Izbor vršnih jedinica fleksibilne toplane

Milić, Matej

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:235:145084

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matej Milić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Matej Milić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru te asistentu Anti Marušiću na strpljivosti, velikoj pruženoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji, prijateljima i svim profesorima na podršci za vrijeme studiranja i pisanja ovog rada.

Matej Milić

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 Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Milić** Mat. br.: 0035193961

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor vršnih jedinica fleksibilne toplane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Peaking Units Selection of Flexible District Heating Station**

Opis zadatka:

Povećanje udjela obnovljivih izvora energije promijenilo je ulogu većine konvencionalnih postrojenja pa tako i termoelektrana toplana priključenih na centralizirane toplinske sustave. Toplane se uz primarnu opskrbu toplinskih potrošača također trebaju prilagoditi intermitentnoj proizvodnji vjetroelektrana i fotonaponskih sustava i pratećim promjenama tržišnih cijena. Prilagodbom toplana su pored promjene načina vođenja pogona postojećih izvora obuhvaćene i izmjene konfiguracije odnosno izgradnja novih izvora koja je dodatno potaknuta i provedbom uredbe o dopuštenim graničnim vrijednostima emisija kojom se zabranjuje pogon većini postojećih nemoderniziranih jedinica na fosilna goriva.

U okviru rada potrebno je:

1. Odrediti godišnje vršne toplinske potrebe sustava smještenog u kontinentalnom dijelu RH kojeg opskrbljuje toplana nazivne toplinske snage 300 MW s visokoučinkovitom kogeneracijskom jedinicom toplinske snage 150 MW, kao temeljnim izvorom;
2. Opisati i usporediti glavne tehnologije koje se mogu koristiti kao vršni toplinski izvori: plinske kotlove, plinske motore ili plinske turbine, dizalice topline, električne kotlove;
3. Izvesti pojednostavljene matematičke modele dinamike procesa opisanih jedinica prikladne za određivanje brzine odziva toplinske i električne snage na zadani poremećaj;
4. Simulirati pogon toplane u karakterističnim danima i tjednima (ljetni, proljetni/jesenski i zimski) s većim ili manjim udjelom varijabilne proizvodnje iz obnovljivih izvora;
5. Koristeći tržišne podatke procijeniti moguće prihode od isporuke toplinske i električne energije te opcijski od pružanja pomoćnih usluga na tržištu električne energije.

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: Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
1.1. Uloga termoelektrana u modernom energetskom sustavu 1
2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI 6
3. TOPLINSKO OPTEREĆENJE CENTRALIZIRANIH TOPLINSKIH SUSTAVA 8
3.1.1. Sezonske promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava 9
3.1.2. Dnevne promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava 11
3.2. Bazno toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava 11
3.3. Vršno toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava 12
4. TEHNOLOGIJE PRIMJERENE ZA NAMIRIVANJE VRŠNOG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA 14
4.1. Plinski kotlovi 15
4.2. Plinski motori 17
4.2.1. Princip rada plinskih motora 17
4.2.2. Sustavi hlađenja plinskih motora 19
4.3. Plinske turbine 21
4.3.1. Princip rada plinskih turbina 21
4.3.2. Vrste plinskih turbina 22
4.3.3. Proizvodnja toplinske energije primjenom plinskih turbina 24
4.4. Dizalice topline 24
4.4.1. Idealni ljevokretni proces 24
4.4.2. Realni ljevokretni procesi 25
4.4.3. Radne tvari dizalica topline 27
4.4.4. Dijelovi dizalica topline 29
4.4.5. Dizalice topline kao toplinski izvor za namirivanje potreba centraliziranih toplinskih sustava 33
4.5. Električni kotlovi 34
5. OPIS METODA (METODOLOGIJA) 36
5.1. Metodologija određivanja vršnih toplinskih potreba 36
5.2. Metodologija izrade pojednostavljenih matematičkih modela 37
5.3. Metodologija simulacije pogona toplane te proračuna prihoda rada toplane 38
6. REZULTATI I DISKUSIJA 40
6.1. Rezultati određivanja vršnih toplinskih potreba 40
6.2. Matematički model dinamike procesa toplovodnog plinskog kotla 42

6.3. Matematički model dinamike procesa plinskog motora 46
6.4. Matematički model dinamike procesa plinskih turbina 50
6.5. Matematički model dinamike procesa dizalica topline 53
6.6. Matematički model dinamike procesa električnih kotlova 57
6.7. Odabir karakterističnih dana toplinskog opterećenja za simulaciju pogona toplane . 59
6.8. Simulacija pogona toplane sa toplovodnim plinskim kotlovima i proračun prihoda i rashoda toplane 61
6.9. Simulacija pogona toplane s plinskim motorima i proračun prihoda i rashoda toplane 65
6.10. Simulacija pogona toplane s plinskim turbinama i proračun prihoda i rashoda toplane 68
6.11. Simulacija pogona toplane s dizalicama topline i proračun prihoda i rashoda toplane 71
6.12. Simulacija pogona toplane s dizalicama topline s većim udjelom obnovljivih izvora na tržištu električne energije i proračun prihoda i rashoda toplane 75
6.13. Simulacija pogona toplane s električnim kotlovima i proračun prihoda i rashoda toplane 78
6.14. Simulacija pogona toplane s električnim kotlovima s većim udjelom obnovljivih izvora na tržištu električne energije i proračun prihoda i rashoda toplane 81
7. ZAKLJUČAK 83
LITERATURA 85
PRILOZI 88

POPIS SLIKA

Slika 1. Sudjelovanje tehnologija na veleprodajnom tržištu električne energije ovisno o cijeni električne energije; [1] 1
Slika 2. Projekcije prosječnog godišnjeg povećanja kapaciteta eksploatacije izvora energije u svijetu; [2] 2
Slika 3. Kratkotrajni marginalni troškovi proizvodnje topline raznih tehnologija; [1] 4
Slika 4. Shematski prikaz centraliziranog toplinskog sustava; [3] 6
Slika 5. Prosječna mjesečna vanjska temperatura i prosječna mjesečna brzina vjetra Grada Zagreba na visini 10 m; [7] 9
Slika 6. Dijagram toplinskog opterećenja; [8] 12
Slika 7. Kondenzacijski toplovodni kotao; [9] 16
Slika 8. Shematski prikaz kogeneracijskog postrojenje s plinskim motorom; [14] 20
Slika 9. Shematski prikaz jednostavnog postrojenja s plinskom turbinom; [15] 22
Slika 10. Areoderivativna plinska turbina; [16] 23
Slika 11. Shematski prikaz realnog ljevokretnog procesa; [17] 26
Slika 12. Raspodjela korištenja radnih tvari kod dizalica topline koje se koriste za namirivanje topline u centraliziranim toplinskim sustavima; [18] 29
Slika 13. Otvorenost pulsno modulirajućeg elektroničkog ekspanzijskog ventila; [19] 30
Slika 14. Otvorenost analognog elektroničkog ekspanzijskog ventila; [19] 31
Slika 15. Stapni kompresor; 32
Slika 16. Toplovodni električni kotao s elektrodama; [32] 34
Slika 17. Potrošnja topline za namirivanje potreba za potrošnom toplom vodom [30] 40
Slika 18. Prosječno satno toplinsko opterećenje sustava 41
Slika 19. Vrijeme trajanja toplinskog opterećenja 42
Slika 20. Toplinski učin plinskih kotlova prilikom uključivanja i namirivanja maksimalnog toplinskog opterećenja 44
Slika 21. Odziv toplinskog učina plinskih kotlova prilikom gašenja 45
Slika 22. Ovisnost toplinskog opterećenja o električnom plinskih motora; [27] 48
Slika 23. Odziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih motora na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava 49
Slika 24. Odziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih turbina na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava 52
Slika 25. Shematski dijagram modelirane dizalice topline 53
Slika 26. Regulacijski signal prilikom ispitivanja realne dizalice topline; [29] 54
Slika 27. Podaci dobiveni ispitivanjem realne dizalice topline; [29] 54
Slika 28. Odzivi električnog opterećenja i proizvodnje topline dizalice topline prilikom povećavanja i spuštanja toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava 56
Slika 29. Odziv potrošnje električne i proizvodnje toplinske energije električnih kotlova na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava 59
Slika 30. Toplinsko opterećenje karakterističnih dana 60

Slika 31. Vrijeme trajanja toplinskog opterećenja dobiveno korištenjem karakterističnih dana 60
Slika 32. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim kotlovima 62
Slika 33. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim motorima 66
Slika 34. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim turbinama 69
Slika 35. Veleprodajna cijena električne energije karakterističnih dana s manje obnovljivih izvora u sustavu 72
Slika 36. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s dizalicama topline 73
Slika 37. Veleprodajna cijena električne energije karakterističnih dana s više obnovljivih izvora u sustavu 76
Slika 38. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s dizalicama topline u sustavu s više obnovljivih izvora 77
Slika 39. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s električnim kotlovima 79
Slika 40. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s električnim kotlovima sustavu s više obnovljivih izvora 81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim kotlovima; 63
Tablica 2. Prihodi toplane s plinskim kotlovima; 64
Tablica 3. Rashodi toplane s plinskim kotlovima; 64
Tablica 4. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim motorima; 67
Tablica 5. Prihodi toplane s plinskim motorima; 67
Tablica 6. Rashodi toplane s plinskim motorima; 67
Tablica 7. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim turbinama; 70
Tablica 8. Prihodi toplane s plinskim turbinama; 70
Tablica 9. Rashodi toplane s plinskim turbinama; 70
Tablica 10. Rad dizalica topline u sekundarnoj rezervi; 72
Tablica 11. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa dizalicama topline; 74
Tablica 12. Prihodi toplane s dizalicama topline; 74
Tablica 13. Rashodi toplane s dizalicama topline; 75
Tablica 14. Pogon dizalica topline u sekundarnoj rezervi u sustavu s više obnovljivih izvora; 76
Tablica 15. Prihodi toplane s dizalicama topline u sustavu s puno obnovljivih izvora; 77
Tablica 16. Rashodi toplane s dizalicama topline u sustavu s puno obnovljivih izvora; 78
Tablica 17. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa električnim kotlovima; 79
Tablica 18. Prihodi toplane s električnim kotlovima; 80
Tablica 19. Rashodi toplane s električnim kotlovima; 80
Tablica 20. Prihodi toplane s električnim kotlovima u sustavu s puno obnovljivih izvora; 81
Tablica 21. Rashodi toplane s električnim kotlovima u sustavu s puno obnovljivih izvora; 82

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C_{UK}	kJ/K	toplinski kapacitet vode u plinskom kotlu
c_v	kJ/kgK	specifični toplinski kapacitet vode
H_{DT1}	–	prijenosna funkcija korištena za pretvorbu izlaznog signala proporcionalno integralnog regulatora u električnu snagu dizalice topline
H_{DT2}	–	prijenosna funkcija korištena za pretvorbu izlaznog signala električne snage dizalice topline u proizvodnju toplinske snage
H_{dplina}	MJ/kg	donja ogrjevna vrijednost prirodnog plina
H_{EK1}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene električnog opterećenja toplane s električnim kotlovima
H_{EK2}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s električnim kotlovima
H_{PIDT}	–	prijenosna funkcija proporcionalno integralnog regulatora dizalice topline
H_{PM1}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene opterećenja toplane s plinskim motorima
H_{PM2}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s plinskim motorima
H_{PT1}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene opterećenja toplane s plinskim turbinama
H_{PT2}	–	prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s plinskim turbinama
H_{PTK1}	–	prijenosna funkcija korištena kod porasta opterećenja toplovodnog plinskog kotla
H_{PTK2}	–	prijenosna funkcija korištena kod pada opterećenja toplovodnog plinskog kotla
P_{PM}	MW	električno opterećenje plinskih motora
PTV	MWh	satno toplinsko opterećenje za namirivanje potrošne tople vode
P_V	MW	električna snaga pri vršnom toplinskom opterećenju sustava
SS	$°C$	stupanj sat
STP	MWh	satno toplinsko opterećenje
T_V	$°C$	prosječna vanjska temperatura u jednome satu
T_{V0TK}	$°C$	temperatura vode u plinskom kotlu
T_Z	$°C$	željena unutrašnja temperatura u grijanim zgradama
UPT	MWh	ukupna proizvodnja toplinske energije iz toplana i kogeneracija
$USTP$	MWh	ukupna satno toplinsko opterećenje
Q_U	MWh	ukupno satno toplinsko opterećenje sustava
Q_V	MWh	vršno satno toplinsko opterećenje sustava

$q_{mgoriva}$	kg/s	maseni protok goriva
q_{mvTK}	kg/s	maseni protok vode kroz plinski kotao
η_{P}	–	električna učinkovitost tehnologije
η_{Φ}	–	toplinska učinkovitost tehnologije
τ_{TK}	s	vremenska konstanta plinskog kotla
Φ_{BN}	MW	nazivna toplinska snaga baznih toplinskih jedinica
Φ_{KONV}	kW	ulazni toplinski tok kroz stjenku cijevi plinskog kotla
Φ_{PM}	MW	toplinsko opterećenje plinskih motora
Φ_{V}	MW	vršno toplinsko opterećenje sustava
Φ_{VN}	MW	nazivna toplinska snaga vršnih toplinskih jedinica

SAŽETAK

U ovom radu prikazane su tehnologije koje se mogu koristiti za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava. Uz korištenje toplinskih spremnika vršne jedinice za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja su neophodne kako bi se omogućila maksimalna učinkovitost i velik broj radnih sati na nazivnom opterećenju temeljnog toplinskog izvora. Izrađeni su pojednostavljeni matematički modeli kojima je pokazana mogućnost tehnologija za praćenje toplinskog opterećenja te za pružanje pomoćnih usluga na tržištu električne energije. Procijenjeno je godišnje toplinsko opterećenje sustava koje se nalazi u kontinentalnoj Hrvatskoj te je izrađeno sedam simulacija sustava kod kojih je pokazana interakcija pojedinih komponenti sustava sa centraliziranim toplinskim sustavom. U simulacijama je razmotreno sudjelovanje vršnih jedinica na tržištu električne energije pružanjem pomoćnih usluga. Također su proračunati prihodi i rashodi simuliranih sustava te su izračunate potrebne cijene toplinske energije kako bi sustavi poslovali s pozitivnom nulom.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustav, toplinsko opterećenje, kogeneracija, simulacija, ekonomska izvodljivost, matematički modeli.

SUMMARY

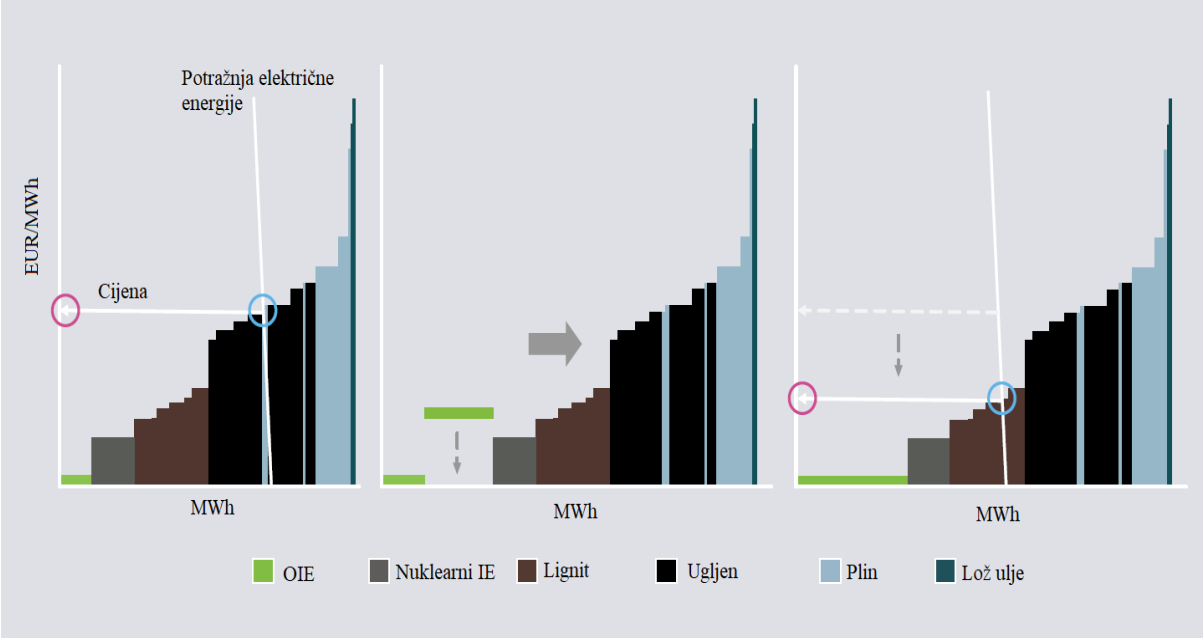
This thesis presents technologies that can be used to cover peak thermal loads of district heating systems. With the use of heat storage peaking units are necessary for providing maximal efficiency and large number of working hours at nominal load of the base heat source. Simplified mathematical models were developed demonstrating the capability of technologies for satisfying thermal load and providing auxiliary services for the electricity market. The annual thermal loads of the system in the continental Croatia were estimated and seven system simulations were developed. Simulations showed interaction of the individual components of the system with district heating system. In the simulations was considered the participation of peaking units in the electricity market by providing auxiliary services. Also were calculated revenues and expenditures of the simulated systems and heating energy prices for enabling work of the systems on positive zero.

Key words: district heating, heat load, cogeneration, simulation, economic feeasibility, mathematical model.

1. UVOD

1.1. Uloga termoelektrana u modernom energetskom sustavu

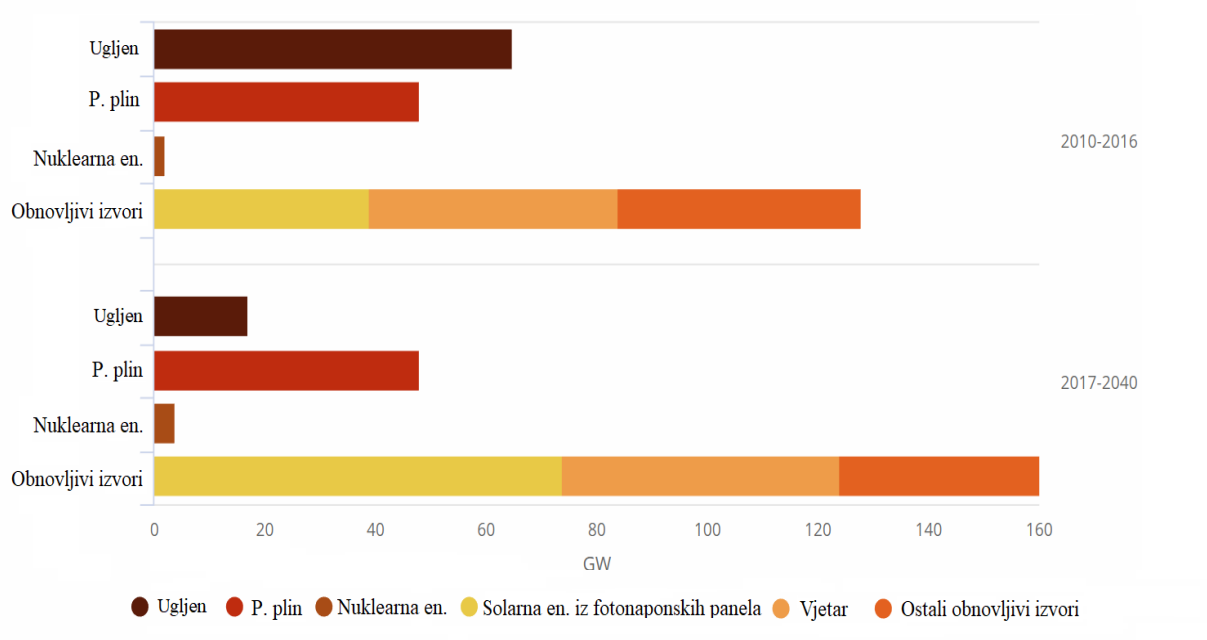
Zbog velikih količina varijabilnih izvora na tržištima električne energije u Europi postoji potreba za termoenergetskim postrojenjima koja su veoma fleksibilna. Razlog tome je što operateri tržišta prvo angažiraju postrojenja koja nude najjeftiniju energiju, odnosno postrojenja koja imaju najmanje varijabilne troškove. Najmanje varijabilne troškove imaju obnovljivi izvori energije čija postrojenja posluju s varijabilnim troškovima koji su bliski nuli. Dakle postoji tendencija da se svi varijabilni izvori unutar električne mreže angažiraju u potpunosti čime se za vjetrovitih i sunčanih sati smanjuje veleprodajna cijena električne energije i smanjuje broj pogonskih sati termoelektrana.



Slika 1. Sudjelovanje tehnologija na veleprodajnom tržištu električne energije ovisno o cijeni električne energije; [1]

Također obnovljivi izvori gotovo nikad nisu dovoljni za namirivanje svih potreba za električnom energijom pa u razdobljima u kojima nema dovoljnih količina obnovljivih izvora postoji potreba za proizvodnjom energije iz drugih izvora, odnosno postoji potreba za

namirivanjem tzv. rezidualne potražnje za električnom energijom. Rezidualna potražnja za električnom energijom predstavlja preostalo električno opterećenje kad se od ukupnog električnog opterećenja oduzme opterećenje koje je namireno izvorima koji posjeduju niske varijabilne troškove. Rezidualno opterećenje se mijenja gotovo jednakom brzinom kao i proizvodnja iz obnovljivih izvora te postrojenja koja služe za namirivanje tog opterećenja moraju posjedovati mogućnost povećanja ili smanjenja opterećenja jednakom brzinom kojom se mijenja rezidualno opterećenje, odnosno proizvodnja energije iz obnovljivih izvora energije i samo električno opterećenje električne mreže. Dakle postoji potreba za postrojenjima koja će imati veliku fleksibilnost proizvodnje električne energije. Ukoliko postrojenje nije u stanju jeftino i brzo smanjiti proizvodnju električne energije kada je došlo do naglog porasta proizvodnje iz obnovljivih izvora, postoji mogućnost za pojavom negativnih cijena na veleprodajnom tržištu električne energije jer se takvim nefleksibilnim postrojenjima više isplati plaćati potrošačima da povećaju potrošnju nego gasiti samo postrojenje. Također je neophodno omogućiti brzo i jeftino pokretanje postrojenja te postizanje dovoljno strmih gradijenata opterećenja postrojenja. Poželjna je i mogućnost korištenja postrojenja na što nižem stabilnom opterećenju. Povećanje fleksibilnosti postrojenja je moguće ostvariti dobrim poznavanjem ograničenja samih postrojenja te postojanjem voljnosti njihovog prekoračenja prilikom samog procesa povećavanja fleksibilnosti.



Slika 2. Projekcije prosječnog godišnjeg povećanja kapaciteta eksploatacije izvora energije u svijetu; [2]

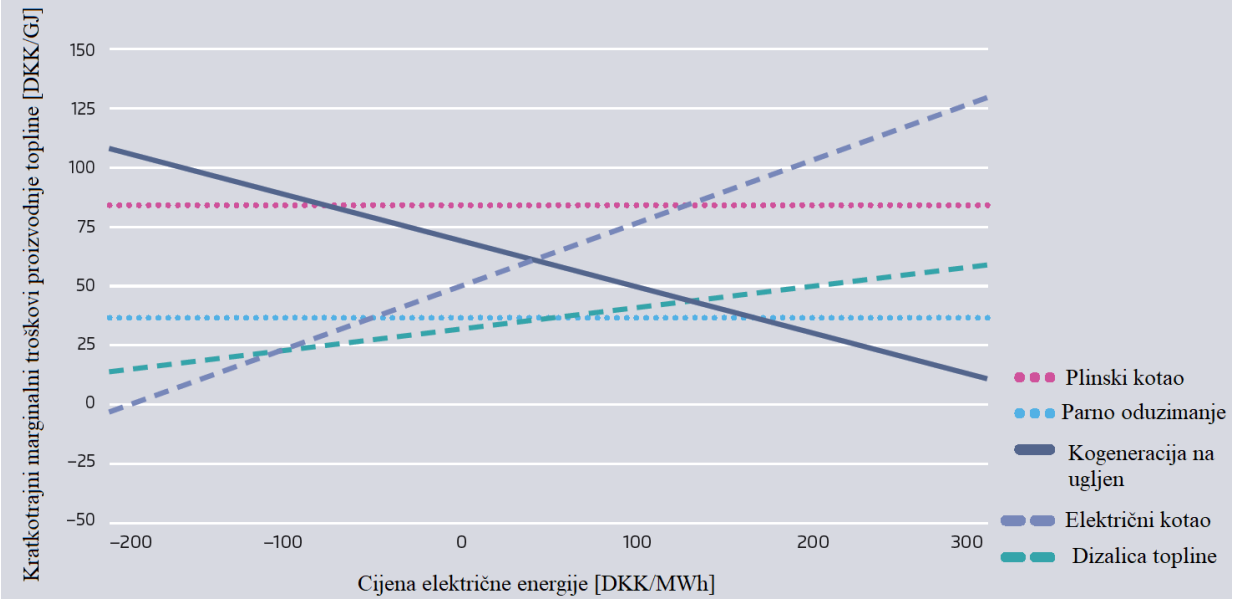
Globalno zatopljenje kao i težnja Europske unije da postane što neovisnija o uvozu energentima kojima je ona siromašna imali su za posljedicu uređivanje strategija razvoja zemalja članica kao i implementaciju pravnih podloga koje su utjecale na ubrzan razvoj i povećanje isplativosti korištenja obnovljivih izvora energije poput vjetroelektrana i solarnih fotonaponskih elektrana. U [2] postoje projekcije u kojima je navedeno da će se u slijedećih trideset godina prosječno godišnje u svijetu graditi 75 GW solarnih izvora te 40 GW vjetroelektrana. Dakle rasti će i potreba za fleksibilnim postrojenjima radi namirivanja sve varijabilnijeg rezidualnog opterećenja. Viškovi proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora zbog manjka fleksibilnosti postrojenja za namirivanje rezidualnog opterećenja mogu se djelomično isporučiti susjednim tržištima električne energije ukoliko postoji međusobna povezanost ili pak korištenjem tehnologija skladištenja energije poput reverzibilnih hidroelektrana ili baterija skladištiti i koristiti onda kada je to najpovoljnije, odnosno kada je cijena na tržištu najveća.

Osim što mogu sudjelovati na tržištu električne energije ukoliko su dovoljno fleksibilne termoelektrane mogu sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga. Pomoćne usluge podrazumijevaju primarnu, sekundarnu i tercijarnu rezervu, regulaciju napona, rotirajuću rezervu, hladnu rezervu. Primarna rezerva se automatski aktivira ukoliko dođe do određenih devijacija u frekvenciji električne mreže, a moguća je njena aktivacija unutar raspona od 5 do 30 sekundi. Sekundarna rezerva se aktivira unutar raspona do 5 min ukoliko dođe do devijacija u razmjeni električne energije te se ona automatski aktivira. Tercijarna rezerva se aktivira ručno unutar 7 do 15 min kako bi se primarna i sekundarna rezerva mogle isključiti. Ukoliko postoji odstupanje u proizvedenoj energiji iz obnovljivih izvora u odnosu procijenjene vremenskom prognozom, kao i odstupanje u električnoj potražnji javlja se potreba za aktivacijom rezervi.

Kod termoenergetskih postrojenja proizvedena električna energija danas je zapravo nusproizvod proizvodnje topline kod centraliziranih toplinskih sustava. Proizvodnjom toplinske i električne energije primjenom kogeneracije osigurava se bolja učinkovitost samih sustava. Korištenje kogeneracije smanjuje mogućnost elektrana da balansiraju proizvodnju iz obnovljivih izvora energije zato jer moraju namiriti svo toplinsko opterećenje sustava. Kod kombinirane proizvodnje kod kondenzacijskih parnih turbina niskotlačni dio turbine je moguće zaobići korištenjem oduzimanja ukoliko su povećane toplinske potrebe sustava, ukoliko postoji velika potreba za proizvodnjom električne energije niskotlačna turbina se može koristiti za proizvodnju električne energije. Kod nekih postrojenja postoji mogućnost potpunog zaobilaženja turbine prilikom malog rezidualnog opterećenja čime se povećava fleksibilnost

ovakvih postrojenja. Također vrlo korisna je mogućnost korištenja toplinskog skladištenja energije za postizanje veće fleksibilnosti cijelog sustava.

Postrojenja koja ne mogu ostvariti dovoljno visoku razinu fleksibilnosti pri umjerenim količinama nepoželjnih emisija morati će se osuvremeniti ili prestati koristiti zbog čega će ih morati zamijeniti nova postrojenja. Pošto je u načelu vrlo teško kod kogeneracija posjedovati odvojenu fleksibilnost toplinske i električne energije kao vrlo zanimljiva opcija je korištenje vršnih toplinskih izvora za namirivanje toplinske energije u centraliziranim toplinskim sustavima. Vršni toplinski izvori posjeduju niže investicijske troškove u odnosu na temeljne, ali više varijabilne troškove. Također imaju znatno bolju fleksibilnost u odnosu na temeljene izvore. Kogeneracijski vršni toplinski izvori kao i toplinski izvori koji koriste električnu energiju kao izvor mogu sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga električne energije ukoliko imaju dovoljno veliku fleksibilnost.



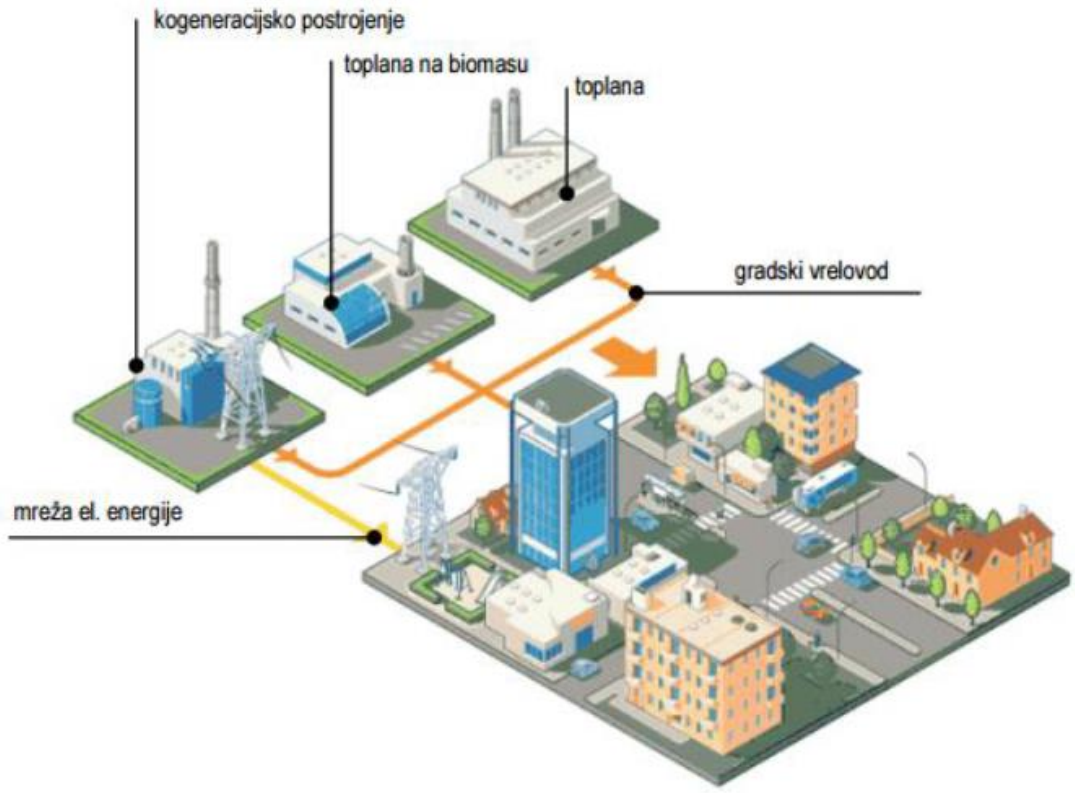
Slika 3. Kratkotrajni marginalni troškovi proizvodnje topline raznih tehnologija; [1]

U trenutcima kada je na raspolaganju puno obnovljivih izvora energije postaje isplativo i ekološki prihvatljivo koristiti tehnologije vršnih jedinica poput električnih kotlova i dizalica topline koje mogu imati faktor grijanja (*COP*) preko 3.5. Korištenje dizalica topline omogućilo bi proizvodnju toplinske energije uz dizanje stupnja iskoristivosti cijele toplane, ali uz uvjet da postoji adekvatna mreža cjevovoda s niskotemperaturnim razvodom i uz veći broj radnih sati u odnosu na električne kotlove. Na slici 3 je vidljivo da kada je cijena električne energije najviša najisplativije je korištenje kogeneracija i plinskih kotlova, kako cijena električne energije pada

postaje isplativo korištenje dizalica topline i električnih kotlova. Za vrijeme negativne cijene električne energije najisplativije je korištenje električnih kotlova zato jer mogu potrošiti više energije od dizalica topline koje imaju visok toplinski učin.

