

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Dragiša, Ž. Nestorović

Mikro-kogeneracija pomoću biomase

master rad

Kragujevac, 2013.

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu



Naziv studijskog programa: Mašinsko inženjerstvo

Nivo studija: Master akademske studije

Modul: Energetika i procesna tehnika

Predmet: Obnovljivi izvori energije 1

Broj indeksa: 344/2011

Dragiša, Ž. Nestorović

Mikro-kogeneracija pomoću biomase
master rad

Komisija za pregled i odbranu:

1. dr Milan Despotović - mentor

2. _____

3. _____

Datum odbrane: _____

Ocena: _____

U okviru ovog master rada kandidat treba da:

- ❖ da pregled literature i dosadašnjih istraživanja,
- ❖ da prikaz i princip rada mikro-kogeneracionih postrojenja,
- ❖ da matematički model rada mikro-kogeneracionih postrojenja,
- ❖ na osnovu definisanog matematičkog modela izvrši simulaciju rada mikro-kogeneracionih postrojenja uz pomoć razvijenog softvera ili nekog od postojećih softverskih paketa (Excel, MatLab),
- ❖ izradi 3D model mikro-kogeneracionog postrojenja za izabranu konkretnu lokaciju,
- ❖ uradi tehno-ekonomsku analizu.

Preporučena literatura:

- [1] M.Despotović, M.Babić, „Energija Biomase“ Monografija, Mašinski Fakultet Kragujevac, 2007. god.,
- [2] Günter R. Simader, Robert Krawinkler, Georg Trnka “Micro CHP systems: state-of-the-art”,
- [3] Michel De Paepe, Peter D'Herdt, David Mertens, „Micro-CHP systems for residential applications”,
- [4] Tuula Mäkinen, Jaakko Larjola, Jussi Heinimö “Micro and small-scale CHP from biomass (< 300 kWe) for distributed energy”.

Kragujevac, 04.12.2012.god.

mentor:

dr Milan Despotović, redovni profesor

REZIME

Upotrebom fosilnih goriva za proizvodnju toplotne i električne energije, nastaju štetni gasovi koji se emituju u atmosferu i zagađuju životnu sredinu. Poslednjih godina se agilnije ulazi u projekte obnovljivih izvora energije. Naravno, u zavisnosti od mogućnosti i od podneblja različiti obnovljivi izvori energije dolaze u obzir kao npr. energija vetra, energija talasa, solarna energija, energija biomase, hidroenergija itd. Međutim, da bi se otpočelo sa nekim projektom obnovljivih izvora energije moraju se izvršiti određena merenja, analize i videti koliko je to isplativo. U suprotnom, može se desiti da obnovljiv izvor energije bude i skuplji od fosilnog zbog čega bi ulaganje u takav projekat bilo čisto gubljenje vremena i novca.

Cilj rada je da se prikaže idejno rešenje mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom koje koristi pelet kao gorivo, njegove karakteristike i mogućnost realizacije sa što nižim periodom povratka investicionih ulaganja. Suštinu master rada predstavlja sveobuhvatna analiza koja je urađena za konkretan model sistema mikro-kogeneracije sa biomasom.

Master rad se sastoji iz 8 poglavlja, gde je u prvom delu rada predstavljena teoretska osnova kojom je prikazana biomasa kao pogonsko gorivo, zatim tehnologije kogeneracije i mikro-kogeneracije koje se najčešće primenjuju, sa opisom rada, svojim karakteristikama i nedostacima.

U drugom delu rada na osnovu postavljenog matematičkog modela rada mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom uz pomoć softverskog paketa "MatLab" i "Excel" izvršene su simulacije uticaja vrste biomase na dobijenu izlaznu snagu sistema, nakon čega su dobijeni rezultati analizirani. U softverskom paketu "CATIA V5R19" izvršeno je modeliranje mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom. U radu je izvršena i tehno-ekonomska analiza kojom se dobio period otplate jednog ovakvog sistema mikro-kogeneracije.

Ključne reči: Biomasa, mikro-kogeneracija, Stirlingov motor

ABSTRACT

The use of fossil fuels for electric and heat energy production produce harmful gases that are emitted into the atmosphere and pollute the environment. In recent years projects of renewable energy sources are more often subject of interes. Naturally, depending of opportunities and climate, different renewable energy sources are considered, for example wind energy, wave energy, solar energy, biomass energy, hydro energy, etc. However, to start a project of reneweable energy sources it is necessary to carry out certain measurements and analysis to see how profitable it is. Otherwise, renewable energy source can be more expensive than fossil fuels, and in that case investment in such project would be a waste of time and

money. The aim of this master thesis is to present a basic solution of micro-cogeneration plant with Stirling engine with pellets as a fuel, its characteristic and possibilities of realisation with the shortest payback period of investments. The essence of this master thesis is a comprehensive analysis of specific model of micro-cogeneration system with biomass as a fuel.

Master thesis consists of 8 chapter, the theoretical foundations of biomass as a fuel, technologies of cogeneration and micro-cogeneration that are frequently applied, with the description of its operation, characteristics and imperfections was presented in the first part of thesis.

In the second part of thesis the simulation of influence of biomass type to the resulting output power of the system was performed based on the derived mathematical model of micro-cogeneration unit with Stirling engine, using MATLAB and EXCEL, and the results are analysed. CATIA software package is used for modelling the micro-cogeneration unit with Stirling engine. The techno-economic analysis of micro-cogeneration system is also performed in order to obtain the repayment period.

Key words: biomass, micro-cogeneration, Stirling engine

SADRŽAJ

UVOD	8
1. BIOMASA - OBNOVLJIV IZVOR ENERGIJE	9
1.1 <i>Energetsko-tehnički potencijal biomase</i>	12
1.2 <i>Ciklus ugljen-dioksida (CO₂) ciklus</i>	14
1.3 <i>Biogorivo (briketi - peleti).....</i>	15
1.4 <i>Tehnologija pripreme i sagorevanja biomase</i>	16
1.5 <i>Toplotna moć biomase</i>	17
2. KOGENERACIJA.....	18
2.1 <i>Prednost i efikasnost sistema kogeneracije</i>	21
2.2 <i>Pregled tehnologija kogenerativnih postrojenja.....</i>	22
2.3 <i>Instalacija kogenerativnih postrojenja</i>	24
2.4 <i>Uticaj primene kogeneracije na životnu sredinu</i>	26
2.5 <i>Zemlje u Evropi sa relativno razvijenom kogeneracijom</i>	27
3. MIKRO-KOGENERACIJA.....	28
3.1 <i>Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (dizel i gasni motori)</i>	29
3.2 <i>Stirlingov motor</i>	31
3.3 <i>Mikro-gasna turbina</i>	34
3.4 <i>Gorive ćelije.....</i>	37
4. MATEMATIČKI MODEL RADA MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA SA STIRLINGOVIM MOTOROM	39
4.1 <i>Konfiguracija Stirlingovog motora.....</i>	40
4.1.1 <i>Alfa Stirlingov motor</i>	41
4.1.2 <i>Beta Stirlingov motor.....</i>	42
4.1.3 <i>Gama Stirlingov motor.....</i>	43

4.2 Matematički model rada Stirlingovog motora	44
4.2.1 Struktura modela	44
4.2.2 Postupak modeliranja.....	45
4.2.2.1 Kontrolna zapremina za konverziju energije	45
4.2.2.2 Kontrolna zapremina motora	46
4.2.2.3 Kontrolna zapremina rashladne vode	47
4.2.2.4 Prenos toplote	48
5. SIMULACIJA RADA MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA.....	53
5.1 Toplotna snaga $q_{gen,ss}$	55
5.2 Ostvarene količine toplotne i električne energije u zavisnosti od $q_{gen,ss}$	57
5.3 Karakter promene temperature radnog fluida i rashladne vode u Stirlingovom motoru...	60
6. 3D MODEL MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA	66
7. TEHNO - EKONOMSKA ANALIZA.....	73
7.1 Investiciona ulaganja	73
7.2 Troškovi proizvodnje električne i toplotne energije	74
7.3 Prihod ostvaren proizvodnjom električne i toplotne energije	75
7.4 Finansijski rezultat	76
7.5 Potencijalni podsticajni fondovi	77
ZAKLJUČAK.....	78
 PRILOG 1	 81
PRILOG 2	83

LITERATURA

UVOD

Povećana potrošnja energije, ograničene zalihe fosilnih goriva, uvoz nafte i prirodnog gasa i sve strožiji zahtevi na očuvanju životnog okruženja visoko opterećuju platne bilanse zemalja koje ne raspolažu sopstvenim izvorima energije i nameću novi pristup upravljanju energijom.

Takvi zahtevi doveli su do razvoja i primene novih tehnologija koje su donedavno smatrane ekonomski i tehnički neopravdanim. Sa druge strane, nameće se potreba povećanja energetske efikasnosti postojećih energetskih procesa.

Evidentna činjenica da su klasični fosilni energenti iscrpljivi i da njihovo korišćenje prouzrokuje značajne negativne ekološke posledice koje se ogledaju pre svega u povećanoj emisiji ugljen-dioksida i u poznatom efektu staklene bašte, svetsku zajednicu je navelo da preduzme određene odlučne korake radi donošenja planova održivog razvoja koji uključuju povećanje energetske efikasnosti korišćenja energetskih resursa, pronalaženja alternativnih, obnovljivih i ekološki bezbednijih izvora energije.

Prednost obnovljivih izvora je što se neprestano obnavljaju u prirodi, za razliku od neobnovljivih čije su zalihe ograničene.

Kada je reč o racionalnom korišćenju energije, pre svega se misli na osavremenjavanju tehnologija u privrednim delatnostima uvođenjem modernih energetskih tehnologija, koje imaju znatno veću energetske efikasnosti u procesima transformacije primarnih oblika energije u finalne, kako u industriji tako i u zgradarstvu i širokoj potrošnji. Svaka transformacija energije uzrokuje neminovne gubitke koje moderne tehnologije smanjuju i do polovine.

Evropska unija je izradila brojne direktive koje regulišu oblast povećanja energetske efikasnosti postrojenja sa jasnim opredeljenjem za povećanje korišćenja kogeneracije i distribuirane proizvodnje električne i toplotne energije.

U kogenerativnom postrojenju električna i toplotna energija se proizvode istovremeno iz istog energetskog izvora. Osnovu procesa kogeneracije čini jedinstven termodinamički proces uz korišćenje samo jednog pogonskog goriva i korišćenja otpadne toplote koja nastaje kada se generiše električna energija u cilju proizvodnje tople vode i/ili pare koja se zatim može koristiti u tehnološkim procesima, za grejanje prostora, u pripremi tople potrošne vode ili za pogon rashladnih mašina. Na tržištu postoji veliki broj tehnologija koje se neprestano razvijaju a namenjene su za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije.

Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije donosi veliku uštedu primarnih energetskih izvora i pogodna je ne samo za velika i srednja postrojenja, već i za mala pre svega za domaćinstva, gde je potrošnja svega nekoliko kilovata.

U novije vreme razvijaju se kogenerativna postrojenja vrlo male snage ($< 50 \text{ kW}_e$) koja se mogu koristiti za proizvodnju energije u individualnim kućama, odnosno za domaćinstva. Ova postrojenja su označena kao mikro-kogeneracijska postrojenja.

1. BIOMASA - OBNOVLJIV IZVOR ENERGIJE

Porast industrijske proizvodnje i demografska ekspanzija dovele su do iscrpljivanja prirodnih resursa, i pri tome doprineli dramatičnom zagađivanju okoline. Sagorevanjem nafte i uglja nastaje niz štetnih produkata kao što su ugljen-monoksid, sumpor-dioksid i oksidi azota. Ova jedinjenja uzrokuju kisele kiše i uništavaju biljni svet.

Među alternativnim energetskim resursima značajno mesto zauzimaju biogoriva kao obnovljiva i ekološki pogodna.

Energetska istraživanja ukazuju na jednu vrlo zabrinjavajuću činjenicu – da će svetske zalihe nafte, ukoliko se potrošnja nastavi ovakvim intenzitetom, biti iscrpljene za manje od 50 godina. U isto vreme, svetska potrošnja energije nezaustavljivo raste a paralelno sa tim, raste i njena cena. Težnja za smanjenjem emisije gasova staklene bašte, kao i potreba za obezbeđivanjem sigurnosti u snabdevanju energentima, dovela je do veće primene energetski efikasnih tehnologija i obnovljivih izvora energije.

Obnovljivi izvori energije se prvenstveno tretiraju kao alternativa klasičnim izvorima energije u meri u kojoj su u mogućnosti da budu zamena za postojeće konvencionalne metode. Obnovljivi izvori energije, nekada označavani i kao trajni energetski izvori, predstavljaju energetske resurse koji se koriste za proizvodnju toplotne ili električne energije, odnosno svaki koristan rad, a čije rezerve se konstantno ili ciklično obnavljaju. Sam naziv obnovljivi, kao i trajni, potiče od činjenice da se energija troši u iznosu koji ne premašuje brzinu kojom se stvara u prirodi [1].

Činjenica da korišćenje fosilnih energenata ima vrlo negativne ekološke posledice, prvenstveno u povećanoj emisiji CO_2 i u poznatom efektu staklene bašte, uslovlila je da svetska zajednica preduzme odlučne korake u donošenju planova održivog razvoja koji podrazumevaju povećanje energetske efikasnosti i pronalaženju alternativnih energetskih resursa, obnovljivih i ekološki bezbednijih.



Slika 1.1 Biomasa kao obnovljiv izvor energije

Godine 1997. potpisan je *Kyoto* sporazum koji zahteva smanjenje emisije štetnih gasova koji doprinose efektu staklene bašte. Prema tom sporazumu u periodu od 2008. do 2012. godine bilo je potrebno ostvariti smanjenje emisija CO_2 za 5,2% u odnosu na stanje iz 1990. godine [2].

Evropska unija je 2003. godine donela *Direktivu EC/30/2003* kojom se sve zemlje članice obavezuju da do 2005. godine obezbede zamenu 2% fosilnih goriva sa alternativnim a do kraja 2010. godine 5,75% . Od alternativnih goriva, Evropska unija glavni akcenat stavlja na zemni gas, biogas, biodizel, bioetanol, a kao dugoročno rešenje – vodonik [3].

Biomasa je u Srbiji za sada najprihvatljiviji obnovljivi izvor energije. Kada se govori o biomasi kao obnovljivom izvoru energije, podrazumeva se materija sačinjena od biljne mase u vidu proizvoda, nusproizvoda, otpada ili ostataka biljne mase, definisano u *tabeli 1.1*.

<i>Pod biomasom kao obnovljivim gorivom podrazumevaju se</i>
<i>Gorivo dobijeno od biljaka i delova biljaka, čije su sve komponente i međuproizvodi proizvedeni od biomase</i>
<i>Ostaci i nusproizvodi biljnog i životinjskog porekla u poljoprivredi, šumarstvu i komercijalnoj proizvodnji riba</i>
<i>Biološki otpad kao što su: biorazgradivi otpad procesa u prehrambenoj industriji, biorazgradive materije ostataka iz kuhinje, separisani biološki otpad iz domaćinstva i firmi, biorazgradivi otpad iz drvne industrije i otpad održavanja prirodne okoline. Neophodno je da ova vrsta otpada ima toplotnu moć od najmanje 11.000 kJ/kg</i>
<i>Gas proizveden iz biomase gasifikacijom ili pirolizom i drugi proizvodi, kao rezultat ovih procesa</i>
<i>Alkohol (kao gorivo) proizveden od biomase čije su komponente i međuproizvodi takođe proizvedeni od biomase</i>
<i>Otpadno drvo pri preradi drveta i u industriji drvenih materijala</i>
<i>Biogas proizveden anaerobnom fermentacijom, gde fermentacijom nisu obuhvaćeni materijali koji ne spadaju u biomasu i u kojima nema više od 10% masenih delova kanizacionog otpada</i>
<i>Gas dobijen tretmanom otpadnih voda</i>

Tabela 1.1 Opis materijala koji se podrazumevaju pod pojmom "biomasa" [1]

Evropska unija se obavezala da smanji svoje ukupne emisije štetnih gasova za najmanje 20% ispod nivoa iz 1990. do 2020. godine, i spremna je da smanji za čak 30% prema novom ugovoru za globalnu klimatsku promenu, prateći pri tome trend razvijenih zemalja sveta. Takođe je i sama postavila sebi za cilj povećanje udela u korišćenju obnovljivih izvora energije na 20% do 2020. godine [1].

Biomasa se može pretvoriti u toplotnu energiju, električnu energiju i goriva za upotrebu u prevozu. Direktnim sagorevanjem biomase dobija se toplota koja se može koristiti za grejanje u

industriji ili domaćinstvima, ili za proizvodnju vodene pare, pomoću koje se u malim termoelektranama može dobiti električna energija (kogeneracija).

Uobičajena klasifikacija oblika energije dobijene iz biomase je:

- ❖ energija dobijena sagorevanjem čvrste biomase,
- ❖ energija iz biodizela koji se dobija iz uljanih kultura i otpadnog jestivog ulja,
- ❖ energija biogasa koji se dobija procesom anaerobnog truljenja iz tečnog stajnjaka.

Možemo reći da se prema agregatnom stanju, sa uticajem na način energetskog korišćenja, biomasa deli na čvrstu, tečnu i gasovitu.

U čvrstu biomasu ubrajaju se ostaci ratarske proizvodnje, ostaci rezidbe iz voćarstva i vinogradarstva, ostaci šumarstva, biljna masa brzorastućih biljaka¹, a pre svega brzorastućih šuma, deo selektovanog komunalnog otpada, ostaci iz drvoprerađivačke industrije, ostaci primarne i sekundarne prerade poljoprivrednih proizvoda i drugo.

