Analiza mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova u industrijskom postrojenju korištenjem alternativnih goriva

Verbić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:886596

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Verbić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Milan Vujanović, dipl. ing.
Doc. dr. sc. Jakov Baleta, dipl. ing.

Student:

Matija Verbić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru izv.prof.dr.sc Milanu Vujanoviću dipl.ing i komentoru doc.dr.sc. Jakovu Baleti dipl.ing. na pruženoj pomoći, savjetima i strpljenju kod izrade ovog diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju i podršci tijekom cijelog školovanja.

Matija Verbić

Ovaj diplomski rad izrađen je unutar projekta Razvoj sustava za ispitivanje višefaznih strujanja i izgaranja s ciljem povećanja istraživačkih aktivnosti znanstvenog i poslovnog sektora, KK.01.1.1.04.0070., sufinanciranog od strane Europske unije, sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija 2014.−2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA VERBIĆ** Mat. br.: 0035207721

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova u industrijskom postrojenju korištenjem alternativnih goriva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of measures to reduce greenhouse gas emissions in an industrial plant using alternative fuels**

Opis zadatka:

Efekt staklenika glavni je uzročnik klimatskih promjena. Neki plinovi poput ugljikova dioksida (CO_2), metana, dušikova oksida i fluoriranih plinova u Zemljinoj atmosferi djeluju slično kao staklo u staklenicima odnosno zadržavaju sunčevu toplinu. Na taj način uzrokuju globalno zagrijavanje te predstavljaju jedan od najozbiljnijih problema s kojima se čovječanstvo danas mora suočiti. CO_2 nastao ljudskim aktivnostima i izgaranjem fosilnih goriva najviše pridonosi globalnom zagrijavanju. Njegova je koncentracija u atmosferi 2020. bila 48 % viša nego u predindustrijsko vrijeme. Energetske intenzivne industrije, poput industrije cementa, predstavljaju glavne svjetske proizvođače emisija stakleničkih plinova. Stoga, u okviru ovog diplomskog zadatka je potrebno istražiti te pregledno prikazati mjere koje je potrebno poduzeti da bi se smanjila emisija stakleničkih plinova u cementnoj industriji. U radu treba prikazati kolika je trenutna potrošnja energije te emisija CO_2 emisija u jednom odabranom industrijskom postrojenju cementne industrije u Republici Hrvatskoj. Potrebno je analizirati i izračunati potencijale smanjenja emisija ugljikova dioksida upotrebom alternativnih CO_2 neutralnih goriva kao nadomjestak fosilnim gorivima u odabranoj cementnoj industriji.

Diplomski rad treba sadržavati:
- opis postrojenja i djelatnosti koje se obavljaju u postrojenju
- opis izvora emisija stakleničkih plinova u industrijskom postrojenju
- opis metode za određivanje sastava alternativnih goriva
- izračun udjela biorazgradive komponente odabranog alternatinog goriva
- izračun emisijskih faktora fosilnih i alternativnih goriva
- izračun topline pri korištenju fosilnih i alternativnih goriva
- izračun emisija stakleničkih plinova.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
30. rujna 2021.	2. prosinca 2021.	13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:	Komentor:	Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Milan Vujanović	doc. dr. sc. Jakov Baleta	prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS OZNAKA V

POPIS KRATICA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. Cementna industrija 3

2.1 Cementna industrija u Hrvatskoj 3

2.2 Proizvodni proces cementa 6

3. OBVEZE CEMENTNE INDUSTRIJE U SVEZI SA STAKLENIČKIM PLINOVIMA 12

3.1. Trgovanje emisijama 13

3.2 EU ETS 15

3.2.1 Podjela dozvola 18

3.2.2 Praćenje i verifikacije emisija 19

4. MOGUĆNOSTI SMANJEJNA EMISIJA STAKLENIČKIH PLINOVA 21

4.1. Poboljšanje energetske učinkovitosti 21

4.2 Uporaba alternativnih goriva 24

4.2.1 RDF/SRF 27

4.2.2 Prednosti alternativnih goriva 31

5. Izračun potencijala smanjenja emisija CO_2 primjenom alternativnog goriva 32

5.1 Sastav i svojstva potencijalnog RDF/SRF goriva 32

5.1.1 Udio biorazgradive komponente 34

5.1.2 Emisijski faktor 35

5.1.3 Ogrjevna vrijednost goriva 37

5.2. Ulazni podaci cementare 40

5.3. Izračun potencijala smanjenja CO_2 42
5.3.1 Prvi slučaj: 30% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom 43
5.3.2 Drugi slučaj: 60% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom 46
5.3.3 Treći slučaj: 90% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom 48
5.4. Ekonomska analiza potencijalnih ušteda korištenjem alternativnog goriva 50
6. ZAKLJUČAK 53
LITERATURA 54

POPIS SLIKA

Slika 1. Proizvodnja cementa od 1950.g. [1] 3
Slika 2. Proizvodnja cementa i klinkera kroz godine [25] 4
Slika 3. Vrste korištenih goriva kroz godine [25] 4
Slika 4. Cementni prah [8] 6
Slika 5. Mlin za mljevenje sirovina [6] 7
Slika 6. Rotacijska peć [7] 8
Slika 7. Planetarni hladnjak klinkera [1] 9
Slika 8. Trgovanje emisijskim dozvolama [18] 14
Slika 9. Sustav trgovanja emisijama i oporezivanje u svijetu [12] 15
Slika 10. Ukupan broj dozvola po fazama [13] 18
Slika 11. Godišnji ciklus praćenja i verifikacije emisija [19] 19
Slika 12. Predgrijači sirovine [22] 22
Slika 13. RDF u obliku peleta [27] 27
Slika 14. Rotirajuće sito [26] 29
Slika 15. Zračna separacija [26] 30
Slika 16. Magnetna separacija [26] 30
Slika 17. Kalorimetar s bombom [40] 38
Slika 18. Petrol koks [47] 41
Slika 19. Usporedba emisija-slučaj 1 45
Slika 20. Usporedba emisija-slučaj 2 47
Slika 21. Usporedba emisija-slučaj 3 49
Slika 22. Ukupni troškovi po slučajevima 52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tržišni udjeli proizvođača cementa [4] 6
Tablica 2. Emisije u europskim cementarama [1] 11
Tablica 3. GWP faktori za razdoblje od 100 godina [11] 14
Tablica 4. Smanjenje besplatnih jedinica [16] 16
Tablica 5. Faktori pretička zraka [16] 24
Tablica 6. Toplinske vrijednosti goriva iz otpada [1] 26
Tablica 7. Sastav RDF-a za različite zemlje [26] 28
Tablica 8. Usporedba ugljena i RDF-a [24] 28
Tablica 9. Sastav komunalnog otpada [28] 32
Tablica 10. Sastav potencijalnog RDF/SRF goriva 33
Tablica 11. Sastav RDF/SRF goriva 33
Tablica 12. Udio biorazgradive tvari u RDF/SRF gorivu 34
Tablica 13. Emisijski faktori konvencionalnih goriva [36] 35
Tablica 14. Emisijski faktori sastavnica RDF/SRF goriva [37] 36
Tablica 15. Ogrjevne vrijednosti sastavnica alternativnog goriva [41][42] 39
Tablica 16. Specifične potrošnje energije 40
Tablica 17. Sastav petrol koksa 41
Tablica 18. Potrebne količine goriva - prvi slučaj 44
Tablica 19. Emisije CO_2 - prvi slučaj 45
Tablica 20. Potrebne količine goriva - slučaj 2 46
Tablica 21. Emisije CO_2 - drugi slučaj 47
Tablica 22. Potrebne količine goriva - slučaj 3 48
Tablica 23. Emisije CO_2 - treći slučaj 49
Tablica 24. Ukupni troškovi po slučajevima 51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
GWP	-	Potencijal globalnog zagrijavanja
Emisijski faktor (EF)	kg CO_2/GJ	Faktor emisije
Δh_d	GJ/t	Donja ogrjevna vrijednost
Δh_g	GJ/t	Gornja ogrjevna vrijednost
m	kg	Masa
Oksidacijski faktor (OF)	-	Faktor oksidacije
r_o	MJ/kg	Specifična toplina isparavanja vode
w	%	Maseni udio
λ	%	Faktor pretička zraka

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
AER	Annual Emission Report – Godišnje izvješće o emisijama
CFC-12	Klorfluorugljik
CGO	Centar za gospodarenje otpadom
CO	Ugljikov monoksid
CO_2	Ugljikov dioksid
ETS	Emissions trading system – Sustav trgovanja emisijama
EU	Europska unija
HCF-134a	Tetrafluoroetan (freon)
HCl	Klorovodik
HF	Fluorovodik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Međuvladin panel o klimatskim promjenama
N_2O	Dušikov oksid
NH_3	Amonijak
NIR	Near-Infrared senzor – Bliski infracrveni senzor
NO_x	Dušikovi oksidi
PFC	Fluorirani plinovi
PVC	Polivinil-klorid
RDF	Refuse-derived fuel – Gorivo dobiveno iz otpada
RH	Republika Hrvatska
SF_6	Sumporov heksafluorid
SO_2	Sumporov oksid
SRF	Solid recovered fuel – Kruto obnovljeno gorivo
UNFCCC	Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime

SAŽETAK

Emitiranjem stakleničkih plinova njihova koncentracija u atmosferi raste što uzrokuje efekt staklenika, odnosno klimatske promjene koje imaju sve veći utjecaj na život ljudi. U ovom radu prikazana je analiza mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova u odabranom industrijskom postrojenju korištenjem alternativnih goriva. Kao industrijsko postrojenje odabrana je energetski intenzivna cementna industrija koja emitira velike količine stakleničkog plina CO_2. U prvome dijelu rada opisana je cementna industrija te procesi koji se odvijaju kako bi se iz sirovine dobio konačan proizvod – cement, te su pritom opisani izvori štetnih i stakleničkih plinova i načini na koji se oni nastoje smanjiti. Opisane su i mogućnosti smanjenja emisija koje se temelje na poboljšanju energetske učinkovitosti i mogućnosti smanjenja emisija uporabom alternativnih goriva s naglaskom na gorivo iz otpada RDF/SRF.

Drugi dio rada sadrži proračun potencijala smanjenje stakleničkih plinova u cementnoj industriji uporabom RDF/SRF goriva čiji su sastav i svojstva određeni na temelju komunalnog otpada Republike Hrvatske. Prikazan je izračun udjela biorazgradive komponente, emisijskog faktora i ogrjevne vrijednost alternativnog RDF/SRF goriva. Potencijal smanjenja stakleničkih plinova prikazan je na 3 scenarija u kojemu su različiti udjeli potrebnog konvencionalnog goriva zamijenjeni RDF/SRF gorivom te je izrađena ekonomska analiza potencijalnih ušteda na troškovima goriva i troškovima dozvola za emitiranje u sklopu EU ETS sustava.

Ključne riječi: Cementna industrija, ugljični dioksid (CO_2), EU ETS, alternativna goriva, RDF, SRF

SUMMARY

By emitting greenhouse gases, their concentration in the atmosphere increases, which causes the greenhouse effect and climate change, which has an increasing impact on people's lives. This paper presents an analysis of measures to reduce greenhouse gas emissions in a selected industrial plant using alternative fuels. The energy-intensive cement industry, which emits large amounts of greenhouse gas CO_2, was chosen as the industrial plant. The first part of the paper describes the cement industry and the processes that take place to obtain the final product from the raw material – cement and describes the sources of air pollutants and greenhouse gases and the ways in which they are reduced. Possibilities of reducing emissions based on improving energy efficiency and possibilities of reducing emissions using alternative fuels with an emphasis on RDF/SRF waste fuels are also described.

The second part of the paper contains a calculation of the potential of reducing greenhouse gases in the cement industry using RDF/SRF fuels whose composition and properties are determined based on municipal waste of the Republic of Croatia. The calculations of the share of biodegradable component, emission factor and calorific value of alternative RDF/SRF fuel are presented. The potential reduction of greenhouse gases is shown in 3 scenarios in which different shares of the required conventional fuel are replaced by RDF/SRF fuel and economic analysis of potential savings on fuel costs and emission allowance costs within the EU ETS system is made.

Key words: Cement industry, carbon dioxide (CO_2), EU ETS, alternative fuels, RDF, SRF

1. UVOD

Posljedice klimatskih promjena svakim danom sve su više vidljive. Vremenski ekstremi-toplinski valovi i obilne kiše sve su češći, polarne ledene ploče sve se brže otapaju što dovodi do porasta razine mora, a prosječna temperatura raste. Klimatske promjene povezane su s povećanim brojem smrti ljudi uslijed velikih vrućina te velikim štetama na imovini zbog poplava uzrokovanih obilnim kišama. Ljudi imaju presudan utjecaj na klimatske promjene od 20. stoljeća, kada u tijeku industrijalizacije kreće korištenje fosilnih goriva-ugljena, prirodnog plina i nafte u svrhu dobivanja energije, a time i povećanje koncentracije ugljikovog dioksida (CO_2) u atmosferi. Sve do danas, udio ugljena i nafte u proizvodnji energije ostao je visok: 27.1% ukupne količine energije dobiva se izgaranjem ugljena, a 32.0% izgaranjem nafte [16]. Osim ugljikovog dioksida, u atmosferi kao posljedica ljudskog djelovanja rastu koncentracije i drugih stakleničkih plinova poput metana čija koncentracija raste uslijed povećanog uzgoja stoke, dušikovog oksida koji u atmosferu ulazi iz gnojiva koja ga sadrže i fluoriranih plinova. Veća koncentracija stakleničkih plinova (koncentracija ugljikova dioksida bila je 48% viša 2020. nego u vrijeme prije industrijalizacije) povećava efekt staklenika čime sve više energije ostaje zarobljeno u atmosferi što za posljedicu ima povećanje prosječne temperature [29],[30]. Kako bi se klimatske promjene zaustavile, a time i ograničila šteta nanesena prirodi, u sklopu Ujedinjenih naroda potpisan je Kyoto protokol kojim se nastoje ograničiti i smanjiti emisije stakleničkih plinova putem više mehanizama od kojih je mehanizam trgovanja emisijama najuspješniji. Predvodnik u borbi s klimatskim promjenama danas je Europska unija koja putem paketa mjera kojima se potiče uporaba obnovljivih izvora energije i povećanje energetske učinkovitosti u kombinaciji sa sustavom za trgovanje emisijama (EU ETS) nastoji prestati koristiti fosilna goriva i ostvariti ugljičnu neutralnost do 2050. godine i na taj način doprinijeti cilju zadržavanja porasta prosječne temperature od 2 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje u skladu s Pariškim sporazumom [31].

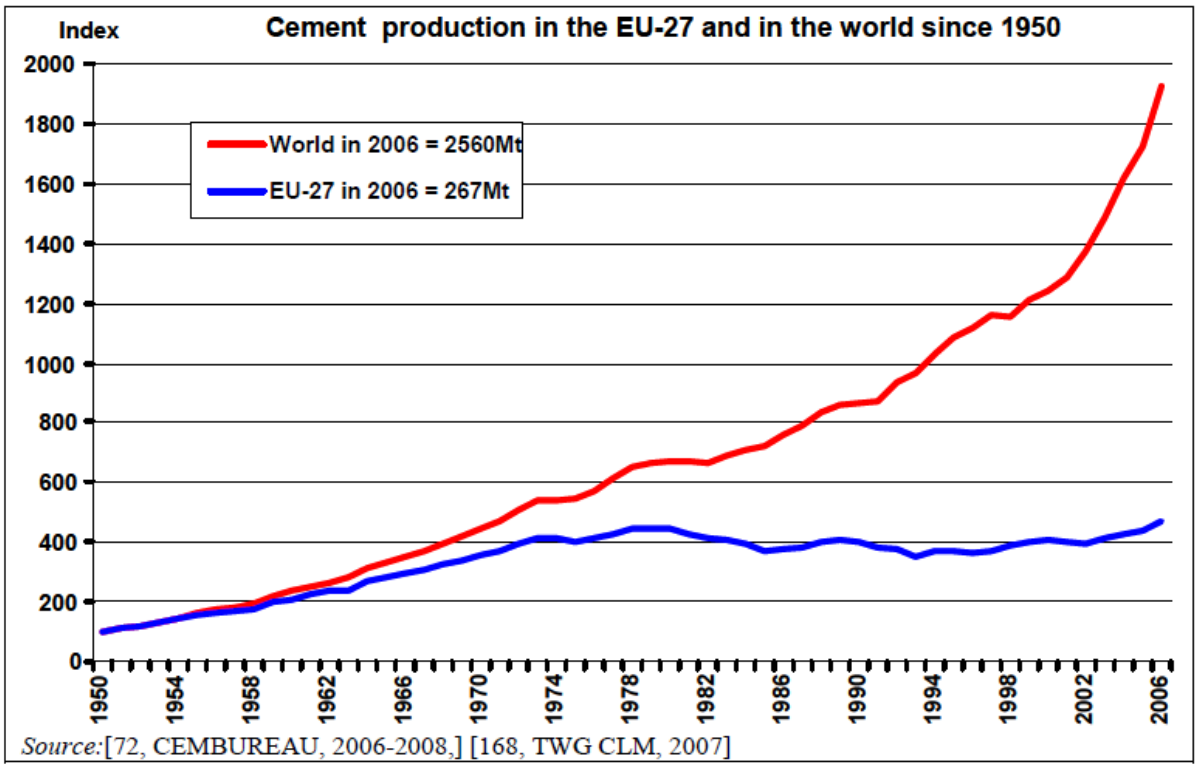
Industrijska proizvodnja odgovorna ja za približno 25% potrošnje ukupne energije, a kako se više od polovine energije dobiva iz fosilnih goriva, industrijska proizvodnja je odgovorna za emitiranje velikih količina stakleničkih plinova [16]. Većina stakleničkih plinova iz industrije nastaje kao posljedica kemijskih reakcija koje nastaju kod transformacije sirovina u proizvode i zbog izgaranja fosilnih goriva. Energetski intenzivne industrije uz transport glavni su generatori velikih emisija CO_2 [33].

U energetski intenzivne industrije spada cementna industrija kod koje emisije stakleničkih plinova nastaju uslijed kemijskih procesa proizvodnje klinkera za što je potrebna i velika količina topline koja se osigurava izgaranjem goriva među kojima se najviše koriste ugljen i koks [1].

U ovom diplomskom radu bit će predstavljena cementa industrija i njezin proizvodni proces s emisijama stakleničkih plinova koji pritom nastaju te mogućnosti smanjenja istih s naglaskom na izračun mogućnosti smanjenja emisija korištenjem alternativnih goriva.

2. Cementna industrija

Cement je osnovni materijal u građevinskoj industriji. U Europi i svijetu najčešće se upotrebljava Portland cement koji je patentiran 1824. godine. Proizvodnja cementa direktno je povezana s građevinskom industrijom i općenitom ekonomskom situacijom te ona raste kontinuirano od 1950-ih godina, s povećanim rastom u Aziji i zemljama u razvoju (Slika 1.). 2005 godine, u cementnoj industriji u Europskoj uniji bilo je zaposleno oko 54 tisuće ljudi.

