

Energijska učinkovitost peći za taljenje i držanje aluminija

Mrkobrada, Lorena

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:013691>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Lorena Mrkobrađa

DIPLOMSKI RAD

Sisak, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Lorena Mrkobrada

ENERGIJSKA UČINKOVITOST PEĆI ZA TALJENJE I DRŽANJE
ALUMINIJA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović

Komentor: prof.dr.sc. Ladislav Lazić

Stručni voditelj: Željko Grubišić, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

Predsjednik: doc.dr.sc. Ivan Jandrlić

Član: doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović

Član: prof.dr.sc. Ladislav Lazić

Član: doc.dr.sc. Jakov Baleta

Član: prof.dr.sc. Damir Hršak

Zamjenski član: izv.prof.dr.sc. Natalija Dolić

Sisak, rujan 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Lorena
PREZIME: Mrkobrada
MATIČNI BROJ: M-64/17

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom:

ENERGIJSKA UČINKOVITOST PEĆI ZA TALJENJE I DRŽANJE ALUMINIJA

izvorni rezultat mogeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 13.9.2019.

(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

Zahvala

Prvenstveno zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Martini Lovrenić-Jugović i komentoru prof.dr.sc. Ladislavu Laziću na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem stručnom voditelju mog diplomskog rada, Željku Grubišiću, mag. ing. met. koji je svojim prijedlozima i savjetima pridonio izradi istog.

Siniši Laziću, dipl. ing. met. koji me uveo u rad ljevaonice zahvaljujem na svim poslanim materijalima kao i na trudu i želji da mi prenese što više znanja i iskustva.

Najveće hvala mojoj obitelji na razumijevanju i podršci tokom studiranja, hvala Luki i prijateljima koji su bili uz mene i bez kojih studiranje ne bi prošlo tako lako i zabavno.

SAŽETAK

ENERGIJSKA UČINKOVITOST PEĆI ZA TALJENJE I DRŽANJE ALUMINIJA

U ovome radu analizirana je energijska učinkovitost peći za taljenje aluminijske legure u talionici aluminijske legure CIAL d.o.o. U teorijskom dijelu opisane su peći za taljenje aluminijske legure te njihov način rada. Detaljnije je opisana izmjena topline u peći tijekom taljenja, proces izgaranja te problematika peći uzimajući u obzir utjecaj tih procesa na energijsku učinkovitost peći. U eksperimentalnom dijelu, u svrhu analize energijske učinkovitosti peći za taljenje aluminijske legure, prikazan je utjecaj temperature izlaznih dimnih plinova i viška kisika na učinkovitost izgaranja, a u svrhu analize energijske učinkovitosti peći za držanje taline aluminijske legure analizirana je učinkovitost izgaranja u odnosu na temperaturu dimnih plinova za različite sadržaje kisika u zraku sa ili bez predgrijanja zraka. Za obje peći napravljena je i ekonomska analiza potrošnje energenata.

Ključne riječi: *energijska učinkovitost, peć za taljenje aluminijske legure, peć za držanje taline aluminijske legure, učinkovitost izgaranja.*

SUMMARY

ENERGY EFFICIENCY OF ALUMINIUM MELTING AND HOLDING FURNACES

This paper analyses the energy efficiency of aluminium melting furnace and the possibility of increasing the energy efficiency of aluminium holding furnace in an aluminium smelter CIAL d.o.o. Theoretical part describes the aluminium melting furnaces and their operation, as well as heat exchange in the furnace during melting, combustion process and furnace problems considering the impact of these processes on the energy efficiency of the furnace. In the experimental part the effect of the temperature of the exhaust flue gases and excess oxygen on the combustion efficiency is shown for the purpose of energy efficiency analysis of an aluminium melting furnace. Moreover, combustion efficiency in relation to the flue gas temperature for different oxygen contents in the air with or without air preheating was analysed for energy efficiency analysis of an aluminium holding furnace. Finally, an economic analysis of energy consumption was made for both furnaces.

Key words: *energy efficiency, aluminium melting furnace, aluminium holding furnace, combustion efficiency.*

SADRŽAJ:

POPIS OZNAKA	i
POPIS POKRATA	ii
POPIS SLIKA	iii
POPIS TABLICA	v
1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Sakupljanje aluminija	2
2.2. Taljenje aluminija	3
2.2.1. Vrste peći za taljenje aluminija	3
2.3. Sakupljanje i pročišćavanje otpadnih plinova	8
2.4. Izmjena topline u peći	11
2.4.1. Konvekcija u peći	12
2.4.2. Zračenje u peći	12
2.4.3. Provođenje ili kondukcija u peći	13
2.5. Izmjenjivači topline	14
2.5.1. Rekuperativni izmjenjivači topline – rekuperatori	14
2.5.2. Regenerativni izmjenjivači topline – regeneratori	16
2.5.3. Izravni izmjenjivači topline	17
2.6. Energijski tokovi u procesu taljenja	18
2.7. Problematika peći za taljenje aluminija	19
2.8. Proces izgaranja	21
2.9. Kontrola izgaranja	22
2.10. Gorionici	22
2.10.1. Regenerativni gorionici	23
2.10.2. Gorionici nove generacije	25
2.11. Efekti predgrijavanja zraka	26
2.12. Izgaranje poboljšano kisikom	28
2.12.1. Obogaćivanje kisikom	29
2.12.2. Obogaćivanje zraka kisikom	30
2.12.3. Efekti izgaranja s kisikom	31
3. EKSPERIMENTALNI DIO	32
3.1. Rotacijska nagibna peć	32
3.2. Peć za držanje taline aluminija	37

4. REZULTATI I RASPRAVA	40
4.1. Mogućnosti povećanja energijske učinkovitosti na peći za taljenje	40
4.2. Mogućnosti povećanja energijske učinkovitosti na peći za držanje taline	42
5. ZAKLJUČAK	45
6. LITERATURA	46
7. ŽIVOTOPIS	48

POPIS OZNAKA

H_g – gornja ogrijevna vrijednost goriva

H_d – donja ogrijevna vrijednost goriva

ε – relativna vrijednost predgrijavanja zraka

$T_{zrak (izlaz)}$ – temperatura zraka za izgaranje na izlazu iz izmjenjivač topline

$T_{zrak (ulaz)}$ – temperatura zraka za izgaranje na ulazu u izmjenjivač topline

$T_{d.p.(ulaz)}$ – temperatura dimnih plinova na ulazu u izmjenjivač topline

η_g – učinkovitost izgaranja

$h_{g(NHV)}$ – neto ogrijevna vrijednost goriva

h_z – entalpija predgrijanog zraka za izgaranje

$h_{d.p.(ulaz)}$ – entalpija plina na ulazu u rekuperator

η_b – faktor uštede goriva

$q_{m,O}$ – maseni protok bez predgrijanja zraka

$q_{m,P}$ – maseni protok s predgrijanjem zraka

$\eta_{g,O}$ – učinkovitost izgaranja bez predgrijanja zraka

$\eta_{g,P}$ – učinkovitost izgaranja s predgrijanjem zraka

λ – višak kisika

POPIS POKRATA

HiTAC tehnologija – besplamena tehnologija izgaranja (*eng. high temperature air combustion*)

OEC – izgaranje poboljšano kisikom (*eng. oxygen-enhanced combustion*)

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikupljeni sekundarni aluminij u tvornici CIAL d.o.o.	3
Slika 2. Kriteriji za odabir peći za taljenje sekundarnog aluminijskog [3]	4
Slika 3. Shematski prikaz električne induksijske peći: a) kanalna induksijska peć, b) induksijska peć bez jezgre [8]	5
Slika 4. Shematski prikaz reverberacijske peći [9]	6
Slika 5. Shematski prikaz rotacijske peći: a) pogled sprijeda, b) bočni pogled [3]	6
Slika 6. Shematski prikaz rada peći za držanje taline [11]	8
Slika 7. Shematski prikaz taljenja aluminijskog s filterskim postrojenjem u tvornici CIAL d.o.o. [12]	9
Slika 8. a) Shematski prikaz ciklona [14], b) ciklon u tvornici CIAL d.o.o.	10
Slika 9. Princip rada vrećastih filtra [16]	10
Slika 10. Prijenos topline u industrijskim pećima [17]	11
Slika 11. Prijenos topline na uložak	13
Slika 12. Kombinirani rekuperator [19]	14
Slika 13. Temperatura struja duž istosmjernog rekuperatora [21]	15
Slika 14. Temperatura struja duž protusmjernog rekuperatora [21]	16
Slika 15. Križni rekuperator [21]	16
Slika 16. Rotacijski regenerativni izmjenjivač topline [24]	17
Slika 17. Izravni izmjenjivač topline [19]	17
Slika 18. Shematski prikaz općih energijskih tokova [25]	18
Slika 19. Taljenje uronjenih metalnih krutina u talini [27]	20
Slika 20. Utjecaj temperature na toplinsku vodljivost metala [27]	20
Slika 21. Utjecaj odnosa zrak / gorivo na sastav produkata izgaranja [31]	22
Slika 22. Primjer gorionika na rotacijskoj peći [33]	23
Slika 23. Princip rada regenerativnih gorionika a) prvi dio ciklusa rada b) drugi dio ciklusa [35]	24
Slika 24. HiTAC (besplamni) gorionik [26]	25
Slika 25. Gorionik za izgaranje s kisikom [26]	25
Slika 26. Konvencionalni gorionik [28]	26
Slika 27. Učinkovitost izgaranja kao funkcija temperatura izlaznih dimnih plinova (mjereno prije izmjenjivača topline) i predgrijanja zraka za izgaranje [28]	27
Slika 28. Ovisnost uštede energije o temperaturi izlaznih dimnih plinova i temperaturi predgrijanog zraka [37]	28
Slika 29. Izgaranje poboljšano kisikom: a) izvedba gorionika [38], b) točka miješanja plinova [39]	29
Slika 30. Obogaćivanje zraka kisikom: a) pomoću kisikovog koplja, b) s prethodnim miješanjem zraka i kisika [38]	30
Slika 31. Rotacijska nagibna peć u tvornici CIAL d.o.o.: a) u radu, b) u hladnom pogonu	33
Slika 32. Shematski prikaz gorionika kisik-zrak na rotacijskoj peći za taljenje	34
Slika 33. Aluminijski: a) blokovi i b) ingoti	35
Slika 34. Peć za držanje taline u tvornici CIAL d.o.o.	37

Slika 35. a) Sklopni crtež regenerativnog gorionika na peći za držanje taline b) regenerativni gorionik u CIAL d.o.o.	38
Slika 36. Dijagram utjecaja temperature izlaznih dimnih plinova i pretička kisika ($\lambda \geq 1$) na učinkovitost izgaranja	41
Slika 37. Učinkovitost izgaranja u odnosu na temperaturu dimnih plinova za različite količine kisika u zraku	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Operativni parametri rotacijske nagibne peći u tvornici CIAL d.o.o.	33
Tablica 2. Prosječna potrošnja sirovine i goriva utrošenih za taljenje aluminija u rotacijskoj nagibnoj peći za 2018. godinu.	36
Tablica 3. Operativni parametri peći za održanje taline u tvornici CIAL d.o.o.	37
Tablica 4. Prosječna potrošnja goriva za peć za držanje taline	39
Tablica 5. Sastav zemnog plina	40

1. UVOD

Aluminij je nakon željeza drugi metal koji se najviše koristi na svijetu. Kao kemijski element, aluminij je treći najčešći element u Zemljinoj kori, s ukupnim udjelom od oko 8 %. Ovaj materijal, koji se primarno proizvodi iz rude boksita, uvelike se koristi u industriji zbog njegovih povoljnih svojstava, kao što su niska gustoća, dobra mehanička svojstva i otpornost na koroziju. Još jedna vrlo vrijedna prednost aluminija je njegova dobra mogućnost recikliranja [1].

Recikliranje aluminija ima velike prednosti u odnosu na primarni aluminij zbog manjeg troška i manje potrošnje energije te zauzima sve važniju ulogu u ukupnoj opskrbi aluminija. Udio sekundarne proizvodnje aluminija u svijetu je u konstantnom porastu [2]. U usporedbi s primarnim aluminijem, reciklirani aluminij ima više nečistoća, što predstavlja glavni nedostatak procesa. Količinu nečistoća u recikliranom aluminiju moguće je smanjiti primjenom različitih tehnologija, preliminarnim postupcima obrade otpadnog materijala i optimizacijom postupka taljenja.

Razvoj peći za taljenje danas je usmjeren na smanjenje potrošnje goriva i energije te na povećanje iskorištavanja metala. Odabir peći ovisi o kvaliteti i količini otpada koji se pretaljuje, a za cilj ima ostvariti najveći kapacitet taljenja po jedinici volumena peći uz povećanje energijske učinkovitosti, kako bi se smanjio trošak energije i vrijeme samog ciklusa. Gledajući postavljene ciljeve, moguće je ostvariti poboljšanja boljom kontrolom parametara procesa izgaranja te povećanjem temperature predgrijanja zraka na regenerativnim gorionicima [3].

U teorijskom dijelu rada opisani su suvremeni tehnološki procesi i tehnologije koje omogućuju učinkovito korištenje energije, odnosno značajne uštede energije, što ujedno dovodi i do veće produktivnosti, bolje kvalitete proizvoda te manje količine i niže emisije onečišćujućih dimnih plinova. U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je mogućnost povećanja energijske učinkovitosti i uštede goriva na rotacijskoj peći za taljenje aluminija te na peći za držanje taline koje se koriste u talionici aluminija CIAL d.o.o.

2. TEORIJSKI DIO

Sekundarna proizvodnja aluminijskog ingota, odnosno recikliranje aluminijskog ingota, ekonomski je isplativija, brža te energijski učinkovitija nego proizvodnja aluminijskog ingota iz ruda. Proizvodnja recikliranog aluminijskog ingota troši samo oko 6 % energije potrebne za proizvodnju primarnog aluminijskog ingota iz rude boksita. Osim toga, za postizanje zadane proizvodnje ingota, reciklirani aluminijski ingot zahtijeva samo oko 10 % troškova kapitalne opreme u usporedbi s onima potrebnim za proizvodnju primarnog aluminijskog ingota. Recikliranjem jedne tone aluminijskog ingota očuva se oko 8 tona boksita, 4 tone kemijskih proizvoda i 14 MWh električne energije. Zanimljiva je činjenica da se svaki proizvod izrađen od aluminijskog ingota može reciklirati i koristiti iznova neograničen broj puta s time da nema razlike u svojstvima i kvaliteti primarnog i recikliranog aluminijskog ingota. Unatoč tome, od ukupne količine proizvedenog aluminijskog ingota u svijetu samo je 33% reciklirani aluminijski ingot.

Cijeli proces recikliranja može se podijeliti na nekoliko koraka: sakupljanje otpadnog materijala, predobrada, odnosno priprema otpada, taljenje aluminijskog otpada u rotacijskim pećima, rafiniranje i legiranje tekućeg aluminijskog ingota u pećima te lijevanje ili transport do industrijskih krajnjih korisnika [1, 4].

U ovome radu naglasak je stavljen na sakupljeni aluminijski ingot, koji se dalje oporabljuje pirometalurškim postupcima u svrhu dobivanja gotovih proizvoda. Daljnja prerada aluminijskog ingota nastavlja se u talionicama, jedna od kojih je i talionica CIAL d.o.o. za proizvodnju aluminijskog ingota, čiji godišnji kapacitet iznosi 12 000 tona, a gdje se, uz izdvojeni aluminijski ingot, obrađuje i tali koncesijski sakupljena Al/Fe ambalaža te ostali aluminijski ingot. Tehnologija koja se primjenjuje jedna je od vodećih talioničkih tehnologija, posebice u taljenju neželjeznih metala. Prema referentnom dokumentu [5] pripada najboljoj dostupnoj tehnologiji za taljenje aluminijskih sekundarnih sirovina, čime se osiguravaju maksimalna iskorištenja materijala i energije, uz nastajanje minimalnih količina otpada i emisija.

2.1. Sakupljanje aluminijskog ingota

Sakupljeni aluminijski ingot dovozi se na prihvatnu lokaciju, prilikom čega se vrši kontrola radioaktivnosti otpada, vaganje otpada, vizualna kontrola otpada, provjera i ovjera pripadajuće dokumentacije te zaprimanje otpada na skladište gdje se privremeno skladišti na lokaciji gospodarenja otpadom do obrade/oporabe istog na vlastitoj lokaciji.

Otpad se skladišti odvojeno po svojstvu, vrsti i agregatnom stanju. Svaka količina sakupljenog otpada koji se skladišti upisuje se u odgovarajući očevidnik o nastanku i tijeku za svaku vrstu otpada posebno, a uz podatak na očevidniku mora postojati primjerak pratećeg lista. Zaprimljeni otpad istovaruje se u za to predviđeni skladišno-manipulativni prostor. Na manipulativnom prostoru vrši se oporaba otpada razvrstavanjem, rezanjem, prešanjem i sortiranjem metalnog otpada. Otpad se razvrstava i sortira ručno prema specifikaciji kupca, industrijskoj specifikaciji ili prema standardu za izravnu uporabu u proizvodnji metala ili metalnih predmeta u čeličanicama i ljevaonicama [6].

Tvornica CIAL d.o.o. najvećim dijelom aluminijski ingot prikuplja iz otpadnih transportnih sredstava (automobili, kamioni, avioni), građevinskog otpada (profili nosivih konstrukcija, radijatori, limovi te prozorski profili), ali i otpada iz kućanstva (hladnjaci, elektronski i električni otpad, kablovi, žice) te aluminijska ambalaža, poput konzervi i čepova (slika 1.).



Slika 1. Prikupljeni sekundarni aluminij u tvornici CIAL d.o.o.

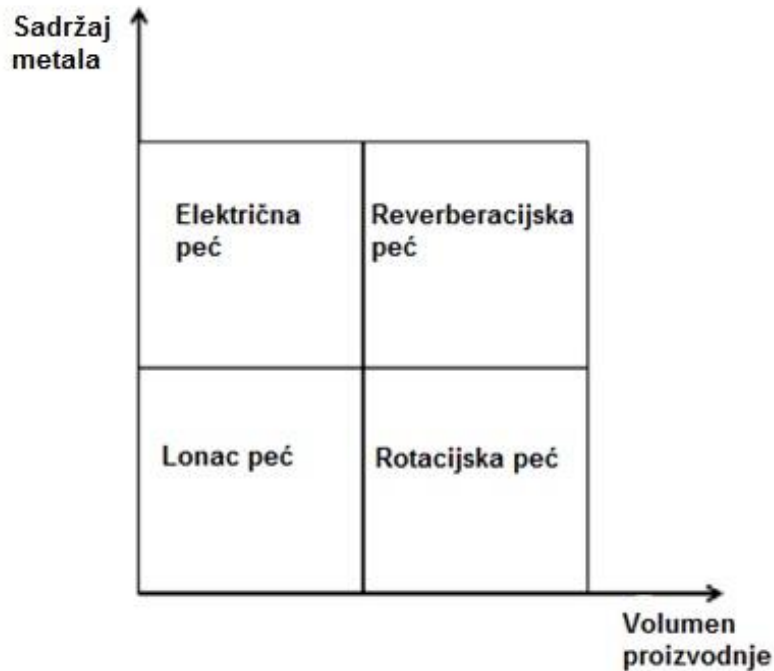
Recikliranje odnosno obnavljanje otpadnih metala i spojeva metala provodi se R4 postupkom oporabe. Navedeni postupak obuhvaća sve aktivnosti kojima je cilj recikliranje/obnavljanje metala i spojeva metala iz otpada koji većinom sadrži metale, ali i nemetalne primjese koje se izdvajaju i dalje obrađuju odgovarajućim postupcima. Postupak se uobičajeno sastoji od fizikalnih procesa koji uključuju izdvajanje, rezanje i sortiranje, nakon kojih slijede daljnji postupci prerade taljenje i rafinacija, a kao rezultat dobivaju se čisti metali, njihovi spojevi ili legure jednake kvalitete metalu dobivenom iz rude [7].

2.2. Taljenje aluminija

Za taljenje aluminija mogu se koristiti različite vrste peći, ovisno o sadržaju aluminija u otpadu, količini proizvodnje, vrsti i sadržaju nečistoća, geometriji otpada, troškovima energije i kvaliteti željenog proizvoda. U Europskim se zemljama najčešće koriste rotacijske peći gdje se zbog visokih troškova energije, energijska učinkovitost smatra operativnim prioritetom. No, osim rotacijskih peći, za taljenje aluminija koriste se električne te reverberacijske peći (*eng. Reverberatory furnace*) [3].

