

Optimiziranje centralizirane opskrbe toplinom iz kogeneracijskog postrojenja na obnovljive izvore energije za pokrivanje ogrjevnog i tehnološkog konzuma

Janko Džodan

EKONERG – Institut za energetiku i zaštitu okoliša d.o.o.

janko.dzodan@ekonerg.hr

Sažetak - Krajnja potrošnja toplinske energije kao prijelaznog oblika u glavini primjena služi za zagrijavanje zraka radi prilagodbe uvjeta boravku ljudi te za potrebe cijelog spektra tehnoloških procesa. Podaci o toplinskem konzumu potrošača sadržani su u srednjem dijagramu trajanja toplinskog opterećenja iz kojeg se očitavaju njegove toplinske potrebe i omogućuje odabir adekvatnog izvora za njihovo zadovoljavanje. Jedna od varijanti pri planiranju proizvodnje i potrošnje energije jesu centralizirani toplinski sustavi u kojima je gorivo u izvorima topline iz kategorije obnovljivih izvora energije, a toplina se prenosi medijem kroz izgrađenu infrastrukturu. Povećanje ukupne učinkovitosti procesa kroz proizvodnju u kogeneracijskim postrojenjima ostvaruje beneficije kako u energetskom, tako i u ekonomskom pogledu. Na primjeru iz prakse prikazano je način rješavanja problema optimizacije opskrbe toplinom pri uvjetovanoj učinkovitosti procesa i dani prijedlozi za nastavak istraživanja.

Ključne riječi – centralizirani toplinski sustav, toplinski konzum, kogeneracija na biomasu, planiranje proizvodnje toplinske energije

I. UVOD

Prednosti centralizirane toplinske opskrbe potrošača opće su poznate i prihvaćene gdje god je takav način zadovoljenja potreba za toplinom tehnički i ekonomski izvediv [3]. Planiranje toplinske opskrbe uključuje ugradnju kogeneracijskih postrojenja u svojstvu novih, ali i kod zamjene postojećih izvora topline. Kogeneracijsko postrojenje proizvodi električnu i toplinsku energiju podižući pritom ukupnu efikasnost pretvorbe energije goriva u korisne oblike energije. Pogodnosti se ostvaruju korištenjem obnovljivih izvora energije (OIE) u kogeneracijskoj proizvodnji putem viših tarifa cijena proizvedene električne energije u odnosu na onu iz postrojenja koje kao gorivo koriste neki od konvencionalnih izvora. Tehnologija proizvodnje se ne mijenja mnogo, jer su ta goriva u raznim primjenama već dugi niz godina i postoji iskustvo u njegovom korištenju. Primjer je korištenje biomase umjesto konvencionalnih goriva (ugljena, naftnih derivata i plina) u termoenergetskim postrojenjima pri proizvodnji električne energije. Korištenjem OIE se poboljšavaju najvažniji elementi u planiranju energetskih sustava današnjice – sigurnost opskrbe, energetska neovisnost, utjecaj na okoliš,

energetska učinkovitost. Samo korištenje tih izvora nije dovoljno ako se ostali aspekti u energetskom lancu ne poboljšaju. Propisima se potiče učinkovitija opskrba toplinskom energijom iz obnovljivih izvora energije. Jedan od problema koji proizlazi iz propisa je obrađen u ovom radu te je dan prijedlog optimizacije. Za dane toplinske potrebe potrošača koji se toplinom opskrbljuju iz proizvodnje kogeneracijskog postrojenja, varijantno su obrađeni režimi proizvodnje uz postavljeno ograničenje na efikasnost procesa, a uz zahtjev za što većom proizvodnjom električne energije.

II. TOPLINSKA ENERGIJA

Toplinski konzum definiran je dvjema veličinama - toplinskim opterećenjem (snagom) i potrošenom toplinom (energijom) za zadovoljavanje toplinskih potreba nekog potrošača. Toplinska energija je prijelazni oblik energije [1] pomoću koje jedan sustav predaje svoju nakupljenu energiju drugom. Obično se prijenos topline događa između tijela više i niže temperature. U sustavima se nakupljena energija nalazi u obliku unutrašnje kaloričke energije koja se mijenja zajedno s promjenom brzine gibanja molekula, pri čemu se toplina odvodi ili dovodi. Nosioci toplinske energije za većinu primjena su topla odnosno vrela voda te vodena para. Korištenje vode kao prijenosnog medija je rašireno zbog njenih povoljnih karakteristika među kojima je najznačajniji veliki specifični toplinski kapacitet koji omogućuje skladištenje velike količine energije po jedinici obujma, prijenos do mjesta potrošnje i predaju potrošaču uz relativno male gubitke.

A. Vrste potrošača toplinske energije

Toplinska energija se najčešće koristi za zagrijavanje prostora radi postizanja određenih temperaturnih karakteristika pri boravku ljudi u njima i povećanju komfora. Osim toga, koristi se i u širokom spektru tehnologija kao ulaz u nekom dijelu procesa, poput sušara, parionica, praona, glaćaona, za različite primjene kod čišćenja, pripreme hrane itd. Kod korištenja toplinske energije za komforno zagrijavanje prostora, bitna veličina je razlika između temperature vanjskog medija i temperature na koju se promatrani

volumen grij. Prva vrijednost odnosi se najčešće na zrak kao medij i zavisi o klimatskim karakteristikama okoliša grijanog prostora, odnosno općenito temperaturnim karakteristikama ako je riječ o prostoru unutar nekog zatvorenog sustava. Projektna vrijednost vanjske temperature je najniža vanjska temperatura zraka koja se može pojaviti u promatranom periodu. Druga vrijednost, unutarnja temperatura ovisi o potrebama koje su različite za svaki prostor. Primjerice, prostori u kojima ljudi žive grijat će se na drugačiju temperaturu nego prostori namijenjeni za rad ljudi ili neku drugu fizičku aktivnost.

