

Odziv kogeneracijskog postrojenja na promjenu okolišne temperature

Jakovčević, Andrija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:761281>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Andrija Jakovčević

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Kandidat **Andrija Jakovčević**

Predao je izrađen diplomski rad dana: 19. lipnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Igor Sutlović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Doc. dr. sc. Andrej Vidak, poslijedoktorand, Sveučilište u
Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo diplomski rad i odobrilo obranu diplomskog
rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Diplomski ispit održat će se dana: 24. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Andrija Jakovčević

ODZIV KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA NA PROMJENU OKOLIŠNE
TEMPERATURE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Igor Sutlović

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Igor Sutlović

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

doc. dr. sc. Andrej Vidak

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, zamjena

Zagreb, lipanj 2024.

Posebno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Igoru Sutloviću na iznimnoj podršci tijekom pripreme ovog rada. Njegovo mentorsko vođenje bilo je ključno za razvoj mojih istraživačkih sposobnosti i dublje razumijevanje teme. Također, želim istaknuti zahvalnost djelatnicima Hrvatske elektroprivrede (HEP) na njihovoj susretljivosti i spremnosti da odgovore na moje upite te podijele potrebne podatke i informacije. Njihova podrška omogućila je obogaćivanje sadržaja ovog rada relevantnim i pouzdanim informacijama iz stvarnog sektora. Naposljetku, želim izraziti duboku zahvalnost svojoj obitelji na neizmjernoj podršci koju su mi pružili tijekom cijelog studiranja. Njihova ljubav, razumijevanje i ohrabrenje bili su temeljni stupovi mog uspjeha i motivacija za ostvarivanje svojih akademskih ciljeva.

SAŽETAK

Ovaj rad detaljno istražuje kako promjene vanjske temperature utječu na karakteristike kogeneracijskih postrojenja, koja su ključna za istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije. Fokusirajući se na održavanje zadanog omjera ukupno proizvedene električne i toplinske energije te visokog toplinskog faktora iskorištenja, postrojenje prilagođava svoju proizvodnju pare sezonskim potrebama. Osim toga, istražuje se kako te promjene utječu na termodinamički stupanj iskorištenja i proizvedenu električnu energiju, pri čemu promjene ovise o tome je li proizvodnja pare konstantna ili ne. Naglašava se važnost kontinuiranog upravljanja postrojenjem kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i ekonomičnost. Rad također pruža sveobuhvatan pregled osnovnih principa kogeneracije, termodinamičkih osnova i tehnologija kogeneracije, uključujući detaljnu analizu rada parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare te analizira prikupljene podatke o radu kogeneracijskih postrojenja u različitim uvjetima temperature.

Ključne riječi: kogeneracijska postrojenja, parna turbina s reguliranim oduzimanjem pare, vanjska temperatura, toplinski faktor iskorištenja, omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije, termodinamički stupanj iskorištenja.

ABSTRACT

Respond of CHP plant on variation of outdoor temperature

In this thesis, the extensive investigation focuses on how changes in external temperature influence the characteristics of cogeneration plants, which are vital for the simultaneous production of electrical and thermal energy. The study emphasizes maintaining the specified power to heat ratio and a high thermal efficiency factor, enabling the plant to adjust its steam production to seasonal needs. Additionally, the research explores how these changes impact thermodynamic efficiency and produced electrical energy, with variations depending on whether steam production is constant or not. Stressing the importance of continuous management to achieve maximum efficiency and cost-effectiveness, the thesis provides a comprehensive overview of the basic principles of cogeneration, thermodynamic fundamentals, and cogeneration technologies, including a detailed analysis of steam turbines with regulated steam extraction. The study also includes an analysis of collected data on the operation of cogeneration plants under different temperature conditions.

Keywords: cogeneration plants, steam turbine with regulated steam extraction, external temperature, thermal efficiency factor, power to heat ratio, thermodynamic efficiency.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED KOGENERACIJSKIH POSTROJENJA.....	1
3. TERMODINAMIČKA OSNOVA CHP-a	3
4. TEHNOLOGIJE KOGENERACIJSKIH POSTROJENJA	5
5. VISOKOUČINKOVITA KOGENERACIJA.....	7
6.1. „TOPPYNG CYCLE” KOGENERACIJSKO POSTROJENJE	8
6.2. TURBINA S REGULIRANIM ODUZIMANJEM PARE.....	10
7. OMJER UKUPNO PROIZVEDENE ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE- POWER TO HEAT RATIO	15
8. KRIVULJE OPTEREĆENJA	17
9. UTJECAJ OKOLIŠNE TEMPERATURE NA RAD KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA.....	19
10. REZULTATI I RASPRAVA	29
11. ZAKLJUČAK	40
12. LITERATURA	43

1. UVOD

Kogeneracijska postrojenja, koja omogućuju istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije, predstavljaju jedno od ključnih rješenja koja odgovaraju zahtjevima energetske učinkovitosti, održivosti i ekonomičnosti, smanjujući pritom štetne utjecaje na okoliš [1,2].

Potrošnja toplinske energije značajno ovisi o vanjskoj (okolišnoj) temperaturi. Tijekom hladnijih mjeseci, potreba za grijanjem povećava se zbog nižih temperatura, što rezultira većom potrošnjom toplinske energije. Nasuprot tome, u toplijim mjesecima, kada su temperature više, potrošnja toplinske energije značajno opada.

Ovaj diplomski rad ima za cilj istražiti odziv kogeneracijskih postrojenja na promjene okolišne temperature te kako se te promjene odražavaju na rad kogeneracijskog postrojenja.

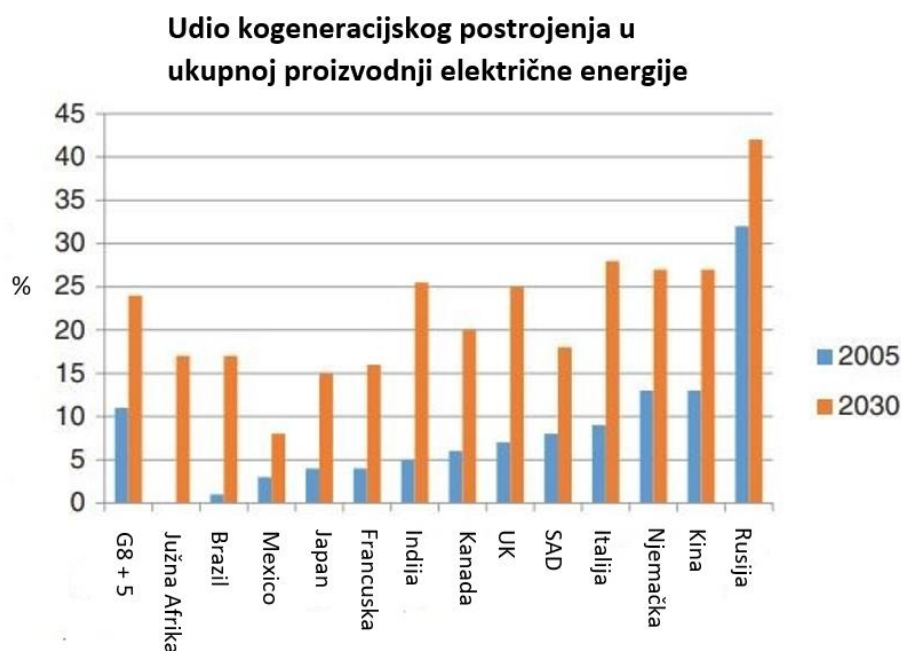
U prvom dijelu rada predstaviti će se osnovni principi kogeneracije, termodinamička osnova, pregled kogeneracijskih postrojenja i tehnologija te ključne značajke njihovog rada. Posebna pažnja bit će posvećena turbini s reguliranim oduzimanjem pare.

Konačno, analizirat će se postojeći podaci i identificirati glavni izazovi s kojima se ta postrojenja susreću pri promjenama vanjske temperature. Detaljno će se proučavati utjecaj tih promjena na proizvodnju toplinske i električne energije, termodinamički stupanj iskorištenja i toplinski faktor iskorištenja.

2. PREGLED KOGENERACIJSKIH POSTROJENJA

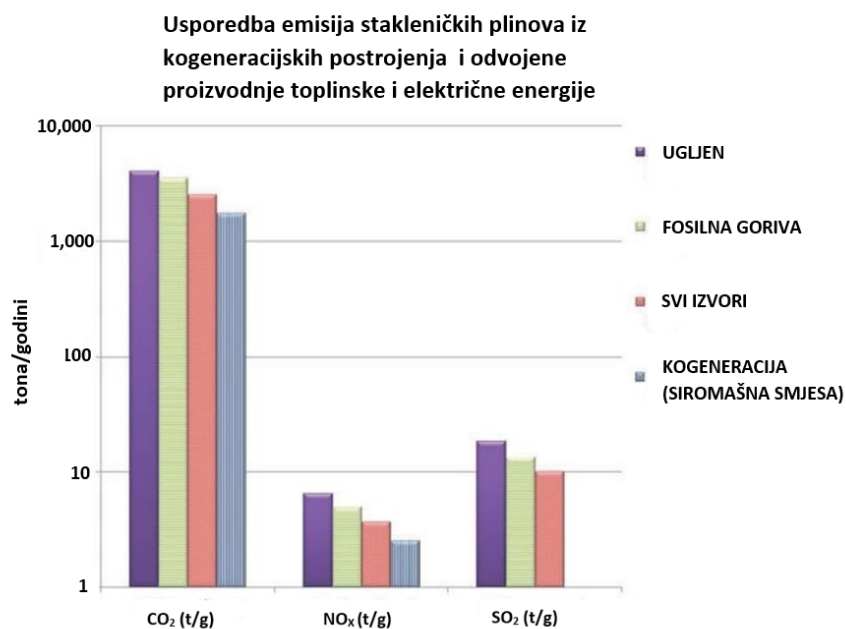
Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije, poznata i kao Combined Heat and Power (CHP) na engleskom jeziku, predstavlja istovremenu proizvodnju transformiranih oblika energije - toplinske i električne - u integriranom procesu sa zajedničkim izvorom energije, odnosno gorivom. Integracijom proizvodnje električne i toplinske energije omogućuje se učinkovitije korištenje izvora energije, čime se znatno smanjuje potrošnja goriva. Da bi se postigla

učinkovita upotreba goriva u energetsom postrojenju, ključno je osigurati potražnju za oba korisna oblika energije - toplinskom i električnom. Za vrijeme proizvodnje električne energije u elektrani, istovremeno se dio energije u obliku topline može isporučiti potrošačima toplinske energije za grijanje stambenih zgrada ili industrijskih pogona u hladnijim klimatskim područjima. Međunarodna agencija za energiju (eng. International Energy Agency – IEA) 2008. godine objavila je izvješće koje ukazuje na prednosti ulaganja u kogeneracijska postrojenja. Slika 1 prikazuje doprinos CHP-a u ukupnoj proizvedenoj električnoj energiji u zemljama G8 i još pet drugih zemalja 2005. godine. Slika također ilustrira procijenjeni potencijal za 2030. godinu. Ukupni procijenjeni potencijal za 2030. godinu je gotovo dvostruko veći od trenutne iskoristivosti (s udjela 11 % na 24 %). U Hrvatskoj, oko 13 % ukupne proizvodnje električne energije dolazi iz kogeneracije.



Slika 1: Udio proizvodnje električne energije u postrojenjima kombinirane proizvodnje topline i električne energije (CHP) u G8 plus pet zemalja za 2005. godinu te procijenjeni potencijal za 2030. godinu [3].

Izvešće naglašava ekonomičnost CHP-a, kao i ključnu ulogu kogeneracijskih postrojenja u smanjenju emisija CO₂. Pretpostavlja se smanjenje emisija CO₂ za 10 % do 2030. korištenjem novih energetske postrojenja. Dakle, kogeneracijska postrojenja nemaju samo veliki potencijal u doprinosu ukupnoj proizvedenoj električnoj energiji, već i u smanjenju emisija CO₂ (Slika 2). Također se očekuje pad troškova investicija obzirom na projicirana niža ulaganja u prijenos i distribuciju energije, što će, zajedno s učinkovitijom uporabom izvora energije, dovesti do toga da krajnji korisnici plaćaju niže cijene električne energije [3,4].



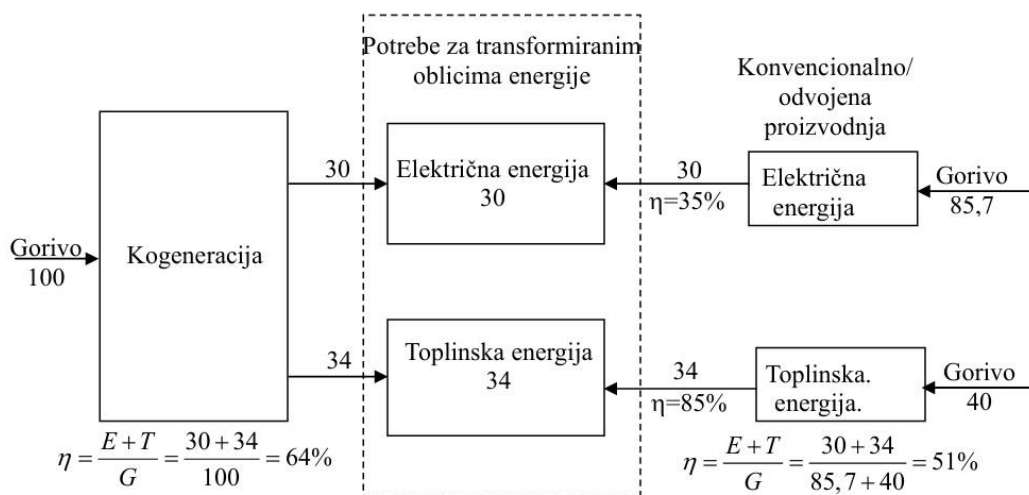
Slika 2: Usporedba emisija stakleničkih plinova iz kogeneracijskih postrojenja i odvojene proizvodnje toplinske i električne enrgije [10].

