# Analiza uklapanja električnih bojlera u centralni toplinski sustav

**Sučić, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:406323

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

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








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Matija Sučić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Mislav Čehil, dipl. ing.

Student:

Matija Sučić

Zagreb, 2019.

# IZJAVA i ZAHVALA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći literaturu navedenu u popisu literature.

Zahvaljujem se na savjetima i stručnoj pomoći mentoru ***doc. dr. sc. Mislavu Čehilu***

Zahvaljujem se ***Energetskom institutu Hrvoje Požar*** i njihovom djelatniku ***Draženu Baliću*** koji mi je pomogao u izradi matematičkog modela u programu ***„PLEXOS Integrated Energy Model“***.

Posebno se zahvaljujem svojim **roditeljima** bez čije potpore i razumijevanja ne bih mogao ostvariti sve svoje ciljeve.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

# DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matija Sučić** Mat. br.: 0035191925

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uklapanja električnih bojlera u centralni toplinski sustav**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of implementing Electric Boilers in the District Heating System**

Opis zadatka:

S porastom udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu povećavaju se povremeni viškovi proizvodnje električne energije. Jedan od načina iskorištavanja tih viškova električne energije je pretvorba u toplinsku energiju u električnim bojlerima velike snage koji su dio centralnog toplinskog sustava (CTS).

U radu je potrebno:

1. Analizirati postojeće i dostupne tehnologije električnih bojlera (vrste, investicijski troškovi, operativni troškovi, učestalost održavanja i troškovi pokretanja).
2. U programskom paketu *PLEXOS® Integrated Energy Model* napraviti simulaciju rada električnog bojlera s toplinskim spremnikom u CTS grada Zagreba s ciljem minimiziranja ukupnih troškova.
3. Odrediti optimalnu snagu električnog bojlera.
4. Prikazati i analizirati dobivene rezultate.

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

| Zadatak zadan: | Datum predaje rada: | Predviđeni datum obrane: |
|---|---|---|
| 17. siječnja 2019. | 21. ožujka 2019. | 27., 28. i 29 ožujka 2019. |

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... III
POPIS KRATICA ..... VI
POPIS OZNAKA ..... VII
SAŽETAK ..... VIII
SUMMARY ..... IX
1. UVOD ..... 1
1.1 Toplinski sustavi u Republici Hrvatskoj ..... 1
1.2 Toplinski sustavi u Europskoj Uniji ..... 3
2. TERMOENERGETSKO POSTROJENJE KAO CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAV ..... 6
2.1 Kogeneracija ..... 6
2.1.1 Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare ..... 6
2.1.2 Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova ..... 7
2.2 Kogeneracijska elektrana EL-TO Zagreb ..... 8
3. ELEKTRIČNI KOTLOVI ..... 10
3.1 Električni parni kotao ..... 10
3.2 Vrelovodni kotlovi ..... 13
4. ANALIZA TOPLINSKOG KONZUMA ..... 15
4.1 Referentna godina ..... 15
4.2 Kretanje toplinskog konzuma - projekcija promjena ..... 16
5. SIMULACIJSKI MODEL ..... 18
5.1. Programski alat PLEXOS ..... 19
5.1.1. Model EL-TO Zagreb u PLEXOS-u ..... 20
5.2. Blok shema postrojenja i ulazni podaci proizvodnih jedinica. ..... 21
5.3 Kretanje toplinskog konzuma ..... 26
5.4 Kretanje cijene električne energije ..... 27
5.5. Kretanje cijene prirodnoga plina i emisijskih jedinica $CO_2$ ..... 29
5.6 Prihodi ..... 30

5.7 Rashodi....31
5.8 Profit....32
5.9 Jednostavni period povrata....33
6. REZULTATI SIMULACIJSKOG MODELA....34
6.1. Proizvodnja električne energije....34
6.2 Proizvodnja toplinske energije....36
6.3 Potrošnja prirodnog plina....39
6.4 Potrošnja električne energije....43
6.5 Emisije $CO_2$....44
6.6 Ekonomska analiza isplativosti....44
6.6.1 Prihodi....45
6.6.2 Rashodi....46
6.6.3 Profit....47
6.6.4 Jednostavni period povrata....48
7. ZAKLJUČAK....49
8. LITERATURA....50

# POPIS SLIKA

**Slika 1. CTS u Republici Hrvatskoj [4]** ..... 2
**Slika 2. Struktura potrošnje toplinske energije u Hrvatskoj [4]** ..... 3
**Slika 3. Finalna potrošnja energije centraliziranih toplinski sustava na razini EU po sektorima i gradovima [3]** ..... 4
**Slika 4. Postotak sektora kućanstva spojeni na CTS u EU po gradovima [4]** ..... 4
**Slika 5. Izvori toplinske energije na razini EU [4]** ..... 5
**Slika 6. Shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem [7]** ..... 7
**Slika 7. CHP s kotlom na otpadnu toplinu** ..... 8
**Slika 8. Dijelovi električnog parnog kotla [10]** ..... 11
**Slika 9. Osnovni dijelovi sklopa : A-parovod, B-cjevovod za blowdown, C-ulaz napojne vode, D- cirkulacijski krug [10]** ..... 12
**Slika 10. Shematski prikaz parnog postrojenja s električnim kotlom: A- otplinjač, B-spremnik napojne vode, C-kotao, D- parovod [10]** ..... 12
**Slika 11. Električni vrelovodni kotao- regulacija promjenom razine vode [10]** ..... 13
**Slika 12. Električni vrelovodni kotao - regulacija s ekranima [10]** ..... 14
**Slika 13. Prikaz konzuma ogrjevne topline za referentnu godinu** ..... 15
**Slika 14. Prikaz konzuma tehnološke pare za referentnu godinu** ..... 16
**Slika 15. Kretanje ogrjevnog konzuma 2016. - 2030. godine** ..... 17
**Slika 16. Prikaz vremenskog perioda simulacija PLEXOS-a [11]** ..... 19
**Slika 17. Model EL-TO Zagreb u PLEXOS-u** ..... 20
**Slika 18. Prikaz sučelja matematičkog solvera Xpress-MP** ..... 21
**Slika 19. Blok shema postrojenja EL-TO Zagreb u 2020. godini** ..... 22
**Slika 20. Blok shema postrojenja EL-TO Zagreb u 2025. i 2030. godini.** ..... 22
**Slika 21. Konzum ogrjevne topline za 2020. godinu** ..... 26
**Slika 22.Konzum tehnološke pare za 2020. godinu** ..... 27
**Slika 23. Cijene električne energije za 2016. godinu – HUPX** ..... 28
**Slika 24. Mjesečni koeficijenti cijene električne energije u razdoblju 2014.-2016. godina** ..... 28
**Slika 25. Satni koeficijenti cijene električne energije u razdoblju 2014.-2016. godina** ..... 29
**Slika 26.Proizvodnja električne energije u tri scenarija pogona EL-TO Zagreb** ..... 34
**Slika 27.Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2020.godine za sva tri scenarija** 35
**Slika 28. Proizvodnja električne energije po blokovima u 2025. i 2030. godini za sva tri scenarija** ..... 35
**Slika 29. Stani prikaz proizvodnje električne energije u 2020.godini.** ..... 36
**Slika 30. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2020.godine za sva tri scenarija** 36
**Slika 31. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2025.godine za sva tri scenarija** 37
**Slika 32. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2030.godine za sva tri scenarija** 38
**Slika 33. Satni prikaz režima rada EL-TO Zagreb u 2020. godini.** ..... 38
**Slika 34. Satni prikaz proizvodnje toplinske energije, toplinskog konzuma i popunjenosti toplinskog spremnika u 2020.godini** ..... 39
**Slika 35. Godišnja potrošnja prirodnog plina po scenarijima pogona EL-TO Zagreb** ... 40
**Slika 36. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - prvi scenarij** ..... 41

**Slika 37. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - drugi scenarij** ..... 42
**Slika 38. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - treći scenarij** ..... 43
**Slika 39.Ukupni godišnji prihodi prema scenarijima.** ..... 45
**Slika 40. Ukupni godišnji rashodi prema scenarijima.** ..... 46
**Slika 41. Ukupni godišnji profit prema scenarijima.** ..... 47

# POPIS TABLICA

**Tablica 1. Postojeći blokovi u pogonu EL-TO Zagreb (9)**..... 9
**Tablica 2. Projekcija promjene toplinskog konzuma na lokaciji EL-TO Zagreb za razdoblje do 2030. godine (samo ogrjevna toplina)** ..... 17
**Tablica 3. Blok H i J**..... 23
**Tablica 4. Blok L- plinska turbina (2X54.9 MWe)**..... 23
**Tablica 5. Blok L-parna turbina**..... 23
**Tablica 6. WK-3**..... 23
**Tablica 7. WK-4**..... 23
**Tablica 8. PK-M** ..... 24
**Tablica 9.PK-M** ..... 24
**Tablica 10. Osnovne karakteristike električnog vrelovodnog kotla** ..... 24
**Tablica 11.Osnovne karakteristike električnog parnog kotla**..... 25
**Tablica 12.Kretanje cijene električne energije prema godinama** ..... 29
**Tablica 13. Kretanje cijene plina prema godinama** ..... 30
**Tablica 14. Kretanje cijene $CO_2$ prema godinama**..... 30
**Tablica 15. Proizvodnja električne energije u tri scenarija (GWh)** ..... 34
**Tablica 16. Potrošnja prirodnog plina po scenarijima pogona EL-TO (GWh)** ..... 40
**Tablica 17. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - prvi scenarij (TJ)** ..... 41
**Tablica 18.Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - drugi scenarij (TJ)** ..... 42
**Tablica 19. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - treći scenarij (TJ)** ..... 43
**Tablica 20. Potrošnja električne energije u drugom i trećem scenariju (GWh)** ..... 44
**Tablica 21. Godišnje emisije $CO_2$ u pogonu EL-TO u tri scenarija ($tCO_2$)**..... 44
**Tablica 22. Ukupni godišnji prihodi prema scenarijima.**..... 45
**Tablica 23. Ukupni godišnji rashodi prema scenarijima.**..... 46
**Tablica 24. Ukupni godišnji profit prema scenarijima.**..... 47
**Tablica 25. Razlika profita među scenarijima**..... 48
**Tablica 26. Jednostavni period povrata (JPP) prema scenarijima.** ..... 48

# POPIS KRATICA

CTS – Centralni toplinski sustav

EU - Europska Unija

PTV- Potrošna topla voda

EK - Europska komsija

PtH – Power to heat

## POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $Pel$ | EUR | Prihod od prodaje električne energije |
| $cel$ | EUR/MWh | Cijena električne energije |
| $C_{topl}$ | EUR/MWh | Cijena toplinske energije |
| $E_{topl},i$ | MWh | Količina proizvedene toplinske energije |
| $P_{topl}$ | EUR | Prihod od prodaje toplinske energije |
| $P_{uk}$ | EUR | Ukupni prihod od prodaje |
| $c_{pp}$ | EUR/MWh | Cijena prirodnog plina |
| $Epp,i$ | MWh | Količina potrošenog prirodnog plina |
| $E_{el,i}$ | MWh | Količina potrošene električne energije |
| $C_{em}$ | EUR/t | Cijena emisijskih jedinica $CO_2$ |
| $m_{em},i$ | t | Količina emisije $CO_2$ |
| $R_{uk}$ | EUR | Ukupni rashod |
| $T_{pp}$ | EUR | Trošak za prirodni plin |
| $T_{el}$ | EUR | Trošak za električnu energije |
| $T_{em}$ | EUR | Trošak za emisijske jedinice |
| $PR$ | EUR | Ukupni profit |
| $JPP$ | Godina | Jednostavni period povrata |
| $PRi$ | EUR | Profit drugog ili trećeg scenarija |
| $PRu$ | EUR | Profit prvog scenarija |
| $C$ | EUR | Ukupna cijena električnih bojlera |

# SAŽETAK

U ovome radu napravljena je simulacija rada električnih bojlera velikih snaga u centralnom toplinskom sustavu (CTS) grada Zagreba na primjeru EL-TO Zagreb. U programskom paketu PLEXOS Integrated Energy Model izrađen je simulacijsko-optimizacijski model uklapanja električnih bojlera u EL-TO Zagreb. Model je izrađen na temelju ulaznih podataka koji obuhvaćaju tehničke i ekonomske parametre novih električnih kotlova te svih postojećih i planiranih jedinica na lokaciji, zatim podatke o očekivanom kretanju toplinskog konzuma te tržišne podatke (cijene električne energije, prirodnog plina i emisijskih jedinca). Simulacijsko optimizacijski model ima cilj minimizacije ukupnih troškova pogona EL-TO Zagreb.

Analiza simulacija napravljena je za tri scenarija. Prvi scenarij je bez električnih kotlova, drugi scenarij predviđa uklapanje jednog vrelovodnog (30 MW) i jednog parnog električnog kotla (30 MW) te treći scenarij predviđa uklapanje dva parna električna kotla (2X30 MW) i jednog vrelovodnog (30 MW). Sva tri scenarija su napravljena za 2020., 2025. i 2030. godinu.

Rezultati prikazuju da električni bojleri u oba scenarija (drugi i treći) imaju zanemariv udio u proizvodnji toplinske energije. U 2020. godini u drugom scenariju proizvode 0,08 % toplinske energije od ukupno proizvedene, a u trećem scenariju 0,33 %. U 2025. godini u drugom scenariju proizvode 0,025 % toplinske energije od ukupno proizvedene, a u trećem scenariju 1,18 %. Jednostavni period povrata električnih bojlera za drugi scenarij u 2020. godini iznosi 181 godinu, a za 2030.godinu iznosi 90 godina.

Ključne riječi : centralni toplinski sustav, električni bojleri, PLEXOS, jednostavni period povrata, minimizacija ukupnih troškova

## SUMMARY

For the purpose of this Thesis, the simulation of the operation of large-scale electric boilers in the District heating (DH) of the city of Zagreb, on the example of EL-TO Zagreb (Cogeneration Plant in Zagreb).

Using the PLEXOS Integrated Energy Model software, a simulation-optimization model for electric boiler fitting in EL-TO Zagreb has been developed.

The model has been created on the basis of a large amount of input data, including technical and economic parameters of modern electric boilers and all existing and planned units at the EL-TO, data of expected heat consumption and market data (the prices of electricity, natural gas and emission units).

The main goal of the model is to minimize the total operating costs of EL-TO Zagreb.Three scenarios have been calculated using the model.

The first scenario does not consider electric boilers usage, the second envisages the fitting of one hot water (30MW) and one steam electric boiler (30MW), while the third envisages fitting two steam electric boilers (2X30MW) and one hot water boiler. All the scenarios have been calculated for years 2020, 2025 and 2030.

The obtained results show that electric boilers do not participate significantly in total heat energy production (according to second and third scenarios). For example, according to the second scenario, it has been calculated that the boilers produce 0.08% of the total heat energy in the year 2020 and 0.33% in the year 2025. Also, according to the third scenario, it has been calculated that the boilers produce 0.025% of the total heat energy in the year 2020 and 1.18% in the year 2025. The payback period for electric boilers is 181 years according to the second scenario and 91 according to third.



Keywords: district heating, electric boilers, PLEXOS, ,minimize the total operating costs, payback period

# 1. UVOD

U postizanju ciljeva energetske politike ublažavanja klimatskih promjena, sigurnosti opskrbe i konkurentnosti središnju ulogu ima energija za grijanje i hlađenje, jer čini više od polovice finalne potrošnje energije u Europskoj Uniji (EU). Energija iskorištena za potrebe grijanja i hlađenja u 2012. iznosila je oko 6.500 TWh, a 12.800 TWh iznosila je finalna potrošnja energije u EU28 [1].

Potencijalni put za dekarbonizaciju sektora toplinarstva je proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora. Osim toga, viškovi električne energije se plasiraju za proizvodnju toplinske energije te na taj način ostvaruju fleksibilnost između proizvedene električne energije i potražnje za električnom energijom.

Koncept iskorištavanja viška proizvedene električne energije za proizvodnju toplinske poznat je pod nazivom Power to Heat (PtH). Sam koncept želi integrirati dva energetska sektora – elektroenergetski i toplinarski. Toplinska energija može se koristiti za pripremu potrošne tople vode (PTV), grijanje ili ukoliko postoji toplinski spremnik naknadno. Korištenje toplinskog spremnika za skladištenje toplinske energije jednostavnije je i jeftinije nego skladištenje električne energije[2]. Razlog su ključni parametri toplinske energije ( npr. temperatura, tlak) koji nisu strogo definirani kao parametri električne energije (frekvencija i napon). Dobru poznatu i razvijenu tehnologiju za pretvorbu električne energije u toplinsku predstavljaju dizalice topline i električni kotlovi (bojleri). Raspon primjene PtH koncepta, tj PtH tehnologije može se primijeniti od manjih skala tj. distribucijske razine pa sve do većih snaga (centralni toplinski sustavi-CTS), do nekoliko stotina MW. PtH tehnologije služe kao pomoćne usluge operateru prilikom promjene opterećenja

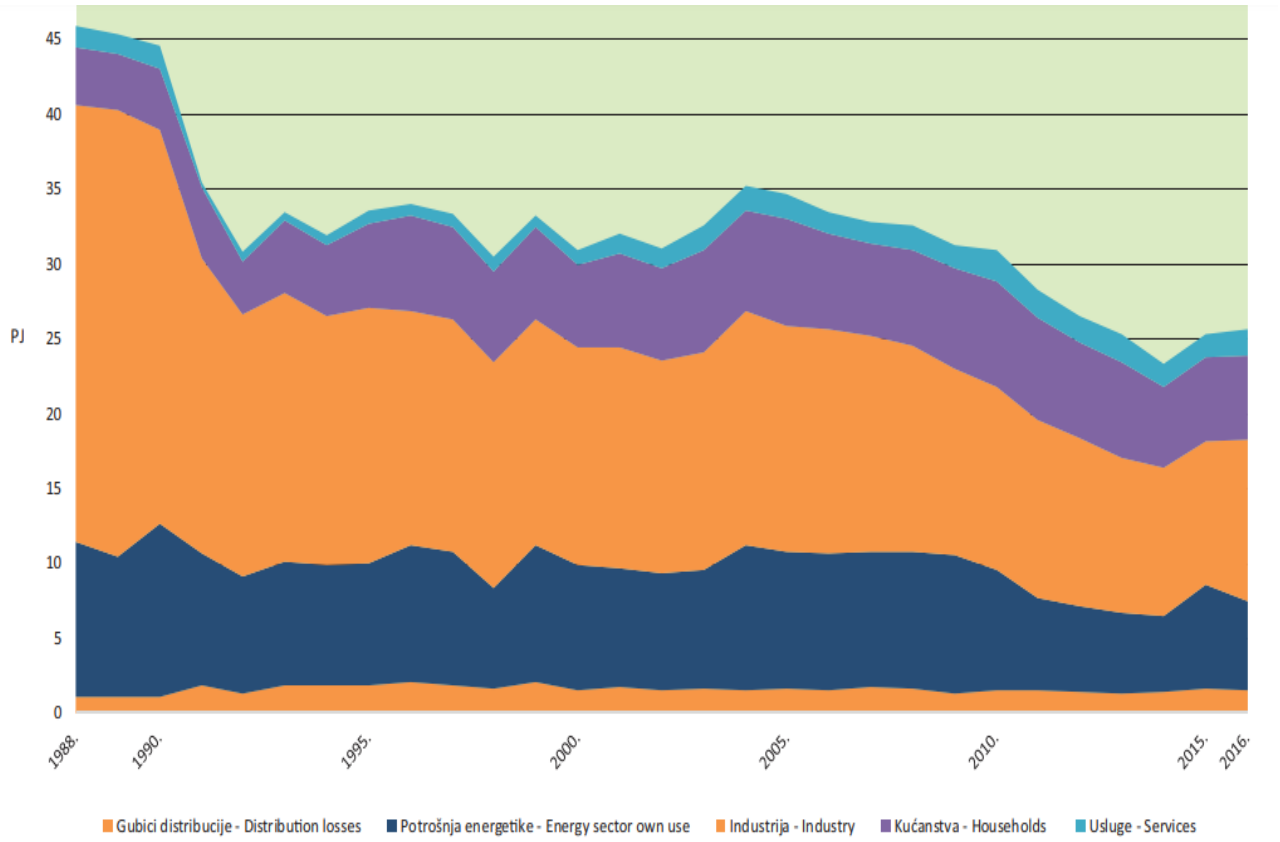
## 1.1 Toplinski sustavi u Republici Hrvatskoj

Opskrbom toplinske energije putem toplinskih sustava u 2016. godini bavilo se 11 tvrtki u 16 gradova. Takvi sustavi služe za grijanje prostora i pripremu tople vode za više od 158 647 kupaca toplinske energije, a 95% ukupnog broja kupaca pripada kućanstvima. Kogeneracijska postrojenja za proizvodnju toplinske energije postoje u gradu Zagrebu, Osijeku i Sisku. U njima se proizvodi i isporučuje tehnološka para za potrebe industrije, a djelom i za potrebe grijanja prostora. U Republici Hrvatskoj krajnjim kupcima isporučeno je više od 2.1 TWh toplinske energije [4].




