

# Utjecaj zamjene ugljena prirodnim plinom

---

**Goluža, Karlo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:906172>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**UTJECAJ ZAMJENE UGLJENA PRIRODNIM PLINOM**

Diplomski rad

Karlo Goluža

N392

Zagreb, 2023.

## UTJECAJ ZAMJENE UGLJENA PRIRODNIM PLINOM

Karlo Goluža

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Klimatske promjene koje su u posljednje vrijeme sve više izražene potiču društvo da pronade nove načine kojima može smanjiti svoj utjecaj na okoliš. Jedan od načina za borbu protiv klimatskih promjena je upotreba prirodnog plina kao tranzicijskog goriva. Prirodni plin je idealno tranzicijsko gorivo na putu prema obnovljivim izvorima energije jer ima puno manji utjecaj na okoliš u odnosu na ostala fosilna goriva. U ovom je radu na primjeru termoelektrane Plomin prikazan utjecaj zamjene ugljena sa prirodnim plinom što u konačnici donosi brojne ekološke i ekonomske prednosti.

Ključne riječi: ugljen, prirodni plin, termoelektrana Plomin, fosilna goriva, štetne emisije

Završni rad sadrži: 63 stranice, 13 tablica, 8 slika i 30 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Nikola Vištica, docent RGNf-a

Ocjenjivači:

1. Dr. sc. Nikola Vištica, docent RGNf-a
2. Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf-a
3. Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf-a

## THE IMPACT OF REPLACING COAL WITH NATURAL GAS

Karlo Goluža

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

Climate changes, which have become more and more pronounced recently, encourage us to find new ways to reduce our impact on the environment. One way to combat climate change is to use natural gas as a transition fuel. Natural gas is an ideal transition fuel on the way to renewable energy sources because it has a much smaller impact on the environment compared to other fossil fuels. In this paper, using the example of the Plomin thermal power plant, the impact of replacing coal with natural gas is shown, which ultimately brings numerous ecological and economic advantages.

Keywords: coal, natural gas, Plomin thermal power plant, fossil fuels, harmful emissions

Thesis contains: 63 pages, 13 tables, 8 figures and 30 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assistant Professor Nikola Vištica, PhD

Reviewers:

1. Assistant Professor Nikola Vištica, PhD
2. Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD
3. Associate Professor Luka Perković, PhD

<b>Sadržaj</b>	
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FOSILNA GORIVA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Nafta .....	4
2.2 Ugljen .....	5
2.3 Prirodni plin.....	6
2.4 Izgaranje fosilnih goriva.....	7
<b>3. EMISIJE FOSILNIH GORIVA .....</b>	<b>10</b>
3.1 Emisije iz ložišta .....	10
3.2 Temeljni pravilnici o emisijama fosilnih goriva .....	10
3.3 Termoelektrane.....	10
<b>4. TERMOELEKTRANA PLOMIN.....</b>	<b>14</b>
4.1 Osnove o termoelektrani Plomin.....	15
4.1.1 Prikaz lokacije postrojenja.....	16
4.1.2 Prikaz proizvodnih kapaciteta i procesa .....	16
4.1.3 Opskrba ugljenom, plinskim uljem i vodom .....	17
4.1.4 Problematika zbrinjavanja nusproizvoda .....	19
4.2 Postrojenje termoelektrane Plomin 2 .....	19
<b>5. ODRŽIVI RAZVOJ I TERMOELEKTRANE.....</b>	<b>21</b>
5.1 Analiza održivog razvoja .....	22
5.2 Temeljni aspekti održivog razvoja .....	24
5.3 Primjeri zamjene ugljena prirodnim plinom u SAD-u .....	25
<b>6. ANALIZA UTJECAJA ZAMJENE UGLJENA PRIRODNIM PLINOM U TERMOELEKTRANI PLOMIN .....</b>	<b>26</b>
6.1. Analiza stanja .....	26
6.2. Budućnost prirodnog plina i održivi razvoj.....	27
6.3 Analiza utjecaja zamjene.....	27
<b>7. 7. EKOLOŠKA ANALIZA RADA TE PLOMIN 2 SA UGLJENOM I PRIRODNIM PLINOM KAO POGONSKIM GORIVOM.....</b>	<b>33</b>
7.1. Kemijski sastav krutih i tekućih goriva.....	33
7.2. Kemijski sastav plinovitih goriva.....	34

7.3.	Stehiometrijske jednadžbe izgaranja goriva.....	35
7.4.	Mase zraka i produkata izgaranja pri korištenju ugljena kao goriva.....	38
7.4.1.	<i>Donja ogrjevna vrijednost</i> .....	38
7.4.2.	<i>Potrebna masa ugljena</i> .....	39
7.4.3.	<i>Potrebna masa zraka za potpuno izgaranje</i> .....	40
7.4.4.	<i>Masa produkata izgaranja</i> .....	42
7.4.5.	<i>Dnevne mase produkata izgaranja ugljena</i> .....	45
7.5.	Mase zraka i produkata izgaranja pri korištenju zemnog plina kao goriva.....	47
7.5.1.	<i>Donja ogrjevna vrijednost</i> .....	47
7.5.2.	<i>Potrebna masa prirodnog plina</i> .....	47
7.5.3.	<i>Potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje</i> .....	48
7.5.4.	<i>Obujam produkata izgaranja</i> .....	50
7.5.5.	<i>Dnevne mase produkata izgaranja prirodnog plina</i> .....	52
<b>8.</b>	<b>USPOREDNA ANALIZA RADA TE PLOMIN B SA UGLJENOM I SA PRIRODNIM PLINOM</b> .....	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>60</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>61</b>

## **POPIS SLIKA**

<b>Slika 2-1.</b> Prikaz proizvodnje prirodnog plina.....	7
<b>Slika 3-1.</b> Skica plinsko-turbinskog postrojenja.....	11
<b>Slika 3-2.</b> Skica parno-turbinskog postrojenja.....	12
<b>Slika 3-3.</b> Skica kombiniranog postrojenja.....	13
<b>Slika 4-1.</b> Prikaz lokacije Termoelektrane Plomin .....	16
<b>Slika 4-2.</b> Prikaz deponija Termoelektrane Plomin .....	17
<b>Slika 4-3.</b> TE Plomin 2 .....	20
<b>Slika 8-1.</b> Dnevna masa produkata izgaranja za prirodni plin i ugljen (t/d).....	55

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1.</b> Prikaz sastava nafte .....	5
<b>Tablica 2-2.</b> Standardna svojstva prirodnog plina za opskrbu u RH.....	6
<b>Tablica 5-1.</b> Razlikovanje održivog i neodrživog razvoja .....	23
<b>Tablica 6-1.</b> Emisije CO <sub>2</sub> u kilogramima po 0,293 MWh energije za različita goriva .....	28
<b>Tablica 6-2.</b> Osnovne karakteristike visokokaloričnog niskosumpornog ugljena .....	29
<b>Tablica 6-3.</b> Duljina i sastavni dijelovi plinskog transportnog sustava u Republici Hrvatskoj .....	31
<b>Tablica 6-4.</b> Procjena troškova za prenamjenu termoelektrane .....	31
<b>Tablica 6-5.</b> Prosječna prodajna cijena prirodnog plina (u kn/m <sup>3</sup> i kn/kWh s PDV-om).....	32
<b>Tablica 7-1.</b> Prikaz sastava kamenog ugljena iz Rusije .....	39
<b>Tablica 7-2.</b> Prikaz sastava prirodnog plina na mjernom mjestu Pula .....	47
<b>Tablica 8-1.</b> Prikaz sastojaka izgaranja goriva (1kg) .....	54
<b>Tablica 8-2.</b> Prikaz sastojaka izgaranja goriva .....	54
<b>Tablica 8-3.</b> Prikaz dnevne mase produkata izgaranja .....	55



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

OZNAKA	OPIS	JEDINICA
SSCM	Praksa upravljanja održivim opskrbnim lancem (engl. Simultaneous Source Control Managers)	/
CCUS	Hvatanje, iskorištavanje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. Carbon Capture, Usage and Storage)	/
LNG	Ukapljeni prirodni plin (engl. Liquefied Natural Gas)	/
R	Latentna toplina isparavanja	kJ/kg
H <sub>G</sub>	Gornja ogrjevna vrijednost	MJ/kg
H <sub>D</sub>	Donja ogrjevna vrijednost	MJ/kg
Q <sub>MG</sub>	Maseni protok goriva	kg/s
Q <sub>VG</sub>	Volumni protok goriva	m <sup>3</sup>
M	Masa	kg
V	Obujam	m <sup>3</sup>

## 1. UVOD

Tematika ovog rada odnosi se na utjecaj zamjene ugljena prirodnim plinom sa naglaskom na smanjenje emisije štetnih tvari u okoliš, što će u nastavku rada biti prikazano na primjeru termoelektrane Plomin koja kao pogonsko gorivo za proizvodnju električne energije koristi ugljen. Iako su termoelektrane na ugljen iznimno raširene, jasno je kako je nužno voditi brigu o okolišu i tražiti optimalna rješenja koja će moći riješiti probleme s kojima se danas susreće. Temeljni predmet ovog rada su ekološki aspekti zamjene ugljena prirodnim plinom na primjeru TE Plomin. Cilj ovog rada je istražiti rad TE Plomin i uvidjeti koje promjene bi donijela zamjena ugljena s prirodnim plinom.

U svrhu istraživanja korišteni su sekundarni izvori podataka. Ovi podaci su prikupljeni pretraživanjem domaće i strane stručne literature iz područja energetike, termoelektrana, održivog razvoja s naglaskom na ugljen i prirodni plin. Prikupljeni podaci su obrađeni znanstvenim metodama kao što je analiza, sinteza, deskripcija i ostalo, te će se na kraju formirati zaključci koji odgovaraju na istraživačka pitanja.

Rad se sastoj od deset poglavlja. U uvodnom dijelu rada prikazani su predmet i cilj rada, struktura rada i metode istraživanja koje su upotrijebljene unutar samog rada. Drugo poglavlje odnosi se na emisije korištenja fosilnih goriva. Navedeno poglavlje služi kao uvod u sam pojam fosilnih goriva i emisije fosilnih goriva. U navedenom poglavlju prikazat će se opis nafte, ugljena i prirodnog plina kao i sam proces izgaranja fosilnih goriva. Treće poglavlje odnosi se na izvore emisija fosilnih goriva gdje će se prikazati konkretne emisije iz ložišta te temeljni pravilnici o emisijama fosilnih goriva s naglaskom na termoelektrane.

Ujedno unutar ovog poglavlja prikazat će se i temeljna teorijska obrada pojma termoelektrane. Četvrto poglavlje odnosi se na konkretno termoelektranu Plomin. Unutar navedenog poglavlja prikazat će se osnove o termoelektrani Plomin čime će se uključiti prikaz lokacije samog postojanja, prikaz proizvodnih kapaciteta i procesa, opskrba ugljenom, plinskim uljem i vodom kao i problematika koja se odnosi na zbrinjavanje nusproizvoda koji nastaju. U ovom poglavlju prikazat će se problematika postrojenja Plomin 1 i postrojenja Plomin 2 kao i konkretne emisije štetnih tvari Termoelektrane Plomin 2. U petom poglavlju naglasak je na održivom razvoju i termoelektranama čime će se prikazati teorijska obrada pojma održivog razvoja, temeljni aspekti održivog razvoja te značaj

održivog razvoja u okviru termoelektrana. Šesto poglavlje donosi analizu utjecaja zamjene ugljena prirodnim plinom u termoelektrani Plomin. U navedenom poglavlju prikazat će se analiza stanja, budućnost prirodnog plina u okviru održivog razvoja i konkretna analiza utjecaja zamjene. U nastavku rada slijedi proračun i usporedba dobivenih emisija štetnih tvari u slučaju zamjene ugljena sa prirodnim plinom na postrojenju Plomin 2. Na kraju rada nalazi se zaključak u kojem su izneseni svi relevantni zaključci doneseni na temelju izrade rada.

## 2. FOSILNA GORIVA

U nastavku rada biti će navedene emisije prilikom korištenja fosilnih goriva. Naglasak je prije svega na emisijama koje nastaju prilikom izgaranja nafte, ugljena i prirodnog plina. Fosilna goriva zapravo predstavljaju goriva koja nastaju od prirodnih resursa poput anaerobnog raspadanja istaloženih organizama. Ujedno je potrebno istaknuti kako su fosilna goriva zapravo osnovni nositelji kemijske energije pa je shodno tome temeljna energetska transformacija putem koje se prenose u neke druge oblike upravo proces izgaranja. Navedenim procesom dolazi do oslobađanja različitih štetnih plinova koji imaju utjecaj na okoliš, a kao primjer se mogu navesti primjerice ugljikov monoksid, ugljikov dioksid kao i sumporni dioksid. Prema svemu do sada navedenom moguće je protumačiti kako upravo fosilna goriva imaju jedan od ozbiljnijih utjecaja na okoliš. Na temelju izgaranja fosilnih goriva u područje atmosfere ispuštaju se iznimne količine ugljika koji se taložio kroz dugo razdoblje. Vrlo bitno je istaknuti kako fosilna goriva ujedno sadržavaju i neke radioaktivne tvari kao što su primjerice uranij ili pak torij, tj. različita goriva koja se ispuštaju u atmosferu. Navedenim je načinom godine 2000. u atmosferu bilo otpušteno čak 12 tisuća tona torija, odnosno čak 5000 tona urana (Rao i Baer, 2007).

Djelatnosti kao što je prerada te ujedno i distribuiranje fosilnih goriva isto tako predstavljaju svojevrsan izvor emisija štetnih tvari u okoliš. Također proces rafiniranja nafte značajno zagađuje vodu i zrak. Kao još jedan primjer može se navesti i prijevoz ugljena. Navedeni zahtijeva upotrebu vlakova kako bi se ugljen prenosio, odnosno brodova kada se radi o transportu na veće udaljenosti. Vidljivo je kako čak i sami transport ovih vrsta goriva zahtijeva dodatnu potrošnju fosilnih goriva.

Ipak, fosilna goriva imaju i neke prednosti u odnosu na druga goriva što je i razlog da još uvijek predstavljaju najvažniji izvor energije. Prije svega nužno je istaknuti kako su fosilna goriva upravo primjer pouzdanog izvora energije, odnosno kako imaju vrlo rasprostranjenu tehnologiju koja se odnosi na proces pripreme. Što se tiče nedostataka, jedan od najvećih nedostataka je emitiranje štetnih tvari i plinova u okoliš i sama ograničenost rezervi. U nastavku rada prikazat će se postanak i određena svojstva pojedinih vrsta fosilnih goriva.

## 2.1 Nafta

Nafta predstavlja prirodnu zapaljivu tekućinu, odnosno tekućinu koja se sastoji od vrlo kompleksne smjese ugljikovodika koji imaju različitu molekularnu masu. Nafta se nalazi u geološkim formacijama ispod zemljine površine. Sam izraz „nafta“ po prvi puta se koristio unutar rasprave njemačkog mineraloga Georgea Bauera godine 1546. pod nazivom „De Natura Fossilium“. Pravo značenje nafta dobiva tek godine 1859. kada je u Pennsylvaniji izrađena prva bušotina i čime je označen početak industrijske proizvodnje. Što se tiče prve velike rafinerije, ona je otvorena na području Rumunjske 1856. godine te se u navedeno doba koristila isključivo za dobivanje petroleja i kao mast namijenjena za podmazivanje. Nakon što je došlo do vrlo naglog razvoja automobilske industrije i sukladno tome sve veće potražnje za naftom, očekivano je došlo i do razvoja novih tehnologija za dobivanje goriva iz nafte, odnosno same tehnologije rafiniranja.

Nafta osim ugljikovodika ujedno sadržava i različite spojeve kisika, dušika ili pak sumpora. Zanimljivo je što se nafta zapravo naziva i „crnim zlatom“ (Sawyer et al., 1994). Sama nafta nastaje procesom razgradnje vrlo velikih molekula masti, ulja te voska koji su pridonijeli stvaranju keragona. Ovaj proces je započeo prije čak nekoliko milijuna godina kada je morski život polako izumirao i taložio se na morskom dnu, potisnut je unutar slojeva glina, mulja i pijeska, te je došlo do postupnog procesa razgradnje i to putem djelovanja topline i tlaka. Navedenim procesom došlo je do stvaranja čak nekoliko stotina spojeva. S obzirom da je upravo nafta fluid, imala je mogućnost migracije kroz stijene u tijeku svog nastajanja. Kako bi se ispod zemlje mogle stvoriti velike i ekonomski isplative količine nafte, potrebna su velika područja poroznih stijena sa međusobno povezanim porama koje omogućuju migraciju nafte kroz stijene.

Što se tiče naftnih ležišta, ona zapravo predstavljaju naftu koja je sadržana u vrlo poroznoj stijeni kao što je primjerice pješčenjak. Što se tiče zamki za ugljikovodike, one predstavljaju neporoznu stijensku formaciju odnosno nepropusne stijene koje drže to isto naftno ležište na okupu odnosno sprječavaju daljnju migraciju nafte (Sawyer et al., 1994).

Ugljikovodici se akumuliraju unutar ležišne stijene, najčešće poroznog pješčenjaka ili pak vapnenca. Bitno je napomenuti kako sama stijena ležišta mora imati pokrov koji se sastoji od nepropusne stijene koja na taj način neće dopustiti daljnju migraciju ugljikovodika. Prikaz sastava nafte vidljiv je u Tablici 2-1.