3. TERMODINAMIČKA OSNOVA CHP-a

Termoenergetski procesi kogeneracije baziraju se na tri glavna ciklusa: Rankineov, Braytonov i ciklus s motorom na unutarnje izgaranje. Rankineov ciklus je često korišten u parnim elektranama, gdje se koristi voda kao radna tvar. Braytonov ciklus primjenjuje se u plinsko-turbinskim elektranama, gdje se koristi plin umjesto tekuće vode te se izvodi kao otvoreni proces [5,6]. Što se tiče motora s unutarnjim

izgaranjem, tu razlikujemo dva glavna ciklusa Otto i Diesel. Stirlingov motor je alternativa koja koristi vanjski izvor topline, a prati procese koji su slični idealnom Ottovom ciklusu [7].

Sušтина ideje kogeneracije, kao što ilustrira Slika 3, temelji se na istovremenoj proizvodnji električne i toplinske energije u cilju povećanja učinkovitosti (η). Bitno je napomenuti da je svakako glavni cilj kogeneracije zadovoljenje potreba za toplinskom energijom, dok se električna energija smatra nusproizvodom. Uspoređujući vrijednost električne i toplinske energije, električna energija je vrijedniji oblik zbog mogućnosti prijenosa na veće udaljenosti, dok je toplinska energija ograničenog kapaciteta u tom pogledu, a taj način razmišljanja prati i njihova tržišna vrijednost. Međutim, ključno je proizvesti dostatnu količinu toplinske energije na efikasniji način, a to pak podrazumijeva stvaranje mehaničkog rada koji će potom proizvesti električnu energiju. Središnji dio sheme, koji je označen crtkanim pravokutnikom, ilustrira proizvedenu električnu i toplinsku energiju u energetske jedinicama, gdje je 30 jedinica električne energije i 34 jedinice toplinske energije. Ovakve vrijednosti bi se mogle ostvariti u uobičajenim postrojenjima gdje se električna i toplinska energija proizvode zasebno.



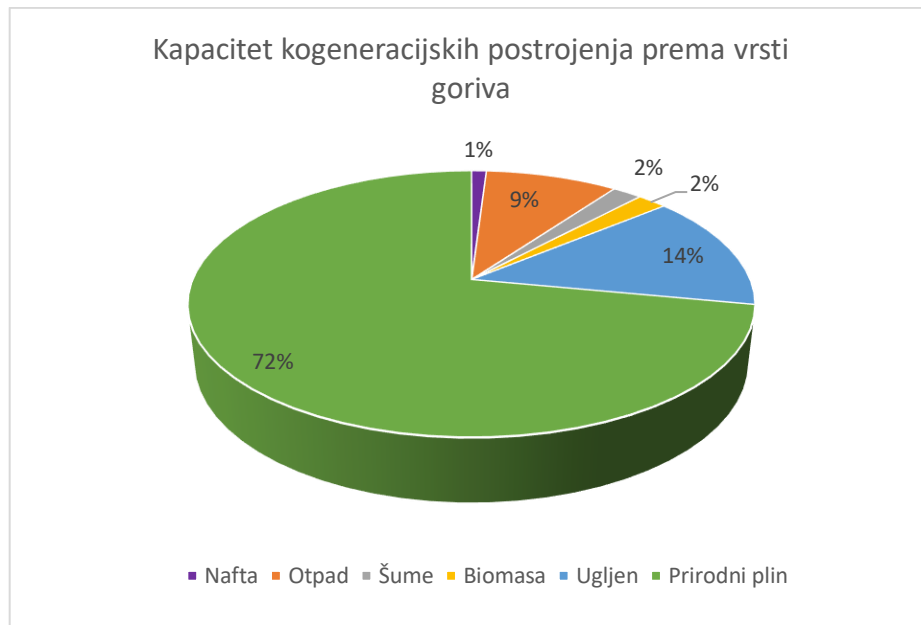
Slika 3: Usporedba proizvodnje toplinske i električne energije kroz odvojene procese i kogeneraciju [8].

Za proizvodnju 30 jedinica električne energije, uz iskorištenje od 35 %, potrebno je 85,7 jedinica ulazne energije u obliku goriva, a za proizvodnju 34 jedinice toplinske energije, uz iskorištenje od 85 %, potrebno je 40 jedinica ulazne energije također kao gorivo. Dakle, ukupno je potrebno 125,7 jedinica goriva. S druge strane, u kogeneracijskom postrojenju, za jednaku količinu toplinske i električne energije utrošeno je 100 ulaznih jedinica goriva. Iskorištenje kogeneracijskog postrojenja je 61 %, dok je iskorištenje odvojene proizvodnje 51 %. Iako su ove brojke samo orijentacijske, svakako idu u korist kogeneracije [8].

4. TEHNOLOGIJE KOGENERACIJSKIH POSTROJENJA

Kogeneracijska postrojenja proizvode toplinsku energiju koja se koristi za različite potrebe, poput grijanja naselja, odnosno zgrada, za zagrijavanje zraka ili vode, za proizvodnju pare ili za hlađenje. Osim toga, postrojenja koja većim dijelom proizvode vruću vodu ili paru za tehničke potrebe, mogu se koristiti za dobivanje električne energije.

Kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima najčešće se koriste fosilna goriva (naftni derivati, prirodni plin i ugljen) te alternativna goriva (bioplina, biomasa, otpad, deponijski plin i geotermalna energija). Povijesno gledano, prirodni plin može se karakterizirati kao poželjno gorivo u kogeneracijskim postrojenjima, uključujući industrijska postrojenja i manja stambena naselja. Trend korištenja prirodnog plina će se nastaviti zbog njegove ekološke povoljnosti, budući da ima najmanji sadržaj ugljika i sumpora među fosilnim gorivima. Dodatno, napredna tehnologija eksploatacije nekonvencionalnih izvora plina dodatno će podržati taj trend. Prognoze također sugeriraju da će se proizvodnja prirodnog plina nastaviti do 2030. godine. Slika 4 ilustrira kapacitet kogeneracijskih postrojenja prema vrsti goriva [9,10].



Slika 4: Kapacitet kogeneracijskih postrojenja prema vrsti goriva [10].

Najčešće komercijalne tehnologije korištene u kogeneracijskim postrojenjima su: plinske turbine, parne turbine, mikroturbine i motori s unutarnjim izgaranjem. Koju od navedenih tehnologija ćemo odabrati ovisi o njihovoj učinkovitosti, dostupnosti samih postrojenja i vrsti goriva koja ih pokreću. U Tablici 1 nalaze se najčešće kogeneracijske tehnologije s pripadajućim karakteristikama [9,11].

Tablica 1: Prikaz kogeneracijskih tehnologija i njihovih karakteristika [4].

Kogeneracijska tehnologija	Električna snaga postrojenja [MWe]	Učinkovitost postrojenja [%]	Raspoloživa toplinska energija [°C]	Omjer električne i toplinske energije	Troškovi izgradnje [\$/kWe]	Troškovi rada i održavanja [\$/kWhe]
Plinske turbine	0,25 - 500	70 - 75	120 - 500	0,5 - 2	970 - 1300	0,004 - 0,011
Mikroturbine	0,03 - 0,25	65 - 75	100 - 400	0,4 - 0,7	2400 - 3000	0,012 - 0,025
Parne turbine	0,05 - 250	80	120 - 400	0,1 - 0,3	430 - 1100	< 0,005
Klipni motori	0,001 - 10	70 - 80	80 - 120	0,5 - 1	1100 - 2200	0,009 - 0,022
Stirlingov motor	0,001 - 0,025	65 - 90	80 - 120	0,4 - 0,6	2000 - 50000	0,006 - 0,008
Gorivne ćelije	0,001 - 10	55 - 80	80 - 1000	1 - 2	5000 - 6500	0,032 - 0,038

5. VISOKOUČINKOVITA KOGENERACIJA

Visokoučinkovita kogeneracijska postrojenja su ona koja ispunjavaju određene kriterije. Proizvedena toplinska energija iz kogeneracijskog postrojenja ili proizvodne jedinice mora se koristiti na učinkovit i koristan način. Kogeneracijska postrojenja i pridruženi toplinski sustavi trebaju biti upravljani na način da povlašteni proizvođači tijekom izvještajnog razdoblja postižu:

- a) Uštedu primarne energije (UPE) od najmanje 0,00 (UPE \geq 0,00) za mikro i mala kogeneracijska postrojenja i proizvodne jedinice s kapacitetom do 1 MW.
- b) Uštedu primarne energije od najmanje 10 % (UPE \geq 0,10) za sva ostala kogeneracijska postrojenja i proizvodne jedinice.

Izračun električne energije proizvedene u kogeneraciji mora se temeljiti na stvarnom omjeru električne i toplinske energije. Ukoliko stvarni omjer nije poznat, koriste se zadane vrijednosti za određene tehnologije. U Tablici 2 nalaze se zadani omjeri prema tipu jedinice [12].

Tablica 2: Zadani omjeri električne i toplinske energije prema tipu jedinice [12].

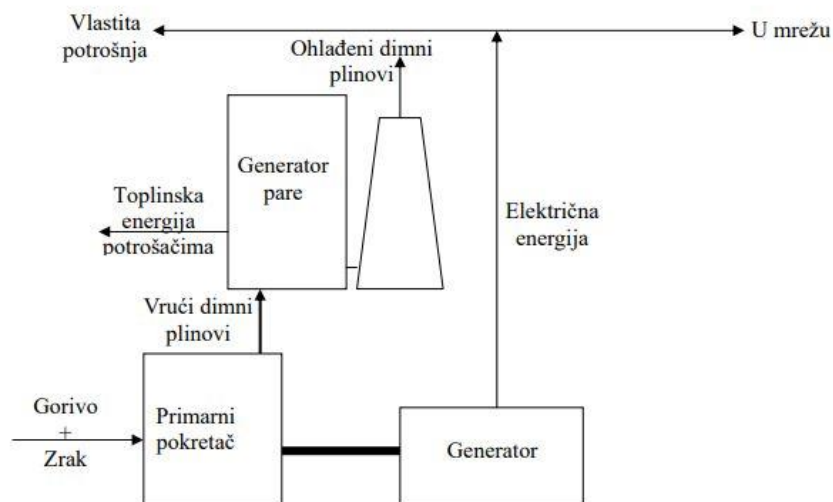
TIP JEDINICE	ZADANI OMJER ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE
Kombinirani proces plinske i parne turbine	0,95
Protutlačne parne turbine	0,45
Kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem pare	0,45
Plinske turbine s iskorištavanjem otpadne topline	0,55
Motor s unutarnjim izgaranjem	0,75

6.1. „TOPPYNG CYCLE” KOGENERACIJSKO POSTROJENJE

Postoje 2 tipa kogeneracijskih postrojenja koji se zovu „topping cycle” i „bottom cycle” [13]. Kogeneracijsko postrojenje „topping cycle” može se prikazati na Slici 5. Temeljni dijelovi postrojenja sadrže primarni pokretač („prime mover”), a to je termin koji opisuje toplinski stroj koji pokreće električni generator za proizvodnju električne energije, dok istovremeno omogućava proizvodnju toplinske energije. Primarni pokretači mogu biti parne turbine, plinske turbine i motori s unutarnjim izgaranjem. Postoje 2 vrste parnih turbina: protutlačne i s reguliranim oduzimanjem. One služe kao izvor mehaničke energije za pokretanje električnog generatora te proizvode toplinsku energiju. Nadalje, plinska turbina može se koristiti kao primarni pokretač koji generira mehaničku energiju, dok se otpadna toplina dobivena iz vrućih dimnih plinova koristi za generiranje pare u generatoru pare. Naposljetku, motori s unutarnjim izgaranjem (Diesel ili Otto) također mogu biti

primarni pokretači, pružajući mehaničku energiju i otpadnu toplinu. Svaka neiskorištena toplina predstavlja ogroman potencijal za uštedu energije [14].

Važno je naglasiti da se proizvedena električna energija može koristiti odmah na licu mjesta za određeni objekt, primjerice zgradu, ili se pak prenosi u elektroenergetsku mrežu izvan objekta. S druge strane, toplina vrućih dimnih plinova iz pogonskih uređaja koristi se za grijanje/hlađenje određenog prostora, grijanje vode ili slično [15]. Ukoliko se radi o termoenergetskom objektu sva dobivena toplinska i električna energija namijenjene su potrošačima, naravno nakon što se namiri osobna tj. vlastita potrošnja. Ako se radi o industrijskom pogonu proizvedena električna i toplinska energije koriste se za podmirenje vlastitih potreba.



Slika 5: Prikaz „toppyng cycle“ kogeneracijskog postrojenja [8].

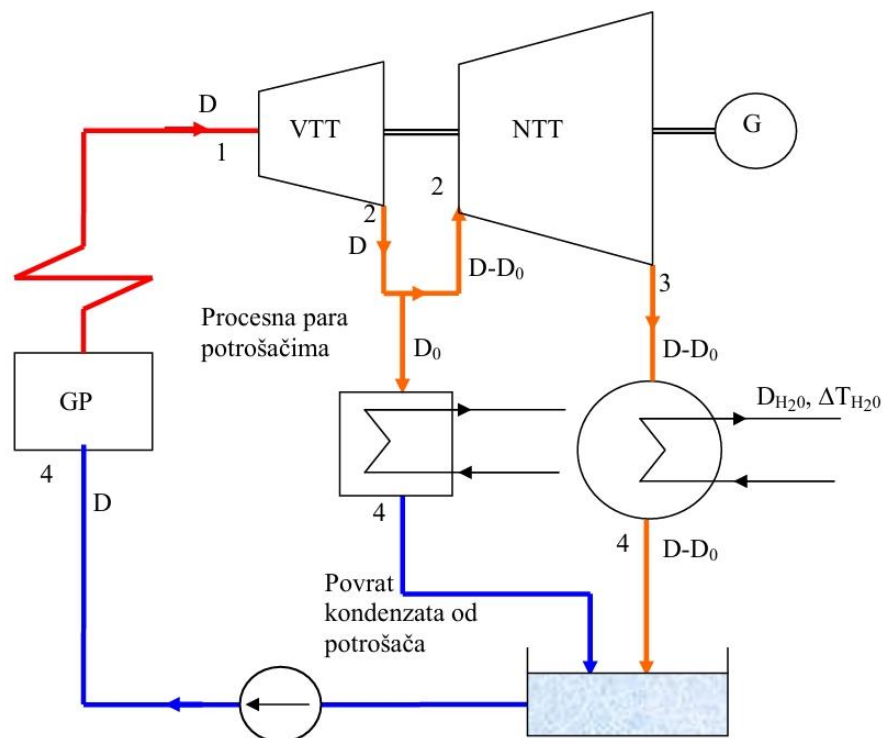
Naziv „toppyng cycle“ dolazi zbog činjenice jer se prvo proizvodi mehanička energija koja pokreće električni generator, a potom se preostala energija u obliku topline odvodi potrošačima.