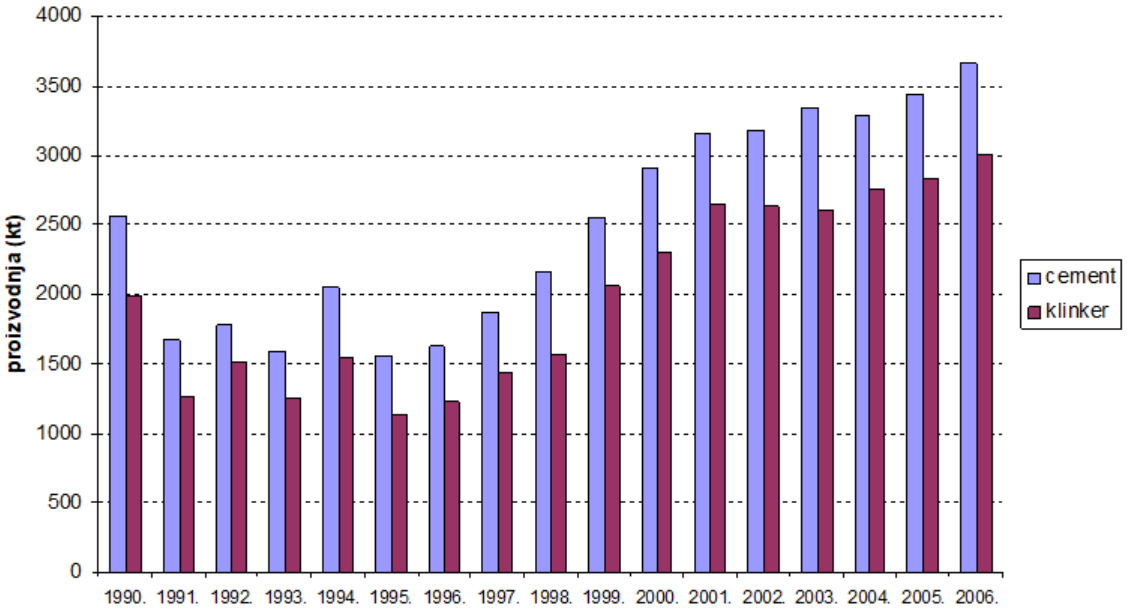


Slika 1. Proizvodnja cementa od 1950.g. [1]

U EU cement se najčešće transportira putem cesta te se smatra da je ekonomično transportirati cement putem ceste do najviše 300 km udaljenosti. Za transport na veće udaljenosti koristi se željeznički prijevoz, a ukoliko se cementara nalazi kraj more ili rijeke, cement se transportira i pomorski putem [1].

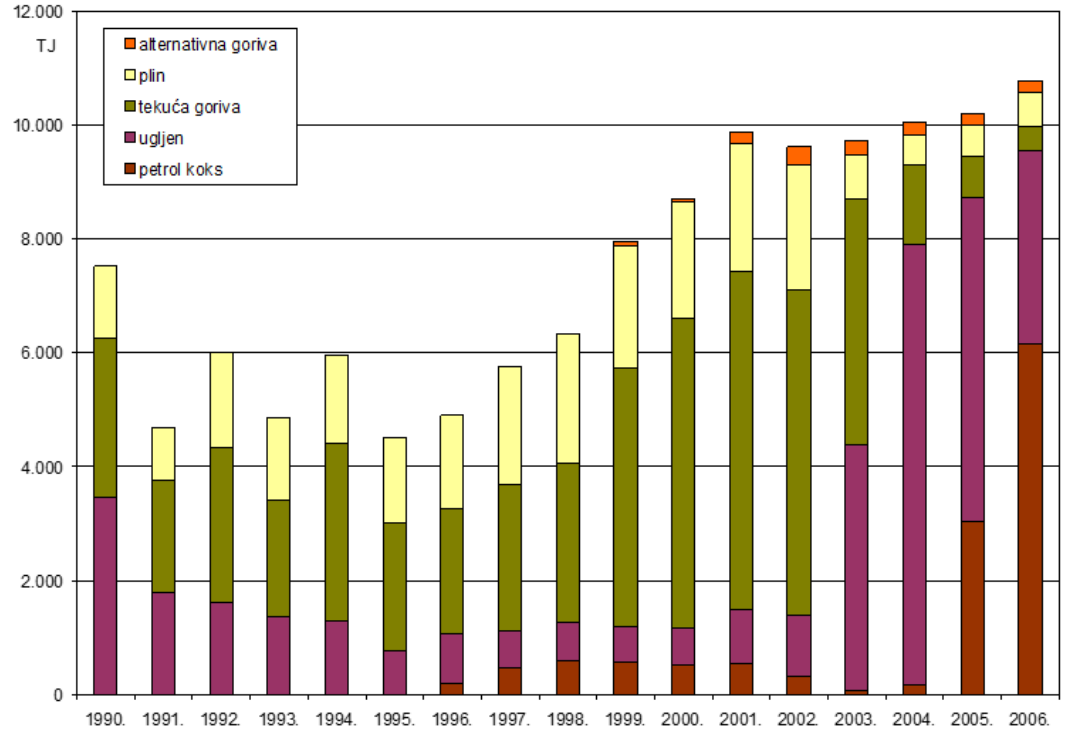
2.1 Cementna industrija u Hrvatskoj

Cementna industrija u Republici Hrvatskoj ima dugu tradiciju. Od izlaska Hrvatske iz Jugoslavije, cementna industrija je doživjela mnogobrojne promjene. Sredinom 1990-ih, broj konkurenata u cementnoj industriji je bio malen, a uvoz cementa nije postojao. Od 1995. godine raste proizvodnja cementa i klinkera što je vidljivo na slici 2.



Slika 2. Proizvodnja cementa i klinkera kroz godine [25]

Kao goriva za proces proizvodnje klinkera u početku najviše su se koristili ugljen, tekuća goriva (dizel) i prirodni plin. Početkom 2000-tih godina uz ugljen sve više se koristi petrol-koks, te dolazi do pojave korištenja alternativnih goriva, najčešće otpadnih ulja i guma (slika 3.)



Slika 3. Vrste korištenih goriva kroz godine [25]

Početkom 2000-tih raste broj konkurenata i investicija, a volumen prodaje je u razini proizvodnje te dolazi do pojave uvoza cementa sa stranih tržišta. Daljnjim rastom konkurencije, te zbog sve većeg uvoza, proizvođači se okreću kontinuiranom ulaganju u proizvodnju te brizi o odnosu s kupcima [2].

Usporedbom karakterističnih pokazatelja proizvodnje cementa među koje spadaju vrsta proizvodnog procesa, potrošnja sirovine, goriva, energetska efikasnost i udio klinkera vidljivo je da hrvatske cementare ne zaostaju puno u odnosu na Europu. Sav cement u Hrvatskoj se proizvodi suhim postupkom što je u skladu s najboljom dostupnom tehnologijom. Potrošnja sirovine u proizvodnji cementa iznosila je 1,64 t sirovine/t klinkera 2006. godine, dok je u Europi to bilo 1,57 t sirovine/t klinkera. Prosječni udio klinkera iznosi 77% u hrvatskim cementarama, 85% u europskim. Toplina potrebna za proizvodnju 1 tone klinkera iznosila je 3,38 GJ po toni klinkera, a potrošnja električne energije 113 kWh po toni cementa. Hrvatske cementare najviše zaostaju za europskim u korištenju alternativnih goriva. U 2006. godini samo 2% alternativnih goriva bilo je korišteno u hrvatskim cementarama, dok je u europskim razina uporabe alternativnih goriva bila na 18% [25]. Prema novijim podacima, udio alternativnih goriva u cementnoj industriji u Europi raste. U Austriji u pojedinim postrojenjima udio alternativnih goriva iznosi preko 70%, dok je u Njemačkoj prosječni udio alternativnih goriva u proizvodnji cementa iznosio 63% u 2014. godini [26]. Za razliku od Europe, U Hrvatskoj je primjena alternativnih goriva i dalje na niskim razinama. Prema zadnje dostupnom izvještaju o održivom razvoju, u cementarama Cemex u 2018. godini svega 1.1% alternativnih goriva je korišteno kod proizvodnje cementa [45]. U cementari Holcim udio korištenja alternativnih goriva za 2015. godinu je viši – 16%, što je i dalje daleko od europskih prosjeka. Pritom najviši udio imaju otpadne gume, gorivi otpad i otpadna maziva ulja [46].

Proizvođači cementa u Hrvatskoj danas su udruženi u Croatia Cement (Udruženje hrvatskih tvornica cementa). Četiri glavna proizvođača cementa su [3]:

- Cemex Hrvatska d.o.o. – 3 tvornice: tvornica Sv. Kajo koja proizvodi cement od 1904. godine, tvornica 10. kolovoz koja posluje od 1908. godine, te tvornica Sv. Juraj koja je otvorena od 1912. godine
- NEXE d.d. – 1 tvornica u Našicama otvorena 1980. godine
- Holcim d.o.o. – tvornica otvorena u Koromačnu 1926. godine
- Calucem d.o.o. – tvornica za proizvodnju aluminatnog cementa u Puli od 1925. godine

Udruženje brine o održivom razvoju cementne industrije – hrvatske tvornice cementa u sklopu udruge sudjeluju u Svjetskoj inicijativi za održivost u industriji cementa te su se putem Izjave o održivom razvoju obvezale posebnu brigu voditi o zaštiti klime, zdravlja i biološke raznolikosti. Udruženje sudjeluje i u procesu provođenja i regulaciji zakona i normi vezanih za cementnu industriju u RH.

Tržišni udjeli pojedinih proizvođača cementa vidljivi su u tablici 1.

Tablica 1. Tržišni udjeli proizvođača cementa [4]

Rang	Proizvođač	Tržišni udio
1	CEMEX Hrvatska d.d.	37,823%
2	NEXE d.d.	27,275%
3	Holcim (Hrvatska) d.o.o.	17,702%
4	Calucem d.o.o.	16,963%
5	„FERT-MONT“ PROIZVODNO TRGOVAČKI OBRT	0,136%
6	TERRA ISTRIANA UMAG d.o.o.	0,098%

2.2 Proizvodni proces cementa

Cement se u može definirati kao vezivni materijal koji se najviše koristi u niskogradnji i visokogradnji. U svom izvornom stanju, cement je prah (Slika 4.) koji se stvrdnjava kad je pomiješan s vodom.



Slika 4. Cementni prah [8]

Postupci proizvodnje cementa mogu se podijeliti na mokri, polusuhi i suhi proces koji se razlikuju po stanju u kojem se nalazi sirovina-kod mokrog procesa, sirovina u peć ulazi kao suspenzija, odnosno kaša, kod polusuhog procesa sirovina je u obliku grudica, a kod suhog procesa sirovina je u obliku suhog praha. Da li se za proces proizvodnje koristi mokri, polusuhi ili suhi proces ovisi o stanju sirovine – mokri proces uobičajeno se koristi kad je udio vlage u sirovini veći od 20%. Preko 90% proizvodnje cementa u Europi zasniva se na suhom procesu za koji je potrebno manje energije u odnosu na mokri proces. Za sva tri procesa zajednički su koraci proizvodnje, a to su [1],[5]:

1. Drobljenje i mljevenje sirovine - sirovine dopremljene iz kamenoloma najčešće kamionima, željezničkim prijevozom ili pokretnim trakama (vapnenci, škriljevci, gline) prvo je potrebno analizirati kako bi se odredio njihov kemijski sastav o kojemu ovisi kvaliteta konačnog proizvoda, a zatim se otpremaju na mljevenje. Sirovine se prvo drobe te se zatim melju u rotirajućim mlinovima (Slika 5.) koji sadrže čelične kuglice kako bi ulazna sirovina u rotacijsku peć nakon miješanja bila što homogenija i odgovarajućeg sastava. Miješanje materijala u odgovarajućem omjeru-vapnenaca i gline kod suhih postupaka osigurava se komprimiranim zrakom, a kod mokrog postupka miješanje se provodi mehaničkim putem i/ili komprimiranim zrakom. Nakon mljevenja sirovine prolaze kroz separator kako bi veličina čestica bila optimalna što je bitno za proces izgaranja. Kod suhog procesa potrebno je prije mljevenja osušiti sirovine u rotacijskim sušilicama pomoću ispušnih plinova iz peći, dok se kod mokrog procesa dodaje voda kako bi se stvorila kaša.



Slika 5. Mlin za mljevenje sirovina [6]

2. Klinkerizacija - proces klinkerizacije provodi se u pećima. Najčešće se danas upotrebljavaju rotacijske peći (Slika 6.), premda su ponegdje u uporabi i modernizirane osovinske peći. Prije samog ulaska u peć, materijal se predgrijava u izmjenjivačima topline kako bi se povećala energetska učinkovitost. Rotacijske peći duge su do 200 metara, s promjerom do 60 metara kod mokrog postupka, dok su kod suhog postupka kraćeg promjera. Os rotacijske peći nagnuta je nekoliko stupnjeva te peć rotira brzinom između 0,5 do 5 okretaja u minuti što pomaže materijalu da se polako kreće pomoću gravitacije s gornjeg kraja peći na donji. Za odvijanje procesa klinkerizacije, temperature u peći moraju biti između 1400 i 1500 °C s temperaturom plamena oko 2000 °C, što se najčešće postiže izgaranjem ugljena, loživog ulja ili prirodnog plina. Za proces klinkerizacije potreban je i kisik pa je potrebno osigurati ulazak zraka u zonu sinteriranja klinkera. Na visokim temperaturama uz prisutnost kisika, minerali formiraju kristale kalcij-silikata koji se još nazivaju klinkeri. U Europi kapacitet tipične rotacijske peći iznosi od 3000 do 5000 tona klinkera dnevno, a sve moderne cementare opremljene su sustavom regulacije izgaranja kako bi se povećala energetska učinkovitost. Proces klinkerizacije odgovoran je za 90% emisija CO_2 kod proizvodnje cementa - oko 50% emisija CO_2 nusproizvod je kemijskih reakcija kod proizvodnje klinkera, a 40% emisija stvara se izgaranjem goriva.



Slika 6. Rotacijska peć [7]

3. Hlađenje i mljevenje klinkera - nakon izlaska iz rotacijske peći, klinkeri se hlade u struji zraka kako bi njihova temperatura bila dovoljno niska za daljnje korake. Osim hlađenja klinkera, zadatak svakog hladnjaka je povrat što veće količine topline koja se koristi za zagrijavanje zraka prije ulaska u rotacijsku peć. Za hlađenje se koriste dva tipa hladnjaka: rotacijski (cijevni i planetarni) i rešetkasti (s putujućom/pokretnom ili kliznom rešetkom). Rotacijski cijevni hladnjak sličan je rotacijskoj peći te je opremljen podizačima za raspršivanje klinkera u struji zraka dok se planetarni hladnjak (Slika 7.) sastoji od uobičajeno 9 ili 11 cijevi.



Slika 7. Planetarni hladnjak klinkera [1]

Hlađenje klinkera rešetkastim hladnjacima odvija se na način da se kroz sloj klinkera koji leži na rešetci propuhuje zrak. Nakon hlađenja, klinkeri se pohranjuju u silosima ili zatvorenim halama iz kojih odlaze na mljevenje. Pri mljevenju, klinkerima se dodaje i odgovarajuća količina gipsa i drugih primjesa (troska, pepeo) koja se zajedno s njima melje u fini prah. Kod većine procesa, grublji materijal se izdvaja od praha te se vraća u mlin na ponovo mljevenje (mljevenje u zatvorenom krugu). Najčešće se za mljevenje koriste cijevni mlinovi s čeličnim kuglicama koji se nazivaju i kuglični mlinovi ili vertikalni mlinovi s valjcima.

Gotovi cementni prah pohranjuje se u silosima za što se koriste pneumatski ili mehanički transportni sustavi te se kasnije pakira u papirnate vreće ili spremnike za rasuti materijal.

Tijekom proizvodnje cementa u zrak se ispuštaju velike količine štetnih i stakleničkih plinova koji pridonose globalnom zatopljenu, a osim štetnih plinova, u zrak se ispušta i velika količina prašine. Najviše emisija u zrak se ispušta u procesu klinkerizacije kao posljedica kemijskih procesa te izgaranja goriva. Štetni i staklenički plinovi koji se oslobađaju kod proizvodnje cementa su [1]:

- CO_2 – Nastaje kao posljedica izgaranja i kemijskih procesa. Od 900 do 1000 kg CO_2 se emitira po toni proizvedenog klinkera, od čega veći udio zauzimaju emisije uslijed kemijske reakcije proizvodnje klinkera. Emisije CO_2 iz izgaranja goriva proporcionalne su s udjelom ugljika u gorivu, ogrjevnom vrijednošću goriva i specifičnom potrebnom toplinom. U posljednjih 25 godina, emisije su smanjene za 25%.
- NO_x – Nastaje tijekom procesa izgaranja na visokim temperaturama iz dušika iz goriva ili iz dušika koji je doveden putem zraka za izgaranje što je glavni izvor emisija. Na količinu emisija dušikovih oksida utječu temperatura izgaranja i faktor pretička zraka, oblik plamena, geometrija komore za izgaranje te sadržaj dušika u gorivu. Prosječne emisije NO_x u europskim cementarama iznose 785 mg NO_x/Nm^3.
- SO_2 – Ovisi o količini sumpora u sirovinama i gorivu. Dio sumpora iz sirovina veže se za klinkere, dok dio oksidira u predgrijaču te se emitira kao sumporni oksid. Sumpor iz goriva također oksidira u SO_2 koji se u procesu klinkerizacije veže na klinkere.
- HF – Emisije fluorovodika nastaju iz fluorida iz sirovina ili goriva.
- HCl – Emisije klorovodika nastaju iz klorida koji u sustav peći ulazi putem sirovine ili goriva.
- CO – Emisije ugljikova monoksida nastaju oksidacijom ostataka biljaka i organizama iz sirovine u procesu predgrijavanja sirovine ili kao posljedica lošeg izgaranja.

Kontinuiranim mjerenjem prati se volumen ispušnih plinova, vlažnost i temperatura, emisije O_2, NO_x, SO_2 i CO te količina prašine, dok se periodično mjere koncentracije metala (Hg – živa, Cd – kadmij, Ti – titanij), HCl, HF i NH_3.

Osim kontinuiranog praćenja emisija iz ispušnih plinova, tvornice cementa u Hrvatskoj prate i kakvoću zraka u okolici tvornica. Pritom se mjere koncentracije SO_2 i NO_x te čestica i teških metala [25].

U tablici 2. prikazane su prosječne emisije štetnih plinova i prašine za europske cementare.