**Tablica 2-1.** Prikaz sastava nafte (Jukić, 2021)

Element	Udio (%)
Ugljik (C)	83-87
Vodik (H)	10-14
Kisik (O)	0,05-1,5
Dušik (N)	0,1-2
Sumpor (S)	0,05-6

Naime, većina spojeva u nafti je takva da sadržava u prosjeku od pet do dvadesetak atoma ugljika. Zanimljivo je kako se brojni od navedenih sastoje upravo od ravnih lanaca atoma ugljika koji su okruženi atomima vodika. Što se tiče agregatnog stanja ugljikovodika ono je u ovisnosti od broja atoma ugljika unutar molekule, kako je navedeno u nastavku.

Ugljikovodici koji imaju manje od pet atoma ugljika, uglavnom su plinovi na uobičajenim temperaturama, ukoliko se radi o ugljikovodicima sa pet do petnaest atoma ugljika, oni su u tekućem stanju i u najvećoj mjeri čine naftu. Ukoliko je riječ o ugljikovodicima koji imaju više od petnaest atoma ugljika, tada se radi o vrlo gustim, viskoznim tekućinama do voštanim krutinama (Rao i Baer, 2007).

## 2.2 Ugljen

Ugljen predstavlja vrlo zapaljivu crnu ili smečkasto-crnu sedimentnu stijenu koja je nastala kada je došlo do razvoja ugljenih slojeva. Radi se zapravo o ugljiku s promjenjivim količinama nekih drugih elemenata kao što su primjerice vodik, sumpor, kisik ili pak dušik. Konkretno ugljen nastaje taloženjem i razgradnjom biljne tvari pod utjecajem topline i pritiska pokrovnih stijena kroz dugo vremensko razdoblje. Najveća nalazišta ugljena potječu iz područja koja predstavljaju primjerice bivše močvare, odnosno tako zvane šume ugljena koje su pokrivala ponajviše velik dio tropskih kopnenih područja za vrijeme kasnog karbona. Ipak, potrebno je istaknuti kako ujedno postoje i vrlo značajna mlađa ležišta ugljena iz mezozoiskog i kenozoiskog doba.

Danas se ugljen prvenstveno koristi kao gorivo. Iako je on poznat i koristi se čak tisućama godina, njegova upotreba je ipak bila ograničena prije nego li je došlo do

industrijske revolucije (Chou, 1997). Izumom parnog stroja došlo je do povećane potrošnje ugljena. Od tog razdoblja ugljen postaje iznimno važno gorivo koje se počinje koristiti kao sirovina za proizvodnju električne energije u elektranama. Samo vađenje kao i upotreba ugljena uzrokuje brojne prerane smrti i različite bolesti pa upravo iz tog razloga uzrokuje brojne kontroverze. Industrija ugljena ima vrlo značajan utjecaj na okoliš gdje se prije svega naglašavaju klimatske promjene. Naime, upravo je ugljen najveći antropogeni izvor ugljikova dioksida odnosno uzrokuje 40% ukupne emisije fosilnih goriva i čak preko 25% ukupnih globalnih emisija stakleničkih plinova (Chou, 1997).

### 2.3 Prirodni plin

Kada se govori o prirodnom plinu zapravo je riječ o smjesi plinovitih ugljikovodika koja se nalazi u ležištima poroznih stijena, a najčešće se upravo radi o pijesku ili o pješčenjaku koji je pokriven nepropusnim slojevima. Vrlo često je povezan s naftom s kojom zapravo ima zajedničko podrijetlo u samoj razgradnji organske tvari unutar sedimentnih naslaga. Standardna svojstva prirodnog plina za opskrbu u Republici Hrvatskoj prikazana su u Tablici 2-2.

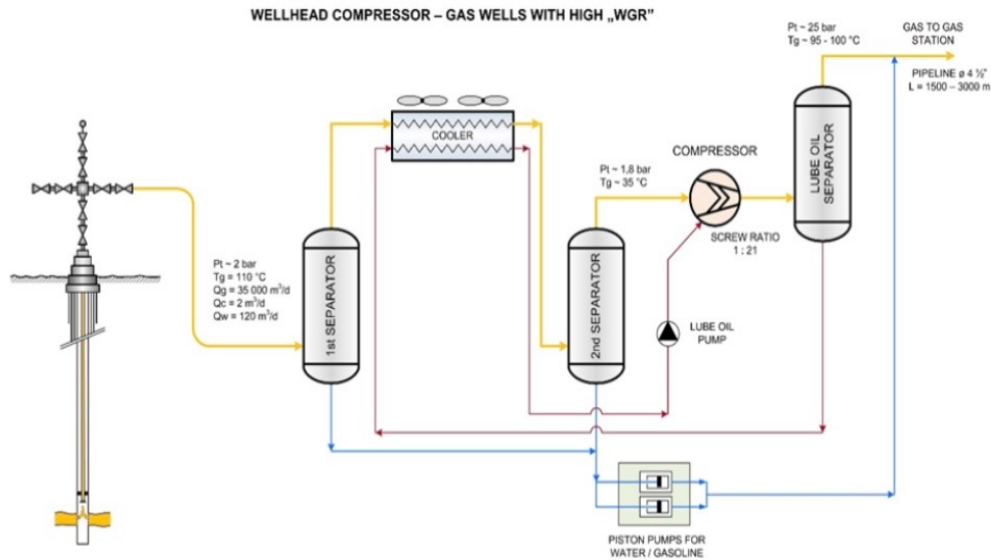
**Tablica 2-2.** Standardna svojstva prirodnog plina za opskrbu u RH (Narodne Novine [NN], 68/2023)

Osnovna svojstva	Iznos
<b>Kemijski sastav, mol %</b>	
- Ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> )	maksimalno 2,5 ili 4
- Kisik (O <sub>2</sub> )	maksimalno 0,001 ili 1
<b>Sadržaj sumpora, mg/m<sup>3</sup></b>	
- Sumpor ukupni (S)	maksimalno 30
- Sumporovodik i karbonil sulfid ukupno (H <sub>2</sub> S+COS)	maksimalno 5
- Mercaptani (RHS)	maksimalno 6
<b>Gornja ogrjevna vrijednost Hg, kWh/m<sup>3</sup></b>	minimalno 10,96 maksimalno 12,75
<b>Gornji Wobbe – indeks Wg, kWh/m<sup>3</sup></b>	minimalno 13,60 maksimalno 15,81
<b>Relativna gustoća d</b>	minimalno 0,555 maksimalno 0,70
<b>Metanski broj</b>	minimalno 70

Prirodni plin se u pravilu sastoji od slijedećih spojeva: metana (CH<sub>4</sub>), etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butana (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), viših alkana (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> i više), dušika (N<sub>2</sub>), kisika (O<sub>2</sub>),

ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), sumporovodika ( $\text{H}_2\text{S}$ ), žive (Hg), helija (He) i raznih drugih primjesa.

Na Slici 2-1 prikazan je proces proizvodnje prirodnog plina sa visokim sadržajem vode.



**Slika 2-1.** Prikaz proizvodnje prirodnog plina (Lukić et al., 2019)

Naime, prirodni plin se transportira u vrlo velikim cjevovodima ili metanijerima pod posebnim uvjetima tlaka i temperature prilikom transporta na veće udaljenosti. Riječ je zapravo o vrlo zapaljivoj smjesi ugljikovodika, a kada isti sagorijevaju dobiva se iznimno velika količina energije. Energija prirodnog plina je potrebna za zagrijavanje domova, pripremu hrane, proizvodnju električne energije i ostalo.

Potrebno je istaknuti kako za razliku od drugih fosilnih goriva prirodni plin gori prilično čisto pa samim time u zrak se emitiraju daleko niže razine nusproizvoda koji su potencijalno štetni za okoliš. S obzirom da je potreba za energijom konstantno u porastu tako i sam prirodni plin dobiva na svojoj važnosti.

## 2.4 Izgaranje fosilnih goriva

Proces izgaranja je zapravo egzotermna redoks kemijska reakcija goriva i oksidansa. Navedena reakcija prema pravilu atmosferskog kisika je reakcija koja stvara oksidirane i najčešće ujedno i plinovite produkte. Radi se zapravo o tako zvanom dimnom plinu. Kao



glavni izvori topline i električne energije navode se upravo fosilna goriva što podrazumijeva ugljen, prirodni plin, kao i naftu. Sva ova goriva sadržavaju ugljik, vodik i kisik, no ujedno i druge tvari. Među njima se tako primjerice ističu sumpor i dušik, odnosno spojevi istih. Pri procesu sagorijevanja dolazi do emitiranja različitih onečišćivača kao što je primjerice lebdeći pepeo, različiti sumporni i dušikovi oksidi kao i hlapljivi organski spojevi.

Lebdeći pepeo sadržava ujedno i razne elemente u tragovima, tj. teške metale. Ove onečišćujuće tvari su prisutne u atmosferi tako da mogu na štetan način djelovati na čovjeka, odnosno na njegovu okolinu.

Kada se govori o onečišćenju zraka koje je uzrokovano česticama kao i drugim zagađivačima, one djeluju izravno na sam okoliš te ujedno procesom onečišćenja vode i tla dolazi i do razgradnje navedenih. Ovim postupkom vlažnog i suhog taloženja različitih anorganskih zagađivača dolazi do zakiseljavanja okoliša. Upravo navedene pojave stoga utječu na zdravlje ljudi, odnosno dovode do pojave i povećanja korozije i na taj način uništavaju obrađeno tlo, ali i šumski pokrov.

Također, emisijom tvari koje nastaju kao produkti izgaranja fosilnih goriva u prisustvu vodenih para, kapljica ili pak magle nastaju sumporna te dušična kiselina. Problemi koji su isto tako vrlo bitni i o kojima se raspravlja su emisije hlapljivih organskih spojeva u atmosferu. Ove emisije uzrokuju iscrpljivanje same stratosferske zone, odnosno uzrokuju prizemno fotokemijsko stvaranje samog ozona, toksične ili čak i kancerogene učinke na ljudsko tijelo. Jedna od zabrinjavajućih stavki je isto tako i globalni efekt staklenika.

Od navedenih produkata izgaranja jedan od najistaknutijih je svakako ugljikov dioksid. Upravo je ugljikov dioksid temeljni produkt izgaranja fosilnih goriva. To je plin koji je bezbojan, nema mirisa, a njegova gustoća je malo veća od gustoće zraka. Jasno je kako se ovdje ujedno radi zapravo o stakleničkom plinu koji je prisutan unutar Zemljine atmosfere, a njegova ukupna koncentracija je čak oko 400 dijelova na milijun (ppm). Ukoliko bi se razmatrala koncentracija koja se smatra opasnom za život tada se govori o koncentraciji od 40 000 ppm (Bolf, 2020).

Još jedan od nusprodukata je i ugljikov monoksid. Riječ je o bezbojnom plinu koji isto tako nema mirisa. Isti se formira onda kada ugljik koji se nalazi u gorivu ne izgori u potpunosti. U ovom slučaju dolazi do javljanja štetnih učinaka na zdravlje ukoliko je koncentracija veća od 10 ppm u slučaju izlaganja (Bolf, 2020).

Od ostalih se isto tako ističu i dušikovi oksidi. Riječ je zapravo o plinovima koji se stvaraju na temelju spaljivanja goriva pri vrlo visokim temperaturama. Kao primaran izvor navedenog svakako su različite elektrane.

### 3. EMISIJE FOSILNIH GORIVA

U nastavku rada navode se izvori emisija fosilnih goriva te temeljni pravilnici koji se odnose na emisije fosilnih goriva i konkretno na termoelektrane.

#### 3.1 Emisije iz ložišta

Emisije fosilnih goriva su emisije koje imaju različite izvore. Gledajući prema specifičnom recipijentu, tj. gledajući prema stavci gdje emisija završava, govori se o recipijentima vode, tla i zraka. Konkretno, emisija u zrak je emisija koja može biti produkt različitih prirodnih procesa kao što su na primjer različite erupcije vulkana, šumski požari, a isto tako izvor predstavlja i izgaranje iz ložišta. Zadnje navedene, emisije iz ložišta, zapravo predstavljaju točkaste izvore.

Radi se o izvorima iz kojih se onečišćujuće tvari unose u zrak i to putem ispuštanja iz različitih postrojenja. Emisije koje se ispuštaju iz ložišta su emisije koje se mogu prikazati veličinama poput masenog protoka, masene koncentracije ili pak emisijskog faktora.

#### 3.2 Temeljni pravilnici o emisijama fosilnih goriva

Kada se govori o temeljnim pravilnicima o emisijama fosilnih goriva jasno je kako treba krenuti od same Uredbe o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN, 42/2021), čime dolazi do utvrđivanja razine dopuštenog prekoračenja postojećih graničnih vrijednosti i to za postojeće izvore, tj. za određeno razdoblje, za određeno praćenje, ali isto tako i za samo vrednovanje emisija. Navedenom Uredbom se isto tako vrši i upis samih nepokretnih izvora i to unutar registra koji se odnosi na male, srednje i na velike uređaje namijenjene za loženje, odnosno srednje i velike plinske turbine. Uredbom se propisuju i posebni načini koji se odnose na smanjivanje potrebnih emisija onečišćujućih tvari u zraku, sam način i rok koji je propisan za dostavljanje potrebnog izvješća o emisijama ministarstvu koje je nadležno za zaštitu okoliša.

#### 3.3 Termoelektrane

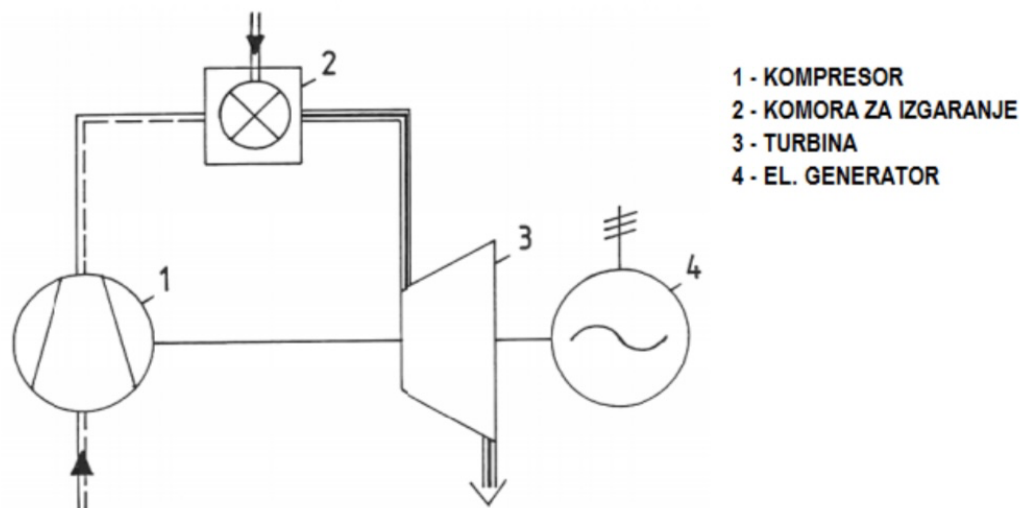
Kada se govori o termoelektranama, govori se zapravo o termoenergetskim postrojenjima koja energiju dobivaju putem izgaranja goriva dok je glavna primjena i svrha navedenih proizvodnja pare koja pokreće turbinu, a zatim pokreće i generator električne

energije. Osnovna namjena termoenergetskih postrojenja je upravo usmjerena na proizvodnju i na transformaciju primarnih oblika energije u koristan rad koji se potom u obliku mehaničke energije može dalje iskoristavati za proizvodnju električne energije. Što se tiče mehaničke energije, ona je proizvedena uz pomoć toplinskog stroja koji je usmjeren prema transformaciji toplinske energije. Tu se kemijska energija potom pretvara u toplinsku koja se zatim različitim procesima predaje nekom određenom mediju. Što se tiče radnog medija on služi kao određeni prijenosnik energije.

Termoelektrane je moguće kategorizirati na nekoliko osnovnih. Tako primjerice prema vrsti pokretača iste se dijele na sljedeće (Radić, 2015):

- Plinsko-turbinsko postrojenje,
- Parno turbinsko postrojenje i
- Kombinirano postrojenje.

Kada se radi o plinsko-turbinskom postrojenju naglašava se kako isti iskorištava dinamički tlak koji je stvoren na temelju protoka plinova i to za direktno pokretanje turbine što je prikazano na Slici 3-1. Sam proces koji se odvija konkretno u plinskoj turbini ne smatra se toliko različitim od procesa koji se odvija u parnoj turbini.