2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI

Centraliziranim toplinskim sustavima definiramo sustave grijanja koji proizvode toplinsku energiju centralizirano na jednom mjestu u toplanama, toplanama-termoelektranama ukoliko su većih snaga ili kotlovnicama snaga iznad 5 MW za grijanje naselja i skupina zgrada [3]. Toplina se odvodi zagrijanim radnim medijem (vodom ili parom) do grijanih zgrada razvodnim cijevnim sustavom (primarnim krugom), gdje se u toplinskim podstanicama pomoću toplinskih izmjenjivača predaje sekundarnom krugu (cijevnom sustavu zgrade). Pošto su grijane zgrade i objekti udaljeni od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara od toplinskih izvora ovakvo grijanje se naziva daljinskim centraliziranim grijanjem.



Slika 4. Shematski prikaz centraliziranog toplinskog sustava; [3]

Toplane ne moraju opskrbljivati samo objekte toplinskom energijom za grijanje, nego i industrijske procese potrebnom toplinom. Smisao ovakvog sustava opskrbljivanja toplinskom energijom je da se izgaranje energenata ne odvija u puno manjih kotlovnica u zgradama, već u jednoj toplani koja posjeduje puno bolji stupanj iskoristivosti ogrijevne vrijednosti goriva zbog

manjih toplinskih gubitaka i savršenijeg ložišta. Posljedica bolje iskoristivosti su manja potrošnja goriva kao i mogućnost kvalitetnijeg ublažavanja štetnog utjecaja na okoliš te jeftinija proizvodnja topline. Također ovakvi sustavi posjeduju bolje vođenje dinamike sustava što povećava pogonsku sigurnost. Pošto se konverzija kemijske energije u toplinsku odvija na jednom mjestu, nisu više neophodna skladišta za gorivo, dimnjaci i kotlovnice pojedinačnih grijanih zgrada[3]. Sustavi centraliziranog daljinskog grijanja danas su nezamislivi bez korištenja visokoučinkovitih kombiniranih kogeneracija. Danas je u upotrebi treća generacija centraliziranih toplinskih sustava, ali se teži prema četvrtoj generaciji centraliziranih toplinskih sustava. Treća generacija centraliziranih toplinskih sustava je u upotrebi od 1980. godine, a koristi se i danas. Za transport ogrjevnog medija koriste se izolirane, zavarene cijevi zakopane u zemlji. Toplina se prenosi kroz distribucijski sustav toplovoda kroz koji struji voda kao medij koja je na temperaturama nižim od 100 °C. Koriste se kompaktne izolirane podstanice. U ovoj generaciji postaje bitno praćenje potrošnje toplinske energije te učinkovitost samog sustava postaje prioritet. Koristi se otpadna toplina iz industrije, solarni kolektori velikih razmjera pa i geotermalna energija, plinski kotlovi, kotlovi na biomasu, kogeneracija koja koristi otpad kao gorivo, kogeneracije na biomasu, ugljen, lož ulje, otpad, kogeneracije na lož ulje i ugljen. Skladištenje osjetne topline se sve više koristi za balansiranje potražnje. Učinkovitost ovakvih sustava je relativno visoka zbog relativno niskih temperatura vode u cijevima te zbog korištenje bolje izolacije cijevi, toplinskih podstanica te zbog korištenja naprednijih tehnologija i materijala u samim postrojenjima. Nedostatak su gubici toplinske energije u distribucijskoj mreži te postojanje troška na održavanje toplovodne mreže[4],[5].

Idući korak u razvoju centraliziranih sustava su sustavi četvrte generacije. Takvi sustavi koriste još niže temperature vode u izoliranim cijevima za prijenos toplinske energije. Temperature polaza mogu biti i niže od 70 °C (50 °C – 70 °C) što ima za posljedicu još manje toplinske gubitke u odnosu na prijašnje generacije Ovakvi sustavi bez problema mogu koristiti centralizirane toplane koje koriste dizalice topline velikih razmjera, zbog adekvatne temperature polaza. Viškovi električne energije proizvedene u vjetroeletranama i fotonaponskim elektranama velikih razmjera moći će se skladištiti u sezonskim i dnevnim spremnicima osjetne topline korištenjem dizalica topline i električnih kotlova. Sami potrošači koji budu adekvatno opremljeni moći će proizvoditi toplinsku energiju i plasirati je u sustav. Ovakvi centralizirani toplinski sustavi podrazumijevaju i izgradnju distribuirane mreže za centralizirano hlađenje tamo gdje je to isplativo[4],[5].

3. TOPLINSKO OPTEREĆENJE CENTRALIZIRANIH TOPLINSKIH SUSTAVA

Toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava može se smatrati jednakim zbrojem toplinskih opterećenja svih potrošaća koji su spojeni na distribucijsku mrežu i sumi svih toplinskih gubitaka i eventualno gubitaka medija koji prenosi toplinu u sustavu koji se može manifestirati kao propuštanje u cjevovodima. Na opskrbu toplinskih potrošaća toplinom u centraliziranim toplinskim sustavima moguće je utjecati s više međusobno neovisnih faktora:

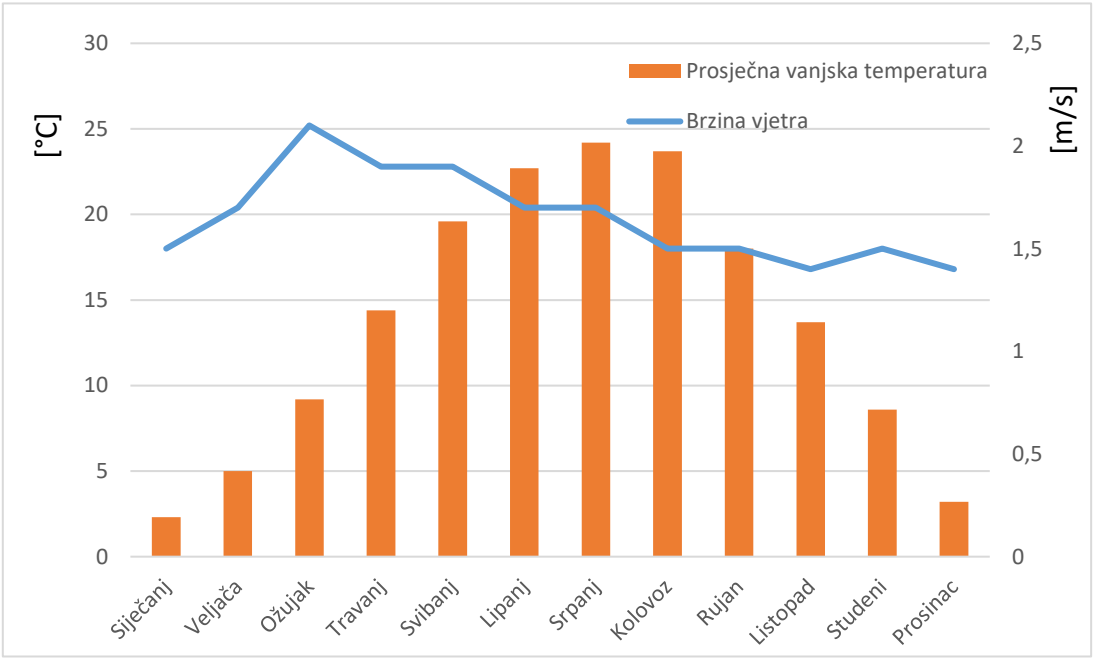
- Regulacijom razlike tlaka polaza i povrata u primarnom krugu, gdje je ključno da razlika tlaka najudaljenije točke sustava bude održavana na zadovoljavajućoj razini kako bi protok bio dovoljno velik,
- Regulacijom temperature polaza ovisno o vanjskoj temperaturi,
- Regulacijskim ventilima na primarnoj strani podstanica čija je zadaća održavanje konstantne temperature tople vode koja struji kroz grijanu zgradu prilagođavanjem protoka na strani primarnog kruga ovisno o vanjskoj temperaturi,
- Regulacijom potrebne toplinske energije sustava ovisno o otvorenosti ventila na radijatorima, o radu ventilacijskih sustava i o potrošnji potrošne tople vode.

Toplinski tok koji se predaje centraliziranom toplinskom sustavu općenito je jednak umnošku masenog protoka medija, specifičnog toplinskog kapaciteta medija i temperaturne razlike povrata i polaza. Dakle promjene toplinskog opterećenja je moguće namirivati dizanjem i spuštanjem temperature polaza ili promjenom protoka medija kroz podstanice. Ukoliko se promjena potrošnje topline namiruje promjenom protoka kroz toplinske podstanice odziv promjene potrošnje prema toplani se kreće brzinom zvuka u mediju. Ukoliko se promjena potrošnje namiruje razlikom temperature odziv promjene potrošnje prema toplani se kreće brzinom strujanja medija, odnosno vode. Što znači da će toplana dobiti u prvom slučaju informaciju o tome da li treba povećati proizvodnju topline u roku od nekoliko sekundi do pola minute, dok će u drugom slučaju kod velikih distribuiranih sustava toplani trebati preko sat vremena kako bi dobile informaciju u tome da li treba povećati ili smanjiti količinu topline koju treba proizvesti, što znači da takvi sustavi potrebnu količinu topline trebaju unaprijed predvidjeti ovisno o mjerenim podacima iz prošlosti i obrascima ponašanja toplinskog

opterećenja ovisno o dobu dana i godišnjem dobu. Sezonske promjene toplinskog opterećenja puno su većih razmjera u odnosu na dnevne promjene toplinskog opterećenja[6].

3.1.1. Sezonske promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava

Sezonske promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava najviše ovise o velikim razlikama između vanjskih temperatura ljeti i zimi i zahtjevu za ugodnost boravka u prostorijama da temperatura tijekom cijele godine bude približno ista .



Slika 5. Prosječna mjesečna vanjska temperatura i prosječna mjesečna brzina vjetra Grada Zagreba na visini 10 m; [7]

Promjene toplinskog opterećenja možemo podijeliti na dvije komponente ovisno o uzroku toplinskog opterećenja ovisi ljudskom faktoru ili o okolišu u kojem se sustav nalazi:

- promjena toplinskog opterećenja zbog ljudskog faktora,
- promjena toplinskog opterećenja zbog prirodnih faktora.

Promjena toplinskog opterećenja zbog ljudskog faktora ovisi o racionalnom ili neracionalnom ponašanju ljudi kao potrošača toplinske energije.

Bitna komponenta ljudskog faktora za sezonske promjene toplinskog opterećenja je potrošnja potrošne tople vode koju ljudi više koriste zimi dužeg boravka u samim zgradama. Ljeti i tijekom praznika dio populacije odlazi iz gradova na odmore pa više nema potrebe namirivati jednake količine toplinske energije za potrošnu toplu vodu. Potrošna topla voda se može pripremati toplinom iz centraliziranih toplinskih sustava na dva načina:

- protočnom pripremom,
- posrednom pripremom.

Kod protočnog pripremanja potrošne tople vode, voda se grije direktno tako da se ona količina vode koja je potrebna za korištenje u trenutku korištenja zagrijava izmjenjivačima topline koji su spojeni sa centraliziranim, sustavom grijanja. Mane ovakvih sustava su što više utječu na promjenjivost toplinskog opterećenja cijelog sustava i to što su potrebne veće izmjenjivačke površine[6].

Posredna priprema tople vode podrazumijeva postojanje toplinskog spremnika s vodom koji omogućava akumulaciju toplinske energije u vodi i njezino korištenje kada je to potrebno. Korištenjem potrošne tople vode spremnik se puni hladnom vodom koja se naknadno grije na zadanu temperaturu. Još jedan razlog zašto je potrošnja toplinske energije veća zimi je jer je obično temperatura vode koja se grije zimi niža nego ljeti[6].

Promjene toplinskog opterećenja zbog prirodnih faktora najviše ovisi o kvaliteti izolacije, o toplinskim gubicima u distribucijskoj mreži. Također značajan utjecaj na promjenu toplinskog opterećenja zbog utjecaja prirodnih faktora ima sunčevo zračenje i strujanje vjetra. Sunčevo zračenje smanjuje potrebu za grijanjem jer povisuje vanjsku temperaturu zidova zgrada što smanjuje toplinski tok kroz zidove, također sučevo zračenje koje prolazi kroz staklene površine zagrijava unutrašnjost zgrade[6].

Sunčevog zračenja najviše ima ljeti, ali je za sezonu grijanja najznačajniji utjecaj tijekom proljetnih i jesenskih mjeseci kada je sama sezona grijanja u tijeku. Vjetar povećava toplinsku potrošnju zbog infiltracije, kojom hladan zrak ulazi u prostorije grijane zgrade i mora biti ugrijan na zadovoljavajuću temperaturu. Iako se iz slike 5 vidi da je prosječna brzina vjetra na primjeru Grada Zagreba najveća od ožujka do srpnja infiltracija ima najvećeg utjecaja na toplinsko opterećenje tijekom hladnih zimskih mjeseci kada je potrebno ugrijati taj zrak za veću

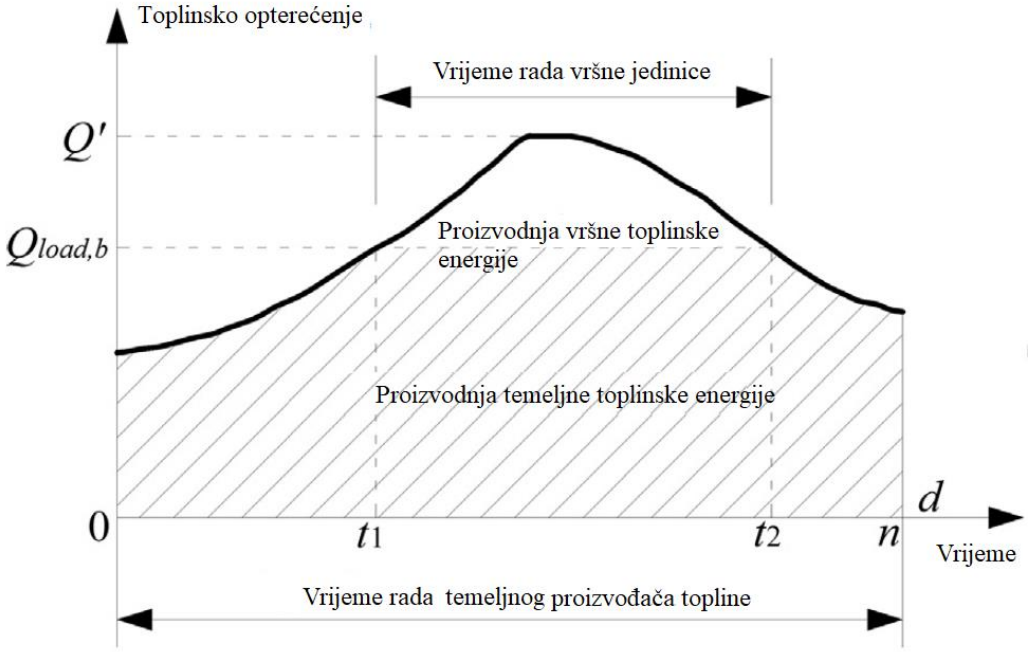
temperaturnu razliku u odnosu na travanj (u gradu Zagrebu sezona grijanja traje do prvog svibnja).

3.1.2. Dnevne promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava

Dnevne promjene toplinskog opterećenja centraliziranih toplinskih sustava su uglavnom posljedica faktora ljudskog ponašanja. Taj utjecaj je povezan kako s individualnim ponašanjem ljudi, tako i s kolektivnim navikama populacije. Primjer individualnog utjecaja na potrošnju je kada se osoba odluči oprati ruke potroši male količine toplinske energije čime se poveća toplinsko opterećenje toplinskog sustava. Kolektivne navike populacije su na primjer spavanje tokom noći ili rad osam sati dnevno, kolektivno korištenje tople vode nakon buđenja, kao i prije spavanja. Na radnim mjestima nema potrebe trošiti toplinu tijekom noći. Svemu tome treba prilagoditi proizvodnju toplinske energije na dnevnoj razini. Što se tiče dnevnih promjena toplinskog opterećenja zbog prirodnih faktora promjena intenziteta zračenje sunca tijekom dana je značajan faktor kao i promjena vanjske temperature tijekom dana [6].

3.2. Bazno toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava

Toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava u prošlosti su namirivale uglavnom toplane-termoelektrane koje su u svojoj konfiguraciji posjedovale nekakvu vrstu parnog postrojenja koje samo po sebi nema veliku fleksibilnost i posjeduje veliku inerciju prilikom promjene izlazne toplinske snage, također su bile velikih razmjera, odnosno izlaznih snaga. Zbog tog razloga su takve toplane namirivale bazno toplinsko opterećenje i karakterizirane su kao temeljnim izvorom energije. Bazno toplinsko opterećenje na dijagramu toplinskog opterećenja je donji dio krivulje opterećenja. Prilikom početka i kraja sezone grijanja bazne toplane su u stanju namiriti gotovo cijelo toplinsko opterećenje uz relativno visoku učinkovitost proizvodnje energije. Visoka učinkovitost sustava osigurana je korištenjem kombiniranih izvora energije gdje se često koriste plinske turbine u kombinaciji s parnim turbinama te kogeneracija toplinske i električne energije.



Slika 6. Dijagram toplinskog opterećenja; [8]

3.3. Vršno toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava

Vršno toplinsko opterećenje centraliziranih toplinskih sustava javlja se u sezoni grijanja kada su svi faktori nabrojani u 3. poglavlju najnepovoljniji i kada temeljna proizvodnja topline više nije dovoljna za zadovoljavanje svih toplinskih potreba sustava. Tada se javlja potreba za uključivanjem vršnih jedinica za namirivanje ostalih toplinskih potreba sustava čime se osigurava zadovoljavanje svih potreba sustava uz visoku učinkovitost. Osim uključivanjem vršnih toplinskih jedinica, vršno toplinsko opterećenje se može regulirati pametnim vođenjem na strani potrošača topline ili korištenjem kratkoročnog ili sezonskog skladištenja topline.

U ovom radu naglasak je na korištenju vršnih toplinskih jedinica uz korištenje visokoučinkovite kogeneracijske jedinice kao baznim izvorom pa će taj dio biti pobliže razmatran. U načelu rada sustave kombinirane proizvodnje toplinske energije moguće je izgraditi tako da funkcioniraju na dva principa rada:

- spregnuti princip rada,
- odvojeni princip rada.

Centralizirani toplinski sustavi koji rade na spregnutom principu rada u trenucima kada postoji vršno toplinsko opterećenje podrazumijevaju međusobnu povezanost temeljnih izvora kao i

onih vršnih, što znači da će toplinske jedinice dogrijavati ili pak ulijevati zagrijanu vodu u zajednički kolektor pri istim parametrima procesa uz povećavanje protoka cirkulacijske pumpe. Ovakva povezanost čini izrazitu spregnutost toplinskih i hidrauličkih uvjeta samog sustava[8].

Centralizirani toplinski sustavi koji rade na odvojenom principu rada prilikom najvećih toplinskih opterećenja sustava dijele sam sustav opskrbe toplinskom energijom na više dijelova tako da temeljni izvori opskrbljuju jedno područje toplinom, a vršni izvori druga područja. Dakle svako područje ima svoj izvor toplinske energije sa svojim toplinskom kapacitetom i mogućim rasponom namirivanja toplinskog opterećenja [8].

4. TEHNOLOGIJE PRIMJERENE ZA NAMIRIVANJE VRŠNOG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA

Kao što je i prije spomenuto postrojenja i uređaje za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja nazivamo vršnim jedinicama. To su postrojenja i uređaji koji su manjih kapaciteta u odnosu na temeljna postrojenja. U pravilu posjeduju veće specifične troškove goriva u odnosu na temeljna postrojenja, a manje investicijske troškove. Godišnji pogonski udio vršnih jedinica je uglavnom od 1000 do 2000 sati godišnje.

Da bi tehnologija bila prihvatljiva za korištenje za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja mora biti u stanju imati veliku fleksibilnost rada. Fleksibilnost rada podrazumijeva:

- rad u širokom rasponu toplinskog opterećenja same jedinice,
- niska razina tehničkog minimuma, odnosno razine opterećenja jedinice pri kojoj još uvijek može stabilno raditi bez prevelikih razina ekološki neprihvatljivih emisija,
- dovoljno brz odaziv promjene proizvodnje toplinske energije ovisno o promijeni opterećenja centraliziranog toplinskog sustava,
- mogućnost učestalog pokretanja jedinice iz stanja mirovanja.
- Ukoliko je riječ o kogeneracijskim jedinicama ili o tehnologijama koje koriste električnu energiju kao izvor energije poželjna je mogućnost brze regulacije električne snage i opterećenja kako bi bile u mogućnosti sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga električne energije.

Glavne tehnologije koje mogu poslužiti za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja i koje su u ovom radu opisane su:

- plinski kotlovi,
- plinski motori,
- plinske turbine,
- dizalice topline,
- električni kotlovi.

Pobliže će biti razmatrani u sljedećim poglavljima.

4.1. Plinski kotlovi

Plinski kotlovi su uređaji koji se koriste za pretvorbu kemijske energije koja je sadržena u prirodnom plinu (često uz prirodni plin mogu koristiti i lož ulje) u toplinsku energiju za zagrijavanje vode. Plinski kotlovi su u izvedeni kao izmjenjivači topline s cijevima u plaštu. Ovakve uređaje možemo zvati toplovodnim kotlovima ukoliko služe za proizvodnju tople vode ili generatorima pare ukoliko proizvode pregrijanu paru. Pregrijana para može poslužiti u tehnološkim industrijskim procesima, za pogon parnih turbina u termoelektranama, može se koristiti za grijanje centraliziranih toplinskih sustava ili za pogon brodova. Ukoliko se proizvodi topla voda ona može služiti za grijanje centraliziranih toplinskih sustava kao i za centralno grijanje zgrada. Prema mediju koji struji kroz cijevi možemo ih podijeliti na:

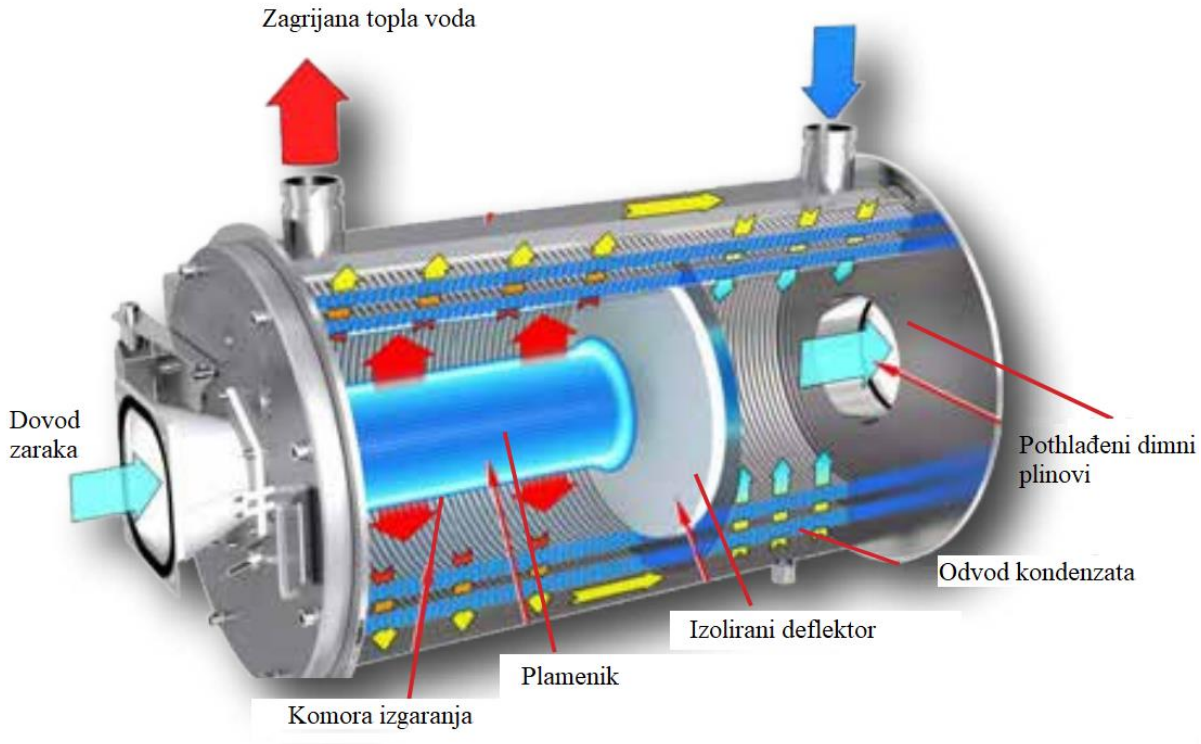
- vatrocijevne kotlove,
- vodocijevne kotlove.

Vatrocijevni kotlovi često posjeduju orebrenu plamenicu u kojoj se odvija izgaranje goriva koje nakon stvaranja dimnih plinova struji kroz cijevi koje su uronjene u vodu. Cirkulacija vode je prirodna. Obično imaju više prolaza, što ovisi o samoj konstrukciji kotla. Ukoliko postoji potreba za proizvodnjom pare cijevi ne moraju u potpunosti biti uronjene u vodu, a moguće je korištenje dodatnog izmjenjivača za pregrijanije vodene pare. Veliki promjer samog kotla ograničava maksimalne tlakove pregrijane pare koju kotao može proizvesti, a s time i maksimalne temperature proizvedene vode.

Vodocijevni kotlovi su kotlovi kod kojih cijevi kroz kojih struji voda oplahuju samo ložište i tako čine većinu ogrijevne površine kotla. Dimni plinovi struje s vanjske strane samih cijevi. Gradijenti gustoće vode koji su uzrokovani zagrijavanjem vode osiguravaju prirodno strujanje vode prema gornjim segmentima cijevi. Strujanje vode može biti i prisilno. Položaj i nagib cijevi uvjetuje vrlo intenzivno zagrijavanje vode koja se u njima nalazi. Ovakvi kotlovi se obično okrste za proizvodnju velikih količina pregrijane pare. Obično imaju dva bubnja. Manji bubanj se obično nalazi s donje strane kotla i u njega struji napojna voda, dok se veći nalazi s gornje strane samog kotla i on je obično djelomično potopljen. S gornje strane većeg bubnja se oduzima suhozasićena vodena para koja zatim ide u sekciju cijevi za pregrijavanje i izlazi iz samog kotla. S donje strane ulazi vodena para i vrela kapljevina u bubanj, a vrela kapljevina izlazi i recirkulira ponovno kroz sustav cijevi kroz sam kotao.

Danas postoje izvedbe kotlova koji omogućavaju iskorištavanje latentne topline vodene pare iz dimnih plinova. Takve plinske kotlove nazivamo kondenzacijskim kotlovima. Kondenzacijski kotlovi imaju veću učinkovitost samog procesa zagrijavanja tople vode. Iskorištavanje latentne topline vodene pare je moguće iz razloga što goriva koja se koriste za izgaranje sadrže uglavnom ugljik koji se potpunim izgaranjem pretvara u ugljični dioksid i vodik koji se pretvara u vodenu paru[3].

Kondenzacija dimnih plinova je moguća zbog korištenja dodatne izmjenjivačke površine na kojoj se odvija kondenzacija dimnih plinova i zbog korištenja niskih temperatura povratne vode. Kako bi se omogućila što veća razina kondenzacije vodene pare dimni plinovi se hlade na niske temperature (od 35-75°C). Ovakvi kotlovi omogućavaju uštedu goriva u odnosu na konvencionalne kotlove u rasponu od 15 do 20%. Kod konvencionalnih kotlova temperatura dimnih plinova je ograničena na 160°C zbog osiguravanja dovoljno velikog gradijenta gustoće o odnosu na atmosferski zrak kako bi se osigurao zadovoljavajući iznos uzgonskih sila koje omogućavaju strujanje dimnih plinova[3].



Slika 7. Kondenzacijski toplovodni kotao; [9]

Drugi razlog je sprječavanje kondenzacije dimnih plinova koja je kod kondenzacijskih kotlova poželjna. Razlog za sprječavanje kondenzacije dimnih plinova je korozivnost kondenzata koji osim što sadrži u sebi vodu sadrži također i kisele produkte poput ugljične kiseline, sulfate, fluoride, nitrate. Ako se loži lož ulje dimni plinovi sadrže i sumporne okside koji se u dodiru s vodom pretvaraju u sumporastu i sumpornu kiselinu. Kiselost uzrokuje koroziju na dodirnim površinama gdje se stvara kondenzat, zato kod kondenzacijskih kotlova kondenzacijski dio mora biti izrađen od otpornih materijala poput nehrđajućih čelika koji sadrže krom, nikal i moldavij ili od legura na bazi nikla[10].

Kod kondenzacijskih kotlova je potrebno osigurati odvod kiselog kondenzata na svim površinama na kojim postoji mogućnost njegovog slijevanja i nakupljanja. Ukoliko su kotlovi većih snaga potrebno je osigurati neutralizaciju kondenzata korištenjem lužnatih sredstava.

U pogledu namirivanja vršnih toplinskih opterećenja centraliziranih toplinskih sustava ukoliko se toplina u toplinskom sustavu prenosi pregrijanom parom i ukoliko su potrebne velike snage vršnih jedinica pogodni su veliki vodocijevni plinski kotlovi odnosno generatori pare. Ukoliko se za prijenos toplinske energije u centraliziranom toplinskom sustavu koristi topla voda na temperaturama od 80 do 150°C pogodni su toplovodni vatrocijevni kotlovi. Ako se za prijenos topline u centraliziranom toplinskom sustavu koristi voda na nižim temperaturama od 80 °C i s vrlo niskim temperaturama povrata tople vode moguće je korištenje kondenzacijskih kotlova.

4.2. Plinski motori

Motori s unutarnjim izgaranjem su vrlo zrela tehnologija koja se danas još uvijek posvuda koristi za pogon cestovnih, tračničkih vozila kao i brodova. Ne samo da imaju veliku ulogu u prometu, nego su važni za pogon rezervnih generatora bolnica i sličnih zgrada kod kojih je od presudne važnosti opskrba električnom energijom za napajanje električnih uređaja. S pogleda proizvodnje električne i toplinske energije motori s unutarnjim izgaranjem su jako zanimljivi zbog mogućnosti kogeneracije spomenutih energetskih oblika. Također ubrzani razvoj uzrokovan pritiskom sve većih zahtjeva na ekonomičnost i smanjen ekološki utjecaj uzrokovali su porast učinkovitosti ovakvih uređaja te smanjenje ekološki neprihvatljivih emisija.

4.2.1. Princip rada plinskih motora

Motori s unutarnjim izgaranjem su tehnologija koja poput kotlova koristi energiju zarobljenu u kemijskim vezama goriva koju za razliku od konvencionalnih kotlova ne pretvaraju samo u toplinsku energiju nego i u mehaničku energiju koja se može vratilom prenijeti na električni generator i tako proizvesti električnu energiju. Na izlazu iz motora struje ispušni plinovi koji mogu predati toplinu vodi i tako mogu namirivati toplinske potrebe toplinskih sustava. Za proizvodnju toplinske i električne energije mogu poslužiti motori koji koriste Ottov kružni proces za koji je potrebna svjećica za iniciranje izgaranja goriva te motori koji koriste Dizelov kružni proces za koji svjećica nije potrebna. Plinski motori koriste Ottov kružni proces. Komora izgaranja je cilindričnog oblika u kojoj zabrtvljeni klip spojen s koljenasti vratilom preko stapajice pravocrtno gibanje pretvara u rotacijsko gibanje. Više cilindara u motoru pogoni jedno koljenasto vratilo [11].