**Slika 1. CTS u Republici Hrvatskoj [4]**

***Slika 1***. prikazuje gradove u Republici Hrvatskoj u kojima postoji CTS. Veličina sustava prikazana je ilustrativno.

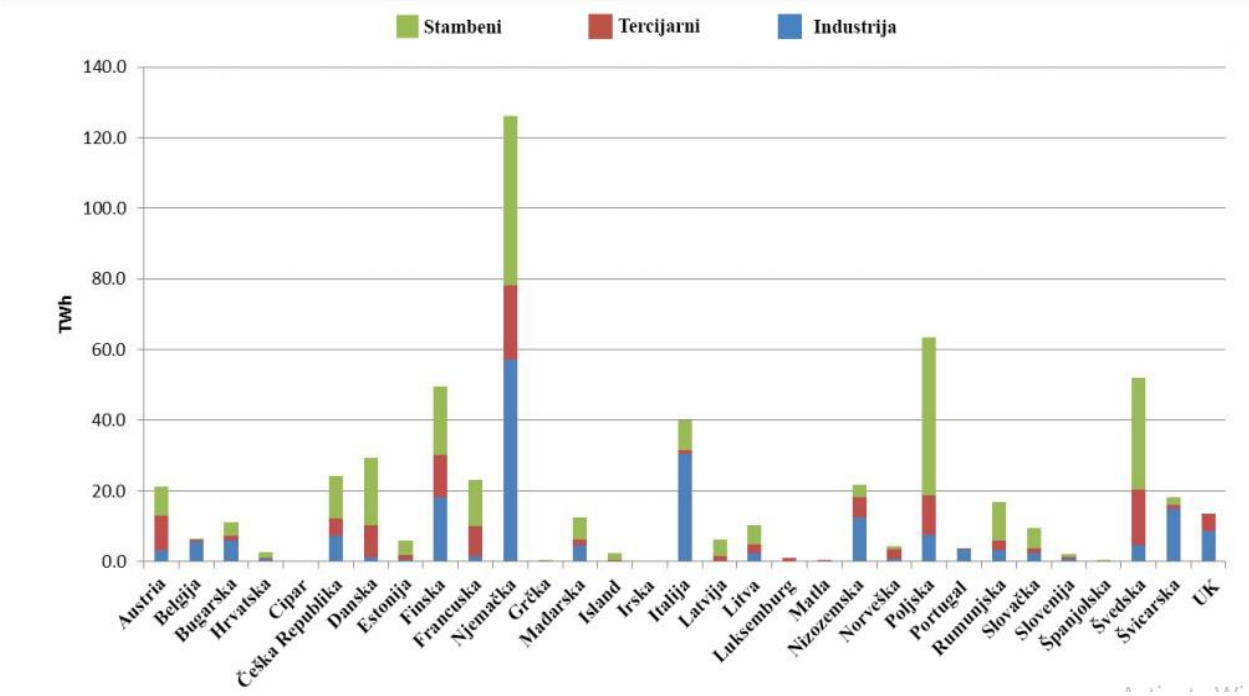



**Slika 2. Struktura potrošnje toplinske energije u Hrvatskoj [4]**

***Slika 2***. prikazuje kako je raspoređena struktura potrošnje toplinske energije prema sektorima u vremenskom periodu. Vidljivo je da sektor industrije ima najveći udio, ali se tijekom godina smanjuje i povećava potrošnja toplinske energije u kućanstvima.

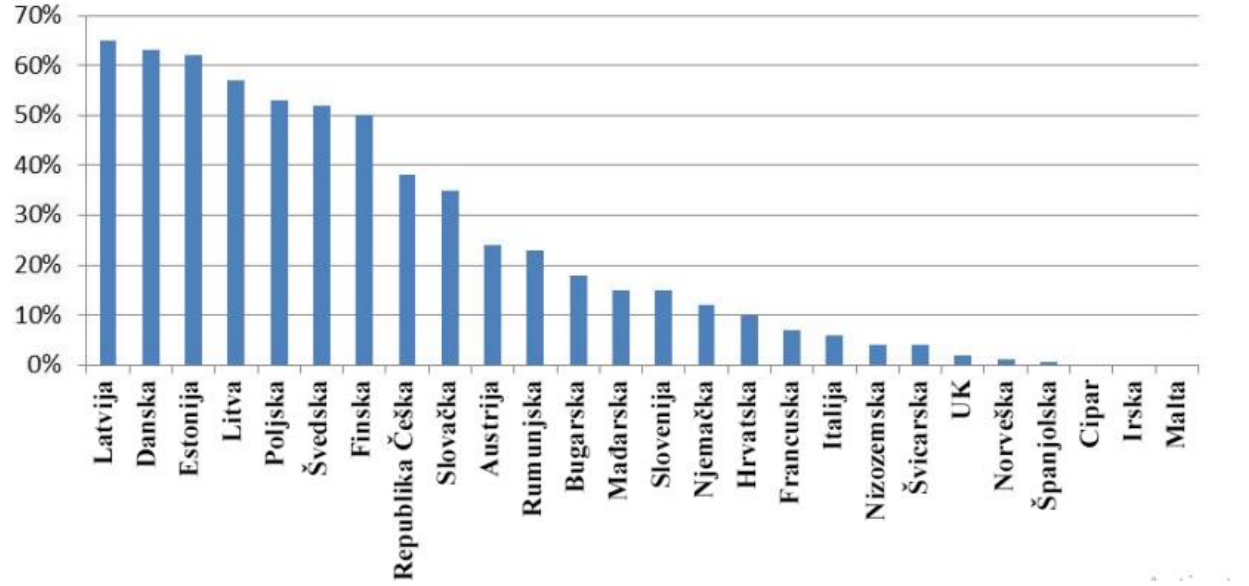
### 1.2 Toplinski sustavi u Europskoj Uniji

Centralizirani toplinski sustavi opskrbljuju oko 70 milijuna građana EU. Na sektor kućanstva otpada 45% od ukupne proizvedene topline u CTS-ima, dok na industrijski i tercijarni sektor otpada udio od 55% (34%+21%). Ovisno o zemlji unutar EU ti se udjeli značajno razlikuju (slika 3). Njemačka predstavlja daleko najvećeg potrošača na razini EU, na koju otpada 20% potrošnje finalne energije CTS-a. Na razini EU finalna potrošnja toplinske energije iz navedenog sustava u 2012. godini iznosila je 576 TWh [5].



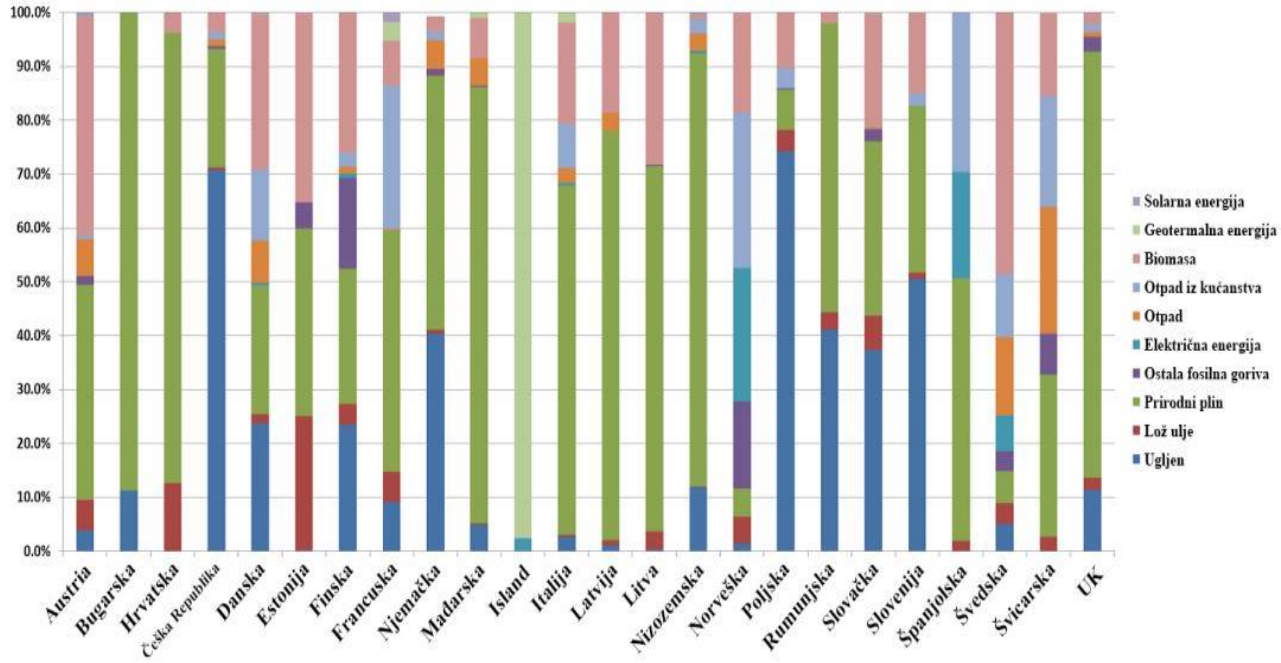

**Slika 3. Finalna potrošnja energije centraliziranih toplinski sustava na razini EU po sektorima i gradovima [3]**

***Slika 4***. prikazuje da Latvija kao zemlja članica EU ima najveći postotak spojenih kućanstava na centralizirani toplinski sustav, dok Malta najmanji [4].




**Slika 4. Postotak sektora kućanstva spojeni na CTS u EU po gradovima [4]**

Prirodni plin kao izvor energije zauzima prvo mjesto u korištenju kod CTS-a na razini EU (40%), a zatim ugljen (29%) i biomasa (16%). Zbog procesa dekarbonizacije može se primijetiti da udio OIE u samim CTS počinje imati sve veću ulogu, kao što prikazuje ***Slika 5***.




**Slika 5. Izvori toplinske energije na razini EU [4]**

# 2. TERMOENERGETSKO POSTROJENJE KAO CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAV

Ovaj rad bavit će se analizom uklapanja visokonaponskih niskotlačnih kotlova u pogon termoenergetskog postrojenja kao centralnog toplinskog sustava u gradu Zagrebu. Stoga je nužno objasniti osnovnu teoretsku podlogu termoenergetskih postrojenja.

Termoenergetska postrojenja koriste kemijsku energiju goriva kako bi proizvela :

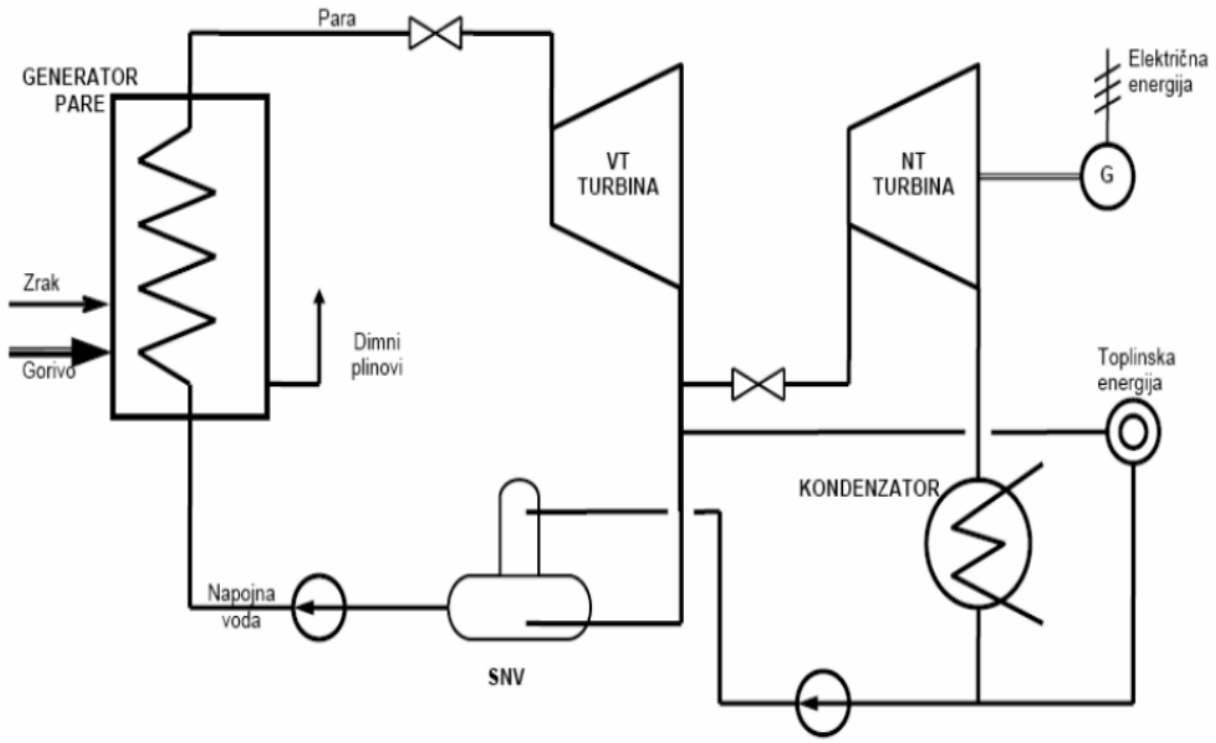
- samo električnu energiju
- samo toplinsku energiju (toplana)
- električnu i toplinsku energiju (kogeneracija)

## 2.1 Kogeneracija

Istovremena proizvodnja električne i toplinske energije naziva se kogeneracijom. Ona postiže bolju energetsku učinkovitost što dovodi do smanjenja korištenja fosilnih goriva [5], a samim time i do smanjenja emisija ugljičnog dioksida ($CO_2$ ) [6].

### 2.1.1 Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

Turbina ovog sustava ima najmanje dva stupnja : visokotlačni (VT) i niskotlačni (NT). Konstantna vrijednost tlaka održava se oduzimanjem pare između VT i NT, a oduzeta para služi za zagrijavanje grijalice. Dva su granična režima ovog sustava, prvi kada nema potrebe za toplinskom energijom „***čisti kondenzacijski pogon***“ i drugi kada je potreba za toplinskom energijom toliko velika da ne preostaje pare za niskotlačni turbinski stupanj (10% nazivnog protoka moga strujati radi hlađenja loptica i diskova) „***čisti protutlačni pogon***“.

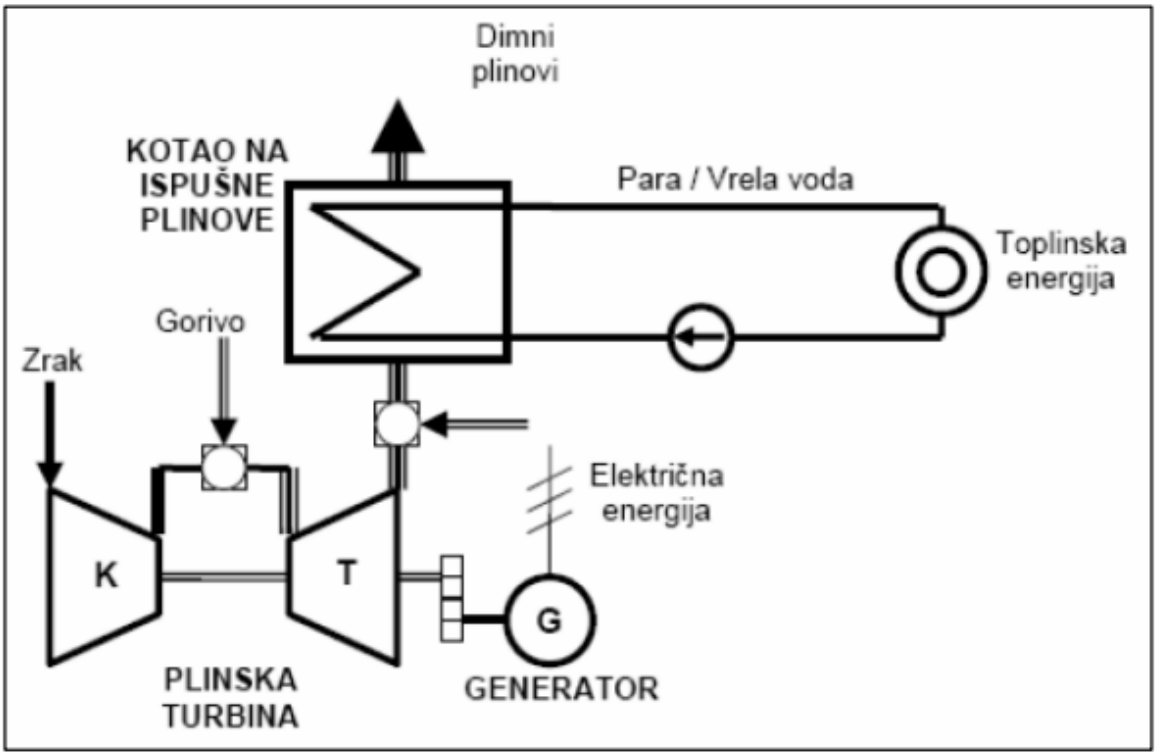



**Slika 6. Shema kogeneracijskog postrojenja s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem [7]**

Ovakav tip postrojenja koristi se u gradskim toplanama, u postrojenjima gdje je potrebna stalna i sigurna opskrba električnom energijom te kod pogona koji su vrlo osjetljivi na prekide u opskrbi energijom (petrokemija, rafinerija itd..). Proizvodnja električne energije kod ovog ovakvog tipa postrojenja ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije i kondenzacijskom tlaku (temperatura + raspoloživa količina rashladnog medija).

