

# TRIGENERACIJA U URBANIM SREDINAMA

*V. Ivanović, D. Ivanović<sup>1</sup>*

## SAŽETAK:

Trigeneracija može biti opisana kao proces istovremene proizvodnje tri različita vida energije: električne, toplotne i rashladne.

Trigeneracija povećava stepen korisnosti i ekonomičnosti postrojenja koja rade u kogeneracionim ciklusima, uz naravno smanjenje emisije i troškova proizvodnje u poređenju sa nezavisnim sistemima.

Izgradnja trigeneracionih sistema zahteva znatno preciznija razmatranja i analize, i u poređenju sa kogeneracionim sistemima, ali je to način da se energija fosilnih goriva iskoristi do maksimuma.

U radu je dat prikaz moguće primene sa osvrtom na naše uslove.

Ključne reči: *trigeneracija, kogeneracija, urbane sredine*

## 1. UVOD

Potrošnja energije, koja je rasla uporedo sa porastom broja stanovnika, rezultirala je brzim trošenjem raspoloživih energetske izvora i povećanjem uticaja zagađivača nastalih sagorevanjem. Uzimajući u obzir i sadašnje cene goriva, tehnologije koje se bave energetske efikasnošću dobijaju na sve većem značaju. Pred projektantima i inženjerima je stalan zadatak da pronađu ekonomično i ekološki pogodno rešenje.

Oduvek je u raznim industrijskim procesima postojala istovremeno potreba za električnom energijom i grejanjem i/ili hlađenjem. U savremenim urbanim celinama danas postoji sve više objekata, zgrada ili skupina zgrada koje iskazuju potrebu za primenom svih ovih vidova energije.

Pri planiranju potreba za energijom neophodno je u što većoj meri iskoristiti primarnu energiju pogonskog goriva i proizvesti maksimalne količine toplot-

---

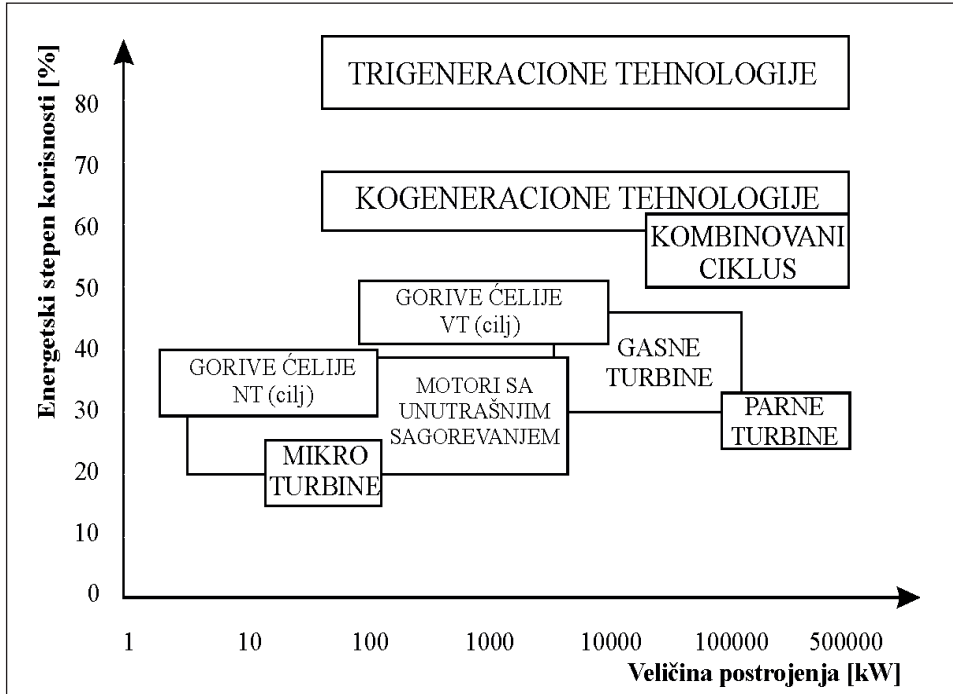
<sup>1</sup> Prof. dr Vladan Ivanović, prof. dr Dečan Ivanović, Mašinski fakultet Podgorica, Cetnjski put bb.

ne, rashladne i električne energije. Efikasnost istovremene proizvodnje toplotne i električne energije, lako se poboljšava dodatnim uključivanjem apsorpcionih rashladnih mašina. Na taj način se dobija trigeneracija, odnosno kombinovana proizvodnja toplotne, električne i rashladne energije istovremeno.