Vršno toplinsko opterećenje važna je veličina za definiranje toplinskog konzuma. To je toplinska snaga koja je potrebna za održavanje željene unutarnje temperature pri uvjetima projektne temperature vanjskog zraka. Energija se predaje u prostor putem trošila koji funkcioniraju kao izmjenjivači topline između prijenosnog medija toplinske energije i okolnog zraka. Bitno je razlikovati instaliranu snagu trošila toplinske energije u nekom sustavu od vršnog toplinskog opterećenja. Te su dvije vrijednosti rijetko istog iznosa, iz više razloga. Projektanti sustava grijanja najčešće radi prelaska na stranu sigurnosti opskrbe predimenzioniraju toplinske sustave dodajući im određenu rezervu izborom ogrjevnih tijela s tipskim snagama većim od izračunatog vršnog toplinskog opterećenja za pojedini prostor. Slična razlika postoji i kod tehnološkog toplinskog konzuma. Kod pojedinog tehnološkog procesa javlja se vršna toplinska snaga potrebna za obavljanje funkcije procesa pri nazivnim parametrima. Ona ovisi o karakteristikama pojedinog tehnološkog procesa i često se razlikuje od instalirane snage izmjenjivača topline koji toplinu dovedenu medijem predaju procesu. Vršno toplinsko opterećenje ovisi i o režimu rada pojedinih elemenata tehnološkog postrojenja te se javlja ovisno i o njihovom međudjelovanju.

B. Izvori toplinske energije

Razmatra se slučaj prijenosa unutrašnje kaloričke energije goriva putem medija različitih karakteristika krajnjim potrošačima. Izgaranjem goriva oslobađa se toplina uz nastanak nusprodukata izgaranja, toplina se predaje prijenosnom mediju koji ju prenosi do izmjenjivača topline gdje se ona predaje potrošaču za korištenje ili pretvorbu u neki drugi oblik energije. Goriva korištена u procesu proizvodnje toplinske energije pripadaju neobnovljivim izvorima, kao što su loživa ulja i prirodni plin te obnovljivim kao što je drvo, geotermalna energija i energija Sunčeva zračenja. U Hrvatskoj prema [2] postoje 24 subjekta registrirana za proizvodnju toplinske energije koji ju proizvode u javnim i industrijskim toplanama i kotlovcima te toplinskim crpkama.

C. Energetska bilanca topline

Kroz vrijeme trajanja toplinskog opterećenja nekog potrošača toplinske energije izmjenjuje se toplinska energija izmijenjena između dvaju sustava. Toplinsko opterećenje može varirati ili biti konstantno u

vremenu. Očitavanjem iznosa u periodičnim jedinicama vremena dobiva se slika o njegovom kretanju u vremenu, a grafički prikaz je dijagram toplinskog opterećenja nekog sustava. Pod pretpostavkom konstantnog toplinskog opterećenja u periodu između očitanja, izračunava se toplinska energija prema sljedećem izrazu:

$$E_q = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot t_i \quad (1)$$

Gdje su:

E_q – Ukupna potrošena energija

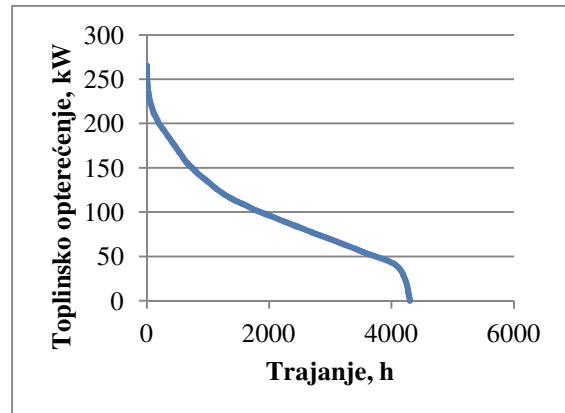
Q_i - Toplinsko opterećenje (snaga) u periodu između očitanja

t_i – period između dva očitanja, period trajanja pojedinog toplinskog opterećenja

N - Broj očitanja

Sortiranjem vrijednosti toplinskog opterećenja po veličini dobiva se sredeni dijagram trajanja toplinskog opterećenja koji prikazuje vrijeme trajanja pojedine snage. Primjer dijagraama trajanja toplinskog opterećenja prikazan je na slici (Sl. 1). Na osi apscisa nalazi se vrijeme u satima, a na osi ordinata iznos snage u kW. Pojedinoj točki krivulje pridruženi su podaci koji pokazuju vrijeme trajanja snage vrijednosti jednakе ili manje od iznosa na osi ordinata. Površina ispod krivulje predstavlja energiju potrošenu u vremenu promatranju.

Sl. 1. Općeniti izgled dijagraama trajanja toplinskog opterećenja



Iznose snaga na osi ordinata moguće je prikazati u relativnom omjeru prema maksimalnom. Najvećoj je snazi pridružena relativna vrijednost 100 %.

III. PROIZVODNJA I POTROŠNJA TOPLINE

D. Kategorije toplinskog konzuma

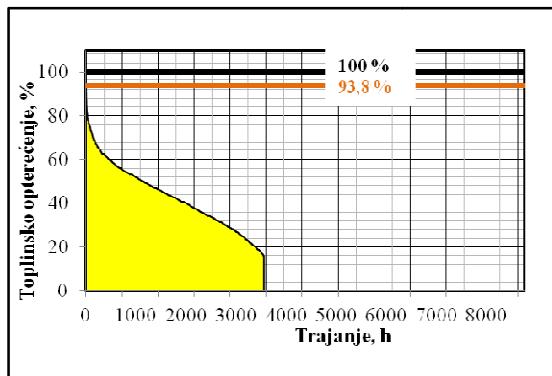
1) Ogrjevni toplinski konzum

Svaki potrošač ima karakterističan izgled krivulje toplinskog opterećenja, a posljedično tome i krivulje trajanja opterećenja.

Krivulju trajanja ogrjevnog toplinskog konzuma u najvećem dijelu određuju vanjski utjecaji kao što su klimatologija, na način koji uvjetuje kretanje toplinskog opterećenja prema zakonitostima iz poglavљa Vrste potrošača toplinske energije. Primjer

dijagrama trajanja opterećenja ogrjevnog toplinskog konzuma dan je na slici (Sl. 2). Snaga je u dijagramu dana u relativnom omjeru prema maksimalnoj, a vrijeme je u satima. Model toplinskog konzuma baziran na klimatološkim podacima u vremenskom rasponu od jedne godine korišten je za konstruiranje krivulje opterećenja prema [4].