Tablica 2. Emisije u europskim cementarama [1]

Prijavljene emisije štetnih plinova europskih cementara			
Štetni plin	**mg/Nm^3**	**kg/tona klinkera**	**tona godišnje**
NO_x	145-2040	0,33-4,67	334-4670
SO_2	do 4837	do 11,12	do 11125
CO	200-2000	0,46-4,6	460-11500
CO_2	-	otprilike 672 kg/tona cementa	1,5456 milijuna
HF	0,009-1,0	0,021-2,3 g/t	0,21-23,0
HCl	0,02-20,0	0,046-46 g/t	0,046-46
Prašina	0,27-227	0,00062-0,5221	0,62-552

3. OBVEZE CEMENTNE INDUSTRIJE U SVEZI SA STAKLENIČKIM PLINOVIMA

Cementna industrija jedan je od najvećih proizvođača stakleničkih plinova koji utječu na zagrijavanje planeta, odnosno potiču klimatske promjene. Kako bi se smanjio utjecaj čovjeka na klimatske promjene, u sklopu konvencije ujedinjenih naroda o promjeni klime (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC) 1997. godine izglasan je Kyoto protokol. Kyoto protokolom svaka zemlja koja ga je potpisala i ratificirala obvezala se na smanjenje emisija stakleničkih plinova u odnosu na emisije istih iz 1990. godine. Republika Hrvatska ratificirala je Kyoto protokol 2007., a osim samih obveza smanjenja emisija, njime su definirani i postupci koji omogućavaju ostvarenje zadanih ciljeva te sektori koji su obvezni smanjiti emisije stakleničkih plinova, a to su [10]:

- Energetski sektor;
- Industrijski procesi-pod koje spada cementna industrija;
- Upotreba otapala;
- Poljoprivreda;
- Gospodarenje otpadom.

Kako bi se olakšalo smanjenje emisija, Kyoto protokol propisuje i tri fleksibilna mehanizma kojima je cilj potaknuti zemlje na smanjenje emisija [9]:

- Mehanizam trgovanja emisijama - zemlje koje imaju viška prava stečenih na temelju vlastitih smanjenja mogu svoje emisije prodat drugoj zemlji;
- Mehanizmi čistog razvoja - potiču ulaganja u projekte za smanjenje emisija;
- Zajednička implementacija - suradnja zemalja u postizanju smanjenja emisija.

Za cementnu industriju u Hrvatskoj važeća su 3 zakona vezana za zaštitu zraka i klimatske promjene. To su [25], [21]:

- Zakon o zaštiti okoliša – Uređuje opće zakone o zaštiti okoliša, te propisuje načela i načine zaštite okoliša i odgovornosti ukoliko onečišćenje okoliša nastupi.
- Zakon o zaštiti zraka – Propisuje načine provođenja i nadzora zaštite zraka i poboljšanja njegove kakvoće. Također zakonom su određeni načini mjerenja i utvrđivanja kakvoće zraka, emisija i njihovih izvora te načini putem kojih se nastoji spriječiti i smanjiti onečišćenje zraka i klimatske promjene.

U sklopu zakona propisano je i na koji način se raspodjeljuju dozvole za emitiranje stakleničkih plinova te dozvole za trgovanje pravima za emitiranje stakleničkih plinova. U Republici Hrvatskoj sva su postrojenja koja ispuštaju stakleničke plinove dužna ishoditi dozvolu za emisije stakleničkih plinova te pratiti emisije iz postrojenja prema odobrenom planu praćenja te dostaviti verificirano izvješće Hrvatskoj agenciji za okoliš i prirodu. Kako bi postrojenje dobilo dozvolu za emisije stakleničkih plinova potrebno je ispuniti zahtjev za dozvolu koji sadrži: djelatnosti i način rada postrojenja, opis tehnologija koje se koriste, popis sirovina i pomoćnih materijala koji se koriste u proizvodnji, te izvore emisija stakleničkih plinova. Dozvolu su dužna imati sva postrojenja kod kojih su emisije stakleničkih plinova više od 25000 tona CO_{2e} ili imaju nazivnu toplinsku snagu veću od 35 MW. Ta postrojenja uključena su i u sustav trgovanja emisijama.

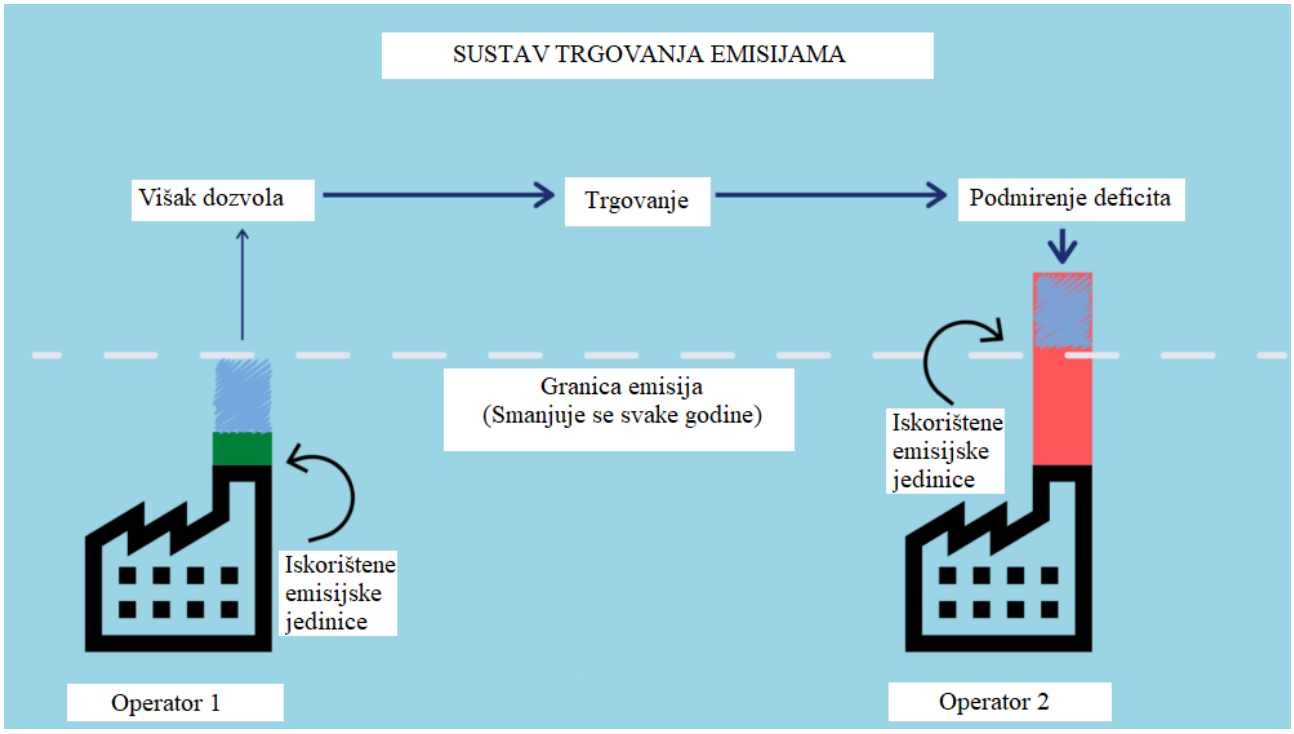
- Zakon o Fondu za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost – Zakonom je osnovan Fonda za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost putem kojega se pripremaju, provode i razvijaju programi za zaštitu i unaprjeđenje okoliša te programi za unaprjeđenje obnovljivih izvora energije i energetske učinkovitosti.

3.1. Trgovanje emisijama

Najuspješniji od tri mehanizma Kyotskog protokola je mehanizam trgovanja emisijama koji se temelji na „cap and trade“ trgovini, to jest trgovini dodijeljenim pravima (dozvolama za emitiranje) na domaćem ili međunarodnom tržištu.

Na početku svake godine, pojedina država određuje maksimalnu količinu emisije stakleničkih plinova kako bi ispunila svoje zadane ciljeve, te se zatim količine dodjeljuju operatorima koji sudjeluju u sustavu trgovanja emisijama (slika 8.), među koje spada i cementna industrija. Jedna izdana dozvola predstavlja 1 tonu emitiranog CO_2. Svaki operator prati emisije CO_2 te na kraju godine sastavlja izvješće o emisijama stakleničkih plinova. Ukoliko su emitirane emisije veće od dodijeljenih operator ima dvije opcije [10]:

- Plaćanje novčane kazne za prekoračenje emisije po dozvoli, odnosno toni CO_2;
- Kupnja dodatnih dozvola od operatora koji su ostvarili manje emisije CO_2 od danih dozvola.



Slika 8. Trgovanje emisijskim dozvolama [18]

CO_2 je uzet kao referentni plin, te pojedina izdana dozvola odgovara ekvivalentnu jedne tone CO_2, a količina, tj. masa ostalih stakleničkih plinova izračunava se prema sljedećoj formuli[10]:

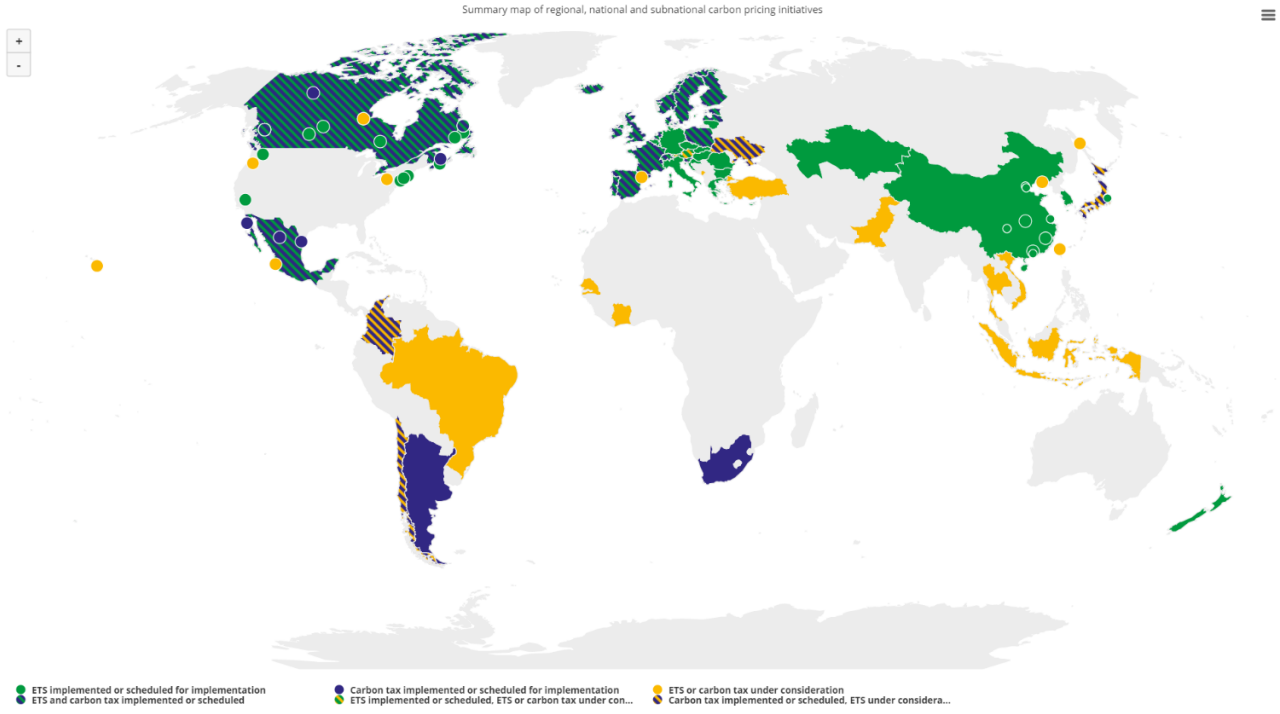
$$CO_{2e} = masa\ stakleničkog\ plina * GWP\ faktor \quad (1)$$

pri čemu GWP faktor (Global Warming Potential) označava koliko pojedini plin ima utjecaj na globalno zatopljenje, na primjer GWP faktor za N_2O iznosi 265 što znači da će ispuštanje 1 tone emisija N_2O imati jednak utjecaj na globalno zatopljenje kao 265 tona emisija CO_2. GWP faktori za pojedine plinove prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. GWP faktori za razdoblje od 100 godina [11]

Stakleнički plin	GWP faktor
CO_2	1
CH_4, fossil	28
CH_4, biogenic	25,25
N_2O	265
HCF-134a	1300
CFC-12	10200
SF_6	23500

Na slici 9. prikazane su države koje su implementirale trgovanje emisijama i/ili oporezuju emisije stakleničkih plinova. Također prikazane su države koje razmatraju uvođenje ili je uvođenje trgovanja emisijama u tijeku [12].



Slika 9. Sustav trgovanja emisijama i oporezivanje u svijetu [12]

3.2 EU ETS

EU ETS, odnosno European Union Emission Trading System prvi je sustav trgovanja emisijama u svijetu. U sustav su uključene sve zemlje članice Europske unije, a sustavu su se pridružili i Island, Norveška i Lihtenštajn. U sklopu EU ETS-a uključeno je 11000 postrojenja i zrakoplovnih kompanija čime se obuhvaća 50% ispušnih emisija stakleničkih plinova. Fokus je na emisijama koje se mogu mjeriti, odnosno koje je moguće ustvrditi i provjeriti s viskom razinom točnosti [13].

Prva faza EU ETS-a koja je započela 2005. godine služila je kao probno razdoblje kako bi se formirale cijene za izdane dozvole te kako bi se razvila odgovarajuća infrastruktura za praćenje, izvještavanje i provjeru emisija. Gotovo sve emitirane dozvole bile su besplatne, pratile su se emisije samo ugljikovog dioksida, a obuhvaćene su bile samo energetske intenzivne industrije pod koje je spadala i cementna industrija, odnosno proizvodnja klinkera.

Druga faza trajala je od 2008. do 2012. godine, a dodatno je obuhvaćala i zrakoplovne kompanije, te su se u ovoj fazi pridružili i Island, Norveška i Lihtenštajn. Osim ugljikovog dioksida, praćenje i izvještavanje o emisijama uključivalo je i didušikov oksid, te se broj besplatnih jedinica smanjio. Kazna za prekoračenje emisija povećana je s 40€/t CO_2 na 100€/t CO_2, a trgovanje neiskorištenim dozvolama odvijalo se na dražbama (aukcijama) [14].

Treća faza trajala je do 2020. godine. Ključne razlike u odnosu na prethodne dvije faze su bile [14],[15]:

- Jedinstveno ograničenje emisijskih dozvola (u prethodne dvije faze postajala su nacionalna ograničenja);
- Dozvole su se dodjeljivale putem dražbi (aukcija);
- Smanjenje besplatnih dozvola postupno s 80% u 2013. na 30% u 2020. prema tablici 4.

Tablica 4. Smanjenje besplatnih jedinica [16]

Udio besplatno dodjeljivanih dozvola po sektorima	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.
Proizvodnja električne energije	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Industrijski sektori	80%	72,90%	65,70%	58,60%	51,40%	44,20%	37,10%	30%
Industrijski sektori kod kojih postoji opasnost od preseljenja proizvodnje u zemlje bez ili s manjim nadzorom emisija	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

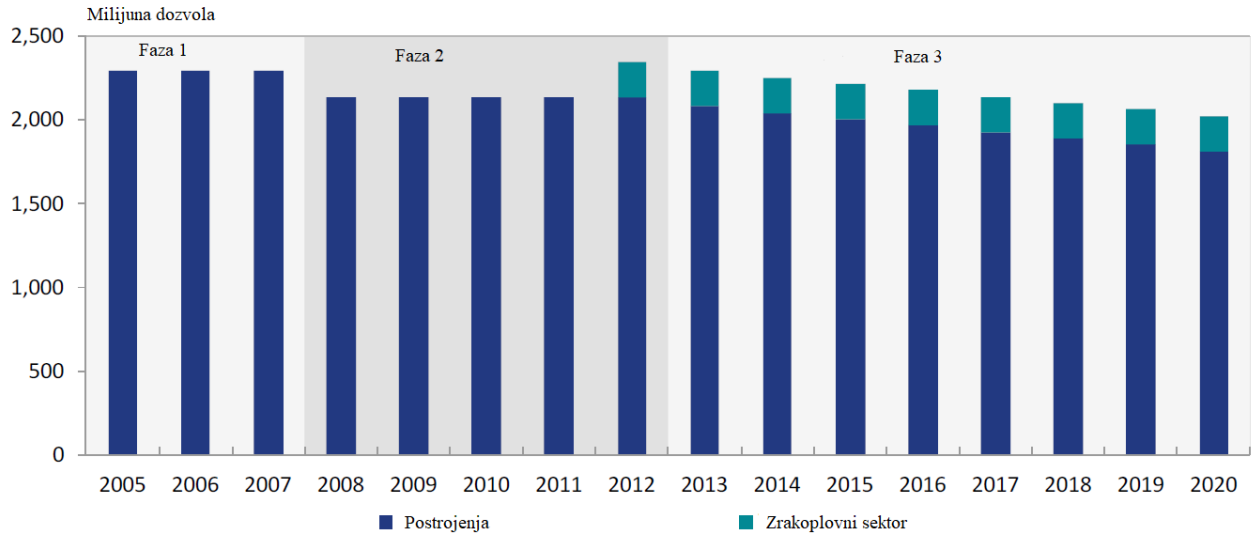
- Uključenje novih sektora-Proizvodnja aluminija, amonijaka, nitratne, adopinske i glioksilne kiseline, petrokemija;
- Uključenje novog stakleničkog plina-PFC (Fluorirani plinovi).

Od ove godine započela je faza 4 EU ETS-a. Da bi se ostvario cilj smanjenja emisije stakleničkih plinova za 2030. godinu, svi sektori uključeni u trgovanje emisijama moraju reducirati emisije za 43% u odnosu na razine iz 2005. godine. U navedenom razdoblju nastoje se potaknuti inovacije i uporaba zelene tehnologije, odnosno tehnologije s niskom razinom emisije stakleničkih plinova, čime se u isto vrijeme nastoji povećati broj radnih mjesta u tim sektorima. Uvedena su i nova pravila kojima se nastoji urediti bolje usklađivanje besplatnih emisijskih dozvola i stvarne razine proizvodnje, tako da će se količina emisijskih dozvola usklađivati i ispravljati jednom u godini dana kao odgovor na smanjenje ili povećanje proizvodnje. Prag prilagodbe postavljen je na 15% te se procjenjuje na temelju prosjeka proizvodnje u dvije godine. Sustav besplatne podjele emisijskih dozvola zadržat će se do 2030. godine, pritom će sektori koji imaju veći rizik od preseljenja proizvodnje izvan Europske unije i dalje dobivati besplatne dozvole, dok će se za sektore kod kojih je rizik preseljenja proizvodnje malen besplatne emisijske dozvole smanjivati od 2026. godine s 30% na 0% u 2030. godini. U 4. fazi uspostavljeni su i financijski mehanizmi kojima je cilj pomoći energetski intenzivnim industrijama i elektroenergetskom sektoru lakši prijelaz na nisko-ugljično gospodarstvo. To su [17]:

- Fond za inovacije-koji potiče inovativne tehnologije i proboj inovacija u industriji. Iznos dostupnih sredstava iznosit će najmanje 450 milijuna emisijskih dozvola;
- Fond za modernizaciju-koji podržava ulaganja u rekonstrukciju energetskog sektora i sustava, te povećanje energetske učinkovitosti s ciljem lakše tranzicije na nisko-ugljično gospodarstvo u 10 članica s nižim prihodima.