2.2.1. Vrste peći za taljenje aluminija

Prilikom odabira peći za taljenje aluminija u obzir se uzimaju dva važna kriterija; sadržaj metala u otpadnom materijalu i volumen proizvodnje. Razlikuju se električne peći i peći na fosilna goriva. Veći dio sekundarnog aluminija proizvodi se u pećima na fosilna goriva, gdje se kao gorivo najčešće upotrebljava prirodni plin. Tu skupinu peći čine reverberacijske i rotacijske peći. Slika 2. prikazuje prijedlog izbora tipa peći za taljenje sekundarnog aluminija s obzirom na navedene kriterije [3].



Slika 2. Kriteriji za odabir peći za taljenje sekundarnog aluminija [3]

2.2.1.1. Električna peć

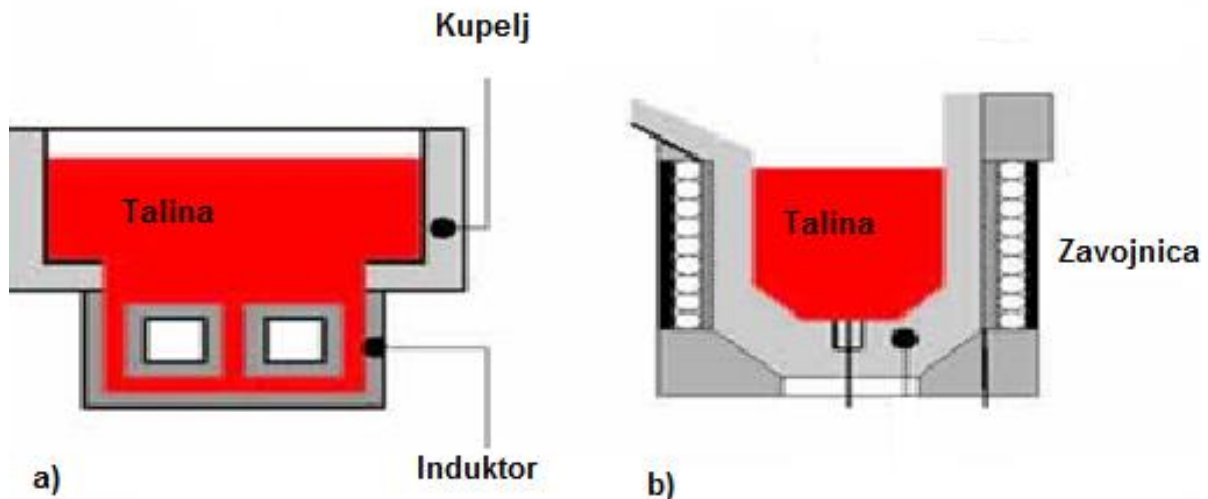
Za taljenje neželjeznih metala najčešće se koriste električne indukcijske peći. Postoje dvije vrste indukcijskih peći: kanalne indukcijske peći i indukcijske peći bez jezgre.

Kod kanalnih indukcijskih peći (slika 3. a) induktor radi kao transformator. Ima željeznu prstenastu jezgru sa zavojnicama koje su hladene vodom ili zrakom kao primarne zavojnice te petlju taline koja cirkulira u kanalu, kao sekundarna zavojnica.

Kod indukcijskih peći bez jezgre (slika 3. b) izmjenična struja koja prolazi kroz zavojnicu inducira izmjeničnu struju u metalnom ulošku unutar lonca. Inducirane struje zagrijavaju uložak i kada se rastali, dok elektromagnetsko polje koje stvara zavojnica stupa u interakciju s elektromagnetskim poljem koje proizvodi inducirana struja. Dobivena sila uzrokuje miješanje, čime se ujednačava sastav taline i temperatura.

Električne peći pretežno se koriste kod manjeg volumena proizvodnje te imaju određene prednosti u odnosu na peći na fosilna goriva za taljenje aluminijskog otpada. Prvenstveno, električne peći imaju znatno niže emisije dimnih plinova jer ne postoje produkti izgaranja, stvaranje troske je znatno manje te se poboljšava čistoća metala. Općenito su učinkovitije od plinskih peći, posebice za male otpadne komade te su manje bučne. U odnosu na peći na fosilna goriva imaju manji gubitak metala. Kod električnih peći gubitak metala je od 0,5% do 3%, dok je u pećima na fosilna goriva od 5% do 8%.

S druge strane, postoje i važni nedostaci. Električna energija je često skuplja od fosilnih goriva; nadalje, električne peći ne mogu konkurirati velikim pećima na fosilna goriva u smislu kapaciteta taljenja te se upravo zbog toga isključivo koriste za manji volumen proizvodnje [3].



Slika 3. Shematski prikaz električne indukcijske peći: a) kanalna indukcijska peć, b) indukcijska peć bez jezgre [8]

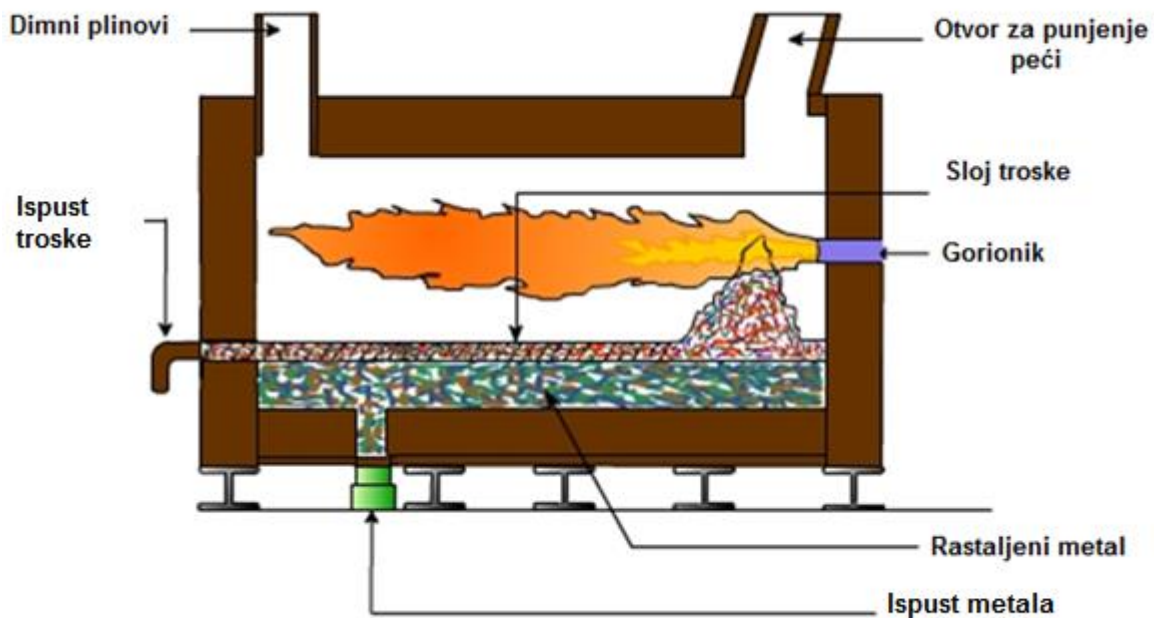
2.2.1.2. Reverberacijska peć

Osnovna namjena peći je pretaljivanje otpadnog materijala koji sadrži nečistoće, kao što su ulje, boja i plastika. Noviji dizajn peći uključuje višekomorne peći koje se općenito temelje na integriranom procesu predgrijavanja i procesu taljenja metala.

U dijelu gdje se provodi predgrijavanje i/ili rasplinjavanje, uložni materijal je izložen intenzivnom protoku plinova izgaranja, pri čemu se organski spojevi pretvaraju u zapaljive plinove, a izgaranje i naknadno izgaranje se odvijaju u pećnim komorama.

Prema tome, proces taljenje se ne odvija samo od dovedene topline plamena i plinova izgaranja, nego i od kemijske energije gorivih plinova koji nastaju iz rastaljenog metala, čime se smanjuje potrošnja goriva kao i gubitak metala bez upotrebe sredstava za taljenje. Najveći dio topline ne prenosi se izravno na uložak od plamena i plinova izgaranja već neizravno zračenjem od vatrostalnog zida. Razlog tomu je što zide ima veću emisivnost u odnosu na dimne plinove nastale izgaranjem zemnog plina. Od tuda potiče i sam naziv peći. Manji dio topline prenosi se i konvekcijom od plinova izgaranja na metalni uložak.

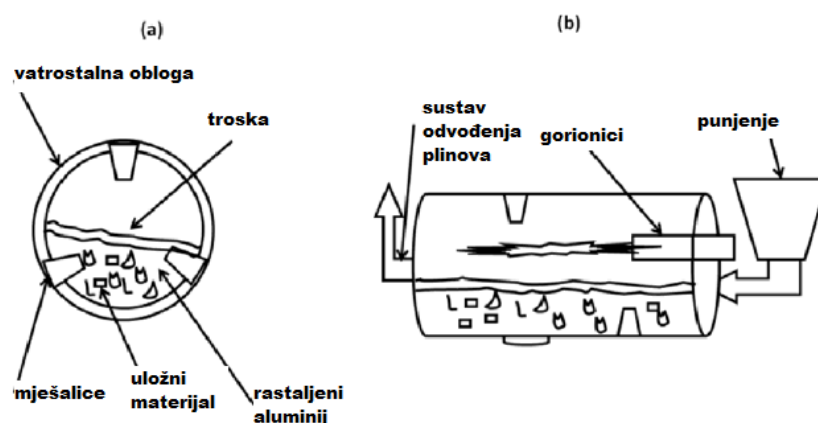
Glavne prednosti reverberacijskih peći su visoka brzina obrade te niski troškovi rada i održavanja. Nedostaci se odnose na visoki udio oksidacije metala, velike dimenzije peći te nisku energijsku učinkovitost. Tipične reverberacijske peći imaju energijsku učinkovitost u rasponu od 15-39%. Shema reverberacijske peći je prikazana na slici 4 [3].



Slika 4. Shematski prikaz reverberacijske peći [9]

2.2.1.3. Rotacijska peć

Rotacijske peći općenito su najprikladnije za taljenje troske i ostalog oksidiranog otpada. Sastoje se od cilindričnog čeličnog bubnja koji je s unutarnje strane obložen vatrootalnim materijalom (slika 5.). Uložni otpadni materijal zajedno sa sredstvima za taljenje (NaCl, KCl) ulaže se u rotacijsku peć koja se zagrijava na radnu temperaturu od ~ 800 °C pomoću plinskih gorionika.



Slika 5. Shematski prikaz rotacijske peći: a) pogled sprijeda, b) bočni pogled [3]

Rotacijske peći skuplje su za instaliranje i teže ih je održavati, no imaju veći stupanj taljenja, smanjene emisije, postojan sastav metala i manju potrošnju goriva. To je djelomično posljedica rotacije vrućeg unutarnjeg vatrootalnog materijala, koji zbog direktnog kontakta prenosi više topline na uložak.

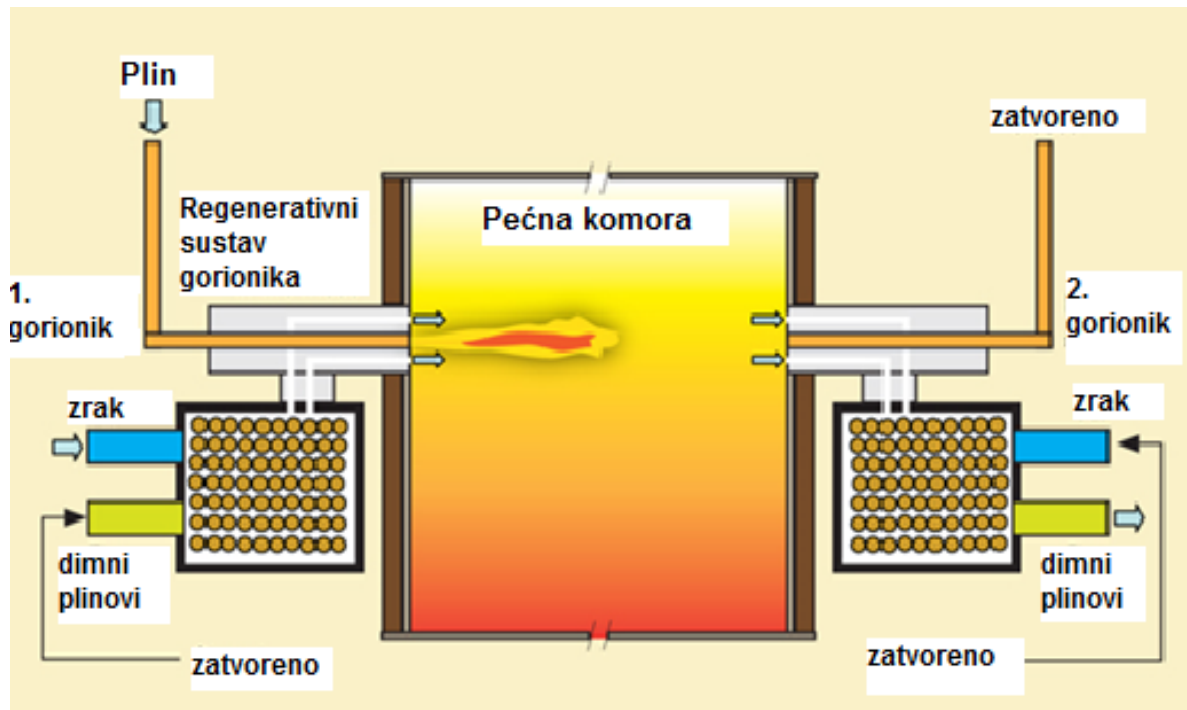
Najvažnija inovacija za rotacijske peći je prijelaz iz horizontalnih bubnjeva u nagibne bubnjeve. Sposobnost peći da se naginje smanjuje količinu vremena koje je potrebno za proces taljenja, a isto tako za operacije kao što su punjenje, odvajanje i čišćenje. Nagibne rotacijske peći mogu taliti otpad visoke kvalitete bez upotrebe sredstava za taljenje.

Zbog neravnomjerne i slučajne raspodjele uložnog materijala i praznina, heterogenosti uložnog materijala (vrste, veličine i oblika), turbulencije, izgaranja plina i prijenosa energije i mase, postupak taljenja unutar rotacijskih peći je vrlo složen i teško ga je eksperimentalno proučiti. Procesi koje taljenje uključuje uglavnom su termodinamički i hidrodinamički, odnosno procesni mehanizmi kao što su kemijske reakcije, prijenos mase, fazne transformacije, izgaranje, prijenos energije zračenjem, interakcije između taline i krutine i dr. Ključnu ulogu u optimizaciji procesa imaju numeričko modeliranje i simulacija, pomoću kojih je moguće proučavati brzinu taljenja i raspodjelu energije unutar peći, čime se povećava učinkovitost procesa izgaranja. Osim toga, na učinkovitost izgaranja utječe i optimiranje dizajna peći (položaj gorionika, potrošnja vatrostalnih obloga, itd.), smanjenje emisija onečišćujućih tvari te osiguranje kvalitete proizvoda [3].

2.2.1.4. Peć za držanje taline

Peći za držanje taline aluminijske služe za održavanje potrebne temperature taline, korekciju kemijskog sastava, legiranje i homogenizaciju taline te kontroliranu opskrbu uređaja za lijevanje talinom. Obložene su vatrostalnom opekama i izvedene u obliku izduženog kupolastog svoda. Boljoj učinkovitosti procesa pridonosi geometrija peći, široki otvori vrata i ravni zidovi, što omogućava jednostavnije punjenje, čišćenje i kontrolu procesa, a zbog posebnog oblika dna peć je moguće u potpunosti isprazniti. Pravokutni dizajn s prednjim vratima preko cijele širine peći omogućuje maksimalan pristup radnom prostoru tijekom punjenja peći, kao i uklanjanje troske.

Rastaljeni metal se drži u peći na željenoj temperaturi prije ispuštanja. Obično se peći mogu naginjati te mogu biti opremljene sustavima s konvencionalnim ili regenerativnim gorionicima. Za učinkovito zagrijavanje koriste se gorionici koji stvaraju veliki volumen plamena, a toplinski učinak gorionika regulira se tijekom procesa taljenja. Osim toga, mogu biti opremljene poroznim čepovima te rotirajućim plinskim ili solnim injektorima za kvalitetniju obradu taline. Shematski prikaz peći za držanje taline s regenerativnim sustavom zagrijavanja prikazan je na slici 6. [3, 10].

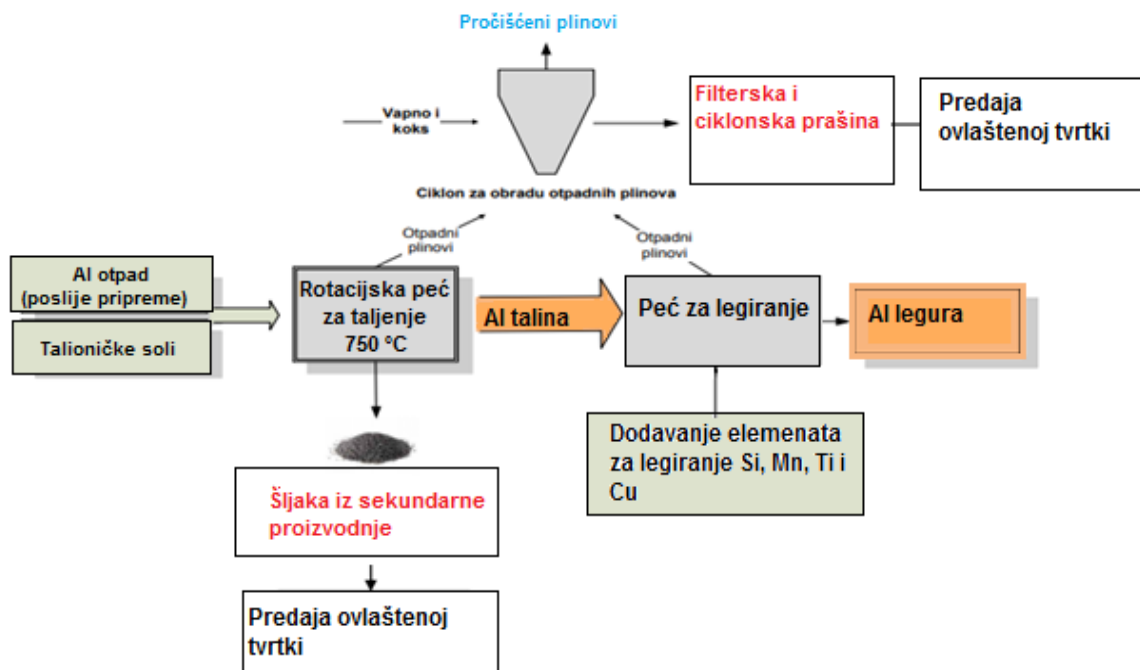


Slika 6. Shematski prikaz rada peći za držanje taline [11]

2.3. Sakupljanje i pročišćavanje otpadnih plinova

Dimni plinovi i krute čestice koje nastaju pri procesu taljenja i rafinacije aluminija prikupljaju se pomoću zatvorenih pećnih sustava, potpunim ili djelomičnim zatvaranjem sustava. Nape namijenjene sakupljanju dizajnirane su da budu što bliže izvornim emisijama, ali i da ostavljaju prostora za procesne operacije. Mogu biti pokretne te također i kao zasebni sustavi namijenjeni sakupljanju emisija koji se još nazivaju i „kuća u kući“ ili „pseća kuća“. Nakon sakupljanja emisija, posebnim se sustavom odvede do postrojenja u kojem se obrađuju.

Filtersko postrojenje (slika 7.) za obradu otpadnih plinova radi na principu vrećastih filtra te se tijekom obrade dodaju vapno i koks kako bi se poboljšala kvaliteta dimnih plinova koji napuštaju postrojenje i ispuštaju se u atmosferu u skladu s hrvatskim propisima i propisima EU. Nakon cijelog postupka otprašivanja, odvojena ciklonska i filterska prašina se sakuplja te predaje ovlaštenoj tvrtki na daljnji oporavak ili zbrinjavanje [12].