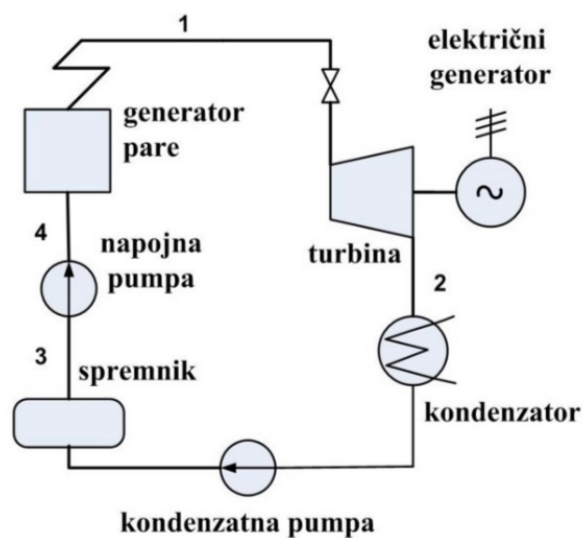


Slika 3-1. Skica plinsko-turbinskog postrojenja (Radić, 2015)

Što se tiče temeljne razlike, ona se odnosi na pad entalpije koji je unutar plinske turbine daleko manji, dok je s druge strane konkretan porast volumena veći. Ukoliko se

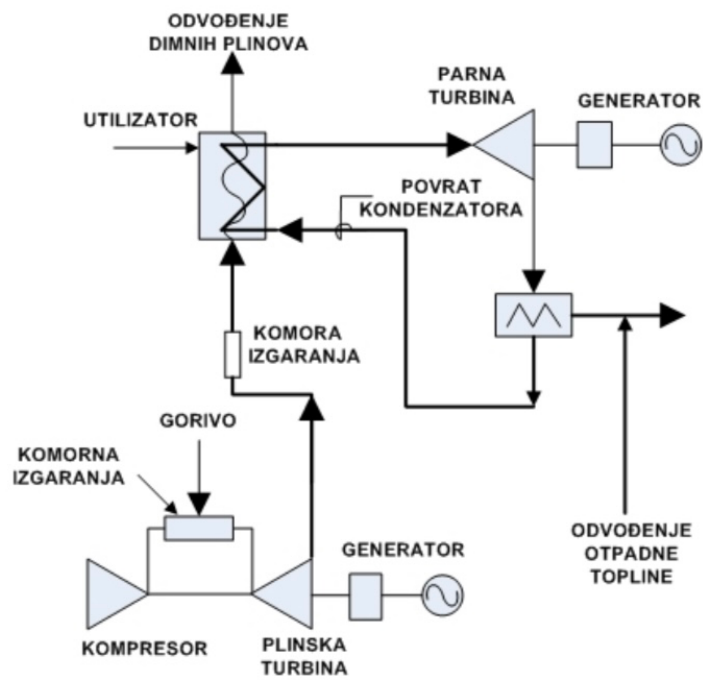
nastoji povećati stupanj za iskorištenje jasno je kako mora doći i do povećanja temperature samog medija koji ulazi u turbinu.

Slijedeći primjer je primjer parno-turbinskog postrojenja koje je prikazano na Slici 3-2. Kod takvog postrojenja para se proizvodi putem topline koja je dobivena na temelju izgaranja goriva koja se potom odvodi unutar turbine gdje dolazi do ekspaniranja čime se stvara određeni moment koji služi za proizvodnju električne energije unutar generatora. Najveći broj termoelektrana je upravo ovog oblika, pa stoga i najveća količina proizvedene energije potječe od parno-turbinskih postrojenja.



**Slika 3-2.** Skica parno-turbinskog postrojenja (Radić, 2015)

Naposljetku, tu je i kombinirano postrojenje koje je prikazano na Slici 3-3. Takvo postrojenje ima i plinske turbine te ujedno i parnu turbinu koja upotrebljava plin kako bi došlo do proizvodnje električne energije.



Slika 3-3. Skica kombiniranog postrojenja (Radić, 2015)

## 4. TERMOELEKTRANA PLOMIN

Termoelektrana Plomin je izgrađena u Plominskom zaljevu i ona je zapravo jedina aktivna termoelektrana na ugljen na području Republike Hrvatske. Naime, spomenuta lokacija je konkretno odabrana zbog pozicije nekadašnjeg ugljenokopa, odnosno zbog poprilično dobrog i prikladnog terena gledano topografski i geološki. Isto tako odabir terena je prihvatljiv zbog opskrbe slatkom i morskom vodom, ali isto tako i zbog izričito dobro razvijene morske i kopnene prometne infrastrukture.

Ističe se kako je postrojenje termoelektrane Plomin kondenzacijsko te se sastoji konkretno od dvije proizvodne jedinice, tj. od Bloka A i Bloka B gdje svaki ima svoj kotao i po jednu parnu turbinu (HEP PROIZVODNJA, n.d.).

Što se tiče energenta, odnosno kamenog ugljena, on se nabavlja na svjetskom tržištu te se dovozi brodovima sve do luke koja ima posebnu namjenu, Plomin, gdje dolazi do iskrcavanja i transporta do otvorenog odlagališta. Za proizvodnju pare upotrebljava se voda iz izvora Bubić jame. Navedena se demineralizira. Kao rashladna voda kod obje proizvodne jedinice, koristi se morska voda (HEP PROIZVODNJA, n.d.).

Snaga proizvodne jedinice Bloka A je 125 MW, ona je završena i puštena u rad još davne 1970. godine. Od 1. siječnja 2018. godine došlo je do prestanka važenja Rješenja o takozvanom objedinjenju uvjeta zaštite okoliša, odnosno do prestanka valjanosti Okolišne dozvole čime je Blok A do daljnjeg postao neraspoloživa proizvodna jedinica. Prestanak rada započeo je još u svibnju godine 2017. i to uslijed požara koji se dogodio u samom postrojenju. Prema izvješću koje je pružio HEP datuma 29. svibnja 2017. godine u 11:18 minuta došlo je do požara prilikom starta motora ventilatora dimnog plina i to na prvom bloku TE Plomin gdje je došlo zapravo do oštećenja samog energetskog kabla što je u konačnici i izazvalo požar unutar kabelskog prostora. Postrojenje Plomin 1 trebalo je biti zamijenjeno novim blokom pod nazivom TE Plomin C, no do izgradnje navedenog bloka nije došlo. Ujedno kako bi TE Plomin 1 mogla zadovoljiti sve potrebne granične vrijednosti koje su propisane putem Uredbe o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora za razdoblje nakon siječnja 2018. godine nužne su prije svega modernizacije samog postrojenja.

Nadalje, proizvodna jedinica Blok B Termoelektrane Plomin 2 ima snagu 210 MW, a izgrađena je i puštena u rad 2000. godine. Ovo je postrojenje izgrađeno od društva TE

Plomin d.o.o. (JV) u vlasništvu 50% HEP d.d. te 50% RWE, Njemačka. Datuma 1. kolovoza 2017. postupkom modernizacije niskotlačnog dijela turbine kao ujedno i aktivnostima koje su se odnosile na kapitalni remont na ostalim dijelovima sustava, što je provedeno 2017. godine, došlo je do ostvarenja poboljšanja unutrašnjeg stupnja iskoristivosti same turbine čime je došlo do povećanja nominalne snage na 217 MW (HEP PROIZVODNJA, n.d.).

Što se tiče veze Bloka B s elektroenergetskim sustavom, navedena je ostvarena putem rasklopnog postrojenja 220/110 kV. Iz svega navedenog slijedi kako obje proizvodne jedinice koriste zajednička pomoćna postrojenja (HEP PROIZVODNJA, n.d.), odnosno:

- Pristran – luku posebne namjene Plomin,
- Transport te odlagalište ugljena,
- Sustav koji se koristi za dopremu vode koja služi kao radni medij
- Sustav za pripremanje demineralizirane vode,
- Rashladni sustav,
- Sustav koji se odnosi na pomoćno gorivo,
- Obradivanje otpadnih tehnoloških, oborinskih te ujedno i sanitarnih voda,
- Transport i odlagalište šljake, pepela i otpadnom mulja i
- Dimnjak koji je visine 340 metara.

Termoelektrana Plomin ujedno ima uveden te certificiran Integrirani sustav upravljanja kvalitetom, okolišem, energijom i zaštitom zdravlja kao i sigurnosti pri radu i to u sukladnosti s normama ISO 9001:2015, 14001: 2015, 50001: 2018 i 45001:2018 kao i Sustav upravljanja sigurnošću u sukladnosti s Uredbom o sprječavanju velikih nesreća koje uključuju opasne tvari (HEP PROIZVODNJA, n.d.).

#### 4.1 Osnove o termoelektrani Plomin

U nastavku rada navedeni su osnovni podatci o termoelektrani Plomin. Konkretno unutar ovog poglavlja biti će prikazana lokacija postrojenja, prikaz proizvodnih kapaciteta i procesa, opskrbljivanje ugljenom, plinskim uljem i vodom kao i problematika zbrinjavanja svih nusproizvoda.



#### 4.1.1 Prikaz lokacije postrojenja

Kao što je već navedeno, termoelektrana Plomin se nalazi pri samom vrhu Plominskog zaljeva na istočnoj obali Istre (Slika 4-1). Ovaj prostor lokacije se najvećim dijelom nalazi u općini Kršan dok se manjim dijelom, odnosno svojim obalnim rubom nalazi unutar plominskih uvala kod grada Labina. Površina navedenog područja je 54 ha. Položaj ove termoelektrane je položaj koji je povoljan zbog nekoliko osnovnih razloga.

Prije svega prikladnost se odnosi u pogledu topografskog i geološkog terena, raspoloživosti dovoljne količine morske vode namijenjene za hlađenje, raspoloživosti slatke vode iz Bubić jame, adekvatne površine koja je namijenjena za smještaj deponija. Isto tako ovo područje je iznimno dobro prometno povezano.



**Slika 4-1.** Prikaz lokacije Termoelektrane Plomin (HEP PROIZVODNJA, n.d.)

#### 4.1.2 Prikaz proizvodnih kapaciteta i procesa

U nastavku rada prikazani su proizvodni kapaciteti i procesi termoelektrane. Kao što je u uvodnom poglavlju naglašeno, termoelektrana Plomin se sastoji zapravo od dva bloka, a radi se o Termoelektrani Plomin1 i Termoelektrani Plomin 2.

Ova dva bloka termoelektrane ujedno imaju određene zajedničke sustave, a radi se o zajedničkom sustavu dopreme i zajedničkom sustavu skladištenja ugljena, o sustavu koji se odnosi na ispušt otpadnih plinova putem dimnjaka koji doseže 340 metara, zajednički sustav

koji se odnosi na dopremanje rashladne morske vode, zajednički sustav za osiguranje zbrinjavanja šljake i pepela, sustav koji se odnosi na pomoćno gorivo, sustav za osiguranje tehnološke vode, otpadnih tehnoloških, sanitarnih i oborinskih voda. Ujedno termoelektrane imaju i zajedničku prometnicu, zajedničko skladište i radionicu (Slika 4-2).



**Slika 4-2.** Prikaz deponija Termoelektrane Plomin (HEP PROIZVODNJA, n.d.)

#### *4.1.3 Opskrba ugljenom, plinskim uljem i vodom*

Kada se radi o gorivu koje je potrebno za rad same termoelektrane, danas se koristi uvozni kameni ugljen. On predstavlja zamjenu za ugljen iz raških ugljenokopa koji više nisu u eksploataciji. Sama blizina raških ugljenokopa je imala značajnu ulogu u odabiru lokacije termoelektrane.

Što se tiče raškog ugljena, isti sadržava iznimno visok udio sumpora pa samim time postoje problemi sa zašljakivanjem. Iz tog razloga je zamijenjen uvoznim kamenim ugljenom. Što se tiče posljednjeg ugljenokopa koji se nalazio na području Republike Hrvatske, to je bio ugljenokop Tupljak na Labinštini.

Ugljen se danas stoga nabavlja na svjetskom tržištu te se dovozi brodovima koji imaju veliku nosivost. Ugljen se doprema iz Sjedinjenih Američkih Država, Kolumbije, Poljske, Južne Afrike, Indonezije, Australije, Kine i Rusije. Sam ugljen se brodovima dovodi do pristaništa gdje se isti iskrcava te se doprema do otvorenog deponija koji ima vrlo velik kapacitet od 220 000 tona (Klapčić, n.d.).

Za potrebe termoelektrane Plomin koristi se visokokokalorični niskosumporni ugljen. Njegove temeljne karakteristike se odnose na donju ogrjevnu vrijednost koja iznosi 24 do 29,3 MJ/kg. Njegova ukupna vlaga je od 6 do 15% dok je sadržaj pepela 8 do 15%. Što se tiče sadržaja vlage i pepela ona je ispod 23% (Klapčić, n.d.).

U termoelektrani Plomin ujedno se koristi i plinsko ulje koje se doprema auto cisternama, a potom se istovarnom pumpom dalje pretače u spremnike. Može se skladištiti u dva nadzemna spremnika koji imaju zapreminu od 150 m<sup>3</sup> koji su međusobno spojeni i opremljeni betonskim tankvanama. Isto tako upotrebljava se i za potpalu samih kotlova, odnosno kao gorivo za pomoćne kotlove.

Nadalje, što se tiče opskrbe vodom, Termoelektrana Plomin 1 i Termoelektrana Plomin 2 zapravo imaju zajednički sustav za vodoopskrbu. Ovaj sustav stoga obuhvaća javnu vodoopskrbu i ujedno i vlastiti vodozahvat. Iz navedenog se crpi voda i dalje se prebacuje u vodospremu Sv. Matej koja ima zapreminu od 500 m<sup>3</sup>.

Što se tiče tehnoloških potreba, odnosno potreba za demineralizaciju, hlađenje ili pak protupožarni sustav, ovdje dolazi do korištenja vode koja se doprema iz izvora Bubić jame. Konkretno, ovdje postoje i dvije jedinice za kemijsku pripremu takozvane demineralizirane vode. Sustav rada demineralizirane vode je zapravo potpuna demineralizacija i to putem ionske izmjene. Otpadne vode koje nastaju regeneracijom ionskih masa se neutraliziraju u samom neutralizacijskom bazenu, a prije samog ispuštanja dalje prolaze kroz lamelne taložnice.

Morska se voda koristi za potrebe rashlađivanja samog kondenzatora, odnosno pomoćnih uređaja. Navedena voda se uzima u Plominskom zaljevu i to s dubine od 24 metra. Što se tiče hlađenja osjetljivijih dijelova strojeva, ovdje dolazi do korištenja demineralizirane vode u samom kružnom optoku.

#### 4.1.4 Problematika zbrinjavanja nusproizvoda

Kada je riječ o samom problemu zbrinjavanja nusproizvoda, TE Plomin 1 i TE Plomin 2 zapravo imaju zajednički sustav koji je namijenjen za zbrinjavanje pepela, za zbrinjavanje šljake, filtarskog kolača otpadnog mulja i gipsa iz postrojenja za samo obrađivanje vode. Smatra se kako je iznimno bitan dio navedenog sustava upravo i odlagalište neopasnog otpada. Primjerice, u tvornici cementa u Koromačnu, kao mineralni dodaci zbrinjavaju se upravo navedeni otpadi koji su nusproizvodi.

Onda kada tvornica cementa nije u mogućnosti prihvatiti sve količine nusproizvoda tada dolazi do korištenja odlagališta koje se sastoji od starog i od novog dijela. Konkretno, na starom dijelu vidljivo je da se odlagalo za vrijeme korištenja domaćeg ugljena. Navedeni dio odlagališta je u potpunosti saniran te je na taj način zaštićen od bilo kakvih procjednih oborinskih kiša, različitih dotoka oborinskih voda s okolnih padina, ali ujedno je osiguran i protiv kliženja i obrušavanja.

Odlagalište je ujedno i prekriveno slojem humusa na kojem je potom posijana trava. Što se tiče novog dijela odlagališta, riječ je o uređenoj plohi na koju je potom došlo do postavljanja bentonitnog tepiha. Na navedenom je zapravo položena geomreža na koju je potom položen zemljani materijal. Isti je debljine od 40 do 50 centimetara na samom dnu odlagališta. Taložnica je zadužena za prikupljanje procjedne, a ujedno i oborinske kiše koje dolaze sa starog i s novog dijela odlagališta. Ove se prikupljene vode kontroliraju.

## 4.2 Postrojenje termoelektrane Plomin 2

Postrojenje TE Plomin 2 je dovršeno 2000. godine (Slika 4-3). Gorivo za rad termoelektrane Plomin 2 isto je kao i za termoelektranu Plomin 1, odnosno uvozni kameni ugljen. Što se tiče snage termoelektrane Plomin 2, ista iznosi ukupno 217 MW. Nadalje, od tehničkih podataka ističe se kako je kotao bloka 2 zapravo jednocjevni protočni s prisilnom cirkulacijom tipa Sluzer koji ima kapacitet 670 t/h te 24 plamenika raspoređena u 6 ravnina. Što se tiče kondenzacijske turbine, ona je proizvodnje ABB Karlovac (Klapčić, n.d.).



**Slika 4-3.** TE Plomin 2 (HEP PROIZVODNJA, n.d.)

Nadalje, od tehničkih podataka valja istaknuti kako je turbina dvokućišna te kako ima kombinirano visokotlačno i srednjetlačno kućište s dvoizlaznim niskotlačnim kućištem te sa sedam nereguliranih oduzimanja. Što se tiče turbogeneratora, on je proizvodnje Končar te je trofazno dvopolni s nazivnom snagom od 247 MVA te faktorom snage od 0,85 i naponom od 13,8 kV (Klapčić, n.d.).

Godine 2017. došlo je do rekonstruiranja postrojenja putem nadogradnje uređaja namijenjenog za uklanjanje oksida dušika iz dimnih plinova. U ovom periodu došlo je i do provođenja kapitalnog remonta za visokotlačni i srednjetlačni dio turbine.

## 5. ODRŽIVI RAZVOJ I TERMOELEKTRANE

Energija je jedan od temelja modernog društva. Život bez energije je život bez pristupa mogućnostima koje ljudima trebaju u modernom svijetu. Bez električne energije nije moguće učinkovito funkcioniranje društva. Nedostatak pristupa električnoj energiji za sobom povlači rastuće probleme zdravstvenih opasnosti, bolesti i neprikladnog obrazovanja. Energija je stoga glavni doprinositelj i vitalni izvor za gospodarski razvoj svake zemlje u razvoju diljem svijeta.

Međutim, za pouzdanu proizvodnju električne energije trenutno je jedini način korištenje fosilnih goriva poput ugljena u određenoj mjeri kako bi imali neometanu opskrbu. Budući da je ugljen osnovno gorivo koje je korišteno za proizvodnju električne energije, proći će neko vrijeme prije nego što se u potpunosti zamjeni prirodnim plinom i obnovljivim izvorima energije. Uobičajeno je da energija proizvedena u termoelektranama na ugljen čini većinu proizvedene energije u zemljama u razvoju. Velika upotreba ugljena u termoelektranama dovodi i do većih ekoloških problema. Termoelektrane koje koriste ugljen kao gorivo tretiraju se kao jedan od najvećih izvora onečišćenja okoliša u cijelom svijetu. Nusproizvodi navedenih termoelektrana uzrokuju degradaciju korištenja zemljišta, onečišćenje zraka, kontaminaciju vode, zdravstvene opasnosti, emisiju stakleničkih plinova, stvaranje otpada, degradaciju vodenog života i slično.