Sl. 2.: Dijagram trajanja opterećenja ogrjevnog konzuma [7]



Klimatološki podaci pojedine lokacije su temelj za definiranje toplinskog konzuma lokalnog potrošača. Pod pretpostavkom sličnosti toplinskih potreba potrošača na jednoj lokaciji, moguće je više pojedinačnih potrošača staviti u skupinu i promatrati karakteristike toplinskog konzuma skupine potrošača. Konstruiranje krivulje opterećenja skupine potrošača vrši se zbrajanjem ostvarenih toplinskih snaga pojedinog potrošača u istom periodu trajanja (u ovom slučaju sat). Konačni izgled dijagrama trajanja opterećenja ima iste dijelove koji karakteriziraju pojedinačnog potrošača, stoga se konzum skupine prikazuje dijagramom kao na slici (Sl. 2). Pri tome je vrijednost maksimalne snage prikazane sa 93,8 % zbroj vrijednosti pojedinačnih maksimalnih snaga potrošača pri uvjetima najniže vanjske temperature zraka koja se pojavila u godini čiji se klimatološki podaci koriste. Vrijednost punog iznosa opterećenja svih potrošača (100 %) bi bila ostvarena da je u toj godini temperatura u razdoblju grijanja postigla projektnu vrijednost. Karakteristike većine dijagrama trajanja opterećenja ogrjevnog konzuma za prostore umjerene klime kakvu ima unutrašnjost Hrvatske je relativno kratko vrijeme trajanja vršne snage, dugi period u kojem snaga pada s malim nagibom krivulje i strmi propad prema nuli pri kraju. Vrijeme trajanja grijanja je značajka također ovisna o klimatskim karakteristikama promatranog prostora. Te karakteristike su važne pri planiranju proizvodnje topline za zadovoljavanje potreba tih potrošača – pokrivanje dijagrafma trajanja opterećenja.

Tehničke karakteristike centralizirane toplinske opskrbe potrošača u slučaju grijanja suproizvodnja topline izgaranjem pogonskog goriva u jednom centralnom izvoru prijenos medijem do mjesta potrošnje, ogrjevnih tijela smještenih u prostorima koje se grijaju. Namjena izvora može biti za zagrijavanje samo jednog stambenog prostora (etažno grijanje) ili

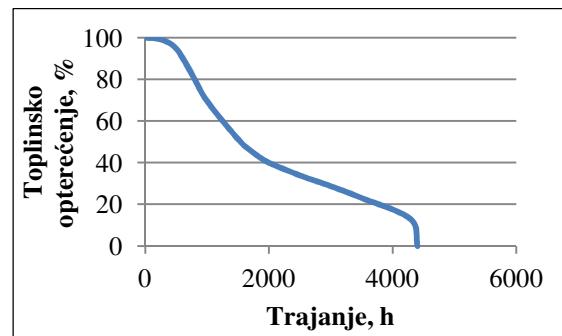
jedan izvor može služiti za opskrbu toplinom jedne zgrade, skupa zgrada, naselja, čak i dijelova gradova, pri čemu je riječ o tzv. centraliziranim toplinskim sustavima. Ti su sustavi dobro rješenje kada kod potrošača postoje sustavi grijanja sličnih tehničkih svojstava koji omogućuju prihvatanje medija prijenosnika topline i korištenje topline iz medija za obavljanje osnovne funkcije - zagrijavanje prostora. Prijenosni medij u većini slučajeva je voda temperature polaza od izvora prema potrošaču 80 ili 90 °C i temperature povrata prema izvoru 60, odnosno 70 °C [5].

2) Tehnološki toplinski konzum

Tehnološki konzum predstavlja mnogo šire područje potreba za toplinskom energijom, kako prema osnovnim elementima toplinskog konzuma, tako i prema tehničkim i tehnološkim karakteristikama njegovog zadovoljavanja. Tehnologije koje u nekom dijelu svoga procesa koriste toplinsku energiju, upotrebljavaju je na različit način i sa drugim ciljem. Rezultat je raznolikost oblika dijagrafma opterećenja i potreba za prijenosnim medijem.

Slika (Sl. 3) prikazuje dijagram trajanja opterećenja tehnološkog potrošača topline sušare. Podaci o konzumu tehnoloških potrošača topline dobivaju se iz tehničkih specifikacija proizvođača opreme, osoblja iz pogona, pogonskog dnevnika, izravnim mjerjenjem, prema karakteristikama procesa i sl. [6]

Sl. 3.: Dijagram trajanja toplinskog opterećenja tehnološkog potrošača sušare [6]



Zadovoljavanje potreba tehnoloških potrošača topline sa tehničke strane opskrbe daleko je zahtjevnije radi zahtjeva na parametre medija kojime se potrošač opskrbljuje toplinom te samog režima opskrbe koji ovisi u prvom redu o značajkama tehnološkog procesa i njegovim režimima rada. Vrste radnog medija mogu biti različite vrste tekućina ili plinova. Primjena vode kao radnog medija u ovom slučaju obuhvaća prijenos topline u obliku tople ili vrele vode, a u velikom broju slučajeva i vodene pare. Primjena vodene pare kao prijenosnog medija topline uključuje njenu upotrebu pod različitim tlakovima i temperaturama, ovisno o potrebama tehnološkog procesa, često i pare različitih parametara za različite dijelove procesa. U slučaju da se toplinski konzum više tehnoloških potrošača pokriva iz centralnog izvora, bitno je da prijenosni medij odgovara svim potrošačima na način omogućava predaju topline svim

dijelovima tehnološkog procesa, u skladu s tehničkim karakteristikama sustava potrošnje topline.

3) Dijagram trajanja ukupnog toplinskog konzuma

Kombiniranjem toplinskog konzuma za ogrjev i tehnologiju dobiva se osnova za konstruiranje zajedničkog, ukupnog sredenog dijagrama opterećenja toplinskog konzuma. Vrijednosti opterećenja obaju konzuma u istim periodima promatranja se zbrajaju i nastaje krivulja ukupnog opterećenja, a iz sortiranih vrijednosti s te krivulje i sredeni dijagram trajanja.