Iako plinski motori mogu biti i dvotaktni oni koji se koriste za proizvodnju električne i toplinske energije uglavnom su četverotaktnog tipa.

Današnje verzije plinskih Otto motora ostvaruju električnu učinkovitost i preko 46% ukoliko su većih snaga od 3 MW. Ukoliko je motor kogeneracijska jedinica može zagrijavati vodu dimnim plinovima i sustavom hlađenja. U tom slučaju je moguća iskoristivost ogrjevne vrijednosti goriva do 80%. Današnji proizvođači imaju u ponudi plinske motore električnih snaga do 18 MW [13].

Većina konstrukcija plinskih motora sa svjećicom je izvedena iz dizelskih motora. Plinski motori iste veličine u odnosu na dizelske imaju u pravilu od 20 do 40% manju snagu na vratilu. Proizvođači plinskih motora iz tog razloga obično povećavaju promjer cilindara motora za oko 10%. Manja snaga na vratilu u odnosu na dizelske motore je uzrokovana manjim kompresijskim omjerom koji je u rasponu od 9 do 12. Kako bi se povećao tlak zraka na usisu u cilindar kao i količina zraka često se na ispušnoj strani postavljaju turbine koje pogone kompresor na usisnoj strani motora. Iako dizelski motori imaju veći kompresijski omjer, korištenjem komore za predizgaranje i visokog pretička zraka plinski motori mogu imati veću učinkovitost od dizelskih motora, to ima za posljedicu povećanje emisije NO_x spojeva zbog ostvarivanja viših maksimalnih temperatura u cilindrima. Plinski motori mogu biti optimizirani za ostvarivanje što nižih razina emisija NO_x spojeva ali uz uvjet da učinkovitost motora padne od 1 do 1.5%[13]. U odnosu na dizelske motore plinski motori imaju manje investicijske troškove, a zbog korištenja čišćeg goriva i manjih kompresijskih omjera imaju duži životni vijek komponenti a s time manje troškove održavanja.

4.2.2. Sustavi hlađenja plinskih motora

Iskorištavanje toplinske energije plinskih motora jako utječe na ekonomičnost upotrebe takvih uređaja. Preko 60% energije goriva je sadržano u toplinskoj energiji ispušnih plinova i sustava hlađenja plinskog motora. Većinu otpadne topline je moguće dobiti rekuperacijom topline iz ispušnog sustava motora i iz sustava hlađenja cilindra i klipa, dok je manji dio energije moguće dobiti iz sustava hlađenja motornog ulja. Temperatura sustava hlađenja motornog ulja te temperatura sustava hlađenja cilindra i klipa obično je preniska da bi se proizvodila vodena para za potrebe grijanja ili za industrijske potrebe. Vodenu paru je moguće proizvesti korištenjem topline iz ispušnog sustava plinskog motora. Toplina sadržana u ispušnim plinovima plinskog motora može sadržavati od 30 do 50% raspoložive topline a temperature ispušnih plinova mogu biti od 380 do 540°C. Toplina koju može dobaviti sustav hlađenja cilindra i klipa obično sadrži do 30% energije koja se oslobodi izgaranjem goriva, a može proizvesti toplu vodu na temperaturama od 85 do 130°C. Iskorištavanjem toplinske energije plinski motori mogu iskoristiti i preko 80% topline koja se oslobodi izgaranjem goriva.

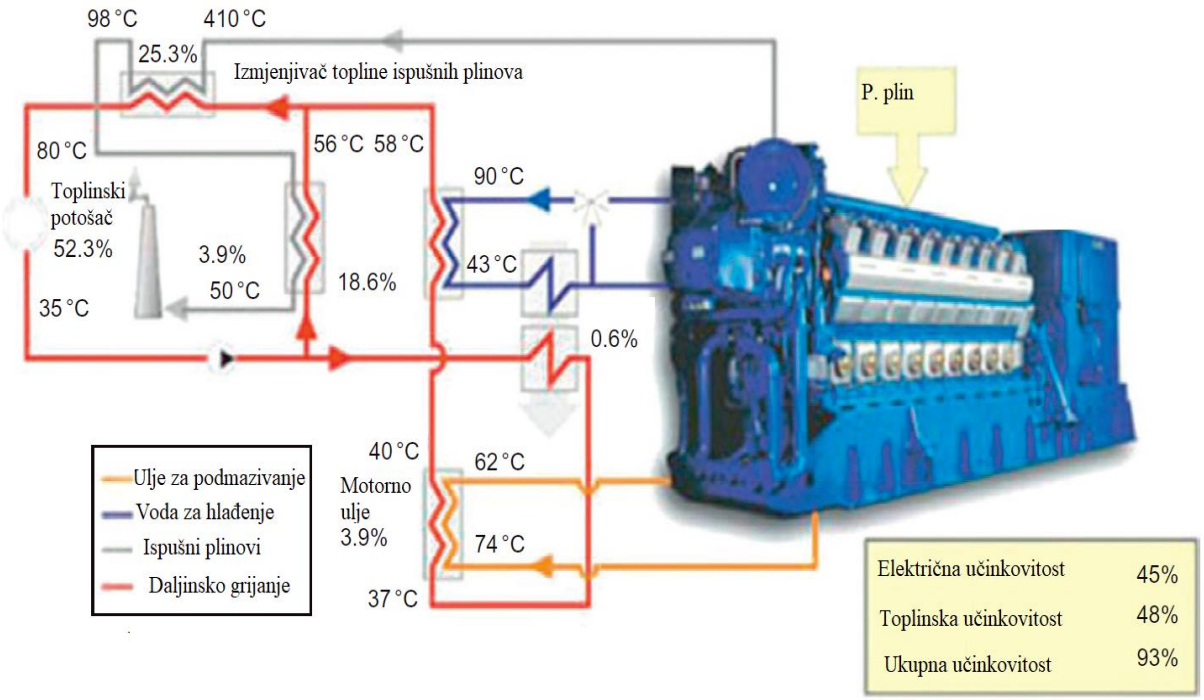
Sustave hlađenja je moguće podijeliti prema izvedbi na tri vrste sustava hlađenja:

- sustav hlađenja ispušnih plinova.
- dvofazni sustavi hlađenja,
- sustavi hlađenja s prisilnom konvekcijom,

Sustav hlađenja ispušnih plinova je u stanju proizvesti toplu vodu temperatura do 110°C i vodenu paru do 28 bar[13]. Minimalna temperatura dimnih plinova ovdje je kao i kod konvencionalnih plinskih goriva ograničena njihovom temperaturom kondenzacije kako bi se spriječilo negativno korozivno djelovanje na površinama gdje bi se kondenzat slijevao i nakupljao što znači da je moguće samo dio topline moguće iskoristiti. Sustavi su konstruirani tako da je temperatura ispušnih plinova održavana u rasponu od 120 do 180°C[13]. Ukoliko je moguće korištenje posebnih materijala koji su otporni na koroziju, moguće je hlađenje dimnih plinova do 40°C, ali je potrebno kao kod kondenzacijskih kotlova osigurati slijevanje i odvod kondenzata te njegovu neutralizaciju. Na takav način sustavi mogu imati ukupnu učinkovitost i preko 90%.

Dvofazni sustavi hlađenja rade na principu prirodnog strujanja vrele vode koja struji kroz plinski motor. Rashladna voda ulazi s donje strane motora. Prolaskom kroz motor voda se

zagrijava i počinje isparavati čime se formira dvofazno strujanje. Stvaranje vodene pare stvara gradijent gustoće vode po visini motora čime se omogućava prirodno strujanje rashladnog medija. Ovakav sustav se obično koristi zajedno sa sustavim hlađenja ispušnih plinova. Temperatura vode koja ulazi u motor je obično par stupnjeva niža od temperature isparavanja, također je uobičajeno održavanje parametara vodene pare koja izlazi iz motora blizu parametara suhozasićenja. Temperatura pare je obično ograničena na 120°C[11]. Takvo vođenje hlađenja osigurava uniformne temperature u samom plinskom motoru te osigurava poboljšanu učinkovitost cijelog sustava kao i dulji životni vijek komponenata samog motora zbog manjih toplinskih naprezanja.



Slika 8. Shematski prikaz kogeneracijskog postrojenje s plinskim motorom; [14]

Sustavi hlađenja s prisilnom konvekcijom su sustavi koji se najčešće koriste za hlađenje plinskih motora. Koriste pumpe za prisilnu cirkulaciju vode kroz kanale za hlađenje samog motora i kroz izmjenjivač topline. Ukoliko postoje viškovi proizvedene topline sustav je moguće hladiti korištenjem rashladnih vodenih tornjeva ili grijanjem vode stajačica i tekućica. Temperatura rashladnog medija kod ovakvih sustava je od 85 do 120°C[13]. Ovakvi sustavi služe za hlađenje cilindra i stapa motora te za hlađenje ulja i zraka nakon turbokompresora.

Ukoliko su potrebe za toplinom manje sustav hlađenja motora može biti neovisan o sustavu hlađenja ispuših plinova, ali obično za potrebe grijanje tople vode iz centraliziranih toplinskih sustava je optimalno korištenje tih sustava u sprezi. Tipični motori s unutarnjim izgaranjem namijenjeni za proizvodnju toplinske i električne energije pogone sinkrone električne generatore koje je potrebno pogoniti konstantnom brzinom vrtnje kako bi se proizvodila izmjenična električna struja s približno konstantnom frekvencijom. Kako prilikom pogona električno opterećenje pada povećava se toplinski tok koji se odvodi iz motora. Ukoliko toplinsko opterećenje kojeg treba opskrbiti toplinskom energijom nije dovoljno veliko prilikom pada električnog opterećenja da bi se sva odvedena toplina predala centraliziranom toplinskom sustavu, toplinu treba odvesti iz motora na druge načine kako ne bi došlo do pregrijavanja komponenti motora. Zbog toga plinski motori često prilikom smanjenja električnog opterećenja imaju manju učinkovitost koja na 50% nominalnog opterećenja pada za 8 do 10%. Kako bi se smanjio negativan utjecaj smanjene učinkovitosti na parcijalnom opterećenju motora poželjno je u fleksibilnim postrojenjima imati više zasebnih jedinica koje se po potrebi mogu uključivati i isključivati.

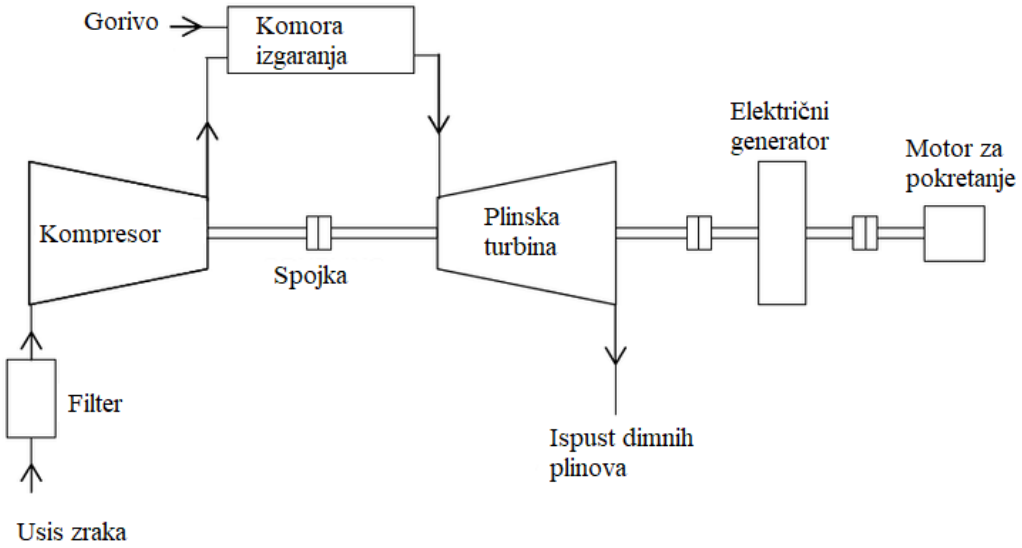
4.3. Plinske turbine

Za ubrzan razvoj plinskih turbina možemo zahvaliti vojnoj industriji koja je četrdesetih godina dvadesetog stoljeća intenzivno radila na razvoju mlaznih motora čiji je razmjere za primjenu u proizvodnji električne i toplinske energije bilo potrebno povećati. Plinske turbine je moguće koristiti za kogeneraciju toplinske i električne energije ili pak samo za proizvodnju električne energije ako je to potrebno iako takav rad danas nije poželjan. Današnja kogeneracijska postrojenja s plinskim turbinama imaju učinkovitost preko 60%, moguće ih je izgraditi u rasponima snage od par stotina kW do više stotina MW (preko 300 MW)[13]. Plinske turbine se često koriste za kombiniranu proizvodnju energije zajedno s parnim turbinama čime postižu najveće učinkovitosti postrojenja (do 80%).

4.3.1. Princip rada plinskih turbina

Plinske turbine koriste Braytonov desnokretni kružni proces. Kompresor (koji je kod energetskih postrojenja uglavnom aksijalni kompresor) usisava zrak te ga tlači na viši tlak mijenjajući mu i temperaturu, nakon stlačivanja u kompresoru zrak odlazi u komoru izgaranja gdje se miješa s prirodnim plinom koji tamo i izgara. Izgaranjem prirodnog plina podiže se

temperatura te nastali dimni plinovi odlaze u turbinu gdje ekspandiraju i odlaze prema regeneratoru topline ili van.



Slika 9. Shematski prikaz jednostavnog postrojenja s plinskom turbinom; [15]

Turbina je vratilom spojena s kompresorom i s električnim generatorom pa se ekspanzijom dimnih plinova dobiva mehanički rad čije približno se dvije trećine troše na pogon kompresora, a ostala trećina na pogon električnog generatora. Što je temperatura dimnih plinova viša to je viša mehanička snaga koju je moguće dobiti primjenom ovakvih postrojenja. Maksimalna temperatura koju je moguće koristiti ovisi o svojstvima materijala i o tehnologijama hlađenja samih lopatica plinskih turbina i ostalih komponenti. Ovakve strojeve nazivamo plinskim turbinama s otvorenim ciklusom i neprekidnim izgaranjem. Komprimirani zrak se može prije odlaska u komoru izgarana dogrijati pomoću dimnih plinova prolaskom kroz regenerator topline čime se povećava učinkovitost ovakvih postrojenja. Temperatura dimnih plinova može biti i do 600°C [11]pa se oni mogu koristiti ili za kombiniranu proizvodnju električne energije ili za potrebe proizvodnje tople vode, pregrijane pare za grijanje ili pak za procese sušenja drveta i slično.

4.3.2. Vrste plinskih turbina

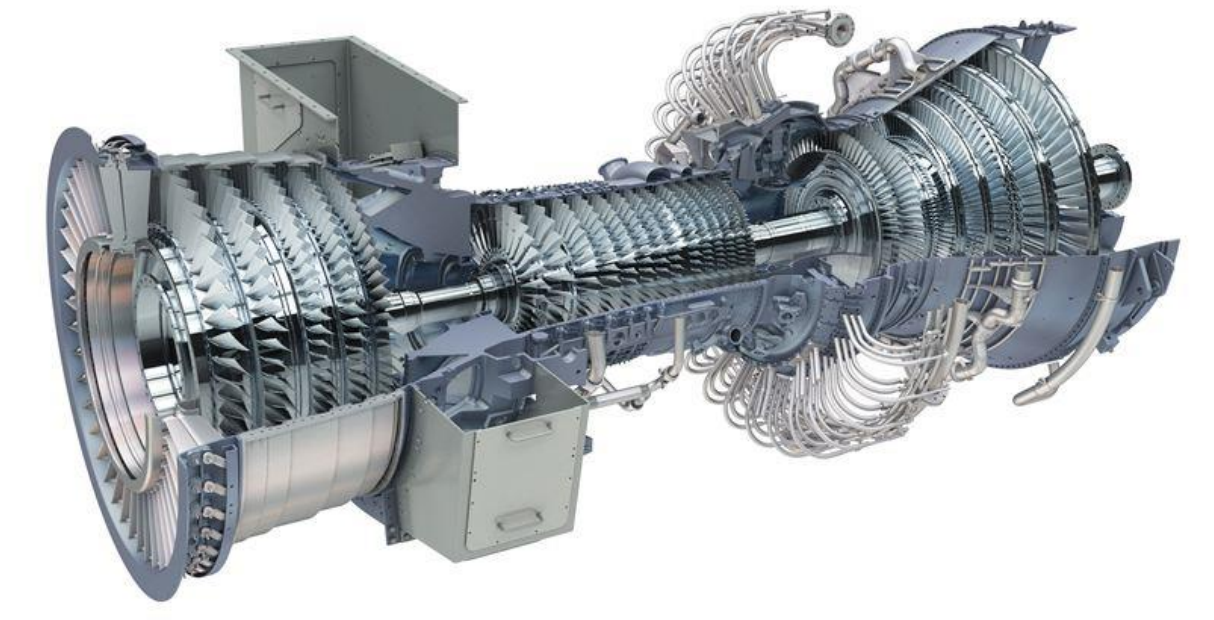
Prema tipu plinske turbine možemo podijeliti na:

- industrijske plinske turbine,

- areoderivativne plinske turbine,
- mikroturbine.

Industrijske plinske turbine ostvaruju najveće kapacitete proizvodnje električne i toplinske energije. Najveći primjerci ostvaruju snage i preko 300 MW električne snage [13]. U odnosu na ostale tipove imaju manje specifične investicijske troškove, većih su dimenzija, robusnije su te učestalost remonta je manja. Ovakav tip turbina je primjereniji za bazno opterećenje sustava. Industrijske plinske turbine ostvaruju kompresijske omjere do 16:1 te im je električna učinkovitost oko 40% ukoliko se ne koriste za kombiniranu proizvodnju energije [11].

Areoderivativne plinske turbine su gotovo jednake po konstrukciji s plinskim turbinama koje koriste avioni s mlaznim motorima. Danas postoje izvedbe koje mogu proizvesti do 50 MW električne snage[13]. Ovakve plinske turbine ostvaruju kompresijske omjere i do 30:1[11]. Uz to što su manjih dimenzija od ranije opisanih industrijskih plinskih turbina imaju i bolju učinkovitost koja može biti i preko 43% [13]. Ovakve plinske turbine imaju bolje dinamičke karakteristike u odnosu na industrijske plinske turbine. Zbog visokog kompresijskog omjera za pogon ovakvih turbina potrebna je dodatna kompresija goriva.



Slika 10. Areoderivativna plinska turbina; [16]

Mikroturbine za razliku od ostalih koje imaju višestupanjsku kompresiju i ekspanziju koriste samo jedan stupanj za komprimiranje zraka i jedan za ekspanziju dimnih plinova. Ovakve turbine su stoga puno manjih snaga (30 do 330 kW [11]) te nisu pretjerano zanimljive za proizvodnju toplinske energije za centralizirane toplinske sustave iako modularnom kombinacijom mogu dosegnuti kapacitete do 1 MW [11].

4.3.3. Proizvodnja toplinske energije primjenom plinskih turbina

Pošto toplinska energija koja se odvodi dimnim plinovima sadrži preko 60% ukupne energije dovedene gorivom učinkovitost postrojenja s plinskom turbinom jako ovisi o učinkovitosti iskorištavanja te toplinske energije. Toplinsku energiju ispušnih plinova je moguće iskoristiti korištenjem kotla na otpadnu toplinu u kojem se proizvodi para za parnu turbinu ukoliko govorimo o kombiniranoj proizvodnji energije, a kasnije topla voda. Toplu vodu je moguće koristiti za grijanje centraliziranih toplinskih sustava, para se može dogrijavati dodatnim izgaranjem goriva kako bi se ostvarili zadovoljavajući parametri za korištenje u parnoj turbini. Dodatno izgaranje bez ubacivanja novog zraka je moguće zato jer je pretičak zraka u komori izgaranja prije plinske turbine velik.

4.4. Dizalice topline

Korištenje dizalica topline je jedan od najučinkovitijih načina dobivanja toplinske energije**.** Dizalice topline rade po principu ljevokretnih kružnih procesa čime crpe toplinsku energiju iz toplinskog izvora koji je na nižoj temperaturi i predaje ju toplinskom ponoru više temperature, što je moguće korištenjem kompresora kojemu je potrebno dovesti mehanički rad kako bi mogao funkcionirati. Postoje i apsorpcijske dizalice topline koje umjesto mehaničkih kompresora koriste termičke kompresore za čiji pogon je potrebna toplina. U ovom radu neće biti više govora apsorpcijskim uređajima.

4.4.1. Idealni ljevokretni proces

Učinkovitost ovakvih sustava je definirana toplinskim množiteljem (*COP*) koji je definiran kao omjerom dobivenog toplinskog toka kojeg uređaj može predati toplijem mediju i potrebne snage koju je za to potrebno predati uređaju. Teoretski maksimalna toplina koju je na opisani

način moguće predati toplinskom ponoru je definirana teoretskim Carnotovim ljevokretnim procesom kod kojeg toplinski množitelj ovisi samo o temperaturama toplinskog izvora i ponora. Toplinski množitelj za ljevokretni Carnotov proces može se izraziti izrazom:

$$\varepsilon_C = \frac{T_g}{T_g - T_{ok}} \tag{1}$$

gdje je:

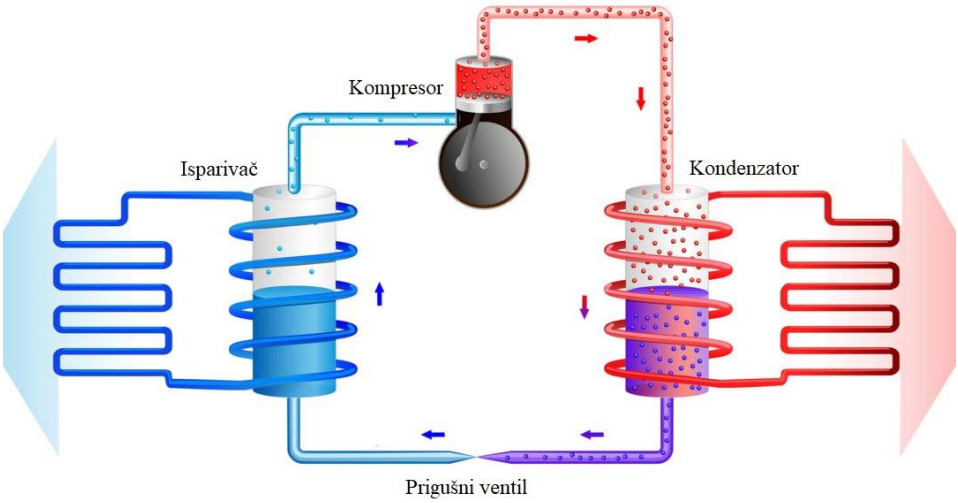
T_g $[K]$ – temperatura toplinskog ponora,

$T_{ok}[K]$ – temperatura toplinskog izvora.

Iz izraza se može zaključiti da će toplinski množitelj Carnotovog procesa biti tim veći što je temperatura toplinskog ponora niža, a temperatura toplinskog izvora viša. Također što je manja razlika između temperatura toplinskog ponora i izvora, manja je snaga potrebna koju je potrebno dovesti pomoću kompresora. Iz svega navedenog je jasno da je potrebno projektirati sustave koji koriste dizalice topline na način da temperatura grijanog medija bude što niža, odnosno da se ne grije na višu temperaturu nego što je neophodno kako bi učinkovitost sustava bila što viša.

4.4.2. Realni ljevokretni procesi

Realni procesi koje koriste dizalice topline koriste fiziku isparavanja i kondenzacije radnog medija kako bi prenijeli što veće količine topline te ih zovemo parnim procesima. Ovakvi procesi se najviše koriste kod dizalica topline. Najjednostavniji promjer je objašnjen u daljnjem dijelu rada. U isparivaču kapljevina koja je u području zasićenja isparava na temperaturi nižoj od temperature toplinskog izvora te se pregrijava. Pregrijana para izlazi iz isparivača te se komprimiranjem u kompresoru podiže njezino energetsko stanje, odnosno temperatura i tlak kako bi mogla predati toplinu toplinskom ponoru kondenzirajući u kondenzatoru. Nakon kondenzacije slijedi prigušenje prigušnim ventilom čime se spuštaju temperatura i tlak pothlađene kapljevine radnog medija čime on zalazi u zasićeno područje te prolazi kroz novi ciklus.



Slika 11. Shematski prikaz realnog ljevokretnog procesa; [17]

Kod dizalica topline koje koriste propan kao radnu tvar ili razne freone učestalo je korištenje međuizmjenjivača topline koji se koristi za pothlađivanje kapljevine radne tvari na izlazu iz kondenzatora te za njezino pregrijavanje na izlazu iz isparivača. Korištenje međuizmjenjivača također povećava faktor grijanja samog uređaja zato jer se pothlađivanjem kapljevine radnog medija te njenim prolaskom kroz prigušni ventil smanjuje količina pare koja ulazi u isparivač. Samim time je u isparivaču je veća količina kapljevine koja isparava te veća količina latentne topline koju radna tvar može primiti.

Kod realnih uređaja koji koriste mehaničke stapne kompresore jako je bitno osigurati pregrijanje na izlazu iz isparivača kako ne bi došlo do hidrauličkih udara u samom kompresoru prilikom dospijevanja kapljevite faze u usis kompresora. Sprječavanje prodora kapljevite faze se osim korištenjem međuizmjenjivača osigurava termoekspanzijskim ili elektroekspanzijskim ventilima koji se koriste za regulaciju masenog protoka radne tvari koja ulazi u isparivač ovisno o pregrijanju radne tvari na izlazu iz isparivača. Također treba voditi računa da to pregrijanje ne bude preveliko kako temperatura radnog medija na kraju kompresije ne bi bila prevelika zbog postojanja mogućnosti za degradiranjem mazivog ulja koje se koristi u kompresorima te zbog povećanja potrebne snage za kompresiju radne tvari s povećanjem pregrijanja. Također postoji mogućnost za oštećenjem kompresora zbog visokih temperatura u glavi kompresora, koju je pri velikim temperaturama potrebno hladiti.

Ukoliko postoji mogućnost da radni uvjeti u kojima uređaj radi dođu do kritičnih vrijednosti potreban je drugačiji pristup prilikom osmišljavanja sustava. Kako sustav ne bi radio u kritičnim

uvjetima moguće je korištenje dvostupanjske kompresije ili kaskadnih sustava. Kod dvostupanjske kompresije koriste se dva kompresora, dva prigušna ventila i mješalište. Sustav radi istovremeno na tri radna tlaka. Isparivač radi na najnižem radnom tlaku, nakon prvog stupnja kompresije je drugi radni tlak na kojem se nalazi i mješalište dviju struja radnih tvari gdje se suhozasićena para i vrela kapljevina fizički odvajaju. U miješalištu se odvajaju suhozasićeni dio koji ide u drugi kompresor, dok vrela kapljevina ide prema prigušnom ventilu i prema isparivačkom dijelu. Suhozasićena struja nakon kompresije ide prema kondenzatoru i tamo predaje toplinu nakon čega prolazi kroz prigušni ventil i odlazi u mješalište. Ovakvim pristupom se smanjuje maksimalna temperatura nakon kompresija te se povećava odveden toplinski tok u isparivaču.

Korištenje kaskadnih sustava podrazumijeva korištenje dvaju izoliranih ljevokretnih sustava kod kojih je moguće korištenje različitih radnih tvari. Najveća prednost ovakvih sustava je mogućnost korištenja različitih radnih tvari. U donjoj kaskadi se nalazi radna tvar koja ima bolja termodinamička svojstva pri nižim temperaturama, dok se u gornjoj kaskadi nalazi radna tvar koja ima bolja termodinamička svojstva pri višim temperaturama. Donja kaskada uzima toplinu iz toplinskog izvora te u kondenzatoru predaje toplinu gornjoj kaskadi. Toplina između gornje i donje kaskade se predaje u izmjenjivaču topline koji je za gornju kaskadu isparivač, dok je za donju kondenzator. Ovakvi sustavi su idealni za postizanje velikih temperaturnih razlika toplinskog izvora i ponora zato su pogodni za korištenje tamo gdje je potrebno u isto vrijeme osiguravanje rashladne i toplinske energije.

4.4.3. Radne tvari dizalica topline

Jedan od značajnijih odabira koje je potrebno napraviti prilikom konstruiranja dizalice topline je odabir radne tvari koja će služiti kao prijenosnik topline. To je tako zato jer o svojstvima odabrane radne tvari ovise dimenzije cjevovoda i kompresora kao i količina radne tvari koja će strujati kroz sustav. Što se tiče termodinamičkih svojstava radnih tvari za dizalice topline je poželjno: da nemaju pretjerano visok tlak zasićenja na temperaturama od 50 do 80°C, da je temperatura pri atmosferskom tlaku zasićenja dovoljno niska, da kompresijski omjer u rasnom području nije pretjerano velik, da u radnom području imaju veliku latentnu toplinu kondenzacije, malu viskoznost, nisku točku ledišta, dobru toplinsku provodnost, veliku gustoću na malim tlakovima, veliku električnu otpornost. Također je poželjno da radne tvari nisu otrovne, zapaljive, eksplozivne, da nisu korozivne i da su inertne u dodiru s mazivim uljem.

Radne tvari rijetko kada cure u atmosferu prilikom svog rada, ali je dosta česta praksa prilikom servisiranja da se samo ispusti u okoliš, zbog toga su jako bitni ekološki čimbenici pri odabiru radnih tvari. Značajno je svojstvo da radne tvari nemaju utjecaja na razgradnju ozonskog sloja odnosno da im je *ODP* (ozone depletion potential) jednak nuli te da imaju što manji utjecaj na globalno zagrijavanje odnosno da im je *GWP* (global warming potential) što manji.

Radne tvari koje se mogu koristiti kod dizalica toplina možemo podijeliti na:

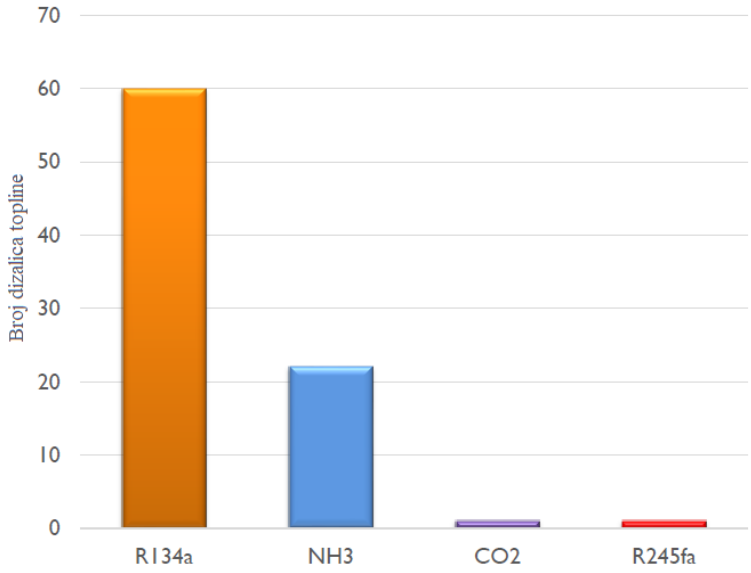
- tvari organskog porijekla,
- tvari anorganskog porijekla,
- zeotropske smjese.
- azeotropske smjese,

U tvari organskog porijekla spadaju razni ugljikovodici (poput propana, metana, etana), razni halokarbonati, odnosno klorofluorougljici, klorofluorougljikovodici te fluorirani ugljikovodici. Halokarbonati se dobivaju halogeniranjem ugljikovodika. Mnogi halokarbonati poput R11, R12, R502 su danas zabranjeni zbog izuzetno štetnog utjecaja na ozonski omotač. Danas se jako često koristi R134a kao radni medij kako za dizalice topline tako i kod split klima sustava, rashladnih sustava automobila te za industrijske potrebe.