Sve veći ozbiljni negativni utjecaji termoelektrana na okoliš, kao i na gospodarska i društvena pitanja dovode do njihovog gašenja i pronalaska novih opcija. Povećana potrošnja prirodnih resursa na neodrživ način, od strane termoelektrana, rezultira konsenzusom u pogledu svijesti o pitanjima zaštite okoliša zbog stalnog pritiska vlade, društva, kupaca i dionika. Zbog toga treba uključiti i implementirati održivu strategiju opskrbnog lanca kako bi se nosilo s raznim problemima povezanim s opskrbnim lancem i kako bi se smanjile opasnosti za okoliš i društvo (Jayaram i Avittathur, 2015).

Komisija UN-a u Brundtlandovu izvješću definirala je održivost kao „razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe“ (Svjetska komisija za okoliš i razvoj, 1987). Prema Agenciji za zaštitu okoliša (SAD), održivost je načelo u kojem sve što nam je potrebno za naš opstanak i dobrobit ovisi, bilo izravno ili neizravno, o našem prirodnom okruženju. Težiti održivosti znači stvarati i održavati uvjete pod kojima ljudi i priroda mogu postojati u produktivnom skladu kako bi podržali sadašnje i buduće generacije. Međutim, provedba praksi upravljanja

održivim opskrbnim lancem (SSCM, engl. Simultaneous Source Control Managers) u termoelektranama čini se teškim zadatkom zbog ovisnosti o nizu različitih međusobno povezanih čimbenika. Ovi čimbenici mogu se uglavnom kategorizirati u dvije skupine, vjerojatni čimbenici i prepreke.

Međuovisnost i poznavanje ovih utjecajnih čimbenika omogućit će donositeljima odluka u organizaciji da razmotre najbolju moguću prikladnu strategiju za smanjenje negativnih utjecaja prepreka i implementaciju prednosti pokretača. Dakle, upravljačke implikacije SSCM prakse u termoelektranama i razumijevanje njihove međusobne ovisnosti važni su za suočavanje s izazovima, preprekama i globalnom konkurencijom za postizanje održivog uspjeha.

## 5.1 Analiza održivog razvoja

Održivi razvoj predstavlja proces koji za svaki svoj temeljni zadatak ima osigurati ukupnu ravnotežu unutar svijeta i to putem ekonomskih, društvenih te ujedno okolišnih učinaka. Cilj održivog razvoja je ispunjavanje osnovnih životnih potreba čovjeka uz istovremenu brigu za okoliš i očuvanje postojećeg integriteta okoliša (Klarin, 2018).

Održivi se od neodrživog razvoja razlikuje u nekim osnovnim karakteristikama koje se prikazuju u Tablici 5-1.

**Tablica 5-1.** Razlikovanje održivog i neodrživog razvoja (Klarin, 2018)

<b>ODRŽIVI RAZVOJ</b>	<b>NEODRŽIVI RAZVOJ</b>
<b>Svoju usmjerenost postavlja prema poboljšanju ukupne kvalitete života</b>	Usmjerenost je postavljena na podizanje standarda života u okviru materijalnih dobara.
<b>Jednak fokus postavljen je na ekonomska, socijalna i pitanja zaštite okoliša.</b>	Najveći fokus postavljen je na ekonomska pitanja dok se socijalna i pitanja okoliša promatraju kao zasebne, manje važne cjeline.
<b>Nastoji rješavati problematiku današnjih generacija prilikom čega se u obzir uzimaju i buduće generacije.</b>	Usmjerenost je postavljena isključivo na kratkotrajna rješavanja problema.
<b>Vodi se računa o ograničenosti resursa.</b>	Nema svijesti o ograničenosti prirodnih resursa.
<b>Nastoji se postići ravnoteža odnosa.</b>	Usredotočenost je postavljena na prava i potrebe pojedinca.

Prema tabličnom prikazu uočljivo je kako se kod održivog razvoja usmjerenost postavlja prema čimbeniku poboljšanja cjelokupne kvalitete života dok se neodrživi razvoj isključivo usmjerava prema podizanju standarda života i to u okviru materijalnih dobara. Nadalje, kod održivog razvoja isti fokus se postavlja na ekonomska, socijalna i okolišna pitanja dok je kod neodrživog razvoja najveći i jedini fokus postavljen na ekonomska pitanja.

Kod održivog razvoja nastoje se zapravo riješiti pitanja problematike današnjih generacija, no u obzir se uzimaju i sve buduće generacije dok je kod neodrživog razvoja usmjerenost prije svega na kratkotrajno područje rješavanja problema. Kod održivog razvoja vodi se računa o ograničenosti resursa gdje se ujedno nastoji postići i ukupna ravnoteža odnosa dok kod neodrživog nema svijesti o ograničenju resursa, a sama usredotočenost je postavljena na prava, odnosno na potrebe pojedinaca.

Temeljni je zadatak održivog razvoja zapravo ostvariti boljitak samog čovjeka. Prilikom postizanja održivog razvoja kao i pri ostvarenju boljitka čovjeka, potrebno je usmjerenost postaviti prema zadovoljenju osnovne tri dimenzije, odnosno načela održivog razvoja, a radi se o:



- gospodarskoj,
- društvenoj i
- okolišnoj dimenziji.

U nastavku se opisuju temeljni aspekti održivog razvoja iz perspektive termoelektrana.

## 5.2 Temeljni aspekti održivog razvoja

Usvajanje najnovijih digitalnih tehnologija može pomoći u poboljšanju učinka termoelektrana smanjenjem potrošnje goriva, pomoćne energije, potrošnog materijala i emisije stakleničkih plinova. Povećana primjena tehnologija za hvatanje, iskorištavanje i skladištenje ugljika (CCUS, engl. Carbon Capture, Usage and Storage) može poboljšati kvocijent održivosti, ali to neće biti dovoljno za postizanje klimatskih ciljeva postavljenih u Pariškom sporazumu.

Postojeće termoelektrane stoga moraju biti opremljene tehnologijama za ublažavanje globalnog zatopljenja. Termoelektrane se sastoje od velike i složene opreme za proizvodnju električne energije kao što su pulverizatori, kotlovi, parne turbine i plinske turbine. Oprema za kontrolu onečišćenja poput pretvarača selektivne katalitičke redukcije (SCR), jedinica za odsumporavanje dimnih plinova (FGD), elektrostatičkih filtera kao i oprema za poboljšanje učinkovitosti poput predgrijača zraka (APH), kondenzatora i rashladnih tornjeva.

Čak i uz postavljanje naprednih sustava upravljanja, nadzor, optimizaciju performansi i periodično održavanje ove opreme postoje izazovi zbog:

- složene dinamike postrojenja,
- međusobno povezane oprema s međudjelovanjem operacija,
- varijabilnosti u kvaliteti ugljena zbog različitih izvora i neadekvatnog miješanja,
- fleksibilnosti za prilagođavanje prolaznim i oštrim varijacijama u potražnji za električnom energijom,
- postupnoj degradaciji i kvarovima opreme tijekom vremena,
- sve većem razvoju standarda emisije i sigurnosnih propisa.

S obzirom na složenost i opseg operacija u tim postrojenjima, neophodno je donositi odluke u stvarnom vremenu, jer kašnjenja dovode do velikih gubitaka i katastrofalnih događaja.

### 5.3 Primjeri zamjene ugljena prirodnim plinom u SAD-u

Kada se govori o termoelektranama koje bi bile najvjerojatniji kandidati za zamjenu ugljena sa prirodnim plinom, to bi bile starije jedinice koje su najmanje učinkovite i najskuplje za održavanje. Veliki broj takvih termoelektrana nalazi se u istočnom dijelu Sjedinjenih Američkih Država. Postoje dva načina zamjene ugljena sa prirodnim plinom u termoelektranama. Jedan način je da se stara termoelektrana u potpunosti ugasi i zamjeni sa novom termoelektranom na prirodni plin, dok je drugi način da se bojleri elektrane prenamjene za izgaranje drugih vrsta goriva kao što je prirodni plin. Između 2011. i 2019. godine prva metoda je primijenjena na 17 termoelektrana na ugljen u SAD-u. U tom slučaju nove termoelektrane imaju ukupni kapacitet od 15,3 GW što je čak 94% više u odnosu na kapacitet starih termoelektrana na ugljen koji je iznosio 7,9 GW. Druga metoda, odnosno prenamjena kotlova elektrane izvršena je kod 104 termoelektrane na ugljen od čega ih je čak 86 prenamijenjeno za izgaranje prirodnog plina (Aramayo, 2020). Ugljen je prema podacima iz 2005. godine bio najvažnije gorivo za proizvodnju električne energije u SAD-u te je njegov udjel činio 50% od svih goriva koja se koriste. U 2019. godini taj udio smanjio se na 23% dok je istodobno udio plina iz 2005. godine od 19% porastao na 38% u 2019. godini. Povećana upotreba obnovljivih izvora energije zaslužna je za 30% od ukupnog smanjenja emisija CO<sub>2</sub> od 2005. do 2019. godine, međutim zamjena ugljena sa prirodnim plinom imala je puno veći utjecaj na smanjenje emisija odnosno zaslužna je za 65% od ukupnog smanjenja u istom razdoblju (McGrath, 2021) .

## 6. ANALIZA UTJECAJA ZAMJENE UGLJENA PRIRODNIM PLINOM U TERMOELEKTRANI PLOMIN

U nastavku slijedi prikaz analize utjecaja zamjene ugljena prirodnim plinom u pogledu smanjenja emisije štetnih tvari u okoliš na primjeru termoelektrane Plomin.

### 6.1. Analiza stanja

Termoelektrane na ugljen su zapravo postrojenja kod kojih je potrebna velika količina topline koja se osigurava upravo putem izgaranja ugljena. Jasno je kako upravo termoelektrane na ugljen imaju vrlo značajan negativan utjecaj na sam okoliš, ali ujedno primjenjivanje novih tehnologija na značajan će način smanjiti navedeni utjecaj. Ovdje se primjerice može govoriti o različitim mjerama koje se odnose na smanjenje emisija sumporova dioksida, dušikova dioksida, filtri namijenjeni za uklanjanje čestica i ostalo. Upravo stoga je potrebno navesti i neke od prednosti:

- velike zalihe ugljena,
- jednostavne metode pridobivanja ugljena posebice kod površinskih iskopa,
- poznata tehnologija za dobivanje, prerađivanje i u konačnici upotrebu ugljena.

Osim prednosti, nedostaci su:

- potencijalne nesreće koje se događaju u rudnicima ugljena,
- iznimno velike količine ugljena koje su potrebne za pogon elektrane,
- iskapanjem rude kao i izgaranjem ugljena dolazi do stvaranja iznimno velikih količina otpada koji je štetan, kako kemijski tako ujedno i radijacijski,
- zbog ugljena stvaraju se velike emisije dušikovih oksida i velike količine sumporovih oksida što posljedično dovodi do nastanka kiselih kiša koje imaju nepovoljan utjecaj na živi svijet.

Iz svega navedenog jasno je zašto se teži prema prirodnom plinu i prema održivom razvoju.

## 6.2. Budućnost prirodnog plina i održivi razvoj

Sami proces proizvodnje električne energije drastično se promijenio u posljednja dva desetljeća. Upravo slijedom toga povećana je ujedno briga za kvalitetu okoliša i briga za efikasnije korištenje resursa što je u konačnici rezultiralo širokom opsegom potencijalnih opcija za razvoj koji su i na strani proizvodnje i potrošnje.

Kada se govori o nekim od ključnih problema koji se mogu pojaviti prilikom planiranja za sam razvoj elektroenergetskog sustava prije svega se govori o području efikasnog korištenja resursa. Već u periodu od osamdesetih godina došlo je do usmjerenosti prema primjenjivanju integralnog planiranja resursa što je zahtijevalo da se sve one opcije koje se smatraju ekonomski isplativijima ujedno tako moraju i na konzistentan način ocijeniti, odnosno moraju se dalje primijeniti. Ovo je zapravo značilo da se moraju osim već konvencionalnih načina ujedno uvidjeti i drugi izvori, odnosno obnovljivi izvori, programi koji se odnose na upravljanje potrošnjom i ostalo.

Ujedno došlo je i do porasta brige o okolišu što bi značilo da proizvodnja električne energije zapravo ima iznimno velik utjecaj na okoliš. Kako bi na taj način došlo do smanjenja navedenog utjecaja uključile su se i države koje su odlučile uvesti različite propise o dozvoljenim emisijama što je imalo iznimno velik utjecaj na rad postrojenja, odnosno i na cjelokupan proces planiranja. Još jedna stavka koju je potrebno istaknuti je područje nesigurnosti i upravljanja rizicima. Ističe se kako je upravo nesigurnost jedan od temeljnih problema koji se uviđa u okviru planiranja resursa za elektroenergetske sustave. Tako primjerice ovdje utječu stavke kao što je porast ukupnog problema opterećenja, same cijene goriva, troškovi koji se odnose na kapital, troškovi koji se odnose na investicije, smanjenje ukupnih emisija i ostalo.

## 6.3 Analiza utjecaja zamjene

Kada se radi o termoelektranama na prirodni plin, valja istaknuti kako u svijetu postoji više vrsta takvih elektrana, a svakako da se među najznačajnijim smatraju kondenzacijski i kogeneracijski tip plinske elektrane. Kondenzacijski tip zapravo služi za jednu vrstu primjene, a to je u ovom slučaju dobivanje električne energije. S druge strane kod kogeneracijskog tipa elektrane dolazi do dodatnog iskorištenja pare koja se zapravo dobiva putem zagrijavanja vode te se shodno tome može pogoniti ujedno i ugrađena toplana u samo postrojenje čime je mogućnost za zagrijavanje gradskog naselja veća. Navedena

postrojenja mogu imati efikasnost i do 90%, međutim problem se može pronaći u vidu izgradnje samog postrojenja namijenjenog za zagrijavanje određenog područja što se smatra iznimno skupim, a ujedno i vrlo dugotrajnim procesom te upravo navedena stavka je i problem što u ljetnim mjesecima postrojenja služe samo za osiguravanje tople vode.

Prilikom korištenja prirodnog plina u modernim i efikasnim termoelektranama proizvodi se od 50 do 60% manje CO<sub>2</sub> emisija u odnosu na konvencionalne termoelektrane na kameni ugljen. Osim toga, termoelektrane na ugljen ispuštaju mnoge druge štetne produkte koji imaju direktan utjecaj na zdravlje ljudi, poput značajnih količina žive. S druge strane prilikom izgaranja prirodnog plina u termoelektranama stvaraju se zanemarive količine sumpora, žive i raznih čestica. Godišnje emisije dušikovih oksida bi se smanjile za 1900 tona, a emisije sumporovog dioksida za 3900 tona kada bi 10000 američkih kućanstava ugljen zamijenilo prirodnim plinom (GASVESSEL, 2018).

**Tablica 6-1.** Emisije CO<sub>2</sub> u kilogramima po 0,293 MWh energije za različita goriva (GASVESSEL, 2018)

Izvor energije	Emisije CO <sub>2</sub> u kilogramima
Ugljen (antracit)	103,69
Diesel gorivo	73,17
Benzin (bez etanola)	71,3
Propan	63,05
Prirodni plin	53,07

Prema tabličnom prikazu vidljivo je da je ugljen uvjerljivo najveći proizvođač emisija CO<sub>2</sub> kao i da su emisije nastale izgaranjem prirodnog plina gotovo dva puta manje od emisija nastalih izgaranjem ugljena. Osim toga došlo bi do smanjenja emisija i drugih štetnih tvari koje negativno utječu na ljudsko zdravlje. Međutim, budući da se nalazimo u nepredvidivoj ekonomskoj i političkoj situaciji na globalnoj razini gdje cijena plina značajno varira, jasno je da bi takva investicija svakako bila rizična. Prema (Milevoj, 2018) u termoelektrani Plomin koristi se visokokalorični niskosumporni ugljen čije su karakteristika prikazane u Tablici 6-2.

**Tablica 6-2.** Osnovne karakteristike visokokaloričnog niskosumpornog ugljena (Klapčić, n.d.)

Karakteristika	Mjerna jedinica	Iznos
Donja ogrjevna vrijednost	MJ/kg	24 - 29,3
Ukupna vlaga	%	6 - 15
Sadržaj pepela	%	8 - 15
Sadržaj vlage i pepela	%	<23
Hlapivo	%	>25
Udio sumpora	%	0,5 – 1,4
Udio dušika	%	<1,85
Udio klora	%	<0,2
Na <sub>2</sub> O	%	>0,2
Granulacija	mm	0 - 50

Zamjena ugljena prirodnim plinom zahtjeva provedbu cjelovite prenamjene i nadogradnju postojećih sustava kako bi se prilagodili novom izvoru energije. Ovaj proces uključuje niz koraka i implementaciju određene infrastrukture. Jedan od ključnih koraka je instalacija plinskih turbina ili zamjena postojećih kotlova za sagorijevanje ugljena s plinskim kotlovima. Plinske turbine koriste prirodni plin kao gorivo za pokretanje turbina i proizvodnju električne energije. Ove turbine su poznate po svojoj visokoj energetske učinkovitosti i nižim emisijama štetnih plinova u usporedbi s konvencionalnim termoelektranama na ugljen. Uz instalaciju plinskih turbina, potrebno je izgraditi i prilagoditi infrastrukturu za dopremu prirodnog plina do termoelektrane. To uključuje izgradnju plinovoda i priključaka koji će omogućiti transport prirodnog plina od plinskog transportnog sustava do elektrane. Ova infrastruktura omogućuje neprekidno opskrbljivanje termoelektrane prirodnim plinom potrebnim za proizvodnju električne energije. U slučaju nedostatka domaćih rezervi prirodnog plina ili ograničenih mogućnosti izgradnje plinovoda, zemlja može uvesti plin iz drugih izvora. Uvoz plina može se obaviti putem plinovoda iz susjednih zemalja ili putem terminala ukapljenog prirodnog plina (LNG, engl. Liquefied Natural Gas) koji omogućuje uvoz LNG-a i daljnju distribuciju plina do termoelektrane.