Pod tečnom biomasom podrazumevaju se tečna biogoriva – biljna ulja, transesterifikovana biljna ulja – biodizel i bioetanol.

Gasovitu biomasu predstavlja biogas, koji može da se proizvede iz životinjskih ekskremenata ili energetskih biljaka (silaža trave i kukuruza), ali kao sirovina mogu da posluže i druge otpadne materije. Gasovitu, pa i tečnu, biomasu, predstavljaju i produkti gasifikacije, odnosno pirolize čvrste biomase.

Direktiva 2001/77/EC daje definiciju biomase: Biomasa predstavlja biorazgradivi deo proizvoda, otpada i ostataka u poljoprivredi (uključujući biljne i životinjske supstance), u šumarstvu i pripadajućoj industriji, kao i biorazgradivi deo industrijskog i gradskog otpada. Ova definicija biomase koja je data u Direktivi na nivou je inicijalne definicije, očekujući da će zemlje članice za sebe definisati znatno preciznije šta se podrazumeva pod pojmom biomasa. Takođe, ova direktiva preporučuje da se mešavina gradskog otpada ne podrazumeva pod pojmom "biomasa" za potrebe ove direktive [4].

S obzirom na postojanje vrlo velikog broja otpadnog materijala, koji u određenoj meri sadrži biomasu, ali pored biomase sadrži štetne i opasne materije, razvijene zemlje pod pojmom biomase uglavnom definišu gorivo koje se može smatrati kao čisto gorivo, bez štetnih i opasnih materija u sebi.

Biomasa se smatra obnovljivim izvorom energije i često se naziva ugljenično neutralno gorivo, ali ono ipak može doprineti globalnom zagrevanju. To se događa kad se poremeti ravnoteža sečenja i sađenja drveća, na primer kod krčenja šuma ili urbanizacije zelenih površina. Kada se biomasa koristi kao gorivo umesto fosilnih goriva ono ispušta jednaku količinu CO₂ u atmosferu. Ugljenik iz biomase koji sačinjava otprilike pedeset posto njene mase je već deo atmosferskog ugljeničnog kruga. Biomasa apsorbuje CO₂ tokom svog životnog ciklusa i nakon toga ga ispušta nazad u atmosferu kada se koristi za dobijanje energije. Kod fosilnih

¹ U engleskom govornom području poznate pod nazivom *Short Rotation Coppice (SRC)*

goriva je to drugačije jer se kod njih ugljenik izdvaja iz dugotrajnih spremnika, u kojem bi inače bio zauvek zarobljen, i ispušta u atmosferu.

Glavna je prednost biomase u odnosu na fosilna goriva manja emisija štetnih gasova i otpadnih voda. Dodatne su prednosti zbrinjavanje i iskorišćavanje otpada i ostataka iz poljoprivrede, šumarstva i drvne industrije, smanjenje uvoza energenata, ulaganje u poljoprivredu i nerazvijena područja i povećanje sigurnosti upotrebe energijom. Predviđa se da će do sredine ovog veka u svetu udeo biomase u potrošnji energije iznositi između 30 i 40% [5].

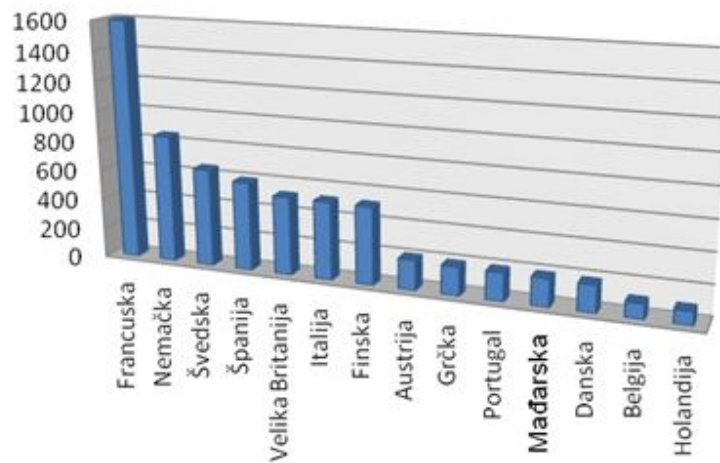
Primarna prednost biomase kao izvora energije je u njenoj obnovljivosti. Upravo ova karakteristika daje suštinsku prednost biomasi u odnosu na klasična fosilna goriva. Dakle, trebalo bi racionalno koristiti energiju i izbeći iscrpljivanje prirodnih izvora koji se ne obnavljaju. Istovremeno se mora sprečiti zagađenje životne sredine, kako bi se život u prirodi odvijao normalno.

Naša zemlja ima relativno visoku stopu rasta potrošnje energije a to upućuje na racionalno korišćenje i najmanjih količina dostupnih energenata. Ovakve okolnosti jasno nalažu i pronalaženje mogućnosti za veće korišćenje biomase kao izvora za dobijanje energije. Korišćenje biomase u Srbiji ima značaj, ne samo za trenutno rešavanje problema manjka energije i njene visoke cene, već i za rešavanje problema zaštite životne sredine. Dodatni značaj razmatranjima potencijala obnovljivih izvora energije u celini, daje proces prilagođavanja i pripreme za uključivanje Srbije u Evropsku uniju.

1.1 Energetsko - tehnički potencijal biomase

Ukupna masa biljnog i životinjskog sveta na planeti Zemlji je oko 200 milijardi tona. Energetski sadržaj skoncentrisan u ovoj biomasi je približno 30.000 EJ². Ovako visoki energetski potencijal je ekvivalentan ukupnom energetskom potencijalu fosilnih goriva. Međutim, samo deo ovog potencijala se može iskoristiti za dobijanje energije. To je takozvani tehnički potencijal, i on je procenjen na oko 150 EJ [6]. Na *slici 1.2* prikazan je tehnički potencijal biomase u pojedinim zemljama Evrope.

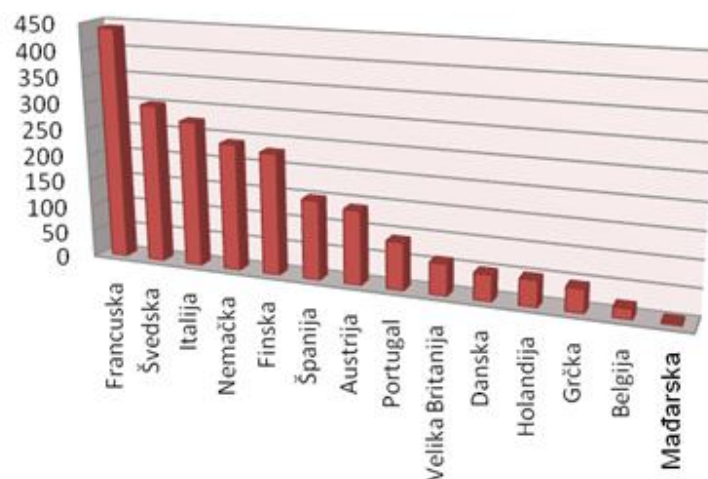
² 1EJ= 10¹⁸ J



Slika 1.2 Tehnički potencijal biomase pojedinih zemalja Evrope [6]

Deo tehničkog potencijala biomase koji se može ekonomično iskoristiti zavisi uglavnom, od tržišnih uslova. Cene fosilnih goriva i instrumenti političke podrške značajno utiču na povećanje tehničkog potencijala, pri čemu je logično pretpostaviti da će cene fosilnih goriva u budućnosti sve više rasti, a uporedo sa time će i tehnički potencijal biomase biti sve veći.

Slika 1.3 prikazuje koliko se biomase upotrebljava u pojedinim zemljama Evrope u proizvodnji energije.



Slika 1.3 Upotreba biomase u proizvodnji energije u pojedinim zemljama Evrope [6]

1.2 Ciklus ugljen-dioksida (CO₂ ciklus)

Sagorevanjem biomase, oslobađa se ugljenik koji se nalazi u biomasi, i koji se u obliku ugljen-dioksida emituje u atmosferu. Međutim, smatra se da ugljen-dioksid nastao sagorevanjem biomase ne utiče na klimatske promene, jer je to upravo ona količina ugljen-dioksida koju je biljka apsorbirala tokom svog životnog ciklusa. Na *slici 1.4* prikazan je ciklus ugljen-dioksida.



Slika 1.4 CO₂ ciklus

Za stvaranje 1 m³ drveta, drvo uzima 1 tonu ugljen-dioksida iz atmosfere, od čega se 250 kg ugljen-dioksida uskladišti u samom drvetu, a 750 kg kiseonika se vrati nazad u atmosferu [6]. Kada drvo uquine, nastaje postepeni proces dekompozicije, u kome mikroorganizmi razbijaju ugljenične lance u drvetu na njihove sastavne delove.

U zavisnosti od tipa drveta i lokacije, ovaj proces traje od jedne do sedam godina. U prirodnom procesu truljenja, koje se još naziva i hladno sagorevanje, oslobađa se ista količina energije, koja je prvobitno bila apsorbirana kroz proces fotosinteze.

Uopšte, ovaj proces truljenja oslobađa istu količinu ugljen-dioksida, kao i kada bi drvo bilo upotrebjeno za proces sagorevanja. Zbog toga je, svakako, prednost kontroliranog procesa sagorevanja, nad prirodnim procesom oksidacije, u tome što je kontrolisani proces sagorevanja praćen i dobijanjem korisne energije.

Red veličine oslobađanja energije procesom sagorevanja je nekoliko časova, što predstavlja relativno visoku gustinu energije, u odnosu na proces prirodnog truljenja, koji traje nekoliko godina, što dovodi do toga da je energija nastala truljenjem veoma niske gustine, i da se ne može praktično iskoristiti.

Ova razlika u brzini oslobađanja ugljen-dioksida, nema nikakvog značaja kada su u pitanju klimatske promene, koje zahtevaju znatno duže vremenske periode. Zbog toga se sagorevanje bioenergetskih izvora smatra CO₂ neutralnim.

1.3 Biogorivo (briketi-peleti)

Osnovne karakteristike pri upotrebi šumske ili drvne biomase kao energenta iste su kao i kod svakog goriva: hemijski sastav, toplotna moć, temperature samozapaljenja, temperature sagorevanja, fizička svojstva koja utiču na toplotnu moć (npr. gustina, vlažnost i dr.).

Osnovna veličina za proračun energije iz određene količine drveta jeste njegova toplotna moć. Najveći uticaj na toplotnu moć ima vlaga, zatim hemijski sastav, gustina i zdravost drveta, pri čemu na toplotnu moć nedrvne biomase podjednako utiču udeo vlage i pepela. Udeo pepela u nedrvenim biljnim ostacima može iznositi i do 20% tako da značajno utiče na toplotnu moć.

Danas se najčešće kao biomasa koristi drvna masa koja je nastala kao sporedni proizvod ili otpad ili ostaci koji se ne mogu više koristiti. Čak 60% biomase nastaje iz poljoprivredne proizvodnje, dok je 40% potencijala postoji u šumskoj masi [5].

Biomasa u vidu briketa ili peleta sagoreva i može se primenjivati kao gorivo kako za grejanje tako i za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije.

Pod biobriketima, prikazanih na *slici 1.5* podrazumeva se proizvod tehnološkog postupka briketiranja, kompaktna forma biomase koja ima daleko veću zapreminsku masu, nego što je to zapreminska masa materijala biomase od koga je biobriket napravljen. Sam postupak briketiranja se sastoji u presovanju lignoceluloznog materijala u što manju zapreminu pomoću presa.



Slika 1.5 Veličine i tipovi briketa

Briketiranjem se, između ostalog, postižu sledeći efekti:

- ❖ povećanje mase po jedinici zapremine (povećanje "gustine"),
- ❖ smanjuju se troškovi manipulacije i transporta,
- ❖ smanjuje se potrebna zapremina za skladištenje,
- ❖ biološki procesi kvarenja biomase su manje izraženi,
- ❖ povećava se efikasnost u procesu sagorevanja u odnosu na sagorevanje u rinfuznom stanju.

Sa druge strane, sam proces briketiranja ima i određene nedostatke, kao što su:

- ❖ potrebna je priprema materijala na određenu vlažnost i granulaciju,
- ❖ u izvesnim slučajevima su neophodni aditivi,
- ❖ mora se ulagati u novu tehnologiju koja je nužna za odvijanje procesa,
- ❖ neophodna je potrošnja energije.

1.4 Tehnologija pripreme i sagorevanja biomase

U zavisnosti od vrste, vlažnosti i krupnoće komada otpadne biomase, razlikuje se tehnologija, njena primena i način sagorevanja, odnosno tipovi (konstrukcija) ložišta kotlova u kojima se vrši sagorevanje. Za sagorevanje se uglavnom koriste klasične tehnologije sagorevanja:

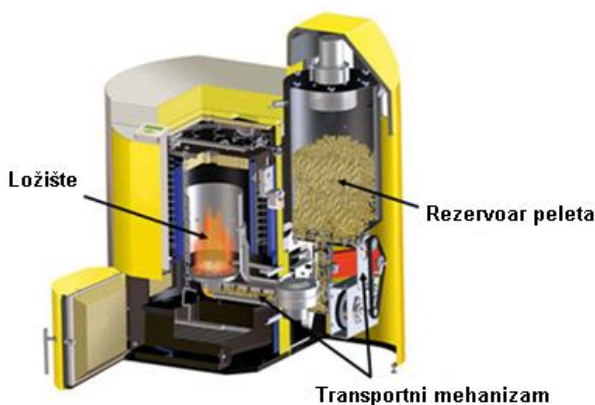
- ❖ na rešetci (nepokretnoj, pokretnoj, kosoj i stepenastoj),
- ❖ sagorevanje u letu,
- ❖ sagorevanje u mehurastom fluidizovanom sloju i
- ❖ sagorevanje u cirkulacionom fluidizovanom sloju.

Danas se, uglavnom, u primeni nalaze rešenja koja se baziraju na tehnologijama koje ne zahtevaju i tehnologijama koje zahtevaju specifičnu pripremu biomase.

Klasično rešenje sagorevanja peleta prikazano je na *slici 1.6* gde se transportnim mehanizmom reguliše količina peleta u ložištu. Priprema biomase za sagorevanje zavisi u određenoj meri i od snage kotlovskog postrojenja, tako da se razlikuju sistemi pripreme za:

- ❖ kotlove malih snaga,
- ❖ kotlove srednjih snaga,
- ❖ kotlove velikih snaga.

Direktno sagorevanje biomase u ložištima kotlova malih snaga najčešće se koristi za grejanje stambenih objekata individualnih domaćinstava. To su kotlovske jedinice čija se snaga kreće najčešće do 30 kW, a ređe do 50 kW i više (maksimalno do 100 kW) [5].



Slika 1.6 Klasično rešenje sagorevanja biomase u kotlu sa transportnim mehanizmom

Za loženje kotlovskih postrojenja velikih snaga (preko 1 MW) loženje je mehanizovano i obavezno se vrši priprema biomase, bilo na mestu potrošnje ili na drugom mestu. Neka od tih postrojenja su opremljena uređajima za mehaničko loženje čija konstrukcija zavisi od oblika biomase i njene pripreme za sagorevanje. To mogu biti uređaji koji u ložište ubacuju briketiranu biomasu ili biomasu u rasutom stanju (sagorevanje u fluidizovanom sloju).

1.5 Toplotna moć biomase

Toplotna moć biomase predstavlja količinu toplote koja se oslobodi pri potpunom sagorevanju biomase, pri čemu se razlikuje gornja toplotna moć (sagorljiva moć) H_u i donja toplotna moć H_d .

Razlika između gornje i donje toplotne moći jednaka je energiji potrebnoj za isparavanje vode koja je prisutna u samom biogorivu, kao i vode koja nastaje reakcijom vodonika iz biogoriva sa kiseonikom tokom procesa sagorevanja.

Ova zavisnost može se prikazati jednačinom [6]:

$$H_u = H_d + r \frac{9h + w}{100} [kJ / kg] \quad (1.1)$$

gde su:

r - entalpija isparavanja vode (2500 kJ/kg na 0°C),

h - sadržaj vodonika u gorivu [%],

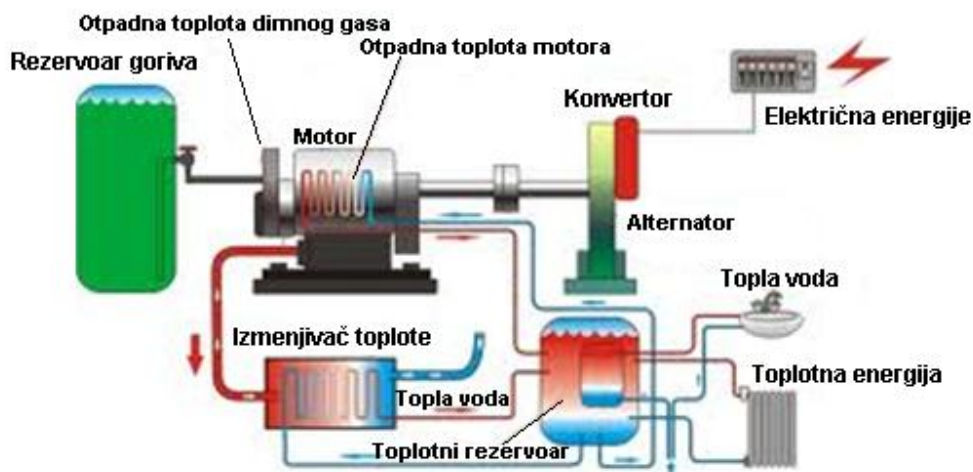
w - sadržaj vode u gorivu.

2. KOGENERACIJA

Pre više od trideset godina u razvijenim zemljama se počela širiti primena kogenerativnih postrojenja, odnosno postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije. Princip funkcionisanja takvih postrojenja odavno je poznat, a sada je došlo vreme njihove široke primene. Kogeneracija je dobila na značaju izgradnjom manjih postrojenja za autonomne potrebe pojedinih industrijskih preduzeća, čime se praktično potpuno izbegava inače značajan gubitak pri distribuciji električne energije.