Tvari anorganskog porijekla su tvari poput amonijaka i ugljičnog dioksida. Amonijak ima jako dobra termodinamička svojstva u odnosu na ostale radne tvari. Iako ima manju gustoću kapljevine u odnosu na većinu drugih radnih tvari, također ima višestruko veći specifični toplinski kapacitet kapljevine i pare, toplinsku vodljivost te specifičnu toplinu isparavanja. Svi navedeni faktori pridonose potrebom za puno manjim dimenzijama cjevovoda te za manjim punjenjem radnom tvari. Zbog manje viskoznosti manji su padovi tlaka u cjevovodima. Također *ODP* i *GWP* amonijaka su jednaki nuli. Najveća mana amonijaka kao radne tvari je njegova korozivnost koja se naročito očituje nagrizanjem bakra uz prisustvo vlažne atmosfere. Zbog toga nije moguće s njim koristiti bakrene cijevi i kao ni poluhermetičke i hermetičke kompresore kroz čije bakrene namotaje struji radna tvar i tako hladi sam motor. Ugljični dioksid karakteriziraju vrlo veliki tlakovi u odnosu na druge radne tvari. Također kritična točka ugljičnog dioksida se postiže već na 31,1°C što ima za posljedicu korištenja kritičnih i transkritičnih parametara prilikom eksploatacije sustava s ugljičnim dioksidom. Ekološki utjecaj ugljičnog dioksida je izuzetno povoljan *GWP* mu je jednak jedinici dok je *ODP* jednak nuli.

Zeotropske smjese su smjese više ugljikovodika kod kojih se pri promjeni agregatnog stanja odvija klizanje temperature zbog promijene koncentracije para u smjesi. Do nedavno su dosta popularne bile radne tvari R410a i R404a, a danas R407F.

Azeotropske smjese su poput zeotropskih smjesa smjese više ugljikovodika, samo što kod azeotropskih smjesa utjecaj klizanja temperature je zanemariv pa ih je moguće razmatrati kao da nisu smjese.



Slika 12. Raspodjela korištenja radnih tvari kod dizalica topline koje se koriste za namirivanje topline u centraliziranim toplinskim sustavima; [18]

Prema anketi koja je provedena u [18] za potrebe grijanja centraliziranih toplinskih sustava najčešće se danas koriti R134a koji se koristio za zamjenu radnih tvari prilikom moderniziranja postrojenja koja su se gradila osamdesetih godina u Švedskoj. Nakon R134a dosta je postrojenja koja koriste amonijak koji se sve više koristi u sustavima. Da bi se ugljični dioksid koristio potrebne su inovacije kako bi se mogao koristiti za proizvodnju većih količina toplinske energije [18].

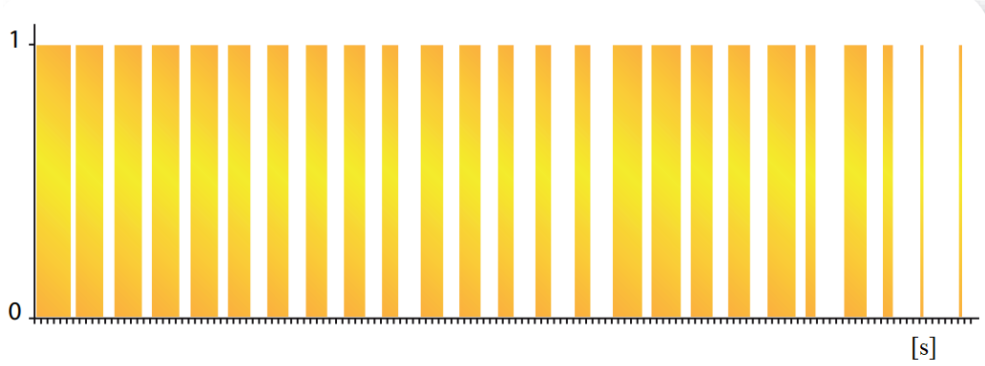
4.4.4. Dijelovi dizalica topline

Najbitniji dijelovi dizalica topline su:

- prigušni ventili,

- isparivači,
- kompresori,
- kondenzatori.

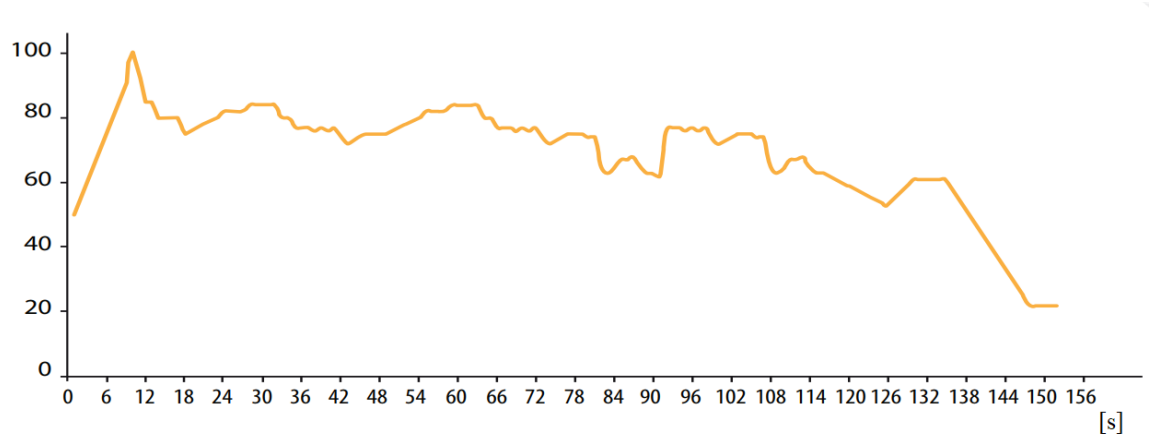
Za prigušenje radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja i za regulaciju masenog protoka u isparivaču koriste se prigušni ventili. Kao što je ranije objašnjeno teže održavanju konstantne vrijednosti pregrijanja na izlazu iz isparivača. Kod manjih uređaja često se koriste termoekspanzijski ventili koji pregrijanje održavaju uz pomoć osjetnika temperature. Kod većih uređaja se obično za prigušenje radne tvari koriste pulsno modulirajući elektronički ekspanzijski ventili i analogni elektronički ekspanzisjki ventili. Jedan i drugi spadaju u elektroničke ekspanzijske ventile za čiji rad su potrebni osjetnici teperature i tlaka pomoću kojih kontroler upravlja elektroničkim ventilima. Kontroler upravlja elektroničkim ventilima tako da pokušava održavati minimalno pregrijanje pri kojim su regulacijski signali stabilni, odnosno minimalno pregrijanje kod kojeg još uvijek nema kapljica na izlazu iz isparivača. Pulsno modulirajući elektronički ekspanzijski ventil radi tako da se periodično otvara i zatvara ovisno o potrebnom protoku radne tvari. Ventil može biti ili potpuno otvoren ili potpuno zatvoren. Protok radne tvari je jednak prosječnom protoku. Ovakvi ventili su pogodni za sve radne tvari.



Slika 13. Otvorenost pulsno modulirajućeg elektroničkog ekspanzijskog ventila; [19]

Analogni elektronički ekspanzijski ventili mogu regulirati razinu otvorenosti za razliku od pulsno modulirajućih ventila. Razina otvorenosti se regulira na način da elektronički aktuator rotira iglu u smjeru kazaljke na satu ili u suprotnom smjeru, mehanički mehanizam pretvara rotacijsko gibanje u aksijalno i tako omogućava finu regulaciju otvorenosti ventila. Kod velikih dizalica topline koje se koriste za namirivanje topline centraliziranih toplinskih sustava najčešće

se koriste isparivači s cijevima u plaštu ili pločasti isparivači. Ukoliko se kao radna tvar koristi amonijak koriste se isparivači s cijevima u plaštu i to potopljeni tip u kojem se održava razina kapljevine korištenjem regulatora razine, također je potrebna posuda za odvajanje faza nakon ekspanzijskog ventila. U potopljenim isparivačima u jednom prolazu ne isparava sva radna tvar. U suhom tipu isparivača sva radna tvar ispari prolaskom kroz isparivač. Suhi isparivači se koriste kod sustava koji koriste freone kao radne tvari, ugljični dioksid, ugljikovodike. Kod suhog tipa isparivača s cijevima u plaštu radna tvar prolazi kroz cijevi dok kroz plašt struji ogrjevni medij odnosno voda.

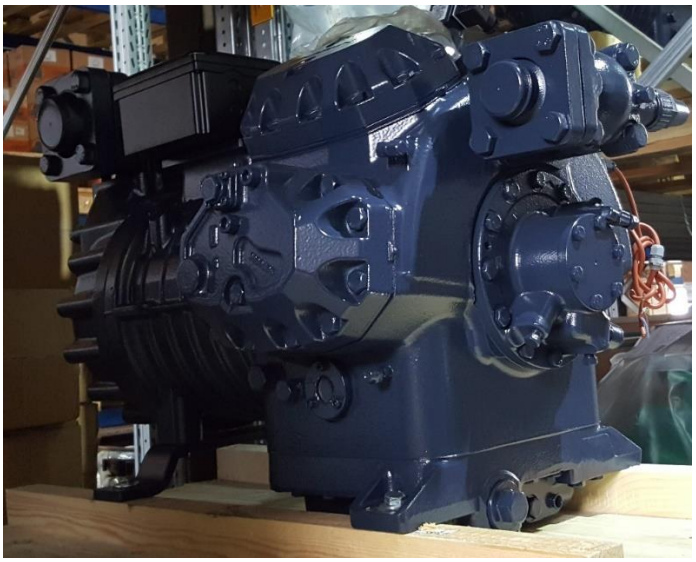


Slika 14. Otvorenost analognog elektroničkog ekspanzijskog ventila; [19]

Pločaste isparivače karakterizira izrazita kompaktnost u odnosu na isparivačima s cijevima u plaštu. Pločasti isparivači ostvaruju vrlo velike toplinske učine u odnosu na svoje dimenzije. Sastoje se od orebrenih limova koji su međusobno spojeni i zabrtveni s tankim slojem bakrenog listića. Radna tvar struji kroz svaki drugi međuprostor, a ogrjevni medij kroz ostale.

Uloga kompresora je dosad već objašnjena. Kod velikih dizalica topline moguće je korištenje velikih stapnih otvorenih i poluhermetičkih kompresora te poluhermetičkih vijčanih kompresora. Kod uređaja manjih toplinskih učina moguće je koristiti hermetičke spiralne kompresore. Stapni kompresori mogu ostvariti veće kompresijske omjere dok vijčani kompresori mogu ostvariti veće protoke radne tvari. Kompresore u načelu pogoni elektromotor makar postoje izvedbe koje su pogonili motori s unutarnjim izgaranjem. Kod stapnih kompresora obično je moguća stupnjevana regulacija masenog protoka ukoliko kompresor ima više glava, postoje također tehnologije kontinuirane regulacije prigušivanjem usisnog voda

kompresora. Kod vijčanih kompresora moguća je regulacija modificiranjem aktivne dužine samog vijka. Moguća je regulacija toplinske snage dizalice topline korištenjem frekvencijske regulacije kompresora.



Slika 15. Stapni kompresor;

Za potrebe centraliziranih toplinskih sustava kondenzatori služe za grijanje vode koja struji distribucijskom mrežom centraliziranih toplinskih sustava. Kod velikih dizalica topline se koriste kondenzatori s cijevima u plaštu te pločasti kondenzatori. Kod većine izvedbi kondenzatora s cijevima u plaštu radna tvar struji kroz plašt, odnosno oko cijevi izmjenjivača, dok rashladni medij struji kroz cijevi. Ovakvi kondenzatori su primjenjivi za freonske radne tvari, amonijak i ugljikovodike. U kondenzatoru se odvija filmska kondenzacija na snopu cijevi, dok je pothlađivanje kapljevine hlađeno slobodnom konvekcijom. Pločasti kondenzatori su manjih dimenzija, potrebno ih je ugraditi da stoje vertikalno. S gornje strane kondenzatora ulazi pregrijana para koja se hladi do temperature zasićenja te kondenzira u kondenzatoru. Kondenzat se nakuplja s donje strane te struji prema prigušnom ventilu. Kao kod pločastih isparivača radna tvar struji kroz svaki drugi međuprostor, dok kroz ostale voda za grijanje centraliziranih toplinskih sustava. Ovakvi kondenzatori mogu podnijeti manje tlakove (do 30 bara[20]) u odnosu na kondenzatore u plaštu s cijevima. Postoje poluzavarene izvedbe pločastih kondenzatora, kao i izvedbe s brtvama između svih ploča.

4.4.5. Dizalice topline kao toplinski izvor za namirivanje potreba centraliziranih toplinskih sustava

Dizalice topline se desetljećima koriste kao izvor topline za grijanje centraliziranih toplinskih sustava. U Europi je izgrađeno preko 140 sustava koji premašuju toplinski kapacitet od 1500 MW [21]. Prosječna instalirana toplinska snaga dizalica topline je 11 MW.

Dizalice topline koje se koriste kao toplinski izvor u centraliziranim toplinskim sustavima kao izvore topline mogu koristiti:

- kanalizacijske otpadne vode
- industrijsku otpadnu toplinu
- jezersku vodu
- vodu iz rijeka
- vodu iz mora
- geotermalne izvore topline
- vodu iz spremnika toplinske energije
- toplinu ispušnih plinova postrojenja za proizvodnju električne i toplinske energije
- vodu iz vodonosnog podzemnog sloja.

Kanalizacijske otpadne vode se najčešće koriste kao izvorom topline i osiguravaju pouzdani izvor toplinske energije. Temperatura kanalizacijskih voda se tijekom godine kreće od 10 do 20°C. Slijedeći izvor topline koji se najučestalije koristi je otpadna toplina iz industrijskih postrojenja zajedno s toplinom ispušnih plinova iz toplana i termoelektrana. Temperature otpadne topline koja se iskorištava u realnim postrojenjima se kreću od 14 do 46°C, dok temperature ispušnih plinova od 11 do 40°C [18]. Na žalost otpadna toplina nije na raspolaganju u svakom trenutku, stoga ovakav izvor se ne smatra pouzdanim. Kao jako pouzdani izvor smatraju se unatoč nižim temperaturama od ostalih izvora voda iz rijeka, jezera i mora. Prosječna temperatura vode kod realnih postrojenja je od 2 do 9°C [18]. Učestalo je korištenje geotermalne energije crpljenjem vode iz vodonosnika temperature su od 15 do 74°C[18]. Sve učestalije je korištenje solarnih kolektora za proizvodnju toplinske energije te

korištenje spremnika topline za skladištenje topline koja se može koristiti kao toplinski izvor kod dizalica topline.

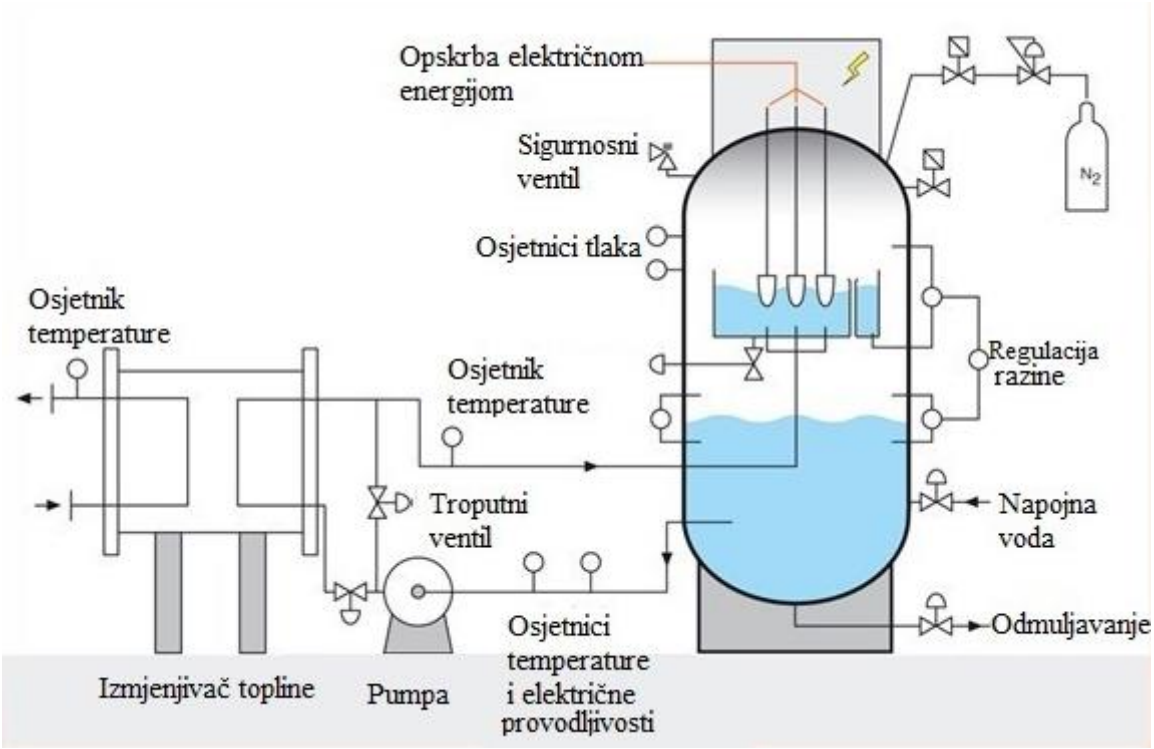
Najčešći rasponi temperatura koji se koriste u distribucijskom sustavu su od 70 do 80°C dok se u novije vrijeme sve više grade sustavi s nižim temperaturama (60 do 70°C te 50 do 60°C) teži se nižim temperaturama zbog manjih toplinskih gubitaka pri manjim temperaturama i zbog manjih toplinskih naprezanja u samim komponentama sustava [18].

4.5. Električni kotlovi

Električni kotlovi su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u toplinsku energiju. Korištenjem električnih kotlova energija se vodi može predati na dva bitno različita principa:

- korištenjem elektrootpornih grijaćih elemenata,
- korištenjem elektroda.

Električni kotlovi s elektrootpornim grijaćim elementima koriste električne otpornike koji se zagrijavaju prolaskom električne struje kroz njih te predaju toplinsku energiju vodi u koju su uronjeni. Ovakvi kotlovi se spajaju na električnu mrežu napona od 400 V ili od 690V [22] te su manjih snaga do 4 MW. Učinkovitost ovakvih kotlova je oko 95% [9].



Slika 16. Toplovodni električni kotao s elektrodama; [32]

Električni kotlovi koji koriste elektrode zagrijavaju vodu tako da trofazna izmjenična struja prolazi kroz vodu. Voda se ponaša kao električni otpornik te se zagrijava. Kotao proizvođača *PARAT* koristi princip rada s dvije posude. U vanjskoj zatvorenoj posudi je napojna voda i odvod vode prema izmjenjivaču za zagrijavanje tople vode za potrebe centraliziranih toplinskih sustava. Na gornjem dijelu s unutrašnje strane posude se nalazi druga posuda koja je otvorena i u koju struji voda iz veće posude. Također u njoj su uronjene elektrode u vodi. Kako se voda zagrijava propušta se ventilom prema donjem dijelu veće posude. Veća posuda je djelomično potopljena s vodom dok je u ostatku posude dušik pod tlakom. Ovakvi kotlovi zahtijevaju napon od 6 do 24 kV [32], mogu biti električnih snaga do 60 MW [32]. Učinkovitost im je do 99% [33]

5. OPIS METODA (METODOLOGIJA)

5.1. Metodologija određivanja vršnih toplinskih potreba

U sljedećem dijelu rada prikazan je slijed proračuna vršnih toplinskih potreba sustava koji je smješten u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske. Vršne toplinske potrebe su proračunate kao vršno satno toplinsko opterećenje. Kako bi se odredilo vršno satno toplinsko opterećenje potrebno je prvo odrediti ukupno satno toplinsko opterećenje sustava. Ukupno satno toplinsko opterećenje je proračunato pomoću stupanj sata kojeg je moguće odrediti kao razliku željene unutrašnje temperature u zgradama i prosječne vanjske temperature u jednom satu. Ukupno satno toplinsko opterećenje je proračunato korištenjem jednadžbe (2):

$$STP = \left(\frac{UPT}{\sum_1^{8784} SS}\right) \cdot SS; \quad (2)$$

Gdje je:

STP $[MWh]$ –satno toplinsko opterećenje,

$UPT[MWh]$ – ukupna proizvodnja toplinske energije iz toplana i kogeneracija,

SS $[°C]$ – stupanj sat.

S tim da je:

$$SS = T_Z - T_V; \quad (3)$$

Gdje je:

T_Z $[°C]$ – željena unutrašnja temperatura u grijanim zgradama,

T_V $[°C]$ – prosječna vanjska temperatura u jednome satu.

U jednadžbi (2) stupnji sati su modificirani tako da iznose 0 izvan sezone grijanja. Također su modificirani ukoliko postoje različiti režimi rada tijekom dana.

Modelirana je i prosječna satna potrošnja topline za potrošnu toplu vodu. Pretpostavljeno je da je profil potrošnje potrošne tople vode svaki dan jednak.

Ukupna satno toplinsko opterećenje je jednako:

$$USTP = STP + PTV; \quad (4)$$

PTV $[MWh]$ – satno toplinsko opterećenje za namirivanje potrošne tople vode,

$USTP[MWh]$ – ukupna satno toplinsko opterećenje,

Distribucijska krivulja ukupnog satnog toplinskog opterećenja se dobije tako da se ukupno satno toplinsko opterećenje u svakom satu podjeli s maksimalnom vrijednošću ukupnog satnog toplinskog opterećenja.

Ukupno satno toplinsko opterećenje se računa prema slijedećoj jednadžbi:

$$Q_U = (\Phi_{VN} + \Phi_{BN}) \cdot \frac{USTP}{maxUSTP}; \quad (5)$$

Gdje su:

Φ_{VN} $[MW]$ – nazivna toplinska snaga vršnih toplinskih jedinica,

Φ_{BN} $[MW]$ – nazivna toplinska snaga baznih toplinskih jedinica,

Q_U $[MWh]$ – ukupno satno toplinsko opterećenje sustava.

Vršno satno toplinsko opterećenje zadanog sustava se zatim računa prema jednadžbi:

$$Q_V = \begin{cases} (\Phi_{VN} + \Phi_{BN}) \cdot \frac{USTP}{maxUSTP} - \Phi_{BN}; & ako\ je \quad \frac{USTP}{maxUSTP} > \frac{\Phi_{VN}}{\Phi_{VN} + \Phi_{BN}} \\ 0; & ako\ je \quad \frac{USTP}{maxUSTP} \leq \frac{\Phi_{VN}}{\Phi_{VN} + \Phi_{BN}} \end{cases}; \quad (6)$$

Gdje je:

Q_V $[MWh]$ – vršno satno toplinsko opterećenje sustava.

5.2. Metodologija izrade pojednostavljenih matematičkih modela

Kako bi se mogli simulirati odzivi vršnih toplinskih jedinica u toplani-termoelektrani potrebno je izraditi pojednostavljene matematičke modele dinamike procesa vršnih jedinica koji su u stanju dovoljno dobro predočiti brzinu odzive toplinske i električne snage na poremećaje toplinskog i električnog opterećenja sustava.

Za izradu matematičkih modela korišteni su razni izvori pomoću kojih su konstruirane prijenosne funkcije koje se mogu u *SIMULINK* simulacijskom okruženju koristiti za simulaciju odaziva sustava na poremećaje. Matematički modeli su izrađeni korištenjem:

- čistog pojačanja,
- proporcionalnog djelovanja prvog reda,
- proporcionalnog djelovanja drugog reda,
- mrtvog vremena,

- proporcionalno integralnog regulatora.

Toplinske i električne snage u modelima će biti skalirane tako da predstavljaju sve vršne jedinice u toplani.

Kod modeliranja procesa koji koriste prirodni plin kao gorivo potrebno je izračunati njegovu potrošnju odnosno maseni protok. Za to će se koristiti jednadžbe (18) i (19):

$$q_{mgoriva} = \frac{\Phi_V}{\eta_\Phi \cdot H_{dplina}}; \tag{18}$$

$$q_{mgoriva} = \frac{P_V}{\eta_P \cdot H_{dplina}}; \tag{19}$$

Gdje je:

$q_{mgoriva}$ $[kg/s]$ – maseni protok goriva,

Φ_V $[MW]$ – vršno toplinsko opterećenje sustava,

P_V $[MW]$ – električna snaga pri vršnom toplinskom opterećenju sustava,

η_Φ – toplinska učinkovitost tehnologije,

η_P – električna učinkovitost tehnologije,

H_{dplina} $[MJ/kg]$ – donja ogrjevna vrijednost prirodnog plina.

Donja ogrjevna vrijednost prirodnog plina je prema [24] 47,1 MJ/kg.

5.3. Metodologija simulacije pogona toplane te proračuna prihoda rada toplane

Prilikom simulacije pogona korišten je *Microsoft Excel* program u kojem su korišteni odabrani karakteristični dani iz prethodno proračunatog satnog toplinskog opterećenja sustava. Modeliran je rad kombiniranog procesa s plinskom i parnom turbinom koji proizvodi toplinu i električnu energiju te koristi toplinski spremnik kako bi isporučio maksimalne količine toplinske i električne energije. Za namirivanje vršnih toplinskih potreba simuliran je rad opisanih tehnologija tako da svaka posebno namiruje vršno toplinsko opterećenje te ako je to optimalno i moguće da sudjeluje na tržištu pomoćnih usluga.

Prihodi rada toplane su procijenjeni korištenjem izračunatih podataka o količinama predane topline centraliziranom sustavu grijanja, prodanoj električnoj energiji te ovisno o tome da li je sustav sudjelovao na tržištu pomoćnih usluga električne energije. Rashodi su proračunati ovisno

o potrošnji goriva, emisijama CO_2, o ostalim varijabilnim i fiksnim troškovima komponenata te ovisno o iznosu godišnje vrijednosti investicijskih troškova.

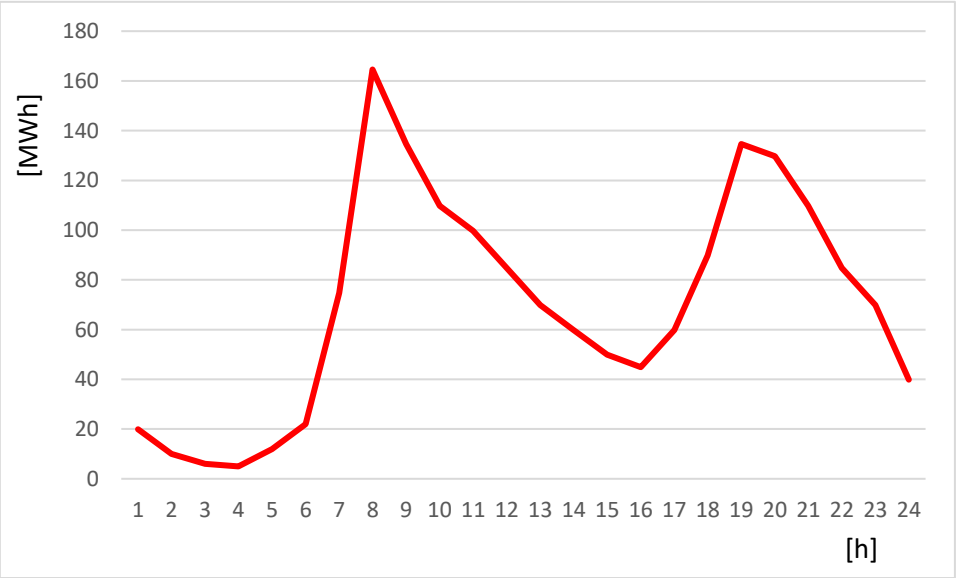
6. REZULTATI I DISKUSIJA

6.1. Rezultati određivanja vršnih toplinskih potreba

U slijedećem poglavlju će biti prikazani rezultati i korišteni podaci prilikom određivanja vršnih toplinskih potreba centraliziranog toplinskog sustava smještenog u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske.

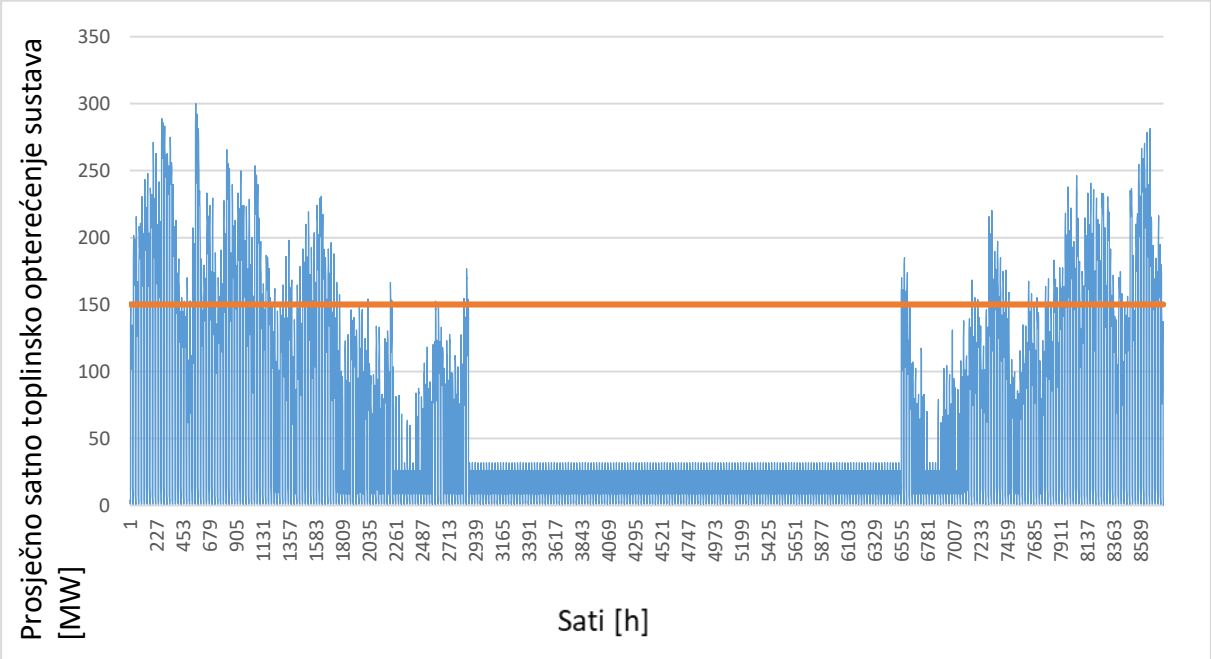
Satna distribucija toplinskog opterećenja je proračunata pomoću jednadžbe (2) gdje je za vrijednost ukupne proizvodnje toplinske energije iz toplana i kogeneracija korišten podatak za 2015. godinu za Republiku Hrvatsku koji prema [2] iznosi 11106 TJ odnosno 3085 GWh. Za proračun stupanj sata korištena je jednadžba (3). Prosječne vanjske temperature u jednom satu su dobivene tako da je korištenjem *METEONORM* baze podataka dobivena prosječna vrijednost vanjske temperature svakog sata u godini. Korištene su mjerene vrijednosti na zagrebačkom Griču od 2000. do 2009. godine.

Stupanj sat se računa samo u sezoni grijanja od prvog listopada do prvog svibnja inače je jednak nuli. Također se računa od 5 do 23 sata s time da je u tom razdoblju željena unutrašnja temperatura 21°C. Da je vanjska temperatura od 23 do 5 sati niža od -15°C stupanj sat bi se računao s time da je unutrašnja željena temperatura jednaka 15°C, ali pošto se ta vrijednost vanjske temperature ni jednom nije dostigla prema podacima, taj dio sa zanemaruje.