Kogeneracijska postrojenja postižu visoke učinkovitosti između 60 % i 80 %. Uz povećanje učinkovitosti, kogeneracijska postrojenja mogu poboljšati pouzdanost

električne opskrbe za pripadajuće korisnike i energetska mrežu, pružajući bolju i stabilniju opskrbu energijom i reducirajući rizike od mogućih prekida [13,16,17].

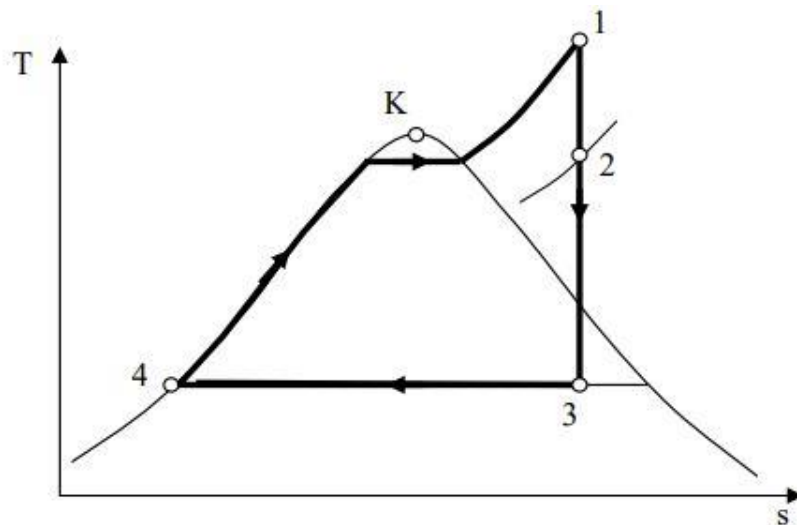
6.2. TURBINA S REGULIRANIM ODUZIMANJEM PARE

Protutlačna turbina je stroj koji se koristi ne samo za proizvodnju mehaničke energije, već i za stvaranje toplinske energije u komunalne ili industrijske svrhe. Para u turbini ekspandira do određene temperature i tlaka, nakon čega se odvodi iz turbine prema potrošačima pare ili toplinske energije. Na izlazu iz turbine, tlak pare je značajno viši od atmosferskog tlaka, zbog čega se ta turbina zove protutlačnom. Na ovaj način istovremeno se dobiva mehanička i toplinska energija [18]. Karakteristika parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare je dodatno oduzimanje pare, a u principu ima sličnu svrhu kao i obična protutlačna turbina. Za razliku od običnih protutlačnih turbina, zahtjevi za ovom vrstom postrojenja se javljaju kada su potrebe potrošača za parom različite. Kod parnih turbina s reguliranim oduzimanjem pare, postoji mehanizam za odvajanje dijela pare viših tlakova i temperatura za potrebe potrošača toplinske energije, a preostali dio pare prolazi kroz drugu turbinu i koristi se za isporuku električne energije. Pomoću ovog sustava omogućuje se prilagodba potrebama potrošača i optimalno korištenje energije. Shema parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare ilustrira Slika 6. Poseban slučaj je kondenzacijska parna turbina s reguliranim oduzimanjem pare, čija je ključna karakteristika mogućnost odvajanja pare visokih parametara, dok se preostala para odvodi u kondenzator [19,20].



Slika 6: Shema parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare [8].

Generator pare (GP) generira paru, koja se zatim pregrijava do stanja 1. Takva pregrijava para ekspandira u prvoj visokotlačnoj turbini (VTT) i to do stanja 2. Ovdje se jedan dio pare (D_0) odvodi prema potrošačima, dok preostala količina pare (označena kao $D - D_0$) dalje ekspandira kroz drugu niskotlačnu turbinu (NTT) sve do stanja 3, gdje se postiže kondenzatorski tlak. Kondenzacijom pare u kondenzatoru nastaje vreli kondenzat (stanje 4). Para koja se odvodi potrošačima vraća se kao kondenzat te se skuplja u spremniku, nakon čega se pumpom vraća u ciklus. Na Slici 7 nalazi se i pripadajući T-s dijagram [8,14].



Slika 7: T-s dijagram parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare [8].

Mehanička snaga koju turbina prenosi električnom generatoru, uz pretpostavku potpune pretvorbe mehaničke u električnu energiju, naziva se električnom snagom. Ona se sastoji od dvije komponente snage dobivene u visokotlačnoj (VTT) i niskotlačnoj turbini (NTT):

$$N_e = N_{VTT} + N_{NTT} = \frac{D \cdot (h_1 - h_2) + (D - D_0) \cdot (h_2 - h_3)}{3600} \quad [kW_e] \quad (1)$$

Gdje su:

$D, D_0 \left[\frac{kg}{h} \right]$ - količina generirane, oduzete pare,

$h \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ - entalpija odgovarajuće točke,

a toplina koja se odvodi u kondenzatoru, tj. bilanca topline kondenzatora:

$$Q_c = (D - D_0) \cdot (h_3 - h_4) = D_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O} \quad \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (2)$$

Gdje su:

$D_{H_2O} - \left[\frac{kg}{h} \right]$ protok rashladne vode,

$c_{pH_2O} - \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$ specifični toplinski kapacitet vode,

$\Delta T_{H_2O} - [K]$ temperaturna razlika za koju se rashladna voda zagrije.

Bilanca topline kotla (generatora pare):

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) = D_G \cdot H_d \cdot \eta_K = V_{PL} \cdot H_d \cdot \eta_K \quad \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (3)$$

Pri čemu su:

$D_G \left[\frac{kg}{h} \right]$, $V_{PL} \left[\frac{m^3}{h} \right]$ - maseni, odnosno volumni protok krutog/tekućeg, odnosno plinovitog goriva,

$H_d \left[\frac{kJ}{kg} \right]$, $\left[\frac{kJ}{m^3} \right]$ - donja toplinska vrijednost krutog/tekućeg, odnosno plinovitog goriva.

Termodinamičko iskorištenje računa se prema:

$$\eta_T = \frac{Ne \cdot 3600}{Q_K} \quad (4)$$

Toplinska snaga odvedena prema potrošačima računa se iz:

$$P = D_0 (h_2 - h_4) \quad \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (5)$$

Faktor toplinskog iskorištenja, odnosno ekonomičnost postrojenja:

$$f = \frac{Ne \cdot 3600 + P}{Q_K} = \frac{Ne \cdot 3600 + P}{D_G \cdot H_d \cdot \eta_K} \quad (6)$$

Prilikom uvrštavanja izraza (6) u izraz (4) dobije se:

$$f = \eta_T + \frac{P}{Q_K} \quad (6a)$$

Sada je potrebno protumačiti navedene izraze. Pomoću izraza (1) računa se električna snaga iz poznatih razlika entalpija i protoka proizvedene, odnosno oduzete pare. Kada je D konstantna vrijednost, električna snaga mijenja se sa promjenom D_0 , tj. sa protokom oduzete pare. Postoje 2 karakteristična slučaja:

- 1) kondenzacijski režim, tj. $D_0 = 0$. Para se ne oduzima i toplinska energija se ne isporučuje prema potrošačima, tako da se cijela proizvedena para D upotrebljava za proizvodnju mehaničke, odnosno električne energije. Dakle, cijela količina pare završit će u kondenzatoru.
- 2) protutlačni režim, tj. $D = D_0$. Ukupna količina pare oduzima se u točki 2 i isporučuje se potrošaču toplinske energije.

Uzme li se u obzir ideja kogeneracije koja kaže da je primarni cilj zadovoljenje potreba za toplinskom energijom, kondenzacijski režim gubi smisao. Međutim, sa investicijskog pogleda ni protutlačni režim nema smisla jer se tada ne koristi niskotlačna turbina. Obzirom na ove činjenice, lako se može zaključiti da će kogeneracijsko postrojenje raditi između ova dva navedena karakteristična slučaja. Ukoliko je D konstantna vrijednost, te uz nepromjenjive vrijednosti entalpija, izrazi od (1) do (6a) se mogu opisati kao funkcija o D_0 .

Npr. izraz (1):

$$N_e = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{3600} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{3600} = a1 \cdot D_0 + b1, a1 < 0 \quad (7)$$

Iz te jednadžbe može se zaključiti da proizvedena električna snaga opada kako se povećava količina pare koja se oduzima - D_0 . Dakle, ta jednadžba zapravo predstavlja padajući pravac. Što se tiče toplinske snage, ona raste.

Ako se izraz (7) uvrsti u izraz (4) može se uočiti potpuno isti padajući smjer pravca, tj. može se zaključiti da se povećanjem količine oduzete pare smanjuje termodinamički stupanj iskorištenja:

$$\eta_{\pi} = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K} = a_2 \cdot D_0 + b_2, a_2 < 0 \quad (8)$$

Nadalje, ukoliko se izrazi (8) i (5) uvrste u (6a) dobiva se veza između toplinskog faktora iskorištenja i količine oduzete pare:

$$f = \eta_{\pi} + \frac{P}{Q_K} = \frac{D_0 \cdot (h_3 - h_4)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K} = a_3 \cdot D_0 + b_3, a_3 > 0 \quad (9)$$

Proučavajući prethodnu jednadžbu može se primijetiti pozitivan koeficijent pravca. Na temelju svega navedenog mogu se izvesti nekoliko ključnih zaključaka. Kada se povećava količina oduzete pare D_0 , električna snaga N_e opada, kao i termodinamički stupanj iskorištenja η_{π} . S druge strane, toplinska snaga P i toplinski faktor iskorištenja f rastu. Toplinski faktor iskorištenja često se naziva ekonomičnošću postrojenja. Budući da je primarni cilj kogeneracijskog postrojenja zadovoljiti potrebe za toplinskom energijom, važno je težiti postizanju što veće vrijednosti toplinskog faktora iskorištenja.

Međutim, sam porast toplinskog faktora iskorištenja nije dovoljan za potpunu ocijenu učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja. Izraz za toplinski faktor iskorištenja uključuje članove koji su izraženi u snazi (kJ/h ili kW), ali ne uzima u obzir vremenski period rada postrojenja. Stoga, presudno je uključiti vremenski faktor u razmatranje, što omogućuje izračun količine proizvedene energije isporučene potrošačima, bilo električne ili toplinske energije. To je ključno za procjenu učinkovitosti kogeneracijskog postrojenja i vrijedi za sve vrste takvih postrojenja [8].

7. OMJER UKUPNO PROIZVEDENE ELEKTRIČNE I TOPLINSKE ENERGIJE- POWER TO HEAT RATIO

Omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije ($\frac{E}{T}$) predstavlja važnu karakteristiku svakog kogeneracijskog postrojenja. Oznaka E predstavlja ukupnu proizvedenu električnu energiju, a oznaka T ukupnu toplinsku energiju. $\frac{E}{T}$ govori koliko će se električne energije proizvesti u odnosu na korisnu toplinu. U

situaciji kad je omjer $\frac{E}{T}$ visok znači da se proizvodi više električne u odnosu na toplinsku energiju, a to je korisno u situacijama gdje je veća potreba za električnom energijom, ili kada je cijena električne energije veća od toplinske. S druge strane, pri manjim omjerima $\frac{E}{T}$ proizvodi se više toplinske energije u odnosu na električnu. Takva situacija je poželjna kada su potrebe za toplinskom energijom veće u odnosu na električnu, primjerice u sustavima grijanja. Međutim, treba stalno imati na umu da je cilj kogeneracijskog postrojenja prvenstveno zadovoljiti potrebe za toplinskom energijom pa tek onda za električnom. Stoga je željeni scenarij da taj omjer bude što manji. U svakom slučaju, omjer $\frac{E}{T}$ je ključan parameter koji ukazuje na učinkovitost i ekonomičnost kogeneracijskog sustava, te ga je potrebno uzimati u obzir prilikom planiranja i projektiranja kogeneracijskog postrojenja [8,21,22]. Ukoliko je potrebno izračunati postotak ukupno proizvedene toplinske ili električne energije, potrebno je uvesti ukupno proizvedenu energiju koja je suma toplinske i električne energije.

$$U = E + T = 100 \% \quad (10)$$

Koristeći izraz (10) omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije je:

$$\frac{E}{T} = \frac{E}{U-E} = \frac{E}{100-E} \quad (11)$$

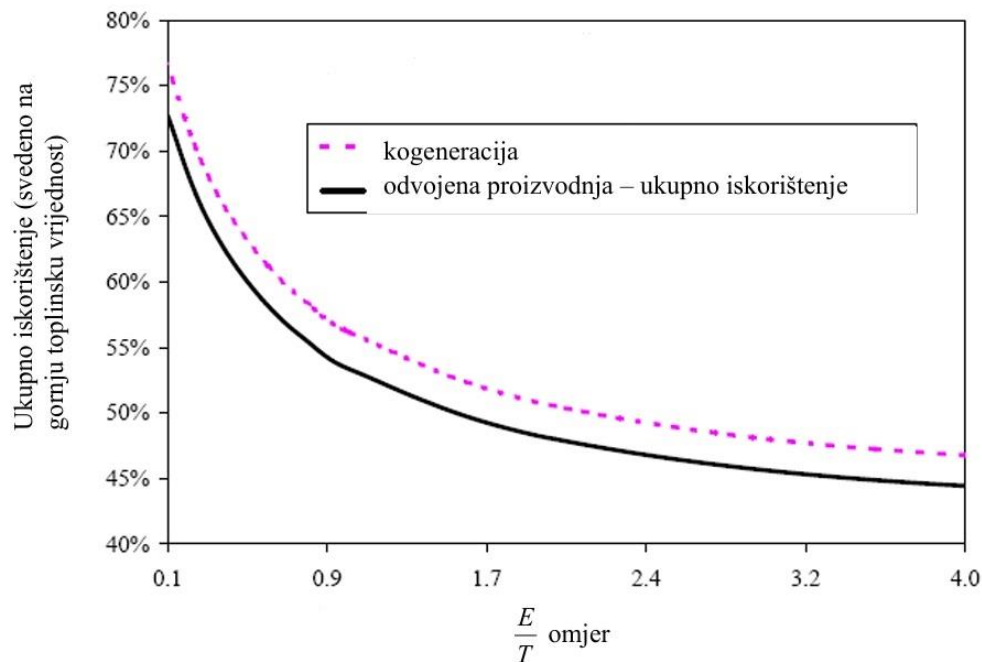
Pomoću izraza (11) dobije se postotak ukupno proizvedene električne energije:

$$E = \frac{\frac{E}{T} \cdot 100\%}{1 + \frac{E}{T}} \quad (12)$$

Ukupno proizvedena toplinska energija dobije se iz izraza (10).