2.1.2 Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova

Ovo postrojenje je po svojoj izvedbi kombinirano te istovremeno proizvodi električnu i toplinsku energiju. Plinska turbina napaja kotao ispušnim plinovima koji proizvodi paru i/ili toplu vodu za primjenu u procesnoj industriji ili za grijanje.




**Slika 7. CHP s kotlom na otpadnu toplinu**

### 2.2 Kogeneracijska elektrana EL-TO Zagreb

Elektrana toplana (EL-TO) Zagreb sastoji se od više jedinica/blokova za proizvodnju toplinske i električne energije. Raspolaže ukupnom snagom od 89 MWe (električna snaga) i 439 MWt (toplinska snaga) te se još proizvodi 160 t/h tehnološke pare. Navedene karakteristike imaju značajan elektroenergetski i toplinski izvor za grad Zagreb [8].

Jedinice za proizvodnju toplinske i električne energije sastoje se od : tri visokotlačna parna kotla (K-6, K-8, K-9), dvije parne turbine, dvije plinske turbine s kotlovima na otpadnu toplinu za proizvodnju tehnološke pare i dva dogrijača vrele vode, vršnog kotla (K-7) za proizvodnju tehnološke pare i dva vrelovodna kotla(VK-3 i VK-4).

Sama elektrana smještena je u gradskom naselju Trešnjevka. Goriva koja se koriste za dobivanje električne i toplinske energije su prirodni plin i lož ulje (zamjensko gorivo).

**Tablica 1. Postojeći blokovi u pogonu EL-TO Zagreb (9)**

| BLOK | | GORIVO | NAZIVNA SNAGA | GODINA PUŠTANJA U POGON |
|---|---|---|---|---|
| **BLOK A** | K-6 | PP/TLU | 100 t/h (115 bara/520°C) | 1970. |
| | TA1 | - | 11 MWe | |
| **BLOK B** | K-8 | PP/TLU | 100 t/h (115 bara/520°C) | 1980. |
| | K-9 | PP/TLU | 100 t/h (115 bara/520°C) | |
| | TA2 | - | 30 Mwe | |
| **BLOK D** | K-7 | PP/TLU | 80 t/h (17 bara/240°C) | 1972. |
| **BLOK G** | VK-3 | PP/TLU | 116 MWt | 1991. |
| **BLOK H** | PTA-1 | PP | 25,2 Mwe | 1998. |
| | KU-1 | - | 7,6 MWt+64 t/h (17 bara/240°C) | |
| **BLOK J** | PTA-2 | PP | 25,2 MWe | 1998. |
| | KU-2 | - | 7,6 MWt+64 t/h (17 bara/240°C) | |
| | VK-4 | PP | 116 MWt | 2013. |
| | | TLU | 93 MWt | |

K-6, K-8, K-9 – visokotlačni parni kotlovi, TA1 – protutlačna plinska turbina, TA2 – kondenzatorska plinska turbina, K-7- niskotlačni parni kotlovi, VK-3 i VK-4 – vrelovodni kotlovi, PTA-1 i PTA-2 – plinske turbine, KU-1 i KU-2 – kotlovi na ispušne plinove, PP – prirodni plin, TLU – teško loživo ulje

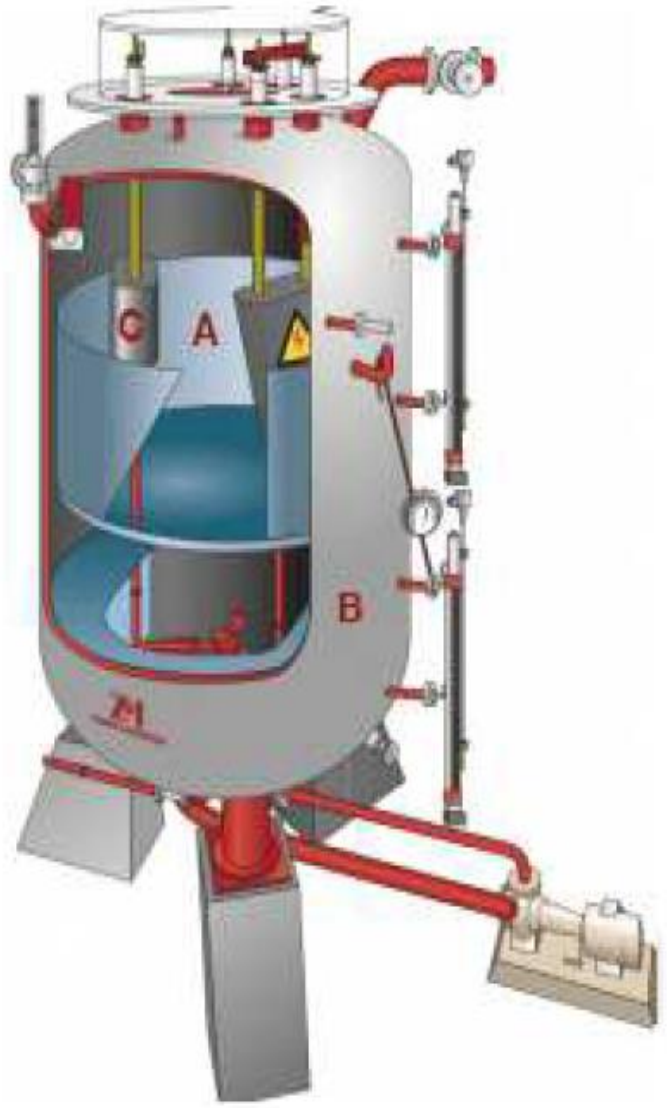
# 3. ELEKTRIČNI KOTLOVI

U ovom radu bit će analizirana mogućnost ugradnje novih električnih kotlova u skladu s pogonskim parametrima EL-TO Zagreb.

Danas se u upotrebi pojavljuju dvije vrste instalacija električnih kotlova : konvencionalni i elektrodni. Konvencionalni koriste princip električnog otpora kod elemenata zagrijača ( kao kod kućanskih zagrijača vode). Oni se primjenjuju kod manjih uređaja, do 1-2 MW snage (mreža 400 kV). Elektrodni kotao radi na principu elektrodnih zagrijača. Voda se u samom kotlu zagrijava tako da se električna struja iz elektroda provodi direktno kroz vodu. Regulacija snage vrši se pomoću aktivne površine elektrode koja se može kontinuirano regulirati pomicanjem upravljačkih ekrana. Sami kotlovi koriste se za veće snage i priključuju se na 10 kV mrežu.

## 3.1 Električni parni kotao

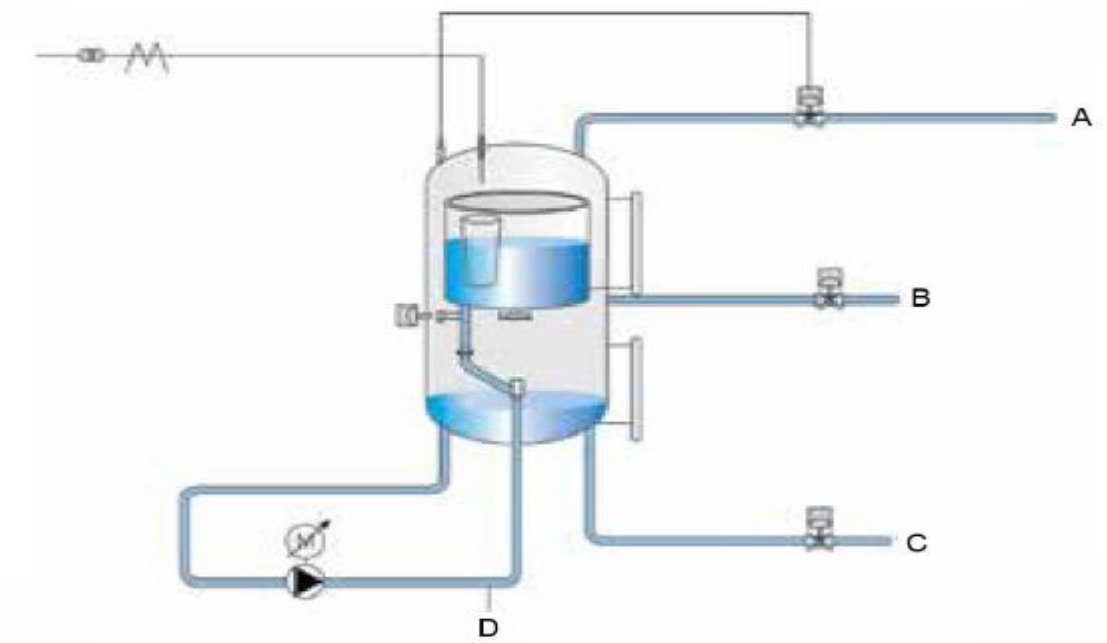
Sam kotao sastoji se od sustava elektroda i namijenjen je za priključak na trofaznu izmjeničnu struju. Pretvorba isporučene energije u toplinu regulira se razinom vode oko elektroda smještenih u unutarnjoj posudi. Povećanjem volumena vode u unutarnjoj posudi povećava se uronjeni volumen elektroda, a samim time i otpor te dolazi do zagrijavanja vode. Osim unutarnje posude kotao ima i vanjski spremnik u kojem se nalazi sav višak vode. Prilikom isparavanja vode iz unutarnje posude voda se nadomješta iz vanjskog spremnika koji se ponovo puni da bi volumen ostao isti. Volumen vode u unutarnjoj posudi i vanjskom spremniku održava se konstantnim kako bi koncentracija pojedenih tvari u vodi ostala ista (kemijski pripremljena voda). Vanjski spremnik je pod tlakom, dok je unutarnja cilindrična posuda pričvršćena nosačima na vanjski spremnik (slika 8.) Granica koja dijeli kotao na dva spremnika vode (unutarnji i vanjski) je unutarnja posuda (dio nultog područja električnog sustava). Regulacijski ventil smješten je na dnu unutarnje posude, a pogonski aktuator na vanjskoj strani kotla. Trofazne elektrode izrađene su od lijevanog materijala i svaka elektroda sastoji se od više šipki ugrađenih u jedinstvenu ploču. Svaka fazna elektroda je ovješena izolatorskim prirubnicama na vrhu kotla [10].



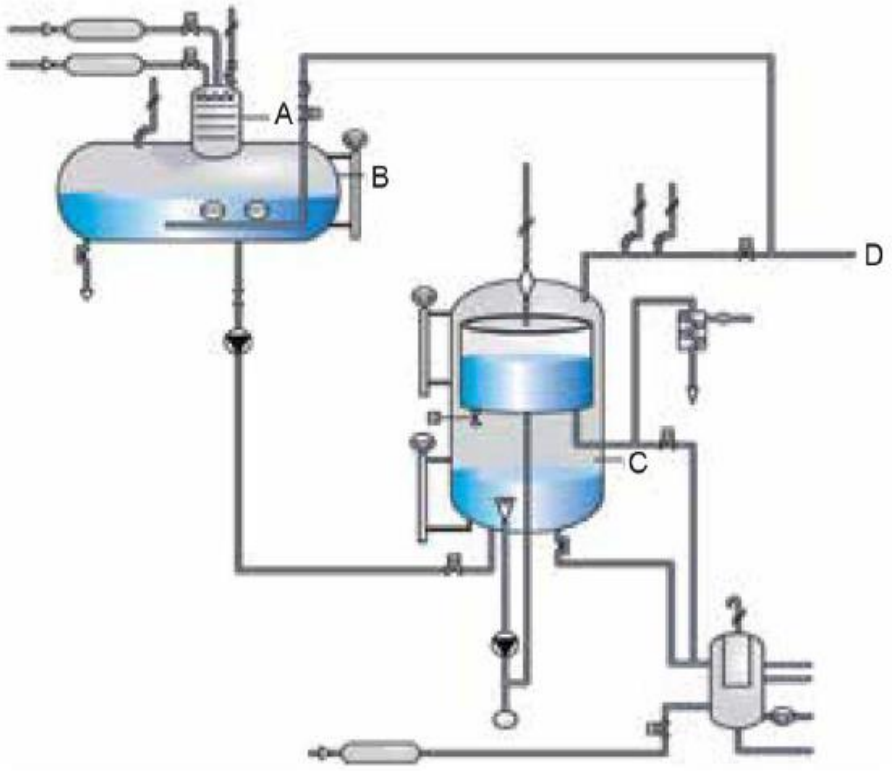

**Slika 8. Dijelovi električnog parnog kotla [10]**

**A- unutarnji spremnik, B- vanjski spremnik, C- elektroda**

Na vanjski spremnik kotla preko usisne cijevi spojena je cirkulacijska pumpa. Cijev pod tlakom dijeli se na tri cijevi unutar kotla, te se one spajaju na unutarnju posudu ispod svake od faznih elektroda. Cirkulacijska pumpa upravljana je promjenom brzine, a protok u krugu ovisi o opterećenju.




**Slika 9. Osnovni dijelovi sklopa : A-parovod, B-cjevovod za blowdown, C-ulaz napojne vode, D- cirkulacijski krug [10]**




**Slika 10. Shematski prikaz parnog postrojenja s električnim kotlom: A- otplinjač, B- spremnik napojne vode, C-kotao, D- parovod [10]**

Iz gore prikazanih slika (8,9,10) vidi se da se oprema električnog parnog kotla sastoji od samog kotla, armature, cirkulacijske pumpe, kontrolne opreme, instrumenata i kontrolnih ploča s PLC kontrolorom. Električni parni kotao koristi tri pumpe : napojna pumpa, cirkulacijska pumpa, pumpa za doziranje.

## 3.2 Vrelovodni kotlovi

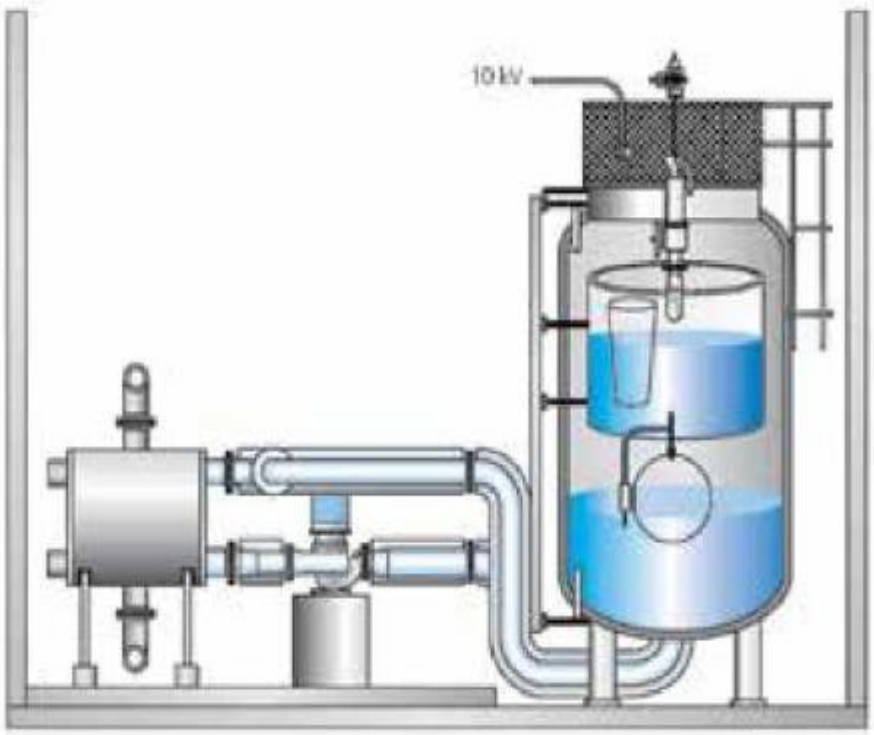
Princip rada ovog kotla isti je kao kod parnog. Vanjski i unutarnji spremnik osnovni su dijelovi ovog kotla, a izlazna snaga izravno je proporcionalna razini vode u unutrašnjoj posudi. Cirkulacijski krug primarne vode izveden je između izmjenjivača i kotla zbog toga što vrelovodni kotao koristi kemijski pripremljenu vodu. Kotao ima i ulogu ekspanzijske posude za primarni krug vode.

U primjeni postoje dvije izvedbe ovog kotla. Jedna izvedba kotla se koristi kada minimalno opterećenje treba biti nisko, uz veliku brzinu regulacije. Raspon opterećenja je tada 0 – 100%, a kotao može biti u pripravnosti (standby-u) s glavnim prekidačem uključenim, bez napajanja iz naponske mreže.



**Slika 11. Električni vrelovodni kotao- regulacija promjenom razine vode [10]**

U trenutku kada su postavljeni zahtjevi za učinkovitost, sigurnošću i raspoloživosti onda se koristi druga izvedba vrelovodnog kotla. U cirkulacijskom krugu kotla cijelo vrijeme cirkulira ista voda, te se vodljivost vode ne mijenja i nema potrebe za pražnjenjem (blowdown-om). Snaga ovog kotla upravlja se pomoću promjene pozicije ekrana koji zakrivaju elektrode. Kod maksimalne zakrivljenosti elektroda, snaga kotla je minimalna.

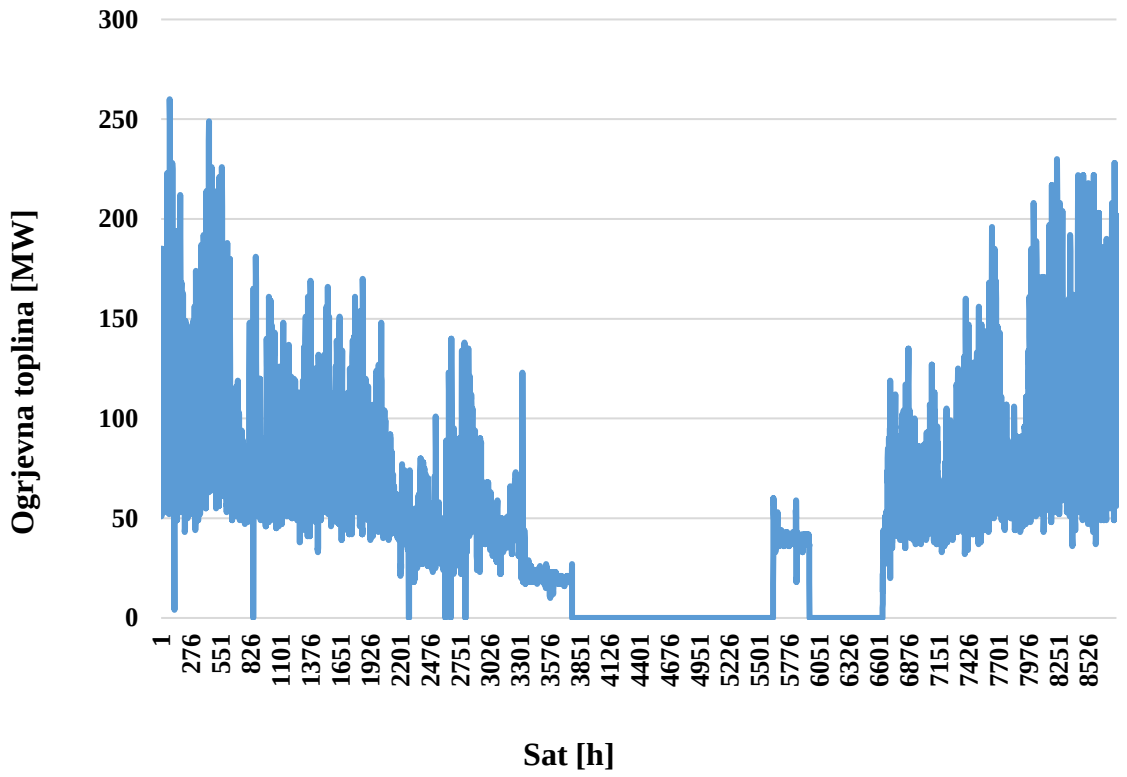



**Slika 12. Električni vrelovodni kotao - regulacija s ekranima [10]**

# 4. ANALIZA TOPLINSKOG KONZUMA

Karakteristike ukupnog toplinskog konzuma (ogrjevna toplina i tehnološka para) temelje se na povijesnim ostvarenjima proizvodne jedinice na lokaciji ELTO Zagreb, za razdoblje od 2014. do 2016. godine, za potrebe ovoga rada u simulacijama korištena je 2016. godina kao referentna.