Osnovu procesa kogeneracije ili kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije čini jedinstven termodinamički proces uz korišćenje samo jednog pogonskog goriva i korišćenje otpadne toplote koja nastaje kada se generiše električna energija u cilju proizvodnje tople vode i/ili pare. Para ili topla voda mogu se koristiti u tehnološkim procesima, za grejanje prostora, u pripremi tople potrošne vode ili za pogon rashladnih mašina pri hlađenju vazduha.

Termin kogeneracija generalno se vezuje za daljinsko grejanje i velike lokalne termoelektrane-toplane ili veća postrojenja instalirana u industriji kao i sam rad tih postrojenja, dok je termin CHP³ uglavnom vezan za implementaciju te tehnologije na manjim jedinicama i postrojenjima (univerzitetima, vojnim bazama, bolnicama, hotelima i javnim zgradama). Na slici 2.1 prikazana je funkcionalna šema sistema kogeneracije.



Slika 2.1 Funkcionalna šema sistema kogeneracije [7]

U većini kogeneracijskih postrojenja hemijska energija se pretvara u mehaničku i toplotnu. Mehanička energija se koristi za proizvodnju električne energije, dok se toplotna energija koristi za proizvodnju pare, zagrevanje vode ili vazduha.

³ Akronim za *Combine Heat and Power*

Kogeneracija koristi otpadnu toplotu, koja uvek nastaje prilikom dobijanja električne energije, čime se sprečava njeno ispuštanje u atmosferu. Prilikom konvencionalnih načina dobijanja električne energije, gotovo dve trećine energetskog potencijala se gubi na ovaj način.

Kogeneracija može da iskoristi većinu te (inače "bačene") toplotne energije, čime se dobija znatno bolja iskorišćenost goriva i značajne uštede, što sve rezultira u energetske uštedi od 20 do 40%.

Osnovna prednost kogeneracije je veće iskorišćenje energenta u odnosu na standardne elektrane koje služe samo za proizvodnju struje, odnosno industrijska postrojenja koja služe samo za proizvodnju pare ili vruće vode za tehničke procese. Glavni razlozi izgradnje kogeneracijskih postrojenja je mogućnost proizvodnje jeftinije električne energije, čime kogeneracijska postrojenja sama sebe isplaćuju. Osim toga, industrijskim postrojenjima kogeneracijska postrojenja pružaju autonomiju u slučaju ispada glavne mreže. Za neke industrijske procese, ekonomski gubici u slučaju zaustavljanja procesa zbog nestanka električne energije su izuzetno veliki.

Kogeneraciona postrojenja su efikasna postrojenja raspoređena na pojedinim lokacijama proizvodnih preduzeća (ili njihovih grupa), čime se praktično potpuno izbegava inače značajan gubitak pri distribuciji električne energije. Usavršavanjem postrojenja za spregnutu proizvodnju električne i toplotne energije manjih snaga stiču se povoljni uslovi za njihovu lokalnu i autonomnu primenu. Povećanjem primene ovakvih postrojenja bitno se rasterećuje distributivna električna mreža.

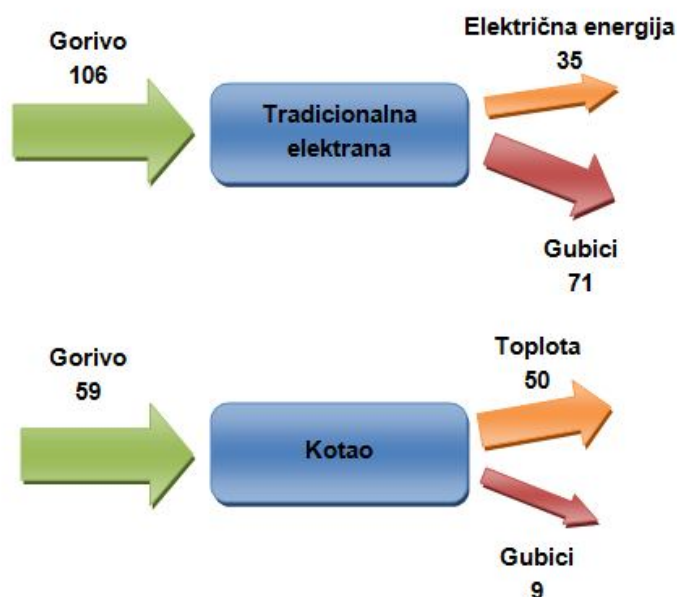
Kao gorivo može se koristiti prirodni gas, biomasa (*slika 2.2*), drvna građa ili vodonik (u slučaju gorivnih ćelija), a izbor tehnologije za kogeneraciju zavisi od raspoloživosti i cene goriva.



Slika 2.2 Gorivo sistema kogeneracije – biomasa (pelet) [8]

Na *slici 2.3* prikazan je primer proizvodnje 35 jedinica električne energije i 50 jedinica toplotne energije na konvencionalan način. Za proizvodnju 35 jedinica električne energije potrebno je uložiti oko 106 jedinica primarne energije (*slika 2.3*). Razlika od 106 do 35 jedinica je prosečan gubitak u klasičnim termoelekttranama.

Kada je u pitanju proizvodnja toplotne energije, stepen korisnosti energetske transformacije je nešto bolji i za proizvodnju 50 jedinica finalne toplotne energije potrebno je utrošiti oko 59 jedinica primarne energije. To znači da je za željenu količinu finalne energije od (35+50) 85 jedinica potrebno utrošiti ukupno (106 + 59) 165 jedinica primarne energije [1].

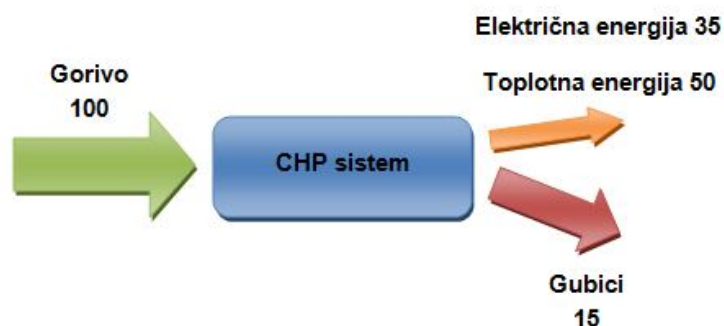


Slika 2.3 Konvencionalan način proizvodnje toplotne i električne energije [1]

U slučaju primene kogenerativnog postrojenja za isti primer proizvodnje, 35 jedinica električne i 50 jedinica toplotne energije, situacija je znatno povoljnija i gubici su značajno manji, što je prikazano na *slici 2.4*.

Koristeći neku od kogenerativnih tehnologija za proizvodnju iste količine električne i toplotne energije kao i u slučaju konvencionalne proizvodnje (*slika 2.3*), potrebno je utrošiti samo 100 jedinica primarne energije.

Razlika od predhodnih 165 jedinica je zaista velika. Ipak, mora se odmah reći da je osnovni problem kod kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije neophodnost da istovremeno imamo potrošača za oba oblika finalne energije. Osim toga, nije svaki oblik primarne energije pogodan za primenu u kogenerativnim postrojenjima, što ujedno predstavlja ograničenje za primenu sistema kogeneracije [1].



Slika 2.4 Kogenerativni sistem za proizvodnju električne i toplotne energije [1]

Odnos proizvedene električne i toplotne energije menja se od slučaja do slučaja. Tip kogenerativnog postrojenja mora biti pažljivo odabran, a odgovarajući radni režim se utvrđuje tako da se zadovolje zahtevi u što je moguće većoj meri.

2.1 Prednost i efikasnost sistema kogeneracije

Osnovna prednost kogeneracije je povećana efikasnost energenta u odnosu na konvencionalne elektrane koje služe samo za proizvodnju električne energije pomoću industrijskih postrojenja ili koji služe samo za proizvodnju pare ili vruće vode za tehničke procese.

Osnovne činjenice i pogodnosti koje se trebaju vrednovati i koje treba uvažiti pri analizi mogućnosti primene kogenerativnih postrojenja su da ovakav sistem:

- ❖ ublažava problem visokih cena energenata. Kogeneracija ih smanjuje udvostručavanjem ili utrostručavanjem efikasnosti procesa korišćenja goriva,
- ❖ smanjuje oslobađanje štetnih emisija, koristeći dva ili tri puta manje goriva,
- ❖ povećava pouzdanost elektroenergetskog sistema. Kogeneracija isključuje opšte prekide koji se mogu javiti kao posledica problema u javnom prenosu i distribuciji;
- ❖ rasterećuje elektro-distributivni kapacitet mreže,
- ❖ omogućava autonomnost snabdevanja električnom energijom,
- ❖ pozitivno utiče na ekologiju,
- ❖ omogućava brži dolazak do nedostajućih količina električne energije. Za izgradnju novih elektrana potrebne su godine. Kogenerativno postrojenje se pušta u rad obično za manje od dve godine, a manja postrojenja (do 2 MW) i za šest meseci.

Kogenerativna postrojenja su našla primenu kako u industriji (hemijska i farmaceutska, industrija papira, prehrambena industrija i šećerane, drvna, metalna, hortikultura i sl.) tako i u zgradarstvu (stambene zgrade, hoteli i restorani, tržni centri, škole, aerodromi, poslovne zgrade i sl.).

Što se tiče efikasnosti kod odvojenog postupka gde se toplotna energija proizvodi u kotlu sa stepenom efikasnosti $\eta = 90\%$ koristi se 53% toplotne u odnosu na 59% hemijske energije goriva, dok su toplotni gubici zračenja 6% [9].

Električna energija proizvodi se u klasičnoj elektrani sa stepenom efikasnosti $\eta = 36\%$ i dobija se 34% električne energije, u odnosu na 100% hemijske energije goriva, gubitak u razvodu električne energije je 2%.

Od 159% hemijske energije goriva, kod odvojenog procesa se koristi 53% za toplotnu, 34% za električnu energiju, a ukupni je gubitak 66 %. Kod kogeneracijskih postrojenja od 100%

hemijske energije goriva za toplotnu energiju koristi se 53%, za električnu energiju 34%, a ukupni gubitak je oko 13% [9].

Dakle, stepen efikasnosti goriva kod kogeneracije 87%, a gubitak 13%, dok za spojeni proces, ako se želi ostvariti isti učinak, treba uz gubitak od 72% utrošiti čak 59% (ukupni indeks dakle 159%) više goriva. Toplotna energija koja se dobija hlađenjem motora, ulja za podmazivanje, gasne mešavine i dimnih gasova, koristi se za grejanje objekata ili za tehnološke potrebe [9].

Prilikom izgradnje kogeneracijskog postrojenja, ključni kriterijum pri dimenzionisanju treba biti toplotni zahtev procesa za koji se koristi toplota. Predimenzionisano postrojenje načelno je skuplje i ima niži stepen efikasnosti.

Kao gorivo se uglavnom koristi prirodni gas zbog niskih emisija i široke dostupnosti. Kako bi se omogućila proizvodnja električne energije, potrebno je proizvoditi toplotnu energiju na višoj temperaturi i pritisku nego što to zahtevaju tehnički procesi za koje se ona koristi.

Proizvodnja, a tako i potrošnja električne i toplotne energije događaju se istovremeno. Kao kriterijum efikasnosti, potreba istovremene proizvodnje toplotne i električne energije treba iznositi barem 4500 sati za godinu. U slučaju visokih cena električne energije moguć je isplativ rad i sa samo 2200 sati za godinu, dok najveću ekonomičnost kogeneracijska postrojenja pokazuju u slučaju stalnog rada tokom cele godine (8760 sati u godini) [9].

Ekonomska isplativost kogeneracijskog postrojenja usko je vezana uz baznu cenu, i troškove održavanja. Što su oni veći, to je manja verovatnoća da će postrojenje biti isplativo.

2.2 Pregled tehnologija kogenerativnih postrojenja

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od tri osnovna dela:

- ❖ glavni pokretač,
- ❖ električni generator i
- ❖ komponente za prikupljanje otpadne toplote.

Glavni pokretač u kogeneracijskom postrojenju je parna ili gasna turbina. Njegova je funkcija pretvaranje energije dobijene sagorevanjem goriva u mehaničku energiju. Ona se potom uglavnom koristi za pokretanje generatora, ali se može koristiti i za pokretanje ostalih rotirajućih pogona. Pokretač mogu biti i gorive ćelije. Iako nisu u mogućnosti predavati energiju na osovinu, njihova prednost je u tome što mogu proizvoditi električnu energiju u procesu bez sagorevanja za razliku od klasičnih goriva.

Postrojenje za prikupljanje otpadne toplote prikuplja neiskorišćenu toplotu iz glavnih pokretača kako bi se mogla korisno iskoristiti.

Postoji više vrsta kogeneracijskih postrojenja po načinu korišćenja električne i toplotne energije. Uglavnom se koriste primarno za proizvodnju električne energije, a potom se nakon prolaska kroz turbinu toplota odvodi u tehnološki proces.

Moguć je i obrnut postupak, gde se nakon industrijskog procesa toplota koristi za grejanje pare koja se odvodi u turbinu. Takva su postrojenja pogodna samo u industriji gde je dostupna otpadna toplota visoke temperature. Stoga su postrojenja prve vrste puno rasprostranjenija.

Važno je napomenuti i mogućnost trigeneracije, odnosno korišćenje dela energije za hlađenje. Prilikom izgradnje postrojenja važno je odrediti koji će se ciklus izvoditi. Sledeći korak je odabir glavnog pokretača, prema nekim od sledećih kriterijuma: snaga postrojenja, primarni i sekundarni izvori goriva, kvalitet vazduha i zahtevi u pogledu emisije dimnih gasova, ograničenja prostora, proizvodnja buke, ostrvski rad ili spajanje sa mrežom.

Kogenerativna postrojenja mogu biti različitih snaga i kao takva mogu se koristiti u toplanama-termoelektranama za daljinsko grejanje i kao nešto manja postrojenja koja će se koristiti u industriji ili u zgradarstvu uz mogućnost da se osim zadovoljenja sopstvenih potreba za energijom podmiruju i toplotne potrebe obližnjih subjekata.

U novije vreme razvijaju se kogenerativna postrojenja vrlo malih snaga koja se mogu koristiti za proizvodnju energije i u individualnim kućama. Za te potrebe razvijene su takozvane mikro-turbine čije su dimenzije slične jednoj prosečnoj mašini za posuđe. U *tabeli 2.1* prikazana je klasifikacija kogenerativnih postrojenja u zavisnosti od instalisane snage.

Mikro	$< 50 \text{ kW}_e$
Mini	$< 500 \text{ kW}_e$
Male	$< 2000 \text{ kW}_e$
Velike	$< 50000 \text{ kW}_e$
Najveće	$> 50000 \text{ kW}_e$

Tabela 2.1 Klasifikacija kogenerativnih postrojenja u zavisnosti od instalisane snage [1]

Na tržištu postoji veliki broj tehnologija koje su namenjene za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije. Najčešće korišćene tehnologije za pogon ovih postrojenja su:

- ❖ motori sa unutrašnjim sagorevanjem (dizel i gasni motori),
- ❖ parne i gasne turbine,
- ❖ mikro-turbine,
- ❖ Stirlingov motor,
- ❖ gorive ćelije.

U praksi su najčešće korišćeni gasni motor ili gasne turbine zbog svojih tehničkih karakteristika i cene. Za njih se može reći da su jedine komercijalne kogenerativne tehnologije. Ove tehnologije su pogodne za kapacitete od 500 kW_e do 10-15 MW_e što se u industriji i zgradarstvu uglavnom i zahteva.

Komercijalno dostupne kogeneracione tehnologije su parne i gasne turbine, mikro-turbine, motori s unutrašnjim sagorevanjem, Stirlingov motor i gorive ćelije, u širokom rasponu snage od 1 kW_e za Stirlingov motor do 250 MW_e za gasne turbine.

Praktično sva goriva koja se koriste u proizvodnji toplotne energije mogu biti upotrebljena u kogenerativnim procesima. Međutim, u praksi se najčešće koristi prirodni gas, prvenstveno iz ekoloških razloga. Čvrsti otpad, pojedini industrijski gasovi i biomasa, nakon odgovarajućeg tretmana mogu stvoriti gasovito gorivo pogodno za korišćenje u gasnim motorima.

Goriva sa velikim sadržajem sumpora nisu pogodna za upotrebu, iz razloga što zagađuju okolinu i uzrokuju koroziju delova postrojenja.

Kogenerativna postrojenja mogu biti projektovana tako da koriste više od jednog goriva, u nekim slučajevima čak i do četiri, kako bi se realizovala mogućnost izbora najjeftinijeg goriva. Upotreba goriva niskog kvaliteta dovodi do smanjenja troškova za gorivo, ali, sa druge strane, prisutni su znatni dodatni troškovi za rukovanje gorivom i kontrolisanje sagorevanja kako bi se zadovoljili ekološki normativi.