E. Pokrivanje toplinskog konzuma

Jedna od prednosti prikaza konzuma dijagramom trajanja opterećenja je mogućnost raspoređivanja proizvodnje izvora za pokrivanje konzuma. Ukupni konzum se pokriva sa jednim ili više izvora, ovisno o tehničkim mogućnostima proizvodnje izvora i ekonomskom karakteristikama svakog od načina opskrbe toplinom. Ponekad je puno opterećenje moguće zadovoljiti jednim izvorom, a on tada mora imati mogućnost mijenjanja učina u cijelom rasponu vrijednosti opterećenja. Kada izvor ne može isporučiti potrebnu snagu, uz njega se ugrađuje vršni izvor.

Uloga vršnih izvora pri pokrivanju dijagrama opterećenja određena je karakterističnim izgledom dijagrama trajanja opterećenja. Vrh krivulje je obično vrlo strm, posebno kod ogrjevnog konzuma [7], što u praksi predstavlja potrebu za velikom snagom, ali malog trajanja. Rezultat je mala ukupnom energijom u odnosu na ostatak vremena trajanja opterećenja tog potrošača. U energetskom i ekonomskom smislu to znači da je moguće ugraditi vršni izvor manje početne cijene koji koristi skuplje gorivo da se toplinska opskrba nekog potrošača pokaže ekonomski prihvatljiva prema pokazateljima tehnoekonomske analize.

Danas se često primjenjuje suproizvodnja (kogeneracija) električne i toplinske energije pri opskrbi toplinom velikog konzuma. Učinkovitost procesa proizvodnje toplinske energije se poveća ako se pritom proizvodi i električna energija, čime se efikasnije iskorištavaju resursi (gorivo), a posljedica čega je prije svega smanjen utjecaj na okoliš. Obnovljivi izvori energije predstavljaju veliki potencijal pri kombiniranoj proizvodnji električne i toplinske energije. Prednosti se u prvom redu sastoje u načelnom smanjenju utjecaja na okoliš kod njihovog korištenja. Izvor koji se koristi u kogeneracijama je prvenstveno biomasa. Kao gorivo se, među ostalim iskorištavaju šumski ostatak te otpad i ostaci iz proizvodnog procesa pogona kao što su pilane, poljoprivredna gospodarstva i sl. [7],[8],[9].

Tehnologije kogeneracije na biomasu koje se najčešće sreću u praksi su klasično parnoturbinsko postrojenje, postrojenje na temelju ORC ciklusa i postrojenje na temelju plinskog motora [9]. Klasična parnoturbinska kogeneracija sastoji se od kotla u čijem ložištu izgara biomasa i zagrijava paru čija se kinetička energija pretvara u mehaničku energiju vrtnje turbine koja je spojena na zajedničko vratilo s

generatorom. Potrebe toplinskog konzuma zadovoljavaju se oduzimanjem pare određenih parametara i distribucijom do potrošača. Druga najčešća tehnologija je ORC (organski Rankineov ciklus), gdje termičko ulje zagrijano izgaranjem goriva svoju toplinu predaje radnom mediju niže točke vrelišta od vode koji zatim obavlja rad na turbini. Toplina za zadovoljavanje potreba potrošača se dovodi najčešće u obliku tople vode zagrijane u izmjenjivaču topline od radnog medija u ORC ciklusu. Gorivo za tehnologiju proizvodnje energije u postrojenju na temelju plinskog motora je plin dobiven isplinjavanjem biomase koji se zatim upotrebljava u klasičnom Otto motoru obavljajući rad i pokrećući generator. Hlađenjem motora toplina se predaje mediju koji služi kao prijenosnik topline za zadovoljavanje potreba potrošača. Iz pregleda tehnologije vidljivo je da je parnom kogeneracijom moguće opskrbiti, među ostalima i parne potrošače, dok toplinu iz ostala dva procesa proizvodnje potrošači moraju preuzeti iz tople vode. Ovo se ograničenje uzima u obzir pri planiranju toplinske opskrbe analiziranih potrošača u dijelu veličine toplinskog konzuma kojeg je moguće pokriti prozvodnjom iz kogeneracije.

F. Proizvodnja iz kogeneracijskih postrojenja

Osim navedene prednosti za okoliš koja se ostvaruje korištenjem obnovljivih izvora energije, potrebno je napomenuti i ekonomske koristi. Na tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj, proizvodnja iz OIE je poticana posebnim tarifama. Sličan način poticanja proizvodnje toplinske energije za zajedničku opskrbu potrošača toplinom još ne postoji. Pred ulagače tehnologiju kogeneracije je zato postavljen zahtjev za proizvodnjom čim veće količine električne energije kako bi ostvarili svoj krajnji cilj, maksimizaciju profita. Ograničenje u tom pogledu predstavlja novi Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (NN br. 63/2012) u kojem se uvedi uvjet minimalne ukupne godišnje učinkovitosti postrojenja od 50 % u pretvorbi primarne energije goriva u isporučenu električnu energiju i proizvedenu korisnu toplinu [10]. Ako se ne ostvari taj uvjet, proizvođač nema pravo prodaje električne energije po povlaštenoj tarifi. Tako s jedne strane treba što više energije proizvesti, a s druge strane se javlja ograničenje na proizvodnju. Zato je proizvodnju toplinske energije potrebno optimirati prema postavljenom uvjetu, kako bi proizvođač bio povlašten po definiciji iz tarifnog sustava. Rješenje je dano u poglavljju koje slijedi. Krajnji rezultat treba definirati odnos proizvedene topline i potrošene za korisne primjene kao posljedicu prilagodbe uvjetu problemskog zadatka. Dodatno se javlja utjecaj na proizvodnju električne energije te je kroz rješenje dan prikaz njenog kretanja nakon izvršene korekcije prema uvjetu. Smanjenje proizvodnje električne energije smanjuje ukupan prihod proizvođača, ali mu sustav otkupa po

povlaštenoj cijeni ekonomski donosi veće koristi nego da ju mora prodavati po normalnoj tržišnoj.