3.2.1 Podjela dozvola

Podjela dozvola za emitiranje emisija stakleničkih plinova vrši se podjelom besplatnih jedinica i putem aukcija. Ukupni broj dozvola ograničen je kvotom koja se svake godine smanjuje i na taj način se osigurava smanjenje emisija stakleničkih plinova kako bi se ostvarili zadani ciljevi (Slika 10.).



Slika 10. Ukupan broj dozvola po fazama [13]

U prve dvije faze ukupan broj dozvola određivao se prema nacionalnim planovima, a od faze 3 izrađuje se plan na razini Europske unije. Od faze 3. EU ETS-a kvota za postrojenja smanjivala se svake godine prema linearnom faktoru koji je iznosio 1,74%, dok u četvrtoj fazi koja sada traje taj faktor iznosi 2,2%. Ove godine ukupan broj dozvola za postrojenja iznosi 1.571.573.007 od kojih će se otprilike 57% podijeliti putem aukcija, a ostatak putem besplatnih dozvola, dok ukupan broj dozvola za zrakoplovni sektor iznosi 24,5 milijuna od kojih će besplatno biti podijeljeno 20,7 milijuna. Godišnje smanjenje dozvola prema linearnom faktoru iznosi 43.003.515 dozvola [34].

U prve dvije faze dodjeljivane su uglavnom besplatne dozvole, a od treće faze većina dozvola se dijeli putem aukcija, dok se besplatne dozvole dijele na temelju „benchmark“ metode. Popis postrojenja kojima će se dodjeljivati besplatne dozvole u sklopu 4. faze EU ETS-a procjenjivati će se i osvježavati svakih 5 godina, a određene su i 54 referentne (benchmark) vrijednosti koje određuju dodjelu besplatnih dozvola za pojedina postrojenja te će se te vrijednosti ažurirati 2 puta. Referentne vrijednosti za pojedini sektor odnosno proizvod temelje se na emisijama stakleničkih plinova u 10% najučinkovitijih postrojenja koja proizvode određeni proizvod te ne ovise o tehnologiji, gorivu, veličini ili geografskom položaju postrojenja.

Na taj način najučinkovitija postrojenja sve ili gotovo sve potrebne dozvole za emitiranje dobivaju besplatno, a neučinkovita postrojenja se potiče na investicije u svrhu smanjenja emisija.

Podjelom dozvola na aukcijama u praksu se stavlja načelo da svako postrojenje koje emitira stakleničke plinove treba za to i platiti. Aukcije su regulirane Uredbom o dražbi koja definira pravila aukcija kako bi se one odvijale na transparentan i nepristran način. Aukcija se odvija na način da tijekom perioda licitacije koji je otvoren barem 2 sata svaki kupac predaje ponudu s brojem dozvola koje želi kupiti po određenoj cijeni. Na kraju perioda licitacija, određuje se završna cijena, te sve ponude više od završne cijene se prihvaćaju od najviše prema najnižoj. Na aukcijama dozvola mogu sudjelovati [13]:

- Postrojenja;
- Investicijske grupe;
- Kreditne institucije.

3.2.2 Praćenje i verifikacije emisija

Kako bi EU ETS, odnosno trgovanje emisijama ispravno funkcioniralo, potreban je kvalitetan sustav za praćenje, izvještavanje i verifikaciju emisija stakleničkih plinova. Niz aktivnosti koje je potrebno obaviti za godišnje praćenje i verifikaciju prikazan je na slici 11.



Slika 11. Godišnji ciklus praćenja i verifikacije emisija [19]

Svi operatori uključeni u EU ETS dužni su tijekom godine pratiti emisije i dostaviti godišnje izvješće o emisijama (AER-Annual Emission Report), te moraju pripremiti plan praćenja emisija stakleničkih plinova. Plan praćenja emisija izrađuje se za procjenu sposobnosti operatora da na pravilan način izvješćuje o emisijama, a on sadržava opise kako se podaci prikupljaju i obrađuju, te zatim evidentiraju. Godišnji izvještaj o emisijama mora se predati svake godine do 31. ožujka te mora sadržavati podatke o unosu goriva i sirovina, proračunske vrijednosti (neto kalorična toplinska vrijednost, faktori emisija) te analize i rezultate uzorkovanja, a do 30. travnja mora se dostaviti odgovarajući broj emisijskih dozvola kojima se pokrivaju emisije iz godišnjeg izvješća [13],[20].

Operatori kod praćenja i izvještavanja imaju na izbor metodologiju koju će koristiti, a mogu birati između [16]:

- Metodologije zasnovane na proračunu;
- Metodologije zasnovane na mjerenju.

Kod obje metodologije potrebno je izvršavati određena mjerenja. Kod metodologije zasnovane na proračunu potrebno je mjeriti parametre kao potrošnja goriva i sirovina ili količina proizvedenih proizvoda, dok se kod metodologije zasnovane na mjerenju mjere i količine samih stakleničkih plinova.

Praćenje i izvještavanje o emisijama mora biti u skladu s uredbom EU (Monitoring and Reporting Regulation) kojom se propisuju iduća pravila [13]:

- Cjelovitost;
- Dosljednost;
- Transparentnost;
- Točnost;
- Kontinuirano poboljšanje.

4. MOGUĆNOSTI SMANJEJNA EMISIJA STAKLENIČKIH PLINOVA

Kako je cementna industrija jedan od operatora koji je uključen u sustav trgovanja stakleničkim plinovima, postrojenja za proizvodnju moraju prilagođavati svoje proizvodne procese kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova i na taj način ostvarili zadani ciljevi smanjenja istih propisanih Kyotskim protokolom. Dva su moguća načina smanjenja emisija stakleničkih plinova u cementnoj industriji, a to su [1]:

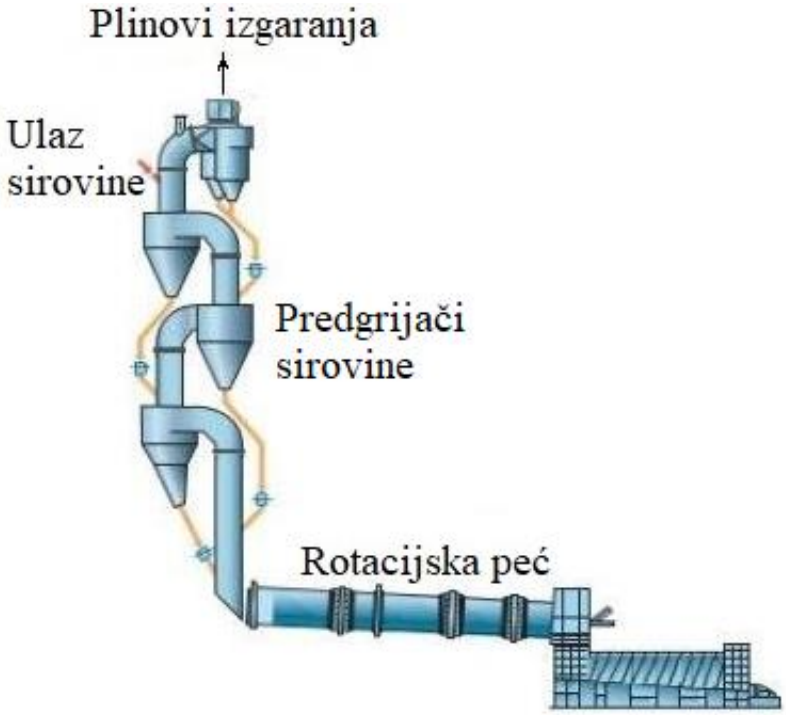
- Poboljšanje energetske učinkovitosti;
- Uporaba alternativnih goriva.

4.1. Poboljšanje energetske učinkovitosti

Poboljšanje energetske učinkovitosti proizvodnje cementa može se podijeliti na redukciju potrebne toplinske energije i na redukciju potrebne električne energije.

Ukupna potrebna toplinska energija za proizvodnju cementa može se smanjiti primjenom različitih tehnika optimizacija. Smanjenjem potrebne toplinske energije, koja se dobiva izgaranjem goriva, direktno se utječe na smanjenje emisija stakleničkih plinova. Najviše toplinske energije potrebno je za proizvodnju klinkera, pri čemu postoji nekoliko faktora koji utječu na rad suvremenih rotacijskih peči, a neki od njih su svojstva sirovine (vlaga, sagorljivost) te svojstva samog goriva. Moguće tehnike za poboljšanje energetske učinkovitosti u sklopu sustava peći su [1]:

- Predgrijač:
  - smanjenje pada tlaka i povećanje stupnja rekuperacije topline
  - ugradnja predgrijača s više ciklona (tri do šest) u ovisnosti o udjelu vlage u sirovini-dodavanjem četvrtog ciklona potrebna toplinska energija može pasti za 250 MJ/toni klinkera (slika 12.)
  - ravnomjernija raspodjela strujanja krutina i plinova



Slika 12. Predgrijači sirovine [22]

- Rotacijska peć:
  - optimizacija omjera duljina-promjer
  - optimizacija dizajna peći s obzirom na vrstu goriva koja će se koristiti
  - ujednačavanje i bolja stabilizacija uvjeta rada-uobičajeno se provode s ciljem smanjenja potrebne topline i radi povećanja kvalitete klinkera, a istodobno se time osigurava i dulji vijek trajanja opreme. Sekundarni efekt optimizacije su smanjenje emisija NO_x, SO_2 te prašine
  - optimizacija procesa upravljanja
  - smanjenje faktora pretićka zraka
  - smanjenje propuštanja zraka
- Rukovanje materijalima:
  - smanjenje udjela vlage u sirovinama i gorivima-smanjenje udjela vlage u gorivima dovodi do poboljšanja energetske učinkovitosti, a dodatna poboljšanja moguće je ostvariti korištenjem otpadne topline za sušenje, odnosno smanjenje vlage u gorivu i sirovinama

- korištenje lako zapaljivih goriva-uporabom finije mljevenog goriva (ugljena) u usporedbi s grubo mljevenim može smanjiti potrošnju energije za 300 MJ/toni proizvedenih klinkera
- homogenizacija i ravnomjernije doziranje sirovina u peć
- homogenizacija i ravnomjernije doziranje goriva-za ravnomjerno doziranje krutih goriva vrlo je važno imati dobro dizajnirani ljevak te sustav konvejera.

Povrat, odnosno iskorištavanje topline iz hladnjaka klinkera ili iz neiskorištenih dimnih plinova još je jedan od načina smanjenja potrebne energije za proizvodnju. Otpadna toplina pritom se koristi za proizvodnju vruće vode, a količina energije koju je na ovaj način moguće povratiti kreće se oko par MW.

Smanjenje potrebne energije izražene u jedinici količina energije po masi cementa (MJ/toni) moguće je postići smanjenjem sadržaja klinkera u cementnim proizvodima. U takvim proizvodima smanjena količina klinkera nadomješta se dodavanjem pijeska, troske ili pepela u koraku mljevenja klinkera. Na taj način osim smanjenja potrebne energije ostvaruju se i sljedeći benefiti:

- Smanjenje emisija stakleničkih plinova;
- Ušteda prirodnih resursa;
- Odlaganje manjih količina otpadnih materijala na odlagalištima (troska, pepeo).

U europskim cementarama, prosječan udio klinkera u cementu iznosi 80-85%. Mnogi proizvođači nastoje različitim tehnikama smanjiti udio klinkera pritom imajući u obziru zadržavanje postojeće kvalitete cementa. Pojedine vrste cementa sadrže i manje od 20% klinkera, ali one su namijenjene samo za uporabu u određenim slučajevima.

Redukciju potrebne električne energije moguće je ostvariti instalacijom sustava za upravljanje napajanjem, korištenjem energetski učinkovitije opreme (npr. učinkovitiji rotacijski mlinovi za mljevenje, ventilatori s promjenjivom brzinom vrtnje) te se na taj način indirektno utječe na smanjenje emisija [1].

4.2 Uporaba alternativnih goriva

Izgaranjem goriva nastoji se osigurati dovoljno topline kako bi proces klinkerizacije mogao teći. Najčešća, odnosno konvencionalna goriva koja su u uporabi mogu se podijeliti na [1]:

- Kruta goriva-ugljen, petrol koks, lignit, ponegdje se koristi i uljni škriljevac;
- Tekuća goriva-loživo ulje;
- Plinovita goriva-prirodni plin.

Kruta goriva skladište se kao i sirovine za proizvodnju cementa u zatvorenim halama te se zatim melju u mlinovima kako bi se postigla odgovarajuća finoća čime se osigurava potrebna temperatura plamena u peći – finije mljevena kruta goriva mogu postići previsoku temperaturu plamena, dok u suprotnom slučaju dolazi do lošeg izgaranja goriva. Tekuća goriva skladište se u čeličnim spremnicima, dok se plinovita goriva ne skladište nego se dopremaju cjevovodima. U europskim cementarama najčešće se koriste ugljen i koks zbog svoje dostupnosti, a plin i nafta se koriste u manjoj mjeri zbog viših troškova. Kod izgaranja svih vrsta goriva faktor pretička zraka nastoji se držati što bliže minimalnoj vrijednosti pri kojoj je izgaranje i dalje potpuno kako bi se smanjio gubitak topline, a na taj način i potrošnja goriva. Faktori pretička zraka za pojedina goriva prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Faktori pretička zraka [16]

Vrsta goriva	Faktor pretička zraka (λ)
Ugljen (krupni)	1,4-1,6
Ugljen (prašina)	1,25-1,35
Tekuće gorivo	1,03-1,1
Plinovito gorivo	1,02-1,1

Za zadržavanje faktora pretička zraka na odgovarajućoj vrijednosti potrebno je vrlo ujednačeno doziranje goriva. Kod tekućih i plinovitih goriva to je vrlo lako postići, dok je kod krutih goriva potreban dobar dizajn lijevka i transportera goriva uz miješanje grubog goriva (ugljena) s fino mljevenim, lako zapaljivim krutim gorivom. Doziranje goriva u rotacijsku peć uobičajeno se vrši na izlaznom kraju rotacijske peći [1].

Alternativa konvencionalnim gorivima je korištenje otpada fosilnog ili biološkog podrijetla kao goriva. Izgaranjem otpada fosilnog podrijetla smanjenje emisija proizlazi iz manjeg emisijskog faktora, dok se izgaranje otpada biološkog podrijetla smatra CO_2 neutralnim [25].

Pojedine europske cementare zamijenile su 80% fosilnih goriva otpadom. Na taj način pridonosi se dodatnom smanjenju emisija stakleničkih plinova i uporabi prirodnih resursa.

Da bi se neki otpad mogao koristiti kao gorivo u cementarama, moraju biti zadovoljeni sljedeći parametri [1]:

- Mogućnost postizanja maksimalne temperature plamena od 2000 °C;
- Mogućnost zadržavanja plinova izgaranja na temperaturi od 1200 °C 8 sekundi;
- Temperatura materijala u zoni sinteriranja od 1450 °C;
- Ujednačeni uvjeti izgaranja;
- Razgradnja organskih tvari uslijed visokih temperatura;
- Mogućnost potpune uporabe pepela goriva kao komponente klinkera

Proces izgaranja klinkera povoljan je za uporabu različitih otpadnih materijala kao zamjena konvencionalnim fosilnim gorivima, stoga udio korištenja otpada kao goriva raste, a u europskim cementarama koriste se sljedeće vrste otpada [1]:

- Drvo, papir i karton;
- Tekstil;
- Plastika;
- Obrađeni otpad (RDF);
- Guma;
- Industrijski mulj;
- Komunalni mulj;
- Životinjske masti;
- Otpad od ugljena;
- Otpad iz poljoprivrede;
- Kruti otpad (impregnirana piljevina);
- Otapala;
- Ulja i naftni otpad.

Kod uporabe krutih otpadnih goriva potrebno je obratiti pozornost na to da se ne može svaki otpad koristiti kao gorivo zbog sadržaja opasnih frakcija poput katrana.

Miješani komunalni otpad i pojedini kruti opasni otpad potrebno je tretirati prije nego li se koriste kao gorivo. Komunalni otpad različit je s obzirom na godišnja doba te sadrži visok udio vlage i pepela zbog čega je niske kalorične vrijednosti. Postupak tretiranja, odnosno obrade ovisi o vrsti goriva, a kod svake obrade važno je da se smanji veličina otpada na manje čestice kako bi se olakšalo doziranje goriva. Tekuća otpadna goriva pripremaju se obradom i miješanjem raznih otapala, ostataka boja i otpadnog ulja. Kod rukovanja tekućim otpadnim gorivima treba imati u obziru opasne tekuće otpatke poput otapala, te je stoga potrebna doza opreza kod skladištenja i korištenja tih goriva [1].

Kod zamjene goriva, bitno je da alternativno gorivo ima odgovarajuću i ujednačenu kvalitetu-toplinsku vrijednost, udio metala, pepela i drugih elemenata kako bi se smanjili negativni učinci na okoliš, odnosno kako bi se smanjile emisije štetnih plinova. Zbog toga potrebno je uspostaviti sustav osiguranja kvalitete goriva. Toplinske (ogrjevne) vrijednosti otpada koji se koristi kao gorivo variraju od 3 do 40 MJ/kg (Tablica 6.) dok se ta vrijednost kod konvencionalnih goriva kreće između 26-30 MJ/kg za ugljen, a za loživo ulje od 40-42 MJ/kg.

Tablica 6. Toplinske vrijednosti goriva iz otpada [1]

Vrsta goriva iz otpada	Toplinska vrijednost, MJ/kg
Drvo	16
Papir, karton	3-16
Tekstil	do 40
Plastika	17-40
Obrađeni otpad (RDF)	14-25
Guma	26
Industrijski mulj	8-14
Komunalni mulj	12-16
Životinjske masti	27-32
Otpad od ugljena	20-30
Otpad iz poljoprivrede	12-16
Kruti otpad (impregnirana piljevina)	14-28
Otapala	20-36
Ulja, naftni otpad	25-36

Samo otpadna goriva s dovoljno visokom toplinskom vrijednošću mogu se koristiti kao zamjena za fosilna goriva, a peći za izgaranje moraju biti prilagođene kako bi se ostvarila visoka energetska učinkovitost.

Priprema otpada za izgaranje vrši se izvan cementare od strane specijalista za obradu otpada, gdje se različitim postupcima otpad prerađuje u homogenu smjesu s ujednačenim toplinskim svojstvima i kemijskim sastavom [1].

4.2.1 RDF/SRF

Alternativa fosilnim gorivima mogu biti i RDF (Refuse derived fuel) i SRF (Solid recovered fuel). SRF i RDF (Slika 13.) se uglavnom proizvode od komunalnog i komercijalnog otpada-papira, kartona, drva, tekstila i plastike [23]. RDF pritom može još sadržavati i [26]:

- Ambalažni otpad;
- Automobilske gume;
- Otpadnu biomasu;
- Ostatke prerađivačke industrije.



