

**PREGLED PRIMENE TEHNOLOGIJA KOGENERACIJE I SKLADIŠTENJA ENERGIJE  
REVIEW OF THE APPLICATION OF COGENERATION AND ENERGY STORAGE  
TECHNOLOGIES**

Zorana Lazić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ENERGETIKA I PROCESNA TEHNIKA**

**Kratak sadržaj** – Rad daje opis tehnologije, kogeneracije i skladištenja energije, na primerima dobre prakse sa ciljem povećanja efikasnosti i smanjenju zagađenja životne sredine, koje je sve veće zbog velikih svetskih potreba za energijom.

**Ključne reči:** Kogeneracija toplotne i električne energije (CHP), Skladištenje energije komprimovanog vazduha (CAES)

**Abstract** – The paper describes technology, cogeneration and energy storage, on the examples of good practice with the aim of increasing efficiency and reducing environmental pollution, which is increasing due to high global energy needs.

**Keywords:** Combined heat and power (CHP), Compressed Air Energy Storage (CAES)

**1. UVOD**

Sve veća zabrinutost zbog uticaja energetske sistema na životnu sredinu o svesti i važnosti odgovorne upotrebe fosilnih rezervi, doprinosi mnogim naporima da se energetske sistem preusmeri na drugačiji i održiviji energetske model. S tim u vezi, preduzete su mnoge značajne akcije kojima se podstiče upotreba obnovljive energije i povećanje efikasnosti čitavog energetske lanca od proizvodnje električne energije do potrošnje krajnjih korisnika. Jedno od rešenja jeste upravo upotreba kogeneracije u kombinaciji sa skladištenjem energije.

Kogeneracija i skladištenje veoma su zastupljene tehnologije širom sveta, ali samo kao dva odvojena postrojenja i kao takvi su opisani detaljno u radu, i pored toga su dati neki od primera. Međutim, cilj rada jeste da se pokaže rešenje, odnosno postrojenje u kome se kombinuju kogeneracija i skladištenje, koje bi mnogo više doprinelo efikasnosti i smanjenju zagađenja životne sredine. Ovaj tip postrojenja nije mnogo rasprostranjen, ali su data dva primera gde je detaljno prikazan princip rada ovog tipa postrojenja.

**2. KOGENERACIJA**

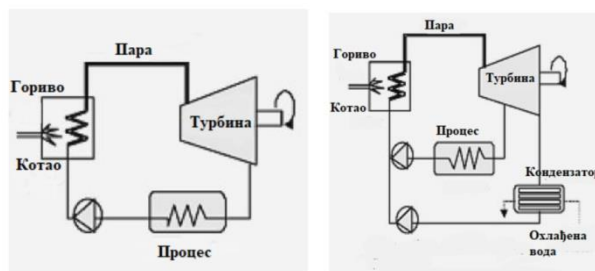
Kogeneracija je tehnologija za racionalno korišćenje energije i definiše se kao istovremeno generisanje dva ili više oblika energije iz jednog izvora. Kod kogeneracije efikasnost sistema se povećava za 80% do 95% u odnosu na konvekcionalne termoelektrane (35% do 40%).

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Anđelković, red.prof.**

**2.1. Tehnologije kogenerativnih postrojenja**

Postoji mnogo vrsta kogenerativnih sistema, međutim, najčešće korišćeni sistemi su sistemi za kogeneraciju parnih turbina (STCS). Oni rade na Rankineovom ciklusu i vrlo su fleksibilni u snabdevanju gorivom. U osnovi mogu da koriste dve vrste goriva koji se mogu sagoreti u kotlu. U kogeneraciji se koriste dve vrste parnih turbina, turbina sa povratnim pritiskom i ekstrakciono-kondenzaciona turbina. Princip rada ove dve vrste turbina dat je slikom 1. gde je na levom delu slike prikazana turbina sa povratnim pritiskom, dok je na desnom delu ekstrakciono-kondenzaciona turbina.



Slika 1. Princip rada turbine sa povratnim pritiskom i ekstrakciono-kondenzacione turbine

Pored pomenutih tehnologija, postoji i sistem na gasne turbine (GTCS). Ti sistemi su doživeli brz razvoj poslednjih godina i postali su alternative kogenerativnim sistemima parnih turbina. Ukoliko je potrebno više električne energije, moguće je koristiti kombinovani ciklus gasa i pare (CGSC).