Kada se termoelektrana prilagodi uporabi prirodnog plina, postiže se niz prednosti. Prije svega, plinski kotlovi ili turbine imaju veću energetske učinkovitost u usporedbi s termoelektranama na ugljen. To znači da će manja količina prirodnog plina biti potrebna za proizvodnju iste količine električne energije. Osim toga, zamjena ugljena prirodnim plinom

rezultira i značajnim smanjenjem emisija štetnih plinova, uključujući CO<sub>2</sub>, što doprinosi smanjenju negativnog utjecaja na okoliš.

Potrebno je provesti redovito održavanje sustava kako bi se osigurala pouzdana i sigurna operacija termoelektrane koja koristi prirodni plin. Održavanje uključuje rutinske preglede, servisiranje opreme, zamjenu dijelova i pravovremeno otklanjanje eventualnih kvarova ili problema kako bi se osigurala neprekidna proizvodnja električne energije. Kada je riječ o financijskoj analizi, troškovi prenamjene termoelektrane su značajni. Prema procjeni prenamjene termoelektrane iznosili bi 27,50 milijuna eura. Ovi troškovi uključuju razne aspekte kao što su tehnička prilagodba, inženjering, radna snaga i nabava opreme. Također, troškovi infrastrukturnih radova, uključujući izgradnju plinovoda i priključaka, procjenjuju se na 30 milijuna eura. Ovi troškovi obuhvaćaju projektiranje i izgradnju plinskih cjevovoda, postavljanje priključaka te eventualne zemljane radove i prilagodbe terena, budući da bi se plinska termoelektrana spajala na transportni sustav kojim upravlja Plinacro d.o.o. Trenutna duljina transportnog sustava u Republici Hrvatskoj i njezini sastavni dijelovi vidljivi su u Tablici 6-3. Osim podataka navedenih u tablici, transportni sustav sadrži i izlazne mjerne redukcijske stanice, plinske čvorove, kompresorku stanicu, odašiljačko prihvatne čistačke stanice i druge dijelove. Nabava i instalacija plinskih turbina ili plinskih kotlova predstavljaju značajan financijski izdatak. U ovom scenariju, procijenjeni troškovi iznosili bi 32 milijuna eura. To uključuje kupovinu potrebne opreme, isporuku, montažu i puštanje u pogon. Kada su u pitanju operativni troškovi, godišnji troškovi se procjenjuju na 7 milijuna eura. Ovi troškovi obuhvaćaju troškove prirodnog plina, troškove održavanja i operativne troškove, kao što su osoblje, gorivo, servisi i ostali operativni resursi. Operativno održavanje i eksploatacija izazvali bi dodatne troškove od 2 milijuna eura (Tablica 6-4). Svi procijenjeni troškovi prenamjene napravljeni su prema objavljenim troškovima prenamjene jedinice termoelektrane Joliet nešto većeg kapaciteta u saveznoj državi Illinois u Sjedinjenim Američkim Državama (Lydersen, 2017).

**Tablica 6-3.** Duljina i sastavni dijelovi plinskog transportnog sustava u Republici Hrvatskoj (Plinacro, n.d.)

Plinovodi	17,43 km maksimalnog radnog tlaka 100 bar	954 km maksimalnog radnog tlaka 75 bar	1573 km plinovoda maksimalnog radnog tlaka 50 bar	-
Ulazne mjerne stanice	2 interkonekcijske mjerne stanice	5 mjernih stanice na spojevima s postrojenjima za proizvodnju	1 ulazno-izlazna mjerna stanica na spoju s podzemnim skladištem Okoli	1 mjerna stanica na spoju s terminalom na Omišlju

**Tablica 6-4.** Procjena troškova za prenamjenu termoelektrane (vlastita izrada)

TROŠKOVI	IZNOS (€)
<b>PRENAMJENA TERMoeLEKTRANE</b>	
Tehnička prilagodba	10,000,000
Inženjering	5,000,000
Radna snaga	2,500,000
Nabava nove opreme	10,000,000
UKUPNO	27,500,000
<b>INFRASTRUKTURNI RADOVI</b>	
Izgradnja plinovoda	20,000,000
Izgradnja priključaka	5,000,000
Projektiranje plinovoda	500,000
Zemljani radovi	4,000,000
Prilagodba terena	500,000
UKUPNO	30,000,000
<b>NABAVA I INSTALACIJA OPREME</b>	
Nabava plinskih turbina/kotlova	25,000,000
Isporuka, montaža i puštanje u pogon	7,000,000
UKUPNO	32,000,000
<b>GODIŠNJI OPERATIVNI TROŠKOVI</b>	
Troškovi održavanja	2,500,000
Ostali operativni troškovi	4,500,000



UKUPNO	7,000,000
<b>OPERATIVNO ODRŽAVANJE I EKSPLOATACIJA</b>	
Redovito održavanje i servisi	1,500,000
Eksploatacijski troškovi	500,000
UKUPNO	2,000,000
<b>UKUPNI TROŠKOVI PRENAMJENE</b>	<b>98,500,000</b>

**Tablica 6-5.** Prosječna prodajna cijena prirodnog plina (u kn/m<sup>3</sup> i kn/kWh s PDV-om) (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2021)

Vrsta potrošača	Mjerna jedinica	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2021.
Kućanstva	kn/m <sup>3</sup>	3,85	3,25	2,84	2,99	3,11	3,01	3,27
	kn/kWh	0,4157	0,3385	0,2948	0,3109	0,3229	0,3121	0,3363
Usluge	kn/m <sup>3</sup>	4,17	3,52	2,90	3,19	3,29	2,91	4,09
	kn/kWh	0,4503	0,3667	0,3011	0,3317	0,3419	0,3010	0,420
Industrija	kn/m <sup>3</sup>	3,70	2,92	2,26	2,65	2,89	2,89	3,14
	kn/kWh	0,3995	0,3042	0,2345	0,2750	0,3004	0,2997	0,3230

## 7. EKOLOŠKA ANALIZA RADA TE PLOMIN 2 SA UGLJENOM I PRIRODNIM PLINOM KAO POGONSKIM GORIVOM

Izgaranje je fizičko – kemijski proces oksidacije gorivih tvari u gorivima pri kojem se kemijski vezana energija goriva pretvara u toplinsku energiju. Uobičajeni načini izgaranja u ložištima su toplinske promjene pri kojima se, u stacionarnim uvjetima, tlak  $p$  i termodinamička temperatura  $T$  mogu smatrati stalnima. Za goriva je važno osigurati potpuno izgaranje: tj da svi gorivi sastojci goriva potpuno oksidiraju. Količina topline koja se dobiva potpunim izgaranjem jedinice sadržaja goriva (1 kg za čvrsta i tekuća goriva ili  $1 \text{ m}^3_n$  – ili 1 kmol za plinovita goriva) naziva se ogrjevna toplina.

Razlikuju se gornja ogrjevna vrijednost,  $H_g$  i donja ogrjevna vrijednost,  $H_d$ . S ciljem usklađivanja sa praksom u zemljama članicama EU, prilikom obračuna plina, umjesto donje ogrjevne vrijednosti plina od 1. listopada 2022. počinje se primjenjivati gornja ogrjevna vrijednost plina (Hrvatska Energetska Regulatorna Agencija [HERA], 2022).

Da bi se napravila procjena potrebne dobave goriva, te potrebne dobave zraka za izgaranje, potrebno je znati bar približnu donju ogrjevnu vrijednost goriva. Da bi se ona saznala nužno je znati kemijski sastav goriva.

Kemijski sastav tekućeg i plinovitog goriva se izražava preko masenih udjela sastojaka goriva. Maseni udjel predstavlja količinu neke tvari (kemijskog spoja ili kemijskog elementa) u 1 kg smjese (u ovom slučaju 1 kg goriva). Naravno, zbroj svih masenih udjela sastojaka neke smjese jednak je 1.

### 7.1. Kemijski sastav krutih i tekućih goriva

Za kruta i tekuća goriva vrijedi (Malić, 1980):

$$c+h+s+o+n+w+a=1$$

Ovdje su:

- $c$  [kg C/1kg] – maseni udjel ugljika,
- $h$  [kg H<sub>2</sub>/1kg] – maseni udjel vodika,
- $s$  [kg S/1kg] – maseni udjel sumpora,
- $o$  [kg O<sub>2</sub>/1kg] – maseni udjel kisika,
- $n$  [kg N<sub>2</sub>/1kg] – maseni udjel dušika (azota),

- $w$  [kg W /1kg] – maseni udjel vlage,
- $a$  [kg A /1kg] – maseni udjel pepela (šljake) u gorivu.

Gorivi sastojci krutih i tekućih goriva su ugljik, sumpor, i vodik – oni neposredno određuju ogrjevnu vrijednost, kisik podržava izgaranje, dušik je neutralan u procesu izgaranja i neposredno se prevodi u produkte izgaranja, vlaga i pepeo su balasne tvari u izgaranju goriva i neposredno se uključuju u produkte izgaranja. Cilj je da, ako je to moguće, u gorivima bude što manji udjel vlage i pepela. Prema načinu vezivanja za gorivo, vlaga u gorivu može biti gruba (ona se da odstraniti iz goriva sušenjem na „običnom“ zraku, temperature do 35 °C, ako je to potrebno i korištenjem sušara) i higroskopska (ona se iz goriva jedino može ukloniti isparavanjem, koje se dešava pri izgaranju). Higroskopska vlaga je štetna u gorivu jer snižava njegovu ogrjevnu vrijednost.

## 7.2. Kemijski sastav plinovitih goriva

Kemijski sastav plinovitih goriva se izražava u obujamskim (volumnim, prostornim udjelima). Obujamski udjel je obujam nekog sastojka u 1 m<sup>3</sup><sub>n</sub> plinske smjese. Kada se govori o m<sup>3</sup><sub>n</sub> treba imati na umu da je to jedinica mase (kada se govori o obujmu, veličina obujma u praktičnim primjenama se ne može vezati za točno određeni tlak i temperaturu, kao što je to slučaj u m<sup>3</sup><sub>n</sub>. m<sup>3</sup><sub>n</sub> izražava „sadržaj tvari“ kakav se poznaje pod pojmom mase ili broja čestica), ali pod posebnim, „normalnim referentnim uvjetima“: tlaka od  $p = 101\,325$  Pa i  $t = 0^\circ\text{C}$ . Osim ovog načina izražavanja sastava plinskih smjesa, može se njihov sastav izražavati i preko množine (količine) tvari, čija je uobičajena jedinica 1 kmol. U sastavu plinovitih goriva može se nalaziti vodik (H<sub>2</sub>), ugljični monoksid (CO), ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), kisik (O<sub>2</sub>), dušik (N<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) i određeni udjel teških ugljikovodika (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>). Gorivi sastojci plinovitih goriva su vodik, ugljični – monoksid, metan, etilen i teški ugljikovodici, ugljični – dioksid i dušik se neposredno prevode u plinove produkata izgaranja (oni su negorivi dijelovi goriva), dok kisik u sastavu goriva potpomaže njegovo izgaranje.

Za plinovita goriva vrijedi (Malić, 1980):

$$H'_2 + CO + CO'_2 + O'_2 + N'_2 + CH'_4 + C_2H'_4 + C_nH'_m = 1$$

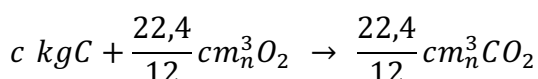
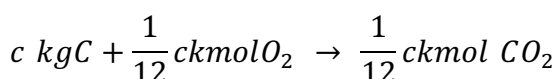
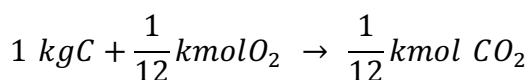
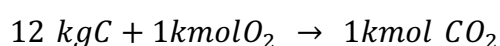
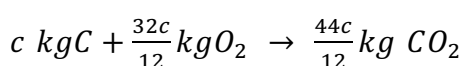
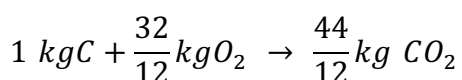
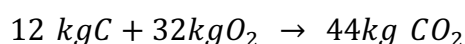
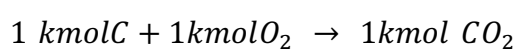
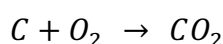
Ovdje su:

- $H_2'$  [ $m^3_n H_2/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel vodika,
- $CO'$  [ $m^3_n CO/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel ugljičnog – monoksida,
- $CO_2'$  [ $m^3_n CO_2/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel ugljičnog – dioksida,
- $O_2'$  [ $m^3_n O_2/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel kisika,
- $N_2'$  [ $m^3_n N_2/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel dušika (azota),
- $CH_4'$  [ $m^3_n CH_4/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel metana,
- $C_2H_4'$  [ $m^3_n C_2H_4/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel etilena,
- $C_nH_m'$  [ $m^3_n C_nH_m/1m^3_n$ ] – obujamski (molni) udjel teških ugljikovodika.

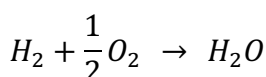
### 7.3. Stehiometrijske jednadžbe izgaranja goriva

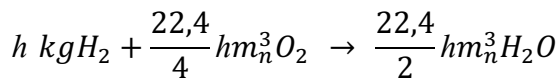
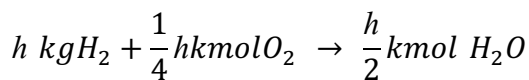
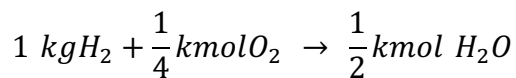
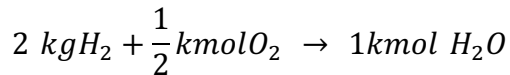
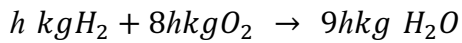
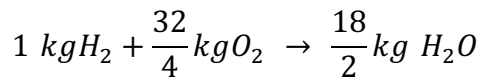
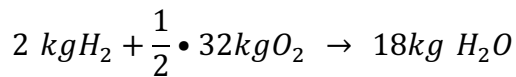
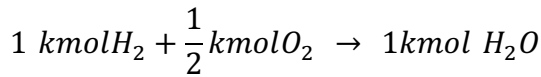
Za kruta i tekuća goriva vrijede slijedeće jednadžbe izgaranja:

1) Jednadžba potpune oksidacije ugljika (Malić, 1980):

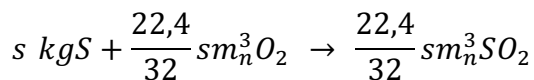
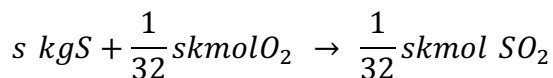
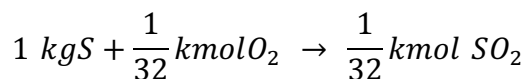
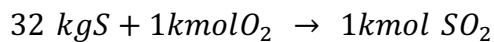
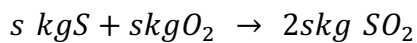
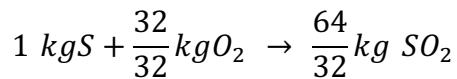
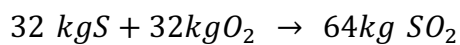
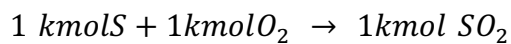
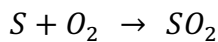


2) Jednadžba potpune oksidacije vodika (Malić, 1980):



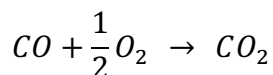


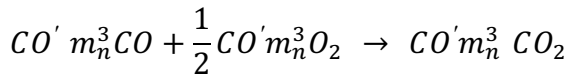
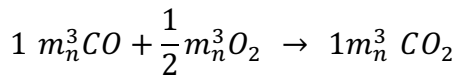
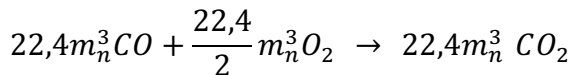
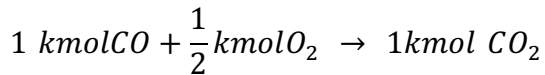
3) Jednadžba potpune oksidacije sumpora (Malić, 1980):



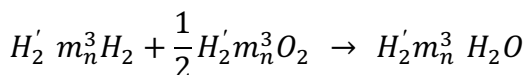
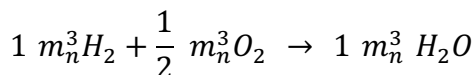
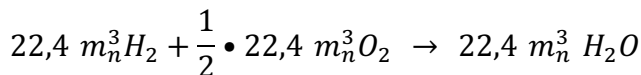
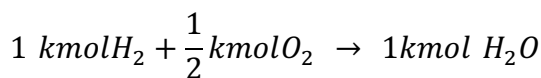
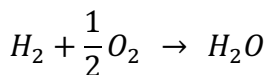
Za plinovita goriva jednadžbe izgaranja su:

1) Jednadžba potpune oksidacije CO (Malić, 1980):

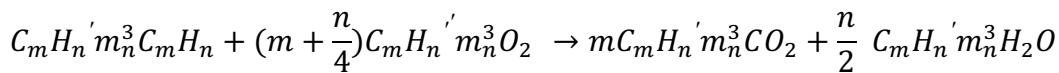
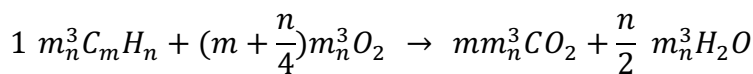
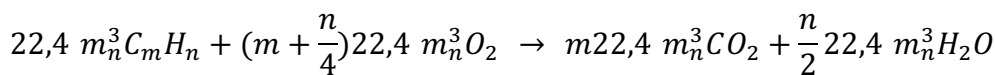
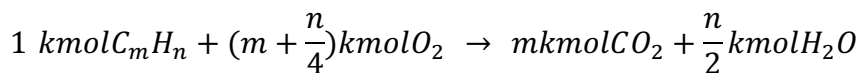
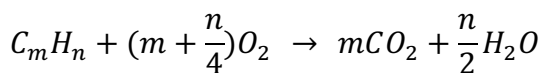




2) Jednadžba potpune oksidacije vodika (Malić, 1980):



3) Jednadžba potpune oksidacije viših ugljikovodika (Malić, 1980):



### Donja ogrjevna vrijednost goriva

Ako je poznat kemijski sastav goriva može se, na osnovu jednadžbi izgaranja, procijeniti njegova donja ogrjevna vrijednost. Gornja ogrjevna vrijednost će biti, obzirom da se higroskopski vezana vlaga u gorivima pri izgaranju ložišta prevodi najčešće u pregrijanu paru u osnovi imati samo teorijsko značenje (vlaga se najčešće u praktičnim primjenama ispušta zajedno sa ostalim produktima izgaranja u zrak, odnosno kod plinova izgaranjem

dobiva se dosta vlage, pa se primjetno razlikuju ogrjevne vrijednosti kada je para pregrijana i kada je ona ukapljena –  $H_g$  i  $H_d$ ).