Slika 13. RDF u obliku peleta [27]

Peći u cementarama izuzetno su pogodne za spaljivanje otpada zbog visokih temperatura izgaranja u kojima temperatura plamena iznosi do 2000 °C te zbog dugog zadržavanja goriva unutar peći čime se smanjuju emisije štetnih plinova.

Kako bi se iz komunalnog otpada dobio RDF, bitno je iz otpada ukloniti komponente koje mogu imati loš utjecaj na zdravlje ljudi, a to su azbest, medicinski otpad, otpadne baterije i akumulatori, otpad s visokom razinom minerala te tretirano drvo. Sastav RDF-a u ovisnosti je o prikupljenom otpadu te se razlikuje od države do države što je vidljivo u tablici 7.

Tablica 7. Sastav RDF-a za različite zemlje [26]

Vrsta otpada	Velika Britanija (%)	Italija (%)	Belgija (%)	Grčka (%)
Tiskani materijal	0	0	64	37
Otpadni papir	84	44	0	6,6
Tiskana ambalaža	0	0	0	18,1
Plastična ambalaža	11	23	9	22,9
Ostaci plastike	0	0	0	1,7
Tekstil	0	12	0	10,8
Drvo	5	4,5	27	0,4
Organski otpad	0	16,5	0	1,3

S obzirom na sastav RDF-a, mijenjaju se i njegova svojstva. Manju toplinsku vrijednost ima RDF koji je proizveden uglavnom iz otpada iz domaćinstva, dok veću ima RDF iz komercijalnog i industrijskog otpada. Udio vlage kreće se između 10-30%, pritom manji udio vlage ima RDF iz industrijskog otpada u odnosu na otpad iz domaćinstva. Veličina čestica kreće se između 10-300 mm te se RDF na tržištu pojavljuje u obliku praha, peleta ili kao briketi. Usporedba svojstava RDF-a sa svojstvima ugljena prikazana je u tablici 8.

Tablica 8. Usporedba ugljena i RDF-a [24]

Gorivo/Svojstvo	Ugljen	RDF
Kalorična vrijednost (Kcal/Kg)	4000	3500-3700
Udio sumpora (%)	0,4	0,2-0,5
Udio vlage (%)	39	10
Udio pepela (%)	4,2	<15
Udio ugljika (%)	31,4	35-40
Udio kisika (%)	7,4	25-30
Udio vodika (%)	4,3	5 - 8

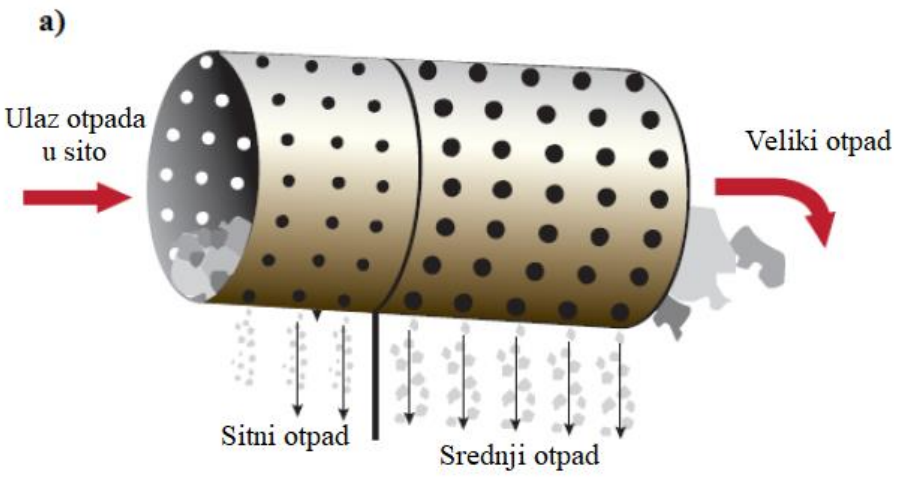
Kako bi se iz komunalnog i industrijskog otpada proizvelo RDF gorivo, otpad je potrebno mehanički i biološki obraditi. Obradom otpada u RDF nastoje se pridobiti što stabilnija svojstva goriva, odnosno što stabilnija ogrjevna vrijednost te sadržaj ugljika, vlage, pepela i ostalih elemenata.

Mehaničko-biološkom obradom goriva dobiva se [26]:

- Reciklirani materijal koji se može koristiti kao sirovina za industriju;
- Kompost;
- RDF gorivo.

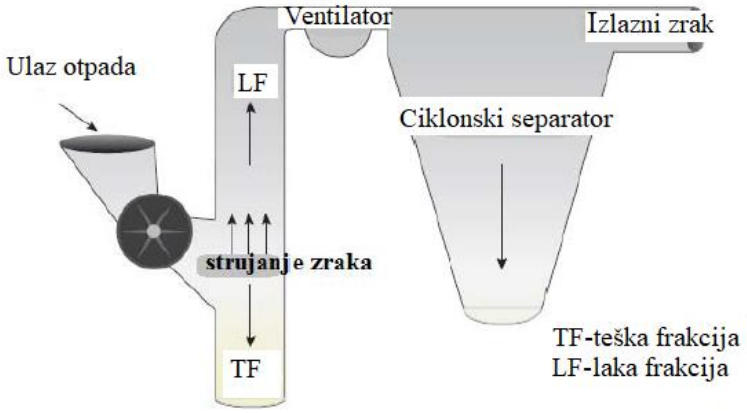
Mehaničkom obradom otpada vrši se razdvajanje otpada na različite vrste te se za to koriste različite tehnike kako bi se ostvarili zahtjevi krajnjih korisnika. Metode koje se koriste za mehaničku obradu otpada su [26]:

- Ručna separacija - kod ručne separacije otpad se razvrstava na temelju vizualnog ispitivanja te se na taj način izdvajaju plastika, zagađeni i glomazni materijal. Na ovaj način razdvaja se otpad koji nije razvrstan na izvoru.
- Prosijavanje - prosijavanjem se razdvaja otpad na temelju njegove veličine. Dolaskom otpada u rotirajuće sito (Slika 14.) ili na prosijavanje pomoću diskova, čestice sitnije od otvora (staklo, organski otpad) propadaju te se odvode zasebnim trakama. Prevelike čestice (papir, plastika) izlaze na drugoj strani sita.



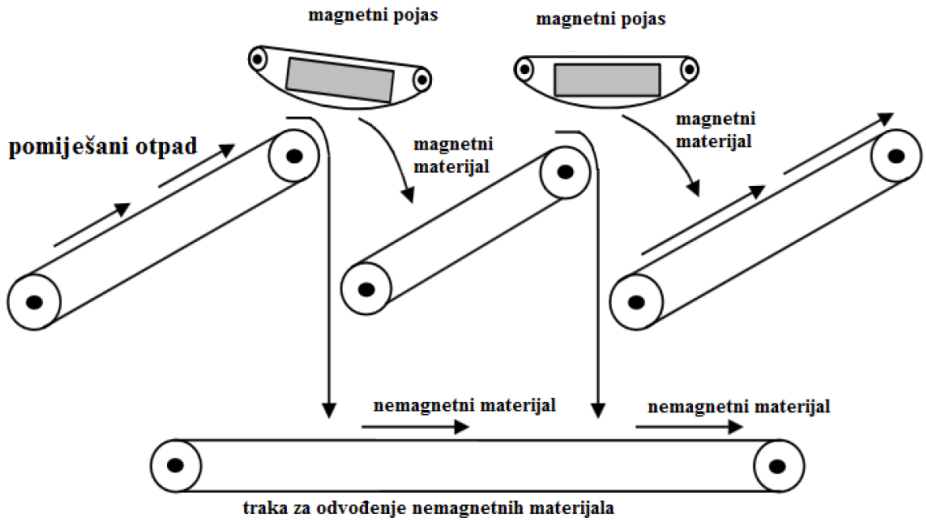
Slika 14. Rotirajuće sito [26]

- Zračna separacija - Odvaja otpad na temelju njegove težine na lake frakcije koje čine papir i plastika i teške frakcije pod koje spadaju kamenje i staklo. Otpad je prije ulaska u separator potrebno usitniti. Nakon ulaska otpada u separator, lake frakcije u struji zraka odlaze prema gore, dok teže frakcije padaju na dno. Nedostatak metode je mogućnost pojave komadića stakla u lakoj frakciji ili kartona u teškoj frakciji ukoliko otpad nije dovoljno usitnjen.



Slika 15. Zračna separacija [26]

- Magnetna separacija - Magnetnom separacijom nastoje se izdvojiti magnetni materijali iz otpada, to jest željezo i čelik. Proces se sastoji od niza traka i magnetnih pojasa koji privlače magnetne materijale kako bi proces izdvajanja bio efikasniji (Slika 16.). Nedostaci metode su potreba da otpad prvo prođe zračnu separaciju te nemogućnost izdvajanja nemagnetičnih metala poput nehrđajućih čelika ili bakra.



Slika 16. Magnetna separacija [26]

- Mokra separacija - Razdvaja otpad na temelju gustoće: papir i plastika manje gustoće plutaju na vodi, dok staklo i kamenje tonu na dno.
- Optička separacija - Optičkom separacijom nastoji se izdvojiti PVC plastika koja se otkriva pomoću NIR (near infrared) senzora. PVC plastika izdvaja se zbog sadržaja klora, koji kod spaljivanja u sastavu RDF-a smanjuje kvalitetu goriva.

Biološka obrada otpada može se provoditi prije ili nakon mehaničke obrade. Osnovni cilj biološke obrade je razgradnja organske komponentne otpada kako bi se spriječilo stvaranje metana kod odlaganja otpada. Metode biološke obrade otpada dijele se na metode uz prisustvo kisika (aerobne) i bez prisustva kisika (anaerobne). Nakon biološke obrade otpada i njegovog sušenja, olakšava se odvajanje otpada mehaničkim postupcima.

Dio miješanog otpada koji je biološki obrađen i mehaničkim postupcima odvojen za RDF gorivo naknadno se može strojevima za pelete ili brikete zgusnuti čime se povećava kvaliteta goriva te se olakšava transport, skladištenje i doziranje u pećima.

4.2.2 Prednosti alternativnih goriva

Zamjena ugljena za RDF ili neko drugo alternativno gorivo ima niz prednosti. Korištenjem otpadnih goriva maksimizira se povrat energije, smanjuju se emisije CO_2, te se smanjuju onečišćenja vode i zemljišta uslijed manje količine odlaganja otpada, smanjuje se potrošnja fosilnih goriva i prostor potreban za odlaganje otpada, a spaljivanjem RDF-a kod proizvodnje cementa mogu se ostvariti i sljedeće prednosti [26]:

- Mogućnost korištenja RDF-a kao dodatno gorivo uz ugljen - Miješanjem ugljena i RDF-a postiže se do 50% veća toplinska vrijednost goriva;
- Smanjenje troškova goriva;
- Mogućnost zamjene ugljena za RDF gorivo uz minimalne potrebne rekonstrukcije;
- Olakšana kontrola izgaranja uslijed homogenih svojstava RDF-a;
- Smanjenje emisija pepela.

5. Izračun potencijala smanjenja emisija CO_2 primjenom alternativnog goriva

Izračun potencijala smanjenja emisija CO_2 u jednom postrojenju za proizvodnju cementa temeljit će se na primjeni alternativnog goriva iz otpada-RDF/SRF goriva kojeg je moguće proizvesti iz komunalnog otpada Republike Hrvatske.

5.1 Sastav i svojstva potencijalnog RDF/SRF goriva

Temelj za određivanje sastava goriva iz otpada sastav je komunalnog otpada na području Republike Hrvatske. Sastav komunalnog otpada određen je iz Izvješća o komunalnom otpadu 2012. Agencije za zaštitu okoliša te na temelju analiza sastava miješanog komunalnog otpada nekoliko županija u sklopu projekta Izrada jedinstvene metodologije za analize sastava komunalnog otpada, određivanje prosječnog sastava komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj i projekcija količina komunalnog otpada. Sastav komunalnog otpada prikazan je u tablici 9.

Tablica 9. Sastav komunalnog otpada [28]

Sastavnica otpada	Udio (%)
Metal	2,07
Drvo	0,98
Tekstil/odjeća	3,71
Papir i karton	23,19
Staklo	3,65
Plastika	22,87
Guma	0,22
Koža/kosti	0,45
Kuhinjski otpad	30,93
Vrtni otpad	5,68
Ostali otpad (zemlja, prašina, nedefinirano)	6,25
Ukupno	100

Kako bi se iz miješanog komunalnog otpada izdvojio dio za RDF/SRF potrebno je metodama mehaničko-biološke obrade ukloniti negorive komponentne, odnosno komponente s niskom ogrjevnom vrijednošću i komponente čije izgaranje ima loš utjecaj na zdravlje ljudi [26]. Iz otpada se izdvajaju metal, staklo, biootpad (kuhinjski i vrtni otpad), pelene.

Ostatak miješanog komunalnog otpada koristi se za proizvodnju RDF/SRF goriva čiji je sastav prikazan u tablici 10.

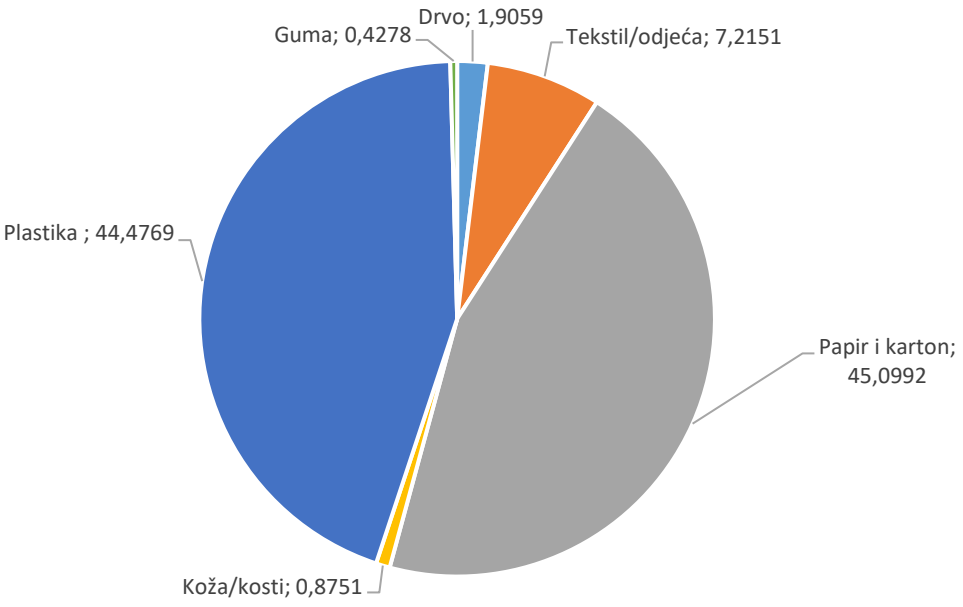
Tablica 10. Sastav potencijalnog RDF/SRF goriva

Sastavnica komunalnog otpada	**Udio u ukupnom komunalnom otpadu (%)**
Drvo	0,98
Tekstil/odjeća	3,71
Papir i karton	23,19
Koža/kosti	0,45
Plastika	22,87
Guma	0,22
UKUPNO	51,42

Zbrojeno te komponente čine 51,42 % ukupnog komunalnog otpada. Ukoliko bi se od tih komponenata proizvodilo RDF/SRF gorivo, preračunato na 100%, sastav budućeg goriva bio bi jednak prikazanom u tablici 11.

Tablica 11. Sastav RDF/SRF goriva

Sastavnica komunalnog otpada	Udio u RDF/SRF gorivu (%)
Drvo	1,9059
Tekstil/odjeća	7,2151
Papir i karton	45,0992
Koža/kosti	0,8751
Plastika	44,4769
Guma	0,4278
UKUPNO	100,00

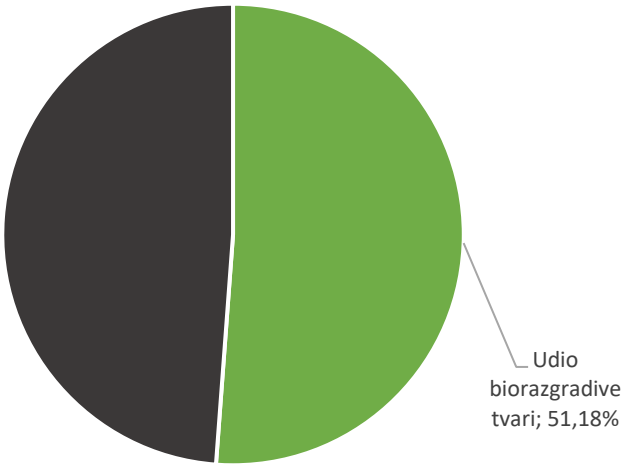


5.1.1 Udio biorazgradive komponente

Udio biorazgradive komponente, odnosno neutralne komponente goriva određen je prema koeficijentima biorazgradivosti komponenti preuzetih iz Uputa za određivanje količina odloženog biorazgradivog komunalnog otpada na odlagališta Hrvatske agencije za okoliš i prirodu [32]. Udio biorazgradive komponente u gorivu prikazan je u tablici 12.

Tablica 12. Udio biorazgradive tvari u RDF/SRF gorivu

Sastavnica komunalnog otpada	Udio u RDF/SRF gorivu (%)	Koeficijent biorazgradive komponente	Udio biorazgradive tvari
Drvo	1,9059	1,00	51,18
Tekstil/odjeća	7,2151	0,50	
Papir i karton	45,0992	1,00	
Koža/kosti	0,8751	0,65	
Plastika	44,4769	0,00	
Guma	0,4278	0,00	



Prema IPCC metodologiji, izgaranje biorazgradive komponente goriva smatra se CO_2 neutralnom zbog jednakosti količina emisija nastalih izgaranjem i količina CO_2 koje se apsorbiraju tijekom rasta biljaka iz kojih je otpad i nastao. Izgaranjem biorazgradivog dijela goriva smanjuju se i emisije metana koje bi nastale uslijed razgradnje otpada ukoliko bi on bio odložen na odlagalištima čime se dodatno smanjuju emisije stakleničkih plinova [25].

5.1.2 Emisijski faktor

Emisijski faktor (EF) je veličina koja predstavlja prosječnu količinu onečišćujuće tvari iz nekog izvora s obzirom na jedinicu aktivnosti, odnosno on je linearna poveznica između emisija štetnih tvari i određene aktivnosti. Jedinica aktivnosti kriterij je koji je u ovisnosti o djelatnostima pojedinog postrojenja, na primjer [35]:

- Količina potrošenog goriva kod izgaranja;
- Količina proizvedenog proizvoda;
- Količina (masa) utrošene sirovine;
- Količina topline;
- Vrijeme trajanja aktivnosti.

Emisijski faktori mogu se podijeliti na [35]:

- Specifični emisijski faktor – Određuje količinu onečišćujućih tvari za određeni industrijski sektor;
- Nacionalni emisijski faktor – Određuje se na temeljnu nacionalnih okolnosti (porijeklo goriva, propisi) ili se izračunava na temelju nacionalnih emisija onečišćujućih tvari;
- Zadani emisijski faktor – Emisijski faktor određen na međunarodnoj razini.