Pomoću Slike 8 može se primijetiti da pri manjim omjerima $\frac{E}{T}$ raste ukupno iskorištenje kako odvojene proizvodnje električne i toplinske energije, tako i

kogeneracijskog postrojenja. Dakle, očito je da će samo pri manjim omjerima $\frac{E}{T}$ kogeneracija biti isplativa.

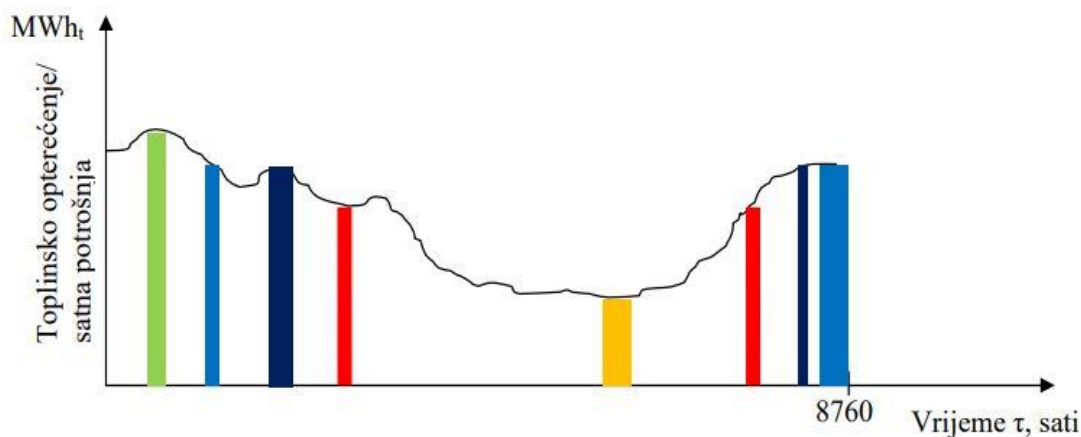


Slika 8: Usporedba iskorištenja električne i toplinske energije u kogeneraciji i odvojenoj proizvodnji, ovisno o omjeru $\frac{E}{T}$ [8].

8. KRIVULJE OPTEREĆENJA

Glavna zadaća svih energetske postrojenja je osigurati dostatne količine potrebnih oblika energije, u ovom slučaju toplinske i električne energije, a sve s ciljem zadovoljavanja potreba potrošača. S obzirom na to da su proizvođači i potrošači međusobno povezani putem električnih i toplinskih mreža, potrošnja i proizvodnja moraju biti sinkronizirani pomoću informacijskih tehnologija u stvarnom vremenu. Kako bi proizvodnja adekvatno odgovorila potrebama potrošnje, ključno je što preciznije predvidjeti te potrebe. U tu svrhu, važno je definirati i analizirati potrošnju energije kroz određeno razdoblje, a to se najčešće prikazuje krivuljama opterećenja. Te krivulje daju uvid u određenu količinu energiju tijekom nekog vremenskog perioda, primjerice jedne godine, jednog dana ili jednog sata. Mogu se

odnositi na pojedinačne potrošače, poput industrijskih objekata ili za grupe potrošača, poput kućanstava. Kvalitativan izgled takvih krivulja, koji je često analiziran obzirom na zadovoljavanje potreba za toplinskom energijom, ključan je aspekt pri planiranju i upravljanju potrebama za toplinskom energijom. Slika 9 ilustrira kvalitativan izgled krivulje toplinskog opterećenja.



Slika 9: Krivulja toplinskog opterećenja [8].

Navedeni dijagram omogućuje predviđanje potrošnje toplinske energije određenog potrošača kroz duži vremenski period, koji je u ovom slučaju 8760 sati [8].

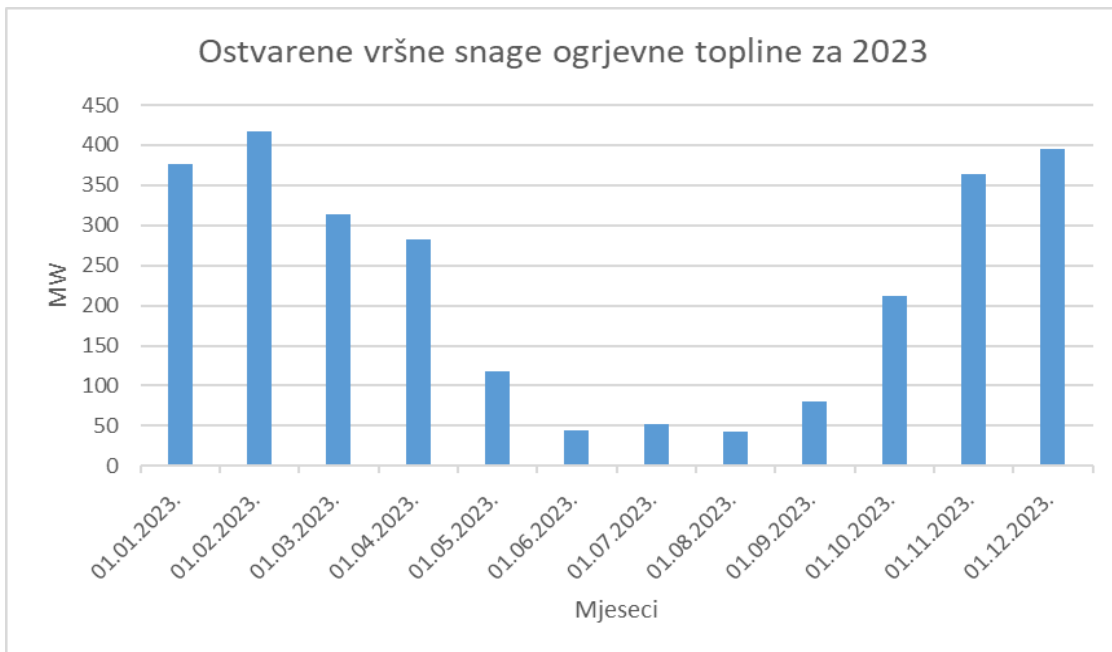
Kako bi se izračunala ukupna mjesečna toplinska opterećenja, u obzir je potrebno uzeti sveukupnu potrošnju goriva te ju prilagoditi postojećim karakteristikama određenih toplinskih pretvornih uređaja. Dakle, potrebno je utvrditi koliko se toplinske energije može proizvesti iz određenih količina goriva, imajući na umu učinkovitost i radne uvjete uređaja. Nadalje, važno je precizno analizirati potrebnu količinu goriva za pojedinačna opterećenja u objektu. To uključuje identificiranje potreba za toplinskom energijom, poput grijanja, pripreme tople vode i slično. Analizom ukupne potrošnje toplinske energije u objektu koji koristi sustav kogeneracije, potrebno je razumjeti raspodjelu potrošnje energije na različite sustave [10].

9. UTJECAJ OKOLIŠNE TEMPERATURE NA RAD KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

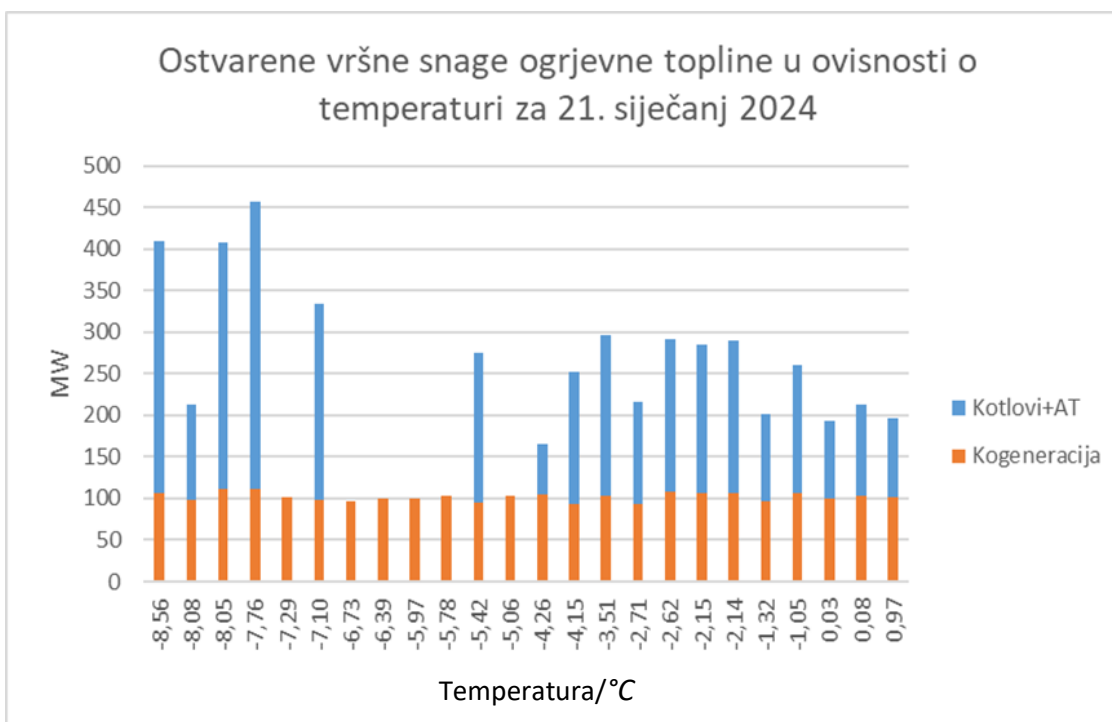
Temperaturno ovisni potrošači su oni čija potrošnja toplinske energije ovisi o vanjskoj temperaturi. Kada počne sezona grijanja, obično se javlja veća potražnja za toplinskom energijom, posebno za grijanje stambenih i poslovnih prostora. Taj porast potražnje povezan je s hladnijim vremenskim uvjetima, jer temperaturno ovisni potrošači, poput sustava grijanja, zahtijevaju veće količine toplinske energije kada je vanjska temperatura niža. S druge strane, s dolaskom toplijih mjeseci zahtjevi za toplinskom energijom opadaju. U tim razdobljima, sustavi grijanja manje su opterećeni jer su vanjske temperature više [8].

U ovom radu istražit će se veza između vanjske temperature i potrošnje toplinske energije temperaturno ovisnih potrošača koji koriste toplinsku energiju proizvedenu iz postrojenja s turbinom s reguliranim oduzimanjem pare.

Na temelju dobivenih podataka o ostvarenoj vršnoj snazi ogrjevnje topline u ovisnosti o temperaturi za 2023. godinu zadatak je utvrditi ovisnost oduzete pare u obliku toplinske energije o temperaturi. Također, dobiveni su i podaci ostvarene vršne snage za najhladniji dan u 2024. godini. Podaci se odnose na Termoelektranu-toplanu Zagreb (TE-TO Zagreb), izgrađenu za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije. Dobiveni podaci od Hrvatske elektroprivrede su sljedeći:



Slika 10: Ovisnost toplinske snage po mjesecima tijekom 2023. godine [23].



Slika 11: Ovisnost ostvarene vršne snage ogrjevnne topline u ovisnosti o temperaturi za 21. siječanj 2024. godine [23].

Slika 10 prikazuje ostvarene vršne snage ogrjevne topline za 2023. godinu. Te vrijednosti predstavljaju ukupne toplinske snage koje proizvodi TE-TO Zagreb. U ovom radu pretpostavlja se da su te snage ostvarene pomoću kogeneracije, odnosno parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare. Cilj je provesti visokoučinkovitu kogeneraciju te ostvariti zadani omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije za turbinu s reguliranim oduzimanjem pare od 0,45.

Prvo je potrebno očitati vrijednosti toplinske snage za svaki mjesec. Tablica 3 prikazuje očitane vrijednosti toplinske snage za svaki mjesec u 2023. godini, zajedno sa srednjim mjesečnim temperaturama. Srednje mjesečne temperature preuzete su iz DHMZ-a (Državni hidrometeorološki zavod).

Tablica 3: Očitane vrijednosti toplinskih snaga s pripadajućim srednjim temperaturama za svaki mjesec u godini. Temperature su preuzete iz [24].

MJESEC	P_t/MW_t	T/°C
Siječanj	375,00	5,20
Veljača	420,00	4,80
Ožujak	315,00	9,80
Travanj	280,00	11,80
Svibanj	120,00	17,40
Lipanj	40,00	22,90
Srpanj	50,00	25,40
Kolovoz	35,00	23,50
Rujan	80,00	20,60
Listopad	215,00	16,10
Studen	365,00	7,50
Prosinac	390,00	5,00

Iz Tablice 3 vidljivo je da srednje mjesečne temperature značajno utječu na ostvarene vršne snage ogrjevne topline. Na primjer, u zimskim mjesecima, kada su temperature niže, potreba za grijanjem je veća, što rezultira većim toplinskim snagama. Nasuprot tome, tijekom ljetnih mjeseci, više temperature smanjuju potrebu za grijanjem, što se očituje u nižim toplinskim snagama.