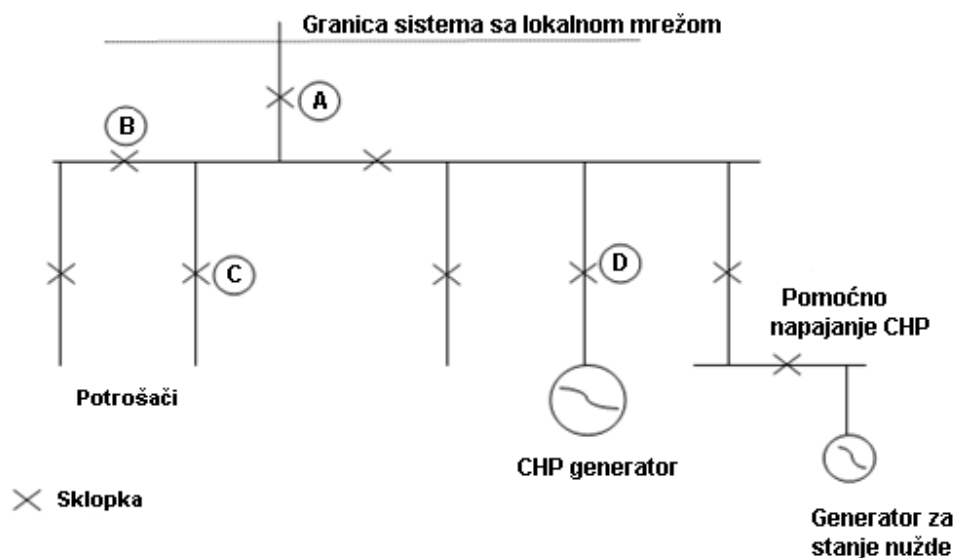
2.3 Instalacija kogenerativnih postrojenja

Postoje dva načina priključenja kogeneracionog postrojenja sa postojećim sistemom:

1. paralelni mod,
2. ostrvski mod.

Da bi se višak proizvedene električne energije iz sistema kogeneracije mogao prodati, neophodno je povezivanje lokalne elektro-mreže sa lokalnim elektro-distributerskim sistemom (*slika 2.5*).

Ovo se omogućava ugradnjom opreme za prekid veze između sistema kogeneracije i lokalne mreže i merača količine isporučene električne energije u lokalnu elektro-distributivnu mrežu i merača količine usmerene subjektu. Ovakav način se u literaturi naziva paralelnim modom funkcionisanja.



Slika 2.5 Paralelni rad kogenerativnog postrojenja [1]

U paralelnom modu sve sklopke su zatvorene. Ako dođe do otkaza u snabdevanju iz lokalnog sistema, kogenerativni generator može da radi u ostrvskom modu. Tada se otvara sklopka A. Ukoliko snaga kogenerativnog generatora nije dovoljna za sve korisnike, otvara se ili zatvara neka od sklopki B i C.

Kada se ponovo uključi lokalni sistem, kogenerativni generator ulazi u sinhronizaciju sa mrežom i sklopka A se zatvara u cilju uspostavljanja paralelnog rada.

Ako u slučaju ispada lokalne mreže dođe do otkaza kogenerativnog postrojenja, ono se može restartovati korišćenjem generatora za slučaj nužde.

Pod funkcionisanjem sistema u ostrvskom modu podrazumeva se rad nekoliko postrojenja koja su instalisana bez konekcije na lokalnu distributivnu električnu mrežu, što je uzorkovano najčešće lokacijom samog preduzeća ili zbog nekih posebnih okolnosti. U ovakvom načinu povezivanja smanjuju se troškovi za instalaciju konekcije sa lokalnom elektro-mrežom, ali se ne može računati na podršku iz mreže kada je to potrebno.

Da bi se mogao postići određeni stepen sigurnosti i konstantno zadovoljile potrebe za električnom energijom, neophodno je instalisati veći kapacitet kogenerativnog postrojenja nego što bi to bio slučaj sa primenom paralelnog moda.

Mnogi od sistema koji funkcionišu sa paralelnim modom, povremeno se prebacuju na ostrvski mod i to u slučaju kada lokalna mreža pretrpi neki otkaz i nije u mogućnosti da snabdeva sistem električnom energijom [1].

2.4 Uticaj primene kogeneracije na životnu sredinu

Štetni gasovi, gasovi staklene bašte i čestice čija emisija mora biti u zakonski dopuštenim granicama su: ugljen-dioksid (CO_2), ugljen-monoksid (CO), sumpor-dioksid (SO_2), azotni oksidi (NO_x), nesagoreli ugljovodonici, opasne zagađujuće materije, ostatak sagorevanja pepeo.

Sa sigurnošću se može reći da kogenerativna postrojenja u ovoj oblasti imaju prednosti u odnosu na klasičan način proizvodnje električne i toplotne energije.

Visina dozvoljenih emisija zavisi od državnog pravnog okvira. U zavisnosti od nastanka emisije zagađujućih materija, one se mogu podeliti na tri veće kategorije:

- ❖ emisije koje se odnose na sastav goriva: SO_x , CO_2 , neke opasne zagađujuće materije,
- ❖ emisije koje se odnose na nepotpuno sagorevanje – CO , nesagoreli ugljovodonici,
- ❖ emisije koje su posledica sagorevanja – NO_x .

Emisije određenih zagađujućih materija kao što su SO_x , CO_2 i pepeo zavise od vrste goriva. Količina emitovanog CO_2 u slučaju sagorevanja sa dovoljnom količinom vazduha zavisi od udela ugljenika u gorivu. Međutim, što je sistem transformacije, odnosno korišćenja energije efikasniji, manja je emisija CO_2 po jedinici energije koja se upotrebi u procesu.

Primena kogenerativnih postrojenja ima dvostruki pozitivan uticaj na zaštitu životne sredine:

- ❖ niža potrošnja primarnog goriva po jedinici proizvedene energije u odnosu na klasična postrojenja, a samim tim i očuvanje prirodnih resursa,
- ❖ zamena goriva sa visokim emisijama ugljen-dioksida, sumpor-dioksida i azotnih oksida čistijim gorivom.

U poređenju sa elektranom na ugalj i sopstvenim kotlarnicama, motor na prirodni gas će redukovati emisiju ugljen-dioksida za oko 50% po jedinici dovedene energije za istu količinu proizvedene energije. Takođe, upotrebom prirodnog gasa se praktično eliminiše emisija sumpor-dioksida u odnosu na ugalj, iako nastaju azotni oksidi tokom rada motora na prirodni gas.

2.5 Zemlje u Evropi sa relativno razvijenom kogeneracijom

Zemlje sa najvećim udelom kogeneracijskih postrojenja u energetske sektoru su Danska, Finska, Holandija i Austrija. Udeo kogeneracijske proizvodnje električne energije u Danskoj iznosi oko 40%, Finskoj oko 32%, Austriji 23% i u Holandiji oko 38% [1].

Razlog ovako visokom udelu leži pre svega u strateškim odlukama ovih zemalja u prošlosti da podstiču kogeneraciju. Danas je situacija ipak malo drugačija i kogeneracija se podstiče prvenstveno zbog ekoloških efekata. Procenjuje se da najveći potencijal za razvoj kogeneracije u ovim zemljama leži u malim kogeneracijskim postrojenjima koja bi se koristila za grejanje individualnih kuća. To posebno odnosi na Dansku i Holandiju.

Najzastupljenije gorivo koje se primenjuje u kogeneracijskim postrojenjima u navedenim zemljama je prirodni gas. Razvijena gasna infrastruktura takođe je pogodovala rastu udela kogeneracijskih postrojenja.

U svim ovim zemljama do sada je već izvršena liberalizacija tržišta električnom energijom i to je imalo raznolik uticaj na kogeneracijska postrojenja. Ipak kogeneracija je kod njih duboko ukorenjena i sve procene ukazuju na dalji rast instaliranih kogeneracijskih postrojenja u budućnosti.

Među zemljama Evrope sa slabo razvijenom kogeneracijom najčešće se ubrajaju Francuska, Grčka, Velika Britanija, Irska i Švedska [1].

Francuska ima vrlo zastupljenu nuklearnu energiju, pri čemu ne postoji politika države koja bi podsticala kogeneraciju. Ovi faktori su uticali na činjenicu da se danas samo 2% električne energije dobija iz kogeneracije.

Grčka i Irska međusobno su poprilično sličan slučaj. Obe zemlje imaju vrlo mali udeo kogeneracijski proizvedene energije iako postoji relativno veliki potencijal za razvoj kogeneracije. Takođe je karakteristično da se liberalizacija tržišta električnom energijom odvija dosta sporo. U obe zemlje predviđa se najveći rast udela kogeneracije velikih snaga u industrijskom sektoru.

3. MIKRO-KOGENERACIJA

Mikro-kogeneraciona postrojenja su postrojenja čija je instalisana proizvodna snaga manja od 50 kW_e [10].

Umesto da se svo gorivo troši za potrebe grejanja, u mikro-kogeneracionim postrojenjima, jedan deo se koristi za proizvodnju električne energije. Ova energija može se koristiti u domaćinstvu i/ili uz odobrenje distributivne mreže da se proda ili preuzme nazad.

Mikro-kogeneraciono postrojenje ima istu efikasnost konverzije iz gasa u toplotu za grejanje kao kod konvencionalnog kotla na gas, a to je cca 80%. Međutim, cca 10 ÷ 15% energije u mikro-kogeneracionim postrojenjima se pretvara u električnu energiju, što izaziva mnogo veću ekonomsku izvodljivost od toplote koja se stvara sagorevanjem gasa u kotlu.

Postoje različiti koncepti realizacije mikro-kogeneracije (*tabela 3.1*). Zbog instalirane električne snage do 50 kW_e, mikro-kogeneraciona postrojenja uglavnom koriste sledeće vrste tehnologije: motori sa unutrašnjim sagorevanjem (dizel/gasni motori), Stirlingov motor, mikro-gasna turbina, gorive ćelije itd. [11].

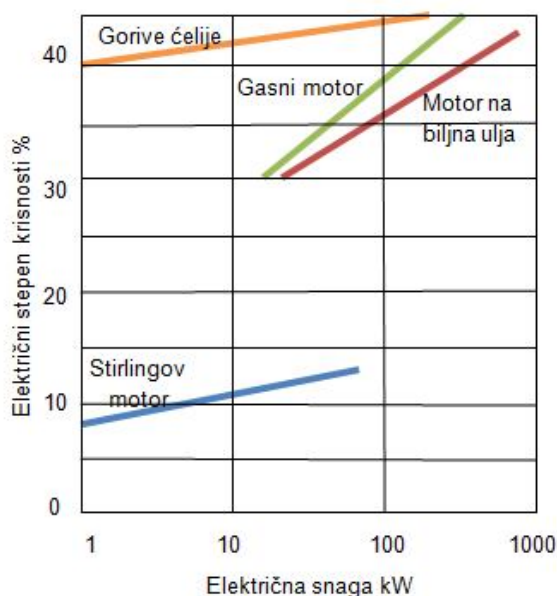
		<i>Dizel/gasni motor</i>	<i>Mikro-turbina</i>	<i>Stirlingov motor</i>
<i>Elektična efikasnost</i>	%	30-38	15-35	10-35
<i>Termička efikasnost</i>	%	45-50	50-60	50-60
<i>Ukupna efikasnost</i>	%	75-85	75-85	75-85
<i>Proizvodnja toplote</i>	°C	85-100	85-100, para	60-80
<i>Radni vek</i>	<i>h</i>		50000-75000	50000-60000

Tabela 3.1 Karakteristike tehnologija mikro-kogeneracionih postrojenja [11]

Današnji dizajn i razvoj takve tehnologije ima za cilj da postigne nižu cenu i emisije staklene bašte sa visokom efikasnošću. Izbor tehnologije zavisi od vrste goriva, potrebne snage i dostupnosti kogenerativnog postrojenja čije karakteristike variraju u zavisnosti od cene sistema, troškova grejanja, uticaja na životnu sredinu, pristupačnosti, lako transportovanje i skladištenje, održavanje i životni vek.

Izvori toplote i goriva koja se koriste kod mikro-kogeneracionih postrojenja su: biomasa, tečni naftni gas, biljno ulje, solarna toplota, prirodni gas i drugi. Budućnost mikro-kogenerativnog sistema zavisiće od cene goriva, koja direktno utiče na njihovu profitabilnost.

Mikro-kogeneraciono postrojenje je efikasnije ako je mesto potrošnje bliže mestu proizvodnje, dok mu korisnost pada sa udaljenošću potrošača. Na *slici 3.1* prikazana je električna snaga i stepeni korisnosti pojedinih sistema mikro-kogeneracije.



Slika 3.1 Područja električnih snaga i stepena korisnosti pojedinih tehnologija mikro-kogeneracije [12]

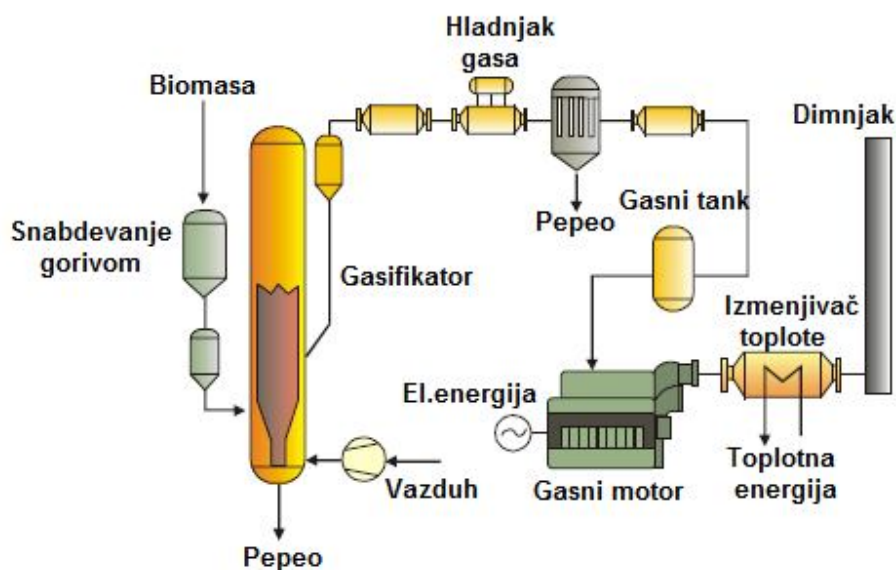
3.1 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (dizel i gasni motori)

Dizel ili gasni motor predstavlja standardni motor pogonjen od strane alternatora koji pretvara mehanički rad proizveden na osovini motora u električnu energiju. Toplota izduvnih gasova, tj. toplota koja nastaje tokom sagorevanja prilikom stvaranja električne energije koristi se za snabdevanje toplotnom energijom u svrhu grejanja [11].

Potencijalna goriva zasnovana na biomasi za dizel i gasne motore su biogas, zemni gas, bioulja, kao ulje iz pirolize i gas iz gasifikacije biomase.

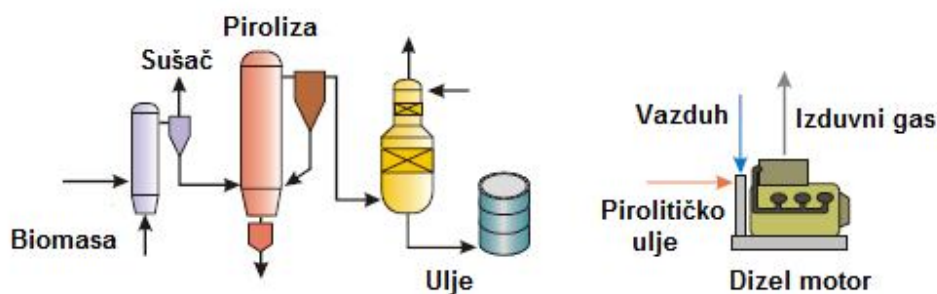
Gasifikacija biomase predstavlja poslednju generaciju procesa pretvaranja energije iz biomase, i na taj način proizvodnja električne energije zasnovanoj na fiksnom gasifikatoru spojenim sa dizel/gasnim motorom (*slika 3.2*) predstavlja predmet mnogih istraživačko razvojnih projekata u Evropi u poslednjih nekoliko godina.

Najveći broj tehnologija koje su razvijene ili čiji je razvoj u toku zasnovane su na neznatno modifikovanom klasičnom inverznom gasifikatoru.



Slika 3.2 Sistem gasifikatora biomase povezan sa gasnim motorom [11]

Primena dizel motora za mikro-kogeneraciju pomoću biomase uključuje proizvodnju pirolitičkog ulja u znatnom obimu i distribuciju ovog bio-ulja u mala postrojenja za proizvodnju električne energije (slika 3.3). Pirolitičko ulje se proizvodi iz biomase u postrojenju za proizvodnju pirolitičkog ulja. Nakon proizvodnje ulje se transportuje do dizel motora i koristi u generaciji snage pomoću dizel motora.



Slika 3.3 Dizel motor pogonjen pirolitičkim uljem [11]

Anaerobna digestija je dekompozicija vlažne i zelene biomase kroz aktivnost bakterija u odsustvo kiseonika kojom se stvara gasna smeša od metana i ugljen-dioksida, tj. biogas. Ovaj biogas može se koristiti u gasnim/dizel motorima bilo za stvaranje mehaničke snage ili električne energije. Kada se koristi biogas mikro-kogeneracija je dokazano energetska efikasna. Otpadna toplota generisana u motoru koristi se za grejanje vode.

Dizel motori na biljna ulja za potrebe mikro-kogeneracije, su u opsegu snaga od 30 kW_e do 500 kW_e. Manji motori preuzeti su iz motornih vozila, dok su motori većih snaga, do cca 3 MW_e, brodski motori, pri čemu je na svim bilo potrebno obaviti određene prepravke, kako bi se

u njima moglo sagorevati biljno ulje. Električni stepeni korisnosti dizel motora za biljna ulja manjih snaga, do 150 kW_e, iznosi cca 30, a termički stepen korisnosti do 50% [13].

Gasni motor (*slika 3.4*) je klipni motor sa unutrašnjim sagorevanjem i proizvodi se u varijantama koje kao gorivo koristi isključivo gasove – prirodni gas, biogas. Gorivo sagoreva u radnom prostoru motora i proizvodi se mehanički rad. Ovaj mehanički rad prenosi se na električni generator, koji je spregnut sa gasnim motorom. Mikro-kogeneracija se ostvaruje iskorišćenjem otpadne toplote ulja za podmazivanje, vode iz hladnjaka koji se hlade strujnim krugom vode u sistemu 60/90° C, a toplotna energija koju nosi ova voda koristi se za zagrevanje vode za grejanje ili sanitarne vode [13].