IV. OPTIMIRANJE ODNOSA PROIZVODNJE U KOGENERACIJI I POTROŠNJE TOPLINE

Proizvodnja u kogeneracijskom procesu ima općenito za cilj plasirati proizvedenu električnu energiju u sustav i opskrbiti toplinski konzum spojen na mrežu u kojoj je ona izvor ili jedan od nekoliko izvora. Prioriteti pri proizvodnji koji utječu na režim rada ovise o nekoliko faktora. Prvenstveno tu je tehnologija proizvodnje električne i toplinske energije sa vlastitim ograničenjima u udjelima pojedine vrste u ukupnoj energiji, a s druge strane postoje vanjski ograničavajući faktori zbog kojih će neki režim rada biti više ili manje preferiran. Njihova priroda je potaknuta ekonomskim razlozima, zahtjevima korisnika ili drugog vanjskog tehnološkog potrošača koji se oslanja na proizvodnju iz kogeneracije. U ovom slučaju ograničenje se veže uz uvjet iz [10] o minimalnom godišnjem stupnju učinkovitosti proizvodnje kogeneracije. Vrši se planiranje proizvodnje toplinske energije za pokrivanje definiranih potreba potrošača topline sa korekcijama prema uvjetu, uz maksimalnu moguću proizvodnju električne energije. Značaj te veličine određen je u poglavljiju Proizvodnja iz kogeneracijskih postrojenja.

G. Proizvodnja toplinske energije

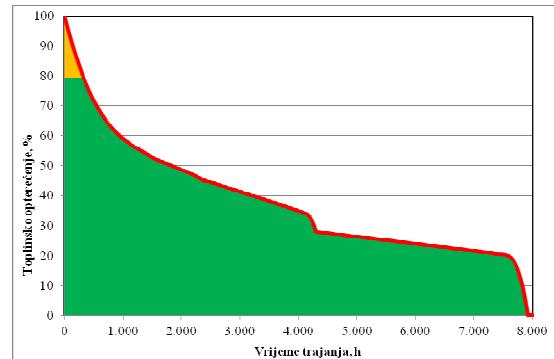
Iskorištavanje proizvedene toplinske energije iz kogeneracije za pokrivanje cijelog ili samo dijela toplinskog konzuma može se ostvariti na više načina. Osim proizvodnje točno onoliko topline koliko je potrebno za zadovoljenje konzuma, postoje slučajevi kada se neiskorišten višak proizvedene topline izbacuje u zrak, najčešće preko kondenzatora izvedenih u obliku rashladnih tornjeva. Optimizacijski problem iz prethodnog poglavlja Proizvodnja iz kogeneracijskih postrojenja analiziran je u tri varijante pokrivanja toplinskog konzuma:

- Proizvodnja prema toplinskom dijagramu
- Maksimalna proizvodnja električne energije
- Ostvarenje minimalne propisane učinkovitosti procesa proizvodnje električne i toplinske energije

Prva varijanta je opisana dijagmom trajanja opterećenja na slici (Sl. 4). Pri proizvodnji toplinske energije se opterećenje postrojenja mijenja prema dijagramu prateći krivulu opterećenja toplinskog konzuma koja je na dijagramu označena crvenom bojom. Proizvodnja električne energije također prati krivulu toplinskog opterećenja. Ograničenja pri proizvodnji se javljaju u vršnom dijelu dijagrama gdje kogeneracijsko postrojenje nije u mogućnosti dati veću snagu i za koje vrijeme se dodatno uključuje vršni izvor (jedan ili više njih). Na dijagramu je toplinska energija predana iz kogeneracijskog postrojenja označena zelenom, a iz vršnog izvora narančastom bojom. Zbog činjenice da se gotovo sva

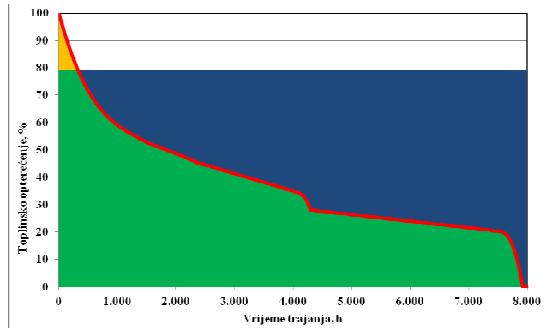
proizvedena toplinska energija preda potrošačima, uz gubitke u proizvodnji i prijenosu, u ovom režimu rada se ostvaruje najveći ukupni stupanj učinkovitosti procesa proizvodnje. Striktno gledajući uvjet o učinkovitosti iz problemskog zadatka, ova varijanta ga zadovoljava. Nema odbačene topline, stoga nije potrebna izgradnja kondenzatora koji bi je preuzeo.

Sl. 4.: Pokrivanje toplinskog dijagrama – Proizvodnja toplinske energije iz kogeneracijskog postrojenja prema opterećenju konzuma [11]



Drugi karakteristični režim rada prikazan je na slici (Sl. 5). Režim maksimalne proizvodnje električne energije u obzir se uzima radi tržišnih uvjeta poticanja proizvodnje električne energije iz kogeneracije na obnovljive izvore energije. U slučaju da nema drugih ograničenja na proizvodnju toplinske energije, ekonomski je najpovoljnija konstantna proizvodnja električne energije s maksimalnim kapacitetom kroz cijelo razdoblje promatranja. Tako se ostvaruje najveći prihod. Pošto su proizvodnja toplinske i električne energije povezane, slijedi da postrojenje čitavo to vrijeme proizvodi i toplinsku energiju maksimalnim kapacitetom. U tom se slučaju pokrivanjem toplinskog dijagrama može iskoristiti dio topline na dijagramu označen zelenom bojom, dok se dio označen plavom bacu u okolinu preko kondenzatora. Maksimalizacija proizvodnje električne energije je ostvarena, ali ova varijanta ne zadovoljava uvjet o ukupnoj učinkovitosti dan u poglavljiju Proizvodnja iz kogeneracijskih postrojenja.