Nacionalni emisijski faktori Republike Hrvatske za konvencionalna goriva koja se koriste u cementnoj industriji prikazani su u tablici 13.

Tablica 13. Emisijski faktori konvencionalnih goriva [36]

Vrsta goriva	Emisijski faktor, kg CO_2/GJ
Ugljen	94,6
Petrol-koks	97,5
Lignit	101
Loživo ulje	77,4
Prirodni plin	56,1

Emisijski faktor koristi se za izračun emisija onečišćujućih tvari prema sljedećoj formuli [35]:

$$Emisije\ po\ postrojenju\ ili\ uređaju = EF * podaci\ o\ aktivnosti\ (A) \quad (2)$$

Prilikom izračuna emisija, važno je provjeriti da su jedinice emisijskog faktora i podatka o aktivnosti dosljedne.

Emisijski faktor potencijalnog RDF/SRF goriva određen je na temelju pojedinačnih emisijskih faktora sastavnica goriva prema tablici 14.

Tablica 14. Emisijski faktori sastavnica RDF/SRF goriva [37]

Sastavnica komunalnog otpada	Emisijski faktor, kg CO_2/GJ
Drvo	110
Tekstil/odjeća	110
Papir i karton	110
Koža/kosti	89
Plastika	75
Guma	85

S obzirom na to da se RDF/SRF gorivo sastoji od više sastavnica potrebno je izračunati ukupni emisijski faktor prema sljedećoj formuli:

$$EF_{ukupni} = \sum EF_i * w_i \quad (3)$$

pri čemu je:

- EF_i – emisijski faktor pojedine sastavnice RDF/SRF goriva
- w_i – maseni udio pojedine sastavnice RDF/SRF goriva

Prema tome emisijski faktor RDF/SRF goriva sastava prema tablici 11. i prema pojedinačnim emisijskim faktorima iz tablice 14. iznosi:

$$EF_{RDF/SRF,ukupni} = \sum EF_i * w_i = 110 * 0{,}019059 + 110 * 0{,}072151 + 110 * 0{,}450992 + $$
$$+89 * 0{,}008751 + 75 * 0{,}444769 + 85 * 0{,}004278 = 94{,}14 \text{ kg } CO_2/GJ \quad (4)$$

Kako RDF/SRF sadrži 51,18% biorazgradive komponente koja se smatra CO_2 neutralnom, zasebno se može izračunati fosilni emisijski faktor prema formuli:

$$EF_{RDF/SRF,fosilni} = EF_{RDF/SRF,ukupni} * (1 - udio\ biorazgradive\ tvari)$$
$$= 94{,}14 * (1 - 0{,}5118) = 45{,}96 \text{ kg } CO_2/GJ \quad (5)$$

5.1.3 Ogrjevna vrijednost goriva

Ogrjevna ili toplinska vrijednost goriva može se definirati kao količina oslobođene topline nastale potpunim izgaranjem jedinice mase goriva. Pritom se razlikuju [38]:

- Donja ogrjevna vrijednost – Količina topline koja se oslobodi potpunim izgaranjem jedinice mase goriva tako da para iz dimnim plinova ne kondenzira;
- Gornja ogrjevna vrijednost – Količina topline koja se oslobodi pri potpunom izgaranju jedinice mase goriva tako da sva para iz dimnim plinova potpuno kondenzira.

Donja i gornja ogrjevna vrijednost povezane su sljedećom formulom [38]:

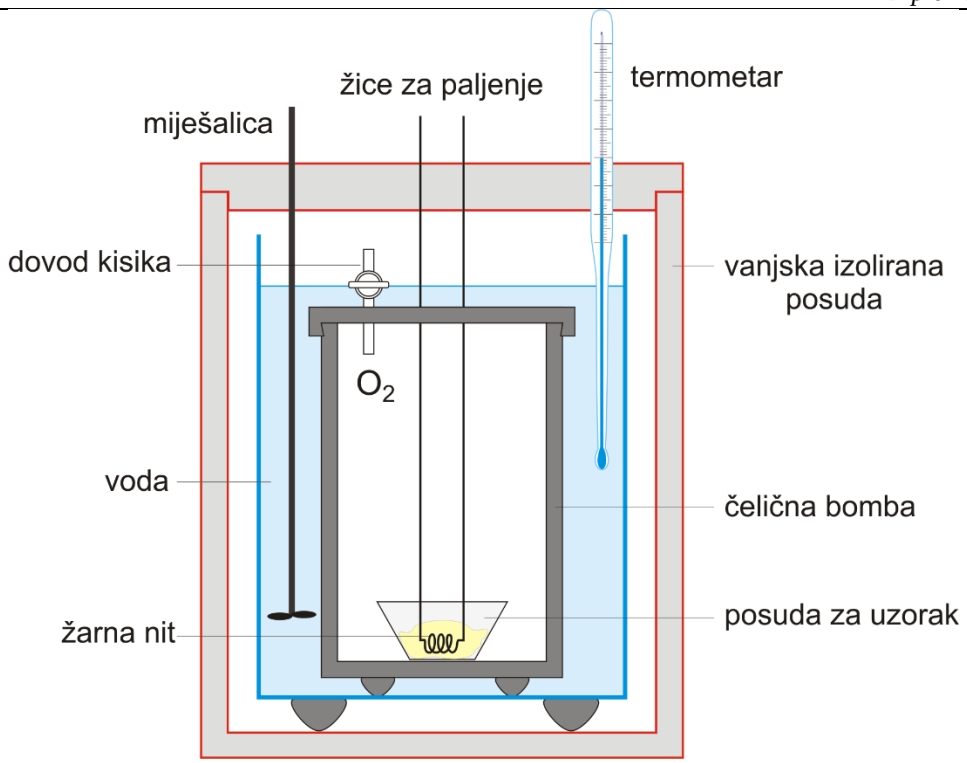
$$\Delta h_g = \Delta h_d + m_{H20} * r_0 \tag{6}$$

gdje je:

- Δh_g – gornja ogrijevna vrijednost
- Δh_d – donja ogrijevna vrijednost
- m_{H20} – masa vodene pare u dimnim plinovima
- r_0 – specifična toplina isparavanja vode

Ogrjevna vrijednost nekog goriva određuje se mjerenjem pomoću kalorimetra – uređaja čija je glavna komponenta toplinski izolirana posuda koja onemogućava prijelaz topline na okolinu. Postoji nekoliko vrsta kalorimetra, a neke od njih su [39]:

- Vodeni kalorimetar – Kalorimetar koji u toplinski izoliranoj posudi sadrži određenu masu vode. Na temelju porasta temperature vode određuje se oslobođena toplina, odnosno ogrjevna vrijednost.
- Ledeni kalorimetar – U toplinski izoliranoj posudi sadrži led koji se dovođenjem topline otapa. Količina dovedene topline izračunava se na temelju promjene volumena smjese leda i vode.
- Kalorimetar s bombom (Slika 17.) – Uobičajeno se koristi za određivanje ogrjevne vrijednosti goriva. Gorivo određene količine izgara pod visokim tlakom u čeličnoj komori (bombi) koja je uronjena u vodu. Ogrjevna vrijednost potom se određuje na temelju porasta temperature vode i toplinskog kapaciteta čelične komore.



Slika 17. Kalorimetar s bombom [40]

Ukoliko za neko gorivo nije poznata ogrjevna vrijednost, ali je poznat sastav određen elementarnom analizom u obliku masenih udjela gorivih elemenata, donja ogrjevna vrijednost može se približno odrediti putem formule:

$$\Delta h_d = 33910c + 117000 * \left(h - \frac{o}{8}\right) + 10500s - 2500w \quad (7)$$

pri čemu je:

- c – maseni udio ugljika u gorivu
- h – maseni udio vodika u gorivu
- o – maseni udio kisika u gorivu
- s – maseni udio sumpora u gorivu
- w – maseni udio vlage u gorivu

U industrijskim postrojenjima sva para koja nastane izgaranjem nekog goriva u dimnim plinovima kondenzira tek kada dimni plinovi dođu u atmosferu. Zbog toga se u industrijskim postrojenjima kao količina oslobođene topline uzima donja ogrjevna vrijednost, a ne gornja [16].

Za određivanje ogrjevne vrijednosti alternativnog goriva iz otpada, odnosno RDF/SRF goriva potrebno je poznavati ogrjevne vrijednosti njegovih sastavnica. Ogrjevna vrijednost otpada ovisi o udjelu ugljika i drugih gorivih elemenata, te o udjelu vlage i pepela. Donja ogrjevna vrijednost komunalnog otpada kreće se između 10 i 12 MJ/kg [41]. Iz RDF/SRF goriva stoga se uklanjaju negorive sastavnice kako bi se gorivu povećala ogrjevna vrijednost. Ogrjevne vrijednosti sastavnica RDF/SRF goriva sastava određenog iz komunalnog otpada Republike Hrvatske prikazane su u tablici 15.

Tablica 15. Ogrjevne vrijednosti sastavnica alternativnog goriva [41][42]

Sastavnica komunalnog otpada	Udio u RDF/SRF gorivu (%)	Donja ogrjevna vrijednost, MJ/kg
Drvo	1,9059	15,40
Tekstil/odjeća	7,2151	18,30
Papir i karton	45,0992	15,70
Koža/kosti	0,8751	16,80
Plastika	44,4769	32,70
Guma	0,4278	34,80
UKUPNO	100,00	

Kako se RDF/SRF sastoji od više sastavnica, potrebno je izračunati ukupnu ogrjevnu vrijednost goriva, odnosno smjese prema sljedećoj formuli:

$$\Delta h_{d,RDF/SRF} = \sum \Delta h_{d,sastavice} * w_{sastavnice} \tag{8}$$

gdje $w_{sastavnice}$ označava maseni udio sastavnice u gorivu.

Prema tome, ogrjevna vrijednost RDF/SRF goriva iznosi:

$$\Delta h_{d,\frac{RDF}{SRF}} = 0{,}019059 * 15{,}40 + 0{,}072151 * 18{,}30 + 0{,}450992 * 15{,}70 + 0{,}008751 * 16{,}80 + 0{,}444769 * 32{,}70 + 0{,}004278 * 34{,}80 = 23{,}53\ MJ/kg \tag{9}$$

Dobivena ogrjevna vrijednost je u usporedbi s prosječnom ogrjevnom vrijednošću komunalnog otpada veća za 114%.

5.2. Ulazni podaci cementare

Za proračun potencijala smanjenja emisija, potrebno je odrediti ulazne podatke cementare, odnosno broj radnih dana, kapacitet cementare, specifičnu potrošnju energije te vrstu korištenog goriva. Ulazni podaci odredit će se na temelju dostupnih podataka hrvatski tvornica cementa.

Broj radnih dana cementare određen je na temelju trajanja remontnih radova cementare NEXE d.d. iz Našica u prethodne 3 godine. U tijeku remonta postrojenja, osim potrebnog redovnog održavanja izvode se i investicijski projekti. U cementari NEXE d.d. u zimi 2018./2019.g. trajanje remontnih radova bilo je 48 dana, a sljedeće zime 44 dana [43]. U zimi 2020./2021.g. remont postrojenja trajao je od 15.02. do 08.04.2021., odnosno 46 dana [44]. Prosječno vrijeme trajanja remonta u prethodne 3 godine bilo je 46 dana. Uz pretpostavku da tijekom godine nema neplaniranih zastoja, za proračun smanjenja emisija kao broj radnih dana cementare uzet će se 319 dana.

Kapacitet cementare određen je na temelju uobičajenog kapaciteta proizvodnje klinkera u rotacijskim pećima koji iznosi do 5000 t/dan [1]. Kao kapacitet cementare za proračun uzet će se kapacitet od 4800 t klinkera po danu.

Specifična potrošnja energije određena je na temelju prosječnih specifičnih potrošnja hrvatskih tvornica cementa Cemex i Holcim. Specifične potrošnje energije za navedene tvornice prema zadnje dostupnim podacima [45],[46] prikazane su u tablici 16.

Tablica 16. Specifične potrošnje energije

Cemex		
2016.	2017.	2018.
3,39 GJ/t	3,47 GJ/t	3,33 GJ/t
Holcim		
2013.	2014.	2015.
3,67 GJ/t	3,63 GJ/t	3,63 GJ/t

Prosječna specifična potrošnja energije cementare Cemex iznosi 3,40 GJ/t klinkera, a kod cementare Holcim 3,64 GJ/t klinkera, dok prosjek svih podataka iznosi 3,52 GJ/t što će se uzeti kao podataka za proračun potencijala smanjenja emisija.

Kao vrsta konvencionalnog goriva u cementari odabran je petrol koks. Petrol koks je gorivo dobiveno kao nusproizvod rafiniranja nafte. Fizički, petrol koks može biti u obliku kao spužva s puno pora ili u obliku kuglica (Slika 18.) [54].



Slika 18. Petrol koks [47]

Njegova svojstva i sastav (tablica 17.) ovise o svojstvima sirove nafte i tehnologije rafiniranja.

Tablica 17. Sastav petrol koksa [55]

Sastav petrol koksa	
Ugljik	81,1%
Vodik	3,4%
Kisik	1,3%
Dušik	1,2%
Sumpor	5,1%
Pepeo	1,3%
Vlaga	6,5%

Zbog visokog udjela ugljika uobičajeno se koristi kao gorivo kod proizvodnje električne energije i u cementarama, ali i u industriji kao izvor ugljika. Kao gorivo, petrol koks ima donju ogrjevnu vrijednost od 31,0 GJ/t s emisijskim faktorom od 97,50 t CO_2/TJ [36].

5.3. Izračun potencijala smanjenja CO_2

Izračun potencijala smanjenja emisija CO_2 primjenom alternativnog RDF/SRF goriva temelji se na određenim ulaznim podacima cementare i na količini potrebnog konvencionalnog i alternativnog goriva čijim izgaranjem nastaju emisije. Potencijal smanjenja temelji se na zamjeni dijela konvencionalnog goriva, odnosno petrol koksa, s RDF/SRF gorivom. Smanjenje emisija izračunat će se za 3 slučaja:

- 1. slučaj: 30% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom
- 2. slučaj: 60% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom
- 3. Slučaj: 90% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom

Prije izračuna smanjenja emisija, izračunate su emisije CO_2 ukoliko se u cementari koristi isključivo petrol koks. Kako bi se izračunale emisije, potrebno je izračunati masu proizvedenih klinkera, potrebnu toplinsku energiju za njihovu proizvodnju te potrebnu količinu goriva.

Godišnja količina (masa) proizvedenih klinkera računa se iz dnevne količine proizvodnje i godišnjeg broja dana rada cementare prema formuli:

$$P_{klinkera} = Dnevni\ kapacitet\ (\ t\ klinkera/dan) * Broj\ radnih\ dana\ (dan) \quad (10)$$

Uz kapacitet proizvodnje klinkera od 4800 t/dan i 319 radnih dana, godišnja količina proizvedenih klinkera iznosi:

$$P_{klinkera} = 4800\ t\ \ klinkera/dan * 319\ dana = 1531200\ t\ klinkera \quad (11)$$

Za izračun potrebne toplinske energije potrebni su podaci o masi proizvedenih klinkera i specifičnoj potrošnji energije. Potrebna toplinska energija izračunava se prema formuli:

$$Potrebna\ toplinska\ energija = P_{klinkera}(t) * specifična\ potrošnja\ energije\ (GJ/t) \quad (12)$$

Prema tome količina potrebne toplinske energije iznosi:

$$Potrebna\ toplinska\ energija = 1531200\ t * 3{,}52\ \ GJ/t = 5389824\ GJ \quad (13)$$

Iz potrebne toplinske energije izračunava se potrebna količina goriva prema sljedećoj formuli:

$$Potrebna\ količina\ goriva = \frac{Potrebna\ toplinska\ energija\ (GJ)}{DOV\ (GJ/t)} \quad (14)$$

gdje DOV označava donju ogrjevnu vrijednost goriva.

Potrebna količina goriva petrol koksa uz donju ogrjevnu vrijednost od 31 GJ/t iznosi:

$$Potrebna\ količina\ goriva = \frac{5389825\ GJ}{31\ GJ/t} = 173865{,}3\ t \tag{15}$$

Nakon što je poznata potrebna količina goriva, moguće je izračunati emisije CO_2. Izračun emisija CO_2 koje nastaju izgaranjem goriva temelji se na potrebnoj količini goriva, donjoj ogrjevnoj vrijednosti, emisijskom faktoru i oksidacijskom faktoru prema formuli:

$$CO_2(gorivo) = potrošnja\ (t) * DOV\ (GJ/t) * EF\ (kg\ \ CO_2/GJ) * OF = Toplinska\ energija\ (GJ) *\ EF\ (kg\ \ CO_2/GJ) * OF \tag{16}$$

gdje je:

- $CO_2(gorivo)$ – emisije od izgaranja goriva
- $potrošnja$ – potrošnja goriva
- DOV – donja ogrjevna vrijednost goriva
- EF – emisijski faktor goriva
- OF – oksidacijski faktor (maksimalna vrijednost 1,00)
- $Toplinska\ energija$ – potrebna toplinska energija

Emisije CO_2 nastale izgaranjem petrol koksa iznose:

$$CO_2(petrol\ koks) = 173865{,}3\ t * 31{,}0\ \ GJ/t * 97{,}5\ kg\ \ CO_2/GJ * 1 = 525507869{,}3\ kg\ CO_2 = 525{,}51\ kt\ CO_2 \tag{17}$$

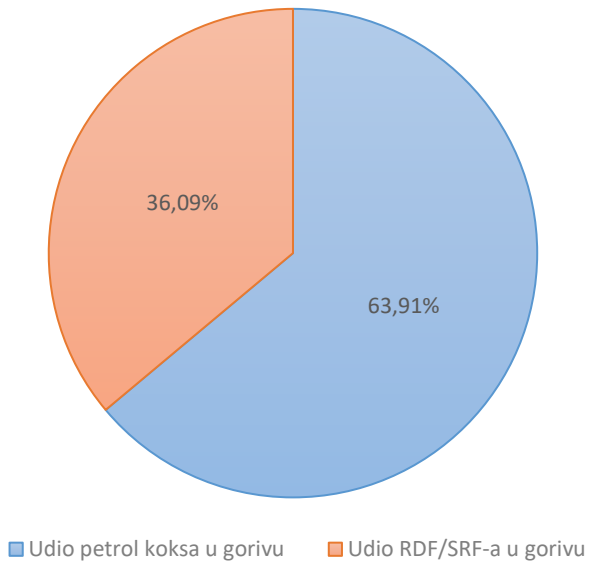
* za vrijednost oksidacijskog faktora uzeta je vrijednost 1 radi onemogućavanja podcjenjivanja emisija

5.3.1 Prvi slučaj: 30% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom

U proračunu potencijala smanjenja emisija CO_2 kod prvog slučaja 30% izračunate potrebe mase petrol koksa (173865,3 t) bit će zamijenjeno alternativnim RDF/SRF gorivom. Kako bi se izračunale nove emisije CO_2, potrebno je izračunati koliko je topline potrebno dobiti iz RDF/SRF goriva ukoliko se masa petrol koksa smanji za 30%. Iz potrebne dodatne topline, izračunava se potrebna količina RDF/SRF goriva, te zatim emisije. U tablici 18. prikazani su rezultati proračuna potrebne mase RDF/SRF goriva.