Slika 3.4 Gasni motor [13]

Gasni motori dostigli su tržišnu zrelost. Osim gasnih motora pogonjenih biogasom, postoje motori veoma slične konstrukcije sa pogonom na prirodni gas, propan, koji su u potpunosti prilagođeni vrsti goriva koju koriste.

3.2 Stirlingov motor

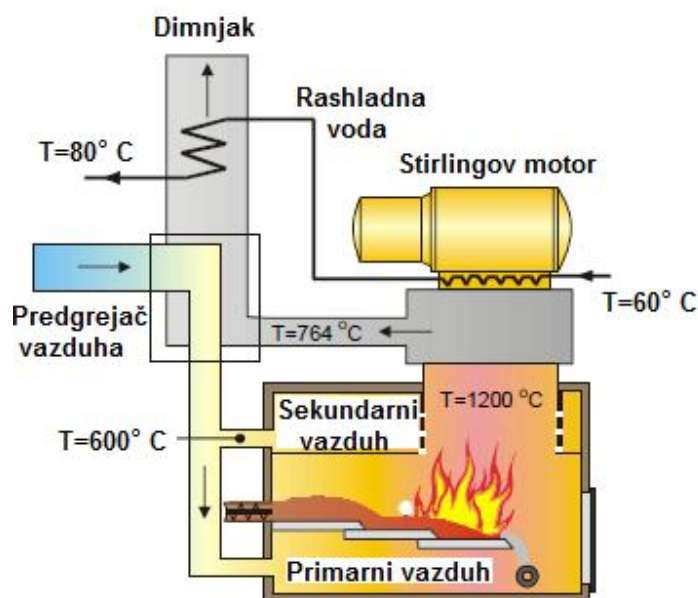
Stirlingov motor je obećavajuća mikro-kogeneraciona tehnologija za proizvodnju električne i toplotne energije. Sistem je zasnovan na zatvorenom ciklusu, gde se radni fluid naizmenično komprimuje u hladnom i ekspandira u vrućem cilindru.

Stirlingov motor predstavlja klipnu mašinu sa zatvorenim ciklusom, gde radni medijum ostaje unutar radnog cilindra. Klasifikuje se kao motor sa spoljašnjim sagorevanjem, iako nije pravilo da se izvor toplotne energije obezbeđuje sagorevanjem (moguće je korišćenje solarne, geotermalne ili nuklearne energije).

Prednost Stirlingovog motora u odnosu na motor sa unutrašnjim sagorevanjem je ta što se toplota ne dovodi u ciklus sagorevanjem goriva unutar cilindra nego se prenosi pomoću izmenjivača toplote na isti način kao kod parnih kotlova. Sistem sagorevanja u Stirlingovom motoru zasnovan je na tehnologiji ložišta i na taj način smanjuje probleme vezane za sagorevanje tipične za čvrsta goriva.

Toplota oslobođena sagorevanjem goriva (temperature 680-780° C) prenosi se na radni fluid pomoću izmenjivača toplote dok toplota koja se oduzme od radnog fluida u izmenjivaču

toplote (temperature 25-75° C) šalje u sekundarni izmenjivač toplote u kotlu [11]. Princip rada Stirlingovog motora prikazan je na *slici 3.5*.



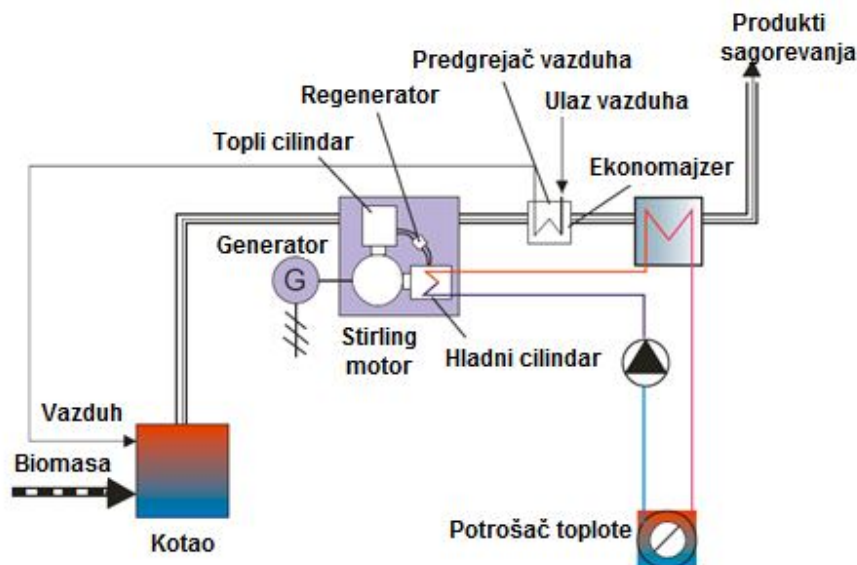
Slika 3.5 Princip rada Stirlingovog motora [11]

Radni fluid, koji se nalazi zatvoren u sistemu cilindra, najčešće je vazduh, vodonik, azot ili helijum. Ne postoji potreba za ventilima kao kod ostalih klipnih mašina, jer se radni fluid, tj. gas ne razmenjuje sa okolinom.

Kružni termodinamički proces Stirlingovog motora sastoji se od 4 glavna procesa: hlađenje, kompresija, zagrevanje i ekspanzija. Ovo se ostvaruje na taj način što se gas transportuje od toplog do hladnog izmenjivača. Topli izmenjivač je u kontaktu s spoljašnjim izvorom toplote, npr. gorionikom, dok je hladni izmenjivač u kontaktu sa toplotnim ponorom, npr. rebrastim vazдушnim hladnjakom. Mikro-kogeneracija se ostvaruje korišćenjem otpadne toplote, koja se odaje na hladnoj strani [13].

U tački master rada "Matematički model rada mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom" detaljno je opisan princip rada Stirlingovog motora kao i promene stanja radnog fluida u p - v i t - s dijagramu.

Šema mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom prikazana je na *slici 3.6*.



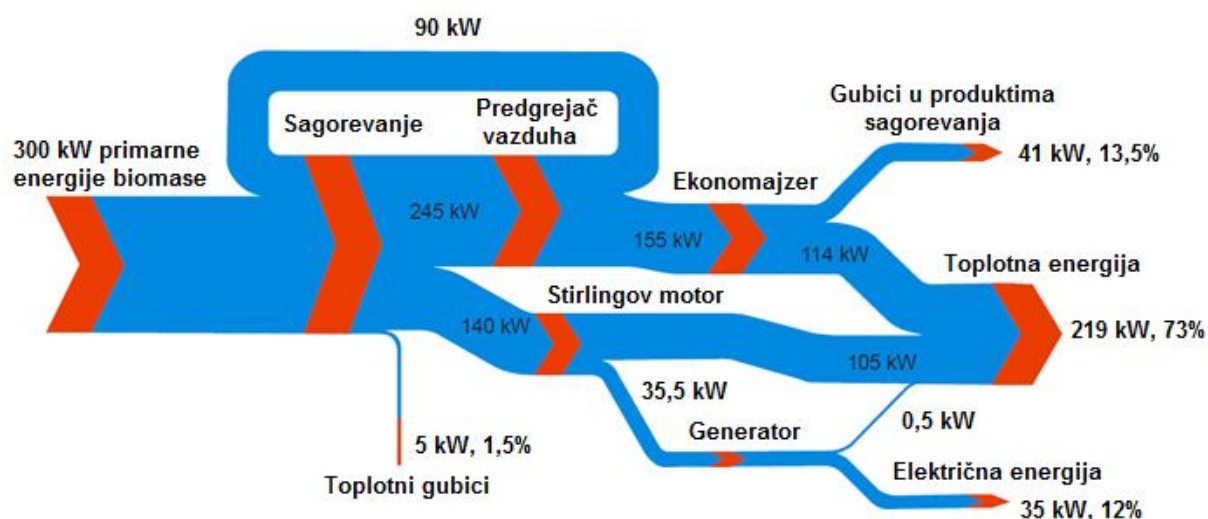
Slika 3.6 Šematski prikaz mikro-kogeneracionog postrojenja pomoću biomase sa Stirlingovim motorom [13]

Ukoliko se koriste male temperaturne razlike, potrebni su veliki maseni protoci grejnog i rashladnog fluida u eksternim izmenjivačima toplote. Tada su prisutni visoki pumpni gubici, što snižava ukupni stepen efikasnosti. Pošto grejni medijum ne dolazi u kontakt sa pokretnim delovima Stirlingovog motora, mogu se upotrebiti goriva čijim sagorevanjem se ne oštećuje unutrašnjost motora, koja se, inače, ne bi mogla upotrebiti u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem.

Pošto proces sagorevanja može da predstavlja izvor toplote, moguće je upotrebiti biomasu kao energent, čvrstu tečnu ili gasovitu, s tim da se konstrukcije međusobno razlikuju, usled različitih tehnologija sagorevanja.

Generalno, električni stepeni korisnosti Stirlingovog motora kreću se u intervalu od 10 do 35%, dok su termički stepeni korisnosti od 50 do 60%, tako da se dostiže maksimalni stepen korisnosti od 75 do 85%. Povećanje električnog stepena korisnosti može se izvesti na račun smanjenja termičkog stepena korisnosti, iskorišćenjem dela toplotne energije, na primer, za predgrevanje vazduha koji ulazi u proces sagorevanja [13].

Za primer mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom električne snage 35 kW_e, prikazan je Senkijev dijagram na slici 3.7.



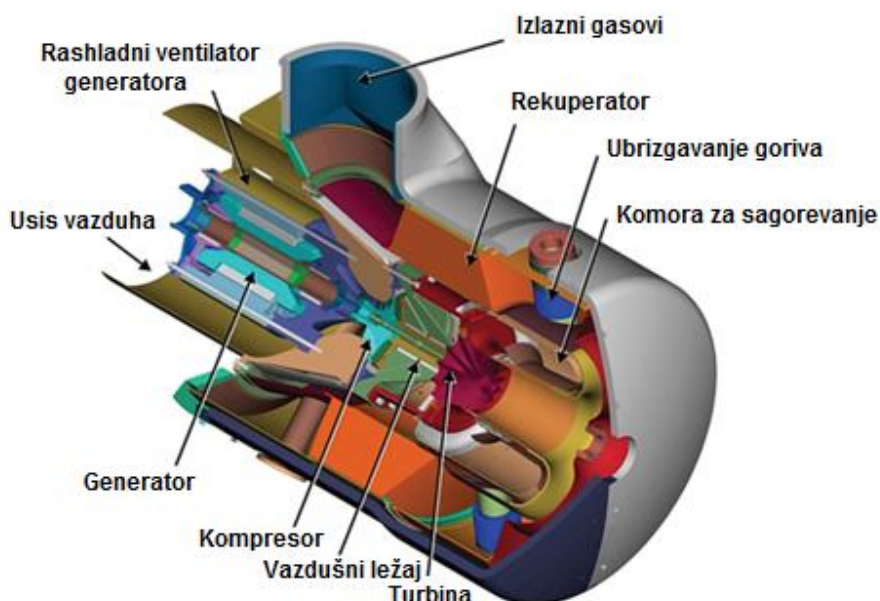
Slika 3.7 Senkijev dijagram sistema mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom [13]

Da bi se dobilo 35 kW_e snage i 219 kW_t, potrebno je uložiti 300 kW primarne energije biomase. Time je postignut električni stepen korisnosti od cca 12%, dok termički stepen korisnosti iznosi 73%. Ukupan stepen korisnosti, električni i termički, iznosi cca 85%. Stirlingov motor u praksi primenjuje se za snage manje od 100 kW_e [13].

3.3 Mikro-gasna turbina

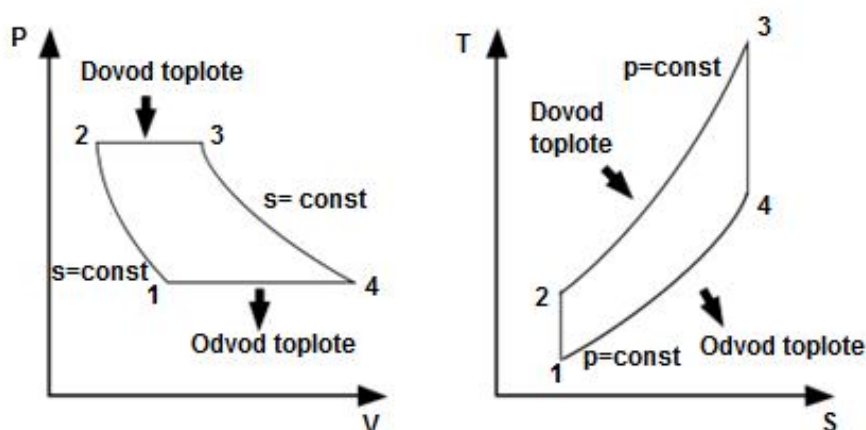
Pod konceptom mikro-turbine generalno se misli na gasne turbine sa izlaznim kapacitetom između 25-250 kW_e. Gas sagoreva u spoljašnjoj komori u kojoj se dovodi vazduh pod pritiskom iz kompresora. Gasovi koji nastaju sagorevanjem uvode se u turbinu gde se njihova energija pretvara u mehaničku energiju koja pokreće alternator. Preostala proizvedena energija u obliku vrelih gasova može se iskoristiti za dobijanje toplote preko izmenjivača toplote, tj. za zagrevanje pare ili tople vode [11].

Da bi se postigla dobra električna efikasnost uprkos niskim temperaturama obično se koristi rekuperator za predgrevanje vazduha za sagorevanje pomoću vrelih izduvnih gasova iz turbine. I gasna i tečna goriva mogu se koristiti u mikro-turbinama. Najčešće korišćeno gorivo u mikro-turbinama je prirodni gas. U smislu mikro-kogeneracionih tehnologija zasnovanih na sistemima gasifikacije iz biomase fiksni gasifikator spojen sa mikro-turbinom je sistem koji je najviše istraživani. Mikro-gasna turbina sa svojim osnovnim delovima prikazana je na slici 3.8.



Slika 3.8 Mikro-gasna turbine sa osnovnim delovima [14]

Mikro-turbine rade po istom termodinamičkom ciklusu, kao i gasne turbine⁴, koji je prikazan na slici 3.9. Ranije su ove vrste gasnih turbine imale veoma nizak električni stepen korisnosti. Međutim, razvijena su tehnička rešenja sa višim stepenima korisnosti, pa mikro-turbine mogu da koriste potrošači energije manjih snaga i na taj način mogu biti potpuno energetski nezavisni [15].



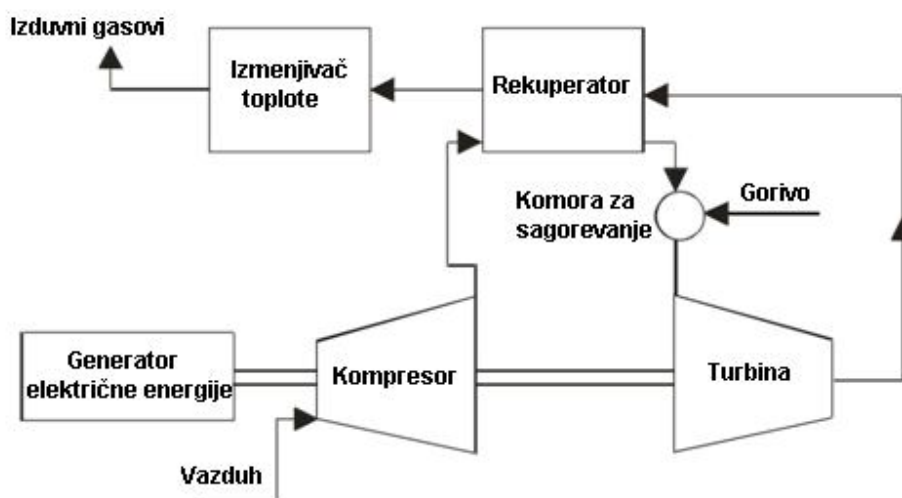
Slika 3.9 Brayton-ov ciklus prikazan u p-v i t-s dijagramu [16]

⁴ Princip rada gasnih turbina zasnovan je na Brayton-ovom ciklusu

Idealan Brajtonov ciklus, turbinskog motora:

- ❖ izentropski proces - vazduh se zagreva u kompresoru, gde se sabija na veći pritisak (kriva 1-2),
- ❖ izobarski proces - komprimovani vazduh zatim prolazi kroz komore za sagorevanje, gde zajedno sa gorivom učestvuje u procesu sagorevanja, sa oslobađanjem toplotne energije pri konstantnom pritisku (kriva 2-3),
- ❖ izentropski proces - zagrejani gas pod pritiskom oslobađa energiju, i širi se kroz turbinu. Dobijena energija na turbini se pretvara u rad (kriva 3-4),
- ❖ izobarski proces - oslobađanje toplote gasa u atmosferu (kriva 4-1).

Principijelna šema rada mikro-turbine u sistemu mikro-kogeneracije prikazana je na slici 3.10. Okolni vazduh se usisava uz pomoć centrifugalnog kompresora koji ga sabija i nakon toga se u rekuperatoru dogreva na cca 150° C, gde mu se predaje toplota produkata sagorevanja nakon izlaska iz turbine, čija je temperatura cca 650° C [13].