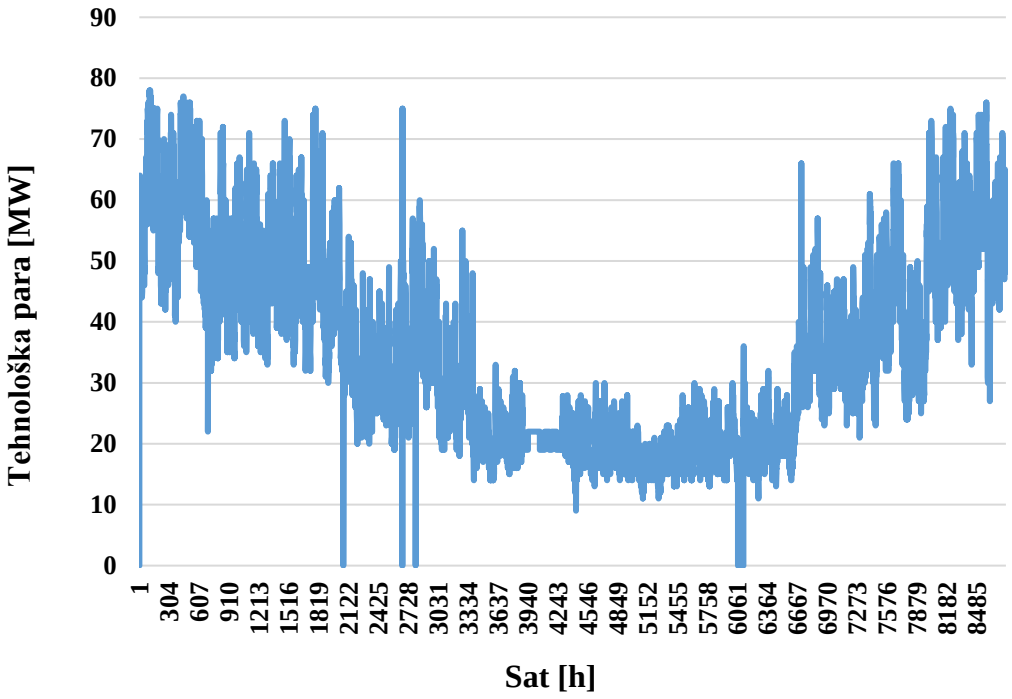
## 4.1 Referentna godina




**Slika 13. Prikaz konzuma ogrjevne topline za referentnu godinu[1]**

**Slika 13**. prikazuje satnu godišnju krivulju konzuma ogrjevne topline za 2016. godinu.

[1] Operater EL-TO Zagreb




**Slika 14. Prikaz konzuma tehnološke pare za referentnu godinu**[2]

**Slika 14**. prikazuje satnu godišnju krivulju konzuma tehnološke pare za 2016. godinu (referentna godina).

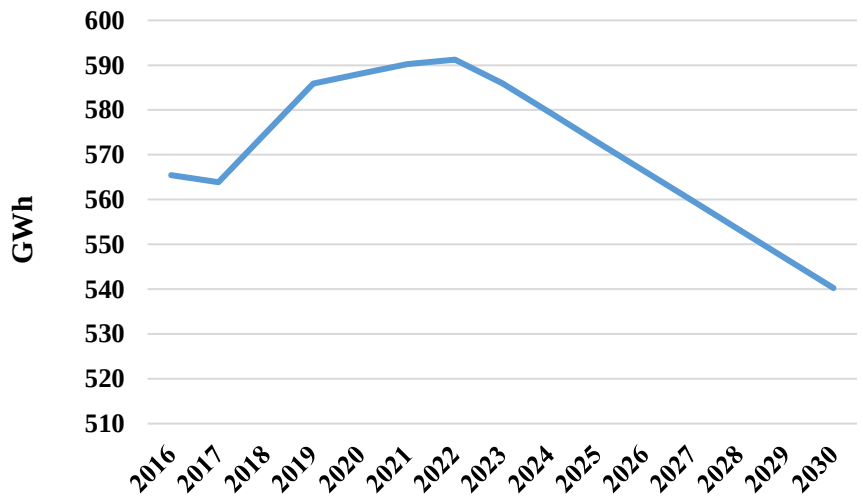
## 4.2 Kretanje toplinskog konzuma - projekcija promjena

Projekcije toplinskog konzuma, koje uključuje ogrjevnu toplinu i industrijsku paru, važni su ulazni parametri za simulaciju scenarija u ovome radu. Projekcijski podaci dobiveni su od strane Energetskog instituta Hrvoje Požar (EIHP), a određeni su na temelju : demografskih i ekonomskih kretanja grada Zagreba, uzimanjem mjera energetske učinkovitosti, ugrađivanja razdjelnika i širenja centralnog toplinskog sustava grada Zagreba.

[2] Operater EL-TO Zagreb

**Tablica 2. Projekcija promjene toplinskog konzuma na lokaciji EL-TO Zagreb za razdoblje do 2030. godine (samo ogrjevna toplina)[3]**

| GODINA | PROJEKCIJA |
|---|---|
| 2016 | 100,00% |
| 2017 | 99,70% |
| 2018 | 101,70% |
| 2019 | 103,60% |
| 2020 | 104,00% |
| 2021 | 104,40% |
| 2022 | 104,60% |
| 2023 | 103,60% |
| 2024 | 102,50% |
| 2025 | 101,30% |
| 2026 | 100,20% |
| 2027 | 99,00% |
| 2028 | 97,90% |
| 2029 | 96,70% |
| 2030 | 95,50% |




**Slika 15. Kretanje ogrjevnog konzuma 2016. - 2030. godine[3]**

Tablica 2. i Slika 15. prikazuju kretanje ogrjevnog konzuma od 2016. do 2030. godine.

[3] EIHP

# 5. SIMULACIJSKI MODEL

Za izradu optimizacijskog modela u ovom radu korišten je programski alat za simulaciju tržišta energije „PLEXOS Integrated Energy Model“. Program je korišten u svrhu usporedne analize pogona elektrane toplane s i  bez električnih kotlova.

Za usporedbu operativnih pokazatelja u simulacijskom modelu su definirana tri scenarija pogona EL-TO Zagreb :

- Scenarij bez novih električnih kotlova 2020., 2025. i 2030. godine.
- Scenariji ulaska u pogon jednog parnog i jednog vrelovodnog električnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine (2X30 MW);
- Scenariji ulaska u pogon dva parna i jednog vrelovodnog električnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine (3X30 MW);

Simulacijski model zahtjeva veliku količinu ulaznih podataka koji obuhvaćaju tehničke i ekonomske parametre novih električnih kotlova te svih postojećih i planiranih jedinica na lokaciji, zatim podatke o očekivanom kretanju toplinskog konzuma te tržišne podatke ( cijene električne energije, prirodnog plina i emisijskih jedinica). Za sve postojeće jedinice (uključujući novo kogeneracijsko postrojenje – blok L) unutar pogona EL-TO definirani su sljedeći parametri:

- tehnički minimum proizvodne jedinice (MW),
- maksimalna snaga proizvodne jedinice (MW),
- maksimalne brzine podizanja i spuštanja snage (MW/min),
- specifični utrošak topline goriva (GJ/MWh) na minimalnoj i maksimalnoj snazi,
- specifični utrošak topline goriva (GJ/MWh) u kogeneracijskom režimu,
- učinkovitost kotla utilizatora (%),
- planirane obustave generatora,
- minimalno vrijeme pogona u jednom ciklusu (h),
- troškovi puštanja u pogon.

Za planirane električne kotlove definirani su sljedeći parametri:

- minimalna snaga (MW),
- učinkovitost kotla (%),
- minimalno vrijeme pogona u jednom ciklusu (h),

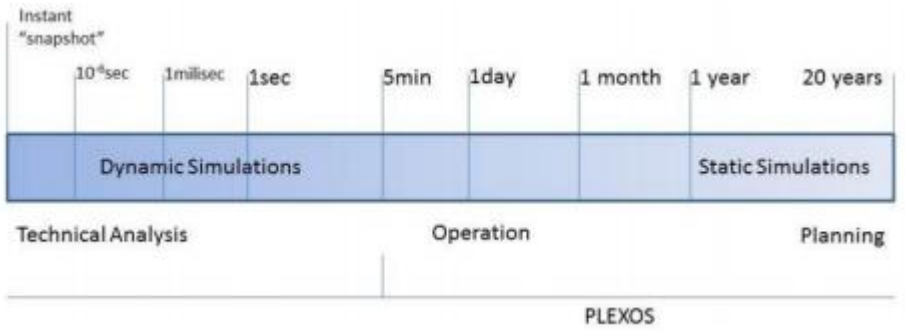
- planirane obustave kotla.

## 5.1. Programski alat PLEXOS

Program je razvijen od strane kompanije Energy Exemplar. Služi za simulaciju tržišta električne energije te općenito elektroenergetskog sustava, s mogućnošću relativno grubog modeliranja proizvodnje toplinske energije tj. toplinarskog sustava.

Sam program je kao simulacijsko-optimizacijski alat temeljen na objektnom modeliranju energetskog tržišta. Objektno modeliranje sastoji se od definiranih skupova klasa i njihovih hijerarhija. Objekti mogu biti : generatori, mreže ili tržište. Objekti su definirani klasama, a klasama se smatraju skupovima pravila i definicija koji se odnose na pojedini tip objekta. Kvalitetna izvedba objektnih modela pruža široku mogućnost za ispitivanje utjecaja različitih energetskih strategija.

PLEXOS ima mogućnost simuliranja tržišta u kraćim i dužim vremenskim periodima kao što prikazuje ***Slika 16***.




**Slika 16. Prikaz vremenskog perioda simulacija PLEXOS-a [11]**

Za simulaciju energetskog tržišta potrebna je velika količina ulaznih podataka zbog čega je neophodan dio simulatora baza podataka. XML je format baze podataka koji se koristi u PLEXOS-u, a dodatak ulaznoj bazi je datoteka u tekstualnom formatu (CSV).

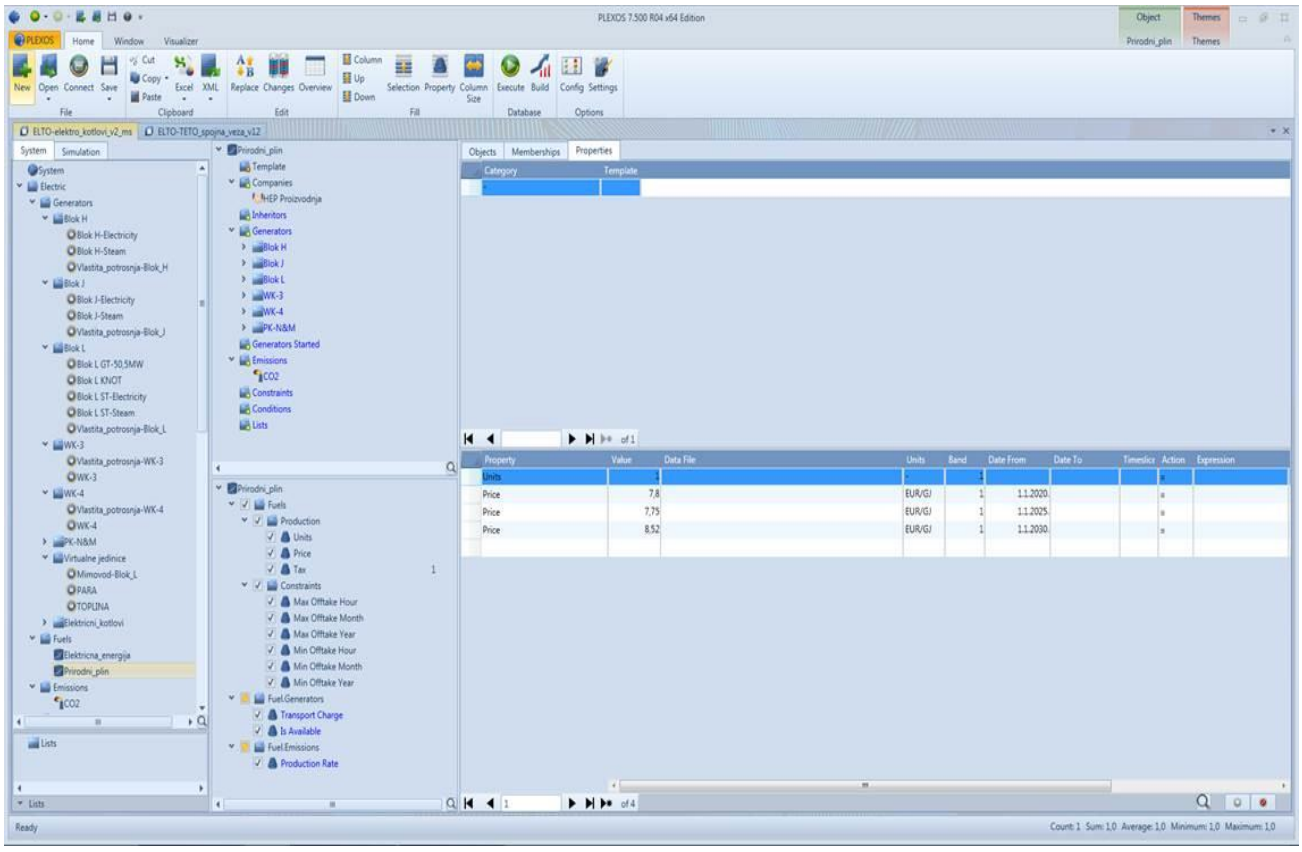
Nakon unošenja potrebnih parametara sustava, definiranju scenarija i određivanju planskog razdoblja PLEXOS pristupa rješavanju matematičkih jednadžbi pomoću solvera za optimizaciju. Za rješavanja koriste se četiri matematička programiranja : LP – linearno programiranje, QP – kvadratično programiranje, MIP –cjelobrojno mješovito programiranje, DP – dinamičko programiranje.

PLEXOS omogućuje korištenje nekoliko komercijalno dostupnih solvera za optimizaciju: MOSEK, Gurobi, Xpress-MP i CPLEX. Po završetku rješavanja matematičkog problema, PLEXOS iz dobivenih rješenja priprema podatke za pregled u grafičkom korisničkom sučelju za pregledavanje i analizu dobivenih rezultata

### 5.1.1. Model EL-TO Zagreb u PLEXOS-u

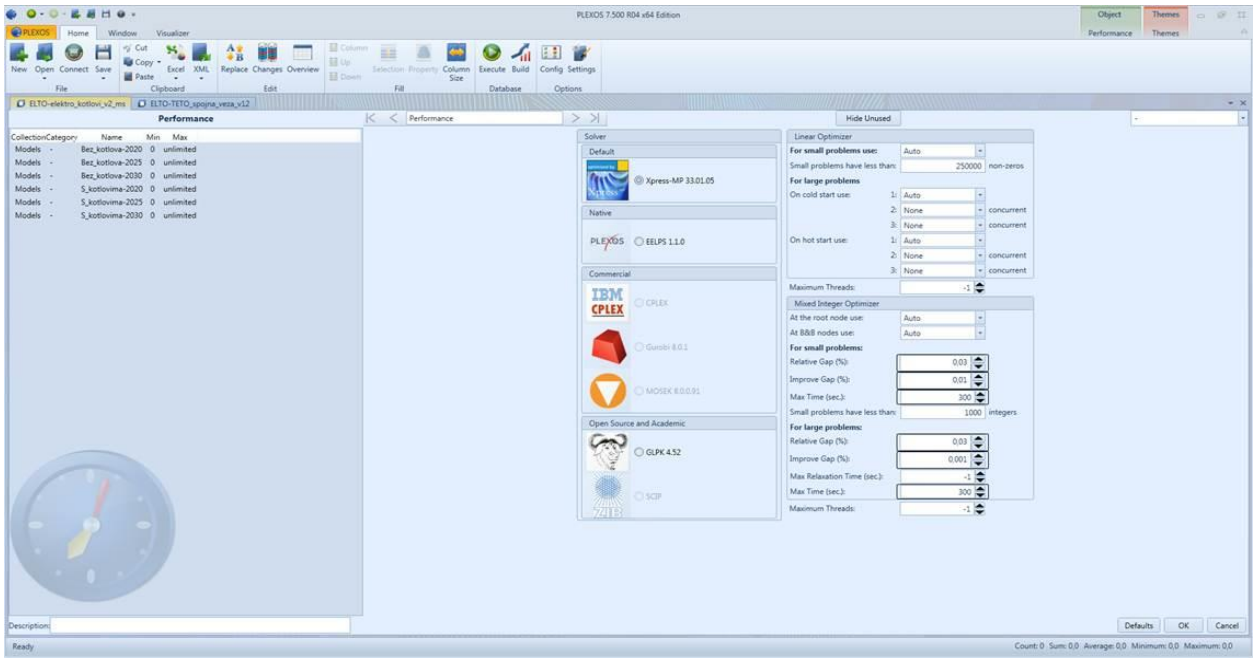
Program PLEXOS u ovom radu je korišten za usporedne analize pogona elektrane toplane Zagreb s i bez električnih kotlova u svrhu minimizacije troškova odnosno maksimizacije profita.

Optimizacija u programu je napravljena na način da kada je cijena električne energije najviša onda se pale kogeneracijski blokovi, ukoliko je proizvodnja toplinske energije veća od potreba onda se ona pohranjuje u spremnik (akumulator) topline. Kada je cijena električne energije niska onda se toplinske potrebe pokrivaju iz tri izvora : 1. Vršni plinski kotao, 2. Električni kotao, 3. Spremnik(akumulator) topline. Kriterij paljenja pojedinih jedinica uvjetovan je minimizacijom troškova odnosno maksimalizacijom profita EL-TO pogona.