Regeneracijski sistem kogeneracije motora (RECS) je još jedna tehnika kogeneracije. Ovaj sistem koristi motore sa unutrašnjim sagorevanjem za obezbeđivanje obrtnog momenta i toplote sa efikasnošću većom nego u parnim i gasnim turbinama.

Pored pomenutih vrsta kogenerativnih sistema mogu se svrstati i mikroturbine i gorivne ćelije. Mikroturbine su male turbine koje sagorevaju gasovita ili tečna goriva da bi pogonila vratilo generatora, pri čijem se sagorevanju takođe oslobađa i određena količina toplote koja se koristi u sistemu kogeneracije. Ovo je relativno nova tehnologija.

Gorivne ćelije imaju znatne prednosti u odnosu na ostale tehnologije iz razloga što pružaju potencijal za čisto, nečujno i efikasno stvaranje pre svega električne, a zatim i toplotne energije. Pogonsko gorivo ne sagoreva, već reaguje elektro-hemijski, pa samim tim se postižu minimalna zagađenja vazduha. Gorivne ćelije su veoma slične baterijama po tome što i jedne i druge proizvode jednosmernu

struju kroz elektro-hemijski proces, ali bez direktnog sagorevanja pogonskog goriva.

## 2.2. Primena kogenerativnih postrojenja

Postoje tri vrste kogeneracije podeljene prema upotrebi. Prva je industrijska kogeneracija koja postoji u fabrikama gde je potrebna toplotna i električna energija. Druga vrsta je kogeneracija grejanja. Takvi sistemi se primenjuju kada postoji velika potražnja za toplotom, a proizvodnja električne energije je samo nusproizvod, na primer u daljinskom grejanju. Poslednji tip kogeneracije je poljoprivredna kogeneracija koja se može koristiti za ruralne procese. Korišćenjem tehnologije kogeneracije u ovoj oblasti, npr. pogoni za preradu hrane mogu koristiti nusproizvode biomase za proizvodnju topline i energije, koja se zauzvrat može koristiti za proizvodni proces.

## 3. SKLADIŠTENJE ENERGIJE

Trenutni zahtevi potrošača u snabdevanju električnom energijom predstavljaju osnovni uzrok složenosti elektroenergetskog sistema. Sve veća odstupanja potrošnje električne energije od njene proizvodnje dovode u pitanje stabilnosti rada celog sistema što za posledicu ima odstupanje napona i frekvencije od njihovih nominalnih vrednosti. Pojam „skladištenje energije“ se odnosi na transformaciju nekih polaznih oblika energije u obliku pogodan za skladištenje i ponovo u povratnu transformaciju. Energija se skladišti u intervalima kada proizvodnja energije nadmašuje njenu potrošnju, a skladištene rezerve se koriste kada potrošnja energije nadmašuje njenu proizvodnju. Na ovaj način se održava balans.

### 3.1. Vrste i karakteristike sistema za skladištenje

Skladištenje energije se može vršiti preko kombinovanih ili hibridnih sistema. Pod kombinovanim sistemima se smatraju sistemi koji na ulazu imaju jedan primarni izvor energije, dok na izlazu imaju dva ili više oblika energije. Dok se pod hibridnim sistemom smatraju sistemi koji imaju dva ili više ulazne energije i samo jednu izlaznu energiju. Delovi sistema za skladištenje energije su: sistem za transformaciju snage (STS), centralno skladište (CS) i upravljački sistem za punjenje i pražnjenje (USPP).