Točna ogrjevna vrijednost nekog goriva može se dobiti samo njegovim potpunim izgaranjem, bilo pri stalnom tlaku, bilo pri stalnom obujmu i mjerenjem dobivene količine topline u kalorimetrima.

Potpunim izgaranjem 1 kg gorivog sastojka dobije se energije (GASVESSEL, 2018):

- ugljika 33,91 MJ,
- metana 55 MJ
- vodika 142,2 MJ,
- sumpora 9,26 MJ.

Za potpuno isparavanje 1 kg vode pri  $t = 0\text{ °C}$  potrebno je utrošiti latentnu toplinu isparavanja od  $r = 2500\text{ kJ/kg}$  (Malić, 1980).

## 7.4. Mase zraka i produkata izgaranja pri korištenju ugljena kao goriva u TE Plomin

### 7.4.1. Donja ogrjevna vrijednost

Pošto rudnici u Istri (prvenstveno Raša i kopovi u Labinštini) više ne rade, ugljen koji se koristi u TE Plomin je različitog sastava, ovisno o cijenama na tržištu. U posljednje vrijeme (2022. godina) korišten je kameni ugljen nabavljen iz Rusije (NACIONAL, 2022). Uglavnom se nabavlja ugljen sa niskim sadržajem sumpora u odnosu na ugljene koji su loženi u termoelektranama u Jugoslaviji. Obzirom na jednadžbe procesa izgaranja i donje ogrjevne vrijednosti, sasvim je jasno da će i toplinski učinak, odnosno količina produkata izgaranja sa promjenom sastava goriva biti promjenjiva.

Neka, kao osnova za analizu, bude kameni ugljen sličan kakav se može kupiti u Rusiji, približnog sastava koji je prikazan u Tablici 7-1.

**Tablica 7-1.** Prikaz sastava kamenog ugljena iz Rusije (vlastita izrada)

Sastojak	Ugljik, C	Vodik, H	Sumpor, S	Kisik, O	Dušik, N	Pepeo, A	Vlaga, W
Maseni udjel	0,62	0,06	0,014	0,1	0,01	0,1	0,1

Ovaj sastav ugljena mogao bi odgovarati nekom prosječnom nabavljenom ugljenu za TE.

Tada je donja ogrjevna vrijednost takvog ugljena:

$$H_d = 33,9 \cdot 0,62 + 142,2 \cdot (0,06 - \frac{0,1}{8}) + 9,26 \cdot 0,014 - 2,5 \cdot (0,1 + 9 \cdot 0,06) \quad [\frac{MJ}{1kg}]$$

$$H_d = 26,302 \text{ MJ/1 kg}$$

#### 7.4.2. Potrebna masa ugljena

Ako se uzme da je snaga na stezaljkama generatora termoelektrane Plomin blok B (Plomin 2)  $P_{en} = 210 \text{ MW}$ , (Kraut, 2009) te uz potrošnju snage unutar bloka (napojne pumpe i sl.)  $P_o = 18,8 \text{ MW}$ , može se računati da je potrebno, izgaranjem goriva, razviti snagu od približno  $P_u = 245 \text{ MW}$ . Potrebna snaga neće biti samo zbroj  $P_{en} + P_g$ , nego imaju gubici i u samom generatoru (trenje u ležajima npr.)

Ako se smatra da je toplinski stupanj djelovanja  $\eta_t = 0,37$  (namjeno je uzet najniži stupanj djelovanja da se ocijene granične vrijednosti potrošnje zraka, goriva i nastalih produkata izgaranja), tada će potreban toplinski tok razvijen izgaranjem goriva u ložištu kotla biti:

$$\eta_t = \frac{P_u}{\Phi_d} \Rightarrow \Phi_d = \frac{P_u}{\eta_t} \quad [MW]$$

$$\Phi_d = \frac{245}{0,37} \quad [MW]$$

$$\Phi_d = 662,163 \text{ MW}$$

Potreban maseni protok goriva (ugljena) u ložište da se ostvari ovaj toplinski tok će biti:



$$q_{mg} = \frac{\Phi_d}{H_d} \quad [kg/s]$$

$$q_{mg} = \frac{662,163}{26,302}$$

$$q_{mg} = 25,176 \text{ kg/s}$$

Ako se kao vrijeme usporedbe uzme vrijeme od 1 dana ( $t = 24\text{h} \times 60 \text{ min} \times 60\text{s} = 86400 \text{ s}$ ), tada će biti dnevna potrošnja goriva:

$$Q_{mg} = q_{mg} \cdot t = \frac{25,176 \cdot 86400}{1000} \quad [t/1dan]$$

$$Q_{mg} = 2175,207 \text{ t/1 dan}$$

#### 7.4.3. Potrebna masa zraka za potpuno izgaranje

Prema stehiometrijskim odnosima izgaranja, za izgaranje ovakvog goriva najmanja potrebna količina kisika za potpuno izgaranje bila bi (Malić, 1980):

$$m_{0min} = \frac{32c}{12} + 8 \cdot h - o + s \left[ \frac{kgO_2}{1kg} \right]$$

Znak – ispred kisika je jer se ne treba dovođiti kisik za izgaranje kisika sadržanog u gorivu.

Za upotrijebljeni ugljen:

$$m_{0min} = (32 \times 0,62)/12 + 8 \times 0,06 - 0,1 + 0,014$$

$$m_{0min} = 2,047 \text{ kg } O_2/1 \text{ kg}$$

Imajući u vidu maseni udjel kisika u smjesi zraka:  $g_{O_2} = 0,232$  (Kraut, 2009), najmanja potrebna masa zraka za izgaranje bit će:

$$m = \frac{m_{0min}}{g_{O_2}} = \frac{m_{0min}}{0,232} = \left[ \frac{kgL}{1kg} \right]$$

Za korišteni ugljen:

$$m_{Lmin} = \frac{2,047}{0,232} \left[ \frac{kgL}{1kg} \right]$$

$$m_{Lmin} = 8,825 \text{ kg L/1 kg}$$

Stvarno dovedena masa zraka je veća od najmanje potrebne da bi se zaista osiguralo što potpunije izgaranje (uvijek se mogu očekivati gubici zraka u ložištu). Stoga je stvarno potrebna masa zraka za izgaranje (Malić, 1980):

$$m_L = \lambda \cdot m_{Lmin} \left[ \frac{kgL}{1kg} \right]$$

U gornjem izrazu  $\lambda$  je pretičak (višak) zraka. Ovaj faktor se uzima u ovisnosti od mjesta izgaranja. Za izgaranje ugljene prašine (kakvo je kod kotla u TE Plomin) uzima se pretičak zraka  $\lambda = 1,2 \div 1,4$ . 1,4 je gornja vrijednost; za fino samljevenu ugljenu prašinu i izgaranje u letu najveća vrijednost pretička zraka bila bi  $\lambda = 1,2$ .

Za korišteni ugljen, stvarno potrebna dovedena količina zraka za izgaranje bit će:

$$m_L = 1,4 \times 8,825$$

$$m_L = 12,355 \text{ kg L/1 kg}$$

Dnevno potrebna masa zraka za izgaranje ovoga ugljena bila bi:

$$m_{Ld} = Q_{mg} \cdot m_L \quad [tL/1dan]$$

$$m_{Ld} = 2175,207 \times 12,355$$

$$m_{Ld} = 26\,874,682 \text{ t L/ 1 dan}$$

Ako bi se željela dobiti vrijednost u  $m^3_n$ , prema jednadžbama izgaranja, imajući u vidu da je obujamski udjel kisika u zraku  $\rho_{O_2} = 0,2099$  (Kraut, 2009) slijedi:

1) Najmanji potrebni obujam kisika za potpuno izgaranje,  $V_{Omin}$  (Malić, 1980)

$$V_{Omin} = \frac{22,4}{12} c + \frac{22,4}{4} h + \frac{22,4}{32} s - \frac{22,4}{32} o \quad [m^3_n O_2/1kg]$$

$$V_{Omin} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,62 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,06 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,014 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,1$$

$$V_{Omin} = 1,433\,134 \text{ m}^3_n O_2/1 \text{ kg}$$

2) Najmanji potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje,  $V_{Lmin}$  (Malić, 1980)

$$r_{O_2} = 0,2099$$

$$V_{Lmin} = \frac{V_{=O_{min}}}{R_{O_2}} = \frac{V_{O_{min}}}{0,2099} \left[ \frac{m_n^3}{1 \text{ kg}} \right]$$

$$V_{Lmin} = \frac{V_{O_{min}}}{R_{O_2}} = \frac{1,433134}{0,2099}$$

$$V_{Lmin} = 6,827 \ 699 \text{ m}_n^3 \text{ L/1 kg}$$

3) Stvarno potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje,  $V_L$  (Malić, 1980)

$$V_L = \lambda \cdot V_{Lmin} \left[ \frac{m_n^3 L}{1 \text{ kg}} \right]$$

Za pretičak zraka  $\lambda = 1,4$ :

$$V_L = 1,4 \times 6,827699$$

$$V_L = 9,558 \ 779 \text{ m}_n^3 \text{ L/1 kg}$$

Dnevno potrebni obujam zraka za izgaranje ovoga ugljena bio bi:

$$V_{Ld} = Q_{mg} \cdot V_L \quad [km_n^3 L/1 dan]$$

$$V_{Ld} = 2175,207 \times 9,558779$$

$$V_{Ld} = 20 \ 792,323 \text{ km}_n^3 \text{ L /1 dan}$$

#### 7.4.4. Masa produkata izgaranja

Prema stehiometrijskim jednadžbama, mase produkata izgaranja izračunate su niže. U produkte izgaranja također ulaze vlaga, dušik i kisik (koji su ili sadržani sami u gorivima ili se unose sa zrakom za izgaranje).

1) Masa ugljičnog dioksida,  $m_{CO_2}$  (Malić, 1980)

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} c \quad [kg \ CO_2/1kg]$$

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot 0,62$$

$$m_{CO_2} = 2,273 \text{ kg } CO_2/1 \text{ kg}$$

2) Masa sumpor dioksida,  $m_{SO_2}$  (Malić, 1980)

$$m_{SO_2} = 2 \cdot s \quad [kg \ SO_2/1kg]$$

$$m_{SO_2} = 2 \cdot 0,014$$

$$m_{SO_2} = 0,028 \text{ kg } SO_2/1 \text{ kg}$$

3) Masa vlage,  $m_w$

Ukupnu masu vlage, uz pretpostavku masenog sadržaja vlage u zraku dovedenom u ložište  $g_w = 0,01$ , činit će higroskopska vlaga, vlaga dobivena oksidacijom zraka i vlaga u zraku za izgaranje (Malić, 1980):

$$m_w = w + 9h + g_w m_L \quad [kg \ w/1kg]$$

$$m_w = 0,1 + 9 \times 0,06 + 0,01 \times 12,355$$

$$m_w = 0,764 \text{ kg } w/ 1 \text{ kg}$$

4) Masa dušika,  $m_{N_2}$  (Malić, 1980)

Treba imati u vidu da u produkte izgaranja ulazi sav dušik u sastavu goriva, kao i dušik unesen sa zrakom u ložište. Maseni udjel dušika u smjesi zraka je  $g_{N_2} = 0,7547$  ([2]).

$$m_{n_2} = n + g_{N_2} \cdot \lambda \cdot m_{L_{min}} \quad [kg \ N_2/1kg]$$

$$m_{N_2} = 0,01 + 0,7547 \times 1,4 \times 8,825$$

$$m_{N_2} = 9,335 \text{ kg } N_2/1 \text{ kg}$$

5) Masa kisika  $m_{O_2}$  (Malić, 1980)

$$m_{O_2} = g_{O_2} \cdot (\lambda - 1) \cdot m_{L_{min}} \quad [kg \ O_2/1kg]$$

$$m_{O_2} = 0,232 \times (1,4 - 0,232) \times 8,825$$

$$m_{O_2} = 2,391 \text{ kg } O_2/1 \text{ kg}$$

6) Masa pepela  $m_a$  (Malić, 1980)

$$m_a = a \quad [kg \text{ A}/1kg]$$

$$m_a = 0,1 \text{ kg A}/1 \text{ kg}$$

Ako se žele produkti izgaranja izraziti u normiranom obujmu,  $m^3_n$  tada se dobivaju vrijednosti u tekstu niže.

1) Obujam  $CO_2$  u plinovima produkata izgaranja,  $V_{CO_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} c \quad [m^3_n \text{ CO}_2/1kg]$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,62$$

$$V_{CO_2} = 1,157 \text{ 334 } m^3_n \text{ CO}_2/1 \text{ kg}$$

2) Obujam  $SO_2$  u plinovima produkata izgaranja,  $V_{SO_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} s \quad [m^3_n \text{ CO}_2/1kg]$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 0,014 \quad [m^3_n \text{ CO}_2/1kg]$$

$$V_{SO_2} = 0,009 \text{ 800 } m^3_n \text{ SO}_2/1 \text{ kg}$$

3) Obujam vlage,  $V_w$  (Malić, 1980)

U obujam vlage je uključena i vlaga koja dospijeva sa zrakom za izgaranje. Njen udjel oko 0,01 u zraku.

$$V_w = \frac{22,4}{18} \cdot w + \frac{22,4}{2} \cdot h + 0,01 \cdot \frac{22,4 \cdot 1,29}{18} \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{Lmin} \quad [m^3_n \text{ W}/1kg]$$

$$V_w = \frac{22,4}{18} \cdot 0,1 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,06 + 0,01 \cdot \frac{22,4 \cdot 1,29}{18} \cdot (1,4 - 1) \cdot 6,827699 \quad [m^3_n \text{ W}/1kg]$$

$$V_w = 0,840 \text{ 287 } m^3_n \text{ W}/1 \text{ kg}$$

4) Obujam dušika,  $V_{N_2}$  (Malić, 1980)

Obujamski udjel dušika u smjesi zraka je  $r_{N_2} = 0,7803$ , a kisika  $r_{N_2} = 0,2009$  (Kraut, 2009).

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot r_{N_2} (\lambda - r_{O_2}) \cdot V_{Lmin} \quad [m^3_n \text{ N}_2/1kg]$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,01 + 0,7803 \cdot (1,4 - 0,2009) \cdot 6,827699 \quad [m_n^3 N_2/1kg]$$

$$V_{N_2} = 0,8 \times 0,01 + 0,7803 \times (1,4 - 0,2009) \times 6,827699$$

$$V_{N_2} = 6,396 \ 389 \ m_n^3 N_2/1 \ kg$$

5) Obujam kisika,  $V_{O_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot V_{Omin} [m_n^3 O_2/1kg]$$

$$V_{O_2} = (1,4-1) \cdot 1,433134 \quad [m_n^3 O_2/1kg]$$

$$V_{O_2} = 0,573 \ 254 \ m_n^3 O_2/1 \ kg$$

Potrebna dnevna masa zraka za izgaranje,  $Q_{mL}$  bit će:

$$Q_{mL} = m_L \times q_{mg} \times t$$

$$Q_{mL} = 12,355 \times 25,176 \times 86,4$$

$$Q_{mL} = 26 \ 874,676 \ t \ L/1 \ dan$$

Ili, ako se potrebna količina zraka želi izražavati preko normiranog obujma u  $m_n^3$ :

$$Q_{VL} = V_L \times q_{mg} \times t$$

$$Q_{VL} = 9,558779 \times 25,176 \times 86,4$$

$$Q_{VL} = 20 \ 792,318 \ km_n^3 L/ 1 \ dan$$

#### 7.4.5. Dnevne mase produkata izgaranja ugljena

1) Dnevna masa ugljičnog dioksida,  $m_{CO_2d}$

$$m_{CO_2d} = m_{CO_2} \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [tCO_2/1dan]$$

$$m_{CO_2d} = 2,273 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{CO_2d} = 4 \ 944,245 \ t \ CO_2/1 \ dan$$

2) Dnevna masa sumpor dioksida,  $m_{SO_2d}$

$$m_{SO_2d} = m_{SO_2} \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [tSO_2/1dan]$$

$$m_{SO_2d} = 0,028 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{SO_2d} = 60,906 \text{ t } SO_2/1 \text{ dan}$$

3) Dnevna masa vlage,  $m_{wd}$

$$m_{wd} = m_w \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [tW/1dan]$$

$$m_{wd} = 0,764 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{wd} = 1\,661,858 \text{ t } W/1 \text{ dan}$$

4) Dnevna masa dušika,  $m_{N_2d}$

$$m_{N_2d} = m_{N_2} \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [tN_2/1dan]$$

$$m_{N_2d} = 9,335 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{N_2d} = 20\,304,069 \text{ t } N_2/1 \text{ dan}$$

5) Dnevna masa kisika,  $m_{O_2d}$

$$m_{O_2d} = m_{O_2} \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [tO_2/1dan]$$

$$m_{O_2d} = 2,391 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{O_2d} = 5\,200,919 \text{ t } O_2/1 \text{ dan}$$

6) Dnevna masa pepela,  $m_{ad}$

$$m_{ad} = m_a \cdot q_{mg} \cdot \frac{86400}{1000} \quad [t/1dan]$$

$$m_{ad} = 0,1 \cdot 25,176 \cdot \frac{86400}{1000}$$

$$m_{ad} = 217,521 \text{ t A/1 dan}$$

7.5. Mase zraka i produkata izgaranja pri korištenju zemnog plina kao goriva

7.5.1. Donja ogrjevna vrijednost

Tipični molni (obujamski) sastav plina prikazan je u Tablici 7-2.