Slika 3.10 Šematski prikaz rada mikro turbine [13]

Upotrebom rekuperatora, električni stepen korisnosti se udvostručuje. U komori za sagorevanje mešaju se pregrejani vazduh i gorivo i usled visoke temperature vazduha, dolazi do sagorevanja. Izduvni gasovi, temperature cca 980° C, ekspandiraju u turbini. Ekspanzijom se proizvodi mehanički rad na vratilu turbine, koji se koristi za pogon kompresora i generatora za proizvodnju električne energije. Izduvni gasovi nakon prolaska kroz rekuperator preostali deo toplote predaju u izmenjivaču toplote sistemu tople vode i na taj način se ostvaruje proizvodnja toplotne energije [13].

Prvobitno, mikro-turbine su bile konstruisane za korišćenje prirodnog gasa kao goriva. Međutim, u njima je moguće koristiti razna goriva, a od biomase, najpogodniji su biogas i gasovi proizvedeni procesima gasifikacije ili pirolize. Pošto je moguće korišćenje i tečnih goriva, moguće je u njima sagorevati biodizel i bioetanol.

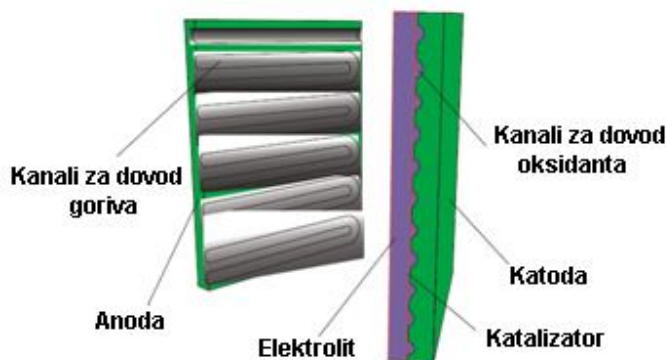
U današnje vreme tehnička rešenja mikro-turbina u potpunosti su zrela, a istraživanje i razvoj u ovoj oblasti usmerava se na konstrukciju turbina izlazne električne snage svega nekoliko kW_e.

Ukupni stepeni korisnosti dostižu vrednosti od 75 do 85% (približno kao i kod većih gasnih turbina sa kogeneracijom), a zavise od veličine i profila toplotnog konzuma. Prema tome, termički stepen korisnosti može da se kreće u opsegu 50 do 60%, a ipak zavise i od toplotnog konzuma [13].

3.4 Gorive ćelije

Gorive ćelije predstavljaju elektrohemijske pretvarače energije, koji hemijsku energiju goriva pretvaraju u električnu i toplotnu energiju bez procesa sagorevanja. Zbog elektrohemijskog mehanizma konverzije energije, tj. odsustva sagorevanja u procesu, gorive ćelije imaju prednost nad tradicionalnim sistemima za proizvodnju energije u vidu smanjenja emisije štetnih gasova. U procesu učestvuju gorivo (najčešće vodonik), oksidant (okolni vazduh ili čist kiseonik), a kao produkti dobijaju se voda, električna i toplotna energija [13].

Osnovne delove gorive ćelije čine elektrolit, elektrode (anoda i katoda) i katalizator, koji se nalazi između elektroda i elektrolita. Šematski prikaz sastavnih delova gorive ćelije prikazan je na slici 3.11.



Slika 3.11 Prikaz sastavnih delova gorive ćelije [13]

Anoda ima ulogu da provodi elektrone koje odaje gorivo do spoljašnjeg strujnog kruga i da obezbedi kontakt između molekula vodonika i katalizatora pomoću kanala. Kroz kanale katode dovodi se kiseonik u kontakt sa katalizatorom i provode elektroni po povratku iz spoljašnjeg strujnog kruga. Elektrolit provodi jonizovane čestice goriva, u ovom slučaju atome vodonika, do anode, a osim toga sprečava i kratko spajanje elektroda.

Katalizator predstavlja specijalan materijal koji obezbeđuje reakciju vodonika i kiseonika, tj. nastajanje vode. Katalizator je izrađen od grafitnog platna, koje je fino presvučeno prahom platine i to na strani koja naleže na membranu. Po površini je hrapav, a po strukturi porozan, tako da može da propusti atome vodonika.

Gorive ćelije mogu biti klasifikovane na više načina, prema kombinaciji goriva i oksidanta, vrsti elektrolita, temperaturi procesa itd. Najčešće upotrebljavana klasifikacija je prema tipu elektrolita, koji se koristi u gorivoj ćeliji.

Lista biljnih vrsta, sporednih i otpadnih proizvoda poljoprivrede i industrije koji se mogu koristiti kao sirovina za dobijanje goriva za primenu u gorivim ćelijama, praktično je beskonačna.

Generalno, gorive ćelije imaju viši električni stepen korisnosti od postrojenja zasnovanih na termodinamičkom ciklusu, naročito kada kao gorivo koriste vodonik, a kao oksidant čist kiseonik. Tada on iznosi cca 60%, a pri upotrebi nekog drugog goriva električni stepen korisnosti je od 40 do 50% [13].

Prilikom sjedinjavanja kiseonika i jonizovanog atoma vodonika u SOFC⁵ gorivim ćelijama, što predstavlja egzotermnu reakciju, stvara se temperatura okruženja cca 800° C, što je najviša temperatura koja se može postići u gorivim ćelijama. Toplotna energija na ovom nivou temperatura može da se iskoristi za zagrevanje vode u sistemu mikro-kogeneracije i da se na taj način postigne ukupni stepen korisnosti 80 do 90% [13].

Ukupni stepen korisnosti zavisi od načina iskorišćenja toplotne energije, a za različite vrste gorivih ćelija javlja se toplotna energija na različitim temperaturama, pa se prema tome ostvaruju i različiti ukupni stepeni korisnosti.

Gorive ćelije mogu da se koriste za stacionarne ili mobilne sisteme. U svetu trenutno postoje stacionarna postrojenja za proizvodnju električne energije, snaga od nekoliko stotina kW_e, međutim, ona još uvek nisu u potpunosti komercijalizovana. Manja stacionarna postrojenja u budućnosti bi mogla da nađu primenu u kućnim instalacijama, uz mogućnost dopremanja goriva javnom mrežom.

Mobilne gorive ćelije zasad svoju najveću primenu nalaze u motornim vozilima, pa su zbog toga najveći svetski proizvođači uključeni u njihov razvoj. Zemlje kao što su SAD, Japan i Nemačka, još od 1999. godine počele su izgradnju pumpnih stanica za punjenje vodonika za potrebe motornih vozila.

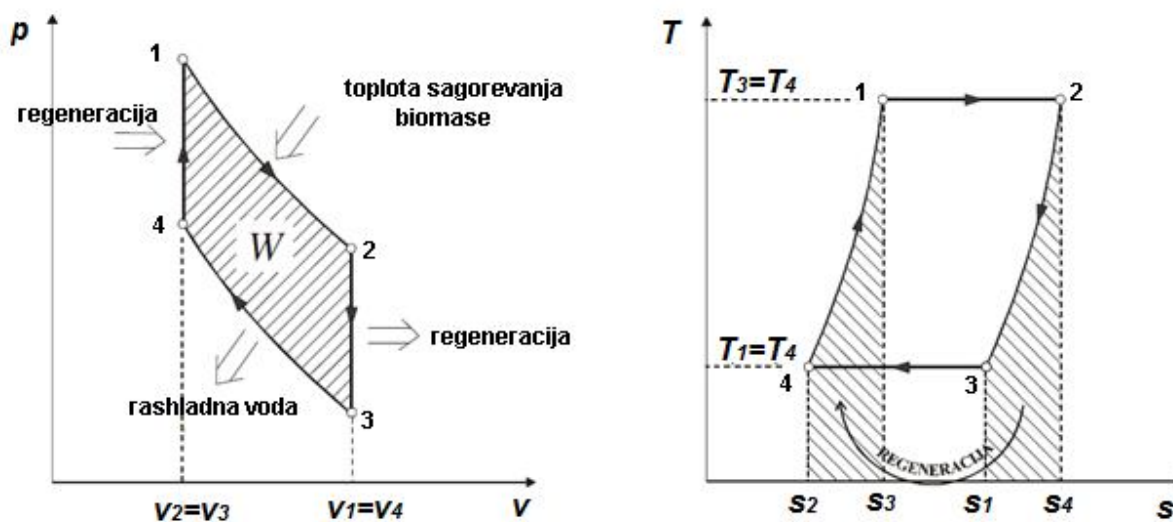
⁵ Akronim za *Solid Oxid Fuel Cell*

4. MATEMATIČKI MODEL RADA MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA SA STIRLINGOVIM MOTOROM

Stirlingov motor je vrsta toplotnog motora koji radi sa cikličnom kompresijom i ekspanzijom radnog fluida (vazduh, helijum, vodonik, acetilen i dr.) na različitim temperaturama, tako da dolazi do konverzije toplotne energije u mehanički rad.

Princip rada Stirlingovog motora zasniva se na zatvorenom termodinamičkom ciklusu⁶ pri čemu toplotnu energiju pretvara u mehanički rad. Sa obzirom na fizičku strukturu ovog motora, on ima pet glavnih podsistema pri čemu svaki od njih predstavlja kontrolnu zapreminu prilikom modelovanja. Postoje, dakle dva podsistema sa promenljivim zapreminama, odnosno kompresioni i ekspanzioni cilindar i tri podsistema sa konstantnim zapreminama, odnosno grejač, hladnjak i regenerator.

U zatvorenom radnom cilindru Stirlingovog motora nalazi se konstantna količina radnog fluida koja ne napušta radni cilindar motora. Stirlingov motor ne poseduje ventile kao benzinski motor, nema eksplozije unutar motora tako da je gotovo nečujan u radu. Na slici 4.1 prikazan je Stirlingov proces u $p-v$ i $T-s$ dijagramu.



Slika 4.1 Prikaz Stirlingovog procesa u $p-v$ i $T-s$ dijagramu [17]

Termodinamički ciklus je sastavljen od izotermne kompresije pri niskoj temperaturi, izohornog dovođenja toplote, izotermne ekspanzije pri višoj temperaturi i izohornog odvođenja toplote.

⁶ Termodinamički ciklus po kome radi Stirlingov motor je Carnot-ov ciklus

Promena stanja 1-2:

U ovoj fazi se odigrava izotermna ekspanzija. Dovođenje toplote koja se prenosi na radni fluid u motoru.

Promena stanja 2-3:

Prilikom ove faze odigrava se izohorna ekspanzija. Prenos toplote sa radnog fluida na regenerator, koji se odigrava pri konstantnoj zapremini.

Promena stanja 3-4:

U ovoj fazi se odigrava izotermna kompresija. Radni fluid u motoru se hladi pomoću rashladne vode koja cirkuliše kroz zid cilindra motora.

Promena stanja 4-1:

Ovom fazom se odvija izohorna kompresija. Prenos toplote sa regeneratora na radni fluid, koji se odigrava pri konstantnoj zapremini.

4.1 Konfiguracija Stirlingovog motora

Osnovni delovi Stirlingovog motora su:

- ❖ izvor toplote (solarna energija, dimni gasovi procesa sagorevanja...),
- ❖ grejač (izmenjivač toplote-topli cilindar),
- ❖ regenerator (regenerativni izmenjivač toplote),
- ❖ hladnjak (izmenjivač toplote-hladni cilindar),
- ❖ primalac toplote (okolina, zagrevanje stambenog objekta).

Grejače kod malih motora predstavljaju zidovi vrućeg cilindra. Za veće instalacije potrebno je imati odgovarajuće izmenjivače toplote za efikasniji prenos toplote na vrući cilindar.

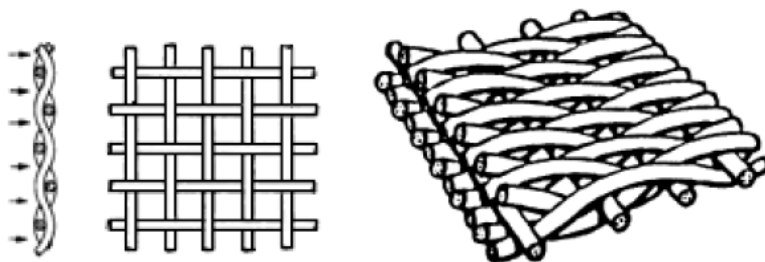
Mehanička konfiguracija Stirlingovog motora može se klasifikovati na tri tipa: Alfa, Beta i Gama tip motora. U okviru konstrukcije Stirlingovog motora nalazi se i regenerator⁷, čijom se upotrebom povećava stepen korisnosti motora. Regenerator, prikazan na *slici 4.2* predstavlja mrežu metalnih žica, koje se nalaze na traktu kroz koji gas prolazi na putu od toplog do hladnog cilindra i obrnuto [18].

Otvori mreže su normalni na smer toka gasa da se smanji provodnost u tom smeru i da se poveća prenos toplote konvekcijom. Regenerator je unutrašnji izmenjivač toplote koji je i

⁷ Izumitelj regeneratora je Robert Stirling, i predstavlja glavnu komponentu koja odvaja Stirlingov motor od običnih motora na vrući vazduh sa zatvorenim ciklusom

privremeno skladište toplotne energije smešten između hladnog i vrućeg prostora motora. Kroz njega protiče radni fluid, prvo u jednom a zatim u drugom smeru.

Funkcija regeneratora je da zadrži toplotu koja bi inače bila izgubljena u okolinu i sa time se omogućava da se termička efikasnost motora približi najvećoj efikasnosti mogućoj za Carnot-ov ciklus.

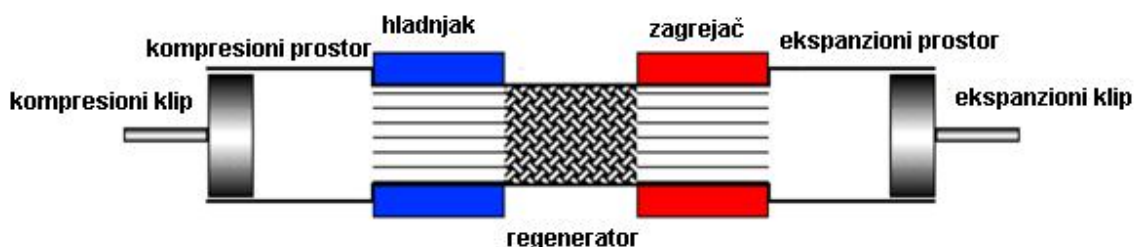


Slika 4.2 Struktura regeneratora [18]

Kada se radni fluid kreće od toplog cilindra, zagreva regenerator, tako da je potrebno oduzeti manju količinu energije u hladnom cilindru. Pri povratku ohlađenog gasa do toplog cilindra, radni fluid ponovo prolazi kroz regenerator koji je sada na višoj temperaturi, tako da se sada zagreva. Na taj način smanjena je potreba za toplotnom energijom koja se mora dovesti u toplom cilindru.

4.1.1 Alfa Stirlingov motor

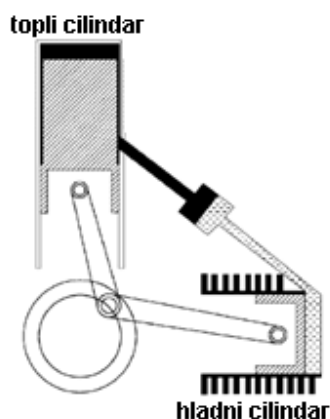
Ovaj tip Stirlingovog motora, prikazan na *slici 4.3* poseduje dva klipa postavljenih u dva odvojena cilindra spojena pomoću zagrejača, regeneratora i hladnjaka. Jedan cilindar je “vruć” i smešten je u visoko temperaturanom izmenjivaču toplote dok je drugi “hladan” i smešten je u izmenjivaču toplote kroz koji cirkuliše rashladna voda.



Slika 4.3 Alfa Stirlingov motor [18]

Ekspanzioni cilindar održava visoku temperaturu pomoću toplotnog izvora, dok se kompresioni cilindar hladi pomoću rashladne vode. Između ova dva cilindra nalazi se regenerator. Raspored klipova je prikazan na *slici 4.4*. Alfa motor predstavlja najjednostavniju

konfiguraciju Stirlingovog motora, međutim potreban je dobar sistem zaptivanja kako bi se radni fluid zadržao unutar motora.

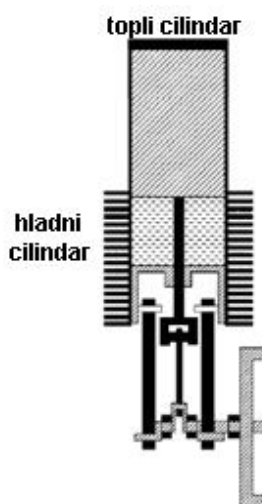


Slika 4.4 Raspored klipova kod Alfa Stirlingovog motora [19]

4.1.2 Beta Stirlingov motora

Ovaj tip motora predstavlja klasičnu konfiguraciju Stirlingovog motora i primenjuje se od njegovog nastanka sve do danas. Originalni patent Stirlingovog motora iz 1816 je pre svega izvedba Beta Stirlingovog motora.

Ovaj tip motora, kao i Gama Stirlingov motor u svojoj izvedbi poseduju “pomerač-klip”. Kod Beta motora i radni i pomerački klip su u istoj osi cilindra, dok su kod Gama motora klipovi postavljeni u odvojenim cilindrima. Beta Stirlingov motor prikazan je na *slici* 4.5.

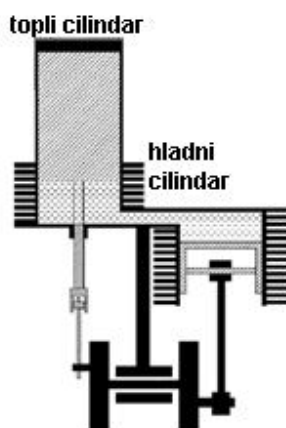


Slika 4.5 Beta Stirlingov motor [19]

Svrha radnog klipa, kao i pomeračkog klipa je da istisnu radni fluid pri konstantnoj zapremini iz ekspanzionog i kompresionog cilindra kroz hladnjak, regenerator i zagrejač. Pomerački klip isključivo služi da usmerava radni fluid od hladnog do vrućeg cilindra i obrnuto. Kao i kod Alfa motora postoji tehnički problem oko zaptivanja pokretnih delova motora.