Slika 17. Potrošnja topline za namirivanje potreba za potrošnom toplom vodom [30]

Pretpostavljeno je da je potrošnja topline za potrošnju potrošne tople vode jednaka 20% od ukupne proizvodnja toplinske energije iz toplana i kogeneracija stoga iznosi 2221,2 TJ odnosno 617000 MWh. Pretpostavljeno je da je profil potrošnje potrošne tople vode svaki dan jednak s time da u danu imamo dva vrhunca jedan se dostiže u 8 sati, a drugi u 20 sati.

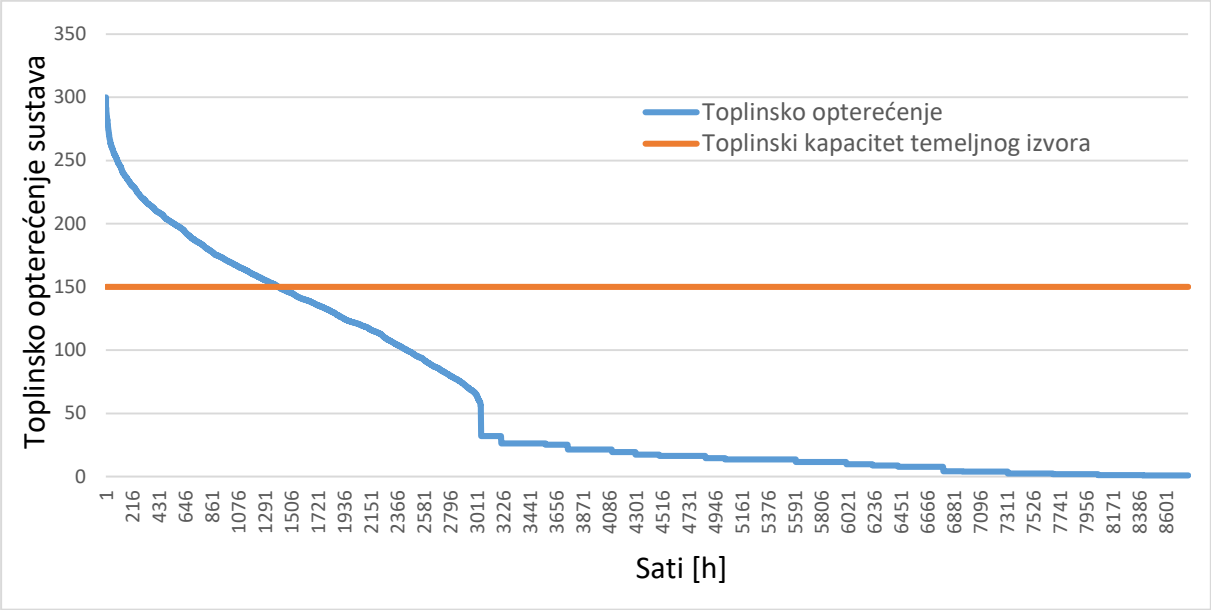


Slika 18. Prosječno satno toplinsko opterećenje sustava

Korištenjem jednadžbe (4) se dobije ukupno satno toplinsko opterećenje toplana i kogeneracije u Republici Hrvatskoj u 2015. godini uvećano za namirivanje topline za potrošnu toplu vodu. Kako bi se dobilo ukupno satno toplinsko opterećenje stava zadanog u diplomskom zadatku potrebno je izračunate vrijednosti iz jednadžbe (4) uvrstiti u jednadžbu (5) s time da je nazivna toplinska snaga vršnih toplinskih jedinica 150 MW i nazivna toplinska snaga baznih toplinskih jedinica 150 MW. Dobivena je distribucijska krivulja ukupnog toplinskog opterećenja sustava. Također uvrštavanje vrijednosti u jednadžbu (6) dobiva se prosječno satno toplinskog opterećenje koja će se dalje koristiti u radu.

Pošto nema grijanja ljeti nema ni vršnog toplinskog opterećenja. Jedina toplinska energija koju je potrebno namiriti je za potrebe namirivanja potrošne tople vode koje je u stanju namiriti fleksibilno kombinirano kogeneracijsko temeljno postrojenje s kondenzacijskom parnom turbinom i oduzimanjima. Pošto su zimi najniže temperature zraka tada je neophodan najučestaliji rad vršnih toplinskih jedinica što se vidi i na distribucijskim krivuljama. Ukoliko

bi vršne jedinice proizvodile toplinsku energiju praćenjem vršnog toplinskog opterećenja koje je prikazano radile bi 1396 sati godišnje te bi proizvele 62058 MWh toplinske energije godišnje što je oko 12% ukupne izračunate potrebne toplinske energije koja se preda centraliziranom toplinskom sustavu.



Slika 19. Vrijeme trajanja toplinskog opterećenja

6.2. Matematički model dinamike procesa toplovodnog plinskog kotla

Izrađen je matematički model dinamike procesa vatrocijevnog toplovodnog kotla korištenjem podataka eksperimentalnih podataka iz [25]. Prilikom izrade matematičkog modela pretpostavljena je konstantna brzina strujanja vode kroz kotao, također konstantan protok vode u vremenu. Pretpostavljeno je da fleksibilno temeljno kogeneracijsko postrojenje može dobro predviđati promjenu temeljnog toplinskog opterećenja pa je temperatura povratne vode koja se zagrijava u vršnim jedinicama toplane konstantna. Također je pretpostavljeno potpuno izgaranje te konstantna učinkovitost kotlova koja iznosi 87% te vrući start pri pokretanju kotla. Kotao koji je ispitan nazivne je toplinske snage 400 kW.

Za određivanje parametara koji su potrebni za izvođenje prijenosne funkcije korišten je alat *WebPlotDigitizer* koji se može koristiti na [26] pomoću kojeg je moguće dobiti precizne informacije o položaju pojedinih točaka u grafovima. Očitano je potrebno vrijeme da se temperatura počne mijenjati i ono iznosi 72 sekunde. To je ujedno i iznos mrtvog vremena u prijenosnoj funkciji prilikom dizanja toplinskog opterećenja kotla. U ovom slučaju mrtvo

vrijeme se javlja zbog vremena koje je potrebno da voda koja se je počela zagrijavati prođe od komore izgaranja do polaza toplinskog centraliziranog sustava.

Pri maksimalnom opterećenju prema ispitnim podacima plinski kotao zagrijava vodu konstantne temperature od 14°C na 81°C, dakle voda se zagrijava za 67°C. Potrebno je izmjeriti vrijeme potrebno da temperatura naraste za 63,2% odnosno da dostigne 56,3°C. Očitana je vrijednost od 500 sekundi što je ujedno i vremenska konstanta proporcionalnog djelovanja prvog reda koja se može koristiti za simulaciju prikazanog odziva na slijedećoj slici. Pošto je temperaturna razlika polaza i povrata nekog realnog centraliziranog toplinskog sustava rijetko kada veća od 50°C i pošto polovicu maksimalnog toplinskog opterećenja namiruje temeljni izvor u toplani pretpostavljeno je da je maksimalna razlika temperatura polaza i povrata kod plinskih kotlova jednaka 25°C. U skladu s tom pretpostavkom potrebno je modificirati maseni protok vode koji je kod ispitnog primjera iz [25] 1,428 kg/s kao i prethodno dobivenu vremensku konstantu proporcionalnog djelovanja prvog reda te mrtvo vrijeme.

Ako zanemarimo toplinski tok kroz vanjsku stjenku kotla te ako zamislimo da kroz kotao struji voda homogene temperature možemo raspisati jednadžbu akumulacije toplinske energije u dijelu kotla koji sadrži vodu na način:

$$C_{UK} \cdot \frac{dT_{VTK}}{dt} = Q_{KONV} + q_{mvTK} \cdot c_v(T_{V0TK} - T_{VTK}); \tag{20}$$

Gdje je:

C_{UK} $[kJ/K]$ – toplinski kapacitet vode u plinskom kotlu,

T_{VTK} $[°C]$ – temperatura vode u plinskom kotlu,

ϕ_{KONV} $[kW]$ – ulazni toplinski tok kroz stjenku cijevi plinskog kotla,

q_{mvTK} $[kg/s]$ – maseni protok vode kroz plinski kotao,

T_{V0TK} $[°C]$ – temperatura vode na ulazu u plinski kotao,

c_v $[kJ/kgK]$ – specifični toplinski kapacitet vode.

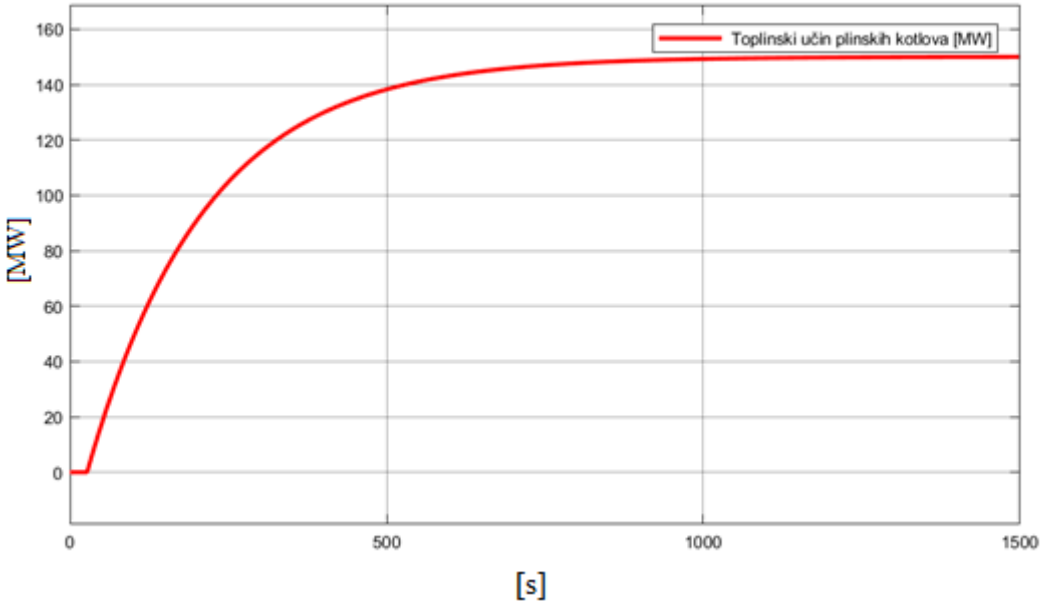
Prijenosna funkcija prethodne jednadžbe se može opisati proporcionalnim djelovanjem prvog reda s tim da je vremenska konstanta jednaka:

$$\tau_{TK} = \frac{C_{UK}}{q_{mvTK} \cdot c_v}; \tag{21}$$

Gdje je:

τ_{TK} $[s]$ – vremenska konstanta plinskog kotla.

Pošto je toplinski tok jednak umnošku temperaturne razlike, masenog protoka i specifičnog toplinskog kapaciteta za smanjenu temperaturnu razliku sa 67°C na 25°C pri ostvarivanju istog toplinskog toka maseni protok vode mora narasti s 1,428 kg/s na 3,83 kg/s. Zatim je moguće modificirati i vremensku konstantu proporcionalnog djelovanja prilikom porasta opterećenja plinskog kotla i ona se mijenja s 500 s na 186 s. Također je potrebno modificirati i mrtvo vrijeme zbog veće brzine strujanja vode stoga ono iznosi 27 sekundi. Ako pretpostavimo da se koristi centralizirani sustav grijanja treće generacije maksimalna temperatura polaza vode biti će 98°C, pa će temperatura povratne vode koju plinski kotlovi zagrijavaju biti 73°C. Također za simulaciju je potrebno povećati vrijednost maksimalne toplinske snage plinskih kotlova na 150 MW. Pošto je vremenska konstanta podizanja snage plinskih kotlova proporcionalna toplinskom kapacitetu vode u kotlu, odnosno volumenu vode koji se nalazi u samom kotlu, a obrnuto proporcionalna masenom protoku vode u kotlu pretpostavljeno je da će se maseni protok povećavanjem nazivne toplinske snage proporcionalno povećavati, kao i količina vode u kotlu te put kojeg voda mora proći od komore izgaranja do polaza centraliziranog toplinskog sustava. Zato je pretpostavljano da su vremenske konstante, kao i mrtvo vrijeme s porastom nazivne toplinske snage kotlova ostale konstantne.

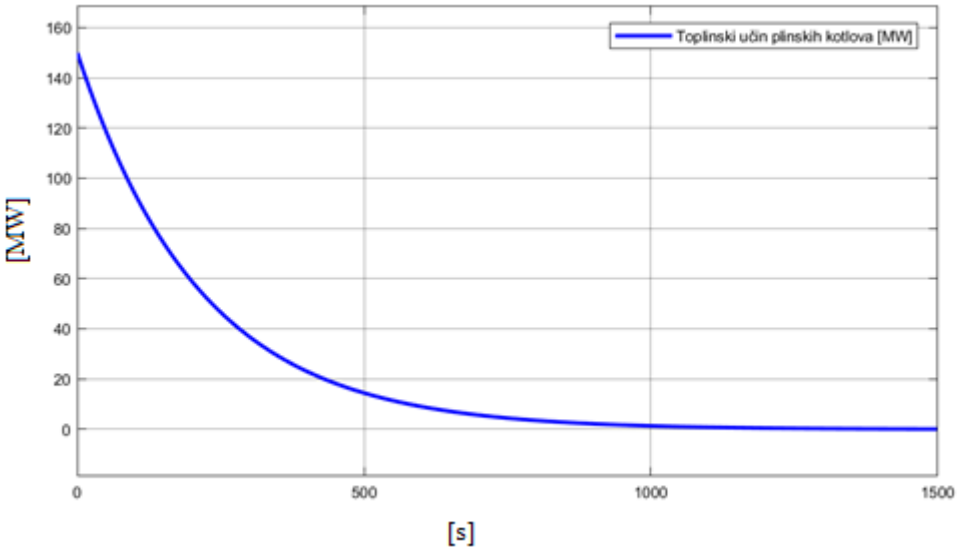


Slika 20. Toplinski učin plinskih kotlova prilikom uključivanja i namirivanja maksimalnog toplinskog opterećenja

Iz prethodnih dijagrama je vidljivo da se maksimalni toplinski učin korištenjem vatrocijevnih toplovodnih plinskih kotlova postiže za 16 minuta.

Spuštanje opterećenja i gašenje kotla modelirano je po dijagramu iz [25].

Pad opterećenja i gašenje plinskog kotla odvija se s drugačijom dinamikom pa je pretpostavljeno da plamenik puno brže reagira na podražaj nego toplinska snaga kotla stoga je pretpostavljen brži odziv plamenika. Prilikom hlađenja plinskog kotla nema mrtvog vremena zato jer plamenici smanjuju ubacivanje goriva te temperatura vode počinje padati kako se akumulirana toplina u izmjenjivačkim površinama kotla predaje vodi koja struju konstantnom brzinom. Krivulja dobivena eksperimentalnom metodom se može također opisati pomoću proporcionalnog djelovanja prvog reda. Korištenjem ranije opisane metode dobivanja vremenske konstante dobivena je vrijednost vremenske konstante proporcionalnog djelovanja prvog reda koja za gašenje plinskog kotla iznosi 573 sekundi. Korištenjem prethodne korekcije temperaturne razlike povrata i polaza dobiva se vrijednost vremenske konstante od 214 sekundi.



Slika 21. Odziv toplinskog učina plinskih kotlova prilikom gašenja

Iz prethodnog dijagrama je vidljivo da plinski kotlovi mogu prestati predavati toplinu 18 minuta nakon pada opterećenja. Za simulaciju vršnih jedinica korištenja plinskih kotlova korištene su slijedeće prijenosne funkcije:

$$H_{PTK1}(s) = \frac{150}{186s + 1} e^{-27s}; \tag{22}$$

$$H_{PTK2}(s) = \frac{150}{214s + 1}; \quad (23)$$

Gdje je:

$H_{PTK1}(s)$– prijenosna funkcija korištena kod porasta opterećenja toplovodnog plinskog kotla,

$H_{PTK2}(s)$ – prijenosna funkcija korištena kod pada opterećenja toplovodnog plinskog kotla.

U prijenosne funkcije kao ulazni signal ulazi potrebno toplinsko opterećenje u pojedinom trenutku podijeljeno s maksimalnim mogućim toplinskim opterećenjem pa je čisto pojačanje u prijenosnim funkcijama 150 MW.

Također je potrebno odrediti potrošnju goriva plinskih kotlova u pojedinom trenutku korištenjem jednadžbe (18). Potrošnja prirodnog plina se računa tako da je prilikom porasta opterećenja potrošnja goriva proporcionalna toplinskom opterećenju centraliziranog toplinskog sustava, kao i prilikom konstantnog toplinskog opterećenja. Također prilikom gašenja sustava toplinski tok se još uvijek predaje zbog akumulacije toplinske energije, ali je u tom slučaju potrošnja goriva jednaka nuli.

6.3. Matematički model dinamike procesa plinskog motora

Matematički model plinskih motora je izrađen prema podacima o sekvencioniranju paljenja i gašenja toplana s plinskim motorima prema [27]. Prilikom izrade modela pretpostavljeno je korištenje većeg broja plinskih motora stoga je pretpostavljena konstantna električna i toplinska učinkovitost toplane. Prema [27] uključivanje toplane s plinskim motorima odvija se:

1. provjerom opreme,
2. sinkronizacijom i povećavanjem opterećenja motora,
3. povećavanjem opterećenja motora do nazivne snage,
4. povećavanjem proizvodnje toplinske energije.

Provjera opreme traje oko 60 sekundi, zatim povećavanjem opterećenja motora započinje proces sinkronizacije na mrežu koji traje oko 60 sekundi. Prilikom sinkronizacije je započeo proces povećavanja opterećenja motora koji traje oko 4 minute dok se ne poveća snaga na nazivnu. Također prilikom sinkronizacije započela je proizvodnja toplinske energije koja kasni oko 20 sekundi za početkom povećavanja opterećenja motora te traje oko 5 minuta. Prilikom

gašenja motoru trebaju 2 minute da smanji opterećenje s nazivnog do onog gdje ga nema te 5 minuta da se motor ohladi, odnosno da se prestane predavati toplinski tok.

Proces povećavanja opterećenja je modeliran korištenjem proporcionalnog djelovanja drugog reda te ograničavanjem brzine povećavanja i smanjivanja ulaznog signala prijenosne funkcije. Signal opterećenja se kreće od 0 do 100%, odnosno od 0 do 1. Pošto proces povećavanja opterećenja od nule do nazivnog traje 4 minute korišteno je ograničenje povećavanja signala od 1/240 po sekundi. Zbog vremenskog trajanja spuštanja opterećenja procesa od nazivnog do nule u vremenskom razdoblju od 2 minute, ograničenje smanjivanja signala iznosi 1/120 po sekundi. Zatim je potrebno odrediti izgled prijenosne funkcije. Pojačanje prijenosne funkcije jednako je ukupnoj električnoj snazi 15 plinskih motora koja iznosi 159 MW. Pretpostavljena je amplituda prvog polutitraja od 45% od ukupne zadane vrijednosti iz čega je moguće očitati koeficijent prigušenja koji iznosi 0,25. Zatim je pretpostavljeno trajanje prve poluperiode u trajanju od 20 sekundi. Izračunata je frekvencija prigušenih oscilacija koja iznosi 0,1571 rad/s. Zatim je moguće izračunati frekvenciju neprigušenih oscilacija koja iznosi 0,1814 rad/s. Uvrštavanjem u prijenosnu funkciju ona dobiva oblik:

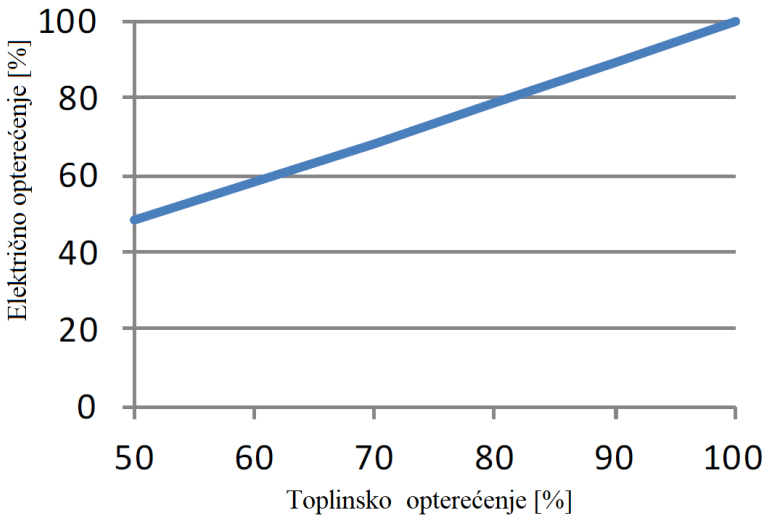
$$H_{PM1}(s) = \frac{159 \cdot 0{,}0329}{s^2 + 0{,}0907s + 0{,}0329}; \tag{24}$$

Gdje je:

$H_{PM1}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene opterećenja toplane s plinskim motorima.

Matematički model je izveden tako da ukoliko je opterećenje toplane s plinskim motorima jednako nuli prilikom povećavanja zahtijevanog toplinskog ili električnog opterećenja u prijenosnu funkciju ulazi signal koji je jednak nuli sve dok ne istekne vrijeme od 60 sekundi.

Opterećenje toplane s plinskim motorima je proporcionalno proizvodnji električne energije osim u periodu sinkronizacije kada je proizvodnja električne energije jednaka nuli. Stoga je prilikom povećavanja opterećenja prvih 60 sekundi povećavanje ulaznog signala u prijenosnu funkciju jednako promjeni opterećenja, dok je izlaz za to vrijeme jednak nuli. Električna snaga koju toplana predaje električnoj mreži je jednaka umnošku izlaznog signala iz prijenosne funkcije (24) i nazivnoj električnoj snazi plinskih motora. Pošto je nazivna toplinska snaga vršnih jedinica u toplani jednaka 150 MW. A prema [27] toplinska učinkovitost na 100% opterećenja je 43,54% dok je električna učinkovitost na 100% opterećenja jednaka 46,21% moguće je dobiti nazivnu električnu snagu vršnih jedinica koja iznosi 159 MW.



Slika 22. Ovisnost toplinskog opterećenja o električnom plinskih motora; [27]

Toplinsko opterećenje je modelirano korištenjem signala opterećenja plinskih motora s time da je korišteno i opterećenje tijekom perioda sinkronizacije. Kako bi se dobio signal toplinskog opterećenja korištenjem prethodne slike izrađena je linearna jednadžba ovisnosti toplinskog opterećenja o električnom opterećenju koje je ekvivalentno opterećenju plinskih motora.

Interpolacijska linearna jednadžba je oblika:

$$\Phi_{PM} = 0{,}970874 \cdot P_{PM} + 0.02913; \qquad (25)$$

Gdje su:

Φ_{PM} $[MW]$– toplinsko opterećenje plinskih motora,

P_{PM} $[MW]$ – električno opterećenje plinskih motora.

Dobiveni signal je zatim modificiran tako što mu se ograničila brzina povećavanja na 1/600 po sekundi te smanjivanje signala na 1/300 po sekundi. Zatim signal prolazi kroz prijenosnu funkciju koja sadrži mrtvo vrijeme koje iznosi 20 sekundi i proporcionalno djelovanje drugog reda. Prilikom modeliranja proporcionalnog djelovanja drugog reda pretpostavljena je ovaj puta veće trajanje prve poluperiode u trajanju od 50 sekundi. Također je pretpostavljena amplituda prvog polutitraja od 55% od ukupne zadane vrijednosti pa je koeficijent prigušenja jednak 0,2. Zatim je moguće izračunati frekvenciju prigušenih oscilacija koja iznosi 0,0628 rad/s te frekvenciju neprigušenih oscilacija koja iznosi 0,0702 rad/s. Pojačanje je jednako ukupnoj toplinskoj snazi koja iznosi 150 MW, stoga je prijenosna funkcija oblika:

$$H_{PM2}(s) = \frac{150 \cdot 0{,}004928}{s^2 + 0{,}02808s + 0{,}004928} \cdot e^{-20s}; \quad (26)$$

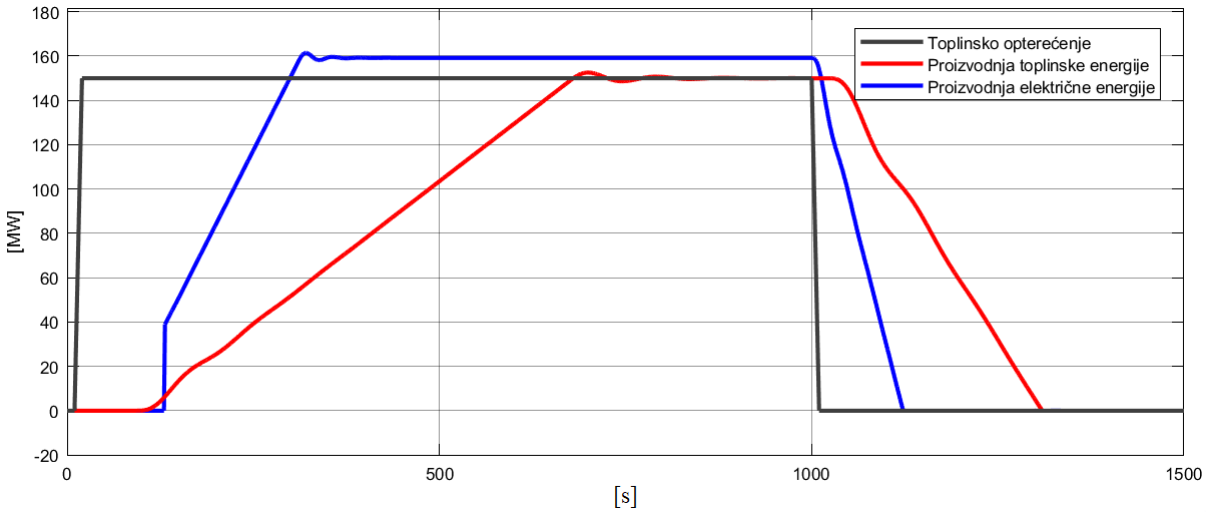
Gdje je:

$H_{PM2}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s plinskim motorima.

Pošto se radi o kogeneracijskoj tehnologiji matematički model je izrađen na način da može pratiti električno opterećenje električne mreže ili vršno toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava. Signal zadanog električnog opterećenja može direktno ići kroz opisani model pošto je električno opterećenje ekvivalentno opterećenju plinskih motora. Signal vršnog toplinskog opterećenja je potrebno modificirati na način da se pretvori u signal potrebnog opterećenja plinskih motora. To se postiglo izradom interpolacijske linearne jednadžbe korištenjem dijagrama na prethodnoj slici koji je oblika:

$$P_{PM} = 1{,}03 \cdot \Phi_{PM} - 0{,}03; \quad (27)$$

Na slijedećoj slici je prikazan odaziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih motora prilikom promjene vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava na način da se toplinsko opterećenje mijenja od nule do maksimalnog opterećenja, a zatim se vraća na nulu.



Slika 23. Odziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih motora na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava

Prikazano je da izrađeni model dovoljno dobro opisuje brzine odziva na poremećaje.

Potrošnja prirodnog plina se računa korištenjem jednadžbe (18) s time da se umjesto brojnika koristi opterećenje motora modificirano jednadžbom (25) te toplinska učinkovitost plinskih motora. Plinski motori mogu sudjelovati kao sekundarna rezerva na tržištu električne energije na tehnološkom minimumu, dok za sudjelovanje u tercijarnoj rezervi mogu biti i ugašeni.

6.4. Matematički model dinamike procesa plinskih turbina

Matematički model plinskih turbina je izrađen slično kao i matematički model plinskih motora prema podacima o sekvencioniranju paljenja i gašenja toplana s plinskim turbina prema [27]. Prilikom izrade modela pretpostavljeno je korištenje većeg broja plinskih turbina stoga je pretpostavljena konstantna električna i toplinska učinkovitost toplane. Prema [27] uključivanje toplane s plinskim turbinama odvija se na isti način s time da ovaj puta provjera opreme traje 5 minuta čemu je potrebno nadodati dvije minute ubrzavanja plinskih turbina kako bi se mogle same pokretati. Nakon ubrzavanja turbine slijedi povećavanje opterećenja turbine i sinkronizacija turbine na mrežu koja traje 1,5 minutu. Prilikom sinkronizacije je započeo proces povećavanja opterećenja turbina koji traje oko 11,5 minuta dok se ne poveća snaga na nazivnu. Također prilikom sinkronizacije započela je proizvodnja toplinske energije koja kasni ovaj puta 10 sekundi za početkom povećavanja opterećenja turbina te traje oko 16,5 minuta. Prilikom gašenja turbinama treba 12,5 minuta da smanje opterećenje s nazivnog do onog gdje ga nema te 15,5 minuta da se regenerator topline ohladi, odnosno da se prestane predavati toplinski tok centraliziranom toplinskom sustavu.

Proces povećavanja opterećenja je modeliran kao kod plinskih motora korištenjem proporcionalnog djelovanja drugog reda te ograničavanjem brzine povećavanja i smanjivanja ulaznog signala prijenosne funkcije. Signal opterećenja se kreće od 0 do 100%, odnosno od 0 do 1. Pošto proces povećavanja opterećenja od nule do nazivnog traje 11,5 minuta korišteno je ograničenje povećavanja signala od 1/690 po sekundi. Zbog vremenskog trajanja spuštanja opterećenja procesa od nazivnog do nule u iznosu od 12,5 minuta, ograničenje smanjivanja signala iznosi 1/750 po sekundi. Potom je potrebno odrediti izgled prijenosne funkcije. Zbog korištenje ograničenja prirasta signala pretpostavljena je amplitudu prvog polutitraja od 45% od ukupne zadane vrijednosti iz čega je moguće očitati koeficijent prigušenja koji iznosi 0,25. Zatim je pretpostavljeno trajanje prve poluperiode u trajanju od 90 sekundi. Zatim je izračunata frekvencija prigušenih oscilacija koja iznosi 0,0349 rad/s, a nakon toga frekvencija

neprigušenih oscilacija koja iznosi 0,0403 rad/s. Pojačanje je jednako nazivnoj električnoj snazi plinskih turbina. Uvrštavanjem u prijenosnu funkciju ona dobiva oblik:

$$H_{PT1}(s) = \frac{155 \cdot 0{,}001624}{s^2 + 0{,}020157s + 0{,}001624}; \tag{23}$$

Gdje je:

$H_{PT1}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene opterećenja toplane s plinskim turbinama.

Matematički model je modeliran tako da ukoliko je opterećenje toplane s plinskim turbinama jednako nuli prilikom povećavanja zahtijevanog toplinskog ili električnog opterećenja u prijenosnu funkciju ulazi signal koji je jednak nuli sve dok ne istekne vrijeme od 420 sekundi.

Opterećenje toplane s plinskim turbinama je proporcionalno proizvodnji električne energije osim u periodu sinkronizacije kada je proizvodnja električne energije jednaka nuli. Stoga je prilikom povećavanja opterećenja prvih 90 sekundi povećavanje ulaznog signala u prijenosnu funkciju jednako promjeni opterećenja, dok je izlaz za to vrijeme jednak nuli. Električna snaga koju toplana predaje električnoj mreži je jednaka umnošku izlaznog signala iz prijenosne funkcije (23) i nazivnoj električnoj snazi plinskih turbina. Pošto je nazivna toplinska snaga vršnih jedinica u toplani jednaka 150 MW. A prema [28] toplinska učinkovitost na 100% opterećenja je 41% dok je električna učinkovitost na 100% opterećenja jednaka 39% moguće je dobiti nazivnu električnu snagu vršnih jedinica koja iznosi 142,68 MW.