Nakon toga, računa se količina oduzete pare kako bi se pronašla funkcijska veza sa vanjskom temperaturom. Količina oduzete pare izračunava se iz izraza (5):

$$P_t = D_0 (h_2 - h_4) \left[\frac{kJ}{h} \right].$$

Računi su izvedeni u programskom alatu Excelu kako bi se olakšalo prikupljanje i analiza podataka. Svi ostali izračuni u ovom radu također su odrađeni u Excelu kako bi se osigurala točnost i efikasnost obrade podataka. Budući da će se izrazi pojaviti u standardnim jedinicama, vrijednosti u tablicama bit će izražene u jedinicama koje će biti najlakše prikazati tablično, na primjer $\left[\frac{kJ}{h} \right]$ u MW. Tablica 4 prikazuje izračunate vrijednosti količine oduzete pare za svaki mjesec.

Tablica 4: Izračunate vrijednosti količine oduzete pare za svaku odvedenu toplinsku snagu

MJESEC	P_t/MW_t	$T/°C$	$D_0/\frac{t}{h}$
Siječanj	375,00	5,20	475,35
Veljača	420,00	4,80	532,39
Ožujak	315,00	9,80	399,30
Travanj	280,00	11,80	354,93
Svibanj	120,00	17,40	152,11
Lipanj	40,00	22,90	50,70
Srpanj	50,00	25,40	63,38
Kolovoz	35,00	23,50	44,37
Rujan	80,00	20,60	101,41
Listopad	215,00	16,10	272,54
Studenj	365,00	7,50	462,68
Prosinac	390,00	5,00	494,37

Da bi se održala visokoučinkovita kogeneracija i zadani omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije, toplinski faktor iskorištenja potrebno je održavati između 60 % i 95 %, jer se na taj način postiže ekonomičnije dobivanje toplinske energije. To je posebno važno jer se potrebe za toplinskom energijom mijenjaju, osobito u kontekstu sezonskih promjena okolišne temperature. Da bi kogeneracijsko

postrojenje radilo ekonomično, količina proizvedene pare razlikuje se tijekom godine, jer bi konstantna proizvodnja pare bila neekonomska.

Dakle, ključno je pravilno upravljati kogeneracijskim postrojenjem kako bi se osigurala adekvatna opskrba toplinskom i električnom energijom, uz istovremeno postizanje ekonomske efikasnosti. Upravljanje kogeneracijskim postrojenjem započinje s pretpostavkom određene količine proizvedene pare. Ta će se količina proizvedene pare smanjivati i povećavati u skladu sa sezonskim promjenama, pritom pazeći na održavanje toplinskog faktora iskorištenja. U sklopu ovog procesa, izračunavaju se dobivena električna snaga, toplinski faktor iskorištenja, bilanca topline kotla i termodinamički stupanj iskorištenja. Koriste se izrazi (1), (3), (4) i (6):

$$N_e = N_{VT} + N_{NTT} = \frac{D \cdot (h_1 - h_2) + (D - D_0) \cdot (h_2 - h_3)}{3600} \quad [kW_e]$$

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) \quad \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

$$\eta_T = \frac{N_e \cdot 3600}{Q_K}$$

$$f = \frac{N_e \cdot 3600 + P_t}{Q_K}$$

Zadane su vrijednosti entalpija:

$$h_1 = 3630 \left[\frac{kJ}{kg} \right], \quad h_2 = 2940 \left[\frac{kJ}{kg} \right], \quad h_3 = 2120 \left[\frac{kJ}{kg} \right], \quad h_4 = 100 \left[\frac{kJ}{kg} \right].$$

Tablica 5 ilustrira primjer upravljanja kogeneracijskim postrojenjem u skladu s navedenim uvjetima.

Tablica 5: Primjer upravljanja kogeneracijskim postrojenjem za 2023. godinu

$T/^\circ\text{C}$	$D/\frac{t}{h}$	$D_o/\frac{t}{h}$	Q_k/MW	f	N_e/MWe	E/MWh_e	T/MWh_t	η_T	P-T-H
5,20	600,00	475,35	588,33	0,88	143,39	103242,25	270000,00	0,24	0,45
4,80	600,00	532,39	588,33	0,94	130,40	93887,32	302400,00	0,22	
9,80	600,00	399,30	588,33	0,81	160,72	115715,49	226800,00	0,27	
11,80	400,00	354,93	392,22	0,94	86,93	62591,55	201600,00	0,22	
17,40	300,00	152,11	294,17	0,72	91,19	65653,52	86400,00	0,31	
22,90	140,00	50,70	137,28	0,64	47,17	33964,51	28800,00	0,34	
25,40	140,00	63,38	137,28	0,69	44,29	31885,63	36000,00	0,32	
23,50	140,00	44,37	137,28	0,61	48,62	35003,94	25200,00	0,35	
20,60	250,00	101,41	245,14	0,66	81,76	58869,01	57600,00	0,33	
16,10	450,00	272,54	441,25	0,77	126,67	91204,23	154800,00	0,29	
7,50	550,00	462,68	539,31	0,91	125,31	90221,13	262800,00	0,23	
5,00	550,00	494,37	539,31	0,94	118,09	85023,94	280800,00	0,22	

Nadalje, Slika 11 prikazuje koliko toplinske snage isporučuje kogeneracijsko postrojenje u zavisnosti od vanjske temperature za najhladniji dan u 2024. godini. Za razliku od Slike 10, ovdje je poznato da je određenu snagu proizvela kogeneracija. Potrebno je očitati vrijednosti odvedene toplinske snage proizvedene kogeneracijom. Očitane vrijednosti nalaze se u Tablici 6. Za izračune se koriste iste vrijednosti entalpija. U ovom slučaju, kreće se od zadane količine proizvedene pare koja će biti konstantna za najhladniji dan u 2024. godini: $D = 180 \left[\frac{t}{h} \right]$. Tom količinom pare, želi se postići zadani omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije od 0,45.

Tablica 6: Očitane vrijednosti odvedene toplinske snage u ovisnosti o temperaturi

T/°C	P _t /MW
-8,56	110,00
-8,08	100,00
-8,05	120,00
-7,76	120,00
-7,29	100,00
-7,10	95,00
-6,73	90,00
-6,39	98,00
-5,97	100,00
-5,78	105,00
-5,42	85,00
-5,06	100,00
-4,26	110,00
-4,15	85,00
-3,51	100,00
-2,71	85,00
-2,62	115,00
-2,15	110,00
-2,14	110,00
-1,32	90,00
-1,05	110,00
0,03	100,00
0,08	105,00
0,97	100,00

Iz očitanih toplinskih snaga računaju se količine oduzetih para D_0 iz formule (5):

$$P_t = D_0 (h_2 - h_4) \left[\frac{kJ}{h} \right].$$

U Tablici 7 nalaze se izračunate vrijednosti D_0 .

Tablica 7: Izračunate vrijednosti D_0 za svaku odvedenu toplinsku snagu

$T/^\circ\text{C}$	P_t/MW_t	$D_0/\frac{t}{h}$
-8,56	110,00	139,44
-8,08	100,00	126,76
-8,05	120,00	152,11
-7,76	120,00	152,11
-7,29	100,00	126,76
-7,10	95,00	120,42
-6,73	90,00	114,08
-6,39	98,00	124,23
-5,97	100,00	126,76
-5,78	105,00	133,10
-5,42	85,00	107,75
-5,06	100,00	126,76
-4,26	110,00	139,44
-4,15	85,00	107,75
-3,51	100,00	126,76
-2,71	85,00	107,75
-2,62	115,00	145,77
-2,15	110,00	139,44
-2,14	110,00	139,44
-1,32	90,00	114,08
-1,05	110,00	139,44
0,03	100,00	126,76
0,08	105,00	133,10
0,97	100,00	126,76

U sljedećem koraku izračunava se proizvedena električna snaga iz izraza (1):

$$N_e = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{3600} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{3600} = a1 \cdot D_0 + b1, a1 < 0 \text{ [kW}_e\text{]}.$$

Izračunate vrijednosti isporučene električne snage nalaze se u Tablici 8.

Tablica 8: Izračunate vrijednosti isporučene električne snage

$T/^\circ\text{C}$	P_t/MW_t	$D_0/\frac{t}{h}$	N_e/MW_e
-8,56	110,00	139,44	43,74
-8,08	100,00	126,76	46,63
-8,05	120,00	152,11	40,85
-7,76	120,00	152,11	40,85
-7,29	100,00	126,76	46,63
-7,10	95,00	120,42	48,07
-6,73	90,00	114,08	49,51
-6,39	98,00	124,23	47,20
-5,97	100,00	126,76	46,63
-5,78	105,00	133,10	45,18
-5,42	85,00	107,75	50,96
-5,06	100,00	126,76	46,63
-4,26	110,00	139,44	43,74
-4,15	85,00	107,75	50,96
-3,51	100,00	126,76	46,63
-2,71	85,00	107,75	50,96
-2,62	115,00	145,77	42,30
-2,15	110,00	139,44	43,74
-2,14	110,00	139,44	43,74
-1,32	90,00	114,08	49,51
-1,05	110,00	139,44	43,74
0,03	100,00	126,76	46,63
0,08	105,00	133,10	45,18
0,97	100,00	126,76	46,63

Da bi se izračunla bilanca topline kotla koristi se izraz (3):

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right].$$

Termodinamički stupanj iskorištenja računa se iz izraza (8):

$$\eta_T = \frac{-D_0 \cdot (h_2 - h_3)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K}.$$

Faktor toplinskog iskorištenja računa se iz izraza (9):

$$f = \eta_{\pi} + \frac{P_t}{Q_K} = \frac{D_0 \cdot (h_3 - h_4)}{Q_K} + \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{Q_K}$$

Termodinamički i toplinski faktori iskorištenja nalaze se u Tablici 9.

Tablica 9: Termodinamički i toplinski faktori iskorištenja

T/°C	P _t /MW _t	D ₀ /t/h	N _e /MW _e	η _π	f
-8,56	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-8,08	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-8,05	120,00	152,11	40,85	0,23	0,91
-7,76	120,00	152,11	40,85	0,23	0,91
-7,29	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-7,10	95,00	120,42	48,07	0,27	0,81
-6,73	90,00	114,08	49,51	0,28	0,79
-6,39	98,00	124,23	47,20	0,27	0,82
-5,97	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-5,78	105,00	133,10	45,18	0,26	0,85
-5,42	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-5,06	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-4,26	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-4,15	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-3,51	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
-2,71	85,00	107,75	50,96	0,29	0,77
-2,62	115,00	145,77	42,30	0,24	0,89
-2,15	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-2,14	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
-1,32	90,00	114,08	49,51	0,28	0,79
-1,05	110,00	139,44	43,74	0,25	0,87
0,03	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83
0,08	105,00	133,10	45,18	0,26	0,85
0,97	100,00	126,76	46,63	0,26	0,83

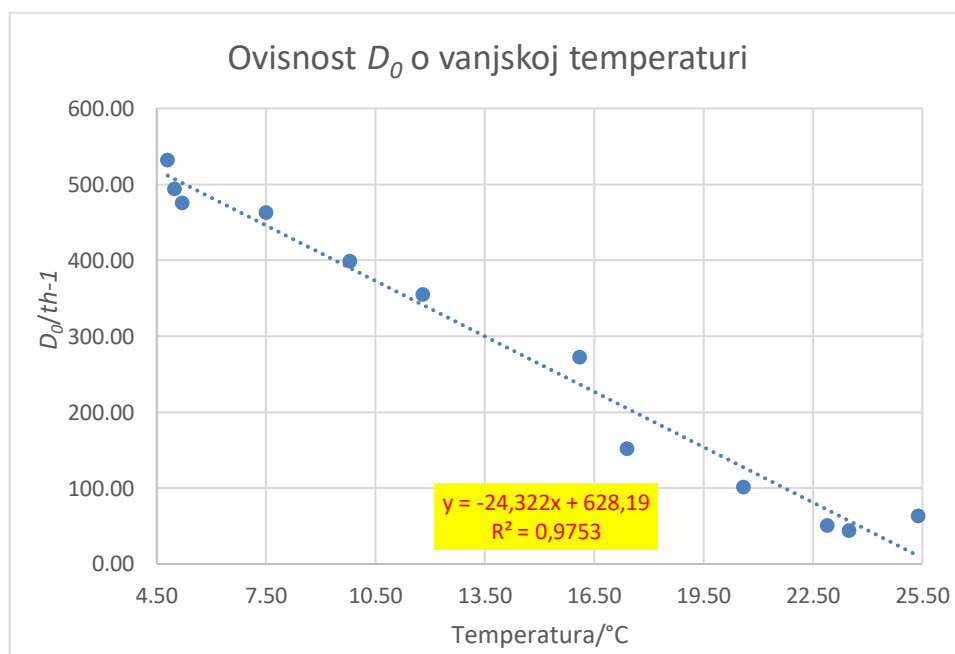
Zadani omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije iznosi 0,45. Prema tome, postotci električne i toplinske energije su:

$$E = \frac{0,45 \cdot 100\%}{1+0,45} = 31,03 \%$$

$$T = U - E = 68,97 \%$$

10. REZULTATI I RASPRAVA

Dakle, kao što je već rečeno ranije, promatrajući Sliku 10 i Tablicu 3, može se primijetiti da toplinska energija koja se odvodi potrošačima ovisi o vanjskoj temperaturi. Dok traje sezona grijanja, temperaturno ovisni potrošači zahtijevaju veće količine toplinske energije jer niže vanjske temperature povećavaju potrebu za grijanjem u unutarnjim prostorima. Zbog toga, u ovom periodu, postoji veća potrošnja toplinske energije. Međutim, kako vanjske temperature počinju rasti s dolaskom toplijih mjeseci, potreba za toplinskom energijom smanjuje se jer prirodno zagrijavanje okoliša smanjuje potrebu za dodatnom toplinskom energijom. Toplinska energija isporučuje se u obliku pare ili vrele vode, a Slika 12 prikazuje ovisnost odvedene pare potrošačima o vanjskoj temperaturi.