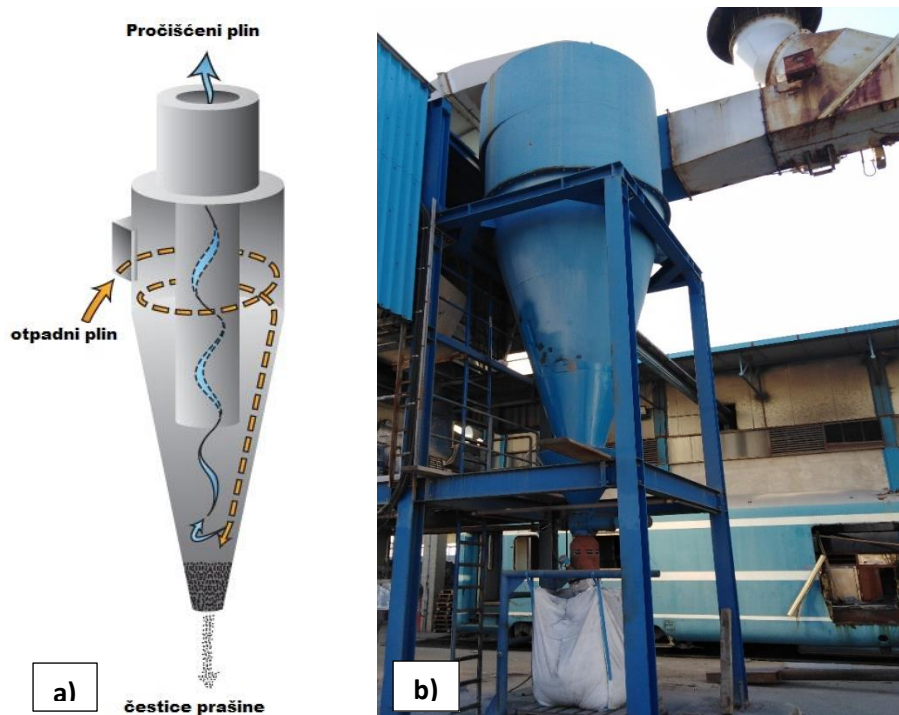


Slika 7. Shematski prikaz taljenja aluminija s filterskim postrojenjem u tvornici CIAL d.o.o. [12]

Prije otprašivanja vrećastim filtrima otpadne plinove najprije je potrebno ohladiti. Postoji više načina na koji se može smanjiti temperatura plinova, primjerice razrjeđenje otpadnih plinova s okolnim zrakom ili primjenom izmjenjivača topline na principu zrak-plin.

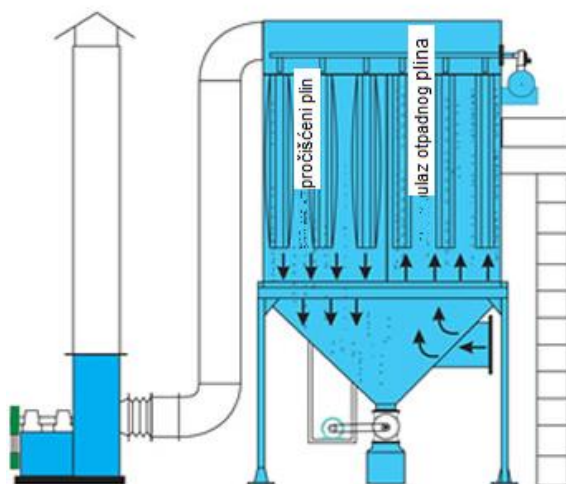
Otpadni plinovi ulaze u ciklon za obradu otpadnih plinova, pri čemu dolazi do kružnog kretanja plina i čestica prašine. Uslijed rotacije dolazi do stvaranja centrifugalnih sila koje nose čestice prema stijenci ciklona i dovode ih u izlazni dio ciklona u kojem se sakupljaju (slika 8.). Cikloni su najrašireniji uređaji za otprašivanje, no unatoč tome ne ispunjavaju stroge zahtjeve koji se traže za kvalitetu zraka te se zbog toga koriste kao predobrada.

U daljnjim koracima za obradu otpadnih plinova koriste se vrećasti filtri ili elektrostatski precipitatori kojima se poboljšava učinkovitost otprašivanja [13].



Slika 8. a) Shematski prikaz ciklona [14], b) ciklon u tvornici CIAL d.o.o.

Vrećasti filteri su uređaji koji koriste filterske elemente nalik vreći. Načinjeni su od tkanine koja je posebno prilagođena za hvatanje krutih čestica iz plina koji sadrži prašinu. S pojavom novih filtarskih materijala i metoda automatskog čišćenja ova vrsta opreme za uklanjanje prašine postaje sve sofisticiranija i široko korištena u modernoj industriji. Nakon predobrade na ciklonu, zrak se dalje kroz usisne nape i kanale uvodi u uređaj s vrećastim filtrima gdje se zatim filtrira kroz vrećice (slika 9.). Čestice prašine nakupljene na površini filter vrećica čiste se pročišćavanjem komprimiranim zrakom, motoriziranim potresanjem ili mehanizmom ručnog potresanja, a akumulirane čestice prašine sakupljaju se u donjem spremniku za prašinu. Čisti zrak zatim se ispušta kroz dimnjak u atmosferu [15, 16].



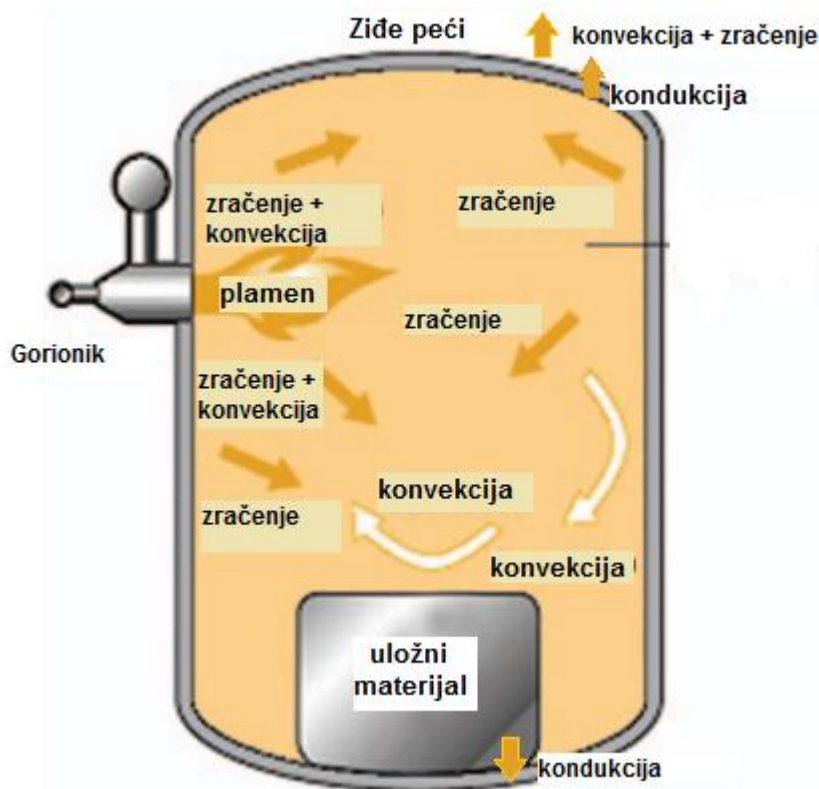
Slika 9. Princip rada vrećastih filtra [16]

2.4. Izmjena topline u peći

Pod pojmom izmjene topline podrazumijeva se količina energije koju dva tijela izmjenjuju zbog različitosti svojih temperatura. Osnovni načini na koji se toplina izmjenjuje u plinovitim, kapljevitim ili krutim medijima ili između dvaju medija su:

- konvekcija;
- zračenje ili radijacija;
- provođenje ili kondukcija.

U industrijskim pećima navedeni načini prijenosa topline događaju se istovremeno kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Prijenos topline u industrijskim pećima [17]

Toplina se prenosi izravno zračenjem i konvekcijom od plamena i plinova izgaranja na uložak i zidove peći te neizravno zračenjem zida peći, koje se sastoji od vlastitog i reflektiranog zračenja, na uložak. Dio topline prenesene od plamena i plinova izgaranja na zidove i strop peći gubi se kondukcijom kroz zidove peći. Toplinski tok kondukcijom na vanjskoj strani zida peći prelazi konvekcijom i zračenjem na okoliš. Toplina koja je prenesena na uložak (izravnim zračenjem, konvekcijom i zračenjem zida) kondukcijom se prenosi u unutrašnjost uložka, a zatim se dio te topline kondukcijom gubi kroz zidove ognjišta.

Zračenje je dominantno pri višim temperaturama peći, dok se pri nižim temperaturama peći ili niskoj emisivnosti uložka, prijenos topline povećava reguliranom konfiguracijom protoka s ciljem povećanja prisilne konvekcije [18].

2.4.1. Konvekcija u peći

Kod izmjene topline konvekcijom makroskopske čestice fluida mijenjaju svoj položaj u prostoru te pri tome prenose energiju koju posjeduju i predaju izravnim dodirnom drugim hladnijim česticama fluida ili stijenci s kojom su u dodiru. S obzirom na uzrok gibanja fluida postoje dvije vrste strujanja: slobodna i prisilna konvekcija, a s obzirom na tip strujanja uz stijenku razlikujemo laminarno i turbulentno strujanje.

Slobodna konvekcija pojavljuje se kada su temperature nejednoliko raspoređene u sustavu, odnosno kada se temperatura fluida koji je u dodiru sa stijenkom razlikuje od temperature same stijenske. Čestice koje se nalaze u temperaturnom graničnom sloju uz stijenku imaju različitu temperaturu od čestica koje su u glavnini mase fluida; samim time različita im je i gustoća, što rezultira pojavom sile uzgona koja djeluje kao jedini pokretač gibanja čestica fluida [19].

U industrijskim pećima od velike je važnosti prisilni prijenos topline konvekcijom, koji se odvija od plamena i plinova izgaranja na uložak i unutarnje zidove peći. Prisilna konvekcija pojavljuje se kada je strujanje fluida uz stijenku uzrokovano nekakvim vanjskim uzrokom neovisnim o rasporedu temperature u sustavu, primjerice padom tlaka uslijed rada pumpe ili ventilatora, vjetrom, prisilnim gibanjem stijenske i slično [19].

U mnogim pećima koje koriste konvencionalne načine zagrijavanja samo se mali dio ukupne topline na uložak prenosi prisilnom konvekcijom. Najvećim dijelom toplina se prenosi zračenjem plamena, plinova izgaranja i zida peći. Međutim, kod peći koje imaju gorionike s visokim brzinama plinova izgaranja, prisilna konvekcija može biti od 70 % do 90 % od ukupno prenesenog toplinskog toka.

Za visokotemperaturne procese zračenje je dominantan mehanizam u prijenosu topline u peći. Kod niskotemperaturnih procesa prisilna konvekcija je općenito jedini mehanizam koji se razmatra. Kod sustava za izgaranje goriva s kisikom, određeni dio topline oslobađa se egzotermnim reakcijama. Međutim, čak i u tim procesima, prisilna konvekcija još uvijek ima važan doprinos u ukupnom prijenosu topline na uložak.

Općenito se u pećima veći intenzitet konvekcije dobiva s vrlo visokim temperaturama plamena, kao što su one koje se javljaju kod obogaćivanja zraka kisikom. U tom slučaju dolazi do reasocijacije disociranih produkata izgaranja hlađenjem vrućih plinova, što dovodi do oslobađanja topline u blizini relativno hladnog uložka povećavajući intenzitet konvekcije [20].

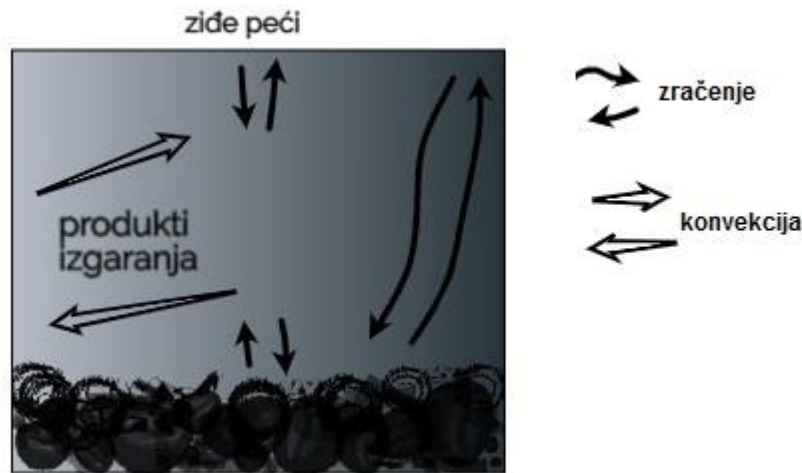
Intenzitet izmjene topline konvekcijom ne ovisi o samoj stijenci nego isključivo o fluidu i zbivanjima unutar njega. Pojave u tankom sloju fluida u neposrednoj blizini stijenske tzv. graničnom sloju, bitno određuju intenzitet izmjene topline. Kroz granični sloj u smjeru normale, toplina se prenosi isključivo samo provođenjem. U usporedbi s provođenjem, konvektivni način izmjene topline je intenzivniji zbog gibanja čestica [19, 21].

2.4.2. Zračenje u peći

U mnogim pećima 90-95 % ukupnog prijenosa topline odvija se zračenjem. U većini industrijskih peći komora peći je velikog volumena pa su brzine vrućih plinova u komori relativno niske. Temperature plamena su obično visoke tako da je prijenos topline zračenjem dominantan, dok konvekcija doprinosi samo malom udjelu ukupnog prijenosa topline. Postoje tri uobičajena oblika prijenosa topline zračenjem:

- zračenje krutih površina;
- zračenje plinovitih medija;
- zračenje čestica u plinovitom mediju.

Prijenos topline na uložak u peći s otvorenim plamenom odvija se na način prikazan na slici 11. Toplina se prenosi izravnim zračenjem i konvekcijom od plamena i produkata izgaranja na uložak i zide peći te zračenjem od zida peći na uložak [20, 22].



Slika 11. Prijenos topline na uložak

Zračenje se u mediju može apsorbirati, reflektirati, transmitirati ili kombinirati, što je najčešće slučaj. Za većinu krutih materijala, transmisivnost je niska, osim za materijale kao što su staklo i plastika. Refleksija većine krutina je niska, osim ako nisu visoko polirane, primjerice nehrđajući čelik. Za kapljevine transmisivnost može biti značajna, posebno one s visokim sadržajem vode. Za većinu plinova transmisivnost je općenito vrlo visoka sa zanemarivom apsorpcijom i refleksijom [22].

Za razliku od prijenosa topline kondukcijom i konvekcijom, za čije je odvijanje potrebno postojanje temperaturnog gradijenta unutar tvari, kod prijenosa topline zračenjem ne treba postojanje materije kao posrednika. Tako da je moguće da se toplina širi i u vakuumu. Osnova ovakvog načina izmjene topline zasniva se na zračenju ili radijaciji. Izmjena topline zračenjem podrazumijeva širenje energije putem elektromagnetskih valova. Tijela zagrijana na neku temperaturu $T > 0 \text{ K}$, emitiraju elektromagnetske valove koji nastaju titranjem elektrona oko jezgre atoma, a promjene u titranju elektrona manifestiraju se u obliku toplinske energije [19, 23].

2.4.3. Provođenje ili kondukcija u peći

Prijenos topline kondukcijom u zidu peći i ulošku može imati značajan utjecaj na učin peći. Provođenje topline kroz zide određuje intenzitet gubitaka topline kroz zidove peći. Također, provođenje topline unutar uloška rezultira i laganim padom temperature od vrha do dna što može značajno utjecati na ukupno vrijeme zagrijavanja i ujednačenost temperature u ulošku [20].

Izmjena topline provođenjem svojstvena je tijelima čije su čestice (atomi i molekule) vezane uz svoj položaj i ne mogu se znatnije pomaknuti s mjesta na kojem se nalaze u strukturi tijela. Toplina se prenosi na razini atoma ili molekula jer molekule viših temperatura imaju veći

intenzitet titranja, odnosno gibanja i veću kinetičku energiju te kao takve predaju dio svoje energije prilikom sudara s molekulama niže temperature koje imaju manju brzinu i kinetičku energiju. Tok energije je na taj način usmjeren s čestica više temperature prema česticama niže temperature. Kod metala, ovakav se način prijenosa topline odvija preko slobodnih elektrona te su zbog toga metali izrazito dobri vodiči topline [19, 23].

2.5. Izmjenjivači topline

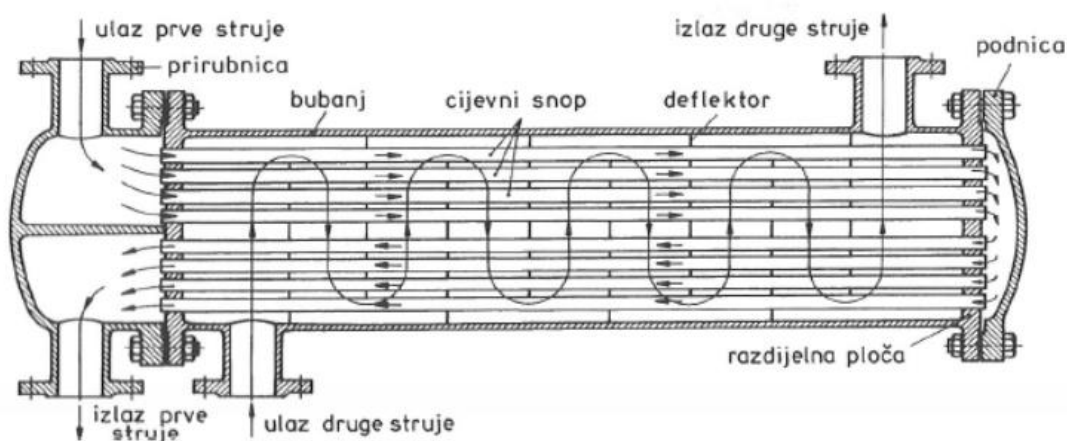
Izmjenjivači topline su toplinski uređaji čija je zadaća izmjenjivanje toplinskog toka između dva ili više fluida u svrhu zagrijavanja ili ohlađivanja fluida. Izmjenjivači topline važni su i česti uređaji u različitim područjima tehnike, a ponajviše u termotehnici, rashladnoj tehnici, procesnoj tehnici, energetici i mnogim drugim granama industrije. Pri njihovom projektiranju i dimenzioniranju od velike je važnosti poznavanje načina prijenosa topline.

Izmjenjivače topline s obzirom na konstruktivnu izvedbu možemo podijeliti na rekuperatore, regeneratore i direktne uređaje [19, 23].

2.5.1. Rekuperativni izmjenjivači topline – rekuperatori

Rekuperatori su uređaji kod kojih su dvije struje fluida međusobno razdvojene nepropusnom stijenkom kroz koju se izmjenjuje toplinski tok. Nepropusna razdjelna stijenka može biti cijevnog ili pločastog oblika te predstavlja rashladnu, odnosno ogrjevnu površinu, koja ne dozvoljava da se struje fluida međusobno izravno dodiruju.

Na slici 12. shematski je prikazan kombinirani rekuperator u kojemu su razdjelne stijenke cijevnog oblika.



Slika 12. Kombinirani rekuperator [19]

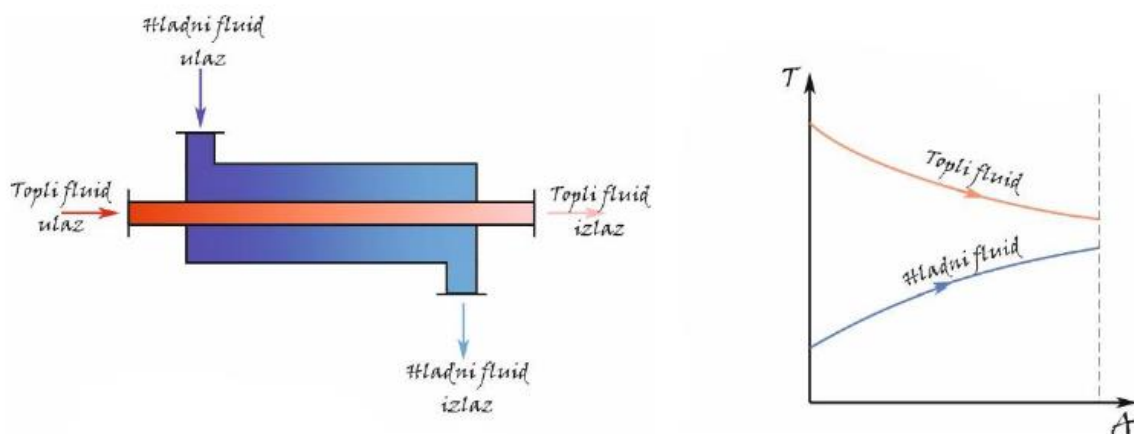
Kod rekuperativnih izmjenjivača topline pretpostavka je da je izmjenjivač toplinski izoliran prema van. Prema tome, toplinski tokovi koji se izmjenjuju su jednaki, ali suprotnog predznaka. Izmjenjivani toplinski tok uzima se od entalpije toplije struje i pretvara se u entalpiju hladnije struje, odnosno toplija struja uvijek izlazi s manjom entalpijom nego što je imala na ulazu u izmjenjivač, a hladnija struja izlazi uvijek s većom entalpijom nego što je imala na ulazu.

Prema podjeli rekuperatora na temelju međusobnog strujanja fluida kroz rekuperator, razlikujemo:

- istosmjerne rekuperatore;
- protusmjerne rekuperatore;
- križne rekuperatore.

2.5.1.1. Istosmjerni rekuperator

Kod istosmjernih rekuperatora obje struje ulaze na istom kraju izmjenjivača i struje paralelno u istom smjeru (slika 13.).