Toplinsko opterećenje je modelirano korištenjem signala opterećenja plinskih turbina s time da je korišteno i opterećenje tijekom perioda sinkronizacije. Kako bi se dobio signal toplinskog opterećenja signal opterećenja plinskih turbina je pomnožen s nazivnom toplinskom učinkovitošću, s nazivnom električnom snagom turbina te podijeljen s nazivnom električnom učinkovitošću i nazivnom toplinskom snagom regeneratora topline. Dobiveni signal je zatim modificiran tako što mu se ograničila brzina porasta signala na 1/990 po sekundi te brzina smanjivanja signala na 1/930 po sekundi. Zatim signal prolazi kroz prijenosnu funkciju koja sadrži mrtvo vrijeme koje iznosi 10 sekundi i proporcionalno djelovanje drugog reda. Prilikom modeliranja proporcionalnog djelovanja drugog reda pretpostavljena je ovaj puta manje trajanje prve poluperiode u trajanju od 70 sekundi. Također je pretpostavljena amplituda prvog polutitraja od 45% od ukupne zadane vrijednosti pa je koeficijent prigušenja jednak 0,25. Zatim je moguće izračunati frekvenciju prigušenih oscilacija koja iznosi 0,0449 rad/s te frekvenciju

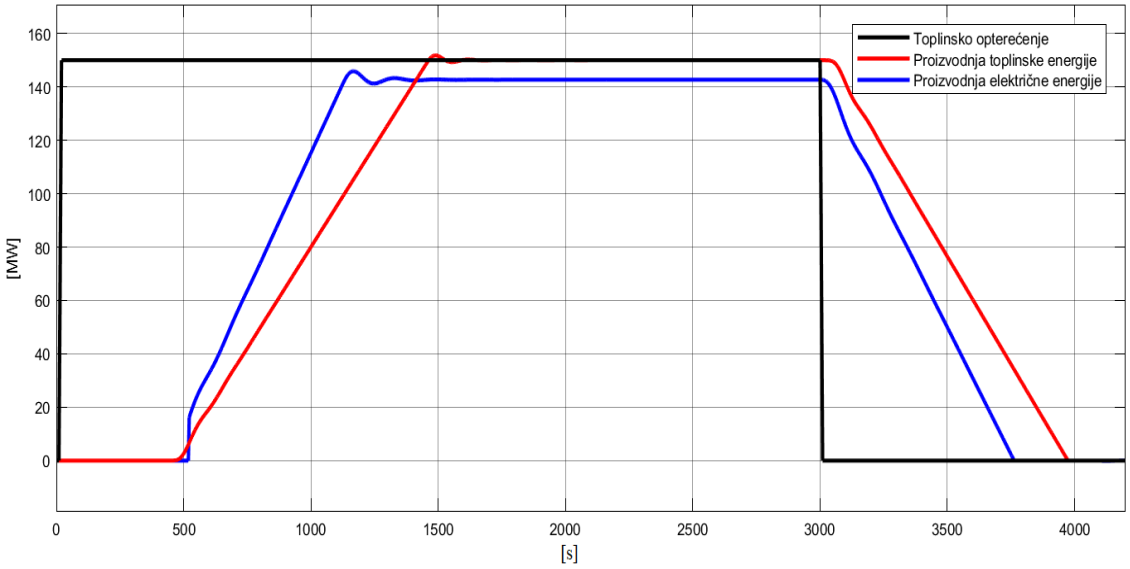
neprigušenih oscilacija koja iznosi 0,0518 rad/s. Pojačanje je jednako nazivnoj toplinskoj snazi koja iznosi 150 MW, stoga je prijenosna funkcija oblika:

$$H_{PT2}(s) = \frac{150 \cdot 0{,}00268}{s^2 + 0{,}0259s + 0{,}00268} \cdot e^{-10s}; \tag{24}$$

Gdje je:

$H_{PT2}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s plinskim turbinama.

Pošto se radi o kogeneracjiskoj tehnologiji matematički model je izrađen na način da može pratiti električno opterećenje električne mreže ili vršno toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava. Signal zadanog električnog opterećenja može direktno ići kroz opisani model pošto je električno opterećenje ekvivalentno opterećenju plinskih turbina. Signal vršnog toplinskog opterećenja je potrebno modificirati na način da se pretvori u signal potrebnog opterećenja plinskih turbina. To se postiglo množenjem signala vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava nazivnom toplinskom učinkovitošću plinskih turbina, s nazivnom električnom snagom plinskih turbina te dijeljenjem s nazivnom električnom učinkovitošću plinskih turbina te s nazivnom toplinskom snagom plinskih turbina.



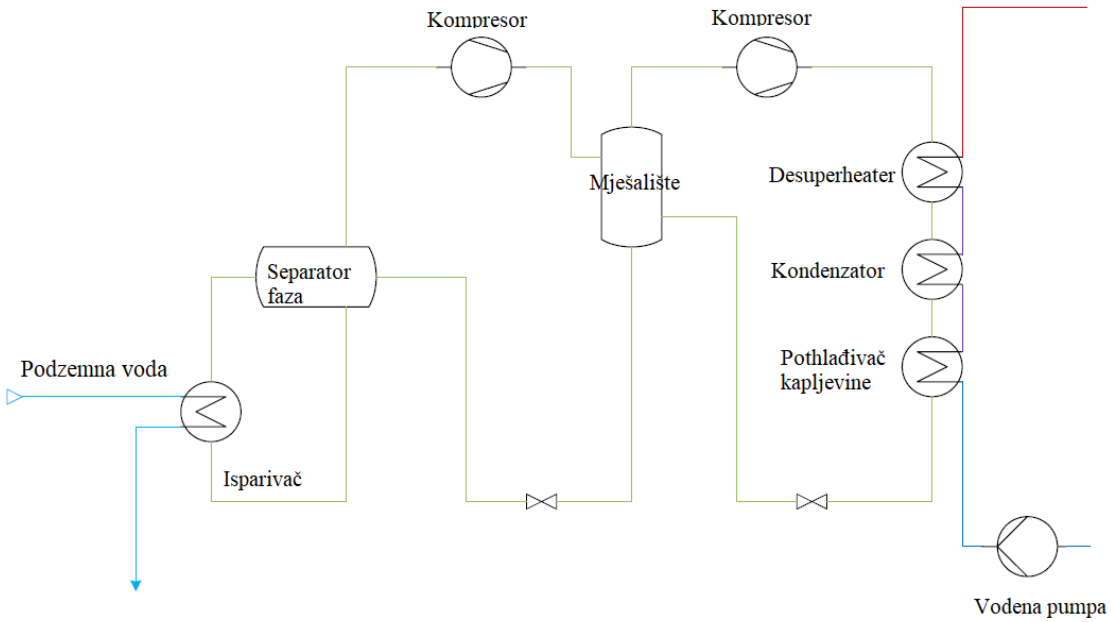
Slika 24. Odziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih turbina na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava

Na prethodnoj slici je prikazan odaziv proizvodnje električne i toplinske energije plinskih turbina prilikom promjene vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava na način da se toplinsko opterećenje mijenja od nule do maksimalnog opterećenja, a zatim se vraća na nulu. Prikazano je da izrađeni model dovoljno dobro opisuje brzine odziva na poremećaje. Plinske turbine posjeduju dovoljno brz odaziv snage da mogu sudjelovati kao pozitivna tercijarna regulacija na tržištu električne energije ukoliko su pritom pogonjene na tehnološkom minimumu ili na višem kapacitetu.

Potrošnja prirodnog plina se računa korištenjem jednadžbe (19).

6.5. Matematički model dinamike procesa dizalica topline

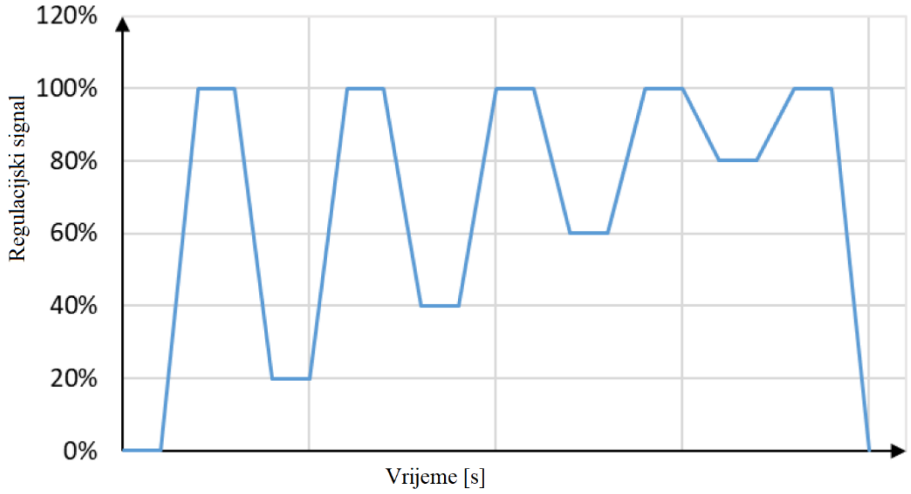
Izrađen je matematički model dinamike procesa dizalice topline čiji je shematski dijagram prikazan na sljedećoj slici.



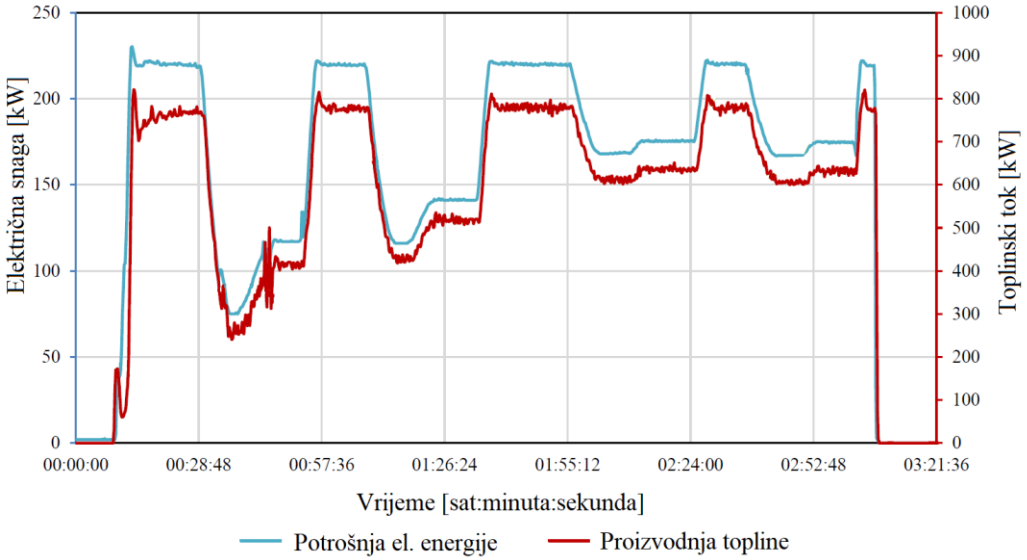
Slika 25. Shematski dijagram modelirane dizalice topline

Prikazana dizalica topline koristi amonijak kao radnu tvar. Dvostupanjsku kompresiju radne tvari s mješalištem. Kao toplinski izvor koristi se voda iz podzemlja. Koriste se dva stapna kompresora i dva elektronička ekspanzijska ventila. Korištenjem kondenzatora, pothlađivača kapljevine i desuperheatera zagrijava se voda iz centraliziranog toplinskog sustava. Regulacija sustava se odvija frekvencijskom regulacijom kompresora. Pojednostavljeni matematički

model je izrađen korištenjem ispitnih podataka dobivenih testiranjem realnog sustava koji je prikazan na shematskom dijagramu te koji je izgrađen koristi se u Danskoj. Kako bi se postigla potrebna maksimalna toplinska snaga za namirivanje centraliziranog toplinskog sustava toplinom koristi se više prikazanih sustava. Stoga je moguće zanemariti postojanje tehničkog minimuma. U ovom slučaju je pretpostavljena temperatura polaza centraliziranog toplinskog sustava od 70°C pa zbog korištenja većeg broja sustava koristiti će se konstantni toplinski množitelj koji za ovaj slučaj prema [29] iznosi 3,55. Na slijedećim slikama je prikazan regulacijski signal i odzivi električne i toplinske snage na taj isti signal realnog postrojenja pomoću kojih je modeliran pojednostavljeni matematički model.



Slika 26. Regulacijski signal prilikom ispitivanja realne dizalice topline; [29]



Slika 27. Podaci dobiveni ispitivanjem realne dizalice topline; [29]

Za određivanje položaja pojedinih točaka u prethodnim grafovima korišten je *WebPlotDigitizer* [26] pomoću kojeg je izmjereno vrijeme potrebno za postizanje nazivne snage koje iznosi 9,58 minuta te vrijeme potrebno za spuštanje snage s nazivne do snage pri kojoj se ne troši električna energija 12,78 minuta. Također je izmjereno kašnjenje signala proizvodnje toplinske energije za potrošnjom električne energije koje iznosi 50 sekundi.

Matematički model dinamike procesa ovaj puta je izveden korištenjem proporcionalno integralnog regulatora te sa zbrojem dvaju proporcionalnih djelovanja prvog reda kod kojih su korištena čista pojačanja. Model je izrađen na takav način da kao ulazni signal može biti omjer vršnog toplinskog opterećenja i maksimalnog vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava ili omjer potrebne potrošnje snage i maksimalne električne snage dizalica topline. Na taj način je moguća simulacija dizalice topline s ciljem namirivanja vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava ili simulacija pružanja pomoćnih usluga na tržištu električne energije. Signalima koji ulaze u model prvo se ograničava brzina porasta signala na 1/575 po sekundi ili brzina spuštanja signala na 1/767. Zatim se signal pretvara u potreban toplinski tok koji sustav za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja treba proizvesti. Nakon toga se od signala oduzima trenutna proizvodnja toplinske energije. Proporcionalno integralni regulator modificira signal pokušavajući minimalizirati izračunatu razliku signala slanjem modificiranog signala prema prijenosnim funkcijama kojima se modelira potrošnja električne energije dizalice topline. Korištenjem mrtvog vremena od 50 sekundi te množenjem signala potrošnje električne energije s toplinskim množiteljem dobiva se trenutna proizvodnja toplinske energije.

Pojačanja, vremenski koeficijenti proporcionalnih djelovanja i proporcionalno integralnog regulatora su dobiveni metodom pokušaja i pogreške sve dok nisu dobiveni odzivi zadovoljavajućih izgleda. Dobiveno pojačanje prvog proporcionalnog djelovanje prvog reda iznosi 220, a vremenska konstanta 150 sekundi. Pojačanje drugog proporcionalnog djelovanja prvog reda iznosi 2,75, dok mu je vremenska konstanta 1,5 sekundi. Zbroj prijenosnih funkcija se koristi za računanje električnog opterećenja sustava u jednom trenutku. Da bi se dobila prijenosna funkcija za računanje toplinskog toka koji dizalice topline proizvode prethodnu prijenosnu funkciju je potrebno pomnožiti s pojačanjem u iznosu toplinskog množitelja te s mrtvim vremenom u trajanju od 50 sekundi. Pojačanje proporcionalno integralnog regulatora

iznosi 0,0046198, dok integracijska vremenska konstanta iznosi 188,56. Prijenosne funkcije su oblika:

$$H_{DT1}(s) = \frac{220}{150s+1} + \frac{2{,}75}{1{,}5s+1}; \tag{25}$$

$$H_{DT2}(s) = 3{,}55 \cdot e^{-50s}; \tag{26}$$

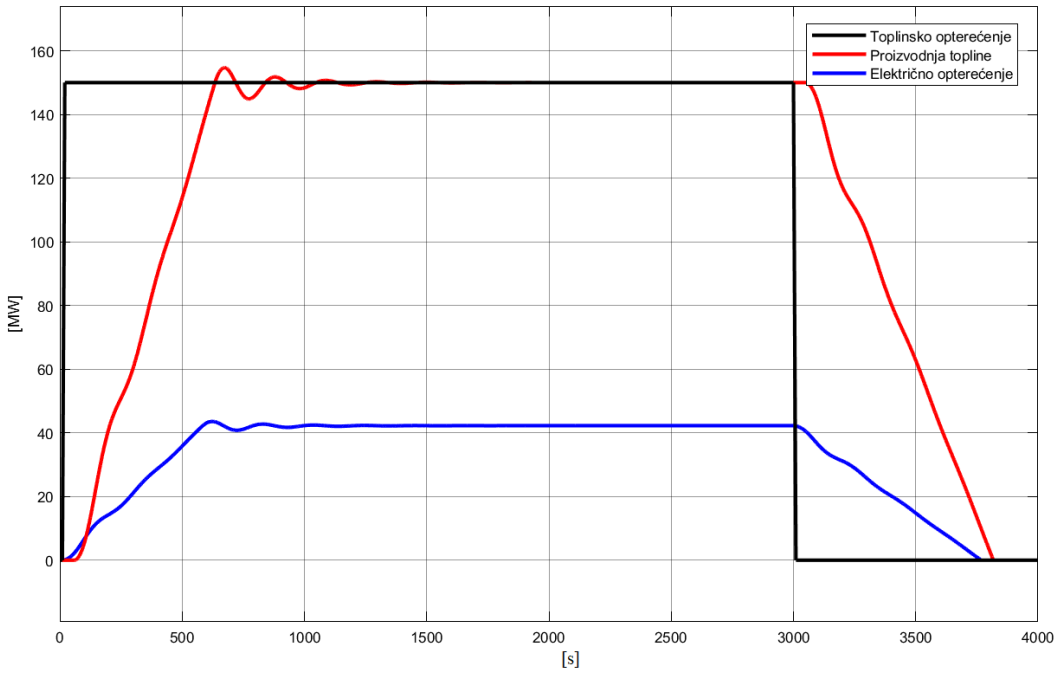
$$H_{PIDT}(s) = 0{,}0046198 + \frac{0{,}0046198}{188{,}56} \cdot \frac{1}{s}; \tag{27}$$

Gdje su:

$H_{DT1}(s)$– prijenosna funkcija korištena za pretvorbu izlaznog signala proporcionalno integralnog regulatora u električnu snagu dizalice topline,

$H_{DT2}(s)$– prijenosna funkcija korištena za pretvorbu izlaznog signala električne snage dizalice topline u proizvodnju toplinske snage,

$H_{PIDT}(s)$– prijenosna funkcija proporcionalno integralnog regulatora dizalice topline.



Slika 28. Odzivi električnog opterećenja i proizvodnje topline dizalice topline prilikom povećavanja i spuštanja toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava

Na prethodnim slikama prikazani su odzivi proizvodnje toplinske energije i električnog opterećenja 15 dizalica topline na poremećaj promjene vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava. Izrađeni model ne predstavlja savršeno rješenje sa simulaciju rada dizalica topline, ali je dovoljno dobar za određivanje brzine odziva.

Ukupnu potrošnju električne energije prilikom rada je moguće dobiti integriranjem vrijednosti električnog opterećenja sustava. Dizalice topline posjeduju dovoljno brz odaziv snage da mogu sudjelovati kao negativna sekundarna rezerva na tržištu električne energije ukoliko su pritom pogonjene na 50% kapaciteta ili na višem kapacitetu. Za sudjelovanje u tercijarnoj regulaciji mogu biti u stanju mirovanja.

6.6. Matematički model dinamike procesa električnih kotlova

U slijedećem dijelu je opisan matematički model dijela toplane koji za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja koristi toplovodne električne kotlove s elektrodama. Matematički model dinamike procesa električnih kotlova je izrađen korištenjem podataka iz [32]. Ovakvi kotlovi u cijelom rasponu radnog područja imaju približno konstantnu učinkovitost pa je korištena vrijednost učinkovitosti 97%. Prilikom izrade modela pretpostavljeno je korištenje većeg broja električnih kotlova stoga je zanemareno postojanje tehničkog minimuma. Sustavu nakon što registrira potrebno povećanje vršnog toplinskog opterećenja treba 16 sekundi da počne povećavati potrošnju električne energije. Zatim ukoliko je potrebna osigurati maksimalnu proizvodnju topline sustava, sustavu treba 30 sekundi da poveća električno opterećenje do nazivne električne snage kotlova. Kako se povećava električno opterećenje sustava temperatura vode rapidno raste te topla voda zagrijava izmjenjivač topline kroz koji struji voda iz centraliziranog toplinskog sustava. Maksimalna proizvodnja toplinske energije se postiže 60 sekundi nakon što kotlovi budi opterećeni maksimalnom električnom snagom. Prilikom smanjivanja električnog opterećenja sustavu treba 30 sekundi da smanji električno opterećenje od nazivnog do onog gdje ga nema te sustav prestaje s proizvodnjom topline 60 sekundi nakon toga.

Proces povećavanja opterećenja je kao i kod prijašnjih modela izrađen korištenjem proporcionalnog djelovanja drugog reda, mrtvog vremena, čistog pojačanja te ograničavanjem brzine povećavanja i smanjivanja ulaznog signala prijenosne funkcije. Signal električnog opterećenja se kreće od 0 do 100%, odnosno od 0 do 1. Pošto proces povećavanja opterećenja

od nule do nazivnog i spuštanja opterećenja s nazivnog do onog kada ga nema traje 30 sekundi korišteno je ograničenje povećavanja i spuštanja signala od 1/30 po sekundi. Zatim je određen izgled prijenosne funkcije. Zbog korištenje ograničenja prirasta signala pretpostavljena je amplitudu prvog polutitraja od 35% od ukupne zadane vrijednosti iz čega je moguće očitati koeficijent prigušenja koji iznosi 0,3. Zatim je pretpostavljeno trajanje prve poluperiode u trajanju od 10 sekundi. Pomoću jednadžbe (13) izračunata je frekvencija prigušenih oscilacija koja iznosi 0,03142 rad/s. Pomoću jednadžbe (14) izračunata je frekvencija neprigušenih oscilacija koja iznosi 0,3755 rad/s. Iznos čistog pojačanja je jednak nazivnoj električnoj snazi sustava koja uz učinkovitost sustava od 97% i nazivnu toplinsku snagu od 150 MW iznosi 154,6 MW. Pošto sustavu treba 16 sekundi da reagira na poremećaj vremenska konstanta mrtvog vremena iznosi 16 sekundi. Uvrštavanjem konstanti u prijenosnu funkciju ona dobiva oblik:

$$H_{EK1}(s) = \frac{20{,}516}{s^2 + 0{,}2253s + 0{,}141} e^{-16s}; \tag{28}$$

Gdje je:

$H_{EK1}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene električnog opterećenja toplane s električnim kotlovima.

Model je modeliran tako da u njega prvo ulazi signal potrebnog električnog opterećenja koji je u rasponu od 0 do 1. Zatim mu se ograničava prirast te prolazi kroz prijenosnu funkciju. Nakon toga prolazi kroz drugu prijenosnu funkciju koja sadrži čisto pojačanje u iznosu učinkovitosti sustava te mrtvo vrijeme od 60 sekundi. Izlazni signal iz druge prijenosne funkcije predstavlja ukupni dobiveni toplinski tok sustava. Druga prijenosna funkcija ima oblik:

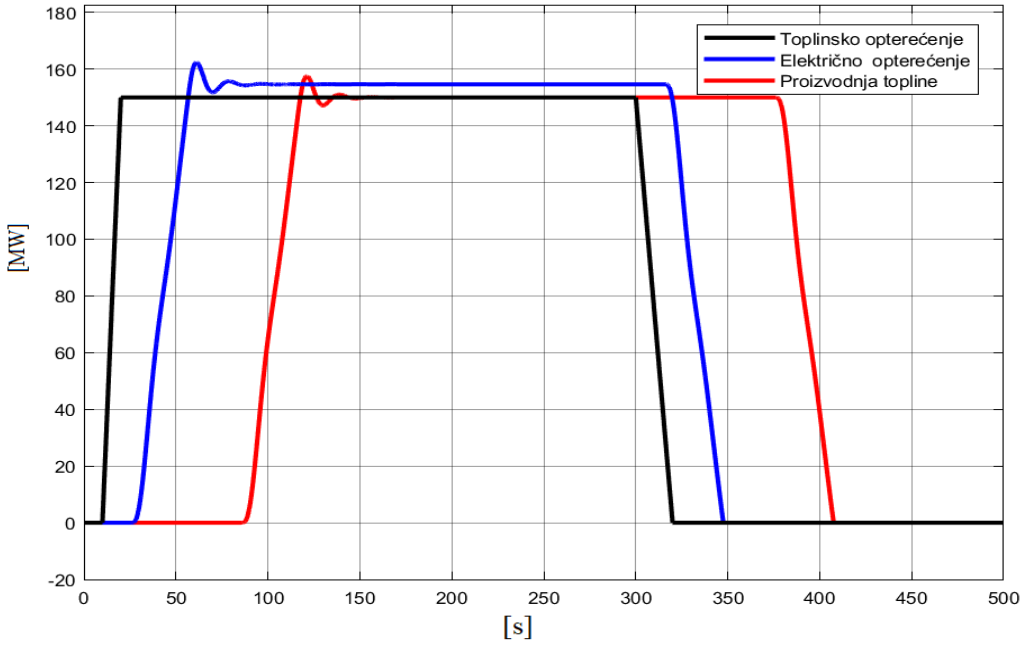
$$H_{EK2}(s) = 0{,}97e^{-16s}; \tag{29}$$

Gdje je:

$H_{EK2}(s)$– prijenosna funkcija korištena prilikom promjene toplinskog opterećenja toplane s električnim kotlovima.

Matematički model je izrađen na način da je omogućeno simuliranje odziva sustava na poremećaj vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava, ali i odziva na poremećaje u električnoj mreži čime se omogućuje simulacija pružanja pomoćnih usluga na tržištu električne energije. Na slijedećoj slici je prikazan odaziv potrošnje električne energije te proizvodnje toplinske energije 3 električnih kotlova ukupne toplinske snage 150 MW prilikom

promjene vršnog toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava na način da se toplinsko opterećenje mijenja od nule do maksimalnog opterećenja, a zatim se vraća na nulu.



Slika 29. Odziv potrošnje električne i proizvodnje toplinske energije električnih kotlova na promjenu toplinskog opterećenja centraliziranog toplinskog sustava

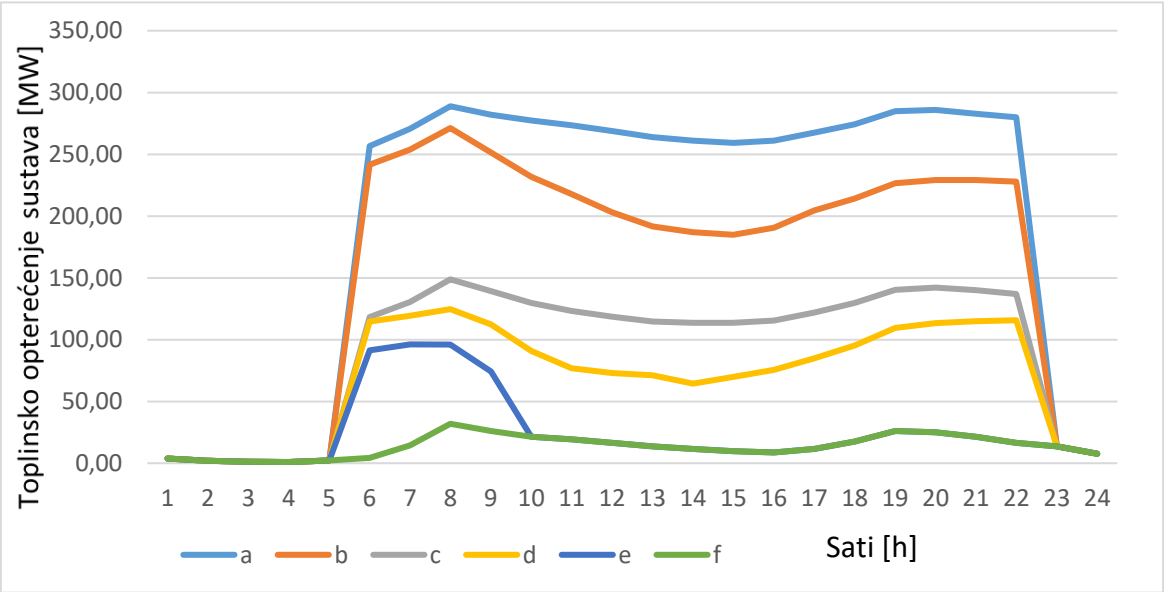
Prikazano je da izrađeni model dovoljno dobro opisuje brzine odziva na poremećaje. Električni kotlovi mogu u svim rasponima opterećenja sudjelovati kao primarna sekundaran i tercijarna rezerva na tržištu električnom energijom.

Potrošnja električne energije se računa integriranjem signala električnog opterećenja sustava.

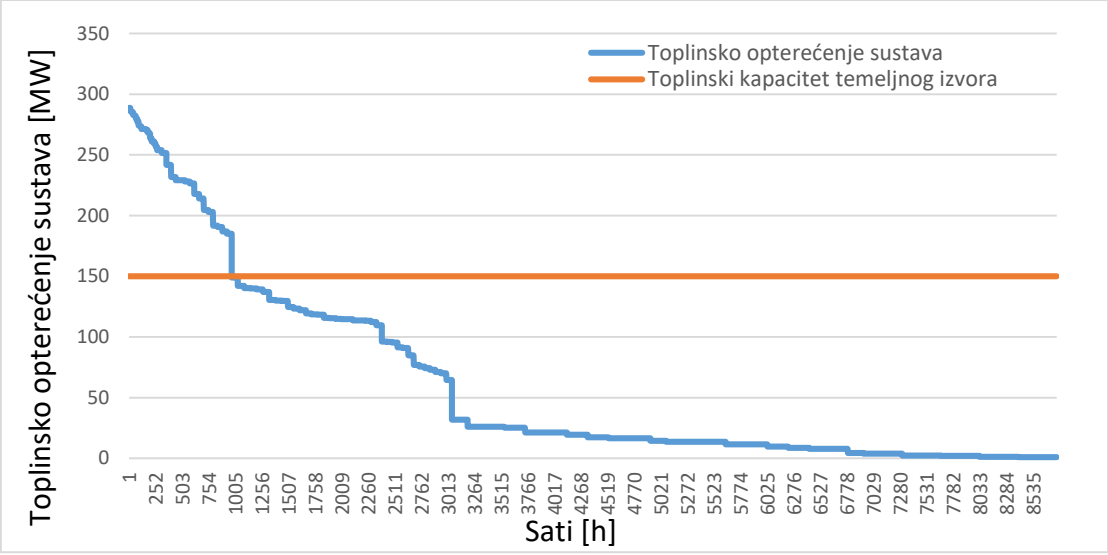
6.7. Odabir karakterističnih dana toplinskog opterećenja za simulaciju pogona toplane

Radi simulacije pogona toplane određeni su karakteristični dani koji dovoljno dobro opisuju toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava tijekom cijele godine. Karakteristični dani su odabrani prema razmjeru toplinskog opterećenja koje se tijekom godine mijenja. Odabrano je šest karakterističnih dana koji se u različitim vremenskim razdobljima javljaju. Karakteristični dan *a* predstavlja hladni zimski dan, a javlja se 13 puta u godini. Karakteristični dan *b* predstavlja umjerenije hladan zimski dan u odnosu na dan *a*, a javlja se 44 puta u godini. Karakteristični dan *c* predstavlja hladniji proljetni i jesenski dan, a javlja se 59 dana u godini. Karakteristični dan *d* predstavlja prosječno hladan proljetni i jesenski dan i javlja se 52 puta.

Dan *e* predstavlja topli proljetni i jesenski dan koji se pojavljuje 48 puta. Dan *f* predstavlja veoma tople proljetne i jesenske te ljetne dane te se javlja 149 dana u godini. Kada se toplinsko opterećenje u svakom satu zbroji i pomnoži sa brojem karakterističnih dana dobije se vrijednost od 521,8 GWh ukupnog godišnjeg toplinskog opterećenja kojeg je potrebno namiriti što je u odnosu na vrijednost izračunatu metodologijom iz poglavlja 5.1 veće za 0,57% što znači da su karakteristični dani dobro odabrani te da su pogodni za korištenje prilikom simulacije pogona toplane.