**Tablica 7-2.** Prikaz sastava prirodnog plina na mjernom mjestu Pula (PLINACRO, 2023)

metan CH <sub>4</sub>	etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	dušik N <sub>2</sub>	ugljični dioksid CO <sub>2</sub>	propan C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	izo butan C <sub>4</sub> H <sub>10i</sub>	normalni butan C <sub>4</sub> H <sub>10n</sub>	ostalih viših ugljikovodika
99,312 %,	0,014 %	0,627 %	0,041 %	0,003 %,	0,01 %,	0 %	u tragovima

Donja ogrjevna vrijednost ovoga plina bi bila 35,661 MJ/m<sup>3</sup><sub>n</sub> pri temperaturi izgaranja 25 °C i temperaturi plina 0° C (Trading economics, 2023b).

7.5.2. Potrebna masa prirodnog plina

Ukoliko je stupanj korisnosti plinsko turbinske termoelektre i termoelektre na ugljen jednak,  $\eta_t = 0,37$ , ostaje i u ovom slučaju jednak potrebni toplinski tok razvijen izgaranjem u ložištu:  $\Phi_d = 662,163 \text{ MW}$ , pa će potrebni normalni obujamski protok:

$$q_{vg} = \frac{\Phi_d}{H_d} \quad [m_n^3/s]$$

$$q_{vg} = \frac{662,163}{35,661}$$

$$q_{vg} = 18,569 \text{ m}_n^3/s$$

Dnevna potrošnja goriva je:



$$Q_{vg} = q_{vg} \cdot t = \frac{18,569 \cdot 86400}{1000} \quad [km_n^3/1dan]$$

$$Q_{vg} = 1\,604,362 \text{ km}_n^3/1 \text{ dan}$$

Da bi ovo moglo usporediti sa masom ugljena kao goriva, može se naći, korištenjem jednadžbe stanja idealnog plina za normalne referentne uvjete, obujam 1 m<sup>3</sup><sub>n</sub> prirodnog plina (to bi bila, zapravo, gustoća prirodnog plina pri normnim uvjetima). Za poznatu molarnu masu prirodnog plina M = 16,134 kg/kmol (Strelec et al., 2014) :

$$m = \frac{p_m \cdot V_m \cdot M}{R_m \cdot T_m} \quad [kg]$$

$$m = \frac{101325 \cdot 1 \cdot 16,134}{8314,5 \cdot 273,15} \quad [kg]$$

$$m = 0,720 \text{ kg}$$

Sada će biti dnevna potrošnja goriva (prirodnog plina):

$$Q_{mg} = 1\,604,362 \text{ km}_n^3 / 1 \text{ dan} = 1\,604,362 \cdot 0,720 \text{ t/1 dan}$$

$$Q_{mg} = 1\,155,141 \text{ t/1 dan}$$

Potrebna dnevna potrošnja ugljena je  $Q_{mg} = 2\,175,207 \text{ t/1 dan}$ . Dakle, mnogo veća masa ugljena je potrebna nego masa prirodnog plina za isti toplinski učinak.

### 7.5.3. Potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje

1) Najmanji potrebni obujam kisika za potpuno izgaranje,  $V_{Omin}$  ([1])

$$V_{Omin} = \frac{1}{2}CO' + \frac{1}{2}H_2' + 2CH_4' + \frac{7}{2}C_2H_6' + 5C_3H_8' + \frac{13}{2}C_4H_{10}i - O_2' \quad [m_n^3 O_2/1m_n^3]$$

$$V_{Omin} = 2 \times 0,99312 + 3,5 \times 0,014 + 5 \times 0,003 + 6,5 \times 0,01$$

$$V_{Omin} = 2,11\,524 \text{ m}_n^3 O_2/m_n^3$$

2) Najmanji potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje,  $V_{Lmin}$  (Malić, 1980)

Obujamski udjel kisika u zraku je  $r_{N2} = 0,2009$  (Kraut, 2009).

$$V_{Lmin} = \frac{V_{Omin}}{R_{O_2}} = \frac{V_{Omin}}{0,2099} \left[ \frac{m_n^3 L}{1m_n^3} \right]$$

$$V_{Lmin} = \frac{V_{Omin}}{R_{O_2}} = \frac{2,11\ 524}{0,2099}$$

$$V_{Lmin} = 10,077\ 371\ m_n^3\ L/m_n^3$$

### 3) Stvarno potrebni obujam zraka za potpuno izgaranje, $V_L$ (Malić, 1980)

Za izgaranje plinskih gorivih smjesa potreban je manji sadržaj zraka (najveća vrijednost pretička zraka je  $\lambda = 1,2$ ), ali radi analize pod istim uvjetima uzet će se  $\lambda = 1,4$ . Za fino mljevenu ugljenu prašinu (kakva se koristi u TE Plomin B) pretičak zraka je skoro isti kao i kod korištenja prirodnog plina.

$$V_L = \lambda \cdot V \frac{m_n^3 L}{1m_n^3}$$

$$V_L = 1,4 \times 10,077371$$

$$V_L = 14,108\ 320\ m_n^3\ L/m_n^3$$

Ukoliko se uzme ranije izračunata masa koja odgovara  $1m_n^3$ ,  $m = 0,720$  kg, slijedi obujam zraka po 1 kg prirodnog plina:

$$V_{Lpp} = 14,108\ 320\ m_n^3\ L / 0,720\ kg$$

$$V_{Lpp} = 19,594\ 889\ m_n^3\ L/1\ kg$$

Za ugljen isti ovaj obujam je  $V_{Lug} = 9,558\ 779\ m_n^3\ L/1\ kg$  goriva, ali ne treba zanemariti razliku ogrjevnim vrijednostima 1 kg plina i 1 kg ugljena. Za prirodni plin u ovoj analizi bila bi  $H_{dpp} = 35,661\ MJ/m_n^3 / 0,72\ kg/ m_n^3 = 49,529\ MJ/1\ kg\ pp$ , dok je za ugljen  $H_d = 26,302\ MJ/1\ kg\ ugljena$ .

Potrebna dnevna mase zraka za izgaranje ovog prirodnog plina bila bi:

$$m_{Lppd} = Q_{mg} \cdot V_{Lpp} \cdot \rho_{pp} \quad [tpp/1dan]$$

$$m_{Lppd} = 1155,141 \times 19,594889 \times 0,720$$

$$m_{Ld} = 16\ 297,099\ t\ L/1\ dan$$

Potrebni dnevni normalni obujam zraka za izgaranje bio bi:

$$V_{Lppd} = Q_{mgd} \cdot V_{Lpp} \quad [km_n^3L/1dan]$$

$$V_{Lppd} = 1155,141 \times 19,594889$$

$$V_{Lppd} = 22\,634,860 \text{ km}_n^3 \text{ L/1 dan}$$

#### 7.5.4. Obujam produkata izgaranja

Prema stehiometrijskim jednažbama, obujmi produkata izgaranja izračunate su niže. U produkte izgaranja također dušik u gorivima, te dušik i kisik koji se unose sa zrakom za izgaranje.

1) Obujam ugljičnog dioksida,  $V_{CO_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{CO_2} = CO' + CO_2' + CH_4' + 2C_2H_6' + 3C_3H_8' + 4C_4H_{10I}' + 4C_4H_{10N}' \quad [m_n^3CO_2/1m_n^3]$$

$$V_{CO_2} = 0,041 + 0,99312 + 2 \cdot 0,014 + 3 \cdot 0,003 + 4 \cdot 0,01 \quad [m_n^3CO_2/1m_n^3]$$

$$V_{CO_2} = 1,108\,120 \text{ m}_n^3 \text{ CO}_2/1 \text{ m}_n^3$$

2) Obujam vlage,  $V_{H_2O}$  (Malić, 1980)

$$V_{H_2O} = H_2O' + H_2' + 2CH_4' + 3C_2H_6' + 4C_3H_8' + 5C_4H_{10I}' + 5C_4H_{10N}' \quad [m_n^3H_2O/1m_n^3]$$

$$V_{H_2O} = 2 \cdot 0,99312 + 3 \cdot 0,014 + 4 \cdot 0,003 + 5 \cdot 0,01 \quad [m_n^3H_2O/1m_n^3]$$

$$V_{H_2O} = 2,090\,240 \text{ m}_n^3 \text{ H}_2\text{O} /1 \text{ m}_n^3$$

3) Obujam dušika,  $V_{N_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{N_2} = N_2' + \frac{R_{N_2}}{R_{O_2}} \lambda V \quad [m_n^3N_2/1m_n^3]$$

$$V_{N_2} = 0,627 + \frac{78,03}{20,99} \cdot 1,4 \cdot 2,11\,524$$

$$V_{N_2} = 11,635\ 721\ m^3_n\ N_2/1\ m^3_n$$

4) Obujam kisika,  $V_{O_2}$  (Malić, 1980)

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot V_{O_{min}} [m^3_n\ O_2/1m^3_n]$$

$$V_{O_2} = (1,4 - 1) \cdot 2,11\ 524$$

$$V_{O_2} = 0,846\ 096\ m^3_n\ O_2/1\ m^3_n$$

Ako se prebace ove jedinice u  $m^3_n/1\ kg$  dobivam:

1) Masa ugljičnog dioksida,  $m_{CO_2}$

$$m_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{22,4} \cdot \frac{V_{CO_2}}{0,720} = \frac{44}{22,4} \cdot \frac{1,108\ 120}{0,720} [kg\ CO_2/1kg]$$

$$m_{CO_2} = 3,023\ kg\ CO_2/1\ kg$$

2) Masa vlage,  $m_w$

$$m_w = \frac{M_{H_2O}}{22,4} \cdot \frac{V_{H_2O}}{0,720} = \frac{18}{22,4} \cdot \frac{2,090\ 240}{0,72} [kg\ H_2O/1kg]$$

$$m_w = 2,333\ kg\ w/1\ kg$$

3) Masa dušika,  $m_{N_2}$

$$m_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{22,4} \cdot \frac{V_{N_2}}{0,720} = \frac{28}{22,4} \cdot \frac{11,635\ 721}{0,72} [kg\ N_2/1kg]$$

$$m_{N_2} = 20,201\ kg\ N_2/1\ kg$$

4) Masa kisika,  $m_{O_2}$

$$m_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{22,4} \cdot \frac{V_{O_2}}{0,720} = \frac{32}{22,4} \cdot \frac{0,846\ 096}{0,72} \quad [kgN_2/1kg]$$

$$m_{O_2} = 1,679 \text{ kg } O_2/1 \text{ kg}$$

### 7.5.5. Dnevne mase produkata izgaranja prirodnog plina

1) Dnevna masa ugljičnog dioksida,  $m_{CO_2d}$

$$m_{CO_2d} = m_{CO_2} \cdot Q_{mg} \quad [tCO_2/1dan]$$

$$m_{CO_2d} = 3,023 \cdot 1\ 155,141$$

$$m_{CO_2d} = 3\ 491,991 \text{ t } CO_2/ 1 \text{ dan}$$

2) Dnevna masa vlage,  $m_w$

$$m_{Wd} = m_W \cdot Q_{mg} \quad [tW/1dan]$$

$$m_{Wd} = 2,333 \cdot 1\ 155,141$$

$$m_{Wd} = 2\ 694,944 \text{ t } W/ 1 \text{ dan}$$

3) Dnevna masa dušika,  $m_{N_2}$

$$m_{N_2d} = m_{N_2} \cdot Q_{mg} \quad [tW/1dan]$$

$$m_{N_2d} = 20,204 \cdot 1155,141$$

$$M_{N_2d} = 23\ 335,003 \text{ t } N_2/ 1 \text{ dan}$$

4) Dnevna masa kisika,  $m_{O_2}$

$$m_{O_2d} = m_{O_2} \cdot Q_{mg} \quad [tO_2/1dan]$$

$$m_{O_2d} = 1,679 \cdot 1155,141$$

$$M_{O_2d} = 1\ 939,482 \text{ t } O_2/ 1 \text{ dan}$$

## 8. USPOREDNA ANALIZA RADA TE PLOMIN B SA UGLJENOM I SA PRIRODNIM PLINOM

Da bi se moglo što bolje usporediti rad termoelektrane sa dva različita goriva, uzet je najniže objavljeni stupanja djelovanja TE Plomin B (Plomin 2). Jasno je da, ukoliko je stupanje djelovanja veći da se za istu snagu na stezaljkama generatora troši manje goriva. To samo po sebi znači i manju ispuštenu količinu neizbježnih produkata izgaranja. Višak zraka uzet je  $\lambda = 1,4$ . Taj višak zraka bi bio za izrazito nepovoljne uvjete rada. Pošto se koristi fino mljevena ugljena prašina, odnosno prirodni plin, očekivani pretičak zraka bi bio oko  $\lambda = 1,2$

### 1. Dnevna potrošnja goriva

- pri radu sa ugljem:  $Q_{mug} = 2\,175,207$  t/1 dan.
- pri radu sa prirodnim plinom:  $Q_{mpp} = 1\,155,141$  t/1 dan ili  $Q_{vpp} = 1\,604,362$  km<sup>3</sup><sub>n</sub>/1 dan.

Zaključak: za isti toplinski učinak (proizvedenu snagu postrojenja) potrebna je manja masa plina kao pogonskog goriva.

### 2. Dnevne potrebe zraka za izgaranje

- Pri radu sa ugljem:
  - $m_{Ld} = 26\,874,682$  t L/ 1 dan ili
  - $V_{Ld} = 20\,792,323$  km<sup>3</sup><sub>n</sub> L/1 dan
- Pri radu sa prirodnim plinom:
  - $m_{Ld} = 16\,297,099$  t L/ 1 dan
  - $V_{Lppd} = 22\,634,860$  km<sup>3</sup><sub>n</sub> L/1 kg

Zaključak: dnevno potrebna masa zraka za izgaranje prirodnog plina je manja nego za izgaranje ugljena.

### 3. Masa produkata izgaranja

Ako se gledaju mase sastojaka produkata izgaranja po 1 kg upotrijebljenog goriva dobivaju se vrijednosti u Tablici 8-1.

**Tablica 8-1.** Prikaz sastojaka izgaranja goriva (1kg) (vlastita izrada)

Sastojak	Ugljen [kg/1 kg ug]	Plin [kg/1 kg pp]
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	$m_{CO_2} = 2,273$	$m_{CO_2} = 3,023$
Sumpor dioksid, SO <sub>2</sub>	$m_{SO_2} = 0,028$	U sastavu plina nema S
Vlaga, W	$m_w = 0,764$	$m_w = 2,333$
Dušik, N <sub>2</sub>	$m_{N_2} = 9,335$	$m_{N_2} = 20,201$
Kisik, O <sub>2</sub>	$m_{O_2} = 2,391$	$m_{O_2} = 1,679$
Pepeo, A	$m_a = 0,1$	U sastavu plina nema pepela.

Ovaj kriterij i nije najpodesniji za ocjenu jer ogrjevna vrijednost 1 kg prirodnog plina je osjetno veća nego 1 kg ugljena.

Ako se gledaju normalni obujmi sastojaka produkata izgaranja po 1 kg upotrijebljenog goriva dobivaju se vrijednosti u Tablici 8-2.