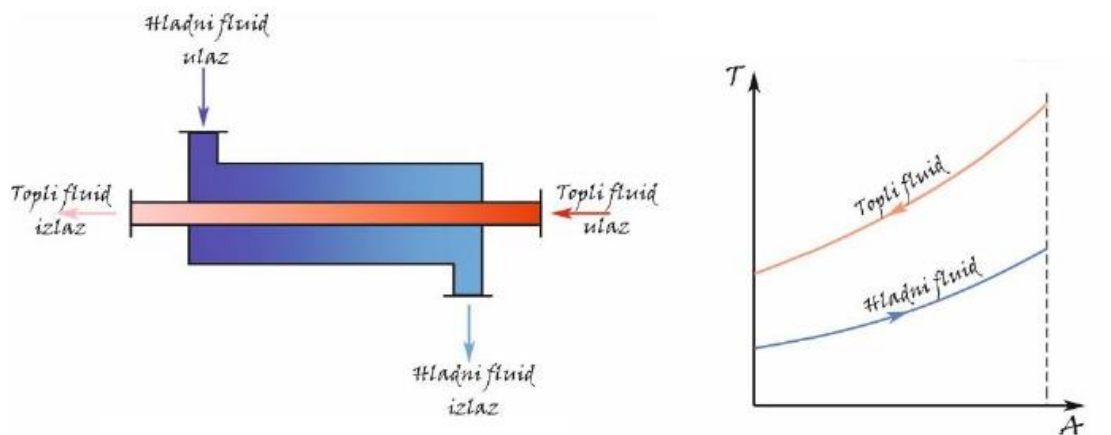


Slika 13. Temperatura struja duž istosmjernog rekuperatora [21]

Na slici 13. prikazani rekuperator je oblika „cijev u cijevi“, njegov princip rada opisan je ulaskom tople (slabije) struje s ulaznom temperaturom ϑ'_1 u manju cijev te ulaskom hladnije (jače) struje s temperaturom ϑ'_2 kroz prstenasti presjek paralelno u istom smjeru.

2.5.1.2. Protusmjerni rekuperator

Kod protusmjernih rekuperatora struje ulaze na suprotnim krajevima i paralelno struje kroz izmjenjivač, ali u suprotnom smjeru (slika 14.).

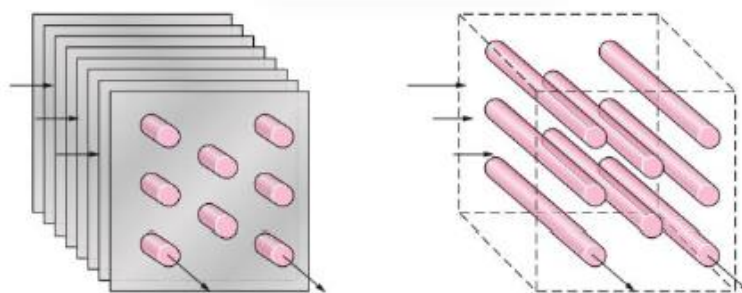


Slika 14. Temperatura struja duž protusmjernog rekuperatora [21]

Prikazani rekuperator tipa je „cijev u cijevi“, kod ovakvog tipa rekuperatora se, isto kao i kod istosmjernog, temperature obje struje mijenjaju s ogrjevnom površinom A . Ova konfiguracija toka radnih fluida omogućuje najveću temperaturnu promjenu oba fluida te je stoga najučinkovitija.

2.5.1.3. Križni rekuperator

Kod križnog rekuperatora struje se unutar izmjenjivača međusobno križaju. Iako obje struje ulaze s uniformnom temperaturom, odnosno sve strujnice jedne struje imaju jednaku ulaznu temperaturu ϑ'_1 i sve strujnice druge struje imaju jednaku temperaturu ϑ'_2 , na izlazu svaka strujnica ima drugačiju temperaturu (slika 15.). Ovakva konfiguracija toka radnih fluida učinkovitija je od izmjenjivača s istosmjernim tokom, ali nije bolja od izmjenjivača s protusmjernim tokom [23].



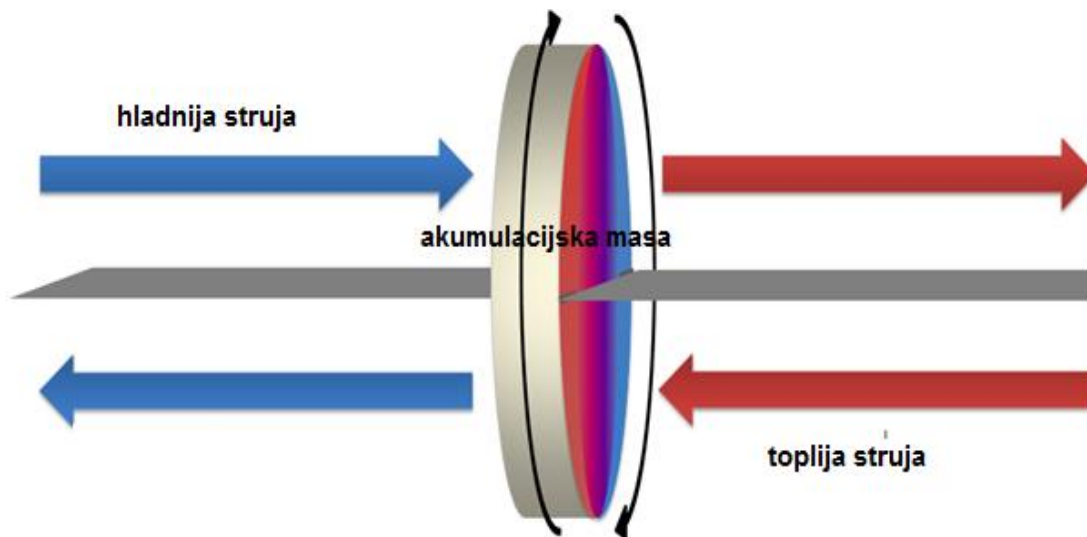
Slika 15. Križni rekuperator [21]

2.5.2. Regenerativni izmjenjivači topline – regeneratori

Toplinski uređaji koji se upotrebljavaju samo za plinove. Kao posrednik za izmjenu toplije i hladnije struje služi porozna čvrsta akumulacijska masa. U prvom dijelu ciklusa akumulacijska masa se dovodi u dodir s toplijom strujom od koje preuzima toplinski tok i zagrijava se. U drugom dijelu ciklusa prethodno zagrijana masa u dodiru s hladnijom strujom se hladi i predaje joj akumuliranu toplinu.

Dva su načina postizanja naizmjeničnog dodira akumulacijske mase s toplijom i hladnijom strujom. Prvi način je da barem dvije matrice miruju, dok se toplija i hladnija struja sustavom kanala i pokretnih ventila naizmjenično puštaju kroz obje matrice.

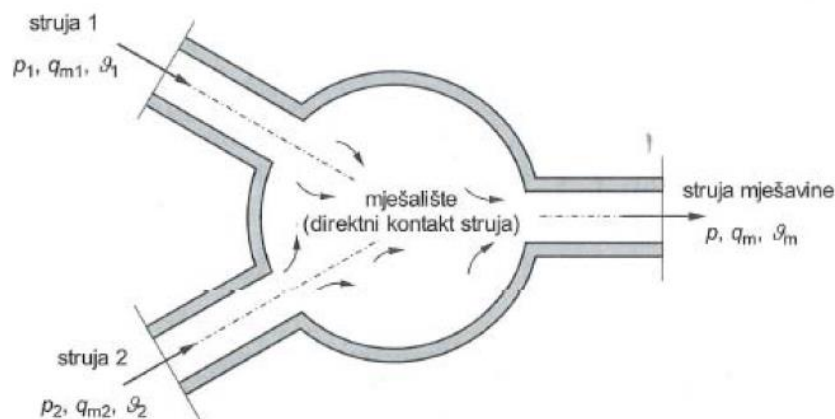
U drugom načinu rada toplija i hladnija struja vode se kroz nepomične kanale, dok se porozna matrica u obliku diska ili šupljeg valjka polagano okreće te pri tome naizmjenično sječe svojom rotacijom putanju toplije i hladnije struje, prenoseći na taj način toplinu (slika 16.) [23].



Slika 16. Rotacijski regenerativni izmjenjivač topline [24]

2.5.3. Izravni izmjenjivači topline

Konstruktivski su najjednostavniji izmjenjivači topline. Toplina se kod ovog tipa izmjenjivača izmjenjuje izravnim dodirnom dviju struja u mješalištu, pri čemu se iskorištava intenzivna turbulencija (slika 17.) [23].



Slika 17. Izravni izmjenjivač topline [19]

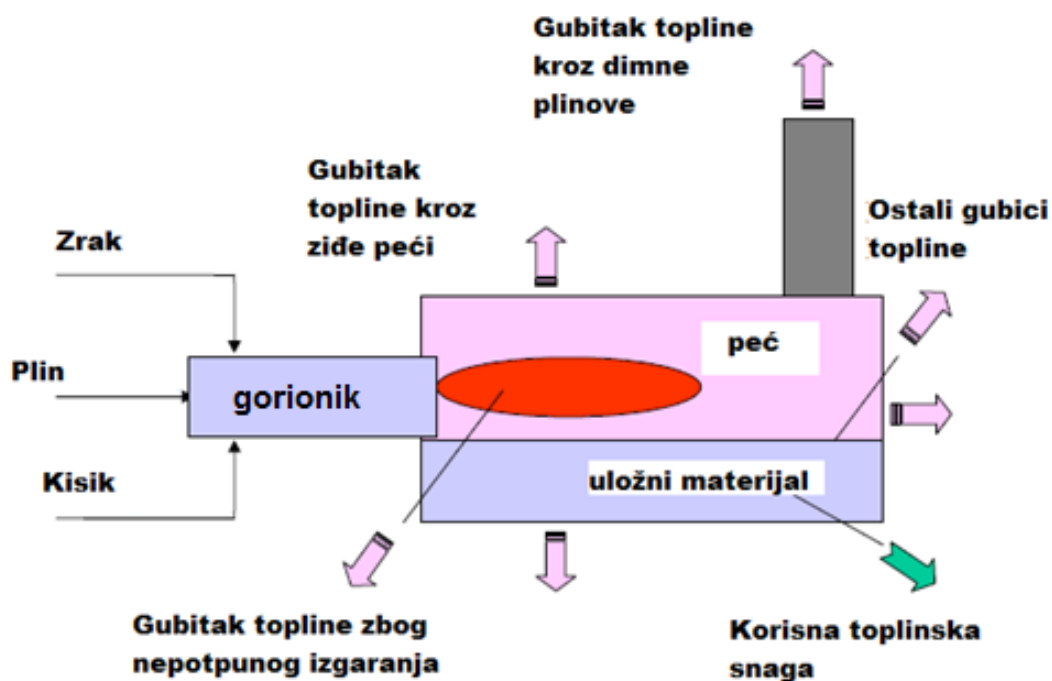
2.6. Energijski tokovi u procesu taljenja

Energijska učinkovitost cjelokupne aluminijske industrije može se dodatno povećati prikupljanjem većeg postotka materijala za recikliranje i poboljšanjem tehnologije za rukovanje otpadom i taljenje.

Glavni izvori energije u procesu taljenja su oslobađanje topline uslijed izgaranja pogonskog goriva (najčešće prirodnog plina) te uslijed izgaranja uložnog materijala. Energiju koja izlazi iz procesa promatramo kao određene toplinske gubitke u vidu entalpije pohranjene u metalu i solnoj troski, entalpije otpadnih plinova, entalpije usisanog zraka te gubitke topline kroz zide peći. Shematski prikaz općih energijskih tokova prikazan je na slici 18.

Peći za taljenje aluminijske koje kao gorivo upotrebljavaju plin mogu biti različite, ali princip rada im je vrlo sličan. Toplina se prenosi na metalni uložak zračenjem i konvekcijom od plamena i plinova izgaranja te zračenjem svoda i zida peći. Oba načina iznimno ovise o tlaku, temperaturi i brzini plinova izgaranja.

Distribucija toplinskog toka na površini metala izravno utječe na brzinu taljenja, a time i na stopu proizvodnje aluminijske. Osim toga, temperatura plina i distribucija lokalnih toplinskih tokova u prostoru izgaranja peći također utječe i na nastajanje dušikovih oksida i drugih onečišćujućih tvari. Razumijevanje osnova i interakcije protoka i prijenosa topline u prostoru izgaranja peći imaju ključnu ulogu u poboljšanju energijske učinkovitosti, povećanju proizvodnje i smanjenju stvaranja onečišćujućih tvari [2, 25].



Slika 18. Shematski prikaz općih energijskih tokova [25]

Za poboljšanje energijske učinkovitosti od velikog je značaja entalpija koja se gubi izlaskom dimnih plinova iz radnog prostora peći zbog činjenice da je to vrijedna energija koja bi se trebala nastojati vratiti u proces.

Prema Referentnom dokumentu [5] koji donosi najbolje raspoložive tehnike za industriju neželjeznih metala i industriju lijevanja, za poboljšanje energetske učinkovitosti u sekundarnoj proizvodnji aluminijske, upućuje se na mjere koje uključuju:

- korištenje entalpije otpadnih dimnih plinova za predgrijavanje uloška peći i/ili grijanje;
- ugradnju gorionika novije generacije (HiTAC tehnologija, rekuperativni gorionici).

Obogaćivanjem kisikom, koje se koristi zajedno s rekuperativnim predgrijavanjem zraka, općenito se postižu uštede energije od 30%. Volumen ispušnih plinova je također smanjen. Potpuno loženje kisikom/gorivom može pružiti uštedu energije do 50% i smanjiti volumen ispušnih plinova do 72 % [5].

Također, naknadnim izgaranjem otpadnih plinova, osim što se smanjuju emisije CO₂, može se postići učinkovitost od 80% do 98% za izgaranje gorivih čestica koje se emitiraju iz rotacijske peći. Vrući plinovi iz naknadnog izgaranja mogu se provoditi kroz rekuperator i pomoći u predgrijavanju zraka te pri tome ostvariti uštedu energije do 15% [5].

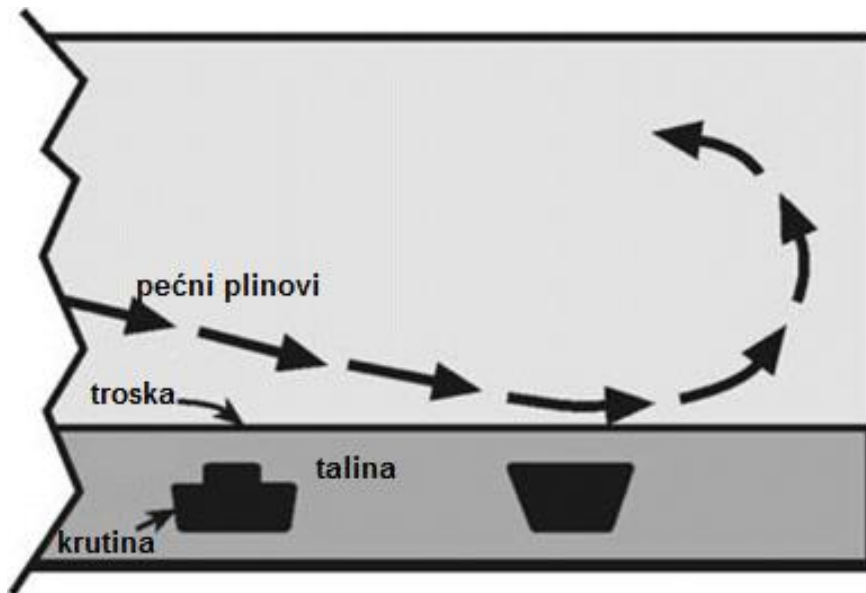
2.7. Problematika peći za taljenje aluminijske

Općeniti problemi koji se pojavljuju u radu industrijskih peći vezani su prvenstveno za energetska učinkovitost i operativne troškove, učinkovitost izgaranja, emisije stakleničkih plinova i kontrolu emisija. Također, stalna je potreba za održavanjem i povećanjem kvalitete proizvoda i održavanjem dijelova postrojenja, što zahtijeva i određene troškove održavanja [26].

Gledajući peći za taljenje aluminijske, osim navedenih problema, postoji još i određena specifična problematika. Toplina se na talinu prenosi odozgo zračenjem i konvekcijom. Kako bi se ostvario potreban prijenos topline, površina taline mora biti dovoljno velika, kao i površina vatrostalnog zida i stropa iznad taline.

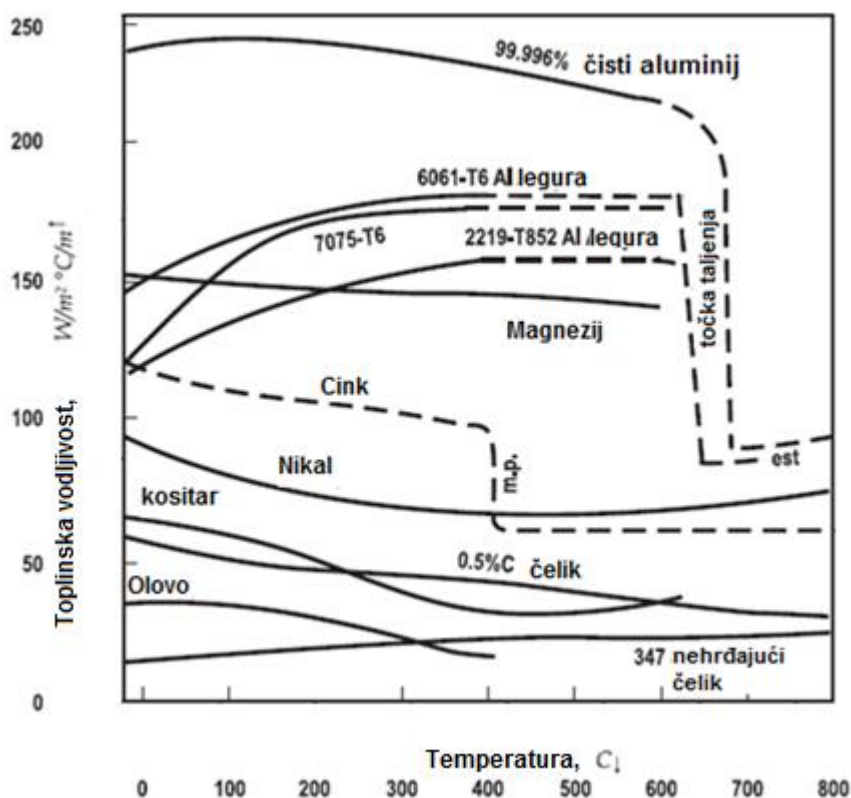
U kadi koja se koristi za taljenje, može doći do sporog taljenja uronjenih metalnih krutina u rastaljenom materijalu zbog slabog prijenosa topline s tekuće na krutu tvar (slika 19.). Zagrijavanje od vrha prema dolje u tekućoj kupelji ovisi o provođenju ili konvekciji ako je uvedeno prisilno miješanje taline.

Specifičnost prijenosa topline u kadi s rastaljenim aluminijem je sporo taljenje krutog uložnog metala jer je toplinska vodljivost rastaljenog aluminijske u odnosu na kruto stanje gotovo 2,5 puta niža. Prijenos topline od taline na krutu uložak, odnosno od površine kade prema dnu, može se intenzivirati mehanizmom prisilne konvekcije. To je moguće realizirati, ili ugradnjom uređaja za miješanje, ili osiguravanjem cirkulacije taline pumpnim sustavom. Pri tome je potrebno uzeti u obzir da je ugradnja ovakve dodatne opreme povezana s visokim investicijskim troškom kao i troškovima održavanja [27].



Slika 19. Taljenje uronjenih metalnih krutina u talini [27]

Podizanjem temperature u prostoru izgaranja iznad kade, odnosno intenziviranjem procesa, povećava se temperaturni gradijent u prvih nekoliko milimetara ispod površine rastaljenog aluminija, što dovodi do smanjenja toplinske vodljivosti rastaljenog aluminija, odnosno smanjuje se prijenos topline provođenjem od površine taline prema dolje. Toplinska vodljivost tekućeg aluminija je znatno niža od toplinske vodljivosti krutog aluminija što se može vidjeti na dijagramu prikazanom na slici 20.