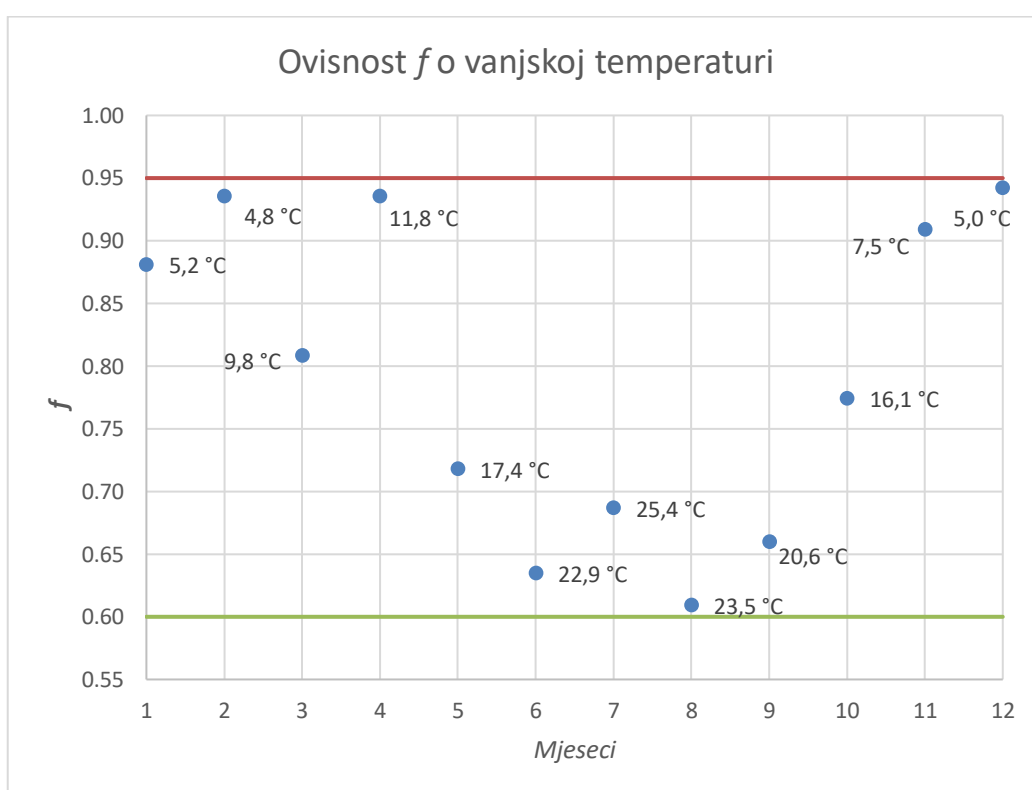


Slika 12: Ovisnost količine pare koja se odvodi potrošačima o sredjoj mjesečnoj temperaturi tijekom godine

Iz slike je jasno vidljivo da se s povećanjem vanjske temperature smanjuje količina pare koja se odvodi potrošačima. Ova negativna korelacija pokazuje da u toplijim uvjetima postoji manja potreba za toplinskom energijom. Koeficijent determinacije

($R^2=0,9753$) dodatno potvrđuje snagu ove veze. Vrijednost bliska 1 znači da model vrlo precizno objašnjava promjenu u količini odvedene pare na temelju promjena vanjske temperature. Ovaj podatak iznimno je važan jer pruža čvrstu osnovu za razumijevanje kako promjene u vanjskoj temperaturi direktno utječu na potrošnju toplinske energije. Takvo razumijevanje omogućava preciznije planiranje i upravljanje resursima u sustavima grijanja, što omogućuje veću učinkovitost te smanjenje troškova.

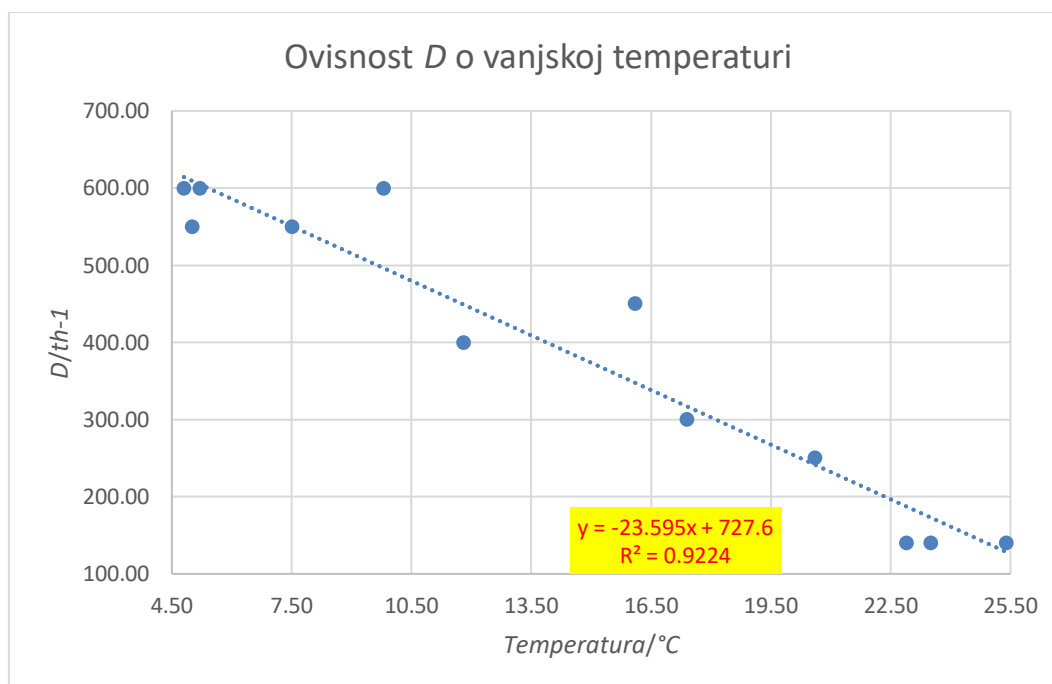
Da bi se održala visokoučinkovita kogeneracija, toplinski faktor iskorištenja održava se između 60 % i 95 % (Slika 13).



Slika 13: Vrijednosti toplinskog faktora iskorištenja po mjesecima sa pripadajućim temperaturama

To se postiže na sljedeći način. Od siječnja do travnja, zbog niskih vanjskih temperatura, potrebe za toplinskom energijom su povećane. Količina proizvedene pare ostaje konstantna, zadovoljavajući potrebe potrošača. Međutim, kako

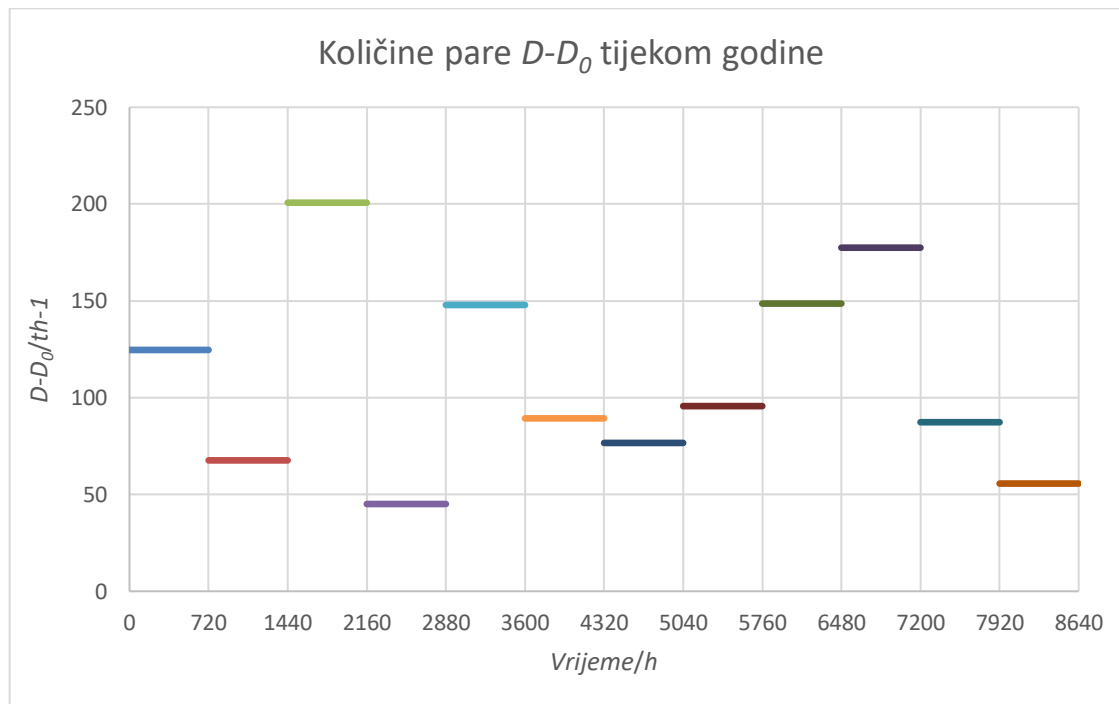
temperature zraka rastu u travnju, smanjuje se količina proizvedene pare sa 600 t/h na 400 t/h. U svibnju, s daljnjim rastom temperature zraka, dodatno se smanjuje količina proizvedene pare na 300 t/h. U lipnju, srpnju i kolovozu, zbog značajnog porasta temperatura zraka, smanjuje se količina proizvedene pare na 140 t/h i održava se konstantnom tijekom ovih mjeseci, čime se održava toplinski faktor iskorištenja u zadanom intervalu. U rujnu, kada temperature počnu padati, povećava se potreba za toplinskom energijom. Stoga se povećava količina proizvedene pare na 250 t/h kako bi se zadovoljile te potrebe. U listopadu, s daljnjim padom temperatura, dodatno se povećava količina proizvedene pare na 450 t/h. U studenom i prosincu, kada su potrebe za toplinskom energijom izrazito velike zbog niskih vanjskih temperatura, povećava se količina proizvedene pare na 550 t/h kako bi se osigurala dovoljna količina toplinske energije za sve potrošače. Dakle, prilagođavanjem količine proizvedene pare potrebama potrošača, postiže se održavanje vrijednosti toplinskog faktora iskorištenja u zadanom intervalu, čime se osigurava ekonomičnost postrojenja. Slika 14 prikazuje ovisnost količine proizvedene pare o vanjskoj temperaturi.



Slika 14: Ovisnost količine proizvedene pare o vanjskoj temperaturi

Slika 14 pokazuje da je količina proizvedene pare veća u zimskim mjesecima nego u ljetnim. To je logično jer, kako temperatura okoline raste, smanjuje se potreba za toplinskom energijom. S druge strane, kada temperatura okoline počne padati i porastu potrebe toplinskih potrošača, povećava se proizvodnja pare.

Nadalje, Slika 15 prikazuje kako se količina pare koja nastavlja ekspanzirati u niskotlačnoj turbini kreće tijekom godine. Dakle, to je razlika količine proizvedene pare i pare koja se odvodi potrošačima.

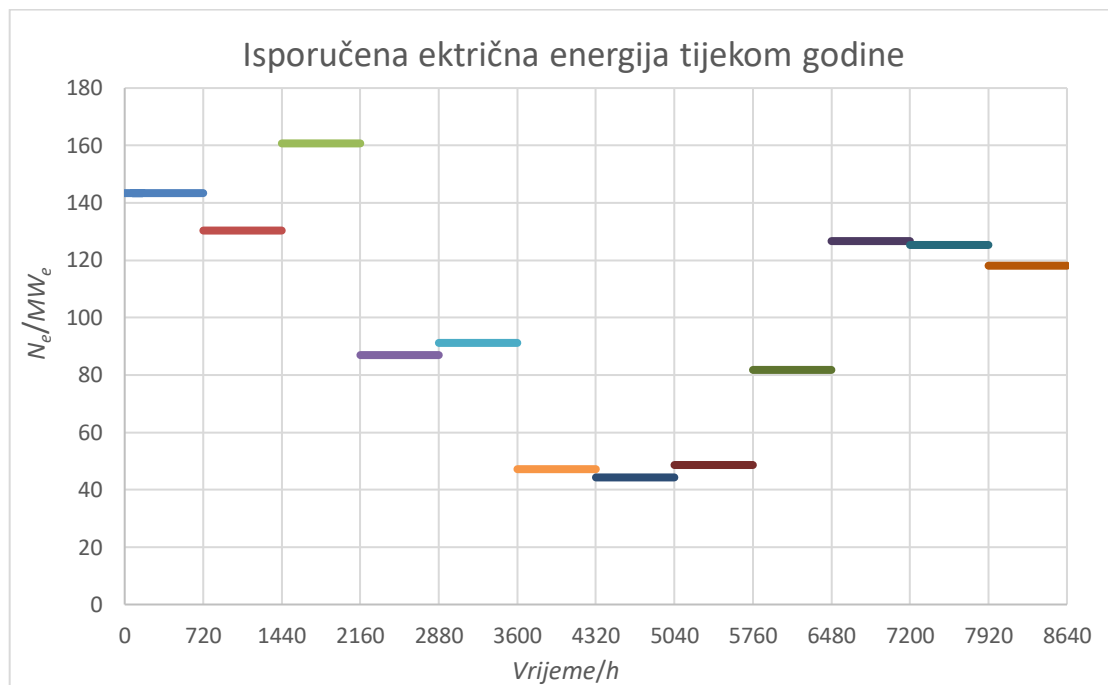


Slika 15: Količine pare koje ekspanziraju u niskotlačnoj turbini tijekom godine

Količina pare koja ekspanzira u niskotlačnoj turbini važna je za pokretanje električnog generatora i stvaranje električne energije. Međutim, iz prethodno navedenog prikaza ne može se zaključiti o trendu mijenjanja te količine s vanjskom temperaturom i mjesecima tijekom godine. Naime, iako se zimi proizvodi veća količina pare, isto tako se i više oduzima, za razliku od ljetnih mjeseci.