**Slika 17. Model EL-TO Zagreb u PLEXOS-u**

***Slika 17***. prikazuje postavljen model EL-TO Zagreb u PLEXOS-u sa svim objektnim modelima i njihovim klasama.

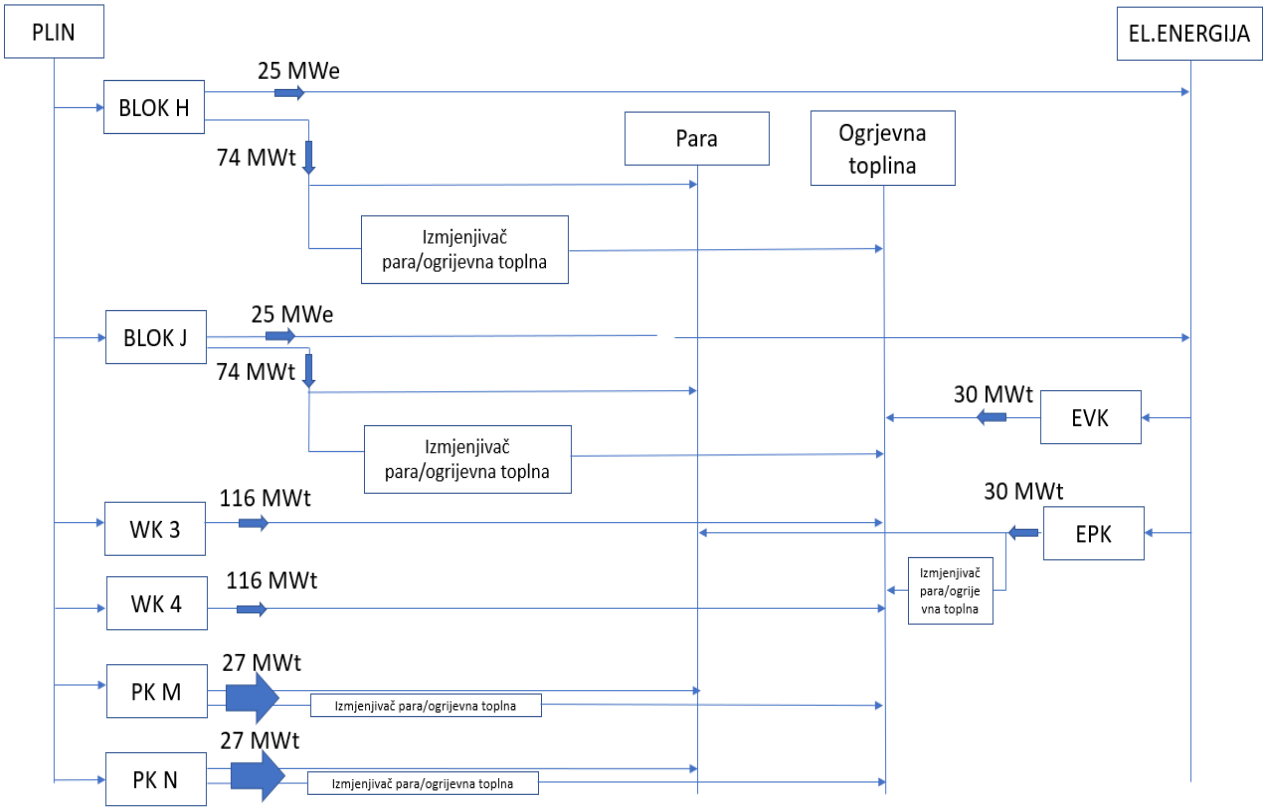



**Slika 18. Prikaz sučelja matematičkog solvera Xpress-MP**

***Slika 18***. prikazuje sučelje solvera Xpress-MP koji je korišten u simulacijama za EL-TO Zagreb. Za potrebe ovoga rada korišteno je linearno programiranje.

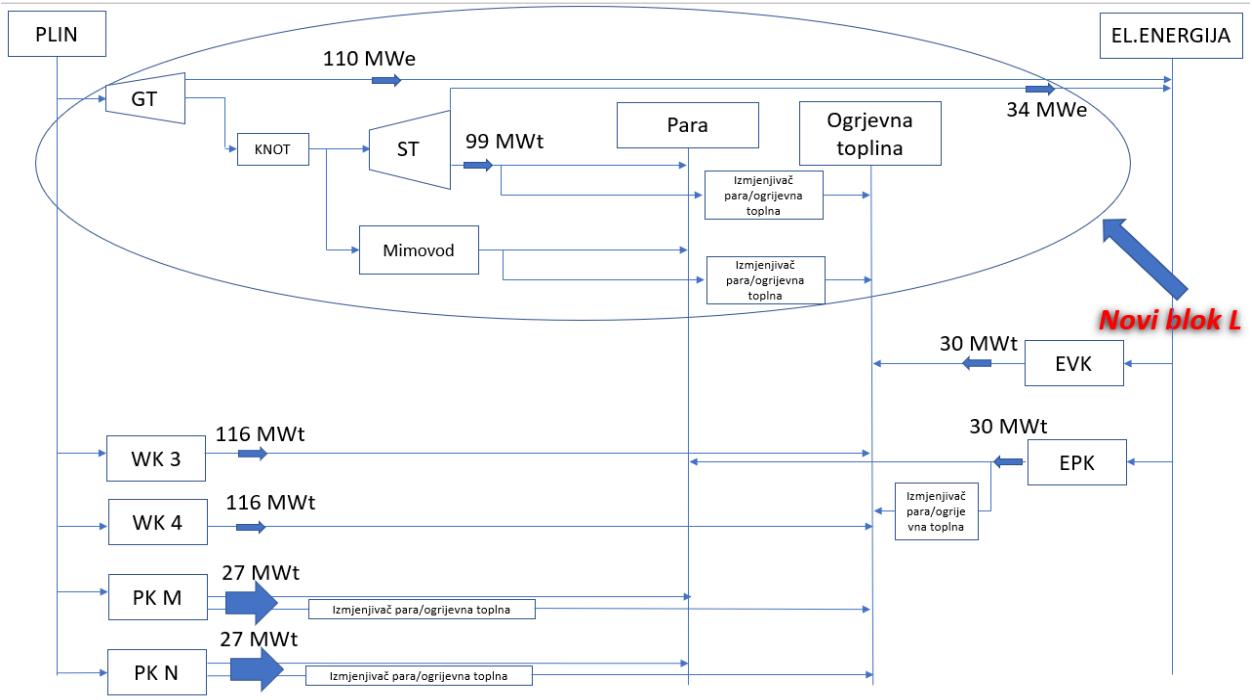
## 5.2. Blok shema postrojenja i ulazni podaci proizvodnih jedinica.

Zbog predviđenog isteka životnog vijeka blokovi A i B nisu uzimani u obzir, te je također pretpostavljeno kako je izgrađeno novo kombi-kogeneracijsko postrojenje (Blok L) i dva parna kotla (PK M i PK N).




**Slika 19. Blok shema postrojenja EL-TO Zagreb u 2020. godini**

***Slika 19***. prikazuje blok shemu postrojenja EL-TO Zagreb u 2020. godini. Iz slike je vidljivo kako su povezane pojedine jedinice postrojenja i tokovi snaga samih jedinica.




**Slika 20. Blok shema postrojenja EL-TO Zagreb u 2025. i 2030. godini.**

**Slika 22**. prikazuje blok shemu postrojenja EL-TO Zagreb u 2025. i 2030. godini. Iz slike je vidljivo kako su povezane pojedine jedinice postrojenja i tokovi snaga samih jedinica te novi blok L.

## Tablica 3. Blok H i J

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25,2 | **50,15** | **5,95** | **DA** | **25,35** | **50,66** | **12** | **330** | **1.1.2023.** |

## Tablica 4. Blok L- plinska turbina (2X54.9 MWe)

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **110** | - | 44 | NE | 38,2 | - | 12 | 1000 | - |

## Tablica 5. Blok L-parna turbina

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **34** | 99 | 48,04 | DA | 22 | 60,46 | 12 | 1000 | |

## Tablica 6. WK-3

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | 116 | 30 | Ne | - | 90 | 4 | 130 | 1.1.2025. |

## Tablica 7. WK-4

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | 116 | 30 | NE | - | 90 | 4 | 130 | - |

## Tablica 8. PK-M

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | 27 | 4,7 | Da | - | 95 | 3 | 130 | - |

## Tablica 9.PK-N

| Instalirana električna snaga ($MW_e$) | Instaliran toplinski učin ($MW_t$) | Tehnički minimum (%) | Mogućnost proizvodnje teh. Pare (-) | Električni stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Toplinski stupanj djelovanja pri nazivnoj snazi (%) | Minimalno vrijeme u pogonu (h) | Trošak pokretanja (EUR) | Planirani izlazak iz pogona |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | 27 | 4,7 | DA | - | 95 | 3 | 130 | - |

Tablice (3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9) prikazuju tehničke karakteristike proizvodnih jedinica.

## Tablica 10. Osnovne karakteristike električnog vrelovodnog kotla

| ELEKTRIČNA SNAGA | **30 MW, 10 KV** |
|---|---|
| CIRKULACIJA U KRUGU KOTLOVSKE VODE | 850 m3/h, dobavna visina 18 m |
| KVALITETA VODE | < 5 µS/cm, kisik < 20 ppb |
| NAZIVNI TLAK | 10 bar |
| RADNI TLAK | 6 bar |
| NAPON I FREKVENCIJA | 10 kV, 50 Hz |
| NAZIVNA STRUJA | 1660 A |
| OTPOR PREMA UZEMLJENJU | 0 Ω |
| REGULACIJA BRZINE 0-100% KAPACITETA | Oko 240 s |
| USPON GRADIJENTA OD HLADNOG DO MAX KAPACITETA | Oko 60 minuta, max gradijent 3 K po minuti |
| TEŽINA KOTLA | 22 t (prazan) |
| VOLUMEN VODE | 21 m3 |
| VODLJIVOST VODE U KOTLU | 85 µS/cm |
| UČINKOVITOST PRI STALNOM RADU | 99,50% |
| PROMJER KOTLA | 2800 mm |
| VISINA KOTLA | 6700 mm |
| ULAZNI PRIKLJUČAK | DN 200 |
| TOPLINSKA IZOLACIJA | Mineralna vuna debljine 150 mm |
| CIJENA | 485.000,00 EUR |

**Tablica 11.Osnovne karakteristike električnog parnog kotla**

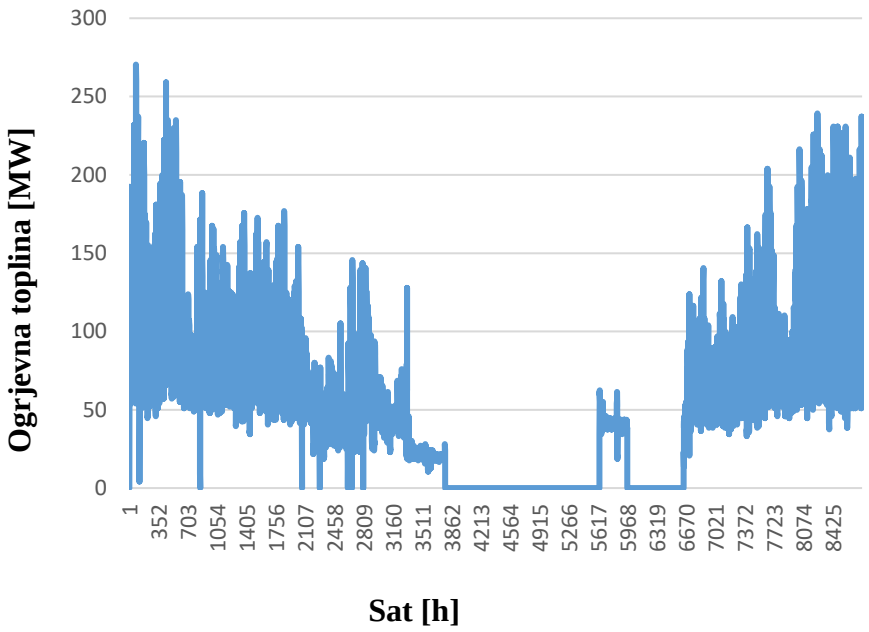
| ELEKTRIČNA SNAGA | **28 MW, 10 KV** |
|---|---|
| PROTOK PARE | 45 t/h |
| TEMPERATURA NAPOJNE VODE | 150 °C |
| KARAKTERISTIKE NAPOJNE VODE | < 5 µS/cm, kisik < 20 ppb |
| NAZIVNI TLAK | 22 bar |
| RADNI TLAK | 18 bar |
| NAPON I FREKVENCIJA | 10 kV, 50 Hz |
| NAZIVNA STRUJA | 1660 A |
| OTPOR PREMA UZEMLJENJU | 2000 Ω |
| VODLJIVOST VODE U KOTLU | 85 µS/cm |
| BRZINA REGULACIJE 0-100% KAPACITETA | Oko 180 s |
| GRADIJENT TEMPERATURE OD HLADNOG STARTA DO MAX. SNAGE | Oko 60 minuta, max gradijent 3 K po minuti |
| TEŽINA KOTLA | 22 t (prazan) |
| UDIO VODE U PARI | < 0,2% |
| UČINKOVITOST PRI KONTINUIRANOM POGONU | 99,50% |
| PROMJER KOTLA | 3200 mm |
| VISINA KOTLA | 5630 mm |
| ULAZNI PRIKLJUČAK | DN 200 |
| TOPLINSKA IZOLACIJA | Mineralna vuna debljine 200 mm |
| CIJENA | 680.000,00 € |

Tablica 11. i Tablica 12. prikazuje osnovne karakteristike električnog vrelovodnog i parnog kotla.

## 5.3 Kretanje toplinskog konzuma

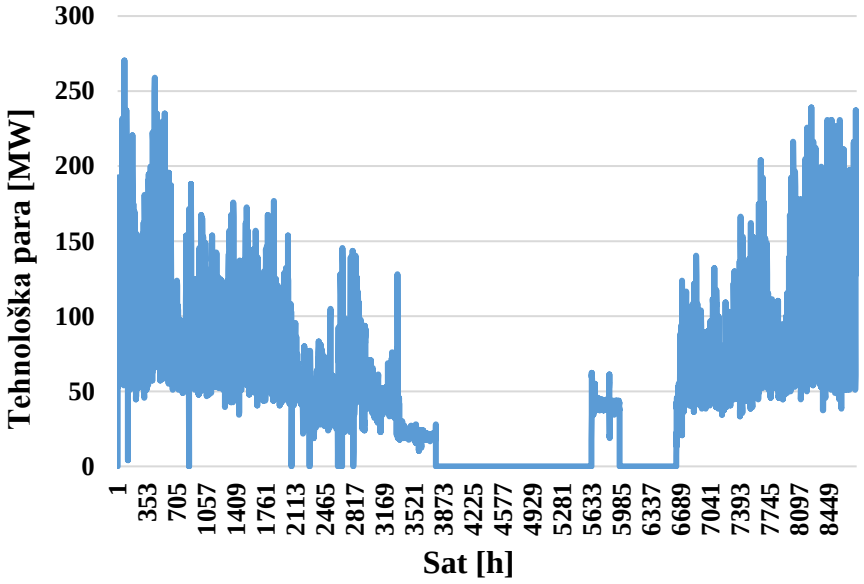
Toplinski konzum je jednak u svim scenarijima i zadan je na satnoj razini, i to posebno :

- konzum ogrjevne topline (MWh)
- konzum tehnološke pare (MWh)




**Slika 21. Konzum ogrjevne topline za 2020. godinu**

***Slika 21***. prikazuje godišnje kretanje toplinskog konzuma za 2020. godinu.



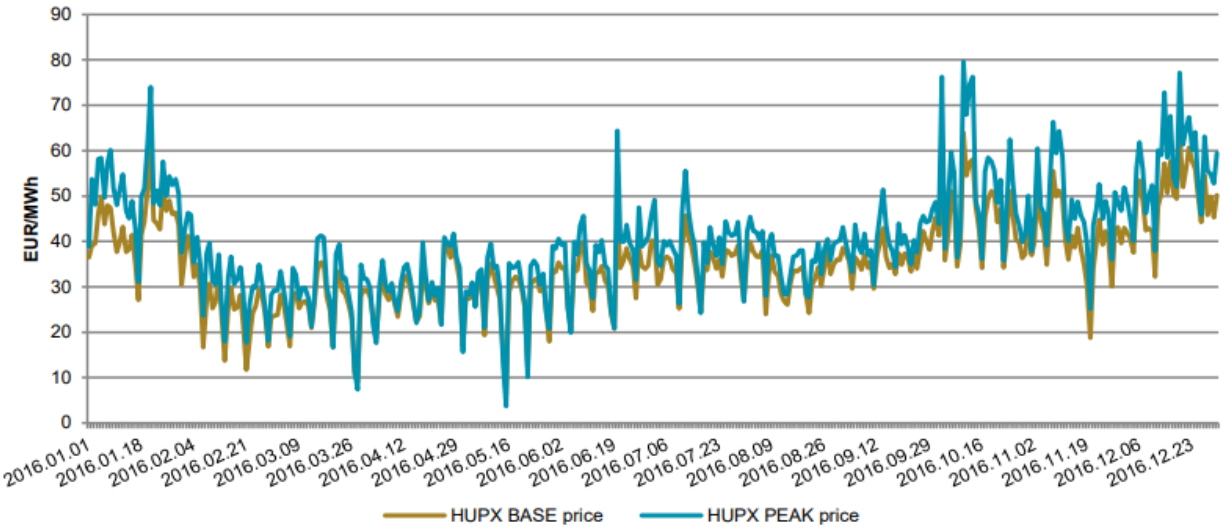

**Slika 22.Konzum tehnološke pare za 2020. godinu**

## 5.4 Kretanje cijene električne energije

Cijena električne energije u simulacijskom modelu zadana je na satnoj razini i jednaka je za sve analizirane scenarije. Satna razina u simulacijskom modelu uzeta je iz razloga što je cijena električne energije vrlo dinamična i čije vrijednost mogu značajno varirati unutar jednog dana. Prilikom analize cijena električne energije postoje određene razlike između iznosa cijena u radnim danima i danima vikenda te između mjeseci tijekom godine.