Slika 20. Utjecaj temperature na toplinsku vodljivost metala [27]

Kod taljenja aluminija i njegovih legura pojavljuju se određeni problemi koji utječu na kvalitetu taline te je zbog toga potrebno, osim na potrošnju goriva, obratiti pažnju i na kontrolu kvalitete taline. Tijekom procesa taljenja obično dolazi do stvaranja oksida i apsorpcije vodika. Upravo ove dvije pojave mogu imati loš utjecaj na kvalitetu gotovih proizvoda stvarajući u njima poroznosti i uključke. Kako bi se smanjili navedeni problemi, postoji nekoliko načina:

- peć treba biti plinski nepropusna s minimalnim otvaranjem uložnih vrata i kontrolnih otvora;
- potrebno je koristiti sustav automatske kontrole tlaka u peći. Treba održavati blago pozitivan tlak ($0,05 \div 0,25$ mm V.S.) kako bi se spriječila infiltracija okolišnjeg zraka, što ima veće negativne posljedice u odnosu na propuštanja dimnih plinova u okoliš;
- potrebno je kontinuirano održavati potreban odnos zrak/gorivo. Peć treba raditi s minimalnom količinom viška zraka kako bi se osiguralo potpuno izgaranje goriva. U suprotnom slučaju, dolazilo bi do stvaranja neizgorenih ugljikovodika, a pogotovo H_2 . Naime, sloj troske na površini rastaljenog metala lakše je ukloniti nego apsorbirani vodik;
- potrebno je izbjegavati usmjeravanje mlaza plamena i plinova nastalih izgaranjem izravno na površinu rastaljenog metala;
- potrebno je izbjegavati uporabu uređaja za miješanje taline čijim se radom usisava zrak ili plinovi izgaranja u rastaljeni metal [28, 29].

2.8. Proces izgaranja

U mnogim industrijskim pećima toplina se oslobađa izgaranjem nafte ili zemnog plina, što se ponekad odvija u atmosferi zraka obogaćenog kisikom. Gorivo i zrak za izgaranje, kojim se dovodi potrebni kisik, miješaju se zajedno formirajući zapaljivu smjesu koja se zatim pali.

Ogrjevna vrijednost goriva je količina topline koja se oslobađa kod potpunog izgaranja goriva. Razlikujemo gornju i donju ogrjevnju vrijednost goriva.

Gornja ogrjevna vrijednost H_g predstavlja količinu topline koja se oslobađa tijekom izgaranja goriva, a produkti izgaranja se hlade na temperaturu 20 °C. Pri tome se kondenzira vodena para koja potječe od vlage sadržane u gorivu, kao i voda koja nastaje izgaranjem vodika iz goriva i pri tome oslobađa entalpija isparavanja.

Donja ogrjevna vrijednost H_d predstavlja količinu topline koja se oslobađa izgaranjem goriva, a vodena para koja je prisutna u plinovima izgaranja se ne kondenzira, već izlazi s plinovima izgaranja [30].

Četiri su komponente važne u prijenosu toplinske energije iz procesa izgaranja na zagrijavani uložni materijal. Jedna od njih je gorionik koji izgara gorivo pomoću oksidacijskog sredstva kako bi se oslobodila toplina, zatim uložni materijal koji može imati velik utjecaj na prijenos topline. Većinom se plamenik i uložni materijal nalaze unutar prostora za izgaranje koji predstavlja treću komponentu. U nekim slučajevima postoje uređaji za povrat topline kojima se povećava toplinska učinkovitost cijelog sustava izgaranja te oni čine četvrtu komponentu sustava izgaranja [22].

Loš odnos miješanja između energenta i oksidacijskog sredstva rezultira dugim plamenom te u nekim slučajevima i nepotpunim izgaranjem, dok optimalan odnos miješanja rezultira kratkim kompaktnim plamenom. Miješanje ovisi o protoku goriva, protoku zraka za izgaranje

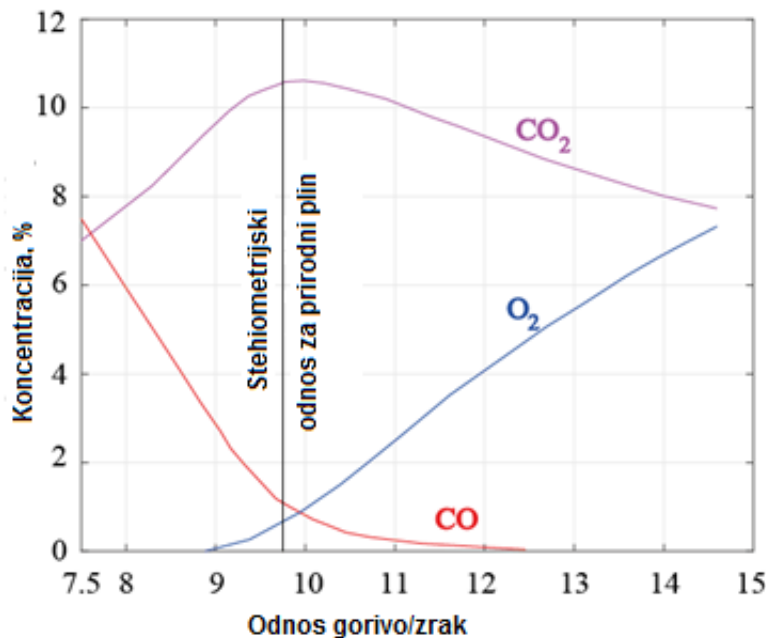
ili kisika i produkata izgaranja u sustavu, odnosno o aerodinamici peći, tako da su izgaranje i aerodinamika peći međusobno povezani.

Izbor tehnologije izgaranja za industrijske peći jedan je od ključnih čimbenika u smanjenju potrošnje energije po jedinici proizvoda. Općenito, ekonomična ušteda energije u peći u metalurškoj industriji može se postići poboljšanjem performansi procesa izgaranja i prijenosa topline. U procesu odabira određene tehnologije nužno je uzeti u obzir troškovnu učinkovitost investicije, odnosno razdoblje njezina povrata [20].

2.9. Kontrola izgaranja

Kako bi se što bolje iskoristila ogrjevna vrijednost goriva potrebno je ispravno upravljati i kontrolirati proces izgaranja. Najvažnije je osigurati potpuno izgaranje što se postiže dovodom dovoljne količine kisika.

Gorivu se zrak ne dovodi u minimalnoj količini već s određenim viškom kako bi se izbjegli problemi kao što je nepotpuno izgaranje što dovodi do stvaranja CO umjesto CO₂. Pri izgaranju zraka potrebno je višak zraka držati što manjim, odnosno što je moguće bliže stehiometrijskom omjeru, s obzirom da s manjim viškom nastaje i manja količina dimnih plinova i CO (slika 21.). Kako dimni plinovi ulaze u dimnjak s relativno visokom temperaturom, manja količina dimnih plinova stoga uvjetuje i manje gubitke topline [31, 32].



Slika 21. Utjecaj odnosa zrak / gorivo na sastav produkata izgaranja [31]

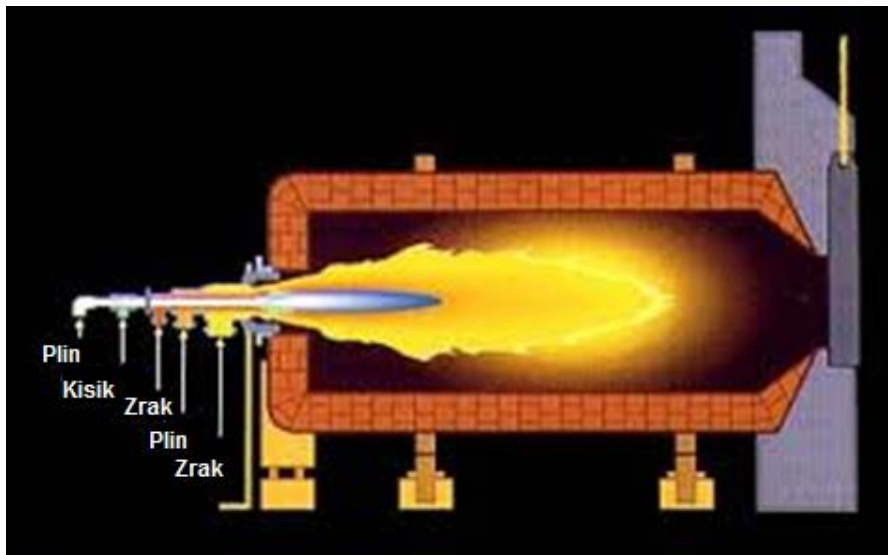
Postotak viška zraka uglavnom ovisi o vrsti goriva i izvedbi gorionika, a njegova kontrola važna je za učinkovit i siguran rad, stabilnost plamena, kontrolu emisija za izbjegavanje emisija CO i nesagorjelih plinova te kontrolu kvalitete proizvoda.

2.10. Gorionici

Općenito, gorionike definiramo kao uređaje koji se upotrebljavaju za izgaranje goriva uz pomoć oksidacijskog sredstva koji pretvara kemijsku energiju goriva u toplinsku energiju. Određeni sustav izgaranja može imati jedan gorionik ili više gorionika, ovisno o veličini i

vrsti primjene. Primjerice, rotacijske peći koje se koriste za taljenje aluminija ili proizvodnju cementnih klinkera, imaju jedan gorionik koji je smješten u središtu zida na jednom kraju cilindrične peći (slika 22.). Plamen i plinovi izgaranja iz gorionika zrače u svim smjerovima te se toplina učinkovito apsorbira u uložni materijal.

Osim korištenja topline otpadnih dimnih plinova za predgrijavanje uložka peći i/ili grijanje, čime se pridonosi poboljšanju energijske učinkovitosti u sekundarnoj proizvodnji aluminija, dodatne mjere za poboljšanje energijske učinkovitosti uključuju i ugradnju gorionika novije generacije, odnosno rekuperativne gorionike te HiTAC tehnologiju [20].



Slika 22. Primjer gorionika na rotacijskoj peći [33]

Za povrat topline iz izlaznih dimnih plinova nastalih tijekom procesa taljenja moguće je koristiti rekuperativne ili regenerativne tehnike. Kod rekuperacije topline koriste se izmjenjivači topline tako da vrući ispušni plinovi ne dolaze u kontakt s prethodno zagrijanim uložnim materijalom. Vrući ispušni plinovi iskorištavaju se za predgrijavanje goriva i/ili zraka koji ulaze u gorionik ili za predgrijavanje uložka koji se obrađuje u prostoru za izgaranje.

Dva su glavna razloga za povrat topline iz izlaznih dimnih plinova. To je prvenstveno povećanje toplinske učinkovitosti sustava izgaranja te povećanje raspoložive topline u radnom prostoru peći izgaranjem metana s predgrijavanim zrakom. Drugi razlog je povećanje temperature plamena za procese koji zahtijevaju više temperature, kao što je taljenje sirovina.

Povrat topline često se izvodi pomoću izmjenjivača topline i ne uključuje gorionike. Međutim, postoje i sustavi koji uključuju rekuperaciju topline u samom gorioniku [20].

2.10.1. Regenerativni gorionici

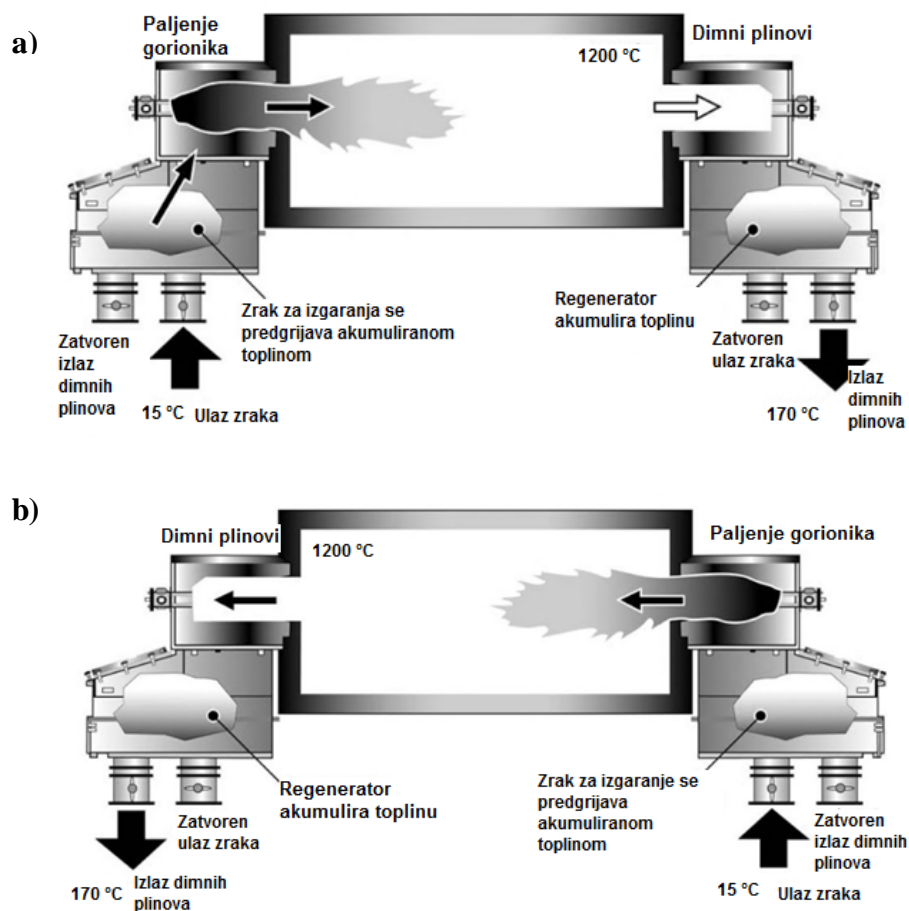
Zbog sve veće potražnje za učinkovitim sustavima zagrijavanja sve se više koriste regenerativni gorionici jer imaju najveći potencijal za predgrijavanje zraka gotovo do procesne temperature uz značajne uštede energije. Peći za pretaljivanje i recikliranje otpadnog materijala, kao što je rotacijska peć za pretaljivanje aluminija, su općenito dobri kandidati za

regenerativne sustave izgaranja. Njima je moguće postići i do 50% veću uštedu goriva u usporedbi s konvencionalnim sustavima koji se napajaju okolnim zrakom i do 30% više u usporedbi s konvencionalnim sustavima za povrat topline.

U regenerativnim gorionicima izmjena topline odvija se između vrućih dimnih plinova koji nastaju u procesu i zraka za izgaranje preko dva gorionika u kružnim ciklusima. Dimne plinove koje proizvodi prvi gorionik usisava drugi gorionik pri čemu dolazi do zagrijavanja posrednog medija unutar gorionika koji je izrađen od keramičkog materijala različitih oblika i veličina. U sljedećem ciklusu funkcija gorionika je zamijenjena na način da se u gorionik uvodi zrak za izgaranje te se predgrijava toplinom koja je u prethodnom ciklusu akumulirana u keramičkom sloju unutar gorionika. Na taj način zrak se predgrijava na temperaturu koja je iznad temperatura koje se postižu uobičajenim sustavima za povrat topline temeljenim na izmjenjivačima topline. Princip ciklusa rada regenerativnih gorionika koji rade u paru prikazan je na slici 23.

Regeneratori bi trebali biti izvedeni na način da je sloj za pohranu topline lako dostupan, jer ukoliko su dimni plinovi onečišćeni, zahtijeva se redovito čišćenje regeneratora kako bi se izbjeglo korozivno oštećenje gorionika te kako bi regeneratori pravilno funkcionirali. Vrijeme prebacivanja s jednog ciklusa na drugi obično je između 5 sekundi i 15 minuta, a optimalna tehnika prebacivanja ovisi o nekoliko čimbenika:

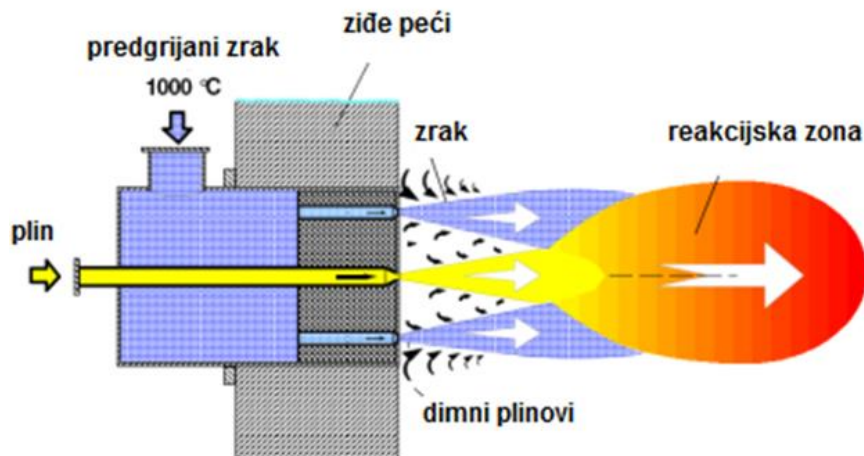
- tlaku zraka u gorioniku;
- vremenu prebacivanja;
- volumenu regeneratora;
- veličini gorionika;
- udaljenosti između gorionika [18, 34].



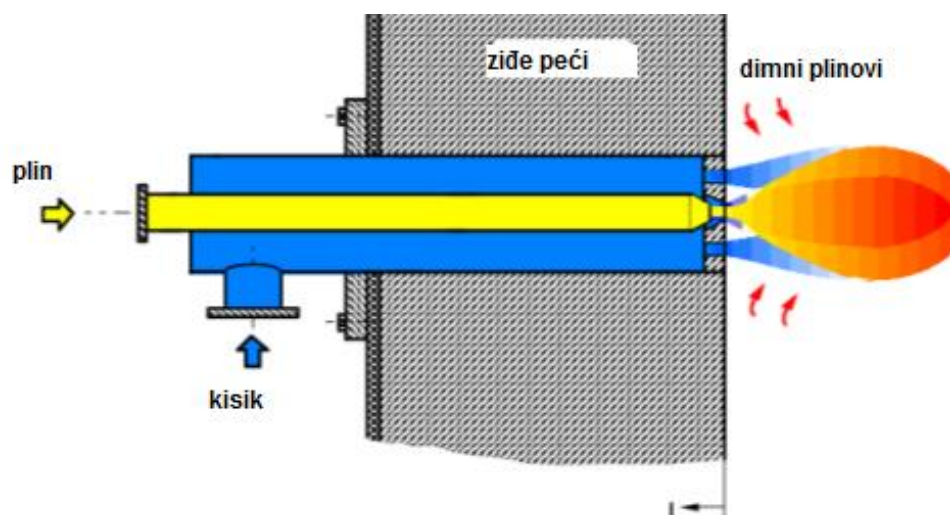
Slika 23. Princip rada regenerativnih gorionika a) prvi dio ciklusa rada b) drugi dio ciklusa [35]

2.10.2. Gorionici nove generacije

Temperature dimnih plinova na izlazu iz besplamenih regenerativnih gorionika su otprilike 200 °C (slika 24.), dok su kod gorionika za izgaranje s kisikom temperature dimnih plinova na izlazu iz peći oko 1000 °C (slika 25.). Zbog nižih temperatura izlaznih plinova koje se postižu visokim temperaturama predgrijavanja zraka, raspoloživa toplina je jednaka ili gotovo veća kod regenerativnih gorionika u odnosu na gorionike za izgaranje s kisikom. Zbog toga, primjenom HiTAC tehnologije, nema opravdanosti za primjenu izgaranja s kisikom jer kisik u tom slučaju predstavlja dodatni trošak.



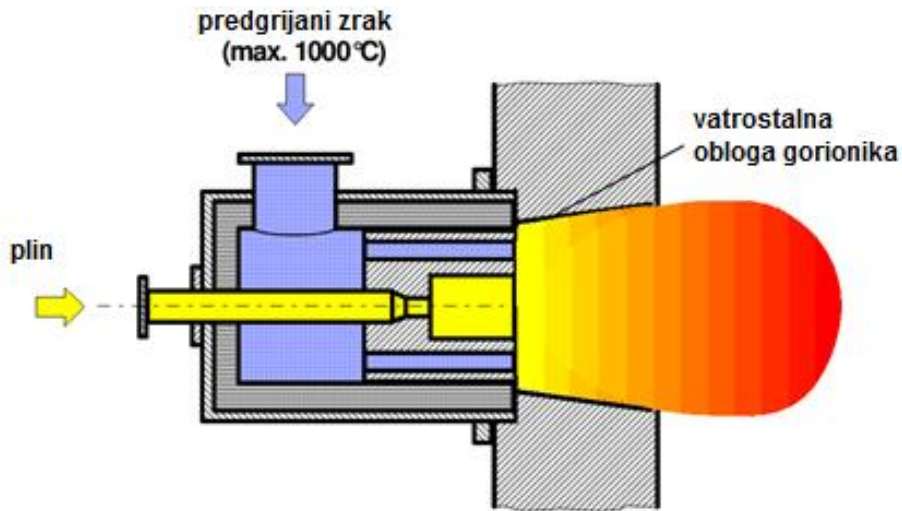
Slika 24. HiTAC (besplameno) gorionik [26]



Slika 25. Gorionik za izgaranje s kisikom [26]

Na slici 26. prikazan je konvencionalni gorionik. U usporedbi s besplamenim HiTAC gorionikom vidljivo je da se zona izgaranja kod besplamene tehnologije proteže po cijelom prostoru peći, čime su izbjegnute ekstremno visoke temperature plamena kao što je slučaj kod konvencionalnog gorionika. Rezultat takvog načina zagrijavanja je intenzivniji i jednoličniji

toplinski tok po prostoru peći, do 30% uštede u gorivu i znatno niže emisije NO_x, čak i do 50% [28].