Iako količina pare koja nastavlja ekspanziju u niskotlačnoj turbini pridonosi proizvodnji električne energije, važan je i utjecaj ukupne količine pare koja

ekspandira u visokotlačnoj turbini. Visokotlačna ekspanzija pare primarni je izvor mehaničke energije za pokretanje električnog generatora. Slika 16 prikazuje isporučenu električnu energiju tijekom godine, otkrivajući određene zakonitosti.

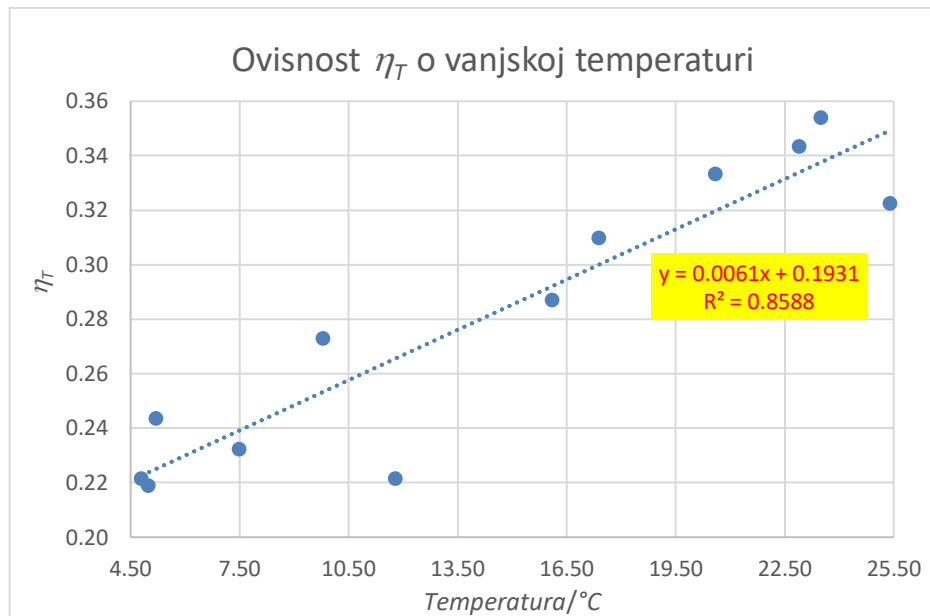


Slika 16: Isporučena električna energija tijekom godine

Proizvedena električna energija tijekom godine u kogeneracijskom sustavu može se analizirati na sljedeći način. Graf prikazuje da je isporuka električne energije veća u zimskim mjesecima u odnosu na ljetne mjesece. Tijekom zimskih mjeseci, zbog nižih vanjskih temperatura, raste potreba za toplinskom energijom, što dovodi do povećanja proizvodnje pare. Povećanje proizvodnje pare povećava proizvodnju električne energije jer se tada ukupna energija generirana u sustavu povećava. U ljetnim mjesecima smanjuje se potreba za toplinskom energijom, što dovodi do smanjenja proizvodnje pare i posljedično smanjenja proizvodnje električne energije. Dakle, količina proizvedene pare ključna je za stvaranje električne energije. Od siječnja do ožujka proizvodi se konstantna količina pare. U veljači je temperatura najniža, zatim u siječnju, dok je u ožujku temperatura najviša. Sukladno tome,

najmanja količina pare u obliku toplinske energije odvodi se potrošačima u ožujku. Zbog toga, u ožujku, najveća količina preostale pare koja je razlika između proizvedene pare i pare koja se odvodi potrošačima prolazi kroz niskotlačnu turbinu i omogućava nastajanje najveće količine električne energije. U travnju i svibnju, rastu temperature okoline, što rezultira smanjenjem proizvedene pare i količine pare koja se odvodi potrošačima. To dovodi do smanjenja količine pare koja odlazi u niskotlačnu turbinu i smanjenja proizvodnje električne energije. U ljetnim mjesecima, lipnju, srpnju i kolovozu, proizvodnja pare dodatno pada na konstantnu vrijednost, najmanju od svih mjeseci u godini, zbog manjih potreba za toplinskom energijom, što rezultira i minimalnim oduzimanjem pare. Sukladno tome, količina pare koja odlazi u niskotlačnu turbinu opet opada, što dalje smanjuje proizvodnju električne energije. Kako temperature zraka opadaju u rujnu i listopadu, povećava se proizvodnja pare i količina pare koja se odvodi potrošačima, no ta razlika je veća nego u ljetnim mjesecima, što rezultira većom proizvodnjom električne energije. Naposljetku, u studenom i prosincu, kada temperature zraka znatno opadaju, proizvodnja pare ponovno raste i drži se konstantnom, uz rast količina oduzete pare. Ipak, količina pare koja prolazi kroz niskotlačnu turbinu nešto je niža nego u listopadu, tako da se proizvodi manja količina električne energije.

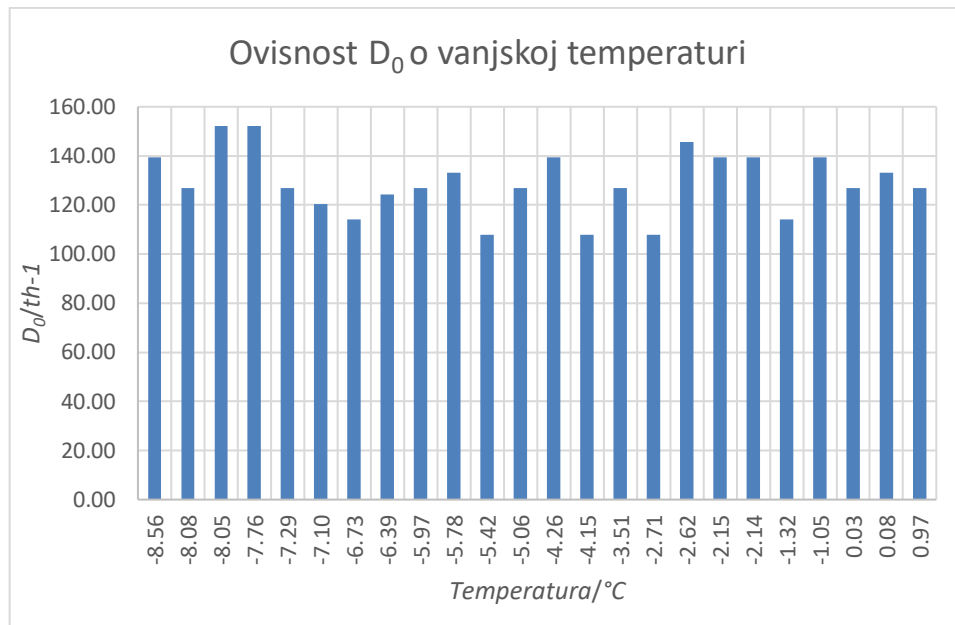
Termodinamički stupanj iskorištenja u ovisnosti o vanjskoj temperaturi prikazuje Slika 17.



Slika 17: Ovisnost termodinamičkog stupnja iskorištenja o vanjskoj temperaturi

Termodinamički stupanj iskorištenja kogeneracijskog sustava veći je u ljetnim mjesecima nego u zimskim. Iako u ljetnim mjesecima dolazi do manje proizvodnje električne energije, važno je napomenuti da se bilanca topline kotla smanjuje zbog viših temperatura okoline. Kako temperature rastu, toplinske potrebe potrošača su manje, što rezultira manjom količinom energije koja se unosi u kotao. Taj pad u bilanci topline kotla rezultira povećanjem termodinamičkog stupnja iskorištenja. To znači da unatoč smanjenju proizvodnje električne energije, sustav efikasnije koristi dostupnu toplinsku energiju za proizvodnju električne energije.

Promatrajući Sliku 11, može se uočiti da uz rad kogeneracijskih blokova istovremeno rade i kotlovi te akumulatori topline. Razlog tome je činjenica da kogeneracijska postrojenja sama ne mogu zadovoljiti potrebu za toplinskom energijom, osobito tijekom najhladnijih dana u godini. S obzirom na to da je primarni cilj ovog istraživanja prikazati ovisnost rada kogeneracijskog postrojenja o vanjskoj temperaturi, potrebno je prikazati kako količina oduzete pare u kogeneracijskim blokovima ovisi o temperaturi okoline.

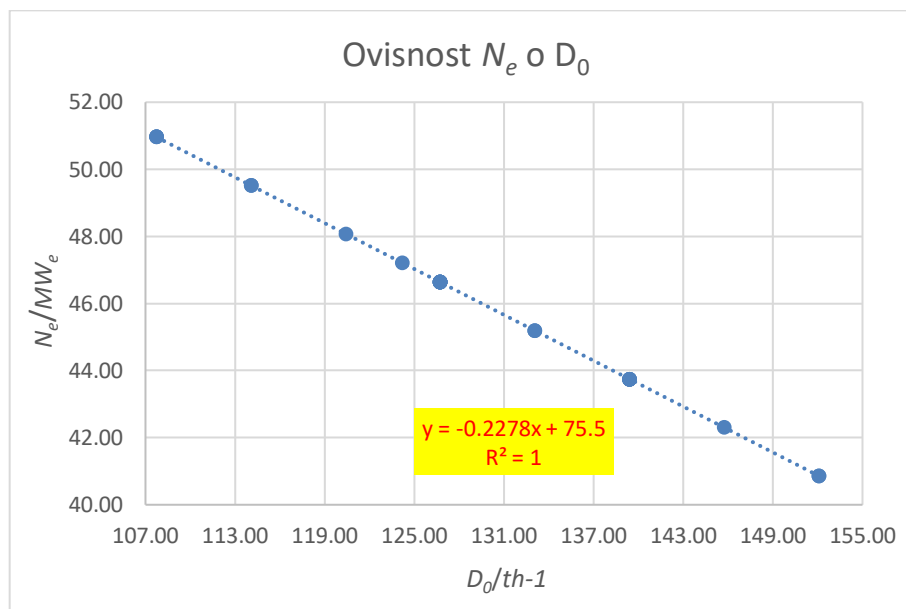


Slika 18: Histogram ovisnosti oduzete pare o vanjskoj temperaturi

Histogram (Slika 18) koji prikazuje ovisnost oduzete pare o vanjskoj temperaturi ne pokazuje jasnu ili pravilnu ovisnost, gdje bi se smanjenjem temperature uvijek povećavala količina oduzete pare ili obrnuto. Umjesto toga, primjećuje se da se količina oduzete pare s povećanjem temperature ne smanjuje uvijek, već oscilira. Postoji nekoliko složenih faktora koji mogu utjecati na ovakvu nejasnu ovisnost. Prvo, treba uzeti u obzir da su podaci prikupljeni samo na temelju promatranja jednog dana u godini, bez informacija o specifičnom satu u danu. Važno je napomenuti da grijanje obično počinje oko 5 ujutro i traje do 9 ili 10 navečer. Dakle, potrošnja toplinske energije može biti veća u jutarnjim i večernjim satima, kada ljudi obično intenzivnije koriste grijanje. Ovi dnevni ciklusi mogu značajno utjecati na količinu oduzete pare. Drugo, kogeneracijska postrojenja ne mogu jednostavno povećavati količinu oduzete pare kada je temperatura niža, jer su njihove značajke ograničene kapacitetom i tehničkim karakteristikama sustava. To znači da treba uzeti u obzir da su parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare projektirane za pokrivanje baznog opterećenja, što znači da ne mogu naglo mijenjati režime rada. Kada dođe do pada vanjskih temperatura, sustav prelazi na vršne kotlove i akumulatore topline kako bi pokrio povećane potrebe za toplinskom energijom. Ova

prilagodba osigurava stabilnost i kontinuitet u isporuci toplinske energije potrošačima.

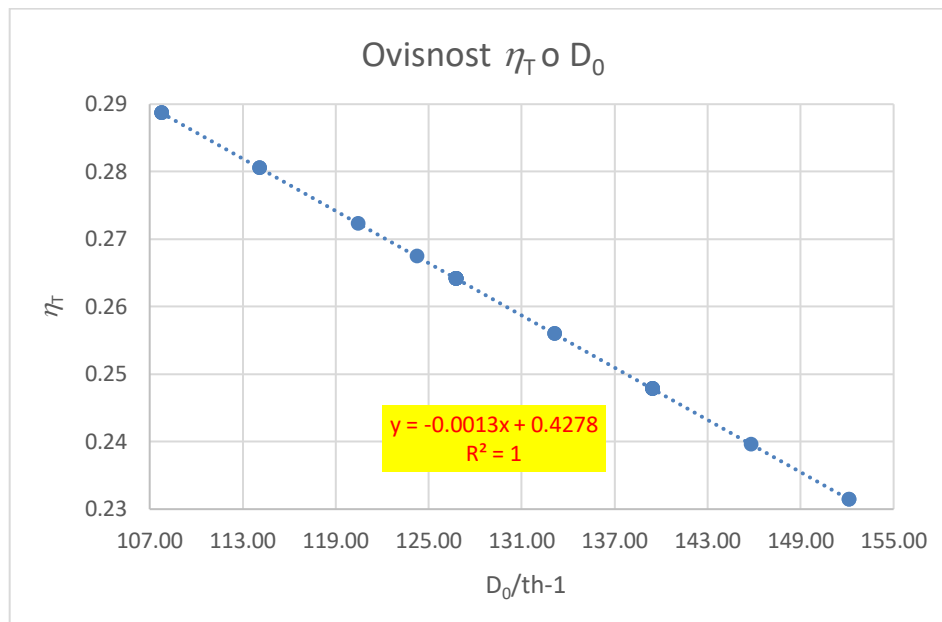
Osim toga, uz konstantnu proizvodnju pare, moguće je identificirati i druge ovisnosti o količini oduzete pare, kao što su termodinamički stupanj iskorištenja, dobivena električna snaga i toplinski faktor iskorištenja. Ovi parametri omogućuju dodatne zaključke o karakteristikama kogeneracijskog postrojenja. Slika 19 prikazuje ovisnost električne snage o količini oduzete pare.