Sl. 5.: Pokrivanje toplinskog dijagrama – Maksimalna proizvodnja električne energije [11]



Pošto gore navedena rješenja samo djelomično ispunjavaju postavljene uvjete, optimiranjem je potrebno naći novi režim rada koji predstavlja rješenje

problema u punom opsegu. Slijede opisi režima rada u kojima se ostvaruje proizvodnja i potrošnja energije uz koju će biti zadovoljeni postavljeni uvjeti [11].

Takva varijanta proizvodnje toplinske energije za pokrivanje toplinskog konzuma kombinira značajke prethodne dvije te bazira proizvodnju toplinske energije dijelom u ovisnosti o toplinskim potrebama potrošača. Drugi dio vremena radi snagom većom od snage toplinskog konzuma, pa se višak energije predaje u okolinu. Tako se ostvaruje veća proizvodnja električne energije što je ispunjenje jednog od uvjeta zadatka. Koliko će se energije iskorištavati samo za pokrivanje toplinskog konzuma, a koliko bacati, ovisi o uvjetu minimalnog godišnjeg stupnja efikasnosti postrojenja. Proizvedena i potrošena energija se može opisati sljedećim jednadžbama:

$$E_{p_uk} = \sum_{i=1}^n (P_{p,i} + Q_{p,i}) \cdot t_i \quad (2)$$

$$E_{k_uk} = \sum_{i=1}^n Q_{k,i} \cdot t_i \quad (3)$$

$$E_{p_uk} = \eta_{uk} \cdot E_{k_uk} \quad (4)$$

$$\text{Uvjet: } \eta_{uk} \geq \eta_{min} \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n Q_{k,i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n (P_{p,i} + Q_{p,i}) \cdot t_i} \geq \eta_{min} \quad (6)$$

Gdje su:

E_{p_uk} , E_{k_uk} - ukupna proizvedena, odnosno potrošena energija

n – Broj perioda promatranja u godini

$P_{p,i}$ – Snaga proizvodnje električne energije u i-tom periodu promatranja

$Q_{p,i}$ – Snaga proizvodnje toplinske energije u i-tom periodu promatranja

$Q_{k,i}$ – Snaga konzuma toplinske energije u i-tom periodu promatranja

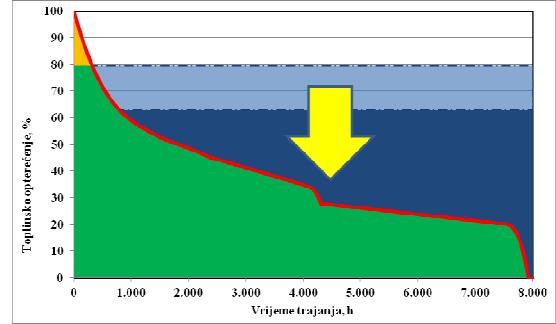
t_i – trajanje perioda promatranja

η_{uk} , η_{min} – Ukupan i minimalni ukupan godišnji stupanj efikasnosti cjelokupnog kogeneracijskog procesa koji uključuje proizvodnju i potrošnju energije, pretvorbu unutrašnje kaloričke energije goriva u toplinu i električnu energiju te gubitke pri distribuciji toplinske energije.

Vidljivo je iz (6) da se povećanje stupnja efikasnosti kogeneracijskog procesa može ostvariti utjecajem na dvije varijable, ukupnu proizvedenu toplinsku i električnu energiju i potrošenu ili iskorištenu toplinsku energiju. Smanjenje ukupne proizvodnje kogeneracije uz konstantni toplinski konzum sa strane potrošača prikazano je na dijagramu na slici (Sl. 6). Uklapanje u dijagram trajanja opterećenja izvedeno je tako da proizvodnja opterećenjem prati dio opterećenja konzuma do jedne točke od koje je proizvedena energija u postrojenju konstantna, a energija koja nastaje razlika između snage konzuma i proizvodnje se predaje u zrak pomoću kondenzatora. Snaga na kojoj prestaje praćenje krivulje opterećenja toplinskog konzuma izravno, prema (4 i 5), slijedi iz zadanog uvjeta minimalnog iznosa stupnja efikasnosti procesa. Gledajući dijagram, moguće je uočiti da se smanjuje

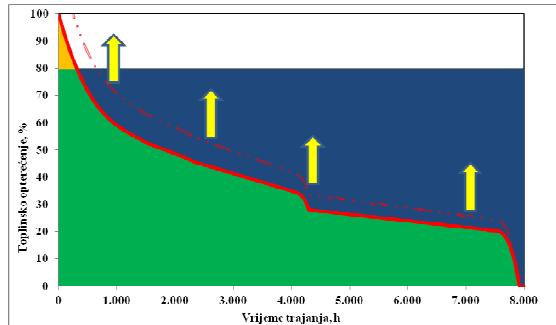
ukupna energija predana okolini pomoću kondenzatora, a posljedično dolazi do porasta stupnja efikasnosti.

Sl. 6.: Postizanje minimalnog stupnja djelovanja kogeneracijskog postrojenja smanjenjem proizvodnje



Ako se primjenjuje utjecaj na potrošnju toplinske energije, onda je za postizanje minimalnog stupnja efikasnosti potrebno povećati potrošenu, odnosno iskorištenu toplinsku energiju kod potrošača. Na dijagramu prikazanom na slici (Sl. 7) to je ostvareno podizanjem krivulje trajanja opterećenja za određeni iznos. Iz (6) slijedi iznos za koji je potrebno povećati opterećenje toplinskog konzuma da bi bio zadovoljen uvjet minimalnog iznosa stupnja efikasnosti procesa. Tehnička izvedba ove mjere je npr. dodavanje novih potrošača toplinske energije u toplinski sustav čime se povećava ukupni konzum. Pri tehnico-ekonomskoj analizi proizvodnje i potrošnje topline daje se prijedlog daljnog razvoja dodavanjem tehnološkog konzuma u obliku procesa koji troše toplinu (peletarnice, sušare i sl.). Bilanca energije nakon dodavanja izgleda kao na dijagramu, potrošačima se predaje više topline nego prije, što se pokriva sa energijom koja bi se inače predala u okolinu. Rezultat je povećanje iskorištene topline na račun odbačene i posljedično povećanje ukupnog stupnja efikasnosti procesa.