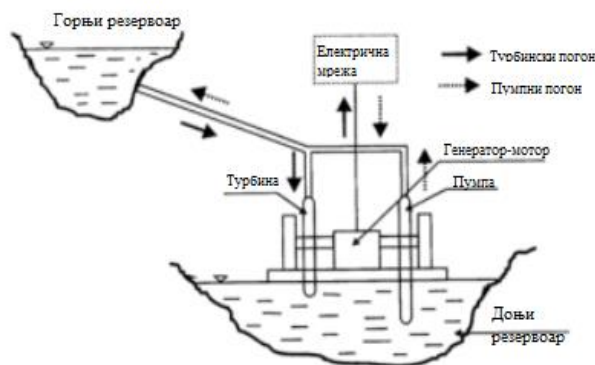
Osnovne karakteristike sistema za skladištenje su: energetska kapacitet skladištenja, maksimalna snaga i vremenska konstanta, gustina energije i gustina snage (energija i specifična snaga), trajanje ciklusa skladištenja, brzina (snaga) punjenja i pražnjenja, gubici energije i efikasnost skladištenja (efikasnost ciklusa), starenje sistema, vreme odziva, troškovi ulaganja, trajnost, ekonomičnost, kompatibilnost, autonomnost, pouzdanost, uticaj na životnu sredinu (okolinu) i sl. Ovi parametri služe za poređenje različitih metoda za skladištenje energije.

### 3.2. Tehnologije skladištenja energije

Koliko je proces skladištenja energije značajan u današnjem modernom svetu, pokazuje i broj tehnologija koje su se razvile kako bi se ovaj proces obavljao. Međutim, postoji četiri glavne kategorije: potencijalna mehanička energija (hidroelektrična brana, reverzibilna hidroelektrana / morska reverzibilna hidroelektrana / skladištenje energije vazduhom), kinetička mehanička energija (inercioni zamajac), elektro- hemijska energija

(baterije, akumulatori, kondenzatori, vodonikovi vektori) i termalna energija (latentna ili osetna toplota).

Mehanička energija predstavlja zbir potencijalne i kinetičke energije u mehaničkom sastavu, odnosno energija koja zavisi od položaja i pomeranja tela usled delovanja sile. Hidro-pumpno skladištenje energije podrazumeva skladištenje u obliku gravitacione potencijalne energije vode. Izgled ovog tipa skladišta dat je na slici 2.



Slika 2. Šematski prikaz reverzibilne hidroelektrane

Glavna razlika između konvencionalnih i reverzibilnih hidroelektrana, je u tome što kod konvencionalnih voda iz akumulacionog jezera protiče kroz postrojenje i dalje nastavlja svojim prirodnim tokom, dok kod reverzibilnih postoje dva skladišta vodene mase, odnosno postoje gornji i donji rezervoar (akumulacija). Pored pomenutog hidro-pumpnog načina za skladištenje energije postoje i sledeći: spremnici elastične energije, skladištenje energije komprimovanim vazduhom, spremnici kinetičke energije (zamajci).

Proizvedena toplota u nekom tehnološkom procesu, može biti višak toplote iz termoelektrane kao i neka otpadna toplota koju je šteta baciti u okolinu pa se skladišti, i privremeno se skladišti u spremnicima za toplotu na odgovarajućoj temperaturi kako bi se posle mogla koristiti. Uskladištena toplotna energija se kasnije može koristiti za zagrevanje potrošne tople vode i za grejanje prostorija ili za proizvodnju električne energije.

Sistem za skladištenje elektro-hemijske energije je zasnovan na principu skladištenja hemijske energije koja se pretvara u električnu. Ovde spadaju tri grupe uređaja: primarne baterije, sekundarne baterije i gorivne ćelije. Litijum-jonske baterije predstavljaju najbolje rešenje kada je u pitanju skladištenje velike količine obnovljive energije.

Superprovodno magnetno skladištenje energije (SMSE) karakterističan je po tome što ima tri principa, koja su samo za njega vezani, a to su: neki materijali provode struju bez termogenih gubitaka, električna struja stvara magnetno polje i magnetno polje je čist oblik energije koji može da se skladišti.

Shodno tome da je cilj da se snabdevanje energijom bazira na 100% obnovljivom energijom, problem se javlja prvo u skladištenju same električne energije, koja je znatno skuplja u odnosu na ostale tehnologije skladištenja, a onda u pretvaranju električne energije u različite skladišne i prenosive nosioce energije.