Tablica 18. Potrebne količine goriva - prvi slučaj

Potrebne količine goriva	
Masa petrol koksa	121705,70 t
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	3772876,79 GJ
Toplina koju ju potrebno dobiti izgaranjem RDF/SRF-a	1616947,21 GJ
Potrebna masa RDF/SRF goriva	68718,54 t
Ukupna masa goriva	190424,24 t
Udio petrol koksa u gorivu	63,91%
Udio RDF/SRF-a u gorivu	36,09%

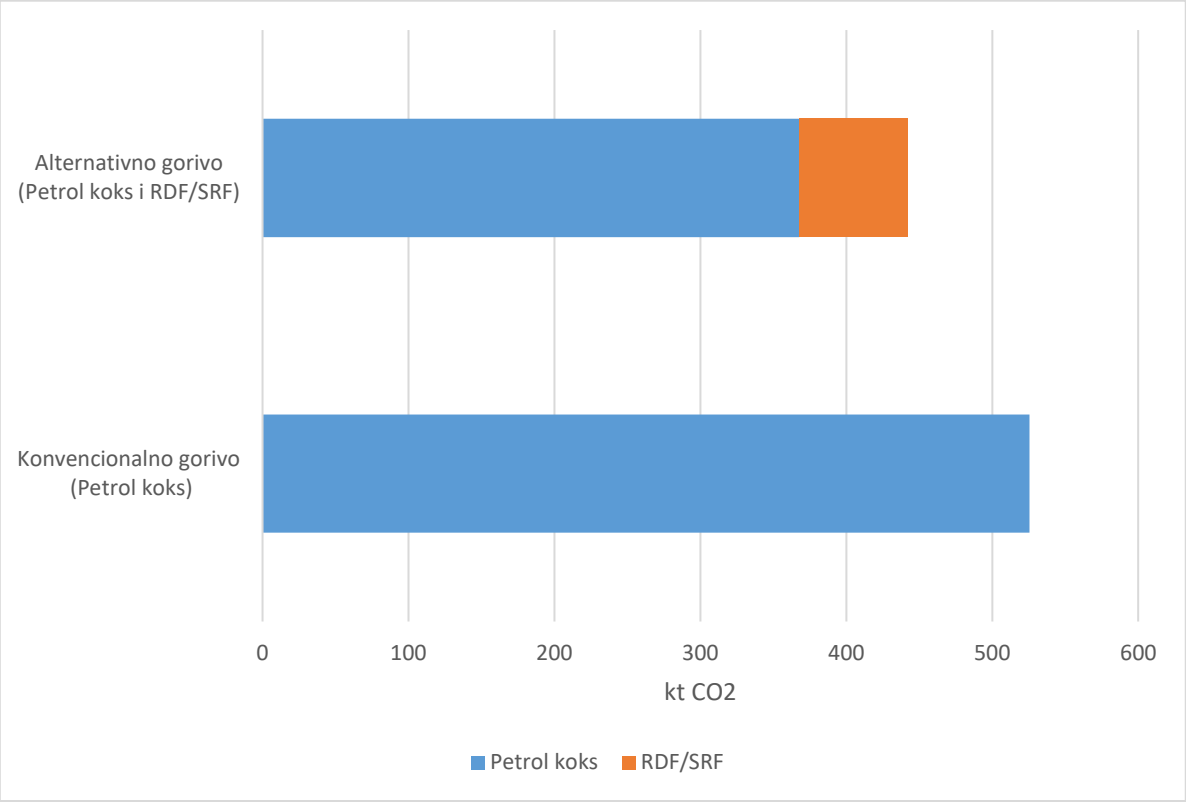


Emisije CO_2 mogu se izračunati tako da će se odrediti pojedinačne emisije CO_2 koje nastaju izgaranjem petrol koksa i RDF/SRF goriva, a zatim će se ukupna emisija CO_2 dobiti kao zbroj pojedinačnih. Kako RDF/SRF gorivo sadrži 51,18% biorazgradive komponente koja se smatra CO_2 neutralnom, u proračunu će se umjesto ukupnog emisijskog faktora RDF/SRF goriva (94,14 kg CO_2/GJ) koristiti fosilni emisijski faktor koji iznosi 45,96 kg CO_2/GJ. U tablici 19. prikazani su rezultati izračuna.

Tablica 19. Emisije CO_2 - prvi slučaj

Emisije CO_2	
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	3772876,79 GJ
Emisijski faktor petrol koksa	97,5 kg CO_2/GJ
CO_2 (petrol koks)	367855487,32 kg = 367,86 kt
Toplina dobivena izgaranjem RDF/SRF goriva	1616947,21 GJ
Emisijski faktor RDF/SRF goriva	45,96 kg CO_2/GJ
CO_2 (RDF/SRF)	74314893,63 kg = 74,31 kt
Ukupna količina emisija	442170380,95 kg = 442,17 kt

Ukupna količina emisija iznosi 442170380,95 kg (442,17 kt). Ukoliko se 30% petrol koksa zamijeni s alternativnim RDF/SRF gorivom, moguće je emisije CO_2 smanjiti za 83337488,35 kg (83,34 kt) na godišnjoj razini, odnosno 15,86% (Slika 19.).



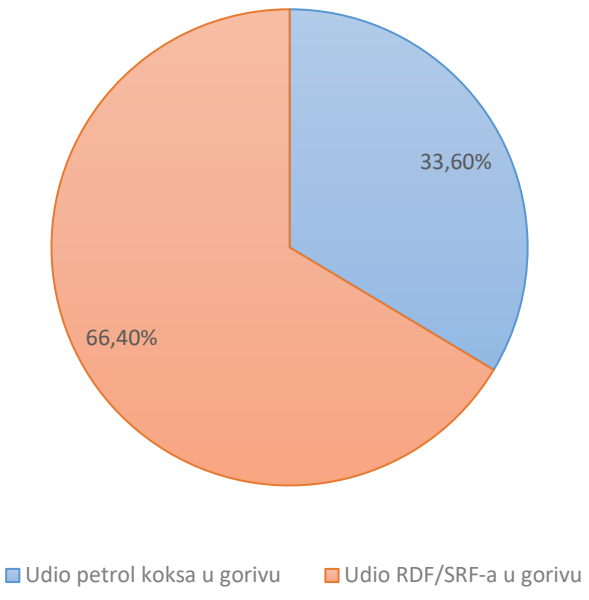
Slika 19. Usporedba emisija-slučaj 1

5.3.2 Drugi slučaj: 60% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom

U drugom slučaju 60% mase potrebnog petrol koksa zamijenjeno je RDF/SRF gorivom. Prvi korak u proračunu potencijala emisija je izračun potrebne količine RDF/SRF goriva koji je odrađen na jednaki način kao i u slučaju 1. Rezultati su prikazani u tablici 20.

Tablica 20. Potrebne količine goriva - slučaj 2

Potrebne količine goriva	
Masa petrol koksa	69546,12 t
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	2155929,60 GJ
Toplina koju ju potrebno dobiti izgaranjem RDF/SRF-a	3233894,40 GJ
Potrebna masa RDF/SRF goriva	137437,08 t
Ukupna masa goriva	206983,19 t
Udio petrol koksa u gorivu	33,60%
Udio RDF/SRF-a u gorivu	66,40%

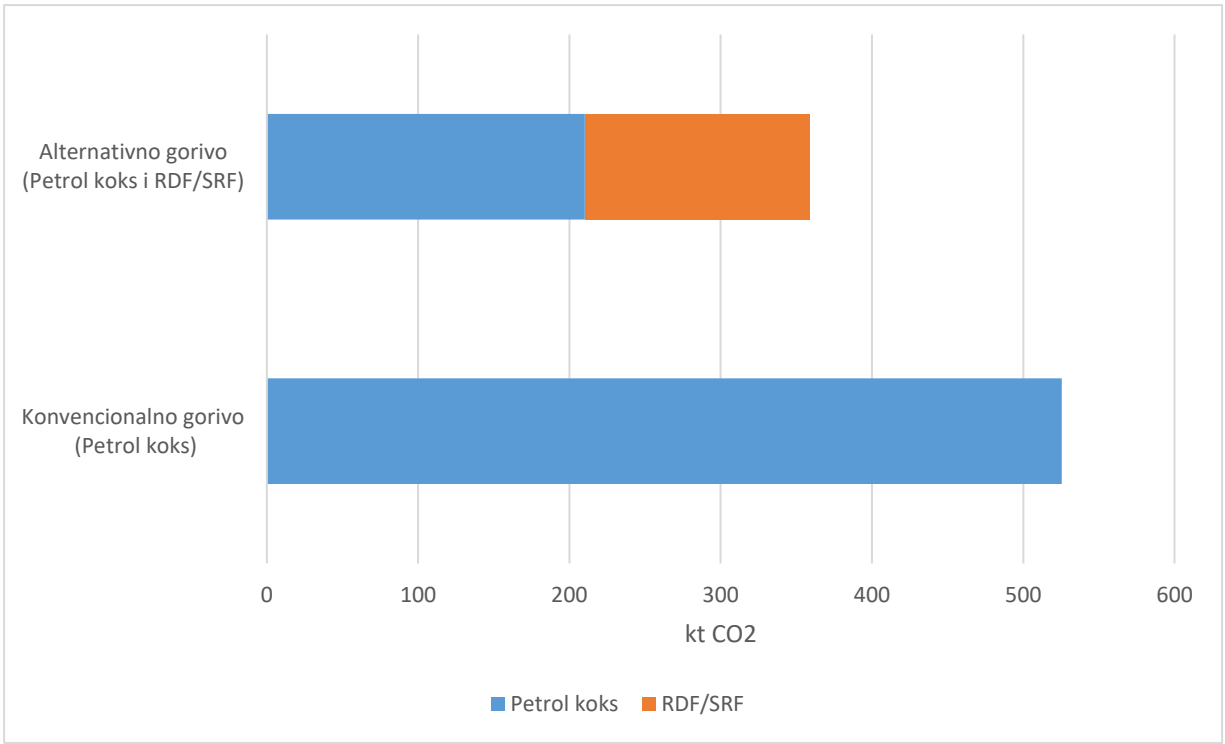


Nakon što su poznate potrebne količine goriva, slijedi proračun emisija. Pojedinačne emisije izgaranjem pojedine vrste goriva zbrajaju se kako bi se dobila ukupna količina emisija CO_2. Rezultati proračuna emisija za slučaj 2 prikazani su u tablici 21.

Tablica 21. Emisije CO_2 - drugi slučaj

Emisije CO_2	
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	2155929,60 GJ
Emisijski faktor petrol koksa	97,5 kg CO_2/GJ
CO_2 (petrol koks)	210203135,61 kg = 210,20 kt
Toplina dobivena izgaranjem RDF/SRF goriva	3233894,40 GJ
Emisijski faktor RDF/SRF goriva	45,96 kg CO_2/GJ
CO_2 (RDF/SRF)	148629786,81 kg = 148,63 kt
Ukupna količina emisija	358832922,42 kg = 358,83 kt

Ukupna količina emisija iznosi 358832922,42 kg (358,83 kt). Ukoliko se 60% petrol koksa zamijeni s alternativnim RDF/SRF gorivom, moguće je emisije CO_2 smanjiti za 166674946,88 kg (166,67 kt) na godišnjoj razini, odnosno 31,72% (Slika 20.).



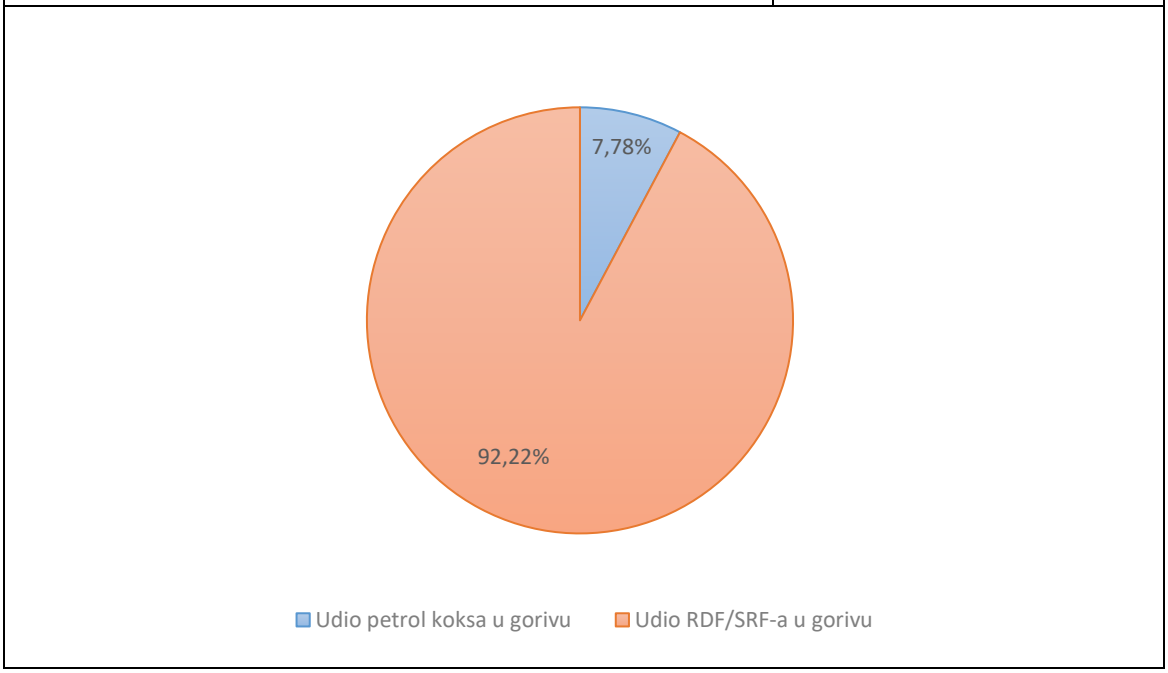
Slika 20. Usporedba emisija-slučaj 2

5.3.3 Treći slučaj: 90% petrol koksa zamijenjeno s RDF/SRF gorivom

Potencijal smanjenja emisija u trećem slučaju temeljit će se na zamijeni 90% mase potrebnog petrol koksa za proizvodnju 1532100 t klinkera godišnje alternativnim, ekološki prihvatljivijim, RDF/SRF gorivom. Prvi korak u proračunu potencijala emisija je izračun potrebne količine RDF/SRF goriva čiji su rezultati prikazani u tablici 22.

Tablica 22. Potrebne količine goriva - slučaj 3

Potrebne količine goriva	
Masa petrol koksa	17386,53 t
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	538982,40 GJ
Toplina koju ju potrebno dobiti izgaranjem RDF/SRF-a	4850841,60 GJ
Potrebna masa RDF/SRF goriva	206155,61 t
Ukupna masa goriva	223542,14 t
Udio petrol koksa u gorivu	7,78%
Udio RDF/SRF-a u gorivu	92,22%

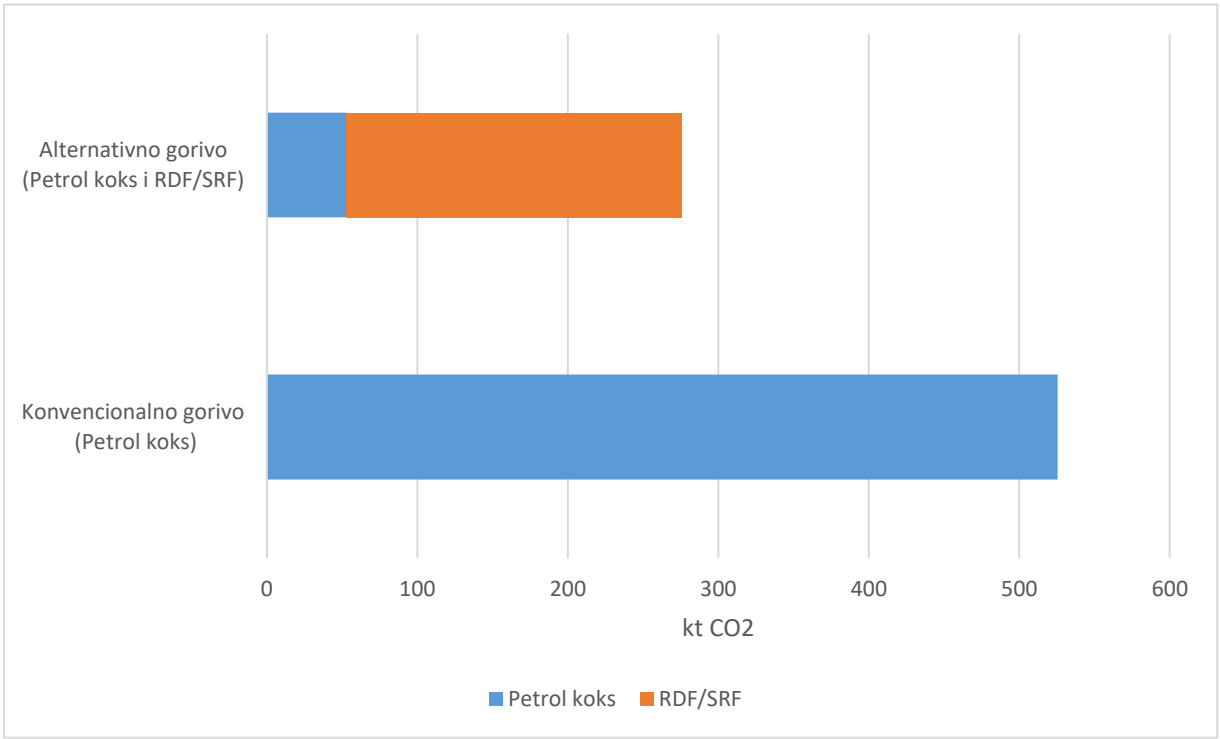


Iz poznatog sastava goriva slijedi proračun emisija CO_2. Emisije CO_2 izračunati će se na način da se odrede pojedinačne emisije CO_2 koje nastaju izgaranjem petrol koksa i RDF/SRF goriva, a zatim će se ukupna emisija CO_2 dobiti kao zbroj pojedinačnih. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 23.

Tablica 23. Emisije CO_2 - treći slučaj

Emisije CO_2	
Toplina dobivena izgaranjem petrol koksa	538982,40 GJ
Emisijski faktor petrol koksa	97,5 kg CO_2/GJ
CO_2 (petrol koks)	52550783,90 kg = 52,55 kt
Toplina dobivena izgaranjem RDF/SRF goriva	4850841,60 GJ
Emisijski faktor RDF/SRF goriva	45,96 kg CO_2/GJ
CO_2 (RDF/SRF)	222944679,98 kg = 222,94 kt
Ukupna količina emisija	275495463,88 kg =275,50 kt

Ukupna količina emisija iznosi 275495463,88 kg (275,50 kt). Ukoliko se 90% petrol koksa zamijeni s alternativnim RDF/SRF gorivom, moguće je emisije CO_2 smanjiti za 250012405,42 kg (250,01 kt) na godišnjoj razini, odnosno 47,58% (Slika 21.).