Slika 19: Ovisnost električne snage o količini oduzete pare

Kada se povećava količina oduzete pare, smanjuje se električna snaga iz više razloga. Glavni razlog leži u činjenici da se količina pare koja pokreće niskotlačnu turbinu, a time i generator električne energije, smanjuje. Kada je manje pare dostupno za pokretanje turbine, ona ima manju snagu rotacije, što rezultira manjim proizvodnim kapacitetom električne energije. Drugim riječima, smanjenje količine pare smanjuje kapacitet turbina za generiranje električne energije. Ovo je logičan rezultat jer je električna energija izravno proporcionalna količini pare koja pokreće turbinu. Stoga, kako se količina pare smanjuje, smanjuje se i električna energija koju turbina može generirati.

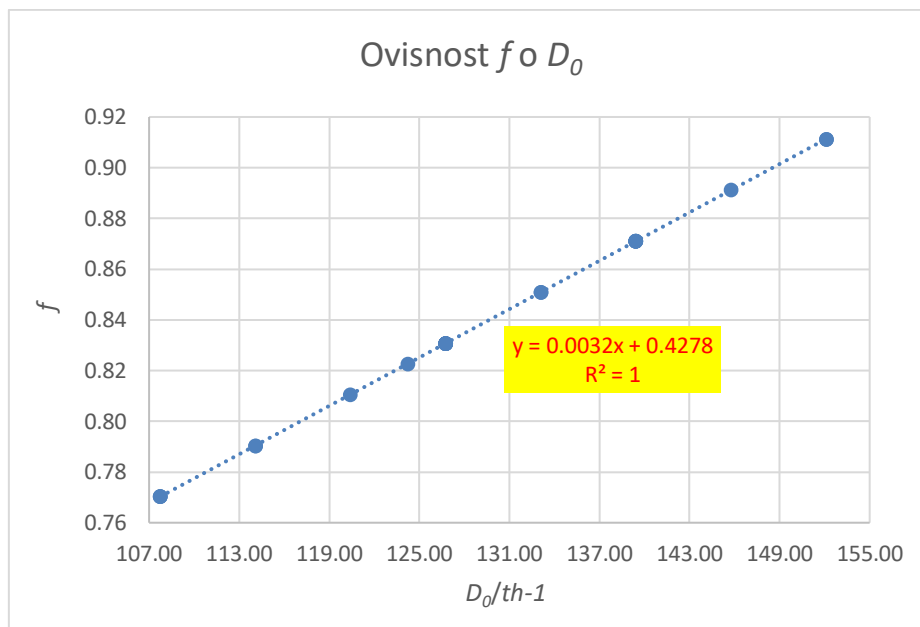
Slika 20 ilustrira kako se termodinamički stupanj iskorištenja mijenja u odnosu na količinu oduzete pare.



Slika 20: Ovisnost termodinamičkog stupnja iskorištenja o količini oduzete pare

Kada je proizvodnja pare konstantna, povećanje količine oduzete pare rezultira smanjenjem termodinamičkog stupnja iskorištenja u kogeneracijskim postrojenjima. S povećanjem količine oduzete pare smanjuje se količina pare koja expandira u niskotlačnoj turbini. Manja količina pare u niskotlačnoj turbini smanjuje radnu snagu koju ona može generirati, što rezultira smanjenjem električne snage. Nadalje, veći gubici topline unutar sustava i smanjenje tlaka pare negativno utječu na pretvaranje toplinske energije u električnu energiju. Niži tlak pare ograničava sposobnost turbine da generira potrebnu radnu snagu, što dodatno smanjuje proizvodnju električne energije.

Slika 21 prikazuje ovisnost toplinskog faktora iskorištenja o količini oduzete pare.



Slika 21: Ovisnost toplinskog faktora iskorištenja o količini oduzete pare

Toplinski faktor raste s povećanjem količine oduzete pare jer se time povećava dostupna količina toplinske energije. Veća vrijednost toplinskog faktora ukazuje da postrojenje bolje koristi raspoloživu toplinsku energiju za ispunjavanje potreba temperaturno ovisnih potrošača.

Kako bi se konačno ocijenilo je li kogeneracijsko postrojenje radilo učinkovito, ključan je izračun omjera ukupno proizvedene električne i toplinske energije. Njegova vrijednost iznosi 0,45 što znači da se proizvodi više toplinske nego električne energije, čime je očuvan koncept kogeneracije. Odnosno proizvodi se 68,97 % toplinske i 31,03 % električne energije. Takav omjer ukazuje na to da postrojenje učinkovito koristi svoje resurse kako bi zadovoljilo veće potrebe za toplinskom energijom, što je u skladu s osnovnim načelom kogeneracije.

11. ZAKLJUČAK

Vanjska temperatura igra ključnu ulogu u proizvodnji i potrošnji toplinske energije. U zimskim mjesecima, niže vanjske temperature povećavaju potrebu za grijanjem kako bi se održali potrebni uvjeti u unutarnjim prostorima, što rezultira većom potrošnjom toplinske energije. S dolaskom toplijih mjeseci, prirodno zagrijavanje okoliša smanjuje potrebu za dodatnom energijom, te se stoga potreba za toplinskom energijom smanjuje. Toplinska energija isporučuje se potrošačima u obliku pare ili vrele vode, a analiza pokazuje da se s povećanjem vanjske temperature smanjuje količina pare koja se odvodi potrošačima. Količina proizvedene pare u kogeneracijskom sustavu prilagođava se vanjskim temperaturama kako bi se održala učinkovitost sustava. U zimskim mjesecima, kada su vanjske temperature niske, potrebe za toplinskom energijom su velike pa se količina proizvedene pare održava visokom. Nasuprot tome, tijekom ljetnih mjeseci, zbog visokih vanjskih temperatura, potrebe za toplinskom energijom su manje, pa se količina proizvedene pare značajno smanjuje. Održavanje toplinskog faktora iskorištenja postiže se kontinuiranim prilagođavanjem proizvodnje pare prema sezonskim potrebama, što omogućuje visoku učinkovitost sustava i smanjenje troškova, osiguravajući optimalno upravljanje resursima tijekom cijele godine. Količina pare koja ekspandira u niskotlačnoj turbini mijenja se tijekom godine, jer ovisi o razlici između ukupno proizvedene pare i pare koja se odvodi potrošačima. Ta para je važna za pokretanje električnog generatora i proizvodnju električne energije. Iako se zimi proizvodi veća količina pare, veći dio te pare se također odvodi potrošačima zbog povećane potrebe za grijanjem, dok je ljeti potreba za toplinskom energijom manja, što rezultira manjim količinama oduzete pare. Zbog tih sezonskih promjena, količina pare koja ostaje za ekspanziju u niskotlačnoj turbini i proizvodnju električne energije ne pokazuje jednostavan trend s promjenom temperature tijekom godine. Proizvodnja električne energije u kogeneracijskom sustavu ovisi o količini pare koja ekspandira u visokotlačnoj i niskotlačnoj turbini. Visokotlačna ekspanzija pare je ključni izvor mehaničke energije za pokretanje električnog

generatora. Analiza isporučene električne energije tijekom godine pokazuje da je proizvodnja veća u zimskim mjesecima kada je potreba za toplinskom energijom veća zbog nižih vanjskih temperatura. Ovaj porast toplinskih potreba povećava proizvodnju pare, što rezultira većom proizvodnjom električne energije. S druge strane, ljetni mjeseci donose smanjenu potrebu za toplinskom energijom, što dovodi do smanjenja proizvodnje pare i, posljedično, proizvodnje električne energije. U prijelaznim mjesecima kao što su travanj i svibanj, rastuće temperature uzrokuju smanjenje proizvedene pare i njene potrošnje, što opet smanjuje količinu pare dostupne za proizvodnju električne energije. Tijekom ljetnih mjeseci, proizvodnja pare se održava na minimalnoj konstantnoj vrijednosti zbog smanjenih potreba za toplinskom energijom, što rezultira najnižom proizvodnjom električne energije. Kako temperature ponovno padaju u rujnu i listopadu, proizvodnja pare raste, što povećava proizvodnju električne energije. U studenom i prosincu, unatoč rastu proizvedene pare i količine oduzete pare prema potrošačima, količina pare koja prolazi kroz niskotlačnu turbinu je niža nego u listopadu, pa je proizvodnja električne energije nešto manja. Termodinamički stupanj iskorištenja kogeneracijskog sustava veći je u ljetnim mjesecima nego u zimskim. Iako se ljeti smanjuje proizvodnja električne energije, viša vanjska temperatura smanjuje toplinske potrebe potrošača, što dovodi do manje količine energije potrebne za kotao. Ova smanjena potreba za toplinskom energijom poboljšava termodinamički stupanj iskorištenja sustava, jer se dostupna toplinska energija efikasnije koristi za proizvodnju električne energije. Na taj način, unatoč manjoj proizvodnji električne energije, ljeti sustav radi učinkovitije koristeći manje resurse.

Dubljom analizom ovisnosti rada kogeneracijskog postrojenja o vanjskoj temperaturi, temeljenom na podacima prikupljenim tijekom jednog najhladnijeg dana u godini, otkrivaju se ključni zaključci. Prvo, primjećuje se nedostatak dosljedne ovisnosti između količine oduzete pare i vanjske temperature. Taj nedostatak dosljednosti može se pripisati činjenici da su podaci prikupljeni na temelju promatranja samo jednog dana u godini, te da nije poznato u kojem su satu u danu

zabilježene određene toplinske snage. Dakle, ograničenja u prikupljenim podacima mogu utjecati na pouzdanost i reprezentativnost rezultata. Nadalje, detaljnom analizom električne snage pokazuje se njezino značajno smanjenje s povećanjem količine oduzete pare. Taj trend može biti posljedica smanjenog kapaciteta turbine za generiranje električne energije. Termodinamički stupanj iskorištenja pokazuje opadajući trend s povećanjem količine oduzete pare zbog većih gubitaka topline unutar sustava i smanjenja tlaka pare, što negativno utječe na pretvaranje toplinske energije u električnu energiju. Međutim, može se primijetiti rastući toplinski faktor iskorištenja s povećanjem količine oduzete pare. Ovo sugerira bolje korištenje energenata za proizvodnju toplinske energije, što je ključno za ekonomičnost postrojenja. Zadani omjer ukupno proizvedene električne i toplinske energije pokazuje da se proizvodi više toplinske nego električne energije, što potvrđuje učinkovitost postrojenja u zadovoljavanju potreba za toplinskom energijom.

Ovi zaključci naglašavaju složenost rada kogeneracijskih postrojenja te potrebu za kontinuiranim upravljanjem kako bi se osigurala maksimalna učinkovitost i ekonomičnost. Utvrđene zakonitosti pružaju vrijedne uvide u dinamiku kogeneracijskog postrojenja i naglašavaju važnost precizne analize kako bi se osigurao rad sustava u različitim uvjetima temperature.

12. LITERATURA

[1] Isa, N.M., Tan, C.W., Yatim, A., A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: a perspective from architecture and operating system, Renew. Sustain. Energy Rev. 81 (2017) 2236-2263.

[2] <https://www.epa.gov/chp/what-chp> (pristup 20.05.2024.)

[3] International Energy Agency (IEA), Combined Heat and Power: Evaluation and Strategy, OECD/IEA, Paris, 2008.

[4] <https://www.ho-cired.hr/referati-umag2010/SO4-22.pdf> (pristup 03.06.2024.)

[5] Staniša, B., Kogeneracijski sustavi s plinskim turbinama, Međunarodni kongres Energija i zaštita okoliša, Opatija, 23.-25.10.1996., Zbornik radova II, 159-168.

[6] Bathie, W. W., Fundamentals of gas turbines, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

[7] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/motor-s-unutarnjim-izgaranjem> (pristup 29.4.2024.)

[8] Sutlović, I., Kogeneracija, Predavanje, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (FKIT), Sveučilište u Zagrebu, 2020.

[9] Borbely, A. M., Kreider, J. F., "Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium", CRC Press, 2001.

[10] ASHRAE, United States Department of Energy, United States Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Design Guide, 15 June 2015.

[11] Kos, F., Bioplinsko kogeneracijsko postrojenje na peradarskoj farmi, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Sveučilište u Zagrebu, 2010.

[12] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_03_28_471.html (pristup 03.06.2024.)

- [13] Department of Energy, State & Local Energy Efficiency Action Network, Guide to the Successful Implementation of State Combined Heat and Power Policies, DOE/EE-0838, March 2013.
- [14] Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., Osnove tehničke termodinamike, Zagreb, 2002.
- [15] National Association of State Energy Officials, Combined Heat and Power: A State Resource Guide for State Energy Officials, 2013.
- [16] US Department of Energy, US Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power: A Clean Energy Solution, August 2012.
- [17] Environmental Protection Agency, Waste Heat to Power Systems, May 30, 2012.
- [18] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/turbina_toplinska.pdf (pristup 01.05.2024.)
- [19] Kostyuk, A., Frolov, V., Steam and Gas Turbines, Mir Publishers, Moskva, 1988.
- [20] Guzović, Z., Konstrukcija i proračun čvrstoće elemenata parnih i plinskih turbina, FSB, Zagreb, 1994.
- [21] [COMBINED HEAT AND POWER DIRECTIVE 2004/8/EC of the EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL \(europa.eu\)](#) (pristup 03.05.2024.)
- [22] Yin, S., Xia, J., & Jiang, Y., Characteristics Analysis of the Heat-to-Power Ratio from the Supply and Demand Sides of Cities in Northern China. Received: 16 December 2019; Accepted: 1 January 2020; Published: 3 January 2020.
- [23] <https://www.hep.hr/> (pristup 15.5.2024.)
- [24] <https://meteo.hr/> (pristup 15.5.2024.)