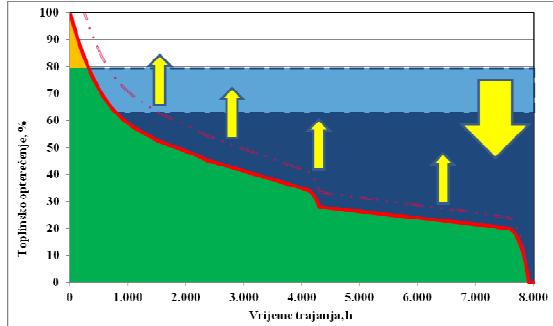
Sl. 7.: Postizanje minimalnog stupnja djelovanja kogeneracijskog postrojenja povećanjem konzuma



Kombinacijom prethodnih režima rada također se postiže ostvarenje uvjeta za pokrivanje konzuma proizvodnjom iz kogeneracije. U smislu izraza (6), istovremeno se smanjuje proizvodnja i podiže ukupno opterećenje kod toplinskog konzuma, što prikazuje slika Sl. 8. Tehnički se mjeru povećanja učinkovitosti ostvaruje dodavanjem toplinskog konzuma u obliku

tehnološkog potrošača u kombinaciji sa smanjivanjem proizvodnje (praćenja krivulje opterećenja) u dijelu dijagrama trajanja toplinskog opterećenja kao na primjeru (vidi sliku Sl. 6).

Sl.8.: Postizanje minimalnog stupnja djelovanja kogeneracijskog postrojenja istodobnim smanjenjem proizvodnje i povećanjem konzuma



Ova varijanta se može postaviti kao optimizacijski problem s parametrima: povećanje opterećenja na krivulji u toplinskem dijagramu, ostvareno priključenjem dodatnog tehnološkog konzuma, ograničenja u obliku zahtjeva pojedinog režima rada potrošača topline ili samog kogeneracijskog postrojenja itd. Proizvodnja električne energije je opet pritom veličina koja treba ostvariti što veći iznos.

4) Primjena na slučaju iz prakse

Mogućnost izgradnje kogeneracijskog postrojenja za proizvođača u drvnoj industriji je analizirana u radu [11]. Izračunat je ukupan konzum za sve potrebe koji je moguće zadovoljiti iz kogeneracijskog postrojenja na temelju ORC ciklusa električne snage 1 MW. Konzum je prikazan u tablici (Tab. 1).

Tab. 1.: TOPLINSKI KONZUM POTROŠAČA IZ [11]

Toplinski konzum	Toplinska snaga (MW)	Toplinska energija (MWh/god)
Grijanje prostorija	2,00	3.300
Sušenje drveta	1,30	5.080
Nova sušara sječke	1,85	7.207
Ukupno	5,15	15.587

Maksimalna toplinska snaga koju daje izvor iznosi 4,095 MW te dio opterećenja konzuma preuzima vršni izvor. Primjenom režima rada u kojem se postiže minimalan stupanj efikasnosti kogeneracijskog procesa proizlazi da postrojenje treba proizvodnjom pratiti opterećenje konzuma dok se ne smanji ispod vrijednosti 3,245 MW, nakon čega može nastaviti tom razinom proizvodnje, odbacujući višak topline. Takvim režimom proizvodnje ostvaruje se godišnji stupanj efikasnosti od 55 %, odabran radi prelaska na stranu sigurnosti. Postizanje uvjeta porastom konzuma vrši se podizanjem vrijednosti varijable $Q_{k,i}$ u izrazu (3) dok se ne ostvari minimum za ostvarenje uvjeta danog izrazom (6). No to u razmatranom slučaju nije

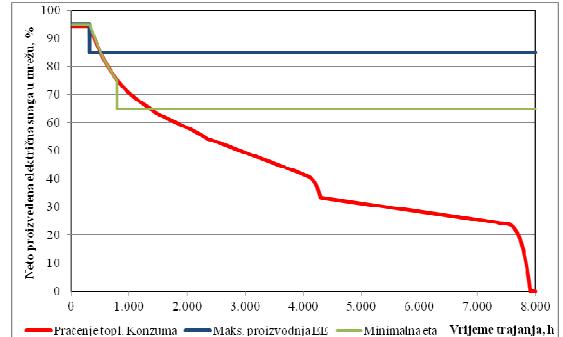
analizirano zbog utjecaja povećanja konzuma na ostale parametre analize.

Problem optimiranja baziran na trećem slučaju proizvodnje prema zadanim uvjetima treba u smislu predmetne analize rješavati uključivanjem drugih dijelova analize u korake optimizacije. Prvenstveno to su promjene ekonomskih pokazatelja pri smanjenju proizvodnje kada se prati opterećenje toplinskog konzuma te pri dodavanju snage novog konzuma. Neki od ekonomskih pokazatelja koji se mijenjaju su gubici nastali smanjenjem proizvodnje električne energije i troškovi dodavanja konzuma proširivanjem ili izgradnjom novih jedinica potrošača. Cilj je doći do ostvarenja osnovnog uvjeta uz najpovoljniju kombinaciju režima rada. Optimizacija se radi promatranjem ekonomskih parametara kod kombiniranja načina ostvarivanja osnovnog uvjeta i nalaženjem točke optimuma. Primjerice, moguće je prilikom utjecaja na proizvodnju i konzum u smislu izraza (6) i uzimajući u obzir par pokazatelja trošak goriva-cijena električne energije i marginalni trošak dodavanja jedinice snage toplinskog konzuma naći točku gdje je glavni pokazatelj isplativosti (NPV ili IRR) optimalan. Rezultat ovisi o osjetljivosti pokazatelja na promjenu odabranih parametara.

H. Proizvodnja električne energije

U prethodnom potpoglavlju pod nazivom Proizvodnja toplinske energije obrađeni su režimi proizvodnje toplinske energije pri različitim varijantama zadovoljavanja toplinskog konzuma potrošača koji koriste toplinu iz kogeneracijskog postrojenja. Proizvedena električna energija se plasira u elektroenergetski sustav. Od ukupne bruto proizvedene električne energije na stezalkama generatora, dio se oduzima za vlastitu potrošnju, a ostatak se na pragu elektrane predaje u mrežu. Vlastita potrošnja je potrošnja koja je izravno vezana za sami proces proizvodnje električne energije. Bitna napomena za promatrani slučaj je da i potrošnja energije za pumpanje rashladne vode u kondenzatoru predstavlja vlastitu potrošnju [11]. Krivulje trajanja snaga neto proizvodnje kogeneracijskog postrojenja dane su na slici (Sl. 9) za sve varijante rada postrojenja zajedno.