U zgrade pogodne za primenu trigeneracije spadaju hoteli, bolnice, škole i fakulteti, supermarketi i mnogi industrijski objekti u kojima je istovremeno potrebna električna energija uz velike količine toplotne i/ili rashladne energije u vidu pare ili vode.

U današnje vreme povećanje cena goriva i ekoloških implikacija proizvodnje ovih vidova energije na okolinu zahtevaju sve bolje tehnologije koje mogu iskoristiti maksimum iz primarnih fosilnih goriva i istovremeno garantovati integrisanu proizvodnju potrebnih energija. Ovo se podrazumeva za projektovanje novih proizvodnih postrojenja i instalacija, ali i za rekonstrukciju i modernizaciju postojećih.

Trigeneracija, kao što se vidi na slici 1, predstavlja efikasan metod za maksimalnu proizvodnju svih vidova energije koja pogoduje kako korisnicima, kroz smanjenje ukupne potrošnje pogonskih energenata, tako i okolini, kroz smanjenje ukupne emisije polutanata.



Slika 1. Poređenje efikasnosti savremenih tehnologija [1]

## 2. KONCEPT

Primarni motor uvek proizvodi električnu i toplotnu energiju. Toplotna energija se može iskoristiti za potrebe grejanja, hlađenja, odvlaživanja ili kao procesna toplota.

Kao energenti za trigeneraciona postrojenja mogu da posluže fosilna goriva (nafta, gas, ugalj) ili pak obnovljivi izvori (biomasa, vetar, sunce), za koje je važno znati cenu, raspoloživost, kao i odgovarajuće emisije polutanata. U zavisnosti od goriva, kao primarni motor u trigeneracionom postrojenju mogu da se nađu trenutno raspoložive tehnologije: parna turbina, gasna turbina, kombinovani ciklusi ili klipni motori (tabela 1). U budućnosti se očekuje znatno veća primena gorivih ćelija, Stirlingove mašine i mikro-turbina.

Za snabdevanje dodatnom toplotnom energijom na raspolaganju postoje kotlovska postrojenja i gorionici, a za snabdevanje rashladnom energijom apsorpcioni, adsorpcioni i kompresioni rashladni uređaji.

U urbanim sredinama klipni motori imaju određene prednosti u vidu visoke efikasnosti proizvodnje električne energije, dobrog odnosa električna energija/toplota, niske cene, dugog radnog veka, lakog prilagođavanja promenljivim zahtevima, kao i lakog uklapanja u raspoloživi prostor.

Tabela 1. Karakteristike trigeneracionih sistema [2]

Primarni pogon	Vrsta goriva	Opseg [MWe]	Odnos topl: el. en.	$\eta_{el}$ [%]	$\Sigma\eta$ [%]	Kvalitet toplote
kondenzaciona parna turbina	sva	1 – 100 +	3: 1 – 8: 1	10 – 20	do 80	para visokog pritiska
protivpritisna parna turbina	sva	0.5 – 500	3: 1 – 10: 1	7 – 20	do 80	para visokog pritiska
kombinovani ciklus gas/para	tečna gasovita	3 – 300 +	1: 1 – 3: 1	35 – 55	73 – 90	para srednjeg pritiska / v. voda
gasna turbina	tečna gasovita	0.25 – 50 +	1.5: 1 – 5: 1	25 – 42	65 – 87	para srednjeg pritiska / v. voda
kompresioni klipni motor	tečna gasovita	0.2 – 20	0.5: 1 – 3: 1	35 – 45	65 – 90	para niskog pritiska / voda
klipni motori el. paljenje	tečna gasovita	0.003 – 6	1: 1 – 3: 1	25 – 43	70 – 92	vrela i topla voda