### 3.3. Pametni energetski sistemi

Definicija pametnih energetskih sistema je takva da se odnosi na kombinaciju električne, toplotne i gasne mreže u cilju pronalazjenja najboljeg rešenja u celokupnom sistemu. Ovakvi sistemi zahtevaju nove tehnologije i infrastrukturu, koje stvaraju nove oblike fleksibilnosti, prvenstveno u fazi konverzije energetskog sistema. Prednost ovakvog tipa sistema se ogleda u tome da ne postoji zavisnost od varijabilnih obnovljivih izvora. Integracijom sektora grejanja i hlađenja sa električnom energijom, omogućava veću efikasnost goriva i povećanje udela varijabilnih resursa, što rezultira efikasnijim sistemom i rešenjima sa najnižim troškovima.

Studije za nekoliko pojedinačnih zemalja Evrope, došle su do zaključka da je najjeftiniji način snabdevanja grejanjem kombinovanje uštede toplote sa daljinskim grejanjem u urbanim područjima i pojedinačnim toplotnim pumpama u ruralnim područjima.

Ono što se smatra pod bitnom tačkom, jeste elektrifikacija transportnog sektora, jer bi se time osigurala ravnoteža između proizvodnje i potražnje u elektroenergetskom sistemu.

### 4. PRIMERI DOBRE PRAKSE

Primeri se pokazuju koje su sve predosti u primeni tehnologije koja poseduje kogeneraciju i skladištenje energije.

#### 4.1. Ušteda energije u zgradama: kogeneracija i kogeneracija zajedno sa skladištenjem toplotne energije

U ovom primeru dato je izvršeno istraživanje električne energije i rashladnog opterećenja u zgradama Azijskog tehnološkog instituta (AIT), Bangkok, Tajland. Zatim je izvedena studija izvodljivosti, kako tehnička tako i ekonomska, kogeneracije pomoću dvostrukog efekta apsorpcionog hladnjaka i upoređuje se kogeneraciona sprega sa termoenergetskim skladištem rashladene vode.

U radu se izučava da li je izvodljivo kogeneraciono postrojenje u cilju što bolje upotrebe energije u zgradi pomoću dvostrukog efekta apsorpcionog hladnjaka. Izabrano je delimično usklađivanje snage sa ciljem smanjenja računa za električnu energiju, kao i postizanja niskih troškova proizvodnje električne energije.

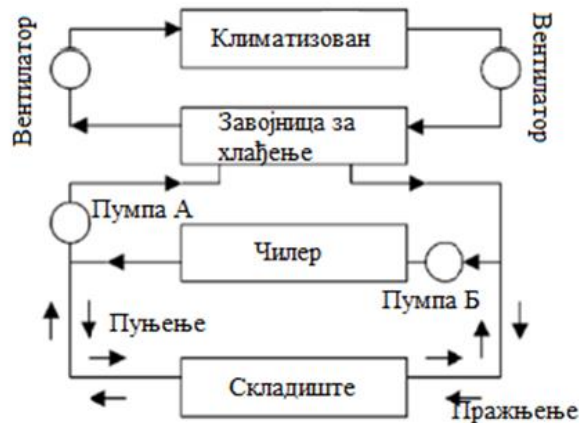
Količina rashladnog opterećenja proizvedenog kogeneracijom zavisi od performansi apsorpcionog hladnjaka sa dvostrukim efektom, koji varira u zavisnosti od količine zagrevanja u izduvnim gasovima i rashladnoj vodi omoćaća motora i njihovih temperatura.

Ukupna količina efekta hlađenja proizvedena za svaki scenario izračunata je prema rasporedu opterećenja motora. Računanje je izvedeno uzimajući u obzir vrednost (COP) od 0,8 za apsorpcioni hladnjak sa dvostrukim efektom. Uštede električne energije i potražnje izračunate su korišćenjem COP konvencionalnog sistema.

Primećeno je da kogenerirani rashladni kapacitet premašuje potrebe Instituta za rashladnim opterećenjem, osim tokom radnog vremena. To ukazuje na potrebu za skladištenjem ohlađene vode.

Sistem za skladištenje toplotne energije (TES) može se povezati sa sistemom za kogeneraciju kako bi se u

potpunosti iskoristila kogenerativna ohlađena voda. Odabir najboljeg sistema za skladištenje rashladene vode se vrši na osnovu klasifikacije po veličini i metode koja ima cilj da umanjuje mešanje ili prenos toplote između uskladištene vode za hlađenje i toplije vode koja se vraća iz sistema za hlađenje objekta, zgrade. U ovom radu je posmatran tip sistema sa delimičnim skladištenjem: on je hibrid delimičnog i potpunog načina skladištenja. Šema radnog ciklusa skladištenja rashladene vode data je na slici 3.