Slika 30. Toplinsko opterećenje karakterističnih dana



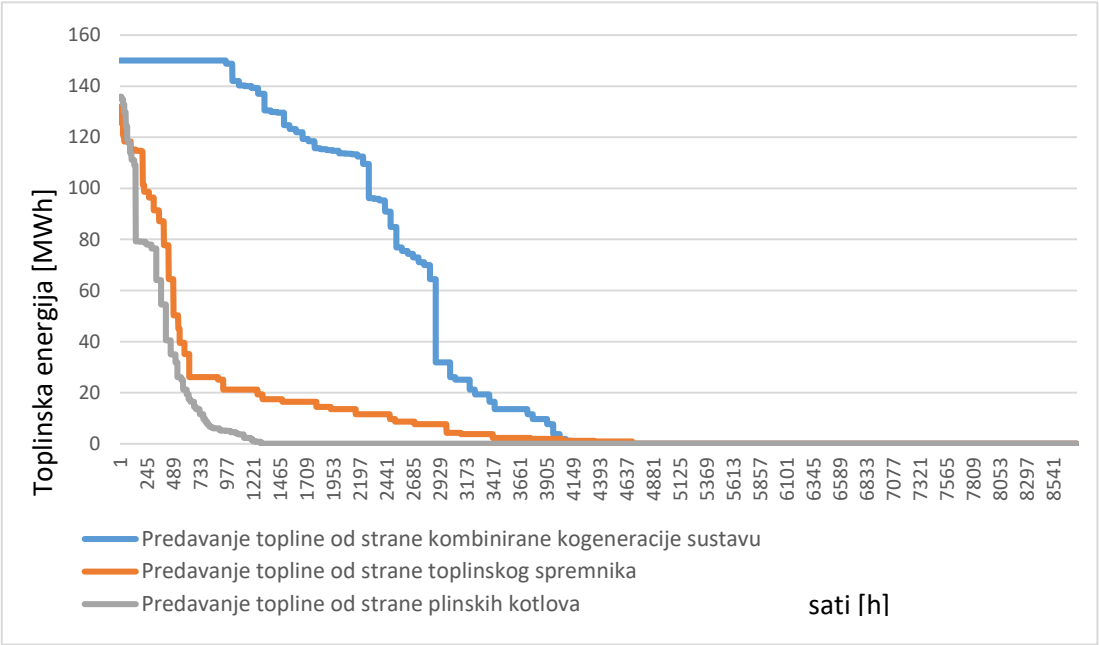
Slika 31. Vrijeme trajanja toplinskog opterećenja dobiveno korištenjem karakterističnih dana

Na prethodnoj slici je vidljivo da vršno toplinsko opterećenje traje oko 1000 sati što je za oko 200 sati manje u odnosu na izračunato u poglavlju 6.1, ali je zato većih iznosa, to će imati utjecaja na točnost simulacije zbog utjecaja tehničkih minimuma korištenih tehnologijama u simulacijama.

6.8. Simulacija pogona toplane sa toplovodnim plinskim kotlovima i proračun prihoda i rashoda toplane

Toplana koristi fleksibilnu visokoučinkovitu kogeneracijsku jedinicu koja koristi kombinirani plinsko-parni proces za proizvodnju toplinske i električne energije. Jedinica je nazivne toplinske snage 150 MW. Podaci o jedinici su preuzeti s [31] Prosječna godišnja električna učinkovitost iznosi 55%, protutalčni koeficijent iznosi 1,7 pa je maksimalna električna snaga 255 MW te ukupna prosječna učinkovitost iznosi nešto više od 90%. Koeficijent smanjenja električne snage s povećanjem toplinskog opterećenja iznosi 0,15 pa je ukupna učinkovitost nešto viša od 90%. Tehnički minimum jedinice iznosi 40%. U simulaciji je korišten i toplinski spremnik kapaciteta 750 MWh toplinske energije čija je toplinska učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja toplinskom energijom ukoliko se spremnik tjedan dana nakon punjenja isprazni 95% [32]. Zbog visoke učinkovitosti kogeneracijska jedinica ima status povlaštenog proizvođača te nastoji proizvesti što više električne energije koja se isporučuje po povlaštenoj cijeni. Preduvjet ostvarivanja više razine učinkovitosti je kontinuirana proizvodnja toplinske energije koja se ne smije evakuirati u okoliš, nego mora namirivati toplinske potrebe centralnog toplinskog sustava. Kada postoji toplinsko opterećenje toplinski spremnik omogućava rad postrojenja onda kada je toplinsko opterećenje ispod tehničkog minimuma postrojenja. Rad kombinirane kogeneracije je simuliran tako da ukoliko je toplinsko opterećenje sustava veće od nazivnog kombinirane jedinice ona radi nazivnim toplinskim kapacitetom i svu toplinu predaje distribucijskom sustavu, ukoliko je toplinsko opterećenje sustava između nazivne snage jedinice i tehničkog minimuma, ona održava toplinsku snagu jednaku toplinskom opterećenju sustava. Ako je toplinsko opterećenje manje od tehničkog minimuma kombinirana kogeneracijska jedinica radi na nazivnoj toplinskoj snazi predajući višak topline toplinskom spremniku. Ukoliko je toplinski spremnik napunjen do kraja jedinica se gasi. Toplinski spremnik predaje toplinu centraliziranom toplinskom sustavu ukoliko iznos toplinskog opterećenja sustava prijeđe nazivnu toplinsku snagu kogeneracijske jedinice i ako je toplinsko

opterećenje ispod tehnološkog minimuma kogeneracijske jedinice, punjenje i pražnjenje je modelirano tako da je na početku i na kraju dana jednakog iznosa.



Slika 32. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim kotlovima

Unutar sustava postoji 5 plinskih toplovodnih kotlova ukupne toplinske snage 150 MW koji se uključuju ako toplinski spremnik i kogeneracijska jedinica nisu u stanju predati dovoljno toplinske energije sustavu. Tehnički minimum plinskih kotlova iznosi 4,5 MW odnosno 15% [31] toplinske snage pojedinačnih jedinica i uzet je u obzir. Ukoliko je ostatak toplinskog opterećenja manji od tehničkog minimuma plinskih kotlova, oni će raditi na tehničkom minimumu, predavati potrebnu toplinu distribucijskoj mreži, a ostatak će pohraniti u toplinskom spremniku. Učinkovitost plinskih kotlova iznosi 87%.

Na slici 32 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu. Toplinska opterećenja pojedinih komponenti su umanjene za iznos punjenja toplinskog spremnika. Na dijagramu je vidljivo kako kombinirano kogeneracijsko postrojenje namiruje većinu toplinskih potreba sustava te radi najveći broj sati na nazivnom toplinskom opterećenju, pri tome mu pomaže toplinski spremnik koji se manjim intenzitetom puni toplinskom energijom iz plinskih kotlova koji ovakvim radom nikada ne dostižu nazivno toplinsko opterećenje, već dostižu maksimalno toplinsko opterećenje koje iznosi 136 MW toplinske snage.

Proizvedena električna energija kogeneracijskog postrojenja je je proračunata korištenjem ranije spomenutog koeficijenta umanjenja električne snage u ovisnosti o visini toplinskog opterećenja kogeneracijskog postrojenja i na godišnjoj razini iznosi 982,84 GWh. Ukupna proizvedena toplinska energija je jednaka ukupnom toplinskom opterećenju i iznosi 521,8 GWh. Kako bi se proračunali prihodi od proizvodnje električne energije korištena je poticajna cijena električne energije koja prema [33] iznosi 504 kn/MWh za dnevnu tarifu koja se obračunava od 7 sati do 21 sati te 251,8 kn za noćnu tarifu koja se obračunava od 21 sat do 7 sati. U proračunu prihoda pretpostavljena je cijena toplinske energije koja je proračunata tako da je pretpostavljeno da je cijena topline jednaka cijeni plina za kućanstva uvećanoj za 5% te umanjenoj za troškove distribucije topline i za gubitke topline u distribucijskoj mreži. Cijena plina za kućanstva prema [34] iznosi 242 kn/MWh donje ogrijevne vrijednosti plina, trošak distribucije topline je pretpostavljeni iznosi 75 kn/MWh, a toplinski gubici u distribucijskoj mreži iznose 10% pa ispada da toplana može za toplinu na pragu toplane dobiti 179 kn/MWh. Potrošnja prirodnog plina ovisi o učinkovitosti jedinica koje se koriste u sustavu. Za proračun potrošnje prirodnog plina kombiniranog postrojenja korištena je ranije navedena prosječna električna učinkovitost sustava, dok je za proračun potrošnje prirodnog plina plinskih kotlova korištena ranije navedena toplinska učinkovitost. Potrošnja plina kogeneracijskog postrojenja iznosi 1787 GWh godišnje. Potrošnja plina plinskih kotlova iznosi 18841 MWh godišnje zbog proizvodnje toplinske energije koja iznosi 48772 MWh godišnje. Pretpostavljeno je da je cijena plina koju postrojenje plaća umanjena za 31% od cijene za kućanstva zbog garantirane veće potrošnje i zbog manjih troškova distribucije plina po MWh pa je u proračunu korištena cijena plina koja iznosi 169,74 kn/MWh. Prilikom proračuna emisija CO_2 korišten je podatak iz [35] prema kojem se emitira 0,1807 tona CO_2 po MWh utrošenog plina. Cijena emisije CO_2 je prema [36] 166,72 kn/toni emitirano CO_2.

Tablica 1. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim kotlovima;

	Kombinirane kogeneracijske jedinice	Plinskih kotlova	Toplinskog spremnika
Investicijski trošak	6,75 Mkn/MWe	0,45 Mkn/MWh	0,0225 Mkn/MWht
Ostali varijabilni troškovi	33,8 Mkn/MWhe	8,3 kn/MWhh	-
Ostali fiksni troškovi	30000 kn/MWe	15000 kn/MWh	157,5 kn/MWht

U tablici 1. su prikazane tehno-ekonomske karakteristike komponenata sustava koje su preuzete sa [32] i [31] s time da su troškovi kogeneracijske jedinice izraženi po MW i MWh električne snage i energije, dok su troškovi plinskih kotlova i toplinskog spremnika izraženi po MW i MWh toplinske snaga i kapaciteta. U tablici 2 su prikazani prihodi.

Tablica 2. Prihodi toplane s plinskim kotlovima;

Ukupan godišnji prihod od el. energije	437,7 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	521,8 Mkn

U tablici 3 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

Tablica 3. Rashodi toplane s plinskim kotlovima;

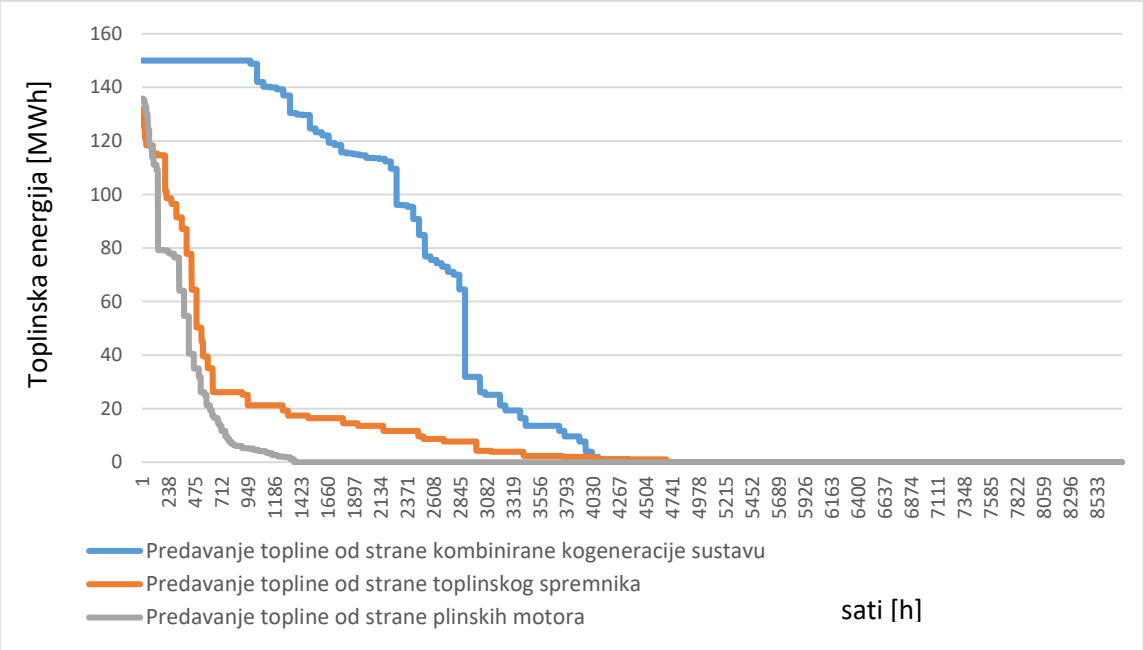
Trošak na plin	305,7 Mkn
Trošak na emisije CO2	55,5 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	33,2 Mkn
Ostali varijabilni troškovi plinskih kotlova	0,2 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak plinskog kotla	2,8 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika	0,9 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi plinskih kotlova	2,3 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika	0,11 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	480,6 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka dobivena je dobit prije oporezivanja koja iznosi 41,2 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn potrebna cijena toplinske energije mora iznositi 82,23 kn/MWh.

6.9. Simulacija pogona toplane s plinskim motorima i proračun prihoda i rashoda toplane

I ovaj puta toplana koristi fleksibilnu visokoučinkovitu kogeneracijsku jedinicu koja koristi kombinirani plinsko-parni proces za proizvodnju toplinske i električne energije jednakih kapaciteta i mogućnosti. U simulaciji je ponovno korišten i toplinski spremnik kapaciteta 750 MWh toplinske energije. Rad kombinirane kogeneracije i toplinskog spremnika je simuliran na jednak način kao i u simulaciji s plinskim kotlovima. U unutar sustava postoji 15 plinskih motora ukupne toplinske snage 150 MW koji se uključuju ako toplinski spremnik i kogeneracijska jedinica nisu u stanju predati dovoljno toplinske energije sustavu. Tehnički minimum plinskih motora iznosi 5 MW odnosno 50% [31] toplinske snage pojedinačnih jedinica te je uzet u obzir. Ukoliko je ostatak toplinskog opterećenja manji od tehničkog minimuma plinskih motora oni će raditi na tehničkom minimumu, predavati potrebnu toplinu distribucijskoj mreži, a ostatak će pohraniti u toplinskom spremniku. Električna učinkovitost plinskih motora iznosi 46%, dok je toplinska učinkovitost jednaka 43%. Proizvodnja električne energije se računa pomoću jednadžbe (27). Korištenjem pojednostavljenog matematičkog modela iz poglavlja 6.4 vidi se da plinski motori mogu sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga električne energije sudjelovanjem u sekundarnoj regulaciji električne mreže pošto mogu podići proizvodnju električne energije s 50% na 100% kapaciteta unutar dvije minute. Pošto plinski motori moraju namirivati vršno toplinsko opterećenje kada je to neophodno, sudjelovanje na tržištu pomoćnih usluga je moguće samo za hladnih dana uz korištenje toplinskog spremnika u kojem bi se toplinska energija skladištila. Motori bi radili kada nema toplinskog opterećenja na 50% kapaciteta te bili dijelom sekundarne rezerve električne mreže. Plinski motori imaju vrlo visoku učinkovitost proizvodnje toplinske i električne energije te mogu imati status povlaštenog proizvođača čime se ostvaruje vrlo povoljna cijena električne energije kao kod kombinirane jedinice. Provedena je analiza pomoću koje je zaključeno da li sudjelovanje ovakvog sustava u sekundarnoj regulaciji električne mreže ima smisla. Korištenjem modela u točci 6.4 izračunato je da bi ukoliko plinski motori tijekom noći nude 3 sata pozitivnu sekundarnu rezervu i ukoliko se pojavljuje potreba za aktivacijom maksimalne sekundarne rezerve 3 puta plinski motori bi proizveli 369 MWh električne i 366 MWh toplinske energije pri čemu bi uz naknadu za sudjelovanje u sekundarnoj rezervi od 82,5 kn/MW snage u rezervi u jednom satu [37] uprihodile 158545 kn. Toplinski tok se mora predati centraliziranom toplinskom sustavu tijekom dana i tada plinski motori ne mogu raditi. Ukoliko bi plinski motori proizveli istu

količinu toplinske energije tijekom dana zaradili bi 254234 kn zbog više tarifi cijene električne energije. Također je vjerojatnije da će se tijekom noći aktivirati negativna rezerva, a ne pozitivna zbog manjih potreba za električnom energijom i zbog postojanja vjetroelektrana koje su spojene na električnu mrežu.



Slika 33. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim motorima

Na slici 33 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu. Toplinska opterećenja pojedinih komponenti su umanjene za iznos punjenja toplinskog spremnika. Na dijagramu je vidljivo kako kombinirano kogeneracijsko postrojenje namiruje većinu toplinskih potreba sustava te radi najveći broj sati na nazivnom toplinskom opterećenju kao i u prijašnjoj simulaciji. Plinski motori i ovaj puta postižu maksimalno toplinsko opterećenje koje iznosi 136 MW toplinske snage.

Proizvedena električna energija kogeneracijskog postrojenja je proračunata kao i ranije na godišnjoj razini iznosi 982,84 GWh, dok proizvedena električna energija plinskih motora iznosi 50276 MWh. Ukupna proizvedena toplinska energija je jednaka ukupnom toplinskom opterećenju i iznosi 50276 MWh. Proračun prihoda od proizvodnje električne energije je jednak kao i kod simulacije s plinskim kotlovima korištenjem poticajna cijena električne energije. U proračunu prihoda pretpostavljena je cijena toplinske energije koja je jednaka proračunatoj u simulaciji s plinskim kotlovima. Potrošnja prirodnog plina ovisi o učinkovitosti jedinica koje

se koriste u sustavu. Za proračun potrošnje prirodnog plina kombiniranog postrojenja i plinskih motora korištene su ranije naveden prosječna električna učinkovitosti jedinica. Potrošnja plina kogeneracijskog postrojenja iznosi 1787 GWh godišnje. Potrošnja plina plinskih motora iznosi 109296 MWh. godišnje zbog proizvodnje toplinske energije koja iznosi 48772 MWh godišnje. Pretpostavljena cijena plina je jednaka kao i ranije.

Tablica 4. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim motorima;

	Plinskih motora
Investicijski trošak	7,5 Mkn/MW_e
Ostali varijabilni troškovi	40,5 kn/MWh_e
Ostali fiksni troškovi	75000 kn/MW_e

U tablici 4. su prikazane tehno-ekonomske karakteristike komponenata sustava koje su preuzete sa [32] i [31] s time da su tehno-ekonomske karakteristike kogeneracijske jedinice i toplinskog spremnika jednake kao kod simulacije s plinskim kotlovima. Troškovi plinskih motora su izraženi po MW i MWh električne snage i energije, dok su troškovi toplinskog spremnika izraženi po MW i MWh toplinske snaga i kapaciteta. U tablici 5 su prikazani prihodi.

Tablica 5. Prihodi toplane s plinskim motorima;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	437,7 Mkn
Ukupan godišnji prihod od el. energije plinskih motora	22,2 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	544 Mkn

U tablici 6 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

Tablica 6. Rashodi toplane s plinskim motorima;

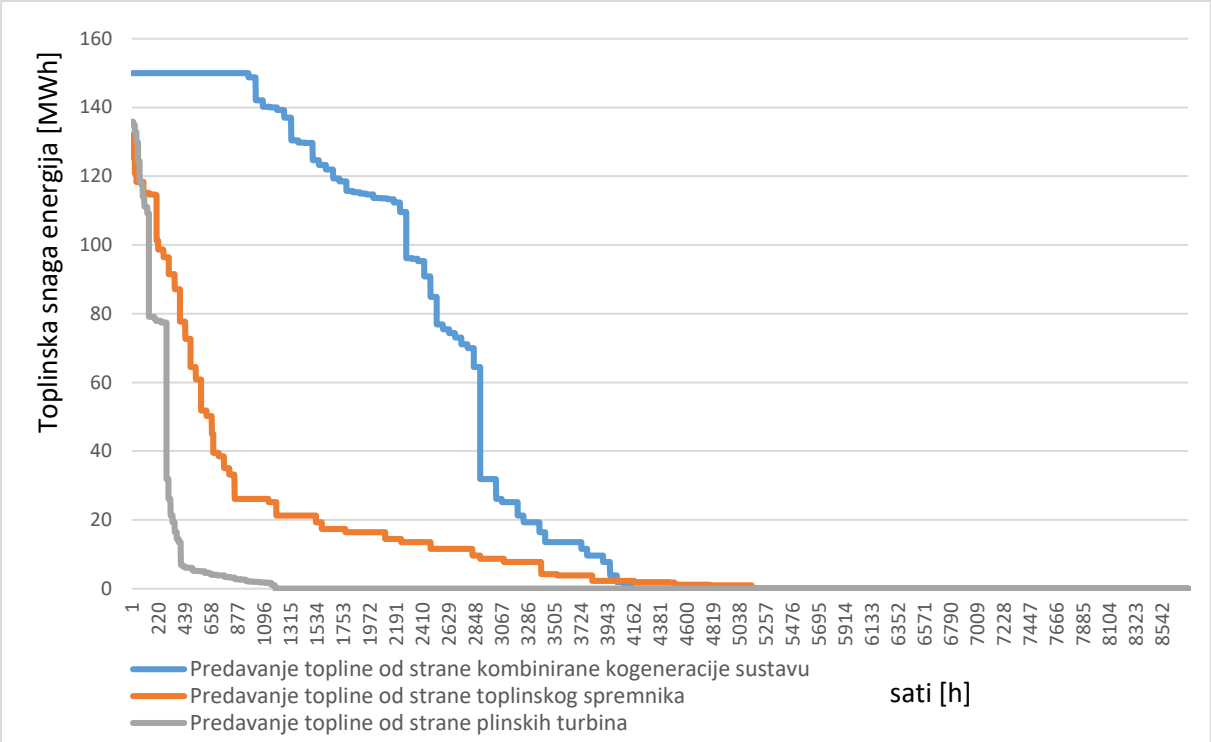
Trošak na plin	314,6 Mkn

Trošak na emisije CO2	57,1 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	33,2 Mkn
Ostali varijabilni troškovi plinskih motora	2 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak plinskih motora	50,1 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika	0,9 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi plinskih motora	11,9 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika	0,11 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	550,7 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka dobiven je gubitak 5,92 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 172,44 kn/MWh.

6.10. Simulacija pogona toplane s plinskim turbinama i proračun prihoda i rashoda toplane

Rad kombinirane kogeneracije i toplinskog spremnika je simuliran na jednak način kao i u prethodnoj simulaciji. modelirano tako da je na početku i na kraju dana jednakog iznosa. U unutar sustava postoje 3 plinske turbine ukupne toplinske snage 150 MW koji se uključuju ako toplinski spremnik i kogeneracijska jedinica nisu u stanju predati dovoljno toplinske energije sustavu. Tehnički minimum plinskih turbina iznosi 25 MW odnosno 50% [31] toplinske snage pojedinačnih jedinica te je uzet u obzir. Ukoliko je ostatak toplinskog opterećenja manji od tehničkog minimuma plinskih turbina one će raditi na tehničkom minimumu, predavati potrebnu toplinu distribucijskoj mreži, a ostatak će pohraniti u toplinskom spremniku. Električna učinkovitost plinskih turbina iznosi 39%, dok je toplinska učinkovitost jednaka 41%. Proizvodnja električne energije je prema [31] jednaka 95% od toplinske energije koju plinske turbine proizvedu. Korištenjem pojednostavljenog matematičkog modela iz poglavlja 6.4 vidi se da plinske turbine mogu sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga električne energije kao tercijarna rezerva, ali zbog već pokazane analize neće sudjelovati.



Slika 34. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s plinskim turbinama

Na slici 34 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu. Toplinska opterećenja pojedinih komponenti su umanjene za iznos punjenja toplinskog spremnika. Na dijagramu je vidljivo kako kombinirano kogeneracijsko postrojenje namiruje većinu toplinskih potreba sustava te radi najveći broj sati na nazivnom toplinskom opterećenju kao i u prijašnjoj simulaciji. Plinske turbine i ovaj puta postižu maksimalno toplinsko opterećenje koje iznosi 136 MW toplinske snage. Vidi se da plinske turbine predaju manje toplinske energije prilikom manjih opterećenja od plinskih motora zbog većeg tehničkog minimuma koji je ovdje veći zbog osiguravanja veće ukupne učinkovitosti sustava. Proizvedena električna energija kogeneracijskog postrojenja je proračunata kao i ranije na godišnjoj razini iznosi 982,84 GWh, dok proizvedena električna energija plinskih turbina iznosi 48865 MWh. Ukupna proizvedena toplinska energija je jednaka ukupnom toplinskom opterećenju i iznosi 50276 MWh. Proračun prihoda od proizvodnje električne energije je jednak kao i kod simulacije s plinskim kotlovima korištenjem poticajna cijena električne energije. U proračunu prihoda pretpostavljena je cijena toplinske energije koja je jednaka proračunatoj u simulaciji s plinskim kotlovima. Potrošnja prirodnog plina ovisi o učinkovitosti jedinica koje se koriste u sustavu. Za proračun potrošnje prirodnog plina kombiniranog postrojenja i plinskih

turbina korištene su ranije naveden prosječna električna učinkovitosti jedinica. Potrošnja plina kogeneracijskog postrojenja iznosi 1787 GWh godišnje. Potrošnja plina plinskih turbina iznosi 125295 MWh. godišnje zbog proizvodnje toplinske energije koja iznosi 48772 MWh godišnje. Pretpostavljena cijena plina je jednaka kao i ranije.

Tablica 7. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa plinskim turbinama;

	Plinske turbine
Investicijski trošak	4,5 Mkn/MW_e
Ostali varijabilni troškovi	41 kn/MWh_e
Ostali fiksni troškovi	75000 kn/MW_e

U tablici 7. su prikazane tehno-ekonomske karakteristike komponenata sustava koje su preuzete sa [32] i [31] s time da su tehno-ekonomske karakteristike kogeneracijske jedinice i toplinskog spremnika jednake kao kod simulacije s plinskim kotlovima. Troškovi plinskih turbina su izraženi po MW i MWh električne snage i energije, dok su troškovi toplinskog spremnika izraženi po MW i MWh toplinske snaga i kapaciteta. U tablici 8 su prikazani prihodi.

Tablica 8. Prihodi toplane s plinskim turbinama;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	437,7 Mkn
Ukupan godišnji prihod od el. energije plinskih turbina	21,2 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	543 Mkn

U tablici 9 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

Tablica 9. Rashodi toplane s plinskim turbinama;

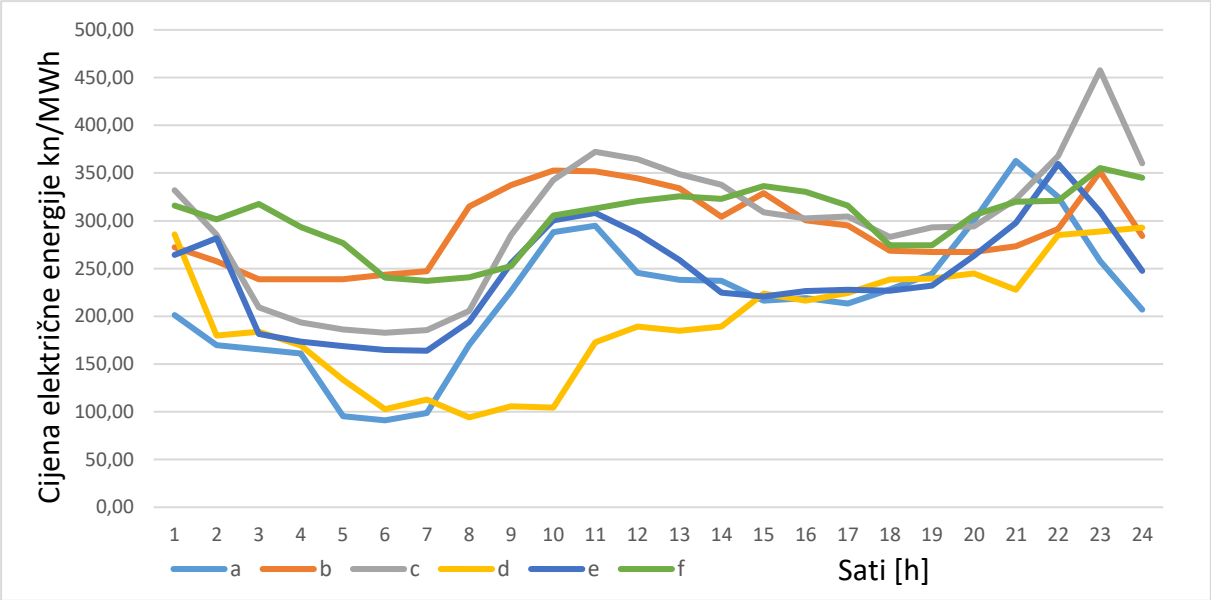
Trošak na plin	317,3 Mkn
Trošak na emisije CO2	57,6 Mkn

Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	33,2 Mkn
Ostali varijabilni troškovi plinskih turbina	1,4 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak plinskih turbina	25,6 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika	0,9 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi plinskih turbina	10,7 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika	0,11 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	527,6 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka dobivena je dobit prije oporezivanja koja iznosi 19,81 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 123,14 kn/MWh.

6.11. Simulacija pogona toplane s dizalicama topline i proračun prihoda i rashoda toplane

I ovaj puta toplana koristi fleksibilnu visokoučinkovitu kogeneracijsku jedinicu koja koristi kombinirani plinsko-parni proces za proizvodnju toplinske i električne energije jednakih kapaciteta i mogućnosti. U simulaciji je ponovno korišten i toplinski spremnik kapaciteta 750 MWh toplinske energije. Rad kombinirane kogeneracije i toplinskog spremnika je simuliran na jednak način kao i u simulaciji s plinskim kotlovima. U unutar sustava postoji 15 dizalica topline ukupne toplinske snage 150 MW koje se uključuju ako toplinski spremnik i kogeneracijska jedinica nisu u stanju predati dovoljno toplinske energije sustavu. Dizalice topline imaju toplinski množitelj 3,55 uzimaju vodu iz lokalnog jezera za koje je pretpostavljeno da može predati dovoljne količine vode tijekom cijele godine za zagrijavanje tople vode. Tehnički minimum dizalica topline je 10% [31]nazivne toplinske snage odnosno 1 MW. Potrebna električna snaga za postizanje nazivnog toplinskog učina iznosi 42,25 MW Također u sustavu postoji još jedan spremnik toplinske energije kapaciteta 600 MWh kako bi dizalice topline mogle noću puniti spremnik toplinskom energijom dok je električna energija jeftinija. Za pogon dizalica topline kupuje se električna energija stoga su odabrani karakteristični dani s [38] slično kao kod odabira karakterističnih dana s toplinskim opterećenjem centraliziranog toplinskog sustava.