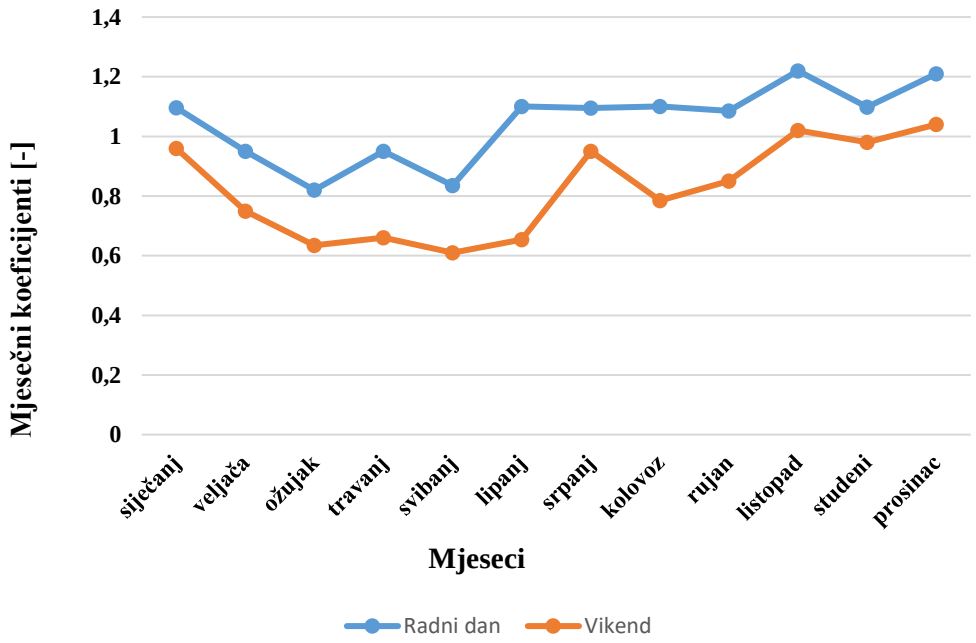
U samom modelu vrijednosti cijena električne energije nisu temeljene na ostvarenim cijenama u razdoblju od samo jedne godine i sa samo jedne burze električne energije. Cijena električne energije na satnoj razini modelirana je na temelju povijesnih podataka s burzi električne energije – HUPX[4] i BSP[5] u periodu od 2014. – 2016. godine.

[4] HUPX – Hungarian Power Exchange
[5] BSP – BSP Regional Energy Exchange



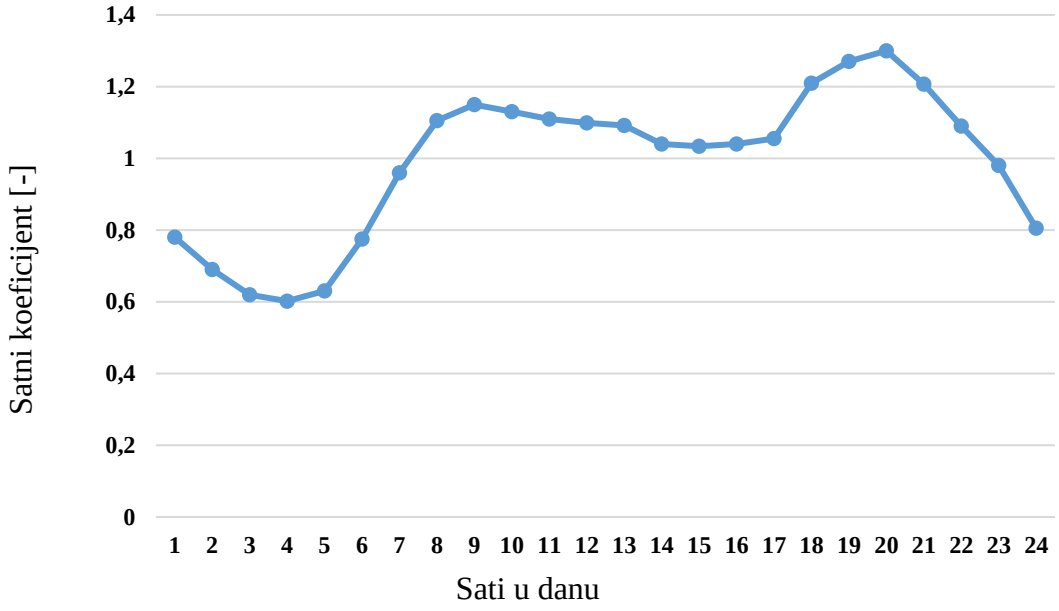

**Slika 23. Cijene električne energije za 2016. godinu – HUPX**

Dijeljenjem prosječnih satnih i prosječnih mjesečnih cijena s prosječnom godišnjom cijenom električne energije dobiveni su satni, odnosno mjesečni koeficijenti za modeliranje cijena. Satni i mjesečni koeficijenti modeliraju tipično kretanje unutar tjedna, odnosno ne odnose se na određeni tjedan, već odražavaju kretanje cijena iz analize navedenih triju godina.




**Slika 24. Mjesečni koeficijenti cijene električne energije u razdoblju 2014.-2016. godina**

***Slika 24***. prikazuje kretanje mjesečnih koeficijenata cijene električne energije kroz radne dane i dane vikenda.




**Slika 25. Satni koeficijenti cijene električne energije u razdoblju 2014.-2016. godina**

Slika 23. prikazuje kretanje satnih koeficijenata dobivenih dijeljenjem satnih prosječnih cijena s godišnjom prosječnom cijenom.

Za kreiranje vremenskog niza cijena električne energije u simulacijskom modelu, mjesečni i satni koeficijenti množeni su s prosječnom cijenom električne energije.

**Tablica 12.Kretanje cijene električne energije prema godinama**

| GODINA | CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE (EUR/MWh) |
|---|---|
| **2020.** | 50 |
| **2025.** | 55 |
| **2030.** | 60 |

## 5.5. Kretanje cijene prirodnoga plina i emisijskih jedinica $CO_2$

Za potrebe ovoga rada cijena prirodnog plina smatrana je konstantnom na razini jedne godine. Nisu uzete u obzir varijacije na satnoj ili mjesečnoj razini. Cijene kao ulazni podatak temelje se na predviđanju EIHP.

**Tablica 13. Kretanje cijene plina prema godinama**

| GODINA | CIJENA PLINA (EUR/MWh) |
|---|---|
| **2020.** | 22 |
| **2025.** | 25 |
| **2030.** | 30 |

Emisijske jedinice $CO_2$ također predstavljaju određeni varijabilni trošak proizvodnje električne i toplinske energije. Naime prilikom sagorijevanja prirodnog plina oslobađa se određena količina ugljikovog dioksida. U simulacijskom modelu usvojena je vrijednost emisija $CO_2$ u iznosu od 56,1 kg po GJ utrošenog prirodnog plina.

**Tablica 14. Kretanje cijene $CO_2$ prema godinama**

| GODINA | CIJENA $CO_2$ (EUR/t) |
|---|---|
| **2020.** | 20 |
| **2025.** | 26 |
| **2030.** | 35 |

## 5.6 Prihodi

U svim scenarijima prihod se generira prodajom električne i toplinske energije.

Izračun prihoda od prodaje električne energije provodi se umnoškom cijene električne energije i njezinom količinom (MWh).

$$P_{el}=c_{el}\cdot E_{el,i}$$

Pri čemu je :

$c_{el}$ – cijena električne energije (EUR/MWh).

Eel,i – količina proizvedene električne energije (MWh).

Izračun prihoda od prodaje toplinske energije provodi se umnoškom cijene toplinske energije i njenom proizvedenom količinom(MWh).

$$P_{topl}=c_{topl} \cdot E_{topl,i}$$

Pri čemu je :

$C_{topl}$ – cijena toplinske energije (EUR/MWh).

$E_{topl}$,i – količina proizvedene toplinske energije (MWh).

$$P_{uk}=P_{topl}+P_{el}$$

Pri čemu je :

$P_{uk}$- ukupni prihod od prodaje (EUR).

$P_{topl}$- prihod od prodaje toplinske energije (EUR).

$P_{el}$- prihod od prodaje električne energije (EUR).

## 5.7 Rashodi

U prvom scenariju promatran je trošak prirodnog plina i emisijskih jedinica dok u drugom i trećem scenariju isti troškovi uz trošak električne energije.

$$T_{pp}=c_{pp} \cdot E_{ppl,i}$$

Pri čemu je :

$c_{pp}$ – cijena prirodnog plina (EUR/MWh).

Epp,i – potrošnja prirodnog plina (MWh).

$$T_{el}=c_{el} \cdot E_{ell,i}$$

Pri čemu je :

$C_{el}$ – cijena električne energije (EUR/MWh).

$E_{el,i}$ – potrošnja električne energije (MWh).

$$T_{em}=c_{em} \cdot m_{ell,i}$$

Pri čemu je :

$C_{em}$ – cijena emisijskih jedinica $CO_2$ (EUR/t).

$m_{em}$,i – količina emisije $CO_2$ (t).

$$R_{uk}=T_{pp}+T_{el}+T_{em}$$

Pri čemu je :

$R_{uk}$ - ukupni rashod (EUR).

$T_{pp}$- trošak za prirodni plin (EUR).

$T_{el}$- trošak za električnu energije (EUR).

$T_{em}$- trošak za emisijske jedinice (EUR).

## 5.8 Profit

Izračun profita provodi se oduzimanjem prihoda od rashoda

$$PR=P_{uk}-R_{uk}$$

Pri čemu je :

PR – ukupni profit (EUR).

$P_{uk}$ – ukupni prihod(EUR).

$R_{uk}$ – ukupni rashod (EUR).

## 5.9 Jednostavni period povrata

Izračun jednostavnog perioda povrata provodi se prema izrazu:

$$JPP = \frac{C}{PRi - PRu}$$

Pri čemu je :

PRi- profit drugog ili trećeg scenarija (EUR)

PRu- profit prvog scenarija (EUR)

C- ukupna cijena električnih bojlera (EUR)

# 6. REZULTATI SIMULACIJSKOG MODELA

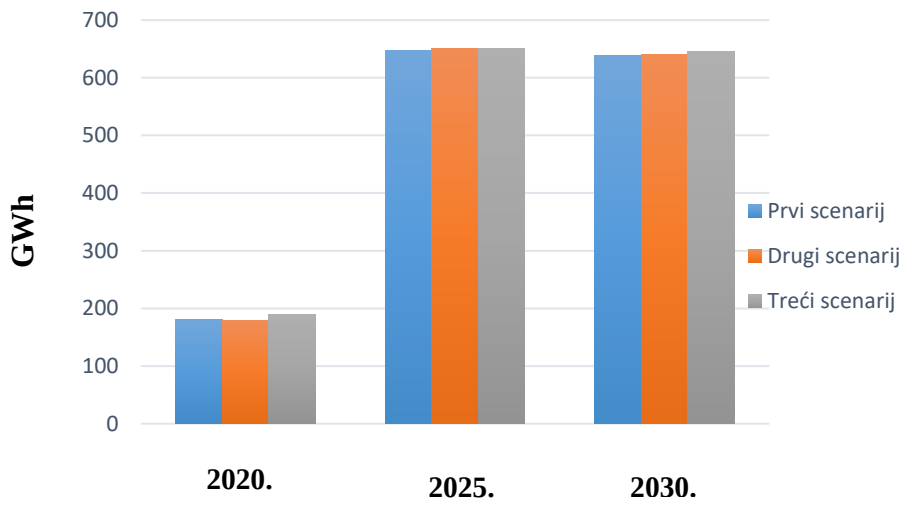
Rezultati optimizacije prikazani su kao satne vrijednosti svih promatranih varijabli :proizvodnja električne i toplinske energije, potrošnja i trošak goriva (prirodni plin i električna energija) te prihod od prodaje električne i toplinske energije za svaku pojedinu jedinicu u pogonu EL-TO Zagreb.

## 6.1. Proizvodnja električne energije

Tablicom 15. i slikom 26. prikazana je ukupna godišnja proizvodnja električne energije za tri scenarija u 2020., 2025. i 2030. godini. U svim scenarijima je zajednički značajan porast proizvodnje električne energije u 2025. godini zbog ulaska u pogon novog kogeneracijskog bloka L.

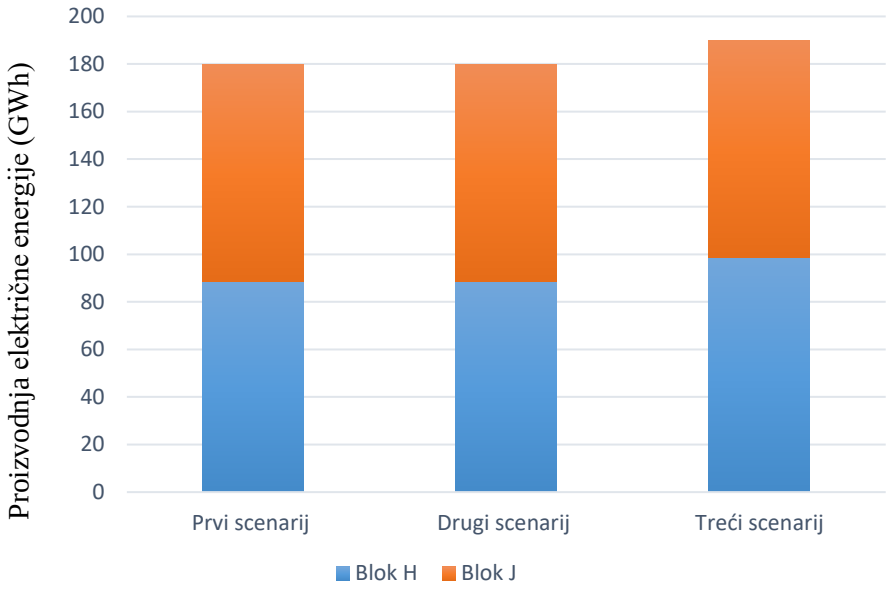
**Tablica 15. Proizvodnja električne energije u tri scenarija (*GWh*)**

| SCENARIJ | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **1.** | 179,85 | 646,51 | 639,25 |
| **2.** | 179,66 | 650,13 | 640,05 |
| **3.** | 189,92 | 651,47 | 644,99 |



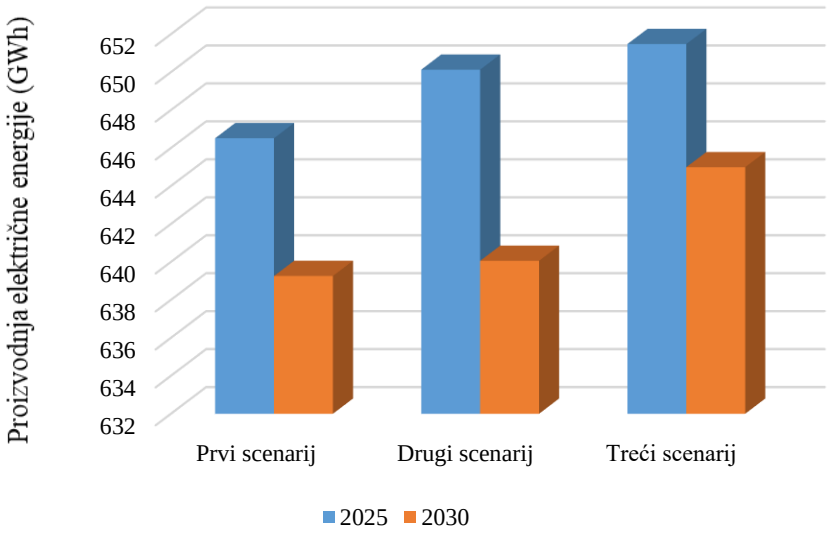

**Slika 26.Proizvodnja električne energije u tri scenarija pogona EL-TO Zagreb**

***Slika 26***. prikazuje proizvodnju električne energije raspoređenu prema godinama u tri scenarija. Vidljivo je da u 2025. godini dolazi do naglog porasta proizvodnje električne energije zbog ulaska novog kogeneracijskog bloka. Razlika u proizvodnji električne energije u svim scenarijima je minimalna.



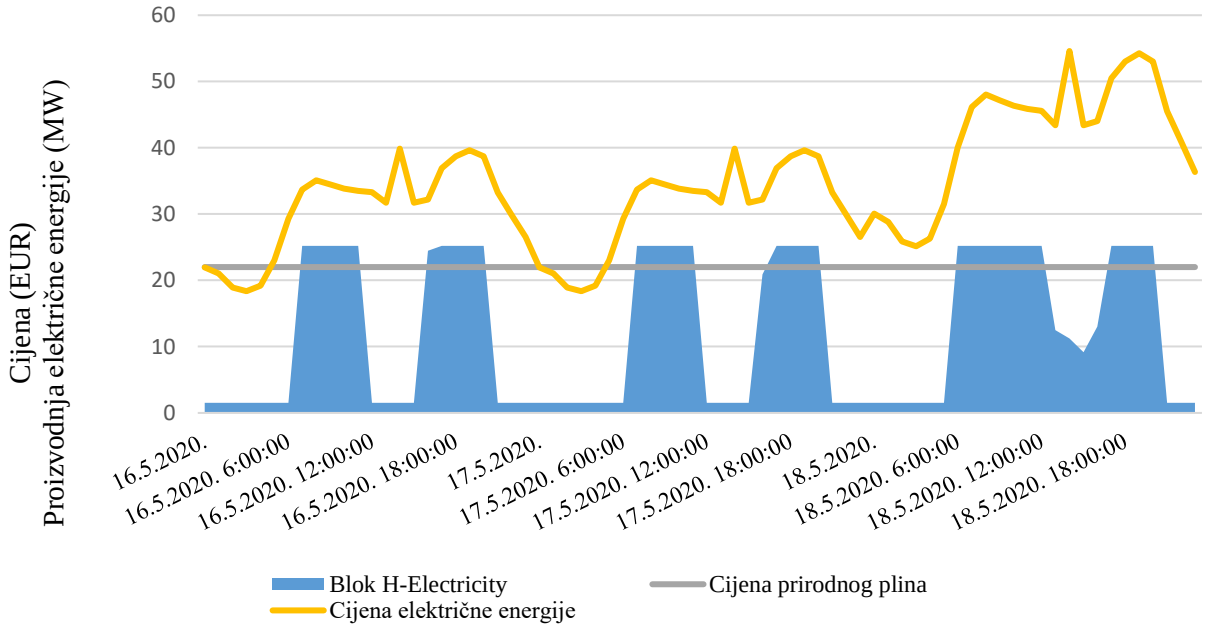

**Slika 27.Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2020.godine za sva tri scenarija**

***Slika 27***. prikazuje odnose udjela proizvodnje električne energije prema blokovima u 2020. godini za tri scenarija.




**Slika 28. Proizvodnja električne energije po blokovima u 2025. i 2030. godini za sva tri scenarija**

***Slika 28***. prikazuje proizvodnju električne energije po blokovima u 2025. i 2030. godini za sva tri scenarija, ali kako je vidljivo u 2025. i 2030. godini samo L blok proizvodi električnu energiju.