Slika 3. Šema radnog ciklusa skladištenja rashladene vode

Tehnička procesa TES-a je izvedena određivanjem viška količine kogeneriranog rashladnog opterećenja dostupnog za skladištenje, potrebne veličine rezervoara za skladištenje i određivanjem odgovarajuće energije i potencijala uštede potražnje. U praksi se primenjuje da se skladišti više rashladne vode nego što je stvarno potrebno zbog gubitaka iz skladišta do kojih dolazi usled mešanja tokom punjenja i pražnjenja, kao i toplote iz okoline i sticanja iste tokom vraćanja toplote iz zgrade.

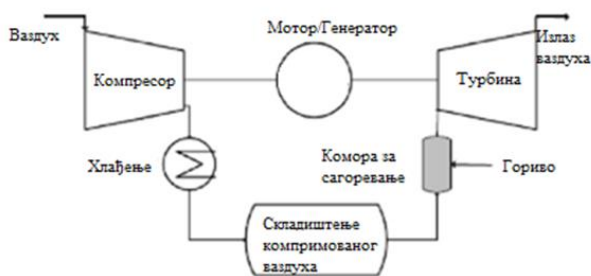
Na osnovu izvršenih istraživanja došlo se do rezultata koji pokazuju da je efikasnost sistema za skladištenje sa više rezervoara varirala od 85 do 98% u različitim zgradama. Ovaj proračun je izveden pretpostavljajući efikasnost skladištenja od 85%. Povezivanje kogeneracije sa TES ekonomičnije u poređenju sa samo kogeneracijom. Međutim, period povrata je uvek kraći kod kogeneracije spojene sa skladištem toplotne energije u poređenju sa onom samo kod kogeneracije.

#### 4.2. Primene skladištenja energije komprimovanog vazduha u kogenerativnim sistemima

Skladištenje energije komprimovanog vazduha (CAES) predstavlja tehnologiju koja se može suprotstaviti problemima koji nastaju prilikom skladištenja energije koja se dobija iz obnovljivih izvora energije, a koji se odnose na nestabilnost obnovljivih izvora pod uticajem prirode.

CAES sistemi se mogu podeliti na tri procesa: punjenje, skladištenje i pražnjenje, kao i na pet potprocesa: kompresija, punjenje i pražnjenje sa razmenom toplote, širenje, skladištenje i mehanička transmisija između motora/generatora, kompresora i ekspandera. Na slici 4. data je konfiguracija osnovnog CAES sistema.





Slika 4. Konfiguracija osnovnog CAES sistema

Jedna od klasifikacija odnosi se na proces prenosa toplote koji se odvija u procesima kompresije i ekspanzije: dijabatski-CAES (D-CAES), adijabatski-CAES (A-CAES) i izotermni-CAES (I-CAES). U radu su opisani tri najbitnija parametra za ocenu performansi: odnos primarne energije (PER), efikasnost povratnog putovanja (RTE) i efikasnost eksergije.

CAES sistemi samo skladište energiju, nisu sposobni da generišu različite vrste energije. Studija o ekonomskim i ekološkim efektima koji uključuju CAES u kombinovanoj termoelektrani (CHP) i obnovljivim izvorima sprovedena je međutim, nije se pokazala kao delotvorna.

CAES sistem kao kogeneracija sadrži nekoliko tipova. Trigenerativni CAES sistem T-CAES, ACCHP sistem koji koristi pneumatski motor kao ekspander, SC-CAES toplota od kompresije vazduha i hladnoća od širenja vazduha obnavljaju se kako bi se zadovoljili toplotni zahtevi u podhlađenom CAES, CCHP sistem zasnovan na plinskoj turbini kao i GT-CAES sistem, gde je glavna razlika između njih broj stepena kompresije. Pored navedenih postoji GT-S-CAES, CCHP sistem zasnovan na gasnoj turbini sa CAES integrisanom sa solarnim grejanjem, sistem kogeneracije zasnovan na dizelskom motoru i CAES (DE-CAES), zatim CCHP sistem zasnovan na gasnom motoru sa CAES (GE-CAES) i sistemom za ejektor za hlađenje.