Među klipnim motorima, dizel motori imaju najviši stepen konverzije goriva u snagu na vratilu. To ne znači da će oni automatski biti izabrani. Prirodni gas je dostupan u mnogim zemljama sa cenama koje su niže od dizel goriva. U Oto ciklusu, samo gasovita goriva mogu biti korišćena i njihove emisione vrednosti su znatno niže od propisanih vrednosti i bez upotrebe katalizatora. U trigeneraci-

onim postrojenjima, prirodni gas je generalno prihvaćen kao najmanji zagađivač u poređenju sa ostalim gorivima, pa se danas u svetu razvoj trigeneracionih tehnologija bazira pretežno na prirodnom gasu.

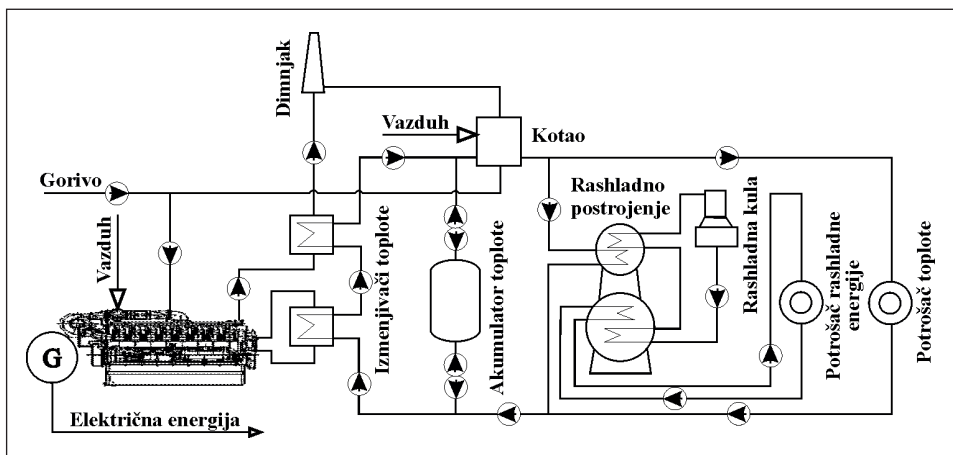
### 3. TRIGENERACIJA SA KLIPNIM MOTOROM

Na slici 2 prikazana je osnovna šema trigeneracionog sistema za proizvodnju toplotne, električne i rashladne energije. Generator koristi za proizvodnju električne energije klipni motor sa unutrašnjim sagorevanjem. Prednost klipnih motora je veliki mehanički stepen korisnosti u celom području delovanja. Upotrebljivi su za proizvodne pogone sa električnom snagom do 20 MW, jer se ugrađuje veći broj paralelno vezanih motora. Moguća je pojedinačna upotreba motora, a da stepen korisnosti ostane isti. Njihova prednost je i brz start i brzi prelaz na puno opterećenje. Odvedenu toplotu pri hlađenju motora koristimo za:

- grejanje u zimskom periodu i pripremu sanitarne tople vode u letnjem periodu,
- za pogon apsorpcionog rashladnog uređaja i pripremu hladne vode za potrebe klimatizacije u letnjem periodu.

Kombinovanje kogeneracionog postrojenja sa apsorpcionim rashladnim sistemom omogućava iskorišćenje sezonskih viškova toplotne energije za hlađenje. Topla voda iz sistema za hlađenje kogeneracionog postrojenja služi kao pokretačka energija za apsorpcione rashladne mašine.

Prednosti apsorpcionih rashladnih mašina u odnosu na klasične kompresorske uređaje su brojne [12]:

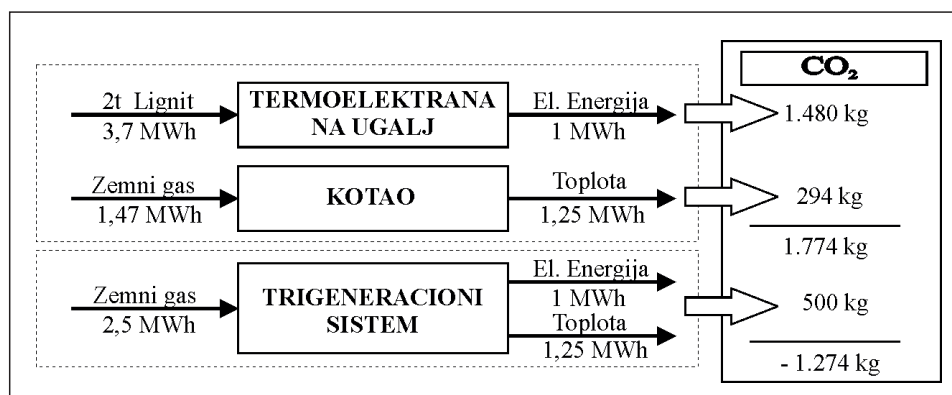


Slika 2. Šema trigeneracionog postrojenja sa klipnim motorom [12]

- apsorpcione rashladne mašine zahtevaju vrlo mala finansijska sredstva za održavanje, jer nemaju rotirajuće i klizeće površine pa nema habanja,
- troškovi rada po satu su gotovo 10 puta manji kod apsorpcionih uređaja,
- potrošnja električne energije za pogon pripadajućih pumpi je oko 1% proizvedene rashladne energije, a kod kompresionih između 25 i 40%,
- ne emituju freone u atmosferu, što je značajan ekološki efekat (kod apsorpcionih rashladnih mašina radni medijum je voda, a litijum-bromid je apsorpciono sredstvo za temperature do 5 °C, a amonijakom za znatni niže temperature do – 60 °C) i
- koriste otpadnu toplotu kogeneracionih postrojenja, što značajno povećava ekonomičnost celokupnog postrojenja.

Za pogon apsorpcione rashladne mašine potrebna nam je velika količina otpadne toplote. Sistem hlađenja se u većini praktičnih primera kombinuje sa parnim kompresionim uređajima koji služe za pokrivanje vršnih potreba za rashladnom energijom.

Efikasnost trigeneracije određuje se poređenjem sa referentnim sistemom za pojedinačnu proizvodnju električne i toplotne energije. Referentni sistem je postojeći sistem odvojene proizvodnje električne energije u elektrani na uglj (lignit) i toplotne energije iz kotlova na zemni gas, umanjujući efikasnost proizvodnje za visinu gubitaka u prenosnoj i distributivnoj mreži do krajnjeg korisnika [13].



Slika 3. Efikasnost trigeneracije: 52% uštede primarne energije i 72% smanjenje emisije CO<sub>2</sub>

Trigeneracija doprinosi znatno boljoj energetskej budućnosti, umanjujući ekološka oštećenja nastala klasičnim energetskej aktivnostima. Najvažnija korist je smanjenje emisije ugljen-dioksida. Trigeneracija može da smanji emisiju CO<sub>2</sub> i za 50%, u poređenju sa uobičajenim izvorima toplotne i električne energije. Dalja korist je i smanjenje emisije sumpor-dioksida i drugih štetnih gasova.

#### 4. IZBOR TRIGENERACIONOG SISTEMA

Za primer izbora trigeneracionog sistema uzet je jedan konkretan objekat, Opšta bolnica Kliničkog centra u Podgorici. Opšta bolnica se snabdeva iz Energane centra uz ostale objekte priključene na nju koji iz nje troše isključivo toplotnu energiju. Potrošnja energenata Opšte bolnice data je u tabeli 2.

Tabela 2. Potrošnja energenata Opšte bolnice

Potrošači zasićene pare 8 bar	D [kg/h]	Instalisani klipni rashladni agregat	
Priprema sanitarne vode	918		480 kW
Radijatorsko grejanje	3180	Potrošnja električne energije:	
Klimatizacija – topla strana	1240	– leti	270000 kWh/m
Interno odeljenje	235	– zimi	180000 kWh/m
Tehnološka para	1660		

Zašto su bolnice pogodne za upotrebu trigeneracionih sistema? Bolnice su veliki potrošači koji imaju 24/7/365 zahteve za električnom, toplotnom i rashladnom energijom koji su vremenski dobro usklađeni. Uobičajeno u svom krugu imaju odgovarajuće energane sa kvalifikovanim osobljem koje može da vodi trigeneracioni proces. Bolnice zahtevaju pouzdano električno napajanje sa stabilnim naponom.