4.1.3 Gama Stirlingov motor

Ovaj tip Stirlingovog motora je sličan Beta motoru sa tom razlikom što je radni klip postavljen u odvojenom cilindru u odnosu na pokretački klip. Radni fluid slobodno cirkuliše između ova dva cilindra. Ovakva izvedba omogućava potpunu odvojenost izmenjivača toplote u odnosu na kompresioni i ekspanzioni prostor cilindra. Gama Stirlingov motor prikazan je na slici 4.6.



Slika 4.6 Gama Stirlingov motor [19]

Gama Stirlingov motor se primenjuje kada je sa odvojenošću cilindara moguće postići nedostatak specifične snage. Prednost korišćenja ovakve izvedbe je u tome što se problem sa zaptivanjem mora rešavati samo na jednom klipu.

4.2 Matematički model rada Stirlingovog motora

Protok mase i energije u postrojenjima za mikro-kogeneraciju zasnovanoj na bazi Stirlingovog motora sadrže:

- ❖ konvektivnu toplotu zračenja koja se oslobađa sagorevanjem goriva,
- ❖ konvektivna toplotna razmena između radnog fluida gasovitih produkata sagorevanja i rashladnog fluida,
- ❖ akumulacija energije u bloku motora i svih drugih termičkih komponenata,
- ❖ konduktivni prenos toplote kroz izmenjivač toplote i moguća latentna rekuperacija toplote iz gasovitih produkata sagorevanja,
- ❖ mehanička snaga proizvedena na osovini od strane motora,
- ❖ električna snaga proizvedena od strane alternatora, koja se koristi i za pogon električnih motora koji se primenjuju u postrojenjima.

Za vreme rada mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom dolazi do pretvaranja termo-hemijske, termo-fluidne, mehaničke i električne energije. Ovde se za potrebe izvođenja matematičkog modela uzimaju u obzir samo one energetske razmene koje su međusobno povezane sa ostalim komponentama ovog postrojenja.

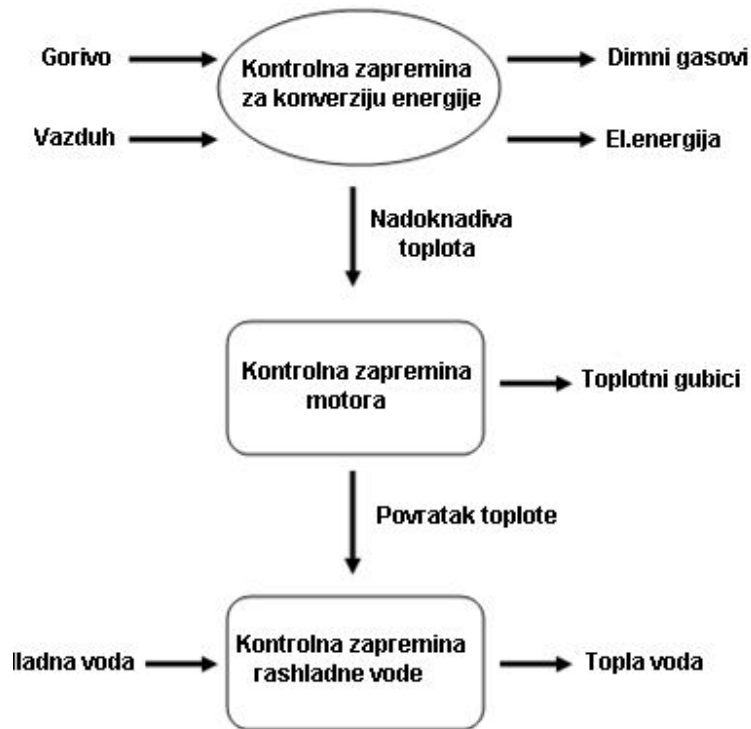
Ovaj pristup modeliranju na taj način uzima u obzir unutrašnju razmenu energije i to onaj deo koji se odnosi na efikasnost proizvodnje toplotne i električne energije.

4.2.1 Struktura modela

Za modeliranje dinamičkih i termičkih karakteristika mikro-kogeneracionog postrojenja koriste se tri kontrolne zapremine:

- ❖ kontrolna zapremina za konverziju energije koja predstavlja radni fluid motora, gasoviti produkti sagorevanja i alternator postrojenja. Ova kontrolna zapremina daje informacije vezane za performanse motora u obliku toplotnog fluksa koje su bitne za izvođenje termičkog modela,
- ❖ kontrolna zapremina termičke mase predstavlja akumulirani termički kapacitet vezan za blok motora kao i izmenjivač toplote,
- ❖ kontrolna zapremina rashladne vode predstavlja rashladnu vodu koja protiče kroz uređaj kao i elemente izmenjivača toplote koji su u neposrednom termičkom kontaktu.

Protok energije između ovih kontrolnih zapremina prikazan je na *slici 4.7*.



Slika 4.7 Kontrolne zapremine modela kogenerativnog sagorevanja [20]

4.2.2 Postupak modeliranja

4.2.2.1 Kontrolna zapremina za konverziju energije

Jednačina energetskeg balansa u stacionarnom stanju za kontrolnu zapreminu ima sledeći oblik [20]:

$$\dot{H}_{fuel} + \dot{H}_{air} = P_{net,ss} + q_{gen,ss} + \dot{H}_{exh} \quad (4.1)$$

gde su:

$\dot{H}_{fuel}$ - ukupna entalpija goriva,

$\dot{H}_{air}$ - ukupna entalpija vazduha za sagorevanje,

$P_{net,ss}$ - snaga proizvedene električne energije,

$q_{gen,ss}$ - snaga proizvedene toplotne energije,

$\dot{H}_{exh}$ - ukupna entalpija izduvnih gasova.

Osnovna ideja kod izvođenja ovog modela nije da u potpunosti karakterizuje energetski bilans opisan pomoću jednačine (4.1), već da uspostavi vezu između rada postrojenja u stacionarnom stanju i ukupne energije koja se unosi u sistem.

$$P_{net,ss} = \eta_e \cdot Q_{gross} \quad (4.2)$$

$$q_{gen,ss} = \eta_q \cdot Q_{gross} \quad (4.3)$$

$$Q_{gross} = \dot{m}_{fuel} \cdot H_d \quad (4.4)$$

gde su:

Q_{gross} - ukupna toplota koja se predaje sistemu (W),

$\dot{m}_{fuel}$ - maseni protok goriva (kg/s ili kmol/s),

H_d - donja toplotna moć goriva koje se koristi (J/kg ili J/kmol),

$P_{net,ss}$ - snaga proizvedene električne energije (W),

η_e - električna efikasnost motora,

$q_{gen,ss}$ - snaga proizvedene toplotne energije (W),

η_q - termička efikasnost motora.

Uzimajući u obzir toplotnu akumulaciju, toplotne gubitke i unutrašnje upravljanje u okviru sistema mikro-kogeneracije, konkretne vrednosti električne i toplotne energije mogu se razlikovati od onih u stacionarnom stanju koje su opisane jednačinama (4.2) i (4.3).

4.2.2.2 Kontrolna zapremina motora

Dinamika termičkog ponašanja mikro-kogeneracionog postrojenja zasnovanog na sagorevanju karakteriše se termičkom masom bloka motora i radnim fluidom koji se nalazi u unutrašnjosti, unutrašnjom opremom za razmenu toplote i spoljašnjim izmenjivačem toplote.

Pri izvođenju ovog modela usvaja se pretpostavka da je kontrolna zapremina motora homogena. Termička energija koja je uskladištena u okviru ove kontrolne zapremine se iskazuje pomoću termičkog (toplotnog) kapaciteta, $m_{eng} \cdot c_{p,eng}$ (J/K) i ekvivalentne srednje temperature motora T_{eng} (K).

Jednačina energetskog bilansa za kontrolnu zapreminu motora:

$$m_{eng} \cdot c_{p_{eng}} \cdot \frac{dT_{eng}}{dt} = q_{gen,ss} - Q_{HX} - Q_{skin,loss} \quad (4.6)$$

gde su:

$m_{eng} \cdot c_{p_{eng}}$ - termički kapacitet kontrolne zapremine (W/K),

Q_{HX} - količina toplote koja se predaje rashladnoj vodi (W),

$Q_{skin,loss}$ - toplotni gubici (W),

T_{eng} - temperatura radnog fluida u kontrolnoj zapremini (K),

t - vreme.

4.2.2.3 Kontrolna zapremina rashladne vode

Jednačina energetskog bilansa za rashladnu vodu ima sledeći oblik [17]:

$$m_{cw} \cdot c_{p_{cw}} \cdot \frac{dT_{cw,o}}{dt} = \dot{m}_{cw} \cdot c_{p_{cw}} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) + Q_{HX} \quad (4.7)$$

gde su:

$m_{cw} \cdot c_{p_{cw}}$ - toplotni kapacitet rashladne vode i izmenjivača toplote koji su u neposrednom kontaktu (J/K),

$T_{cw,o}$ - izlazna temperatura rashladne vode (K),

$T_{cw,i}$ - ulazna temperatura rashladne vode (K),

$\dot{m}_{cw} \cdot c_{p_{cw}}$ termički kapacitet protoka rashladne vode (W/K).

4.2.2.4 Prenos toplote

Toplota se prenosi do rashladne vode preko izduvnih gasova i kućišta motora. Količina toplotne razmene može se razlikovati od one izračunate za stacionarno stanje zbog:

- ❖ akumulacije toplote u zidu motora i drugim komponentama koji imaju akumulativnu sposobnost,
- ❖ efekta unutrašnje regulacije kao što je recirkulacija izduvnog gasa i rad spoljašnjeg izmenjivača kod Stirlingovog motora.

Model uzima u obzir dinamiku toplotnog ponašanja mikro-kogeneracijskog uređaja sa sagorevanjem u smislu toplotne mase motora (toplotne akumulativne sposobnosti motora), izmenjivača toplote izduvnih gasova i spoljašnjeg izmenjivača toplote.

U ovom modelu se pretpostavlja da je količina toplote koja se predaje rashladnoj vodi proporcionalna razlici temperatura kontrolne zapremine rashladne vode i kontrolne zapremine motora. Toplotna razmena između motora i rashladne vode se izražava na sledeći način:

$$Q_{HX} = UA_{HX} (T_{eng} - T_{cw,o}) \quad (4.8)$$

gde su:

UA_{HX} - termička provodljivost između kontrolnih zapremina rashladne vode motora i motora (W/K),

T_{eng} - srednja temperatura kontrolne zapremine motora (K).

Pretpostavlja se da je gubitak toplote iz motora proporcionalan temperaturnoj razlici između kontrolne zapremine motora i okruženja. Tako da se može napisati:

$$Q_{skin-loss} = UA_{loss} (T_{eng} - T_{room}) \quad (4.9)$$

gde je:

UA_{loss} - efektivna termička provodljivost između kontrolne zapremine motora i okruženja (W/K),

Korišćenjem jednačina (4.8) i (4.9) bilansne jednačine kontrolnih zapremina motora i rashladne vode jednačine (4.6) i (4.7) mogu se napisati na sledeći način [16]:

$$m_{eng} \cdot c_{p,eng} \cdot \frac{dT_{eng}}{dt} = UA_{HX} (T_{cw,o} - T_{eng}) + UA_{loss} (T_{room} - T_{eng}) + q_{gen,ss} \quad (4.10)$$

$$m_{cw} \cdot c_{p,cw} \cdot \frac{dT_{cw,o}}{dt} = \dot{m}_{cw} \cdot c_{p,cw} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) + UA_{HX} (T_{eng} - T_{cw,o}) \quad (4.11)$$

Na osnovu jednačina energetskog bilansa (4.10) i (4.11) za mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom, dobija se matematički model u obliku sistema diferencijalnih jednačina kojim se opisuje promena temperature radnog fluida u cilindru, kao i promena temperature rashladne vode kojoj se predaje toplota od strane radnog fluida u cilindru motora:

$$m_{eng} c_{p,eng} \frac{dT_{eng}(t)}{dt} = UA_{HX} (T_{cw,o}(t) - T_{eng}(t)) + UA_{loss} (T_{room}(t) - T_{eng}(t)) + q_{gen,ss}(t) \quad (4.12)$$

$$m_{cw} c_{p,cw} \frac{dT_{cw,o}(t)}{dt} = \dot{m}_{cw} c_{p,cw} (T_{cw,i}(t) - T_{cw,o}(t)) + UA_{HX} (T_{eng}(t) - T_{cw,o}(t)) \quad (4.13)$$

Uvođenjem odgovarajućih koeficijenata prethodni sistem jednačina može se napisati u sledećem obliku:

$$\frac{dT_{eng}(t)}{dt} = a_1 T_{eng}(t) + a_2 T_{cw,o}(t) + b_1 q_{gen,ss}(t) + d_1 T_{room}(t) \quad (4.14)$$

$$\frac{dT_{cw,o}(t)}{dt} = a_3 T_{eng}(t) + a_4 T_{cw,o}(t) + b_2 T_{cw,i}(t) \quad (4.15)$$

Napomena: Koeficijenti su dati u prilogu 1 master rada.

Matematički model opisan jednačinama (4.14) i (4.15) može se dalje transformisati u matrični oblik na sledeći način:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + D\mathbf{z}(t), \quad (4.16)$$

gde je:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} T_{eng}(t) \\ T_{cw,o}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} Q_{gen,ss}(t) \\ T_{cw,i}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}(t) = T_{room}(t),$$

Pri čemu odgovarajuće matrice imaju sledeći oblik:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Jednačina (4.16) naziva se još i vektorska diferencijalna jednačina stanja, a vektor $\mathbf{x}(t)$ naziva se vektor stanja kojim je određeno stanje sistema koji je predmet izvođenja ovog matematičkog modela, dok je vektor $\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} q_{gen,ss}(t) \\ T_{cw,i}(t) \end{bmatrix}$, vektor ulaza ili vektor upravljanja koji sadrži veličine pomoću kojih se upravlja promenom veličina stanja.

Vektor $\mathbf{z}(t) = T_{room}(t)$ naziva se još vektor poremećaja jer se njime izražavaju toplotni gubici Stirlingovog motora u okolinu.

Određivanje dinamika promena temperatura $T_{eng}(t)$ i $T_{cw,o}(t)$ je osnovni cilj prilikom izvođenja ovog matematičkog modela, jer ove temperature uspostavljaju direktnu vezu sa glavnim energijskim tokovima u okviru jednog mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom, odnosno u direktnoj su vezi sa proizvedenom električnom snagom $P_{net,ss}(t)$ i toplotnom snagom za potrebe grejanja $q_{gen,ss}(t)$.

Zbog toga će se jednačini (4.16) pridodati još jedna jednačina, tzv. jednačina izlaza, kojom se određuju izlazne veličine, tj. temperature $T_{eng}(t)$ i $T_{cw,o}(t)$, a koja ima sledeći oblik:

$$\mathbf{x}_i(t) = C\mathbf{x}(t) \quad (4.17)$$

gde je:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Rešavanjem sistema jednačina (4.16) i (4.17) dobija se promena temepratura $T_{eng}(t)$ i $T_{cw,o}(t)$ u jedinici vremena u zavisnosti od promene ulaznih veličina.

Jedan od načina za rešavanje ovog sistema jednačina (4.16) i (4.17) jeste primena Laplasove i inverzne Laplasove transformacije, gde će se za potrebe izvođenja ovog modela usvojiti da su početni uslovi jednaki nuli. Primenom Laplasove jednačine na sistem jednačina (4.16) i (4.17) dobija se:

$$s\mathbf{X}(s) = A\mathbf{X}(s) + B\mathbf{U}(s) + DZ(s) \quad (4.18)$$

$$\mathbf{X}_i(s) = C\mathbf{X}(s) \quad (4.19)$$

Rešavanjem jednačine (4.18) po $\mathbf{X}(s)$ dobija se:

$$\mathbf{X}(s) = (sI - A)^{-1} B\mathbf{U}(s) + (sI - A)^{-1} DZ(s) \quad (4.20)$$

Zamenom jednačine (4.20) u jednačinu (4.19) dobija se:

$$\mathbf{X}_i(s) = C(sI - A)^{-1} B\mathbf{U}(s) + C(sI - A)^{-1} DZ(s) \quad (4.21)$$

Primenom inverzne Laplasove transformacije i prelaskom iz kompleksnog domena u vremenski domen može se dobiti promena vektora izlaza u jedinici vremena, odnosno promena temperatura $T_{eng}(t)$ i $T_{cw,o}(t)$:

$$\mathbf{x}_i(t) = L^{-1} \{ C(sI - A)^{-1} B\mathbf{U}(s) + C(sI - A)^{-1} DZ(s) \} \quad (4.22)$$

Zamenom odgovarajućih vrednosti dobija se:

$$T_{eng}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{b_1(s-a_4)}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} q_{gen,ss}(s) \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{a_2b_2}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} T_{cw,i}(s) \right\} +$$

$$+ L^{-1} \left\{ \frac{d_1(s-a_4)}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} T_{room}(s) \right\} \quad (4.23)$$

$$T_{cw,o}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{b_1a_3}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} q_{gen,ss}(s) \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{b_2(s-a_1)}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} T_{cw,i}(s) \right\} +$$

$$+ L^{-1} \left\{ \frac{a_3d_1}{(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3} T_{room}(s) \right\} \quad (4.24)$$

odnosno:

$$T_{eng}(t) = b_1 \frac{(p_1-a_4)e^{p_1t} - (p_2-a_4)e^{p_2t}}{p_1-p_2} q_{gen,ss}(t) + a_2b_2 \frac{e^{p_1t} - e^{p_2t}}{p_1-p_2} T_{cw,i}(t) +$$

$$+ d_1 \frac{(p_1-a_4)e^{p_1t} - (p_2-a_4)e^{p_2t}}{p_1-p_2} T_{room}(t) \quad (4.25)$$

$$T_{cw,o}(t) = a_3b_1 \frac{e^{p_1t} - e^{p_2t}}{p_1-p_2} q_{gen,ss}(t) + b_2 \frac{(p_1-a_1)e^{p_1t} - (p_2-a_1)e^{p_2t}}{p_1-p_2} T_{cw,i}(t) +$$

$$+ a_3d_1 \frac{e^{p_1t} - e^{p_2t}}{p_1-p_2} T_{room}(t) \quad (4.26)$$

gde su:

$$p_1 = \frac{a_1 + a_4 + \sqrt{(a_1 + a_4)^2 - 4(a_1a_4 - a_2a_3)}}{2}, \quad p_2 = \frac{a_1 + a_4 - \sqrt{(a_1 + a_4)^2 - 4(a_1a_4 - a_2a_3)}}{2}$$

rešenja kvadratne jednačine $(s-a_1)(s-a_4)-a_2a_3=0$.