Slika 21. Usporedba emisija-slučaj 3

5.4. Ekonomska analiza potencijalnih ušteda korištenjem alternativnog goriva

Zamjenom djela konvencionalnog petrol koks goriva alternativnim RDF/SRF gorivom osim smanjenja emisija moguće je ostvariti smanjenje troškova goriva te troškova dozvola za emitiranje stakleničkih plinova u sklopu EU ETS sustava.

Za izračun uštede troškova potrebno je odrediti cijene korištenih goriva i dozvola za emitiranje. U trećem kvartalu 2021. godine cijena petrol koksa u Europi bila je u uzlaznoj putanji uslijed smanjene proizvodnje i snažne potražnje od potrošača. Porastu cijene pridonijelo je i povećanje cijene sirove nafte te zastoji u trgovačkim rutama između Europe i Sjedinjenih Američkih Država iz kojih se uvozi većina petrol koksa. Cijena petrol koksa u rujnu 2021. godine iznosila je 504 američka dolara po toni, odnosno približno 3300 HRK/t [48].

Za razliku od petrol koksa čija je cijena rasla, cijena RDF-a od početka godine kreće se između 90 i 100 britanskih funti po toni, odnosno između 790 i 880 HRK/t [49]. Gorivo iz otpada, odnosno RDF/SRF u Hrvatskoj imaju mogućnost proizvoditi 2 centra za gospodarenje otpadom (CGO), a to su ŽCGO Marišćina i ŽCGO Kaštijun te privatno postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada u gradu Varaždinu. U planu Ministarstva zaštite okoliša i energetike je izgradnja ukupno 11 CGO-a od kojih bi svaki od njih sadržavao postrojenje za mehaničko-biološku obradu, to jest svaki bi imao mogućnost proizvoditi RDF/SRF gorivo čime bi se osigurale dovoljne količine alternativnog goriva za potrebe cementne industrije [50], [51]. U Europi, najveći proizvođači RDF/SRF goriva su [52] :

- Njemačka;
- Italija;
- Nizozemska;
- Ujedinjeno Kraljevstvo.

U 2016. godini izvoz RDF/SRF goriva iznosio je 5,9 milijuna tona. Najviše RDF/SRF goriva izvozi Ujedinjeno Kraljevstvo, dok su Nizozemska i Njemačka uz Švedsku najveći uvoznici.

Cijena dozvole za emitiranje stakleničkih plinova u sklopu EU ETS sustava od početka godine se udvostručila s 30 eura po toni CO_{2e} na prosječnih 60 eura, odnosno 450 HRK/t CO_{2e} [53].

Prvi korak u izračunu potencijala ušteda korištenjem alternativnog goriva je izračun troškova goriva i dozvola kada se kao gorivo koristi isključivo petrol koks. Trošak goriva izračunava se prema formuli:

$$Trošak\ goriva = Cijena\ goriva\ (HRK/t) * Masa\ potrebnog\ goriva\ (t) \qquad (18)$$

Trošak goriva u slučaju kada se kao gorivo koristi isključivo petrol koks tada iznosi:

$$Trošak\ goriva = 3300\ HRK/t * 173865{,}3\ t = 573755490\ HRK \quad (19)$$

Trošak dozvola za emitiranje ovisi o cijeni dozvole i količini emitiranih emisija stakleničkih plinova te se izračunava prema formuli:

$$Trošak\ dozvola\ za\ emitiranje = Cijena\ dozvole\ (HRK/t\ CO_{2e}) * Količina\ emitiranih\ emisija\ (t\ CO_{2e}) \quad (20)$$

Trošak dozvola u slučaju kada se kao gorivo koristi isključivo petrol koks tada iznosi:

$$Trošak\ dozvola\ za\ emitiranje = 450\ HRK/t\ CO_{2e} * 525508\ t\ CO_{2e} = 236478600\ HRK \quad (21)$$

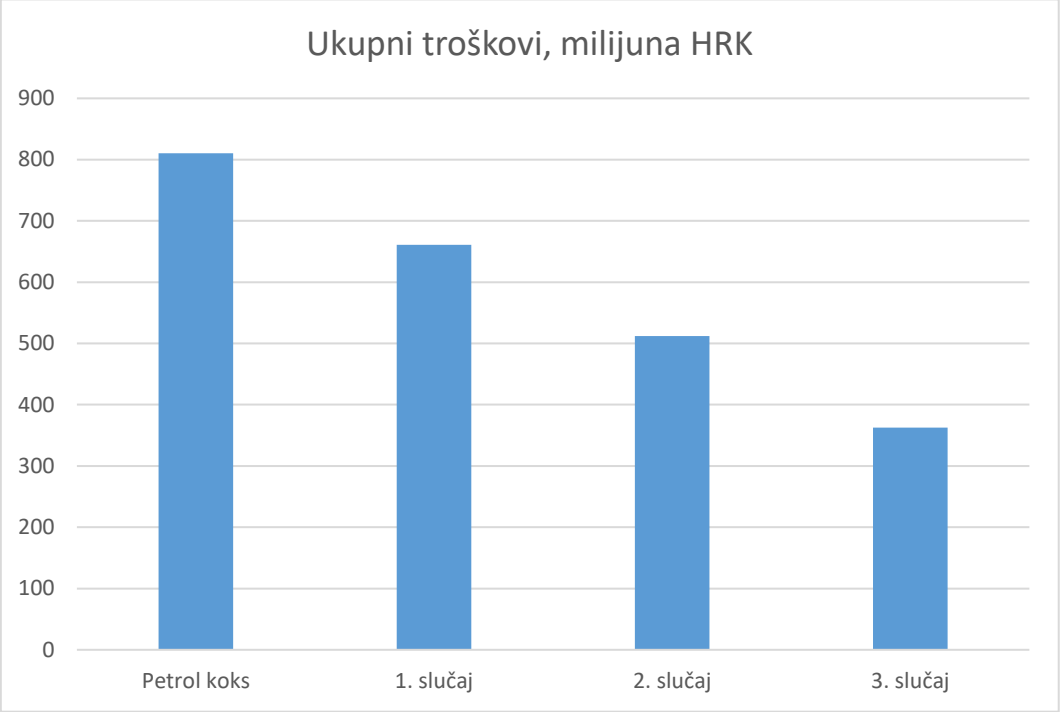
Ukupni troškovi u slučaju kada se koristi isključivo petrol koks kao gorivo tada iznose 810234090 HRK (810,23 milijuna HRK).

Rezultati izračuna troškova i potencijala smanjenja istih (s obzirom na slučaj kada se koristi isključivo petrol koks gorivo) za slučajeve u kojima je dio petrol koks goriva zamijenjen alternativnim RDF/SRF gorivom prikazani su u tablici 24.

Tablica 24. Ukupni troškovi po slučajevima

	Prvi slučaj	Drugi slučaj	Treći slučaj
Masa petrol koksa, t	121705,70	69546,12	17386,53
Troškovi petrol koksa, HRK	401628810,00	229502196,00	57375549,00
Masa RDF/SRF-a, t	68718,54	137437,08	206155,61
Troškovi RDF/SRF-a, HRK	60472315,20	120944630,40	181416936,80
Ukupni troškovi goriva, HRK	462101125,20	350446826,40	238792485,80
Ukupna količina emitiranih emisija, CO_2	442171,00	358833,00	275496,00
Troškovi dozvola za emitiranje, HRK	198976950,00	161474850,00	123973200,00
Ukupni troškovi, HRK	661078075,20	511921676,40	362765685,80
Potencijalna ušteda, HRK	149156014,80 (149,16 milijuna HRK)	298312413,60 (298,31 milijuna HRK)	447468404,20 (447,47 milijuna HRK)

Iz tablice 24. vidljivo je da zamjenom petrol koksa alternativnim RDF/SRF gorivom moguće ostvariti znatne uštede u troškovima goriva. Iako je zbog manje ogrjevne vrijednosti potrebno više RDF/SRF goriva kako bi se zamijenila određena masa petrol koksa, zbog njegove niske cijene ostvaruju se velike uštede, a kako je RDF/SRF gorivo ekološki prihvatljivije, značajne uštede ostvaruju se i kod troškova dozvola za emitiranje stakleničkih plinova. U trećem slučaju u kojemu je 90% potrebne mase petrol koksa zamijenjeno RDF/SRF gorivom, ušteda troškova iznosi 447,47 milijuna HRK, odnosno troškovi goriva i dozvola za emitiranje smanjili su se 55,23% (slika 22.).



Slika 22. Ukupni troškovi po slučajevima

Smanjenje ukupnih troškova goriva i troškova potrebnih dozvola za emitiranje stakleničkih plinova korištenjem alternativnog RDF/SRF goriva omogućava postrojenju za proizvodnju cementa smanjenje cijene proizvoda za krajnje kupce čime se ostvaruje prednost u odnosu na konkurenciju koja koristi konvencionalna goriva.

6. ZAKLJUČAK

Posljedice klimatskih promjena poput porasta prosječne temperature i sve češćih vremenskih ekstrema sve su vidljivije stoga je potrebna brza reakcija kako bi se klimatske promjene stavile pod kontrolu. Glavni pokretač klimatskih promjena je porast koncentracije stakleničkih plinova uslijed izgaranja fosilnih goriva, odnosno uslijed djelovanja čovjeka. Kako bi se ograničile klimatske promjene usvojen je Kyoto protokol kojim su se države potpisnice obvezale smanjiti emisije stakleničkih plinova, stoga industrija, koja emitira velike količine stakleničkih plinova, mora prilagođavati svoje proizvodne procese kako bi se obveze smanjenja ispunile. Europska unija predvodi borbu s klimatski promjenama poticanjem povećanja energetske učinkovitosti i poticanjem uporabe obnovljivih izvora energije zajedno s sustavom trgovanja emisijama EU ETS.

Cementna industrija, koja spada u energetski intenzivne industrije, emitira velike količine stakleničkog plina CO_2 uslijed kemijskih procesa proizvodnje i izgaranjem fosilni goriva. Smanjenje emisija uslijed kemijskih procesa ograničene je prirode, ali zato postoji više mogućnosti za smanjenje emisija koje nastaju izgaranjem fosilnih goriva – poboljšanje energetske učinkovitosti ili korištenje alternativnih goriva. Izgaranjem alternativnih goriva moguće je ostvariti značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova kao što je prikazano kroz izračun potencijala smanjenja emisija korištenjem alternativnog RDF/SRF goriva koje je moguće proizvesti iz komunalnog otpada postupcima mehaničko-biološke obrade. RDF/SRF gorivo sadrži plastiku i gumu fosilnog podrijetla, te drvo, tekstil, papir i kožu koji su biološkog podrijetla i čije se izgaranje smatra CO_2 neutralnim. Uporabom goriva iz otpada indirektno se smanjuju i emisije stakleničkih plinova koje bi nastale ukoliko bi taj otpad bio odložen. Zamjenom 90% potrebnog petrol koks goriva u odabranom postrojenju za proizvodnju cementa RDF/SRF gorivom, emisije je moguće smanjiti za 47,58% što je veliki korak u borbi s klimatskim promjenama. Korištenjem alternativnog goriva, osim smanjenja emisija, ostvaruju se i značajne uštede u troškovima čime se ostvaruje veća konkurentnost na tržištu naspram drugih proizvođača koji koriste konvencionalna goriva.

LITERATURA

[1] European Commission: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, 2013.g.

[2] Šolić Ana: Cementna industrija u Republici Hrvatskoj, Sveučilište u Splitu, Ekonomski fakultet, Završni rad, 2016.g.

[3] Croatia Cement: Industrija cementa u RH, http://www.croatiacement.hr/hr/index.php (14.5.2021.)

[4] Tadić Barbara: Hrvatsko tržište cementa i njegova tržišna struktura, Sveučilište u Splitu, Ekonomski fakultet, Završni rad, 2020.g.

[5] Britannica: Cement, https://www.britannica.com/technology/cement-building-material (16.5.2021.)

[6] Sinom Group:Ball mill, https://www.sinomgroup.com/be14.html (16.5.2021.g.)

[7] Nirvana Star: Cement making machinery rotary kiln, http://www.nirvana-star.com/cement-making-machinery-rotary-kiln/ (17.5.2021.g.)

[8] Tehno filter: Cement, https://tehno-filter.hr/cement/ (17.5.2021.g.)

[9] United Nations Climate Change: What is the Kyoto Protocol?, https://unfccc.int/kyoto_protocol (29.5.2021.g.)

[10] Hrnčević Lidia: Analiza utjecaja provedbe Kyoto protokola na naftnu industriju i poslovanje naftne tvrtke, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Doktorski rad, 2008.g.

[11] Updated carbon footprint calculation factors, https://pre-sustainability.com/articles/updated-carbon-footprint-calculation-factors/ (29.5.2021.g.)

[12] The World Bank: Carbon Pricing Dashboard, https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data (30.5.2021.g.)

[13] EU ETS Handbook, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/ets_handbook_en.pdf (10.6.2021.g.)

[14] European Comission: Phases 1 and 2, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/pre2013_en (11.6.2021.g.)

[15] European Comission: EU Emissions Trading System, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en (11.6.2021.g.)

[16] Vujanović Milan: Predavanja iz kolegija „Industrijska energetika“, FSB, Zagreb, 2020/21.

[17] European Comission: Revision for the phase 4, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision_en (12.6.2021.g.)

[18] Investigate Europe: EU Emissions Trading Scheme Explained, https://www.investigate-europe.eu/en/2020/eu-emissions-trading-scheme-explained/ (29.5.2021.g.)

[19] Ricardo: The EU emissions Trading System (ETS), https://ee.ricardo.com/sustainability/compliance/the-eu-emission-trading-scheme (12.6.2021.g.)

[20] European Commission: Monitoring, reporting and verification of EU ETS emissions, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/monitoring_en (12.6.2021.g.)

[21] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja: Sustav trgovanja emisijama stakleničkih plinova, https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug-4925/klima/sustav-trgovanja-emisijama-staklenickih-plinova/1890 (12.6.2021.g.)

[22] ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Rotary-kiln-with-preheater-cyclone-27_fig1_322289513 (15.6.2021.g.)

[23] Clarity: What is RDF & SRF?, https://www.clarity.eu.com/waste-to-fuel/what-is-rdf-srf/ (17.6.2021.g.)

[24] ResearchGate: Comparison of RDF vs. Coal: https://www.researchgate.net/figure/COMPARISON-OF-RDF-vs-COAL_tbl2_265684610 (17.6.2021.g.)

[25] EKONERG: Hrvatska industrija cementa i klimatske promjene, 2007.g.

[26] EANOVA: Analiza iskustva u proizvodnji i korištenju RDF u jugoistočnoj Europi, 2016.g.

[27] Wikipedia: Refuse-derived fuel, https://en.wikipedia.org/wiki/Refuse-derived_fuel (6.9. 2021.g)

[28] ECOINA: Izrada jedinstvene metodologije za analize sastava komunalnog otpada, određivanje prosječnog sastava komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj i projekcija količina komunalnog otpada-faza 1, 2015.g., http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Projekti/OTP_PR_Faza_1_analiza_i_ocjena_postojeceg_stanja.pdf (8.9.2021.g.)

[29] Europska komisija: Uzroci klimatski promjena, https://ec.europa.eu/clima/change/causes_hr (8.9.2021.g.)

[30] Naš planet naša budućnosti: Zajednička borba protiv klimatskih promjena, https://ec.europa.eu/clima/sites/youth/causes_hr (8.9.2021.g.)

[31] Europski parlament: Borba protiv klimatskih promjena, https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/72/borba-protiv-klimatskih-promjena (8.9.2021.g.)

[32] Hrvatska agencija za okoliš: Upute za određivanje količina odloženog biorazgradivog komunalnog otpada na odlagališta, http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Upute/OTP_D_Upute_Biorazgradivi_komunalni_otpad.pdf (15.9.2021.g.)

[33] IPCC: Industry, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf (15.9.2021.g.)

[34] European Commission: Emissions cap and allowances, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances_en (15.9.2021.g.)

[35] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu: Priručnik za izračun emisija u zrak za nacionalne E-PRTR obveznike, 2017.g.

[36] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja: Invertar stakleničkih plinova (NIR 2021), http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/inline-files/Tablica%20DOV_EF_OF%20NIR_2021.pdf (24.9.2021.g.)

[37] List of Constants and Default CO_2 emission factors, https://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Internet_Manual/constants.htm (24.9.2021.g.)

[38] Boris Halasz: Uvod u termodinamiku, FSB, 2015.g.

[39] Hrvatska enciklopedija: Kalorimetar, https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70661 (9.10.2021.g.)

[40] Kemijski rječnik: Kalorimetar, https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=kalorimetar (9.10.2021.g.)

[41] Z. Prelec: Inženjerstvo zaštite okoliša, https://www.scribd.com/document/395563522/Z-Prelec-In%C5%BEenujerstvo-Za%C5%A1tite-Okoli%C5%A1a (14.10.2021.g.)

[42] Z. Milanović: Energetsko vrednovanje otpadnih tvari, https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/410600 (14.10.2021.g.)

[43] NEXE: Novosti, Srpanj 2020., broj 44.

[44] NEXE: Novosti, Srpanj 2021., broj 47.

[45] CEMEX Hrvatska: Izvještaj o održivom razvoju 2017./2018.g.

[46] Holcim: Izvještaj o održivosti, 2016.g.

[47] Petro Driling Mining oil Co.:Petcoke, Petroleum coke, https://www.petrodmo.com/products/petcockpetroleum-coke (20.10.2021.g.)

[48] CHEMANALYST: Petroleum Coke Price Trend and Forecast, https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/petroleum-coke-1119 (10.11.2021.g.)

[49] Letsrecycle.com: EfW, landfill, RDF 2021 gate fees, https://www.letsrecycle.com/prices/efw-landfill-rdf-2/efw-landfill-rdf-2021-gate-fees/ (10.11.2021.g.)

[50] Branimir Fuk: Gorivo iz otpada-rješenje ili problem, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, https://hrcak.srce.hr/221800 (11.11.2021.g.)

[51] Waste Management: Mechanical-Biological Waste treatment Plants in Croatia, https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM8/2018_wm_313-336_sarc (11.11.2021.g.)

[52] IEA Bioenergy: Trend sin the use od solid recovered fuels, https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/05/Trends-in-use-of-solid-recovered-fuels-Main-Report-Task36.pdf (11.11.2021.g.)

[53] EMBER: Daily Carbon Prices, https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/ (15.11.2021.g.)

[54] Oxbow: Petroleum Coke, https://www.oxbow.com/Products_Energy_Products_Petroleum_Coke.html (20.10.2021.g.)

[55] ScienceDirect: Petroleum Coke, https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/petroleum-coke (20.10.2021.g.)

PRILOZI

I. CD-R disc