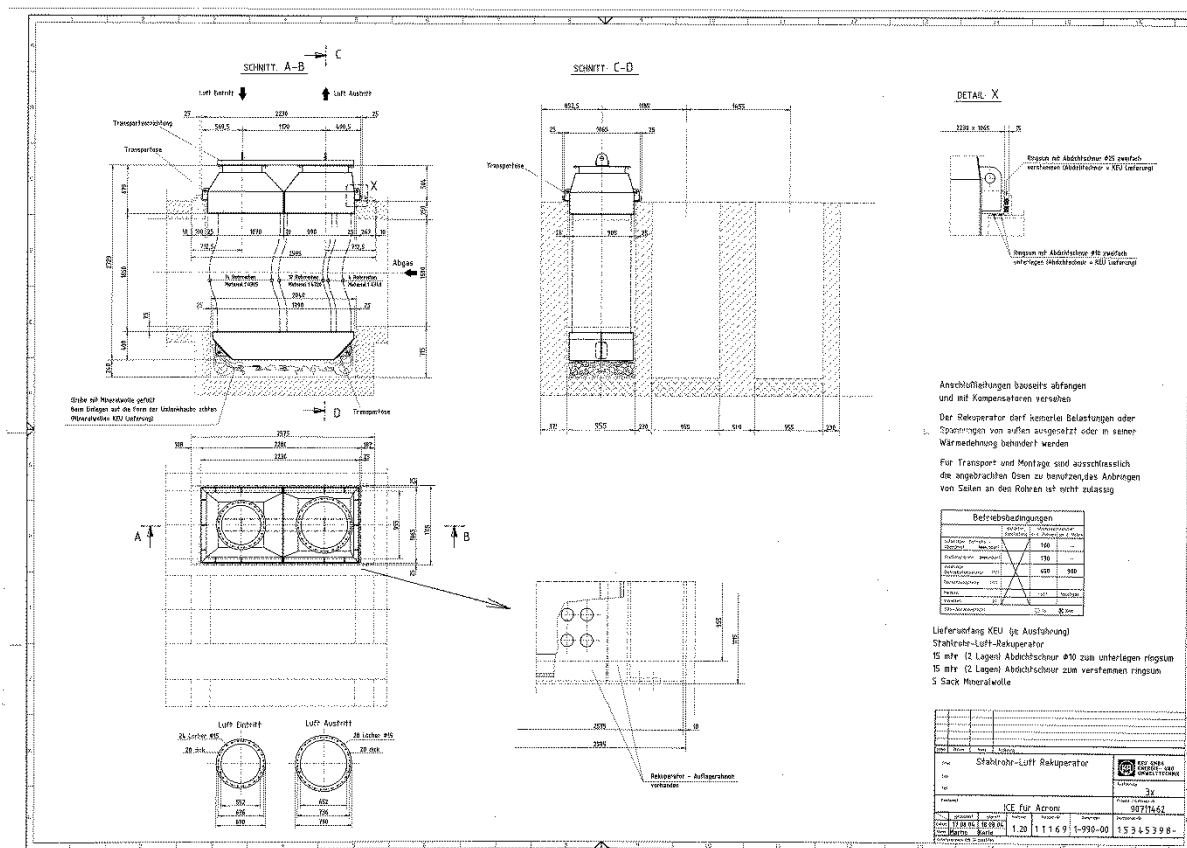


B 41.02-1

**PRILOGA 2:** Vzdolžni prerez potisne peči po rekonstrukciji 2006/07.



**PRILOGA 3:** Cevni rekuperator za predgrevanje zraka (ICE Industrietechnik GmbH, 17.08.2004).



**PRILOGA 4:** Popravilo rekuperatorja KEU(ICE Industrietechnik GmbH, 02.06.1999).