Na osnovu potrošnje energenata, uzimajući u obzir da je razlika u potrošnji električne energije u zimskim i letnjim mesecima prvenstveno rezultat hlađenja split sistemima, uz pretpostavku ugradnje dvostepenog apsorpcionog hladnjaka (COP=1.1), jer je na raspolaganju zasićena para, izvršena je procena potrošnje po godišnjim dobima (tabela 3). Toplotna opterećenja u prelaznom periodu su za potrebe grejanja i hlađenja objekta procenjene na 40% od maksimalnih zahteva.

Tabela 3. Potrošnja po godišnjim dobima [kW]

Potrošnja	Leti	Zimi	Prel. period
Tehnološka para – 8 bar 170 °C	1100	1100	1100
Sanitarna topla voda 50 °C	460	610	540
Grejanje – topla voda 90/70 °C	–	2940	1180
Toplotni potrošači ukupno	1560	4650	2820
Hlađenje 7/12 °C	875	–	350
Toplota potrebna iz agregata	2360	4640	3140
Električna energija	620	620	620

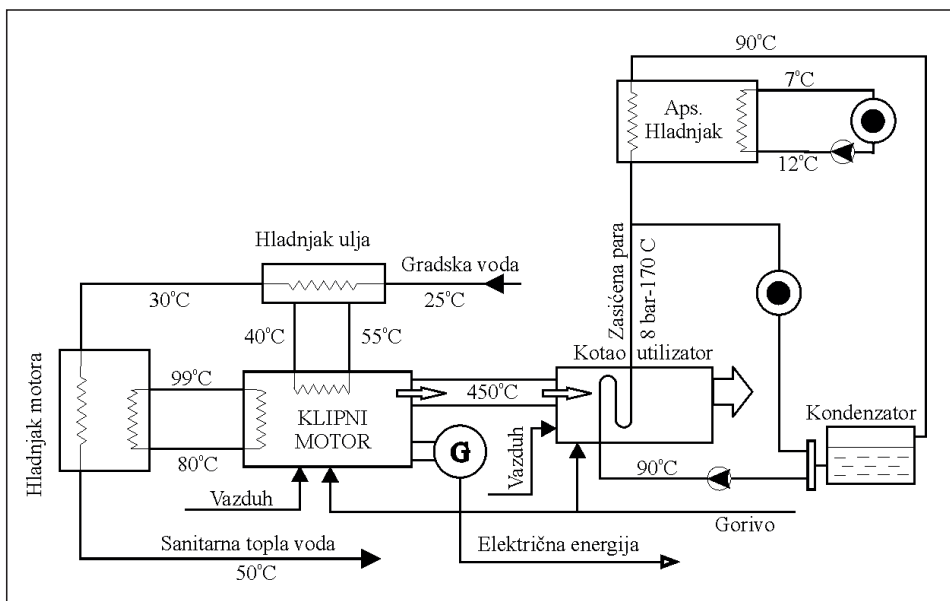
Vidi se da je odnos potrebne električne i toplotne energije veoma visok u najnepovoljnijem zimskom periodu 1: 7.5 zbog velike potrošnje tehnološke pare, pa bi takav odnos upućivao na izbor protivpritisne turbine kao pogonskog motora. Ako se zadržimo na klipnim kompresionim motorima, kojima možemo proizvesti paru traženih karakteristika, kod kojih je uobičajeni odnos prema ka-

talozima proizvođača [14, 15] 1: 1.4, onda trigeneracioni sistem možemo izabrati u pogledu na:

- zahtevanu maksimalnu toplotnu snagu u zimskom periodu,
- zahtevanu rashladnu snagu u letnjem periodu, ili
- zahtevanu električnu snagu.

Ako u primeru sistem dimenzionišemo prema zahtevanoj električnoj snazi sa izabranim trigeneracijskim sistemom, ne možemo da pokrijemo potrebe za grejanjem u zimskom periodu. Neophodna je ugradnja dodatne kotlovske jedinice. Proizvedena toplotna energija nije dovoljna ni za pokrivanje rashladnog opterećenja u apsorpcionom rashladnom uređaju, pa je neophodna ugradnja vršnih rashladnih kompresora koji se u tom slučaju snabdevaju električnom energijom preuzetom iz gradske mreže, jer motor ne proizvodi dovoljno električne energije i za njihov pogon.