Slika 35. Veleprodajna cijena električne energije karakterističnih dana s manje obnovljivih izvora u sustavu

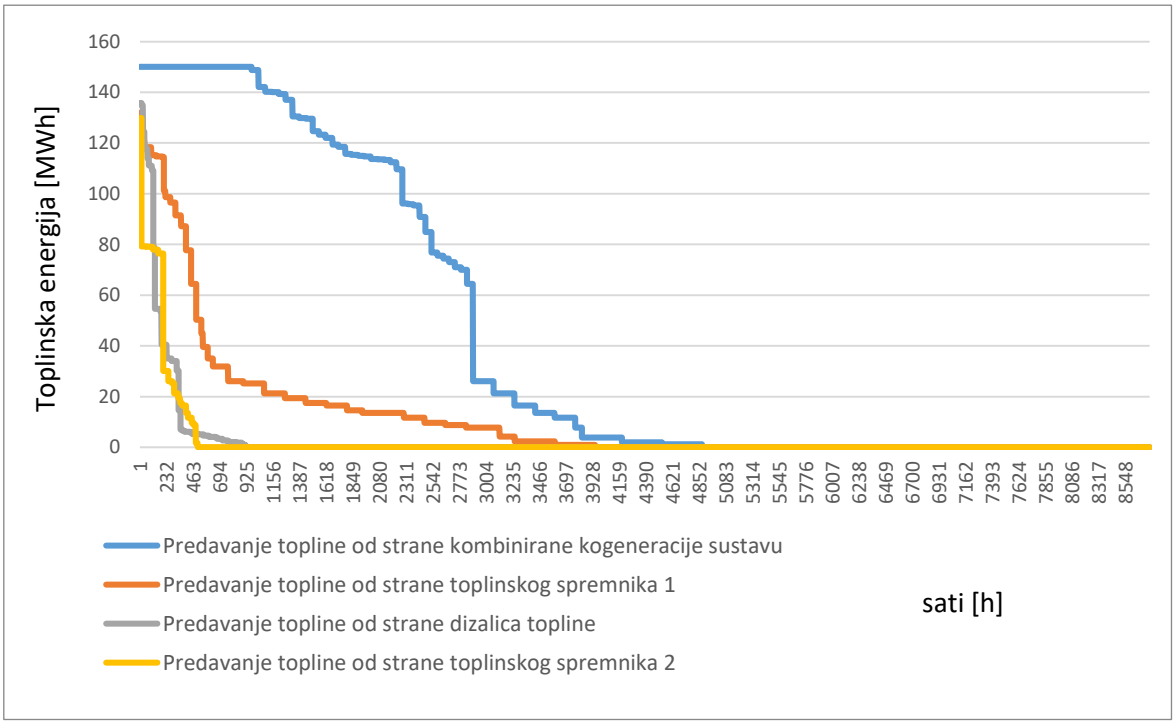
U poglavlju 6.5. je izrađen matematički model pomoću kojeg se pokazalo da dizalica topline može s 50% nazivnog kapaciteta podići opterećenje na 100% za 4,8 minuta što je dovoljno brzo za sudjelovanje u negativnoj sekundarnoj rezervi električnog sustava. Zato dizalica topline od 23 sata par sati radi u sekundarnoj rezervi u karakterističnim danima, potom se isključuje, zatim ukoliko postoji vršno toplinsko opterećenje kojeg ne uspijeva namiriti prvi toplinski spremnik dizalica topline se uključuje i radi intenzitetom koji je potreban da bi se namirilo ukupno toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava, sredinom popodneva dizalica topline obustavlja rad te se drugi toplinski spremnik počinje prazniti toplinskom energijom za namirivanje vršnog toplinskog opterećenja. U tablici 10 je prikazan pretpostavljen broj sati sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji kao i ukupan pretpostavljeni broj aktivacija sekundarne rezerve u karakterističnim danima. Pretpostavljeno je da će biti potreban sav raspoloživi negativni kapacitet od 21,1 MW električne snage prilikom aktivacije sekundarne rezerve. Cijena negativne sekundarne rezerve prema [37] iznosi 30 kn/MW u satu.

Tablica 10. Rad dizalica topline u sekundarnoj rezervi;

Karakteristični dan	a	b	c	d	e	f

Broj sati rada u sekundarnoj rezervi [h]	2	3	0	0	0	0
Ukupan broj aktivacija sekundarne rezerve u karakterističnom danu	1	2	0	0	0	0

Pretpostavljeno je da potreba za sekundarnom rezervom traje 15 minuta pa prilikom aktivacije rezerve potrošnja električne energije dizalice topline je 17,81 MWh, a pritom proizvede 63,24 MWh toplinske energije. Na slici 36 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu. Toplinska opterećenja pojedinih komponenti su umanjena za iznos punjenja toplinskih spremnika.



Slika 36. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s dizalicama topline

Proizvedena električna energija kogeneracijskog postrojenja je proračunata kao i ranije na godišnjoj razini iznosi 1156 GWh što je više u odnosu na prijašnje simulacije zato jer vršne toplinske jedinice više ne pune prvi toplinski spremnik pa kombinirano postrojenje može duže raditi i proizvoditi električnu energiju. Dizalice topline potroše 14762 MWh električne struje godišnje. Ukupna proizvedena toplinska energija je jednaka ukupnom toplinskom opterećenju

i iznosi 50276 MWh. Proračun prihoda od proizvodnje električne energije je jednak kao i kod simulacije s plinskim kotlovima korištenjem poticajne cijene električne energije. U proračunu prihoda pretpostavljena je cijena toplinske energije koja je jednaka proračunatoj u simulaciji s plinskim kotlovima. Potrošnja prirodnog plina ovisi o učinkovitosti jedinica koje se koriste u sustavu. Za proračun potrošnje prirodnog plina kombiniranog postrojenja korištene su ranije navedena prosječna električna učinkovitost jedinica. Potrošnja plina kogeneracijskog postrojenja iznosi 2102 GWh.

Pretpostavljena cijena plina je jednaka kao i ranije.

Tablica 11. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa dizalicama topline;

	Dizalice topline
Investicijski trošak	5,25 Mkn/MWh
Ostali varijabilni troškovi	34 kn/MWhh
Ostali fiksni troškovi	30000 kn/MWh

U tablici 11. su prikazane tehno-ekonomske karakteristike komponenata sustava koje su preuzete sa [32] i [31] s time da su tehno-ekonomske karakteristike kogeneracijske jedinice i toplinskog spremnika jednake kao kod simulacije s plinskim kotlovima.

Tablica 12. Prihodi toplane s dizalicama topline;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	473,3 Mkn
Ukupan godišnji prihod od sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji električne mreže	0,1 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	557,8 Mkn

U tablici 13 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

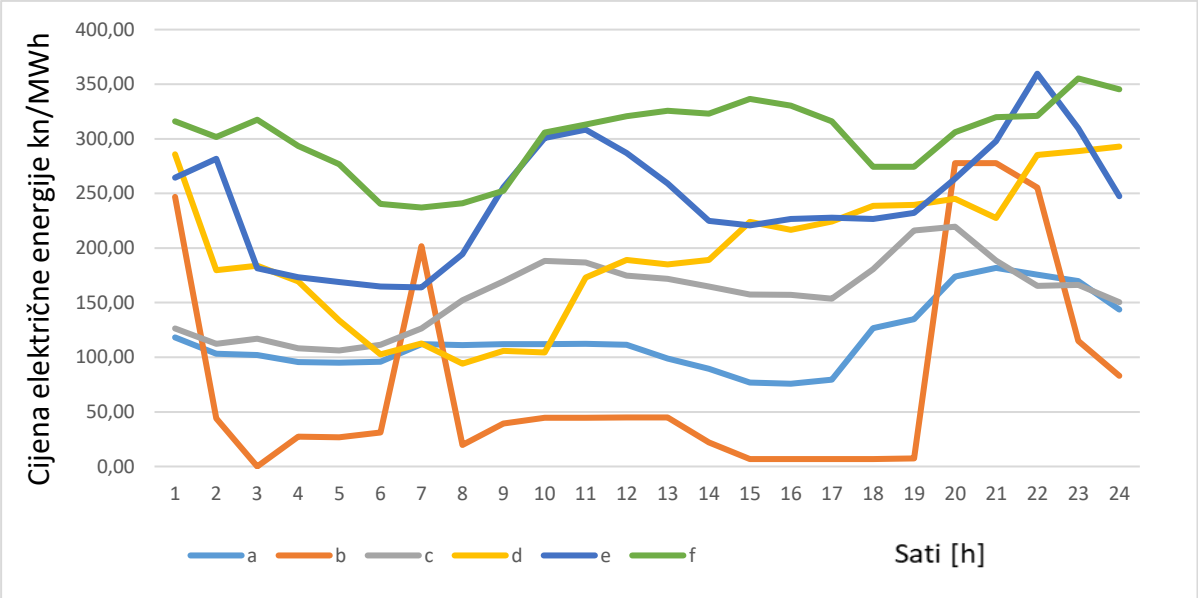
Tablica 13. Rashodi toplane s dizalicama topline;

Trošak na plin	348,8 Mkn
Trošak na emisije CO2	63,3 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	39 Mkn
Trošak na električnu energiju dizalice topline	3,9 Mkn
Ostali varijabilni troškovi dizalica topline	0,72 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak dizalica topline	33,1 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 1	0,9 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 2	0,7 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi dizalica topline	2,3 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 1	0,11 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 2	0,1 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	572,8 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka ostvaren je gubitak od 15,4 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 189,9 kn/MWh.

6.12. Simulacija pogona toplane s dizalicama topline s većim udjelom obnovljivih izvora na tržištu električne energije i proračun prihoda i rashoda toplane

Podaci i metodologija koja je korištena za simulaciju ovog sustava je jednaka prethodnoj simulaciji uz pretpostavku nižih cijena na tržištu električne energije pošto je pretpostavljen veći udio obnovljivih izvora energije koji su priključeni na električnu mrežu. Također dizalice topline koriste spremnik topline koji u ovom slučaju može primiti 900 MWh toplinske energije Karakteristični dani sadrže niže cijene od prosječnih i prikazane su na slijedećoj slici za svaki od karakterističnih dana.

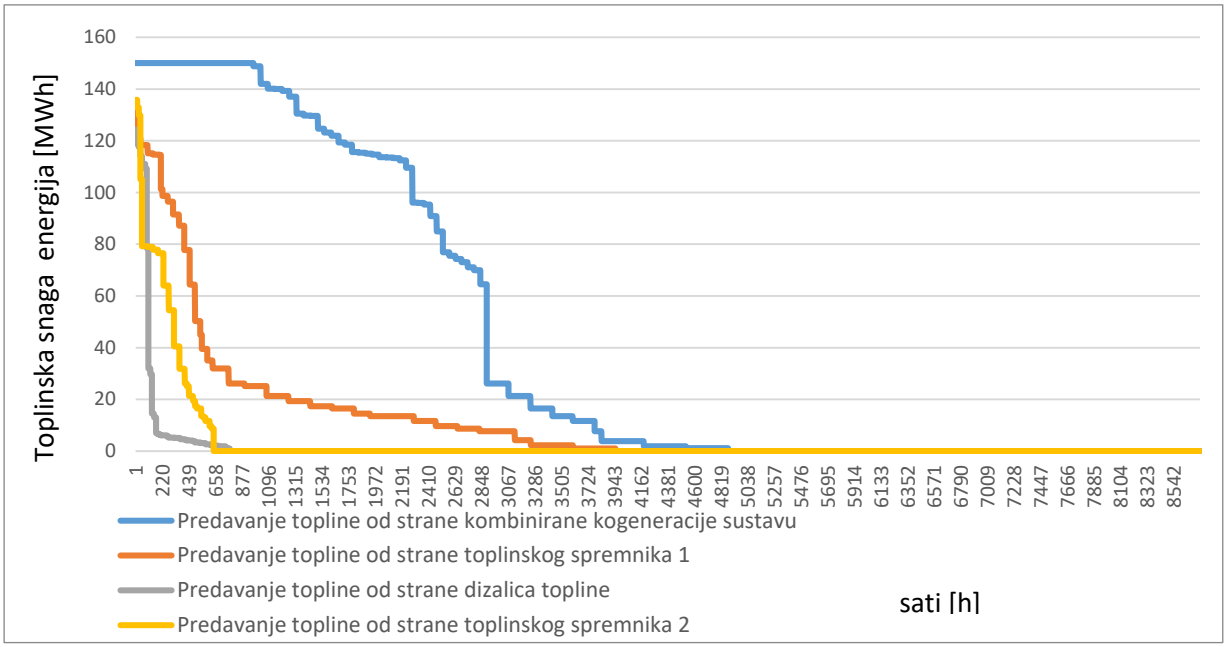


Slika 37. Veleprodajna cijena električne energije karakterističnih dana s više obnovljivih izvora u sustavu

U tablici 10 je prikazan pretpostavljen broj sati sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji kao i ukupan pretpostavljeni broj aktivacija sekundarne rezerve u karakterističnim danima. Pretpostavljeno je da će biti potreban sav raspoloživi negativni kapacitet od 21,1 MW električne snage prilikom aktivacije sekundarne rezerve. Cijena negativne sekundarne rezerve prema [37] iznosi 30 kn/MW u satu.

Tablica 14. Pogon dizalica topline u sekundarnoj rezervi u sustavu s više obnovljivih izvora;

Karakteristični dan	a	b	c	d	e	f
Broj sati rada u sekundarnoj rezervi [h]	4	4	0	0	0	0
Ukupan broj aktivacija sekundarne rezerve u karakterističnom danu	4	5	0	0	0	0



Slika 38. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s dizalicama topline u sustavu s više obnovljivih izvora

Na slici 38 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu, vidljivo je da dizalice topline predaju puno manje toplinske energije direktno, već se toplina predaje korištenjem toplinskog spremnika. U tablici 15 su prikazani proračunati prihodi. Ovaj puta se zanemaruju toplinski gubici skladištenja energije u drugom toplinskom spremniku pošto se spremnik u potpunosti isprazni u svakom danu.

Tablica 15. Prihodi toplane s dizalicama topline u sustavu s puno obnovljivih izvora;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	473,3 Mkn
Ukupan godišnji prihod od sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji električne mreže	0,2 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	558 Mkn

U tablici 16 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

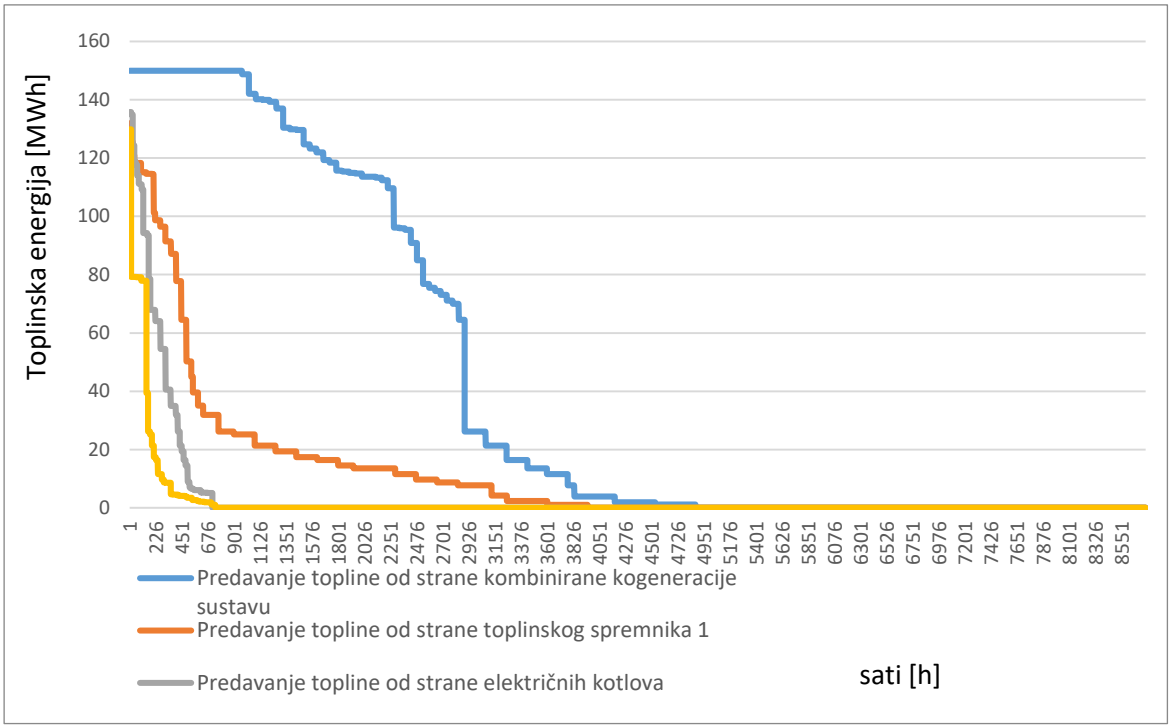
Tablica 16. Rashodi toplane s dizalicama topline u sustavu s puno obnovljivih izvora;

Trošak na prirodni plin	348,8Mkn
Trošak na emisije CO2	63,3 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	39 Mkn
Trošak na električnu energiju dizalice topline	1,9 Mkn
Ostali varijabilni troškovi dizalica topline	0,72 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak dizalica topline	33,1 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 1	0,9 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 2	1,1 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi dizalica topline	2,3 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 1	0,11 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 2	0,14 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	570,9 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka ostvaren je gubitak od 13,7 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 187,3 kn/MWh.

6.13. Simulacija pogona toplane s električnim kotlovima i proračun prihoda i rashoda toplane

Podaci i metodologija koja je korištena za simulaciju ovog sustava je jednaka simulaciji u poglavlju 6.11. jedina razlika je što se ovaj puta koriste 2 električna kotla s elektrodama za namirivanje ostatka vršnog toplinskog opterećenja. Učinkovitost električnih kotlova iznosi 97%, a tehnički minimum je 10% nazivne toplinske snage odnosno 7,5 MW. Za pogon električnih kotlova kupuje se električna energija na veleprodajnom tržištu električne energije te se za proračun troškova koriste cijene karakterističnih dana kao u poglavlju 6.12. U poglavlju 6.6. izrađen je matematički model pomoću kojeg se pokazalo da električni kotlovi mogu sudjelovati u sekundarnoj regulaciji električne mreže pa se i u ovoj simulaciji koristila ista metodologija kao kod dizalica topline. Pretpostavljeno je da potreba za sekundarnom rezervom traje 15 minuta pa prilikom aktivacije rezerve električni kotlovi potroše 40,95 MWh električne energije, a pritom se proizvede 39,32 MWh toplinske energije.



Slika 39. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s električnim kotlovima

Na slici 39 prikazano je vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu. Toplinska opterećenja pojedinih komponenti su umanjena za iznos punjenja toplinskih spremnika. Vidljivo je da toplinski kotlovi predaju veću količinu toplinske energije nego toplinski spremnik 2 s kojim je u interakciji. Pretpostavljen je broj sati sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji kao i ukupan pretpostavljeni broj aktivacija sekundarne rezerve u karakterističnim danima. Pretpostavljene vrijednosti su prikazane u tablici 10.

Tablica 17. Tehno-ekonomske karakteristike komponenti sustava sa električnim kotlovima;

	Električni kotlovi
Investicijski trošak	0,525 Mkn/MWh
Ostali varijabilni troškovi	3,8 kn/MWhh
Ostali fiksni troškovi	8250 kn/MWh

Tablica 18. Prihodi toplane s električnim kotlovima;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	473,3 Mkn
Ukupan godišnji prihod od sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji električne mreže	0,4 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	557,8 Mkn

U tablici 19 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

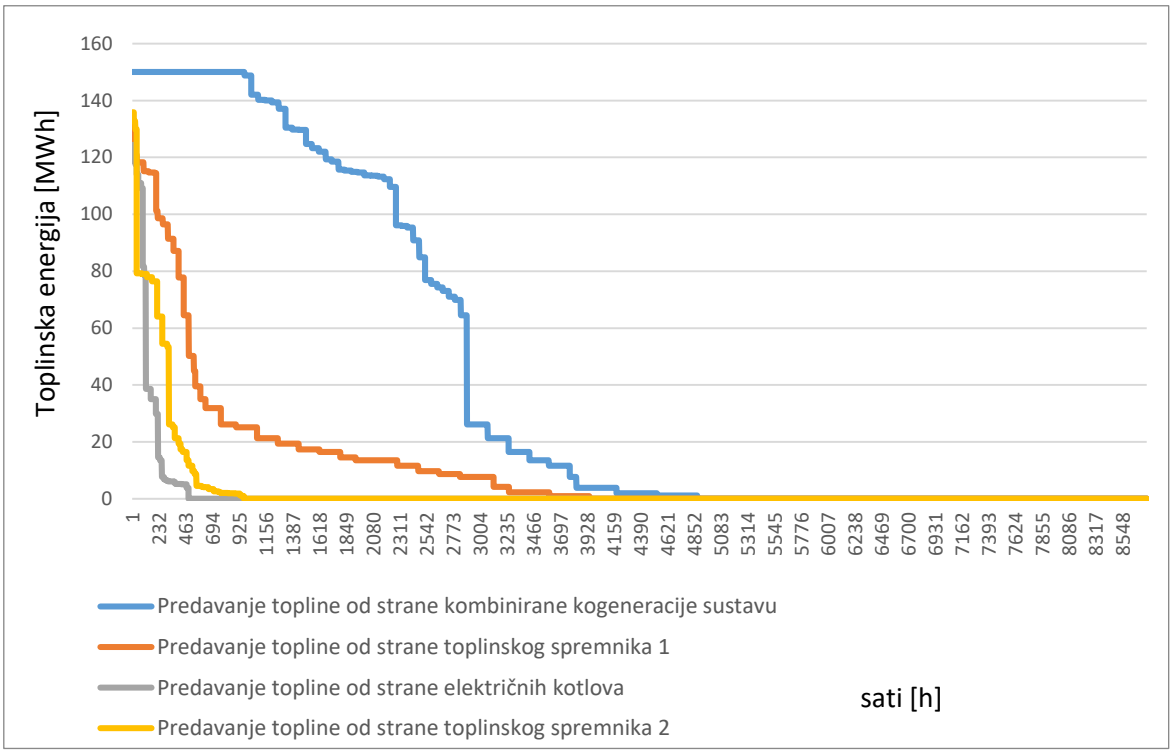
Tablica 19. Rashodi toplane s električnim kotlovima;

Trošak na prirodni plin	348,8 Mkn
Trošak na emisije CO_2	63,3 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	39 Mkn
Trošak na električnu energiju električnih kotlova	14 Mkn
Ostali varijabilni troškovi električnih kotlova	0,2 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak električnih kotlova	4,13 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 1	0,9 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 2	0,7 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi električnih kotlova	1,2 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 1	0,12 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 2	0,1 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	552,41 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka dobivena je dobit prije oporezivanja koja iznosi 5,39 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 150,7 kn/MWh.

6.14. Simulacija pogona toplane s električnim kotlovima s većim udjelom obnovljivih izvora na tržištu električne energije i proračun prihoda i rashoda toplane

Podaci i metodologija koja je korištena za simulaciju ovog sustava je jednaka simulaciji u poglavlju 6.12. jedina je razlika što se koriste električni kotlovi kao u prethodnoj simulaciji.



Slika 40. Vrijeme trajanja isporuke toplinske energije dobiveno korištenjem karakterističnih dana toplane s električnim kotlovima sustavu s više obnovljivih izvora

Na slici 40 je prikazano vrijeme trajanja predavanja toplinske energije centraliziranom toplinskom sustavu, vidljivo je da električni kotlovi predaju puno manje toplinske energije direktno, već se toplina predaje korištenjem toplinskog spremnika, ali više nego dizalice topline u istim uvjetima zbog većeg tehničkog minimuma. U tablici 14 su prikazani proračunati prihodi. Ovaj puta se zanemaruju toplinski gubici skladištenja energije u drugom toplinskom spremniku pošto se spremnik u potpunosti isprazni u svakom danu.

Tablica 20. Prihodi toplane s električnim kotlovima u sustavu s puno obnovljivih izvora;

Ukupan godišnji prihod od el. energije kombinirane kogeneracijske jedinice	473,3 Mkn

Ukupan godišnji prihod od sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji električne mreže	0,6 Mkn
Prihod od prodaje toplinske energije	84,1 Mkn
Ukupni godišnji prihodi	558 Mkn

U tablici 21 su prikazani rashodi sustava s time da su godišnji investicijski troškovi računati s diskontnom stopom od 5%.

Tablica 21. Rashodi toplane s električnim kotlovima u sustavu s puno obnovljivih izvora;

Trošak na prirodni plin	348,8Mkn
Trošak na emisije CO2	63,3 Mkn
Ostali varijabilni troškovi kogeneracije	39 Mkn
Trošak na električnu energiju električnih kotlova	5 Mkn
Ostali varijabilni troškovi električnih kotlova	0,2 Mkn
Godišnji investicijski trošak kogeneracije	72,3 Mkn
Godišnji investicijski trošak električnih kotlova	4,13 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 1	0,9 Mkn
Godišnji investicijski trošak toplinskog spremnika 2	1,1 Mkn
Fiksni troškovi kogeneracije	7,7 Mkn
Fiksni troškovi električnih kotlova	1,2 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 1	0,11 Mkn
Fiksni troškovi toplinskog spremnika 2	0,14 Mkn
Ukupni troškovi na godišnjoj razini	543,8 Mkn

Korištenjem prikazanih podataka dobit prije oporezivanja koja iznosi 14,17 Mkn. Kako bi dobit iznosila 0 kn cijena toplinske energije mora iznositi 133,94 kn/MWh.

7. ZAKLJUČAK

Namirivanje toplinskog opterećenja je ključan preduvjet kako bismo mogli opravdati rad velikih termoelektrana priključenih na centralizirane toplinske sustave. Proizvodnjom toplinske i električne energije diže se učinkovitost postrojenja te se ostvaruje ušteda primarne energije u odnosu na korištenje zasebnih tehnologija i onih manjih necentraliziranih. Kao problem javlja se pojava promjenjivog rezidualnog opterećenja električne mreže na kojeg jako utječe rad varijabilnih obnovljivih izvora koji sa svojom varijabilnošću ruše cijenu električne energije na tržištu električnom energijom i tako smanjuju isplativost velikih temeljnih izvora. Jedno od rješenja je status povlaštenih cijena električne energije čime se znatno povećava isplativost takvih postrojenja. Kako bi se izbjeglo predimenzioniranje sustava i minimalizirao rad na manjem opterećenju od onog nazivnog potrebne su vršne jedinice koje mogu namiriti vršno toplinsko opterećenje kao i spremnici topline koji omogućavaju rad postrojenja kada je toplinsko opterećenje ispod tehničkog minimuma visokoučinkovite kogeneracije.

Pošto je apsolutni imperativ toplane da je u mogućnosti namiriti i u onom najhladnijem trenutku toplinsko opterećenje sustava potrebni su veliki kapaciteti vršnih toplinskih jedinica koje bi bile u stanju namiriti sustav potrebnom toplinskom energijom. Moguće je koristiti plinske kotlove, motore, turbine, dizalice topline, električne kotlove. Od nabrojanih najveće investicijske troškove imaju plinski motori koji su iz istog razloga i najneisplativiji od kogeneracijskih tehnologija unatoč vrlo visokoj učinkovitosti i mogućnosti doprinosa sekundarnoj i tercijarnoj regulaciji elektroenergetske mreže koja je moguća samo u noćnim satima kada nema prevelikih potreba za vršnim toplinskim opterećenjem. U noćnim satima je i cijena električne energije niža zbog niskog električnog opterećenja. Više je isplativo proizvoditi toplinu i električnu energiju po danu onda kada postoji vršno toplinsko opterećenje umjesto njezinog skladištenja noću i predavanja distribucijskom sustava po danu bez predavanja električne energije po višim cijenama. Zbog korištene metodologije ispostavilo se da je najisplativije koristiti plinske kotlove koji imaju niske investicijske troškove i mali broj sati rada zbog korištenja toplinskog spremnika radi proizvodnje što većih količina električne i toplinske energije jedinice s kombiniranom proizvodnjom. Korištenje plinskih turbina je isplativo za namirivanje vršnih toplinskih opterećenja, moguće je sudjelovanje u tercijarnoj rezervi što također nije preporučljivo iz istih razloga kao i kod plinskih motora. Vrlo je teško namiriti ukupno vršno toplinsko opterećenje s dizalicama topline unatoč najboljoj učinkovitosti od svih tehnologija.

Da bi to bilo moguće neophodne su velike količine toplinskih izvora na dovoljno visokim temperaturama u razdoblju kada postoji vršno toplinsko opterećenje. Idealni toplinski izvori su otpadne vode iz kanalizacijskih sustava zbog relativno visokih temperatura tijekom cijele godine te morska voda zbog neiscrpnih količina toplinskog izvora. Dizalice topline su dovoljno fleksibilne da noću pune toplinski spremnik toplinom, a da pri tom sudjeluju kao negativna sekundarna rezerva elektroenergetskog sustava, problem su izuzetno visoki investicijski troškovi. Zbog manjih investicijskih troškova korištenje električnih kotlova je isplativije nego dizalica topline, također su dobri zbog izuzetno brzih odziva promjene električne i toplinske snage. Sve niža cijena električne energije na veleprodajnom tržištu električnom energijom uzrokovana velikim udjelom obnovljivih izvora pogoduje korištenju električnih kotlova i dizalica topline.

Potrebno je naglasiti da je potrebno postojanje temperatura ispod 80°C u distribucijskoj mreži centraliziranih toplinskih sustava kako bi dizalice topline mogle direktno sudjelovati u namirivanju toplinskih potreba centraliziranog toplinskog sustava, također postojanje nižih temperatura povećava učinkovitost svih ostalih tehnologija jer se omogućava predavanje većih količina toplinske energije sustavu te su manji toplinski gubici u distribucijskom sustavu.

LITERATURA

[1] Kofoed-Wiuff, A., Heathey,J.,Togeby, M., Sawatzki, S., Persson, C.: The Danish Experience with Integrating Variable Renewable Energy, Agora Energiewende, London, Berlin, 2015.

[2] https://www.iea.org

[3] Šivak, M.: Centralno grijanje, klimatizacija, ventilacija, 1998.

[4] http://www.districtenergyinitiative.org/sites/default/files/report_pdf/01%20District%20Energy%20Chapter%201_print.pdf

[5] Lund, H., Werner, S. Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J., E., Hvelplund, F., Mathiesen, B., V.: 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy, Volume 68, 2014, 1-11

[6] Gadd, H., Werner, S.: Daily heat load variations in Swedish district heating systems, Applied Energy, Volume 106, 2013, 47-55

[7] https://meteonorm.com/

[8] Wang, H., Lahdema, X., Jiao, W., Zhu, C., Zou, P.: Analysis of the location for peak heating in CHP based combined district heating systems, Applied Thermal Engineering, Volume 87, 2015, 402-411

[9] https://bryanboilers.com

[10] Mori, G., Zitter, H.: Material requirementr for heat exchangers in gas condensing boilers, Department for General, Analytical and Physical Chemistry, University of Leoben, 2005, Austria

[11] Darrow, K., Tidball, R., Wang, J.,Hampson, a.: Catalog of CHP Technologies, 2017

[12] https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/engines_components/industrial_engines

[13] Goldstein, L., Hedman, B., Freedman, S., I., Woods, R., Schweizer, T.: Gas-Fired Energy Resource Technology Characterizations, 2003

[14] Sipila, K.: Cogeneration, biomass, waste to energy and industrial waste heat for district heating, Woodhead Publishing, 2016, 45-73

[15] Khan, K., A., Shuva, P., Kazi, A. I., Baishakhi, I.: Modeling of a Biomass Energy based (BPL) Generating Power Plant and its features in comparison with other generating Plants, 2012

[16] https://aemstatic-ww2.azureedge.net/content/dam/pe/online-articles/2015/September/GE%20LM6000-PF%2B%20aeroderivative%20gas%20turbine.jpg
[17] https://www.onesourceair.com/wp-content/uploads/2018/07/ENERGY-heat-pump-how-it-works-BIGSTOCK-1080x675.jpg
[18] https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/160420_1600_1730_2nd-place_Andrei-David_presentation.pdf
[19] https://www.carel.com/documents/10191/0/%2B4000009EN/e2e45752-2e75-47d7-aed8-3a9865803c88
[20] https://www.kelvion.com/products/product/nh-series/
[21] David, A., Mathiesen, B., V., Averfalk, H., Werner, S., Lund, H.: Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems, Energies, 2017
[22] http://danstoker.com/product-search/electric-boilers/
[23] https://bryanboilers.com/boilers/electric-boilers/bh-series/
[24] https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
[25] Ternoveanu, A., Ngendakumana, P.: Dynamic model of a hot water boiler, Laboratory of Thermodynamics,2003, Belgium
[26] https://apps.automeris.io/wpd/
[27] Haga, N., Kortela, V., Ahnger, A.: Smart Power Generation – District heating solutions, 2012,
[28] https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/CHP-Gas%20Turbine.pdf
[29] https://www.4dh.eu/images/Wiebke_Meesenburg_2018.pdf
[30] Vježbe iz kolegija Energetsko planiranje: Upute za izradu satne krivulje toplinskog opterećenja CTS
[31] Danish Energy Angency: Technology Data for Energy Plants for Electricity and District heating generation, 2016
[32] Milić, M.: Završni rad, FSB, Zagreb, 2017
[33] https://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/Indeksacija_2019/HR_kogen_2019.pdf
[34] http://www.gpz-opskrba.hr/zagreb-javna-usluga-opskrbe-plinom-cijene-plina-od-01-01-2019-do-31-03-2019/404
[35] https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11
[36] https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte

[37] Lončar, D.: Vođenje energetskih sustava, FSB, Zagreb

[38] https://www.cropex.hr/hr/

PRILOZI

I. CD-R disc