Rezultati su pokazali da je kogeneracija sa CAES zaista središnje polje, pa je dalje teško sa samopouzdanjem identifikovati glavne trendove. Malo je očigledno da su mali GT-S-CAES-ORC sistemi najperspektivniji u pogledu efikasnosti eksergije, ali dalja ispitivanja koja to potvrđuju.

## 5. PRIMERI KOGENERACIJE I SKLADIŠTENJA ENERGIJE U SRBIJI

Srbija trenutno na svojoj teritoriji ne poseduje kogenerativno postojenje sa skladištenjem. Ono što je karakteristiše jesu nekoliko kogenerativnih postrojenja i jedno podzemno skladište gasa. Razvojem zemlje bi trebalo da se razvija i širi upotreba kogeneracije i skladištenja, upravo zbog njihovih doprinosa kako u očuvanju životne sredine tako i u pogledu efikasnosti koje oni daju.

Nekoliko kogenerativnih postrojenja u Srbiji su sledeća: kogenerativno postrojenje kompanije Imlek (Padinska Skela, Beograd), Biogasno postrojenje „Budućnost“ (Bačka Palanka), kogenerativno postrojenje EPS-a, kogenerativno postrojenje Voždovac i kogenerativno postrojenje pri Centru za upravljanje otpadom u Vinči.

Dok što se tiče skladištenja, postoji samo jedno podzemno skladište gasa Banatski Dvor.

## 6. ZAKLJUČAK

U elektroenergetskom sistemu u svakom trenutku mora da postoji ravnoteža između energije koju proizvede određeno postrojenje, i energije koja je potrebna potrošačima. Od sada postoji mogućnost rešavanja ovog problema primenom opisane tehnologije, kogeneracije sa skladištenjem energije. Kombinacija određene tehnologije kogeneracije i tipa skladištenja energije, daje se velika mogućnost za različite privredne segmente.

Radom su obuhvaćene pomenute tehnologije ponaosob, ali i njihova primena zajedno na primerima dobre prakse. Prvi primer se odnosi na uštedu energije u zgradama: kogeneracija i kogeneracija zajedno sa skladištenjem toplotne energije, gde je izvršeno istraživanje električne energije i rashladnog otperećenja u zgradama Azijskog tehnološkog instituta (AIT), Bangkok, Tajland, dok se drugi primer odnosi na primenu skladištenja energije komprimovanog vazduha u kogenerativnim sistemima. Takođe, prikazan je uvid u primenu istih na teritoriji Srbije.

Cilj rada jeste da se ukaže na probleme koji nastaju u pogledu energije, čija potražnja raste iz godine u godinu. Upotrebom opisanih tehnologija bi se većinskim delom rešili problemi, jer bi se iskoristila energija koja se do sada baca i time doprinosi zagađenju, koje je sve veće kao i smanjenju efikasnosti postojećih postrojenja. Iz tog razloga, potrebno je osvestiti stanovništvo i probuditi svest o racionalnoj upotrebi energije. Datim primerima dat je uvid u troškove koji nastaju upotrebom samo jedne od tehnologija, a koji su troškovi kada se obe tehnologije koriste zajedno. Pored doprinosa u novčanom smislu, veliki uticaj njihove primene ima na povećanje efikasnosti postrojenja, čak i upotrebom fosilnih goriva.

## 6. LITERATURA

- [1] Energy conservation in buildings: cogeneration and cogeneration coupled with thermal energy storage, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261903001004>
- [2] Applications of compressed air energy storage in cogeneration systems, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220320119>
- [3] Catalog of CHP Technologies, <https://www.epa.gov/chp/catalog-chp-technologies>
- [4] Održivo planiranje energije: tehnologije i energetska efikasnost, [https://www.researchgate.net/publication/327201030\\_13P\\_oglavlje7\\_Skladistenje\\_energije](https://www.researchgate.net/publication/327201030_13P_oglavlje7_Skladistenje_energije)

### Kratka biografija:

**Zorana Lazić** rođena u Sremskoj Mitrovici 1998. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Energetika i procesna tehnika -Termoenergetika završila je 2020. god. Trenutno student master studija na smeru Termoenergetika.