Ako sistem dimenzionišemo prema zahtevanom rashladnom i toplotnom opterećenju u letnjem periodu, ne pokrивamo zahtevano toplotno opterećenje ni u zimskom ni u prelaznom periodu pa je opet neophodna ugradnja vršnog kotla. Zahtevano rashladno opterećenje u prelaznom periodu (30-40% od maksimalnog) pokrивamo sa apsorpcionim rashladnim uređajem, dok manjak toplotne energije proizvodimo u vršnom kotlu. Imamo konstantan višak električne energije koji predajemo električnoj mreži.



Slika 4. Uprošćena šema predloženog trigeneracionog postrojenja

Ako u primeru sistem dimenzionišemo prema zahtevanom toplotnom opterećenju, gotovo konstantan višak toplotne energije odvodimo u rashladni stepen, a višak električne energije predajemo električnoj mreži. Podrazumeva se da je ugradnja agregata, izabranog prema maksimalnom toplotnom opterećenju, najviša po investiciji, ali su i dobici viškova energije koji se mogu eventualno prodati najviši.

U ovom slučaju najbolja opcija je zbog ovako, sa aspekta kombinovane proizvodnje, nepovoljnih odnosa prema zahtevanoj toplotnoj, rashladnoj i električne energiji ugradnja sistema sa vršnim kotlom ili kotlom utilizatorom sa pomoćnim ložištem (slika 4), čija veličina bi zavisila od investicionih parametara a koji bi pokrивao sva rashladna opterećenja, konstantno proizvodio višak električne energije i samo deo zahtevanih toplotnih opterećenja u zimskom periodu.

Analiza izbora najboljeg načina trigeneracije je analizirana samo sa energetskog gledišta, i to vrlo uprošćeno. Istovremeno je ukazala i na svu kompleksnost izbora sistema. Za dimenzionisanje postrojenja neophodna je detaljnija analiza dnevnih, mesečnih i godišnjih potreba za toplotnom, električnom i rashladnom energijom.

Ekonomičnost investiranja se ocenjuje na primeru troškova za energiju dobijenu uobičajenim načinom (električna energija preuzeta iz mreže a toplotna iz kotla na tečno gorivo), sa troškovima proizvodnje električne i toplotne energije u kombinovanom postrojenju. Glavni kriterijumi za ocenu ekonomičnosti trigeneracije su:

- odnos cene električne energije i goriva,
- istovremenost potrebe za toplotnom i električnom energijom,
- godišnja proizvodnja.

Uobičajeno je da se osnovno toplotno opterećenje pokriva pomoću trigeneracionog sistema, a vršno odgovarajućim kotlom, odnosno kompresionim rashladnim uređajem.

U najboljem slučaju primene, trigeneraciono postrojenje može da prodaje svoju struju drugim potrošačima. Svakako, ovakav način rada omogućiće trigeneracionom sistemu da radi duže, povećavajući energetske i finansijske uštede, kao i zaradu. Prodaja električne energije zahteva pristup elektro-distribucionoj mreži. Trenutni odnosi kod nas između proizvođača i mrežnog operatora su takvi da još uvek nije moguća prodaja struje na način koji bi omogućio dalji razvoj trigeneracije.

Konačna odluka se može doneti tek posle detaljne analize, uzimajući u obzir investicione i operacione troškove opreme, uključujući i prateću opremu, kao i troškove održavanja za celokupan predviđeni period rada postrojenja (oko 10 godina).

Primeri sličnih postrojenja, uzimajući u obzir gore navedene elemente, predviđaju rok vraćanja investicija za period od 3 do 5 godina, što umnogome zavisi i od mera racionalizacije potrošnje, koja su već sprovedena u razmatranoj instalaciji.