Slika 26. Konvencionalni gorionik [28]

2.11. Efekti predgrijavanja zraka

Predgrijavanje zraka za izgaranje je učinkovita metoda za smanjenje potrošnje goriva u visokotemperaturnim procesima. Relativna vrijednost predgrijavanja zraka (ε) izražava se kao:

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{zrak (izlaz)}} - T_{\text{zrak (ulaz)}}}{T_{\text{d.p. (ulaz)}} - T_{\text{zrak (ulaz)}}}, \quad (1)$$

gdje je $T_{\text{zrak (izlaz)}}$ temperatura zraka za izgaranje na izlazu iz izmjenjivača topline, $T_{\text{zrak (ulaz)}}$ je temperatura zraka za izgaranje na ulazu u izmjenjivač topline, a $T_{\text{d.p. (ulaz)}}$ je temperatura dimnih plinova na ulazu u izmjenjivač topline.

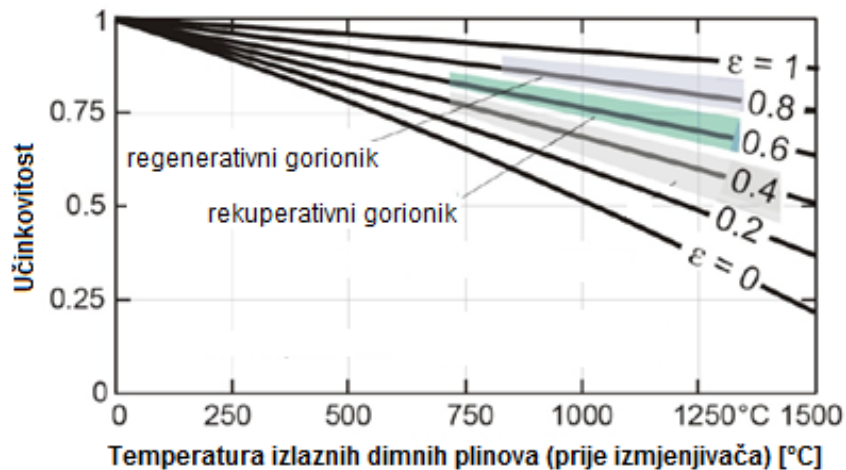
Ukoliko se proces zagrijavanja može provesti s i bez predgrijavanja zraka, tada odabrani način rada utječe samo na učinkovitost izgaranja koja je povezana s potrošnjom goriva. Gledajući isti proces zagrijavanja u oba slučaja, mora se dovesti jednak toplinski tok prema zagrijavanom materijalu pa će u slučaju predgrijavanja zraka učinkovitost izgaranja biti veća, a time će i potrošnja goriva biti manja.

Na učinkovitost izgaranja η_g najveći utjecaj ima maseni protok dimnih plinova koji izlaze iz peći, a izražava se kao:

$$\eta_g = \frac{h_{g(NHV)} + h_z + h_{d.p.(ulaz)}}{h_{g(NHV)}}, \quad (2)$$

gdje je $h_{g(NHV)}$ neto ogrjevna vrijednost goriva, h_z je entalpija predgrijanog zraka za izgaranje, a $h_{d.p.(ulaz)}$ je entalpija plina na ulazu u rekuperator. Fizikalno značenje učinkovitosti izgaranja identično je raspoloživoj toplini, odnosno postotku bruto unosa energije koja je dostupna za zagrijavanje uložka i energije usmjerene na zide peći.

Na slici 27. prikazana je učinkovitost izgaranja kao funkcija temperatura izlaznih dimnih plinova (mjereno prije izmjenjivača topline) i predgrijanja zraka za izgaranje. Vidljivo je da za proces bez predgrijanja zraka učinkovitost naglo pada s porastom temperature izlaznih dimnih plinova.



Slika 27. Učinkovitost izgaranja kao funkcija temperatura izlaznih dimnih plinova (mjereno prije izmjenjivača topline) i predgrijanja zraka za izgaranje [28]

Predgrijanje zraka za izgaranje s izlaznim dimnim plinom, vodi do znatnog povećanja učinkovitosti izgaranja, tako da je poželjno koristiti predgrijani zrak kada god za to postoji mogućnost. Povećanje učinkovitosti izgaranja omogućuje smanjenje potrebne energije, a time i manji maseni protok goriva.

Faktor uštede goriva (η_b) definira se na sljedeći način:

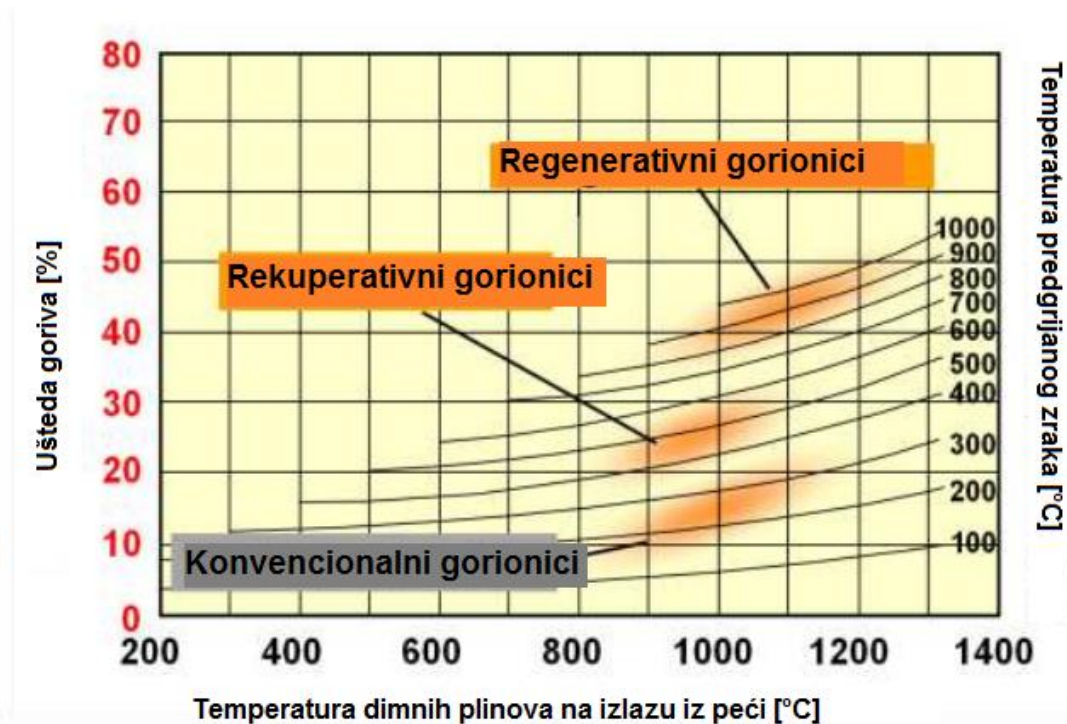
$$\eta_b = \frac{q_{m,O} - q_{m,P}}{q_{m,O}} = 1 - \frac{q_{m,P}}{q_{m,O}}, \quad (3)$$

gdje je $q_{m,O}$ maseni protok bez predgrijanja zraka, $q_{m,P}$ maseni protok s predgrijanjem zraka. Jednadžba (3) može se zapisati na sljedeći način:

$$\eta_b = 1 - \frac{\eta_{g,O}}{\eta_{g,P}}, \quad (4)$$

gdje je $\eta_{g,O}$ učinkovitost izgaranja bez predgrijanja zraka, a $\eta_{g,P}$ učinkovitost izgaranja s predgrijanjem zraka [28, 36].

Dijagramom na slici 28. prikazana je ovisnost uštede energije u postotku o temperaturi izlaznih dimnih plinova i temperature predgrijanja zraka.



Slika 28. Ovisnost uštede energije o temperaturi izlaznih dimnih plinova i temperaturi predgrijanog zraka [37]

2.12. Izgaranje poboljšano kisikom

Većina industrijskih procesa zahtijeva znatne količine energije za zagrijavanje, koje se obično stvaraju izgaranjem ugljikovodičnih goriva kao što je prirodni plin ili nafta. Većina procesa izgaranja koristi zrak kao oksidacijsko sredstvo te se u mnogim slučajevima ti procesi mogu poboljšati upotrebom oksidansa koji sadrži veći udio kisika nego onaj u zraku. Takvo izgaranje je poznato kao izgaranje poboljšano kisikom (*eng. oxygen-enhanced combustion, OEC*).

Izgaranje poboljšano kisikom može biti izvedeno na način da se upotrebljava oksidacijsko sredstvo koje se sastoji od zraka pomiješanog s čistim kisikom (*eng. air enrichment*) ili na način da se kao oksidacijsko sredstvo upotrebljava samo kisik visoke čistoće (*eng. oxy/fuel combustion*). Udio kisika može se povećati do 100%, no međutim, sigurnosni razlozi nalažu da je razina kisika često ograničena na 25% u slučaju ako se rabe konvencionalni gorionici, a ako se primjenjuje čisti kisik, preporučljivo je koristiti besplamenu tehnologiju izgaranja [22].

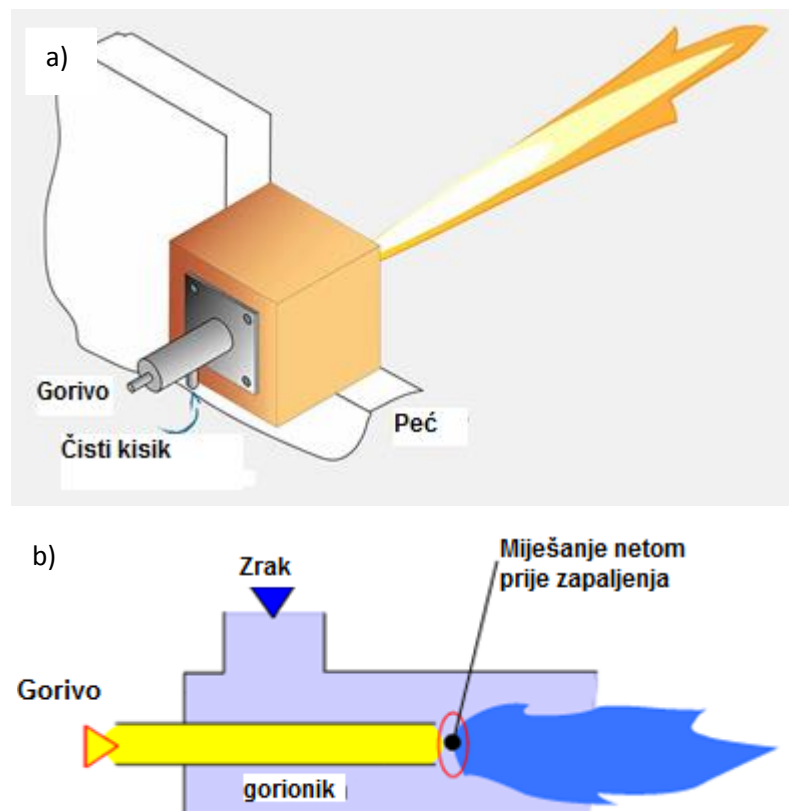
Izgaranje s kisikom ili izgaranje zrakom obogaćenim kisikom u nekim slučajevima imaju određene prednosti kao što je povećana proizvodnja peći, smanjena specifična potrošnja goriva, poboljšana kvaliteta proizvoda, veća operativna fleksibilnost te značajno smanjene emisije onečišćujućih plinova. Navedene prednosti se moraju promatrati zajedno s troškom kisika i investicijskim troškom nabave i ugradnje nove opreme te troškovima održavanja što se razlikuje od slučaja do slučaja [28].

2.12.1. Obogaćivanje kisikom

Slika 29. a prikazuje izgaranje s kisikom koje se obično naziva izgaranje kisik/gorivo (*eng. oxy/fuel combustion*). U gotovo svim slučajevima gorivo i kisik ostaju odvojeni unutar gorionika te se ne miješaju dok ne dođu do izlaza iz gorionika stvarajući difuzijski plamen (slika 29. b). Plinovi se ne miješaju iz sigurnosnih razloga zbog iznimno visoke reaktivnosti čistog O_2 jer postoji opasnost od eksplozije ukoliko su plinovi prethodno izmiješani.

Kako bi se osiguralo paljenje, temperatura komore mora biti iznad temperature samozapaljenja goriva. Ovisno o geometriji komore, gorionik stvara gotovo nevidljivi plamen te se zbog toga ova metoda naziva besplameno izgaranje. Prednost ove metode je vrlo niska emisija NO_x jer su točke najviše temperature u plamenu minimizirane, što općenito dovodi do smanjenja NO_x . S druge strane, smanjenje prijenosa topline predstavlja potencijalni nedostatak jer se time može smanjiti i temperatura i efektivna emisija plamena.

Izgaranje kisik/gorivo ima najveći potencijal za poboljšanje procesa, ali može imati i najveće operativne troškove jer se kod ove metode za izgaranje goriva upotrebljava kisik visoke čistoće (> 90% O_2 vol) [22].

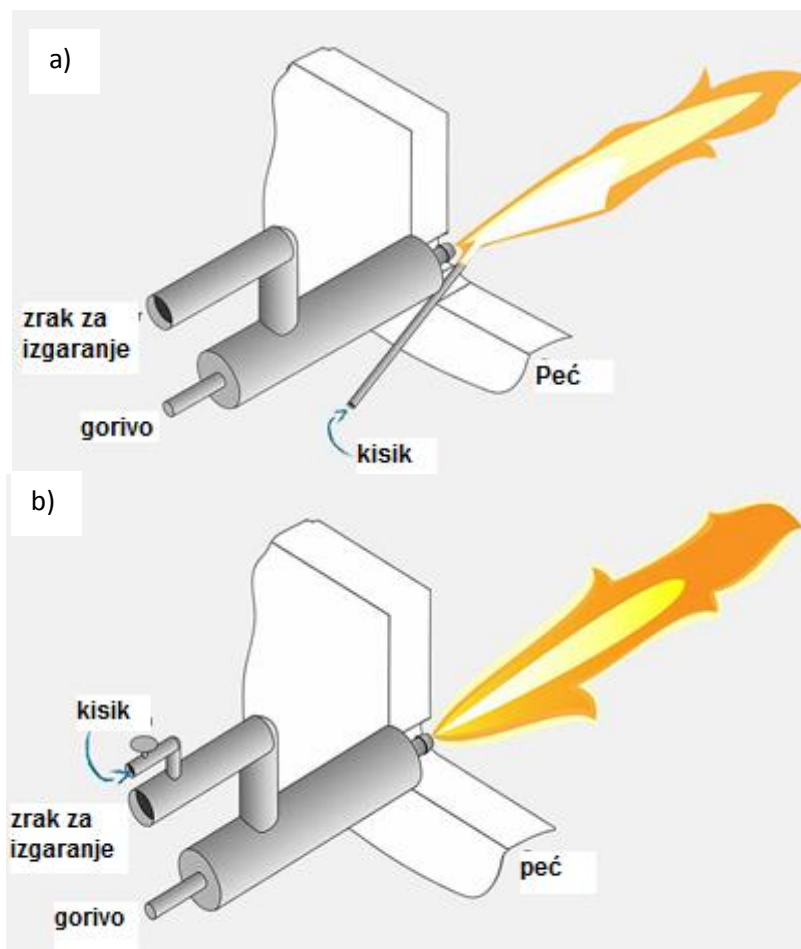


Slika 29. Izgaranje poboljšano kisikom: a) izvedba gorionika [38], b) točka miješanja plinova [39]

2.12.2. Obogaćivanje zraka kisikom

Obogaćivanje zraka kisikom (*eng. air enrichment*) može biti izvedeno s dovođenjem niskih razina kisika pomoću kisikovog koplja (slika 30. a) ili s prethodnim miješanjem zraka i kisika (slika 30. b). Mnogi konvencionalni plamenici za zrak/gorivo mogu se prilagoditi ovim tehnologijama. Kisik se ubrizgava u dolazni dovod zraka za izgaranje, obično kroz difuzor, kako bi se osiguralo odgovarajuće miješanje.

Obogaćivanje zraka kisikom pridonosi poboljšanju procesa uz relativno niske troškove. Dodani kisik skraćuje i pojačava plamen, no međutim, ukoliko se uvede previše kisika u gorionik zrak/gorivo postoje određene opasnosti. Plamen u tom slučaju može postati neprihvatljivo kratak i imati višu temperaturu koja može oštetiti gorionik. Zbog toga se iz sigurnosnih razloga modificiraju cijevi za dovod zraka kako bi se osigurao rad s višim razinama kisika. Koncentracija kisika u zraku ograničena je na razinu od 23-35%, a koncentracija kod konvencionalnih plamenika iznosi 25% [22].



Slika 30. Obogaćivanje zraka kisikom: a) pomoću kisikovog koplja, b) s prethodnim miješanjem zraka i kisika [38]

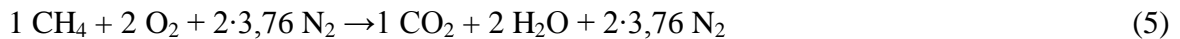
2.12.3. Efekti izgaranja s kisikom

Utjecaj kisika na proces izgaranja očituje se i kroz:

- povećanu temperaturu plamena i posljedično intenzivniji prijenos topline zračenjem;
- povećanu proizvodnju peći;
- poboljšanu energijsku učinkovitost i smanjeno specifično izgaranje goriva;
- poboljšanu kvalitetu proizvoda;
- povećanu brzinu izgaranja;
- smanjenu temperaturu zapaljenja.

Osim navedenog, izgaranje s kisikom također utječe i na sastav i količinu dimnih plinova:

Stehiometrijsko izgaranje metana sa zrakom:



Sastav dimnih plinova: 9,5% CO₂, 19,5% H₂O, 71% N₂

Količina dimnih plinova: 10,52 m³ dimnih plinova/m³ CH₄

Stehiometrijsko izgaranje metana s kisikom:



Sastav dimnih plinova: 33,3% CO₂, 66,7% H₂O

Količina dimnih plinova: 3 m³ dimnih plinova/m³ CH₄

Kod izgaranja tijela u pećima koje izgaraju fosilna goriva, pećni prostor ispunjen je troatomnim i višeatomnim plinovima koji emitiraju i apsorbiraju zračenje. Ovakav tip zračenja naziva se selektivno zračenje plinova i ima veliku ulogu pri povišenim temperaturama [40]. Usporedbom izgaranja metana s kisikom u odnosu na izgaranje sa zrakom iz jednadžbi (5) i (6) vidljive su povećane koncentracije CO₂ i H₂O. Nastali plinovi rezultiraju većom emisivnošću plamena što za posljedicu ima intenzivniji prijenos topline zračenjem. Samim time je i smanjena količina dimnih plinova što dovodi do poboljšanja toplinske učinkovitosti.

Postoje određena ograničenja kod izgaranja s kisikom koje treba uzeti u obzir: održavanje sustava izgaranja je osjetljivo te mora biti izvedeno od strane specijaliziranih tehničara. Zbog vrlo visokih temperatura koje se postižu, životni vijek vatroalnog materijala je kraći nego kod izgaranja sa zrakom, a ujednačenost temperature pri zagrijavanju uložka nije poboljšana [26].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je energijska učinkovitost peći za taljenje aluminija te mogućnost povećanja energijske učinkovitosti na peći za držanje taline aluminija u talionici aluminija CIAL d.o.o. Da bi se mogla analizirati ekonomska opravdanost primjene mogućih rješenja, kroz godinu dana praćene su prosječne potrošnje sirovina i goriva utrošenih za taljenje aluminija u rotacijskoj nagibnoj peći. Također je praćena i prosječna potrošnja goriva za peć za održavanje temperature taline.

CIAL d.o.o. je talionica i ljevaonica aluminija smještena u krugu Južne industrijske zone grada Siska. Godišnje CIAL d.o.o. od 15 000 tona sirovine sekundarnog aluminija proizvede 12 tisuća tona aluminijskih legura od čega je 50% namijenjeno domaćem tržištu, a 50% se izvozi [6]. Unutar postrojenja nalazi se rotacijska nagibna peć u kojoj se aluminij pretaljuje te peć za držanje taline u kojoj se provodi korekcija kemijskog sastava, legiranje i homogenizacija.

3.1. Rotacijska nagibna peć

Za taljenje aluminija koristi se rotacijska nagibna peć tvrtke Bartz Maschinen - und Anlagenbau prikazana na slici 31. a i b. Sustav se sastoji od cilindričnog čeličnog bubnja koji je s unutarnje strane obložen vatrostalnim materijalom, uređaja za punjenje te sustava za mjerenje i kontrolu dotoka zemnog plina i kisika. Ovakav tip peći uobičajeno je karakteriziran ugradnjom jednog gorionika smještenog u ili blizu središta jednog kraja peći, a smjer plamena je paralelan s osi peći. Takav tip gorionika može raditi u teškim uvjetima kao što su procesi sa solima, ponovnog taljenja procesnog otpada, taljenja kontaminiranog metalnog otpada ili otpada loše kvalitete.