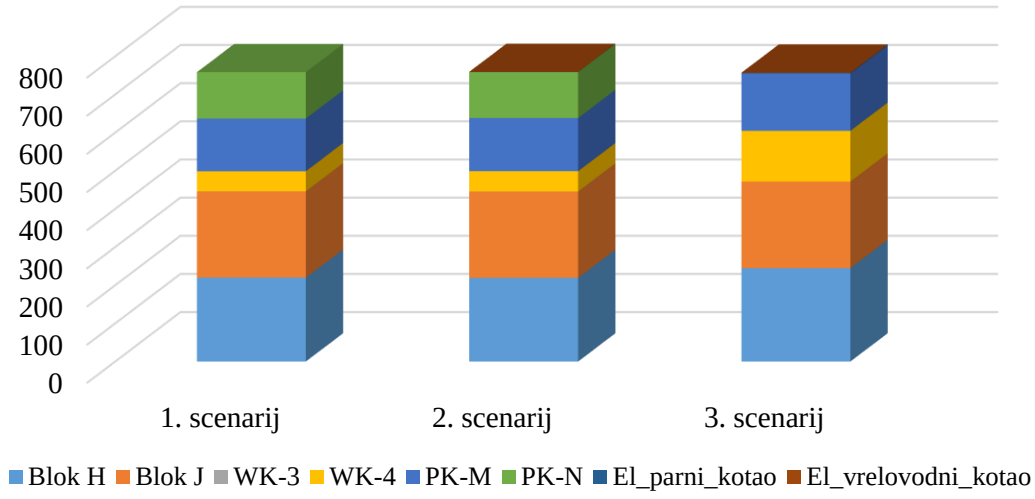



**Slika 29. Stani prikaz proizvodnje električne energije u 2020.godini.**

***Slika 29***. prikazuje satnu proizvodnju električne energije u 2020. godini kada rade oba električna bojlera. Iz slike je vidljivo da blok H radi na minimalnoj snazi (1.5 MW) pri nižim cijenama električne energije, a u trenutku porasta cijene raste i snaga proizvodnje električne energije.

## 6.2 Proizvodnja toplinske energije

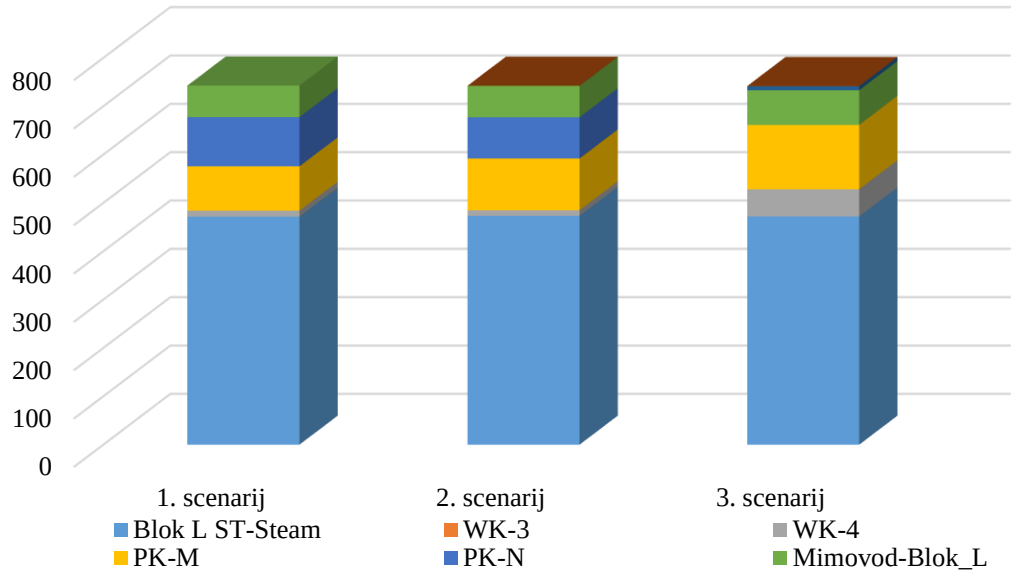
U svim scenarijima ukupna godišnja proizvodnja toplinske energije je jednaka.




**Slika 30. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2020.godine za sva tri scenarija**

**Slika 30**. prikazuje da je u svim scenarijima najveći proizvođač toplinske energije kogeneracijski blok J. U odnosu na prvi scenarij , u drugom i trećem scenariju u pokrivanju toplinskog opterećenja sudjeluju i električni kotlovi. Blok B u prvom i drugom scenariju proizvodi godišnje 29,8% ukupne toplinske energije, dok u trećem nešto malo više.

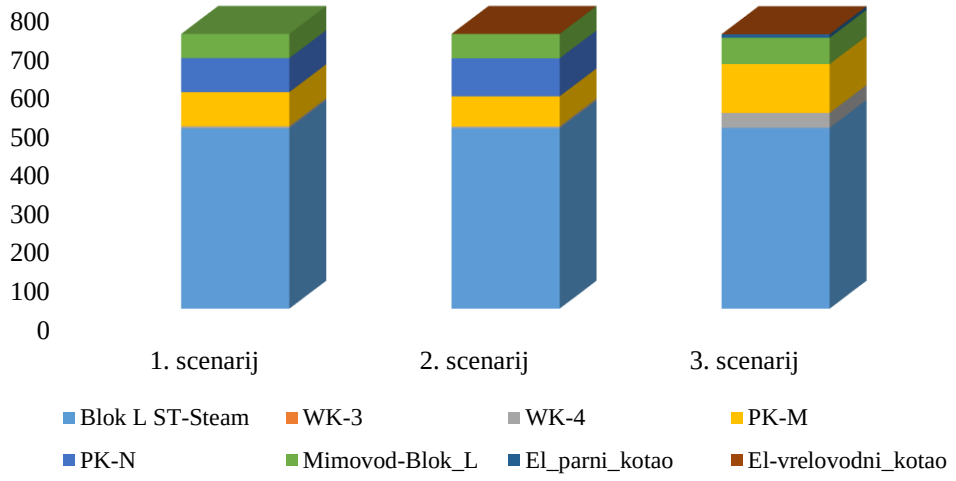
U drugom scenariju električni kotlovi proizvode ukupno 0,08%, a u trećem scenariju 0,33%.




**Slika 31. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2025.godine za sva tri scenarija**

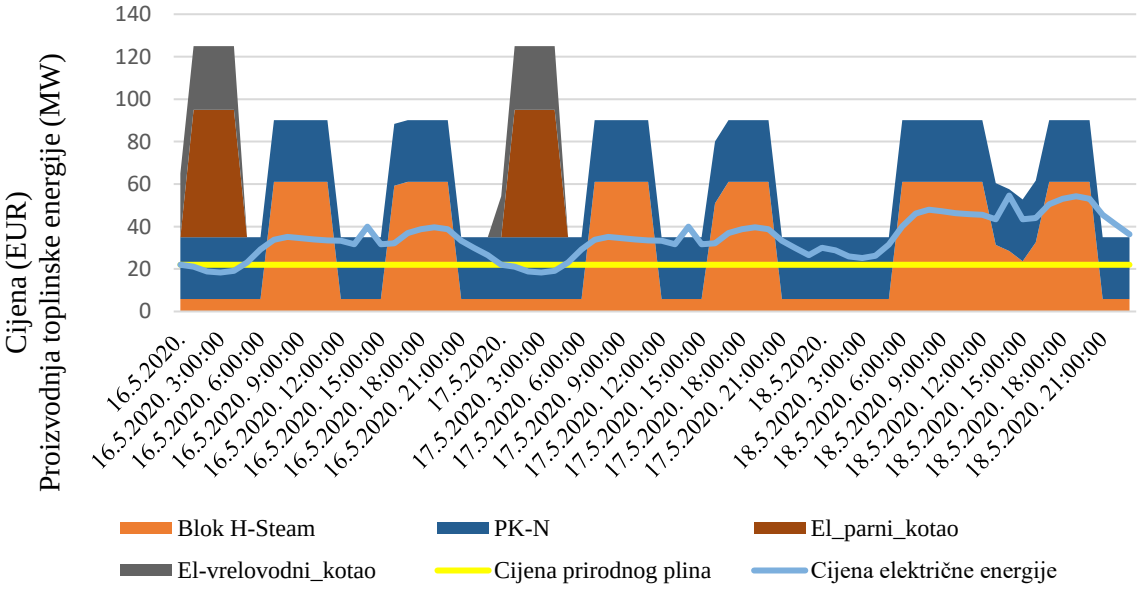
***Slika 31***. prikazuje da će u 2025. godini iz pogona izići kogeneracijski blokovi J i H, a biti će izgrađen novi kogeneracijski blok L. U svim scenarijima najveći proizvođač toplinske energije je kogeneracijski blok L. Blok L u prvom i drugom scenariju proizvodi godišnje 29,8% ukupne toplinske energije, dok u trećem nešto malo više.

U drugom scenariju električni kotlovi proizvode ukupno 0,025%, a u trećem scenariju 1,18%.




**Slika 32. Proizvodnja toplinske energije po blokovima 2030.godine za sva tri scenarija**

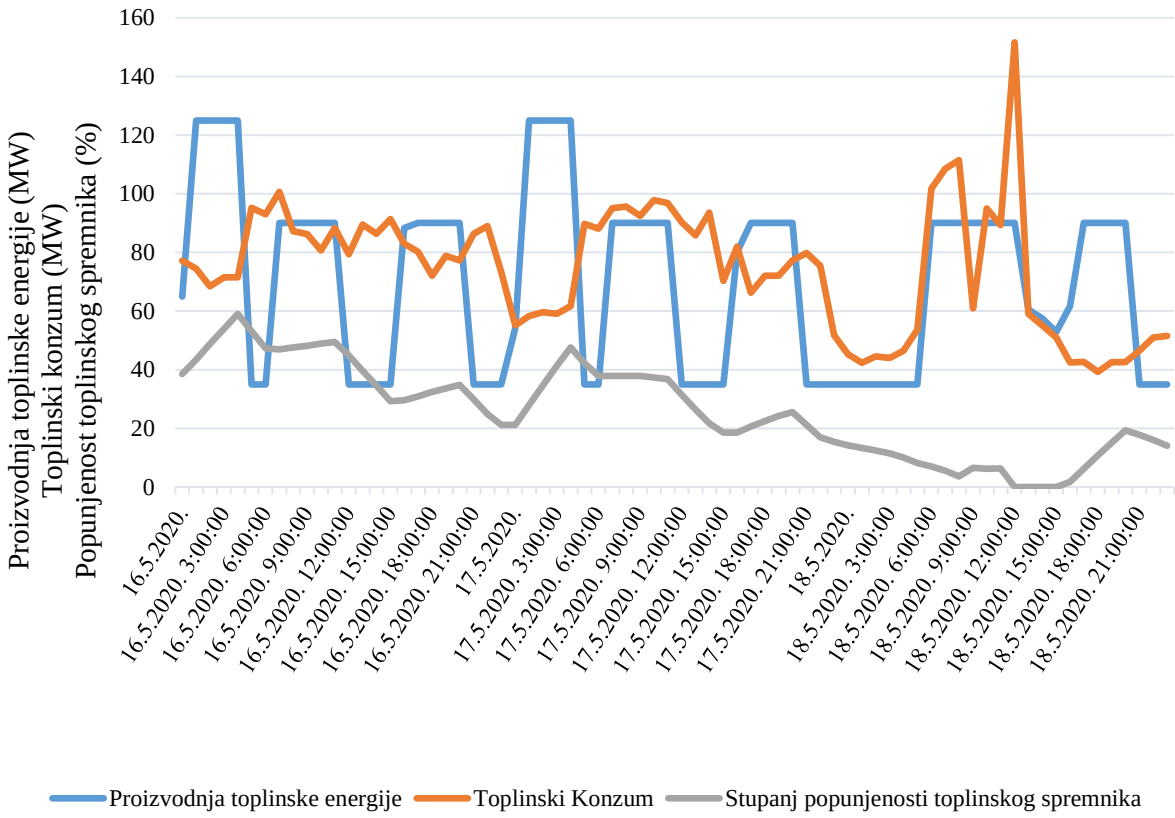
***Slika 32***. prikazuje da blok L ima najveći udio u proizvodnji toplinske energije. Električni parni kotao i električni vrelovodni kotao imaju mali udio u proizvodnji toplinske energije u drugom i trećem scenariju za 2030. godinu. Električni kotlovi imaju mali udio u proizvodnji toplinske energije zbog prevelike cijene električne energije u odnosu na cijenu prirodnog plina.




**Slika 33. Satni prikaz režima rada EL-TO Zagreb u 2020. godini.**

***Slika 33***. prikazuje satni režim rada EL-TO Zagreb za karakteristične dane kada su u pogonu oba električna bojlera (parni i vrelovodni). Iz slike je vidljivo da se električni bojleri pokreću u trenutku kada je cijena električne energije niža od cijene prirodnog plina, a gase se kada cijena eklektične energije preraste cijenu prirodnog plina. Kogeneracijski blok H povećava opterećenje

kada cijena na tržištu električne energije postane veća od proizvodne cijene eklektične energije iz bloka H.




**Slika 34. Satni prikaz proizvodnje toplinske energije, toplinskog konzuma i popunjenosti toplinskog spremnika u 2020.godini**

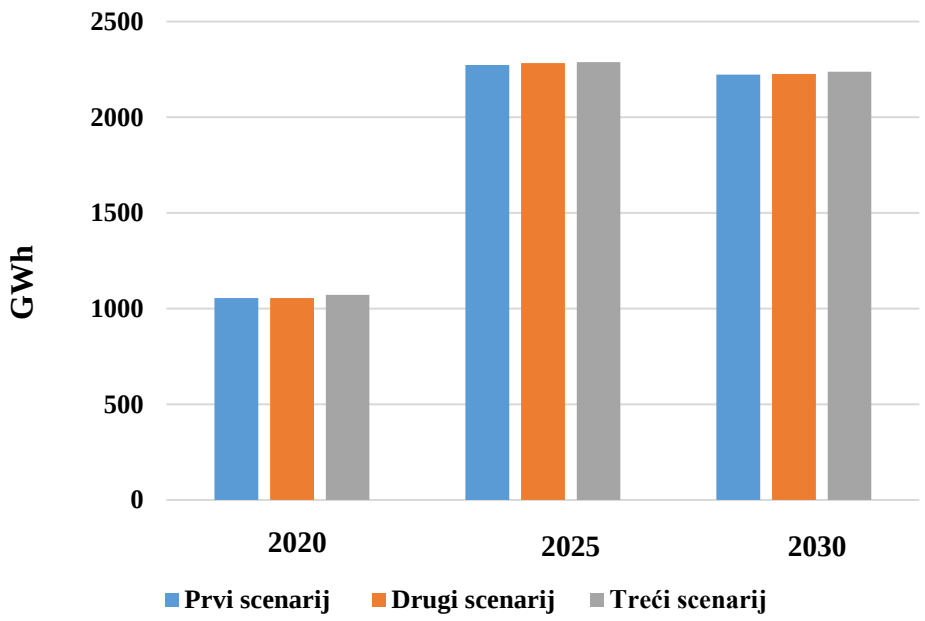
***Slika 34***. prikazuje satno kretanje proizvodnje toplinske energije, toplinskog konzuma i popunjenosti toplinskog spremnika za karakteristične dane u 2020. godini, kada su u pogonu oba električna bojlera (parni i vrelovodni). Vidljivo je da se toplinski spremnik puni kada postoji višak proizvedene toplinske energije, a prazni kada postoji potreba za njom. Razlika u proizvedenoj toplinskoj energiji i toplinskom konzumu upravo određuje popunjenost toplinskog spremnika.

## 6.3 Potrošnja prirodnog plina

U pogonima EL-TO Zagreb u svim scenarijima kao gorivo za kogeneracijsku jedinicu te vrelovodne i parovodne kotlove troši se prirodni plin.

**Tablica 16. Potrošnja prirodnog plina po scenarijima pogona EL-TO (GWh)**

| SCENARIJ | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **1.** | 1054,18 | 2273,13 | 2222,59 |
| **2.** | 1054,80 | 2282,02 | 2225,69 |
| **3.** | 1071,70 | 2287,24 | 2238,45 |



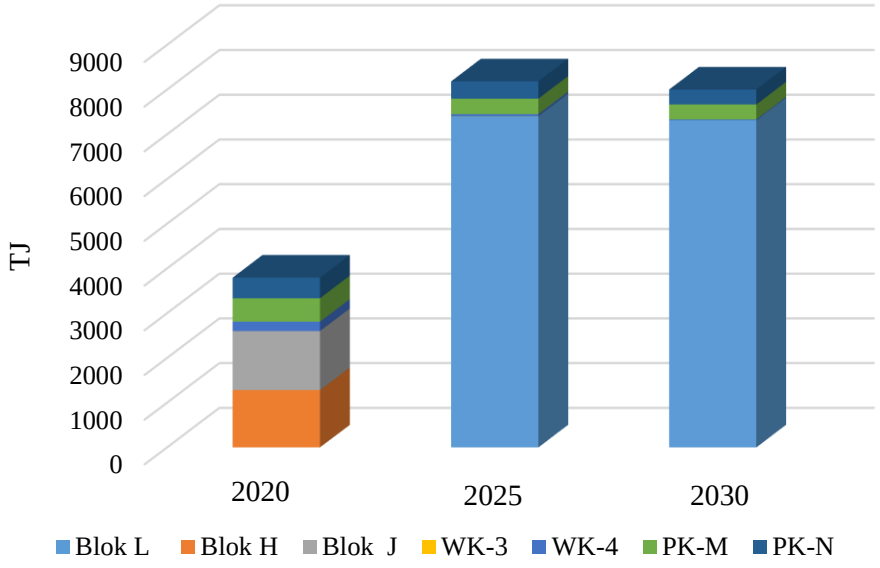

**Slika 35. Godišnja potrošnja prirodnog plina po scenarijima pogona EL-TO Zagreb**

***Slika 35***. prikazuje da nema značajne razlike po scenarijima u potrošnji prirodnog plina.

Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO Zagreb za sva tri scenarija prikazana je u nastavku kroz tablice i slike.

**Tablica 17. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - prvi scenarij (TJ)**

| POGONSKE JEDINICE | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **BLOK L** | - | 7399,57 | 7311,72 |
| **BLOK H** | 1281,15 | - | - |
| **BLOK J** | 1318,28 | - | - |
| **WK-3** | 1,3711 | 0,93 | 0,71 |
| **WK-4** | 210,08 | 48,70 | 19,57 |
| **PK-M** | 523,70 | 348,02 | 334,33 |
| **PK-N** | 460,47 | 385,97 | 334,93 |

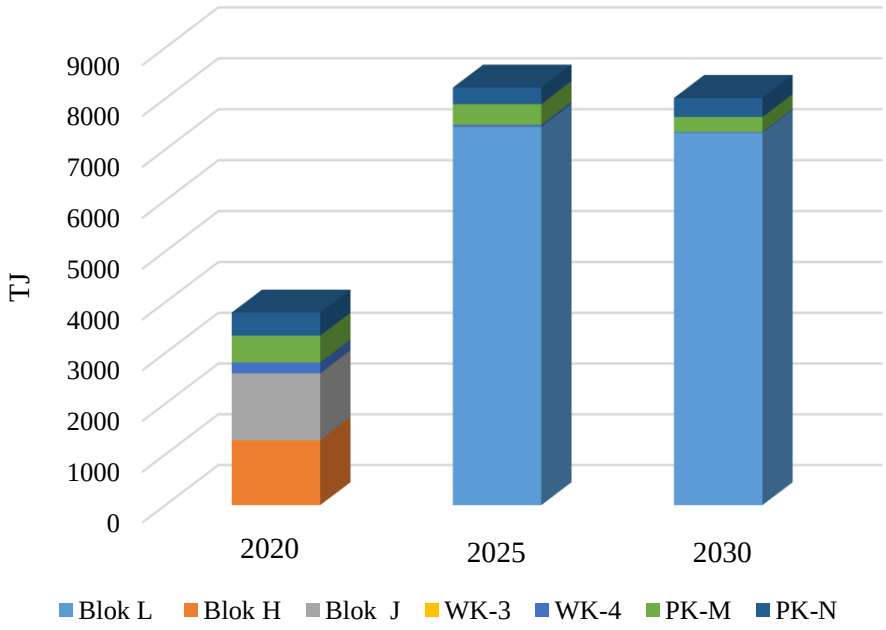



**Slika 36. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - prvi scenarij**

Tablica 17. i Slika 36. prikazuju potrošnju prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO Zagreb za prvi scenarij. Vidljivo je da u 2020. godini blok J troši najviše prirodnog plina, a vrelovodni kotao WK-4 najmanje. U 2025. i 2030. godini blok L troši najviše prirodnog plina.