## 5. ZAKLJUČAK

Suprotno od današnje prakse centralizovane proizvodnje električne energije, trigeneracija pruža niz novih mogućnosti za dobijanje kvalitetne i jeftine energije uz smanjenje rizika da potrošači ostanu iznenada bez izvora električne i/ili toplotne energije. Popularnost ovog koncepta raste, jer je lokalna proizvodnja energije najefikasniji i najekološkiji način brzog ekonomskog rasta. Nažalost, iz brojnih praktičnih i političkih razloga trigeneracija se ne koristi u svom punom potencijalu.

Za trigeneracione sisteme moguće su razne konfiguracije, uz upotrebu različite kombinacije opreme. Optimalna konfiguracija zavisi od lokalnih i ekonomskih uslova kao što su raspoloživost gorivom, cene električne energije, zahteva za rashladnom vodom, parom ili toplom vodom i njihova sezonska opterećenja. Analiza trigeneracionog sistema je veoma kompleksna zbog varijacija ovih parametara, ne samo na nivou godine već i tokom dana. Trigeneracioni sistem mora da zadovolji sva zahtevana vršna opterećenja a ujedno da se ne dozvoli da bude predimenzionisan.

Važno je istaći da je upotreba trigeneracionih sistema najbolja raspoloživa tehnologija za smanjenje emisije gasova staklene bašte i ostalih polutanata koji su uobičajeni kod standardnih termoenergetskih postrojenja, kao i sredstvo za očuvanje primarnog goriva i smanjenja zavisnosti od uvoza energije i energenata.

## 6. LITERATURA

- [1] Monty Goodell: *Trigeneration* [www.trigeneration.com](http://www.trigeneration.com)
- [2] Educogen: *A Guide to Cogeneration*, March 2001, [www.cogen.org](http://www.cogen.org).
- [3] „BCHP Baseline Analysis for the Wisconsin Market”, University of Illinois at Chicago – Energy Resources Centar, Septembar 2002.
- [4] Critoph R. E.: *Modular regenerative adsorption cycles with fixed beds, applied to trigeneration* Process Mechanical Engineering, Vol. 219, Part E, 2005, pp 197-204.
- [5] Rosen M. A. at all: *Exegetic analysis of cogeneration – based district energy systems* Power and Energy, Part A. Vol. 218, pp 369-376.
- [6] Galip Temir at all: *An Application of Trigeneration and Its Economic Analysis* Taylor & Francis, Energy Sources, 26: 857-867, 2004.
- [7] Mindi Altman Zissman: *Making the Most of Fuels* Consulting Specifying Engineer, Septembar, 2001, pp 47-51.
- [8] Grobovsek B.: *Trigeneracija – sočasna proizvodnja, toplotne, električne in hladilne energije* [www.energetika.net/portal](http://www.energetika.net/portal).

- [9] Ted Bronson: *Combined Cooling, Heating and Power Technologies (CHP): An Overview* Combined Heat and Power Symposium, Februar, 2003.
- [10] S. Dharmadhikari: *Consider trigeneration techniques for process plants* Hydrocarbon Processing, Jul 97. Vol 76 Issue 7, pp 91-98.
- [11] Educogen: *The European Educational Tool on Cogeneration*, Decembar 2001, [www.cogen.org](http://www.cogen.org).
- [12] GE Energy: *Keep Cool – trigeneration with Jenbacher gas engines*, [www.gejenbacher.com](http://www.gejenbacher.com).
- [13] „Trigeneracija”, [www.kogeneracija.co.yu](http://www.kogeneracija.co.yu).
- [14] Katalog opreme – Caterpillar, [www.caterpillar.com](http://www.caterpillar.com).
- [15] RETScreen International: *Clean Energy Project analysis Software, Combined Power & Heat Project Model*, [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net).

#### ABSTRACT:

Trigeneration can be defined as the conversion of a single fuel source into three energy products: electricity, steam or hot water and chilled water.

Trigeneration increase efficiency and economy of the plants which works in cogeneration cycles, with lower pollution and production costs than producing the three products separately.

Construction of trigeneration system requires an precision examination and analysis, more than cogeneration systems, but that is the way to use maximum of fossil fuels. Feasible applications in our conditions is presented in the paper.

*Key words: trigeneration, cogeneration, urban environment*