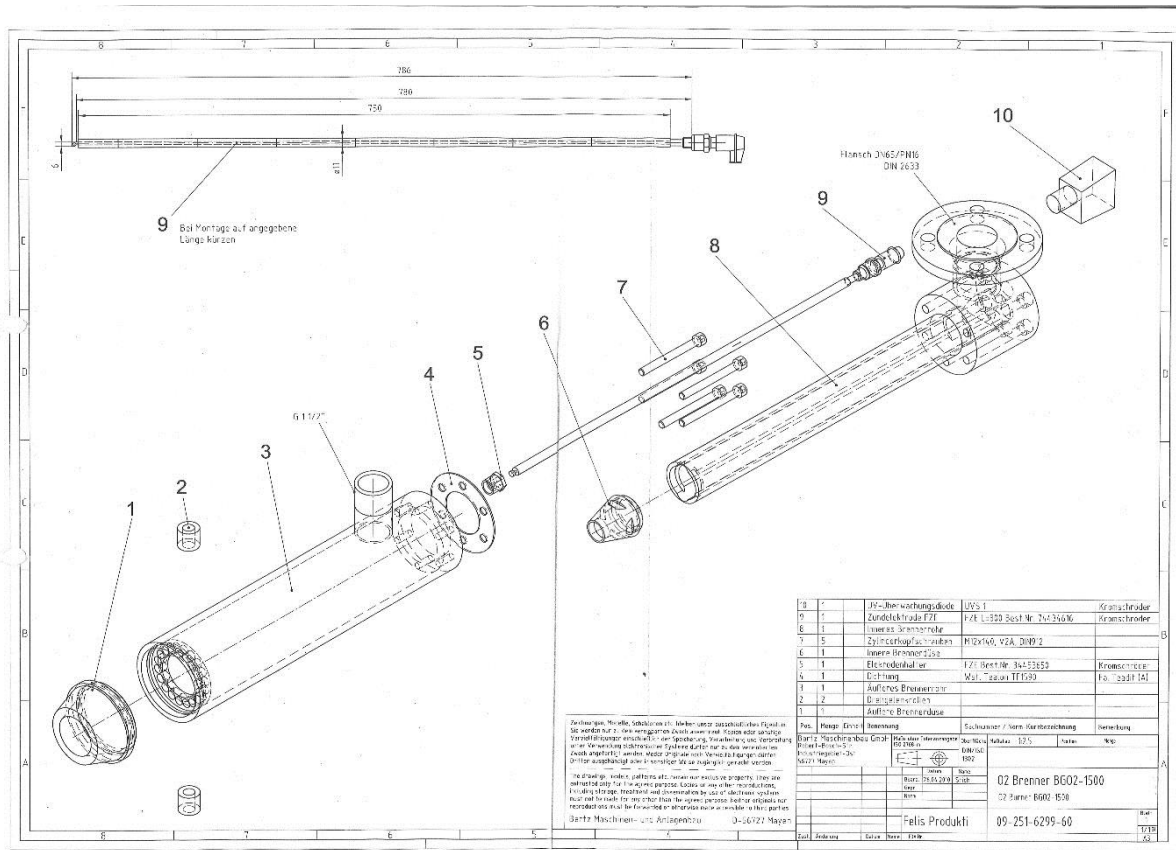
Slika 31. Rotacijska nagibna peć u tvornici CIAL d.o.o.: a) u radu, b) u hladnom pogonu

U tablici 1. prikazani su operativni parametri peći.

Tablica 1. Operativni parametri rotacijske nagibne peći u tvornici CIAL d.o.o.

Kapacitet peći	10 000 kg
Trajanje zagrijavanja	4 – 5 h
Temperatura taline	700 – 750 °C
Temperatura dimnih plinova na izlazu iz peći	900 – 1000 °C

Uložni otpadni materijal zajedno sa sredstvima za taljenje (NaCl, KCl) ulaže se u rotacijsku peć koja se zagrijava na radnu temperaturu od ~ 1200 °C pomoću nagibnog gorionika koji, u unaprijed zadanim omjerima, koristi zemni plin kao energent, a kisik kao oksidacijsko sredstvo. Shematski prikaz gorionika dan je na slici 32. Gorionik stvara plamen zaobljenog oblika koji odgovara cilindričnoj geometriji peći, čime se postiže jednoličan prijenos topline od plamena i plinova izgaranja na uložak i zide peći.



Slika 32. Shematski prikaz gorionika kisik-zrak na rotacijskoj peći za taljenje

Peć tijekom rada rotira kako bi se izmiješao otpadni materijal sa sredstvima za taljenje te ubrao proces taljenja intenzifikacijom prijenosa topline unutar uloška. Uloga sredstava za taljenje je rafinacija aluminija pri kojoj se nečistoće iz otpada prilikom taljenja vežu u solnu trosku. Solna troska istresa se u metalne kokile i odvozi na hlađenje te se nakon hlađenja istresa u privremeno skladište opasnog otpada. Prašina iz dimnih plinova se nakon utvrđivanja težine također skladišti na privremenom skladištu opasnog otpada.

Na kraju faze taljenja peć se zaustavlja i rastaljeni metal se izljevava u horizontalni rotacioni sustav s deset kokila u kojima se oblikuju blokovi aluminija ili se kanalima odvodi u peć za držanje taline gdje se provodi rafinacija i korekcija kemijskog sastava prema specifikacijama kupaca te se naposljetku lijeva u ingote (slika 33. a i b).



Slika 33. Aluminijski: a) blokovi i b) ingoti

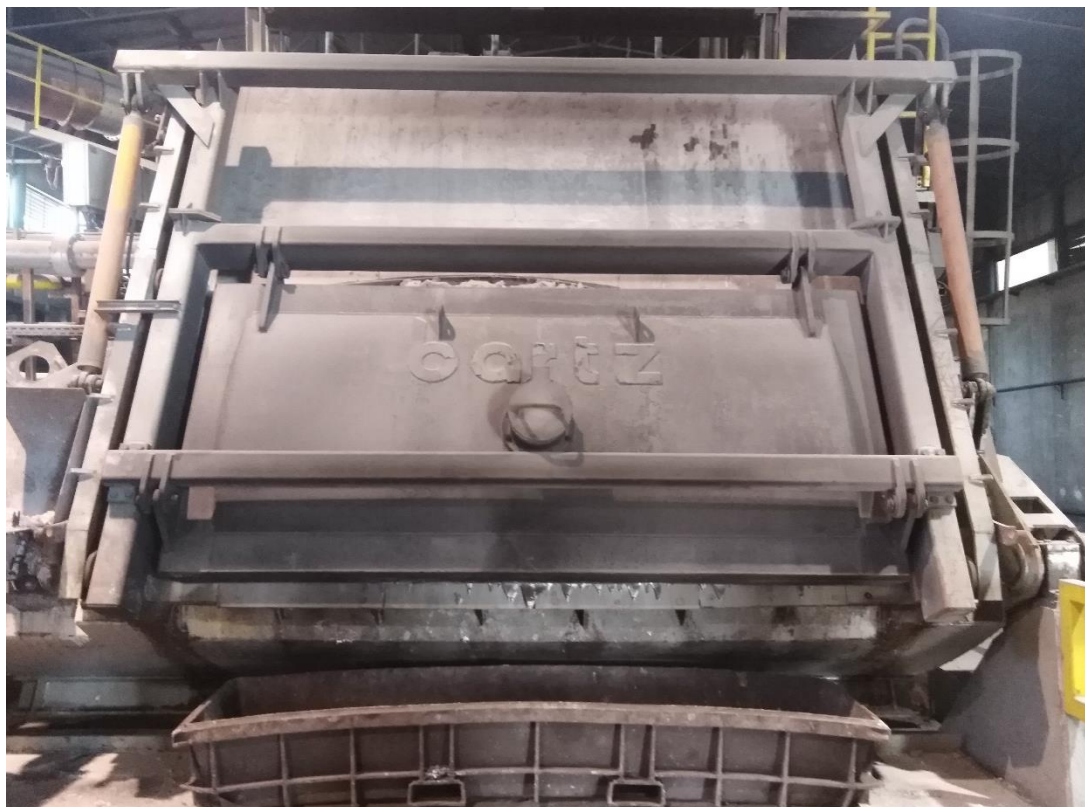
U tablici 2. prikazana je prosječna potrošnja sirovine i goriva utrošenih za taljenje aluminija u rotacijskoj nagibnoj peći za 2018. godinu.

Tablica 2. Prosječna potrošnja sirovine i goriva utrošenih za taljenje aluminija u rotacijskoj nagibnoj peći za 2018. godinu.

Mjesec [2018. godina]	Količina sirovine [kg]	Sol+Sirovina [kg]	Dobiveni metal [kg]	Zemni plin [m ³]	Kisik [m ³]	Omjer kisik/plin [-]	Trajanje šarže [hh:mm]	Potrošnja plina m ³ /mt (sirovina +sol)	Potrošnja plina [m ³ /mt] sirovine	Potrošnja plina [m ³ /mt] metala
Siječanj	5 892	6 487	3 966	346,85	688,25	1,98	4:45	53,63	59,07	89,58
Veljača	5 378	5 919	3 644	278,12	547,48	1,96	4:34	46,82	51,54	78,30
Ožujak	5 688	6 265	3 631	396,72	788,92	1,99	4:53	65,13	71,72	118,48
Travanj	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Svibanj	6 474	7 122	4 139	389,64	777,04	1,99	5:00	55,20	60,71	95,21
Lipanj	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Srpanj	6 248	6 875	4 048	372,64	744,25	2,00	5:04	54,82	60,33	94,87
Kolovoz	6 923	7 618	4 788	359,77	717,77	2,00	6:14	47,26	52,02	75,31
Rujan	5 566	6 125	3 772	293,5	585,91	2,00	4:26	50,32	55,37	83,98
Listopad	6 741	7 422	3 951	309,57	616,57	1,99	4:48	42,92	47,23	94,30
Studeni	6 206	6 833	3 929	359,59	720,46	2,00	5:00	54,51	60,16	97,09
Prosinac	5 834	6 420	3 710	377,13	752,21	1,99	4:52	58,59	64,49	102,39
Ukupna godišnja potrošnja	60 950	67 086	39 578	3 483,53	6 938,86	x	x	529,20	582,64	929,51
Prosječna mjesečna potrošnja	6 095	6 708,6	3 957,8	348,353	693,886	1,99	4:57	52,92	58,264	92,95

3.2. Peć za držanje taline aluminija

Peć za držanje taline aluminija tvrtke Bartz Maschinen -und Anlagenbau, prikazana na slici 34., služi za korekciju kemijskog sastava, odnosno legiranje i homogenizaciju taline te kontroliranu opskrbu uređaja za lijevanje taline u kokile. Sustav se sastoji od peći za držanje taline i redukcijske stanice za mjerenje i regulaciju protoka zemnog plina.



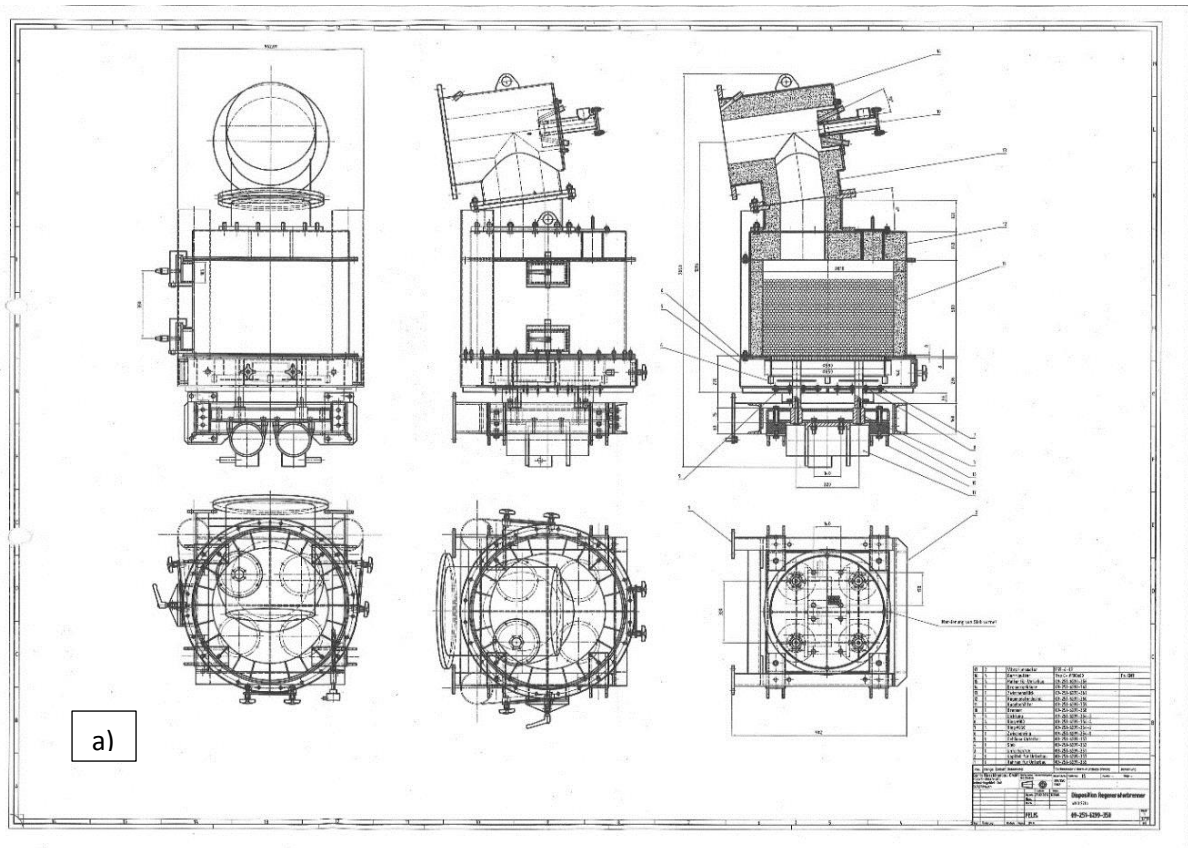
Slika 34. Peć za držanje taline u tvornici CIAL d.o.o.

U tablici 3. prikazani su operativni parametri peći.

Tablica 3. Operativni parametri peći za održanje taline u tvornici CIAL d.o.o.

Kapacitet peći	27 000 kg
Temperatura taline	700 – 750 °C
Temperatura dimnih plinova na izlazu iz peći	~ 1000 °C

Zagrijavanje se provodi pomoću dva regenerativna gorionika s keramičkim kuglicama koje služe za akumuliranje topline za vrijeme prolaska izlaznih dimnih plinova kroz gorionik. Vrijeme reverziranja rada gorionika iznosi oko 5 sekundi. Gorionici su ugrađeni u bočnim zidovima peći, koriste zemni plin kao energent, a zrak kao oksidacijsko sredstvo. Na slici 35. a prikazan je sklopni crtež tehničke dokumentacije regenerativnog gorionika.



Slika 35. a) Sklopni crtež regenerativnog gorionika na peći za držanje taline b) regenerativni gorionik u CIAL d.o.o.

U tablici 4. prikazana je prosječna potrošnja goriva utrošena na peći za držanje taline za 2018. godinu.

Tablica 4. Prosječna potrošnja goriva za peć za držanje taline

Mjesec [2018. godina]	Proizvedeno tona [t]	Utrošeno plina [Nm ³]	Potrošnja plina [Nm ³ /t] proizvedene taline
Siječanj	17 996	1 834,33	101,93
Veljača	23 661	1 775,8	75,05
Ožujak	20 820	1 513,29	72,69
Travanj	x	x	x
Svibanj	20 364	1 556,75	76,44
Lipanj	x	x	x
Srpanj	19 816	1 403,18	70,81
Kolovoz	21 505	1 476,67	68,67
Rujan	21 067	1 507,9	71,58
Listopad	24 175	1 517,33	62,76
Studeni	23 441	1 511,3	64,47
Prosinac	19 078	1 436,6	75,3
Ukupna godišnja potrošnja	211 923	15 533,15	739,7
Prosječna mjesečna potrošnja	21 192,3	1 553,315	73,97

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Mogućnosti povećanja energijske učinkovitosti na peći za taljenje

Peć za taljenje u tvrtki CIAL d.o.o. je rotacijska nagibna peć, što se razlikuje od uobičajene konstrukcije peći za taljenje aluminijske u Republici Hrvatskoj u kojima se aluminijski taljeni u kadi, a ložene su gorionicima sa zrakom kao oksidacijskim sredstvom. Prednost rotacijske peći u odnosu na peć s kadom je skraćeno vrijeme procesa taljenja, smanjenje specifične potrošnje goriva i postizanje jednoličnije temperature taline.

Konstrukcija i dimenzije radnog prostora prilagođene su za izgaranje zemnog plina s kisikom kao oksidacijskim sredstvom. Prema tome, ni jedno od prije navedenih rješenja za intenzifikaciju prijenosa topline nije primjenjivo na ovoj vrsti peći. Također nije moguća niti zamjena kisika sa zrakom kao oksidacijskim sredstvom.

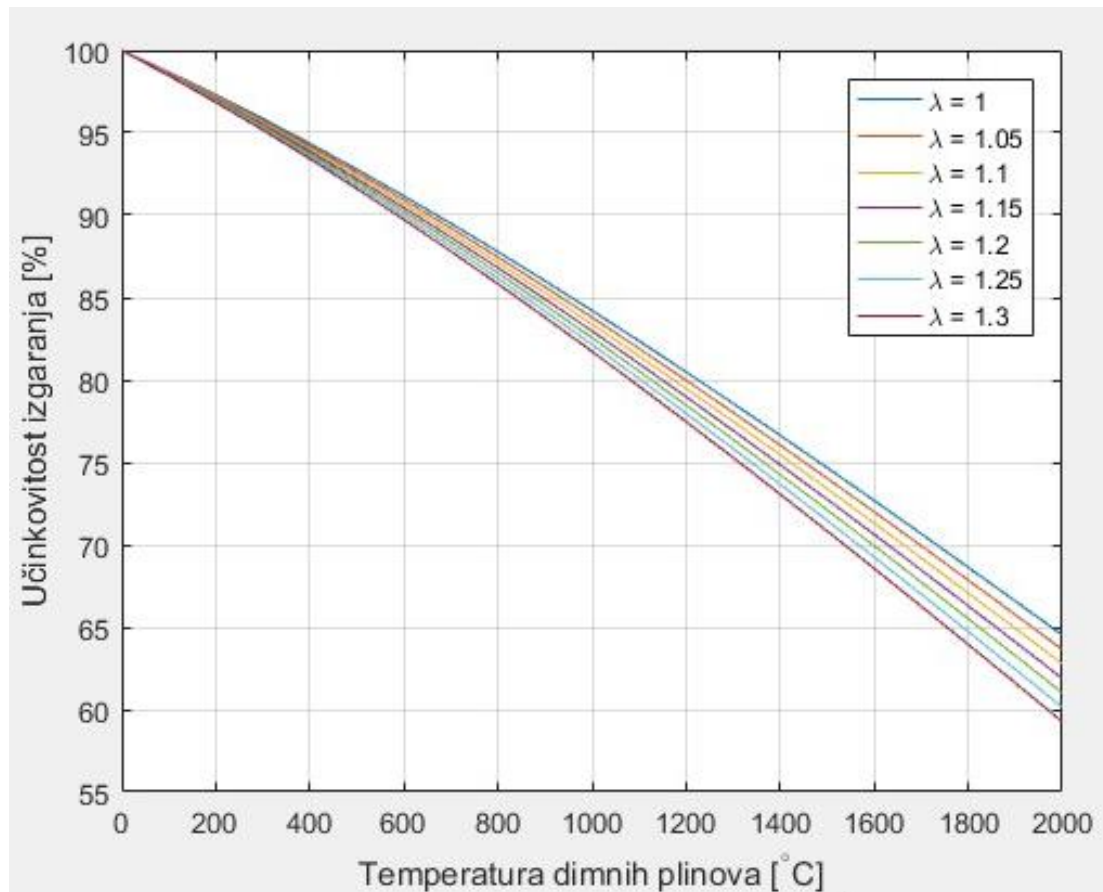
U ovom slučaju, jedino što bi se moglo predložiti, je redovita kontrola odnosa zemni plin/kisik. Naime, u slučaju nedovoljne količine kisika u dimnim plinovima dolazi do pojave neizgorjelih ugljikovodika čime se povećava specifična potrošnja zemnog plina. U slučaju dovodjenja veće količine kisika od optimalno potrebne dolazi do prekomjerne potrošnje kisika što povećava operativne troškove, a s druge strane, stvara se visokotemperaturna oksidativna atmosfera, što povećava gubitak zagrijavanog materijala odgorom.