**Tablica 8-2.** Prikaz sastojaka izgaranja goriva (vlastita izrada)

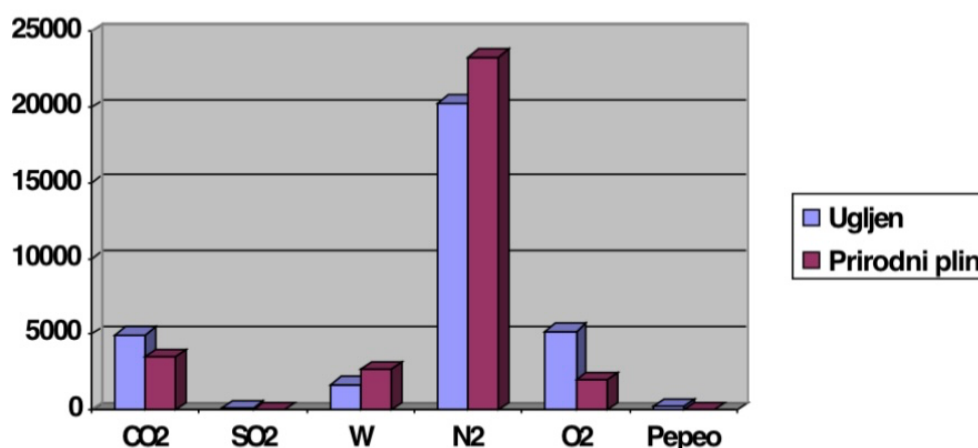
Sastojak	Ugljen [m <sup>3</sup> n/1 kg ug]	Plin [m <sup>3</sup> n /1 kg pp]
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	$V_{CO_2} = 1,157\ 334$	$V_{CO_2} = 1,108\ 120$
Sumpor dioksid, SO <sub>2</sub>	$V_{SO_2} = 0,009\ 800$	U sastavu plina nema S.
Vlaga, W	$V_w = 0,840\ 287$	$V_w = 2,090\ 240$
Dušik, N <sub>2</sub>	$V_{N_2} = 6,396\ 389$	$V_{N_2} = 11,635\ 721$
Kisik, O <sub>2</sub>	$V_{O_2} = 0,573\ 254$	$V_{O_2} = 0,846\ 096$
Pepeo, A	$V_a =$	U sastavu plina nema pepela.

Ovi podaci, također, nisu najpodesniji za usporedbu.

U Tablici 8-3. prikazane su dnevne mase produkata izgaranja.

**Tablica 8-3.** Prikaz dnevne mase produkata izgaranja (vlastita izrada)

Sastojak	Ugljen [t/1 dan]	Plin [t/1 dan]
Ugljični dioksid, CO <sub>2</sub>	m <sub>CO2</sub> = 4 944,245	m <sub>CO2</sub> = 3 491,991
Sumpor dioksid, SO <sub>2</sub>	m <sub>SO2</sub> = 60,906	U sastavu plina nema S.
Vlaga, W	m <sub>w</sub> = 1 661,858	m <sub>w</sub> = 2 694,944
Dušik, N <sub>2</sub>	m <sub>N2</sub> = 20 304,069	m <sub>N2</sub> = 23 335,003
Kisik, O <sub>2</sub>	m <sub>O2</sub> = 5 200,919	m <sub>O2</sub> = 1 939,482
Pepeo, A	m <sub>a</sub> = 217,521	U sastavu plina nema pepela.



**Slika 8-1.** Dnevna masa produkata izgaranja za prirodni plin i ugljen (t/d)

Dobiveni podatci iz tablice prikazani su stupičastim dijagramom kako bi razlika u masi produkata izgaranja bila uočljivija.

Zaključak:

- Prilikom izgaranja prirodnog plina, osjetno je manja masa ugljičnog – dioksida (29,37 %).
- U sastavu plina nema sumpora, pa je sadržaj sumpor dioksida u sastavu produkata izgaranja u smislu primjesa – to je značajna prednost izgaranja prirodnog plina.
- Primjetno je veća masa vlage pri izgaranju prirodnog plina (62,16 %), što je i razumljivo obzirom na sadržaj vodika u ugljikovodicima koji čine prirodni plin.
- Izgaranjem ugljena dobiva se veća masa kisika u produktima izgaranja. Pošto on stiže iz zraka to i nije prednost izgaranja ugljena.



- Pri izgaranju prirodnog plina udjel pepela je teorijski jednak 0. To je prednost izgaranja plina jer nije potrebno uklanjanje pepela, odnosno prostor za njegovo skladištenje.

Ukupno gledano, sa stanovišta utjecaja na životnu sredinu, prirodni plin je podesnije gorivo.

#### 4. Dnevni trošak goriva

##### 1) Ugljen

Cijena ugljena je 139,65 \$ po toni (TRADING ECONOMICS, 2023a).

Pri ovoj cijeni dnevni trošak goriva, ne računajući troškove, dopreme, skladištenja, sušenja i pripreme za izgaranje bio bi:

$$C_{ugd} = P_u \cdot t \cdot C_1 \quad [\$]$$

$$C_{ugd} = 2175,207t \times 139,65 \text{ \$/1t}$$

$$C_{ugd} = 303\,767,66 \$ = 277907,92 \text{ €}$$

##### 2) Prirodni plin

Cijena 1 MWh prirodnog plina je 33,478 € (TRADING ECONOMICS, 2023b). To znači da je dnevni trošak goriva (ne računajući troškove prijevoza, skladištenja i rukovanja):

$$C_{ppd} = P_u \cdot t \cdot C_1 \quad [€]$$

$$C_{ppd} = 245 \text{ MW} \times 24\text{h} \times 33,478 \text{ €/1MWh}$$

$$C_{ppd} = 196\,850,64 \text{ €}$$

Zaključak: trošak rada Plomina na ugljen je značajno veći nego trošak rada na prirodni plin.

Za oba goriva, oba su fosilna goriva, u cijenu troška treba uračunati i nametnute ETS stope za ispuštanje ugljičnog dioksida u atmosferu, iako bi ti troškovi za prirodni plin bili manji radi manje proizvodnje CO<sub>2</sub> pri radu.

Opći zaključak: TE Plomin 2 na prirodni plin bi, u trenutnim uvjetima, bio jeftinija inačica.

Koristeći podatke iz Tablice 6.4 o ukupnim troškovima prenamjene elektrane i koristeći izračunatu razliku u dnevnoj potrošnji plina i ugljena te razliku u naknadama za emisiju CO<sub>2</sub> biti će izračunato vrijeme povrata investicije.

Na temelju izračunatih podataka o dnevnoj potrošnji goriva razlika u dnevnom utrošku goriva bila bi:

$$C_r = C_{ugd} - C_{ppd}$$

$$C_r = 277907,92 \text{ €/d} - 196850,64 \text{ €/d}$$

$$C_r = 81057,28 \text{ €/d}$$

Ukoliko dobivenu razliku pomnožimo sa 365 dobiti ćemo razliku u utrošku goriva na godišnjoj razini:

$$C_{r_{god}} = C_r \times 365$$

$$C_{r_{god}} = 81057,28 \text{ €/d} \times 365$$

$$C_{r_{god}} = 29585907,2 \text{ €/god}$$

Načini obračunavanja i plaćanja naknade na emisiju u okoliš CO<sub>2</sub> određeni su Uredbom o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš ugljikovog dioksida (NN, 46/2021). Prema toj uredbi jedinična naknada za jednu tonu emisije CO<sub>2</sub> iznosi 1,486 €, a iznos naknade izračunava se prema izrazu  $N = N1 \times E \times k_k$  gdje je:

- N – ukupni iznos naknade na emisiju CO<sub>2</sub>
- N1 – naknada za jednu tonu emisije CO<sub>2</sub>
- E – količina emisije CO<sub>2</sub> u tonama u kalendarskoj godini
- k<sub>k</sub> – korektivni koeficijent ovisan o količini i podrijetlu emisije

Korektivni koeficijent izračunava se prema izrazu:

$$k_k = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4$$

U ovom slučaju, budući da je emisija CO<sub>2</sub> na godišnjoj razini veća od 500 000 tona koeficijent k<sub>1</sub> iznosi 0,65, koeficijent k<sub>2</sub> iznosi 1 za kruta goriva i 0,7 za plin, koeficijent k<sub>3</sub> iznosi 0,5 i koeficijent k<sub>4</sub> iznosi 0,8.

Prema tome, korektivni koeficijent za ugljen je jednak:

$$k_{kg} = 0,65 \times 1 \times 0,5 \times 0,8$$

$$k_{kg} = 0,26$$

Korektivni koeficijent za plin iznosi:

$$k_{kp} = 0,65 \times 0,7 \times 0,5 \times 0,8$$

$$k_{kp} = 0,182$$

Koristeći izračunate podatke naknada za emisije CO<sub>2</sub> kod korištenja ugljena na godišnjoj razini iznosi:

$$N_g = 1,486 \times (4944,245 \times 365) \times 0,26$$

$$N_g = 697244,352 \text{ €/god}$$

Naknada za emisije CO<sub>2</sub> kod korištenja plina iznosi:

$$N_p = 1,486 \times (3491,991 \times 365) \times 0,182$$

$$N_p = 344711,822 \text{ €/god}$$

Razlika u naknadama na emisiju CO<sub>2</sub> na godišnjoj razini između ugljena i plina iznosi:

$$N_R = N_g - N_p$$

$$N_R = 697244,352 - 344711,822$$

$$N_R = 352532,53 \text{ €/god}$$

Ukupna razlika na godišnjoj razini, uzimajući u obzir razliku u utrošku goriva i razliku u emisijama CO<sub>2</sub>, iznosi:

$$R = C_r + N_R$$

$$R = 29585907,2 + 352532,53$$

$$R = 29\,938\,439,70 \text{ €/god}$$

Koristeći podatke iz tablice 7. gdje su ukupni troškovi prenamjene elektrane procijenjeni na 98 500 000 € može se izračunati vrijeme povrata investicije:

$$T = 98\,500\,000/R$$

$$T = 98\,500\,000 / 29\,938\,439,70$$

$$T = 3,29 \text{ god}$$

Izračunato vrijeme povrata investicije može značajno varirati u ovisnosti o cijeni plina i ugljena koje su u posljednje vrijeme zbog geopolitičkih i ekonomskih razloga prilično nestabilne.

## 9. ZAKLJUČAK

Nakon provedene analize na Termoelektrani Plomin 2, čiji je cilj bilo ustanoviti koje prednosti ili nedostatke sa sobom nosi zamjena ugljena sa prirodnim plinom, jasno je kako je upotreba plina bolja opcija prvenstveno gledano sa ekološkog aspekta. Također u financijskom smislu, s obzirom na dnevnu potrošnju svakog od goriva i na njihove trenutne cijene na tržištu, prirodni plin se pokazao kao bolji izbor. Na temelju rada prikazano je kako plin kao gorivo i termoelektrana na prirodni plin imaju značajno manje produkte izgaranja koji direktno utječu na okoliš i klimatske promjene. Tu se prije svega misli na ugljikov dioksid koji je najzastupljeniji zagađivač među produktima izgaranja i za kojeg se plaća naknada na godišnjoj razini. Budući da je termoelektrana na prirodni plin manji proizvođač ugljikovog dioksida takva naknada također ide u prilog tome kako je zamjena ugljena sa prirodnim plinom isplativa opcija. Prema svemu navedenom može se zaključiti kako je termoelektrana na prirodni plin bolji izbor i u ekološkom i financijskom smislu, međutim određena prepreka njezinoj izgradnji bila bi trenutna situacija na tržištu energenata koja je prilično nestabilna te prati ekonomsko i geopolitičko stanje u svijetu.

U svakom slučaju, vidljivo je kako trend zamjene ugljena prirodnim plinom u velikoj mjeri doprinosi smanjenju emisija kao što je i navedeno u radu. Zamjena ugljena prirodnim plinom je rješenje koje treba prihvatiti prije potpune primjene obnovljivih izvora energije što se sigurno neće dogoditi u nekom kratkom razdoblju.

## 10. LITERATURA

1. BOLF, N. 2020. *Produkti gorenja u industriji*
2. CHOU, C-L. 1997. *Geology of Fossil Fuels – Coal*
3. HRVATSKA ENERGETSKA REGULATORNA AGENCIJA (HERA). 2022. *Obavijest krajnjim kupcima plina - izmjena načina obračuna i naplate isporučenog plina primjenom gornje ogrjevne vrijednosti*. Zagreb: Hrvatska energetska regulatorna agencija.
4. JAYARAM, J., AVITTATHUR, B. 2015. *Green supply chains: A perspective from an emerging economy*. *International Journal of Production Economics*, 164, str. 234-244.
5. KLARIN, T. 2018. *The Concept of Sustainable Development: From its Beginning to the Contemporary Issues*. *Zagreb International Review of Economics and Business*, 21(1), str. 67.
6. KRAUT, B. 2009. *Strojarski priručnik*. 11. izdanje. Zagreb: Sajema d.o.o
7. MALIĆ, D. 1980. *Termodinamika i termotehnika*. 7. izdanje. Beograd: Građevinska knjiga Beograd.
8. MILEVOJ, M. 2018. *Postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i ispušnih dimnih plinova termoelektrane Plomin*. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu.
9. NARODNE NOVINE br. 42/2021. *Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora*. Zagreb: Narodne novine d.d.
10. NARODNE NOVINE br. 46/2021. *Uredba o jediničnim naknadama, korektivnim koeficijentima i pobližim kriterijima i mjerilima za utvrđivanje naknade na emisiju u okoliš ugljikovog dioksida*. Zagreb: Narodne novine d.d.
11. NARODNE NOVINE br. 68/2023. *Izmjene i dopuna Općih uvjeta opskrbe plinom*. Zagreb: Narodne novine d.d.
12. RAO, D., BAER, P. 2007. *Decent Living Emissions: A Conceptual Framework*
13. SAWYER, C., MCCARTY, P., PARKLIN, G. 1994. *Chemistry for Environmental Engineering*
14. STRELEC, V., BELAMARIĆ, B., CIKATIĆ ŠANIĆ, D., CRNIĆ, D., DEKANIĆ, I., DOJČINOVIĆ, Z., DUJMOVIĆ, N., DUVANČIĆ, D., i dr. 2014. *Plinarski priručnik*. 7. izdanje. Zagreb: Energetika Marketing.

Web izvori:

15. ARAMAYO, L. 2020. *More than 100 coal-fired plants have been replaced or converted to natural gas since.* 2011.  
URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=44636> (12.08.2023.)
16. GASVESSEL. 2018. *Natural gas vs. Coal – a positive impact on the environment.*  
URL: <https://www.gasvessel.eu/news/natural-gas-vs-coal-impact-on-the-environment/> (30.07.2023.)
17. HEP PROIZVODNJA, n.d. *TE Plomin.*  
URL: <https://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/termoelektrane/te-plomin/1563> (15.08.2023.)
18. JUKIĆ, A. 2021. *Sirova nafta – sastav i svojstva*  
URL: [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/Jukic\\_PPN\\_3\\_Sirova\\_nafta\\_-\\_sastav\\_i\\_svojstva.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Jukic_PPN_3_Sirova_nafta_-_sastav_i_svojstva.pdf) (04.01.2024.)
19. KLAPČIĆ, S. n.d. *Termoelektrana Plomin.*  
URL: <http://istra.lzmk.hr/clanak.aspx?id=2730> (29.08.2023.)
20. LUKIĆ, M., HEMETEK – POTROŠKO, I., TIŠLJAR, V., KUPSJAK, L. 2019. *Projekt Podravina – okosnica proizvodnje plina u Republici Hrvatskoj*  
URL: <https://hrcak.srce.hr/file/330843> (12.01.2024.)
21. LYDERSEN, K. 2017. *Conversion to natural gas brings new life to aging coal plants*  
URL: <https://energynews.us/2017/02/24/conversion-to-natural-gas-brings-new-life-to-aging-coal-plants/> (08.01.2024.)
22. MCGRATH, G. 2021. *Electric power sector CO2 emissions drop as generation mix shifts from coal to natural gas.*  
URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48296> (30.07.2023.)
23. MINISTARSTVO GOSPODARSTVA I ODRŽIVOG RAZVOJA 2021. *Energija u Hrvatskoj – Godišnji Energetski pregled*  
URL: [https://eihp.hr/wp-content/uploads/2023/01/Energija%20u%20HR%202021\\_WEB\\_LR.pdf](https://eihp.hr/wp-content/uploads/2023/01/Energija%20u%20HR%202021_WEB_LR.pdf)
24. NACIONAL. 2022. *TEŠKI PUTINOV UDAR NA HRVATSKU: Rusi odbijaju isporučiti ugljen za TE Plomin pa Hrvatska ostaje bez 9 posto el. energije.*  
URL: <https://www.nacional.hr/teski-putinov-udar-na-hrvatsku-rusi-odbijaju-ispocuciti-ugljen-za-te-plomin-pa-hrvatska-ostaje-bez-9-posto-el-energije/> (16.08.2023.)
25. PLINACRO. n.d. *Opis transportnog sustava.*

- URL: <https://www.plinacro.hr/default.aspx?id=162> (23.08.2023.)
26. PLINACRO. 2023. *Kvaliteta prirodnog plina - objava podataka*.  
URL: <https://www.plinacro.hr/default.aspx?id=106> (16.08.2023.)
27. RADIĆ, M. 2015. Matematički model Medupi elektrane, Južnoafrička republika  
URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/34009281.pdf>
28. SVJETSKA KOMISIJA ZA OKOLIŠ I RAZVOJ 1987. Brundtlandovo izvješće  
URL: <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/glossary/sustainable-development.html> (29.08.2023.)
29. TRADING ECONOMICS. 2023a. *Coal*.  
URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/coal> (08.07.2023.)
30. TRADING ECONOMICS. 2023b. *EU Natural Gas*.  
URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas> (08.07.2023.)



## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Utjecaj zamjene ugljena prirodnim plinom“ izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Karlo Goluža



KLASA: 602-01/23-01/200  
URBROJ: 251-70-12-23-2  
U Zagrebu, 17.01.2024.

**Karlo Goluža, student**

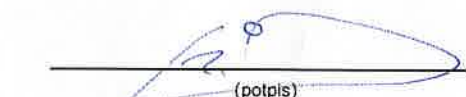
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/200, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 07.11.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### UTJECAJ ZAMJENE UGLJENA PRIRODNIM PLINOM

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada doc. dr. sc. Nikola Vištica nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:




(potpis)

doc. dr. sc. Nikola Vištica

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:



(potpis)

izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)