Sl. 9.: Proizvodnja električne energije za tri režima rada kogeneracijskog postrojenja



Pri proizvodnji prema krivulji opterećenja toplinskog konzuma električna snaga na pragu elektrane označena crvenom bojom prati krivulju. Kako nema topline koja se baca u okolinu, nije potreban rad kondenzatora, stoga u vlastitu potrošnju se ne ubraja pumpanje rashladne vode.

Maksimalna proizvodnja toplinske energije prepostavlja konstantan rad maksimalnom snagom cijele godine. Višak pritom proizvedene topline koji se ne iskoristi za zadovoljavanje toplinskog konzuma mora se odvesti u okolinu pomoću kondenzatora. Krivulja označena plavom bojom ima nagli propad zbog vlastite potrošnje koja se u jednom trenutku povećava za iznos snage pumpanja rashladne vode u kondenzatoru smanjujući pritom snagu koju postrojenje plasira u mrežu. Kondenzator u ovom slučaju nije u pogonu cijelu godinu jer dio toplinskog konzuma ima veće ili jednakopterećenje od proizvedene topline u postrojenju i ona se tada može u potpunosti iskoristiti.

Zelenom bojom je označena proizvodnja električne energije kada je cilj postizanje minimalnog propisanog stupnja efikasnosti kogeneracijskog postrojenja na način da se smanjuje snaga proizvodnje u dijagramu trajanja opterećenja do snage s kojom je dalje moguće raditi, a da ukupni uvjet bude zadovoljen (slučaj opisan dijagramom na slici Sl. 6). Dio topline se baca u okolinu, što za sobom povlači potrebu vlastite potrošnje električne energije za rad kondenzatora.

Ukupna proizvedena električna energija je najveća u slučaju režima maksimalne proizvodnje električne energije, slijedi režim s uvjetom minimalnog godišnjeg stupnja efikasnosti pa režim proizvodnje prema krivulji opterećenja toplinskog konzuma.

V. ZAKLJUČAK

Analizom potreba za toplinskom energijom potrošača stvara se osnova za proces planiranja njene opskrbe. Analitički prikaz toplinskog konzuma korišten u ovom radu je sređeni dijagram trajanja opterećenja. Na temelju njega se prikazuje kretanje opterećenja svih promatranih potrošača i planiraju kapaciteti za njihovu opskrbu toplinom.

U radu je dan pregled mogućnosti pokrivanja dijagrama trajanja opterećenja toplinskog konzuma, sa strane tehnoloških i tehničkih ograničenja i kompatibilnosti proizvodnog postrojenja i potrošačkih potreba. Sa strane energetske bilance vrši se uklapanje izvora u dijagram trajanja opterećenja i analiziraju potrebe za angažiranjem dodatnih izvora.

Poticanje proizvodnje iz obnovljivih izvora predmet je politike energetskog planiranja koja radi razumnog korištenja resursa pred proizvođače stavlja uvjete. Jedan od takvih je i minimalna godišnja učinkovitost pri proizvodnji električne i toplinske energije iz kogeneracijskih postrojenja na obnovljive izvore energije. Provedena je optimizacija za problem proizvodnje toplinske energije za pokrivanje danog konzuma. Zbog utjecaja promjene proizvodnje toplinske na proizvodnju električne energije koju treba

maksimizirati, optimizacija daje varijante rješenja kojima se ispunjava postavljeni uvjet. Iz posljednjeg predloženog slučaja koji se temelji na kombinaciji dviju varijanti rješenja problema postavlja se novi optimizacijski problem. Rješavanjem tog problema unaprijeđuje se proces planiranja i donošenja odluka o ispunjenju uvjeta o minimalnoj učinkovitosti.

LITERATURA

- [1] Udovičić, B., Elektroenergetski sustav, knjiga, Kigen Zagreb, 2005.
- [2] Vuk, B., Energija u Hrvatskoj 2010 – godišnji energetski pregled, publikacija, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske, 2011.
- [3] Mužek, Z., Jelavić, V., Slavica, Ž. Et al., *Strategija razvoja sektora toplinarstva u Republici Hrvatskoj, faza 2/3*, knjiga, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske, 2008.
- [4] Komerički, Z., Abrashi, A., Džodan, J., et al. *Studija izvodljivosti centralizirane opskrbe toplinskom energijom iz biomase Grada Otočca*, EKONERG, Zagreb, 2012.
- [5] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E. *Grijanje i klimatizacija*, knjiga, Interklima, Vrnjačka Banja, 2004.
- [6] Komerički, Z., Abrashi, A., Džodan, J. *Studija izvodljivosti izgradnje kogeneracijskog postrojenja na biomasu, električne snage 1 MW*, EKONERG, Zagreb, 2012.
- [7] Vidak, D., Džodan, J., Hecer, D., Abrashi, A. *Analiza konzuma toplinske energije grada Pazina i izbor ogrjevnog medija*, EKONERG, Zagreb, 2012.
- [8] Komerički, Z., Abrashi, A., Džodan, *Studija izvodljivosti centralizirane opskrbe toplinskom energijom iz biomase naselja Sunja*, EKONERG, Zagreb, 2011.
- [9] Komerički, Z., Hecer, D., Džodan, J. *Studija izvodljivosti izbora najpovoljnijeg tehničko-tehnološkog rješenja kogeneracijskog postrojenja za tvrtku PANA d.o.o. lokacija Turopolje*, EKONERG, Zagreb, 2011.
- [10] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, podzakonski akt, Narodne novine, Zagreb, 2012.
- [11] Hecer, D., Džodan, J., *Analiza opravdanosti izgradnje kogeneracijskog postrojenja i priključka na elektroenergetsku mrežu s tehno-ekonomskim podacima i podacima prostornog uredenja*, EKONERG, Zagreb, 2012.