U svrhu analize učinkovitosti izgaranja proračuni se temelje na jednadžbi (2) i izgaranju zemnog plina niže ogrjevne vrijednost $H_i = 34,18 \text{ MJ/Nm}^3$. Sastav zemnog plina prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Sastav zemnog plina

CH ₄	97 %
C ₂ H ₆	2,06 %
N ₂	0,80 %
CO ₂	0,14 %

U tu svrhu izrađen je dijagram (slika 36.) utjecaja temperature izlaznih dimnih plinova i viška kisika ($\lambda \geq 1$) na učinkovitost izgaranja (η_g).



Slika 36. Dijagram utjecaja temperature izlaznih dimnih plinova i pretička kisika ($\lambda \geq 1$) na učinkovitost izgaranja

Na osnovi podataka iz dijagrama prikazan je utjecaj učinkovitosti izgaranja na potrošnju kisika i operative troškove u slučaju veće količine kisika od optimalno potrebne.

Uz pretpostavljenu temperaturu dimnih plinova na izlazu iz peći 1200 °C te uz pretičak kisika $\lambda = 1$, učinkovitost izgaranja iznosi 82 %, dok uz pretičak kisika $\lambda = 1,3$, učinkovitost izgaranja iznosi 77 %.

Iz navedenih podataka proizlazi da se povećanjem pretička kisika λ , od vrijednosti 1 do 1,3, učinkovitost izgaranja smanji za 5%. To ujedno znači i povećanu potrošnju goriva i kisika za 5 %.

S obzirom da ogrjevna vrijednost dobavnog zemnog plina varira unutar 10 %, nameće se potreba kontinuirane kontrole koncentracije kisika u izlaznim dimnim plinovima kako bi se pravovremeno mogao kontrolirati odnos kisik/zemni plin. Od raspoloživih uređaja za mjerenje koncentracije kisika u dimnim plinovima mogla bi se preporučiti ugradnja kisikove sonde.

Ekonomska analiza potrošnje

Prema podacima iz tablice 2., godišnja potrošnja kisika za 2018. godinu iznosila je 6 938,86 m³, dok je za zemni plin iznosila 3 483,53 m³. Uzimajući u obzir tržišnu cijenu kisika koja iznosi 12,55 kn/kg O₂, te cijenu zemnog plina koja iznosi 5,25 kn/kg plina, izračunata je godišnja potrošnja plina i kisika te trošak pri povećanju od 5 %. Dobiveni podaci prikazani su tablici 6.

Tablica 6. Potrošnja zemnog plina i kisika te troškovi pri povećanju potrošnje od 5 %

	Godišnja potrošnja [m ³]	Troškovi [kn]
Zemni plin ($\lambda=1$)	3 483,53	18 288,53
Zemni plin ($\lambda=1,3$)	3 657,71	19 202,96
Razlika	174,18	914,43
Kisik ($\lambda=1$)	6 938,86	87 082,70
Kisik ($\lambda=1,3$)	7 285,80	91 436,84
Razlika	346,94	4 354,14

Povećanjem potrošnje od 5 %, potrošnja kisika raste za 346,94 m³ godišnje, odnosno 4 354,14 kn, a zemnog plina za 174,18 m³, odnosno 914,43 kn. Godišnji trošak raste za 5 268, 57 kn.

4.2. Mogućnosti povećanja energijske učinkovitosti na peći za držanje taline

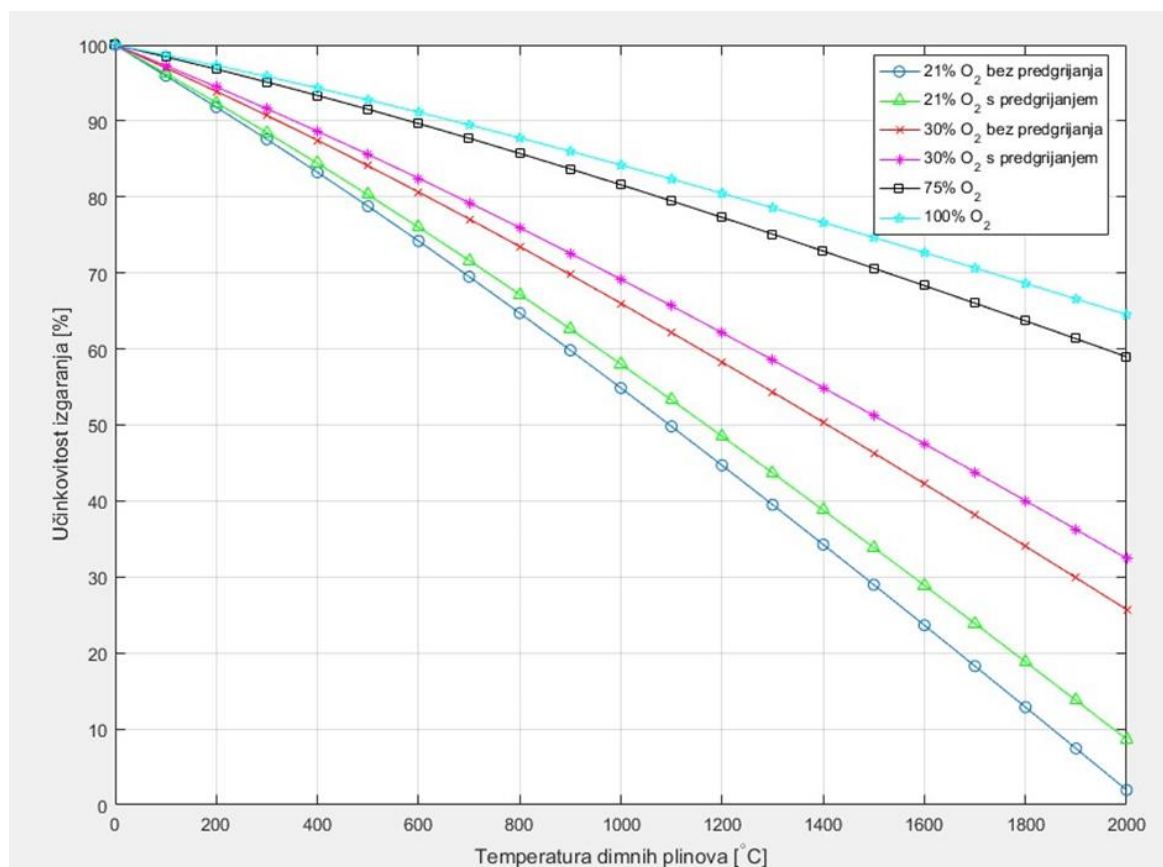
Na peći za držanje taline ugrađena su dva besplamena gorionika, tj. primjenjena je najsuvremenija tehnologija tzv. HiTAC tehnologija. Međutim, primijećeno je da je temperatura predgrijanog zraka relativno niska 300-400 °C. S obzirom na temperaturu dimnih plinova koji su oko 1000 °C, s takvim tipom gorionika mogla bi se realizirati viša temperatura predgrijanja zraka i do 800 °C (prema jednadžbi (1) i dijagramu na slici 27.).

Više temperature predgrijavanja zraka mogu se postići dužim vremenom reverziranja rada gorionika u odnosu na postojećih 5 sekundi. Optimalno vrijeme reverziranja u cilju postizanja maksimalne temperature predgrijanja zraka može se utvrditi eksperimentalno varirajući vrijeme reverziranja uz istovremeno mjerenje temperature predgrijanog zraka.

Razlog zašto se ne ide na više temperature predgrijanja zraka, a time i na više temperature izlaznih plinova, je uporaba postojećeg sustava za otprašivanje dimnih plinova, tj. sustava za izdvajanje krutih čestica s filter vrećama. Naime, taj sustav ne podnosi temperature dimnih plinova više od 200 °C.

U radu se analizira utjecaj povećanja temperature predgrijanja zraka, kao i eventualnog obogaćivanja zraka za izgaranje kisikom, na smanjenje specifične potrošnje zemnog plina, ne uzimajući u obzir postojeće postrojenje za otprašivanje i njegovu problematiku.

U tu svrhu, na temelju jednadžbe (2) konstruiran je dijagram (slika 37.) koji prikazuje utjecaj temperature izlaznih dimnih plinova na učinkovitost izgaranja za različite načine rada i vrste gorionika.



Slika 37. Učinkovitost izgaranja u odnosu na temperaturu dimnih plinova za različite količine kisika u zraku

Uporabom regenerativnih gorionika može se postići predgrijanje zraka od 800 °C, a dimni plinovi na izlazu iz gorionika bi se ohladili na oko 200 °C. Iz dijagrama na slici 37. vidljivo je da se praktično ista učinkovitost izgaranja u rasponu od 93-98% postiže s ili bez obogaćivanja zraka kisikom. Iz toga se može zaključiti da u ovom slučaju nema potrebe obogaćivati zrak kisikom jer to predstavlja dodatni trošak.

Međutim, iz istog dijagram vidljivo je da se značajno može povisiti učinkovitost izgaranja povišenjem temperature predgrijanja zraka s prosječnih 350 °C na 800 °C. Kod predgrijanja zraka na 800 °C, temperatura izlaznih dimnih plinova iznosi 200 °C te se postiže učinkovitost izgaranja od 93%. Predgrijanjem zraka na temperaturu od 350 °C, temperatura izlaznih dimnih plinova iznosi 650 °C, a učinkovitost izgaranja iznosi svega 74%.

Ukoliko se zrak za izgaranje predgrijava s dimnim plinovima temperature 1000 °C na temperaturu od 800 °C, postiže se učinkovitost izgaranja od 93%. Ušteda goriva koja se pri tome ostvari očitava se na dijagramu uštede goriva u ovisnosti o temperaturi izlaznih dimnih plinova i temperaturi predgrijanja zraka prikazanom na slici 28. te iznosi 38%.

Predgrijanjem zraka za izgaranje na uobičajenih 350 °C s dimnim plinovima temperature 1000 °C, ne postižu se optimalni učinci regenerativnog sustava zagrijavanja. U ovome slučaju učinkovitost izgaranja iznosi svega 74%, dok je ušteda goriva 20%.

Ekonomska analiza potrošnje

Prema podacima iz tablice 4., godišnja potrošnja zemnog plina za 2018. godinu iznosila je 15 533,15 m³. Uzimajući u obzir cijenu zemnog plina koja iznosi 5,25 kn/kg plina, izračunata je godišnja potrošnja plina te ušteda koja bi se mogla ostvariti primjenom drugačijeg zagrijavanja. Dobiveni podaci prikazani su tablici 7.

Tablica 7. Potrošnja i ušteda zemnog plina

	Godišnja potrošnja [m ³]	Troškovi [kn]
Zemni plin (zrak predgrijan na 350 °C)	15 533	81 549
Zemni plin (zrak predgrijan na 800 °C)	12 737	66 870
Razlika (ušteda goriva)	2 796	14 679

Ušteda goriva koja se ostvari predgrijavanjem zraka za izgaranja na višu temperaturu od uobičajene iznosi 18%, pri tome se godišnje ostvari ušteda zemnog plina za 2 796 m³, odnosno 14 679 kn.

U slučaju da bi se analizirala ekonomska isplativost uvođenja obogaćivanja zraka za izgaranje kisikom na peći za držanje taline, za izradu povrata navedene investicije mogla bi se primijeniti sljedeća metodologija:

- izmjeri se potrošnja goriva po satu pri određenoj temperaturi predgrijanja zraka i pretičku zraka;
- da bi se odredio trošak godišnje potrošnje goriva, potrošnja goriva po satu pomnoži se s godišnjim brojem radnih sati peći, a zatim se godišnja potrošnja goriva pomnoži s jediničnom cijenom goriva;
- na isti način se izračuna godišnji trošak za potrošnju kisika za izgaranje s kisikom;
- izračuna se ušteda goriva u postocima postignuta predgrijavanjem zraka, a zatim se izračuna godišnja ušteda goriva i godišnje smanjenje troškova za goriva;
- razdoblje povrata investicije određuje se tako da se trošak investicije i dodatni trošak za godišnju potrošnju kisika podijele s godišnjim smanjenjem troška za gorivo.

5. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane mogućnosti povećanja energijske učinkovitosti na peći za taljenje aluminijske i na peći za držanje taline aluminijske. Na peći za taljenje analizirao se utjecaj viška kisika na učinkovitost izgaranja i specifičnu potrošnju zemnog plina i kisika. Na peći za držanje taline analizirao se utjecaj povećanja temperature predgrijanja zraka za izgaranje na učinkovitost izgaranja i specifičnu potrošnju zemnog plina. Analize su provedene na način da su napravljeni dijagrami na temelju jednadžbi učinkovitosti izgaranja iz kojih su dobiveni podaci za ekonomsku analizu.

Upotrebom novih tehnologija zagrijavanja i iskorištavanjem topline nastalih dimnih plinova za predgrijavanje zraka te optimiranjem procesa izgaranja povisuje se energijska učinkovitost čime se smanjuje potrošnja goriva, ali se time i smanjuje negativan utjecaj procesa izgaranja na okoliš nižom emisijom NO_x.

Kod rotacijske peći za taljenje, s obzirom na konstrukciju peći i dimenzije radnog prostora koje su prilagođene za izgaranje zemnog plina s kisikom, ni jedno od navedenih rješenja za intenzifikaciju prijenosa topline nije primjenjivo. Također nije moguća niti zamjena kisika sa zrakom kao oksidacijskim sredstvom. U ovom slučaju, jedino što bi se moglo predložiti, je redovita kontrola odnosa zemni plin/kisik kako ne bi dolazilo do pojave neizgorjelih ugljikovodika u slučaju nedovoljne količine kisika, čime bi se povećala specifična potrošnja zemnog plina.

U slučaju dovođenja veće količine kisika od optimalno potrebne, kontrola odnosa zemni plin/kisik važna je kako ne bi dolazilo do prekomjerne potrošnje kisika. Time bi se povećavali operativni troškovi i stvaranje visokotemperaturne oksidativne atmosfere zbog koje bi bio povećan gubitak zagrijavanog materijala odgorom.

Također bi se mogla predložiti i ugradnja kisikove sonde za mjerenje koncentracije kisika u izlaznim dimnim plinovima kako bi se pravovremeno mogao kontrolirati odnos kisik/zemni plin.

Kod peći za držanje taline potrebno je održavati optimalan odnos zraka i goriva, s minimalnim viškom zraka kako bi se osiguralo potpuno izgaranje goriva te kako ne bi dolazilo do stvaranja neizgorjelih ugljikovodika. Postizanjem optimalnog λ u određenoj mjeri povećava se temperatura plamena i dimnih plinova, što nema veći utjecaj na povišenje temperature izlaznih plinova iz peći.

Višom temperaturom predgrijanja zraka na peći za držanje taline uz uštedu goriva, ostvaruje se istovremeno i smanjenje količine dimnih plinova iz regenerativnih gorionika, odnosno na ulazu u sustav za otprašivanje dimnih plinova. Razlog zašto se ne ide na više temperature predgrijanja zraka, a time i na više temperature izlaznih plinova, je uporaba postojećeg sustava za otprašivanje dimnih plinova s filter vrećama jer taj sustav ne podnosi temperature dimnih plinova više od 200 °C. Ukoliko bi se primjenjivalo predgrijanje zraka za izgaranja na više temperature, potrebno je razmotriti isplativost i mogućnosti zamjene filterskog postrojenja koje bi podržavalo više temperature izlaznih dimnih plinova.

6. LITERATURA

- [1] T. Pepelnjak; K. Kuzman; I. Kačmarčik; M. Plančak. Recycling of AlMgSi1 Aluminium Chips by Cold Compression, *Metalurgija*, **51**, 4 (2012) 509–512.
- [2] Y. Yang; Y. Xiao; B. Zhou; M. A. Reuter. Aluminium Recycling : Scrap Melting and Process Simulation, *Sustainable Developments in Metals Processing*, July (2005), 251–264.
- [3] G. T. S.Capuzzi; G. Timelli. Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review, *Metals*, **8**, 4 (2018), 249-274.
- [4] U.S. Department of Energy. U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspective, Theoretical Limits and Current Practices, *Industrial Technologies Program Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2007, 150.
- [5] European Commission. Integrated pollution prevention and control: Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, May (2005), 1–361.
- [6] D. Vrkljan. Elaborat gospodarenja otpadom, CIAL d.o.o., 2017.
- [7] T. Sofilić; I. Brnardić, Održivo gospodarenje otpadom otpadom, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.
- [8] https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=melting_furnaces, (22.7.2019.)
- [9] <https://nptel.ac.in/courses/112107144/24>, (22.7.2019.)
- [10] <https://www.tenova.com/product/casting-holding-furnace/>, (22.7.2019.)
- [11] <https://www.swifasia.com/aluminium-field-product/>, (22.7.2019.)
- [12] D. Fundurulja, Elaborat gospodarenja otpadom, 2018.
- [13] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/predavanje_4-1.pdf (1.5.2019.)
- [14] <http://www.redecam.com/wp-content/uploads/2015/01/Cyclone.jpg>, (1.5.2019.)
- [15] <http://www.best-filter.com/bag-filter-definition-and-classification/>, (1.5.2019.)
- [16] <http://www.handlair.co.in/products2.php>, (1.5.2019.)
- [17] Bureau of Energy Efficiency. Furnaces, 89-119.
<https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/2Ch4.pdf>.
- [18] J. G. Wüning; A. Milani. Handbook of Burner Technology for Industrial Furnaces. Vulkan-Verlag, Renningen, 2009.
- [19] A. Galović. Termodinamika 2. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [20] J. Ward; R. Collin. Industrial Furnace Technology. University of Glamorgan, Rio Tonto, Portugal, 2003.
- [21] N. Botica. Metoda proračuna izmjenjivača topline i njegova učinkovitost. Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Split, 2018.
- [22] C. E. Baukal, Jr. Heat Transfer in Industrial Combustion. CRC Press, Tulsa, Oklahoma,

2000.

- [23] B. Halasz. Uvod u termodinamiku, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [24] <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/>, (22.7.2019.)
- [25] S. K. Das. Improving Energy Efficiency in Aluminum Melting, Secat, Inc., 2007.
- [26] L. Lazić; D. Cerinski; J. Baleta; M. Lovrenić-Jugović. Improving Fuel Utilisation Efficiency by Oxygen-Enriched Air Combustion, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2019.
- [27] W.Trinks. Industrial Furnaces, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2004.
- [28] L. Lazić; A. Varga; J. Kizek; V. Brovkin. “Mogućnosti niske potrošnje energije u pećima za taljenje, legiranje i držanje aluminijskih legura.” Sisak.
- [29] L. Lazić; Ž. Grubišić. Utjecaj emisijskog faktora na energetske učinkovitost ljevaoničkih peći za taljenje aluminijske legure, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2013.
- [30] A. Šestan; N. Vladimir. Ispitivanje parnog kotla, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [31] L. Lazić; D. Cerinski; J. Baleta; M. Lovrenić-Jugović. Impact of Excess Air on Energy Efficiency of Industrial Open-Flame Furnance, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2018.
- [32] M. Kundak; A. Rađenović. Goriva i izgaranja. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [33] <http://www.angelfire.com/myband/mrinmoy/ezrot.html> (23.7.2019.)
- [34] ESA Pyronics, Regenerative burners: REGE-NxT, 2018, 1-19. <https://esapyronics.pl/wp-content/uploads/E3905E.pdf>
- [35] C. E. Baukal, Jr. Industrial Burners Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [36] L. Lazić; V. Brovkin; A. Varga; J. Kizek. Reduction of Energy Consumption and CO₂ Emissions through Increase of Combustion Efficiency, 2015.
- [37] https://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/1198856_6995.html, (14.6.2019.)
- [38] <https://www.airliquide.com/industry/oxy-combustion>, (14.6.2019.)
- [39] http://gta.gastechnology.org/combustion/cm_dm_c, (14.6.2019.)
- [40] L. Lazić. Numeričke metode u toplinskoj analizi, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2007.

7. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime: Lorena Mrkobrađa, univ. bacc. ing. met.
Datum i mjesto rođenja: 26. prosinac 1992., Sisak
Adresa: Andrije Hebranga 25, 44000 Sisak
Telefon: 099 504 18 82
e-mail: lorena.mrkobrađa@gmail.com

OBRAZOVANJE:

1999.-2007. Osnovna škola „22. lipanj“ Sisak
2007.-2011. Tehnička škola Sisak, ekološki tehničar
2012.-2017. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij
Metalurgija, smjer Industrijska ekologija
2017.-2019. Metalurški fakultet Sisak, diplomski sveučilišni studij
Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

VJEŠTINE:

Rad na računalu: Dobro poznavanje operativnog sustava Windows, korištenje
paketnog programa MS Office
Strani jezik: Engleski (aktivno), Njemački (pasivno)