**Tablica 18.Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - drugi scenarij (TJ)**

| POGONSKE JEDINICE | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **BLOK L** | - | 7438,63 | 7322,22 |
| **BLOK H** | 1279,09 | - | - |
| **BLOK J** | 1317,60 | - | - |
| **WK-3** | 1,37 | 0,80 | 0,62 |
| **WK-4** | 212,43 | 45,54 | 19,14 |
| **PK-M** | 528,68 | 406,01 | 295,61 |
| **PK-N** | 455,80 | 323,56 | 374,37 |

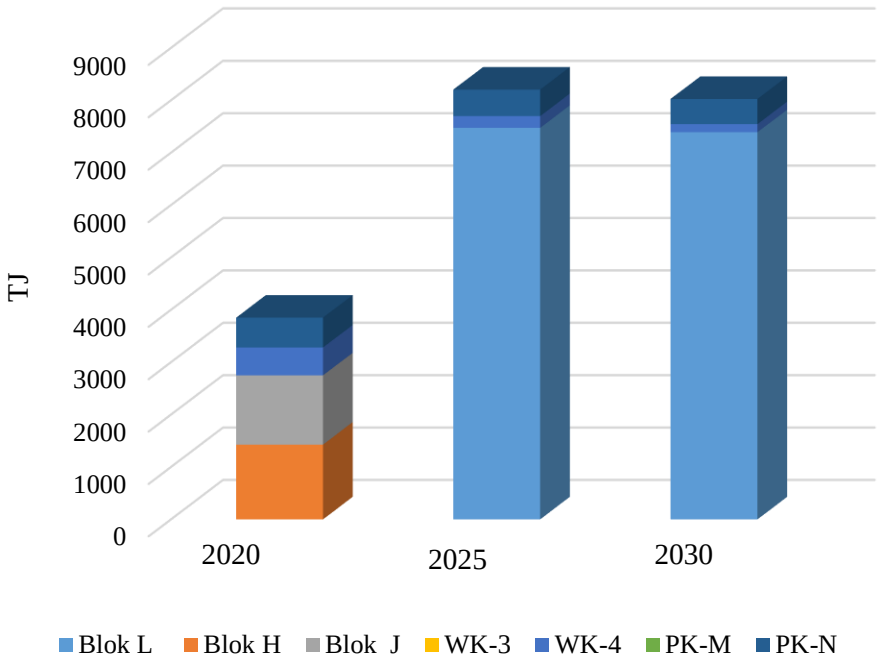



**Slika 37. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - drugi scenarij**

Tablica 18. i Slika 37. prikazuju potrošnju prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO Zagreb za drugi scenarij. Vidljivo je da u 2020. godini blok J troši najviše prirodnog plina, a vrelovodni kotao WK-4 najmanje. U 2025. i 2030. godini blok L troši najviše prirodnog plina.

**Tablica 19. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - treći scenarij (TJ)**

| POGONSKE JEDINICE | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **BLOK L** | - | 7472,92 | 7389,81 |
| **BLOK H** | 1426,44 | - | - |
| **BLOK J** | 1322,16 | - | - |
| **WK-3** | - | - | - |
| **WK-4** | 532,50 | 224,49 | 154,27 |
| **PK-M** | - | - | - |
| **PK-N** | 569,02 | 505,04 | 479,89 |




**Slika 38. Potrošnja prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO - treći scenarij**

Tablica 19. i Slika 38. prikazuju potrošnju prirodnog plina po jedinicama pogona EL-TO Zagreb za treći scenarij. Vidljivo je da u 2020. godini blok J troši najviše prirodnog plina, a vrelovodni kotao WK-4 najmanje. U 2025. i 2030. godini blok L troši najviše prirodnog plina.

## 6.4 Potrošnja električne energije

U drugom i trećem scenariju uz prirodni plin koristi se i električna energija za pogon električnih kotlova.

**Tablica 20. Potrošnja električne energije u drugom i trećem scenariju (GWh)**

| SCENARIJ | 2025 | 2030 |
|---|---|---|
| **DRUGI SCENARIJ** | 2,11 | 1,64 |
| **TREĆI SCENARIJ** | 8,77 | 9,57 |

Iz tablice 20. vidljivo je da je potrošnja električne energije za pogon električnih kotlova manja u drugom scenariju u odnosu na treći scenarij zbog nešto manjeg angažmana električnih kotlova, što je posljedica pretpostavke izlaska iz pogona parnog kotla u trećem scenariju.

## 6.5 Emisije $CO_2$

Tablica 21. prikazuje godišnje emisije $CO_2$ u pogonu EL-TO u tri scenarija.

**Tablica 21. Godišnje emisije $CO_2$ u pogonu EL-TO u tri scenarija ($tCO_2$)**

| | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **PRVI SCENARIJ** | 212904,04 | 310468,29 | 2114331,524 |
| **DRUGI SCENARIJ** | 212899,65 | 311453,22 | 2116975,167 |
| **TREĆI SCENARIJ** | 215993,17 | 310073,99 | 2112209,796 |

## 6.6 Ekonomska analiza isplativosti

Ekonomska analiza isplativosti je provedena na temelju rezultata analize optimiranja proizvodnje.

Usporedna analiza napravljena je za tri scenarija

- Prvi scenarij – pogon EL-TO bez novih električnih kotolova

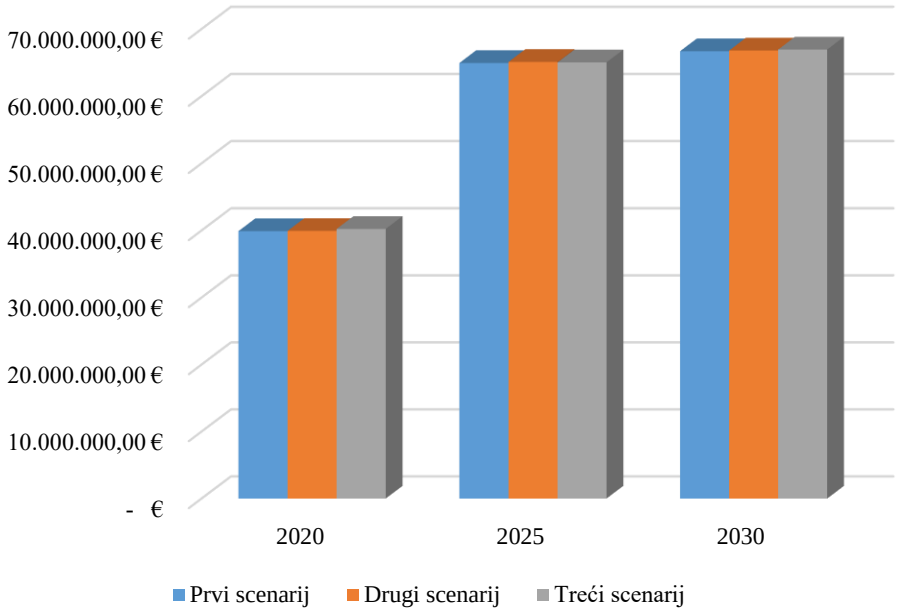
- Drugi scenarij – ulazak u pogon jednog parnog i jednog vrelovodnog električnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine.

- Treći scenarij – ulazak u pogon dva parna i jednog vrelovodnog električnog kotla te izlazak jednog parnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine.

6.6.1 Prihodi

**Tablica 22. Ukupni godišnji prihodi prema scenarijima.**

| PRIHOD | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **PRVI SCENARIJ** | 39.902.994,34 € | 64.935.035,90 € | 66.694.241,76 € |
| **DRUGI SCENARIJ** | 39.929.968,74 € | 65.094.365,11 € | 66.793.530,67 € |
| **TREĆI SCENARIJ** | 40.229.814,65 € | 65.031.487,89 € | 66.937.040,47 € |



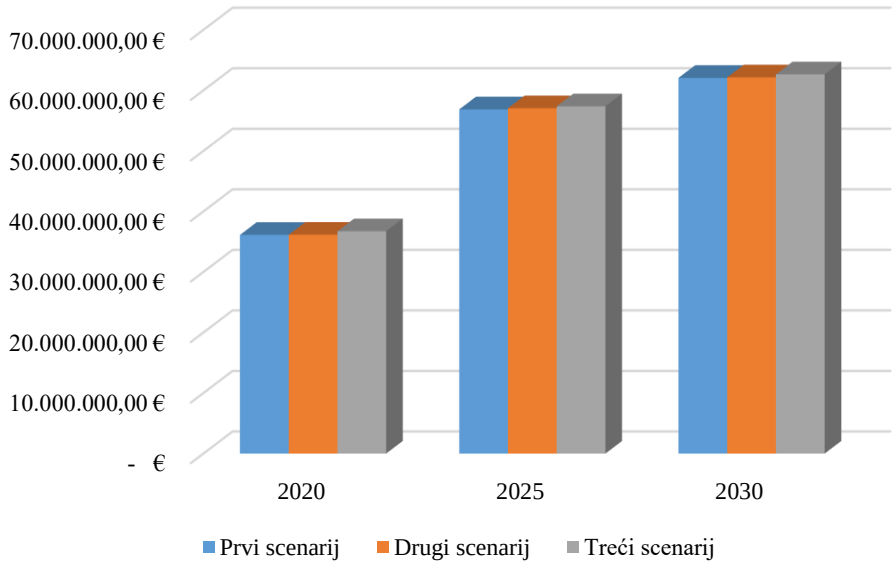

**Slika 39.Ukupni godišnji prihodi prema scenarijima.**

Tablica 22. i Slika 39. prikazuju ukupni godišnji prihod od prodaje električne i toplinske energije prema scenarijima u 2020., 2025. i 2030. godini.

6.6.2 Rashodi

**Tablica 23. Ukupni godišnji rashodi prema scenarijima.**

| RASHODI | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **PRVI SCENARIJ** | 36.124.173,39 € | 56.857.745,60 € | 62.057.416,96 € |
| **DRUGI SCENARIJ** | 36.144.778,67 € | 57.047.370,00 € | 62.143.803,16 € |
| **TREĆI SCENARIJ** | 36.728.212,90 € | 57.364.591,55 € | 62.648.070,26 € |



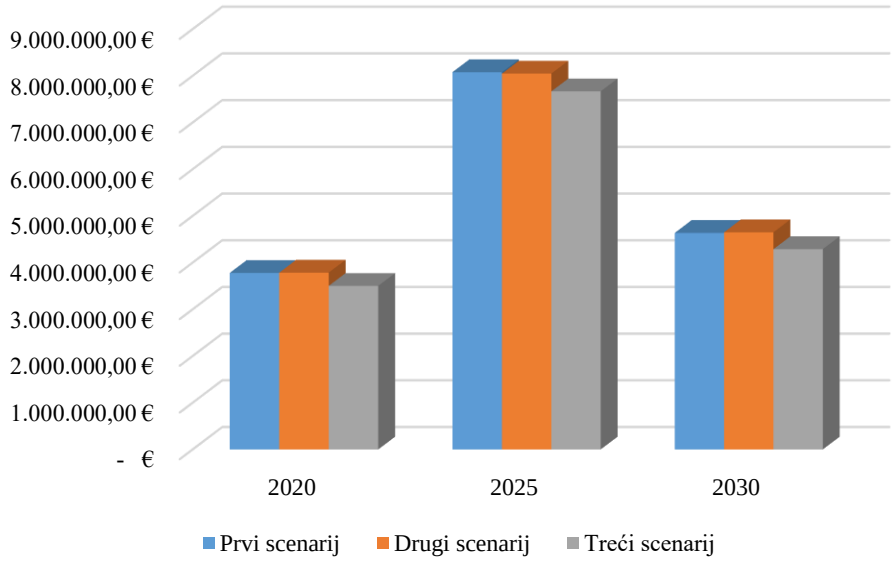

**Slika 40. Ukupni godišnji rashodi prema scenarijima.**

Tablica 23. i Slika 40. prikazuju ukupni godišnji rashod koji se sastoji od troška prirodnog plina, električne energije i emisijskih jedinica prema scenarijima u 2020., 2025. i 2030. godini.

6.6.3 Profit

**Tablica 24. Ukupni godišnji profit prema scenarijima.**

| PROFIT | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **PRVI SCENARIJ** | 3.778.768,77 € | 8.077.290,30 € | 4.636.824,81 € |
| **DRUGI SCENARIJ** | 3.785.190,07 € | 8.046.995,11 € | 4.649.727,51 € |
| **TREĆI SCENARIJ** | 3.501.601,74 € | 7.666.896,34 € | 4.288.970,21 € |




**Slika 41. Ukupni godišnji profit prema scenarijima.**

Tablica 24. i Slika 41. prikazuju ukupni godišnji profit koji je rezultat prihoda od prodaje električne i toplinske energije umanjen za troškove nabave prirodnog plina i električne energije u 2020., 2025. i 2030. godini.

6.6.4 Jednostavni period povrata

**Tablica 25. Razlika profita među scenarijima**

| GODINA | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **RAZLIKA PROFITA IZMEĐU PRVOG I DRUGOG SCENARIJA** | 6.421,30 € | -30.295,19 € | 12.902,70 € |
| **RAZLIKA PROFITA IZMEĐU PRVOG I TREĆEG SCENARIJA** | -277.167,03 € | -410.393,96 € | -347.854,60 € |

Tablica 25. prikazuje razliku profita između prvog scenarija bez električnih kotlova i druga dva s električnim kotlovima.

**Tablica 26. Jednostavni period povrata (JPP) prema scenarijima.**

| GODINA | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **JPP DRUGI SCENARIJ (GODINA)** | 181,42 | - | 90,29 |
| **JPP TREĆI SCENARIJ (GODINA)** | - | - | - |

Tablica 26. prikazuje jednostavni period povrata električnih bojlera prema scenarjima.

# 7. ZAKLJUČAK

U ovome radu analizirana je integracija električnih bojlera velikih snaga u centralni toplinski sustav grada Zagreba na primjeru Elektrane toplane Zagreb (EL-TO Zagreb). U programskom paketu ***„PLEXOS Integrated Energy Model“*** izrađen je simulacijsko-optimizacijski model uklapanja električnih bojlera u EL-TO Zagreb. Model je izrađen na temelju ulaznih podataka koji obuhvaćaju tehničke i ekonomske parametre novih električnih kotlova te svih postojećih i planiranih jedinica na lokaciji, zatim podatke o očekivanom kretanju toplinskog konzuma te tržišne podatke (cijene električne energije, prirodnog plina i emisijskih jedinca).

Za potrebe analize integracije električnih bojlera velikih snaga u centralni toplinski sustav EL-TO Zagreb izrađen je optimizacijski model postrojenja te su definirana tri scenarija pogona:

• Prvi - scenarij bez novih električnih kotlova 2020., 2025. i 2030. godine.

• Drugi - scenariji ulaska u pogon jednog parnog i jednog vrelovodnog električnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine (2X30 MW);

•Treći- scenariji ulaska u pogon dva parna i jednog vrelovodnog električnog kotla 2020., 2025. i 2030. godine (3X30 MW);

Rezultati simulacija prikazuju da električni kotlovi 2020. godine proizvode u drugom scenariju 0,08 % toplinske energije od ukupno proizvedene, a u trećem scenariju 0,33 %. U 2025. godini u drugom scenariju proizvode 0,025 % toplinske energije od ukupno proizvedene, a u trećem scenariju 1,18 %. Jednostavni period povrata električnih bojlera za drugi scenarij u 2020. godini iznosi 181 godinu, a za 2030.godinu iznosi 90 godina. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je udio proizvedene toplinske energije iz električnih bojlera zanemariv. Rezultati ovih simulacija su odraz relativno visoke cijene električne energije (50 EUR/MWh-2020. godine, 55 EUR/MWh-2025.godine i 60 EUR/MWh-2030. godine.) u odnosu na cijenu prirodnog plina (20 EUR/MWh-2020. godine, 25 EUR/MWh-2025.godine i 30 EUR/MWh-2030. godine.). Moguće je u budućnosti očekivati u slučaju veće integracije OIE dolazak ekstremno niskih cijena električne energije na tržištima i stoga električne kotlove ne treba odbaciti već je donošenje investicijske odluke stvar strateškog promišljanja i planiranja.

# 8. LITERATURA


[1] European Commission Directorate - general for energy, Ed., “Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables): Work package 1: Final energy consumption for the year 2012,” 2016. :https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Report%20WP1.pdf. (posljednji pristup 20.11.2018)

[2] Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., et al., Energy Storage and Smart Energy Systems, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, Vol. 11, No. 0, pp 3–14, 2016.Enerpedia: Finalna potrošnja energije i energetska efikasnost

[3] Balić, Dražen; Mikulić, Martina; Jakšić, Dražen :PRIMJENA POWER TO HEAT KONCEPTA U HRVATSKOM ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU // Digitalni zbornik radova 13. savjetovanja HRO CIGRE, Šibenik, 2017.

[4] Energija u Hrvatskoj 2016 - godišnji energetski pregled. Institut Hrvoje Požar, 2017. http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2018/06/EUH2016.pdf (posljednji pristup :25.11.2018)

[5] Staniša, Branko; Prelec, Zmagoslav; Jakovljević, Ivan: Analiza učinkovitosti kogeneracijskoga parno-turbinskog postrojenja snage 5,7 Mwel. https://hrcak.srce.hr/file/85209 (posljednji pristup: 3.12.2018)

[6] Greenhouse gas emissions associated with various methods of power generation in ontario 2016. https://www.opg.com/darlington-refurbishment/Documents/IntrinsikReport_GHG_OntarioPower.pdf (posljednji pristup: 3.12.2018)

[7] Lončar, D., Krajačić, Ž., Vujanović M., Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na…

[8] Jukić, P., Majcen,M., Pravci razvoja izvora topline centralnog toplinskog sustava (cts) grada zagreba http://www.hkis.hr/Upload/Documents/SSU/ZagrebackiEnergetskiTjedan/A.Majcen%20-%20Prezentacija%20CTS_A.ppt (posljednji pristup: 9.12.2018)

[9] EKONERG d.o.o., Netehnički sažetak- Zamjena bloka „A“ novom kombi kogeneracijskom elektranom u EL-TO Zagreb, http://www.hep.hr/UserDocsImages/projekti/kke-zg/NTS_2017_HRV_FINAL.pdf (posljednji pristup : 10.03.2019)

[10] Hot water and steam boilers – Zander & Ingerstrom

**PRILOZI**

I. CD-R disc