Jednačine (4.25) i (4.26) opisuju zavisnost promene temperature radnog fluida u cilindru Stirlingovog motora i promenu izlazne temperature rashladne vode u zavisnosti od promena toplote dobijene sagorevanjem goriva i ulazne temperature rashladne vode.

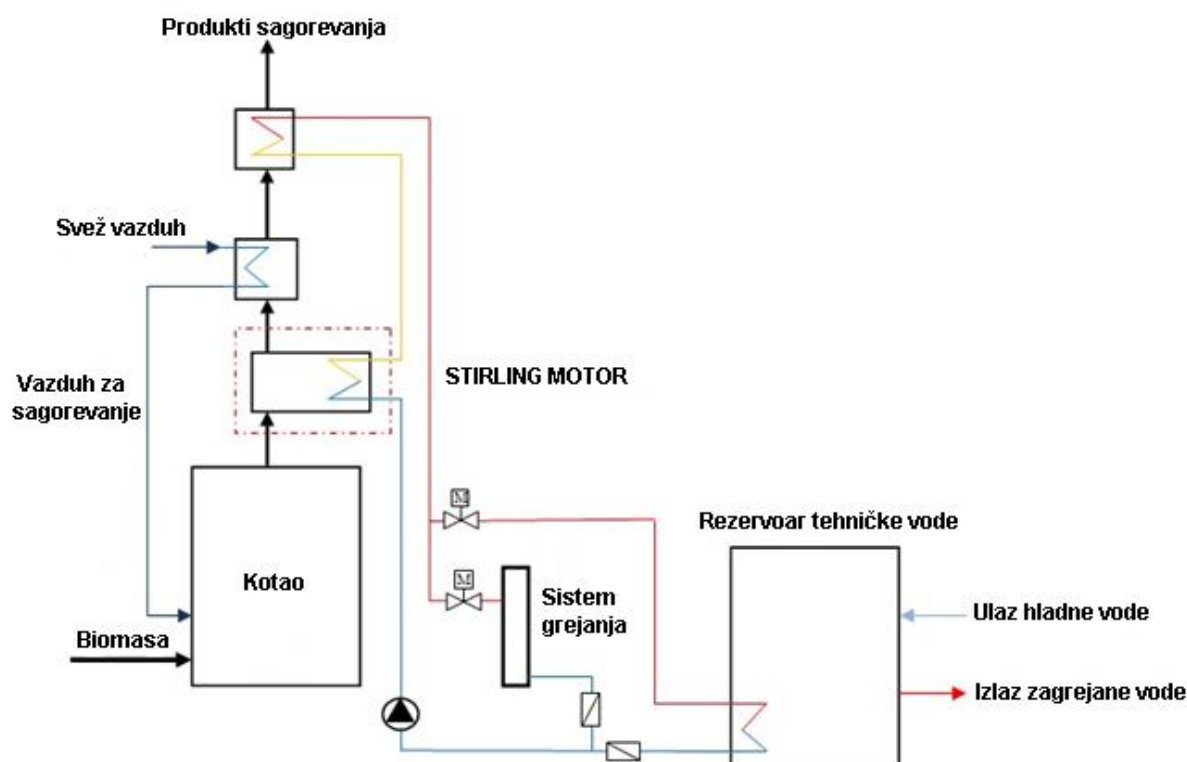
5. SIMULACIJA RADA MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA

Na osnovu definisanog matematičkog modela, a na osnovu potrebnih parametara prikazanih u *tabeli 5.1*, koji su neophodni za simulaciju rada mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom u ovoj tački biće prikazani rezultati izvršenih simulacija u softverskim paketima "Matlab" i "Excel".

Naziv	Oznaka	Vrednost	Jedinica	Referenca
Koeficijent prolaza toplote (radni fluid-rashladna voda)	U_{HX}	15	W/mK	[21]
Koeficijent prolaza toplote (radni fluid-okolni prostor)	U_{loss}	15	W/mK	[21]
Specifični toplotni kapacitet radnog fluida (helijum)	c_{peng}	5193	J/kgK	[22]
Masa radnog fluida (helijum)	m_{eng}	0,00115	kg	[23]
Gustina radnog fluida (helijum)	ρ_{eng}	0,1785	kg/m ³	[22]
Specifični toplotni kapacitet radnog fluida (acetilen)	c_{peng}	1511	J/kgK	[22]
Masa radnog fluida (acetilen)	m_{eng}	0,00115	kg	[23]
Gustina radnog fluida (acetilen)	ρ_{eng}	1,097	kg/m ³	[22]
Površina toplotne razmene između cilindra motora i rashladne vode	A_{HX}	0,003	m ²	[23]
Površina toplotne razmene između dela cilindra koji je u kontaktu sa prostorijom	A_{loss}	0,0028	m ²	[23]
Masa rashladne vode	m_{cw}	0,1	kg	usvojeno
Specifični toplotni kapacitet rashladne vode	c_{pcw}	4186	J/kgK	[22]
Gustina rashladne vode	ρ_{cw}	1000	kg/m ³	[22]
Brzina strujanja rashladne vode	$\dot{m}_{cw}$	0,1	m/s	usvojeno
Dužina izmenjivača toplote (rashladna voda)	l_{cw}	0,1	m	usvojeno

Tabela 5.1 Parametri za simulaciju

Prikazani parametri u *tabeli 5.1* su izabrani za kotao snage 5÷10 kW_t pri čemu su karakteristični podaci preuzeti sa modela GPU3⁸ [21, 22]. Na *slici 5.1* prikazana je tehnološka šema sistema mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom koji predstavlja predmet simulacije koja je obrađena u ovom radu.



Slika 5.1 Tehnološka šema sistema mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom

Princip rada sistema mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom zasniva se na sledećem: biomasa koja se sagoreva u kotlu oslobađa toplotu $q_{\text{gen,ss}}$ koja se preko cilindra Stirlingovog motora predaje radnom fluidu unutar motora.

Fluid se na niskoj temperaturi održava uz pomoć rashladne vode koja cirkuliše u izmenjivaču toplote koji obavlja hladni cilindar motora.

Temperatura rashladne vode na ulazu u izmenjivač toplote (cilindar Stirlingovog motora) iznosi cca 40⁰ C [24]. Rashladna voda zatim odlazi u izmenjivač toplote koji se nalazi u kanalu dimnog gasa gde joj temperatura raste do cca 90⁰ C, nakon čega, u zimskom režimu rada, odlazi u radijatorski sistem za potrebe grejanja objekta. Povrat radijatora je preko cirkulacione pumpe povezan sa ulazom u izmenjivač toplote Stirlingovog motora.

⁸ Akronim za *Ground Power Unit-3*, General Motors korporacije

Pri ovom režimu rada od velike je važnosti da je temperatura vode na povratu radijatora ista kao i temperatura vode na ulazu u izmenjivač toplote u prvom ciklusu. Ukoliko bi temperatura vode na povratu radijatora bila veća od 40⁰ C opala bi termička i električna efikasnost Stirlingovog motora.

U letnjem režimu rada predviđen je rezervoar tehničke vode u kome je smešten izmenjivač toplote kroz koji cirkuliše voda koja je preuzela deo toplote iz Stirlingovog motora i kanala dimnog gasa kotla. Voda preko izmenjivača toplote predaje toplotu tehničkoj vodi i pri tome je zagreva.

Ovde je takođe od bitnog značaja temperatura rashladne vode na povratu izmenjivača toplote u rezervoaru tehničke vode koja mora iznositi cca 40⁰ C. Sistem mikro-kogeneracije je podržan sistemom upravljanja, tako da se mogu ostvariti optimalni uslovi rada prilikom eksploatacije.

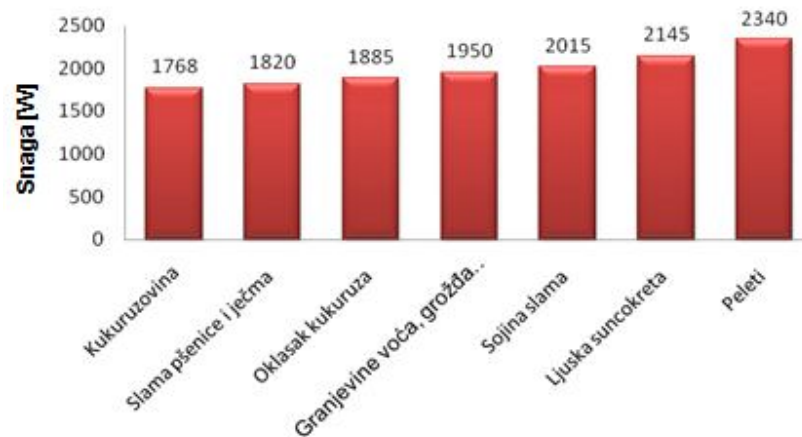
Zbog složenosti ovakvog sistema mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom i vremena potrebnog za obradu celokupnog sistema, simulacijama u master radu obrađen je samo deo cilindra motora koji prima količinu toplote $q_{\text{gen,ss}}$ koja se sagorevanjem biomase različitih toplotnih moći predaje radnom fluidu, odnosno karakter promene temperature radnog fluida i karakter promene temperature rashladne vode.

5.1 Toplotna snaga $q_{\text{gen,ss}}$

Na osnovu izraza (4.3 i 4.4) na *slici 5.2* prikazana je proizvedena toplotna energija $q_{\text{gen,ss}}$, odnosno toplotna energija koja se sagorevanjem biomase preko dimnih gasova preda Stirlingovom motoru, odnosno radnom fluidu unutar motora.

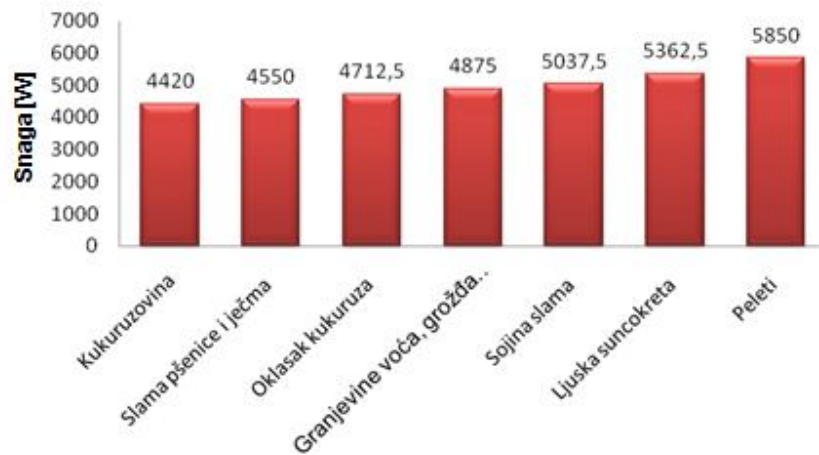
U zavisnosti od vrste biomase koja se sagoreva u kotlu, masenog protoka goriva i stepena korisnosti izmenjivača toplote dobijaju se različite vrednosti toplotne energije. Peleti sa donjom toplotnom moći od cca 18000 kJ su znatno bolje gorivo u odnosu na kukuruzovinu čija je donja toplotna moć cca 13600 kJ [25].

Na dobijenu količinu toplotne energije znatno utiče maseni protok goriva i stepen korisnosti izmenjivača toplote. Prilikom simulacije vrednosti masenog protoka su iznosile 0,2 kg/h i 0,5 kg/h, dok je stepen korisnosti izmenjivača toplote između dimnih gasova i radnog fluida Stirlingovog motora iznosio 65%. Vrednosti masenog protoka biomase i stepena korisnosti izmenjivača toplote su usvojene zbog potrebe izvršenja simulacija.



Slika 5.2 Proizvedena toplotna energija $q_{\text{gen,ss}}$ u zavisnosti od vrste biomase

Na *slici* 5.2 prikazana je proizvedena toplotna energija $q_{\text{gen,ss}}$ sa masenim protokom goriva 0,2 kg/h. Prilikom povećanja masenog protoka goriva na 0,5 kg/h proizvedena toplotna energija $q_{\text{gen,ss}}$ se znatno povećava, što je i prikazano na *slici* 5.3.



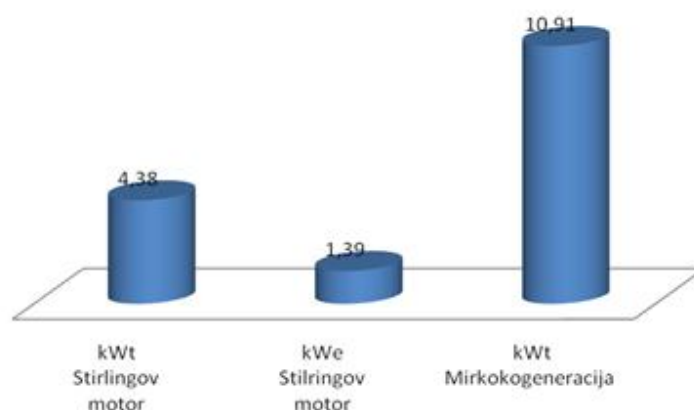
Slika 5.3 Proizvedena toplotna energija u zavisnosti od vrste biomase prilikom povećanja masenog protoka goriva

5.2 Ostvarene količine toplotne i električne energije u zavisnosti od $q_{\text{gen,ss}}$

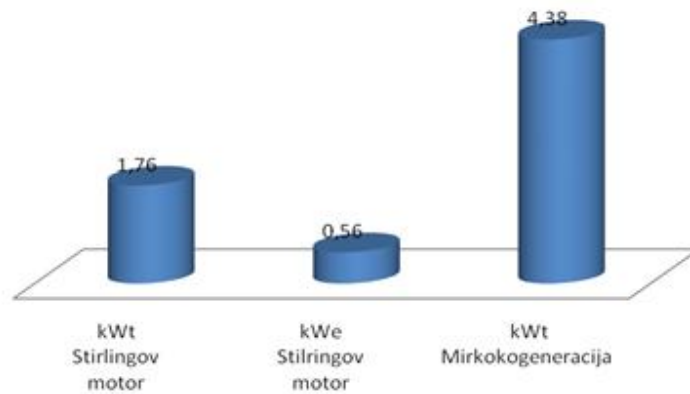
Na osnovu Senkijevog dijagrama o transferu mase i energije mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom [13], a u zavisnosti od količine toplote $q_{\text{gen,ss}}$ (slika 5.3) koja se sagorevanjem različite vrste biomase preda radnom fluidu unutar Stirlingovog motora, i na osnovu stepena korisnosti izmenjivača toplote, u tabeli *tabeli* 5.2 prikazana je proizvedena električna i toplotna energija uz pomoć Stirlingovog motora i ukupna toplotna energija proizvedena sistemom mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom.

Gorivo	Maseni protok	Stepen korisnosti izmenjivača	$q_{\text{gen,ss}}$	kWt Stirlingov motor	kWe Stirlingov motor	kWt Mirkokogeneracija
Peleti	0,5 kg/h	65%	5,85	4,38	1,39	10,91
	0,3 kg/h		3,51	2,63	0,83	6,55
	0,2 kg/h		2,35	1,76	0,56	4,38
Ljuska suncokreta	0,5 kg/h	65%	5,36	4,02	1,27	10
	0,3 kg/h		3,21	2,4	0,76	5,99
	0,2 kg/h		2,14	1,6	0,51	3,99
Kukuruzovina	0,5 kg/h	65%	4,42	3,31	1,05	8,25
	0,3 kg/h		2,65	1,98	0,63	4,94
	0,2 kg/h		1,76	1,32	0,42	3,29

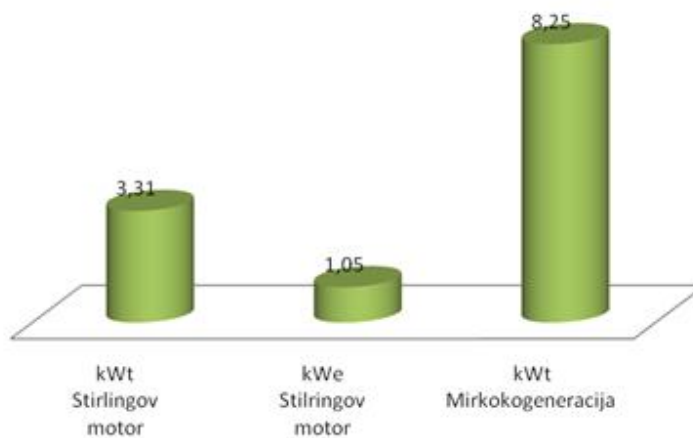
Tabela 5.2 Proizvedena i električna toplotna energija u zavisnosti od vrste i masenog protoka biomase



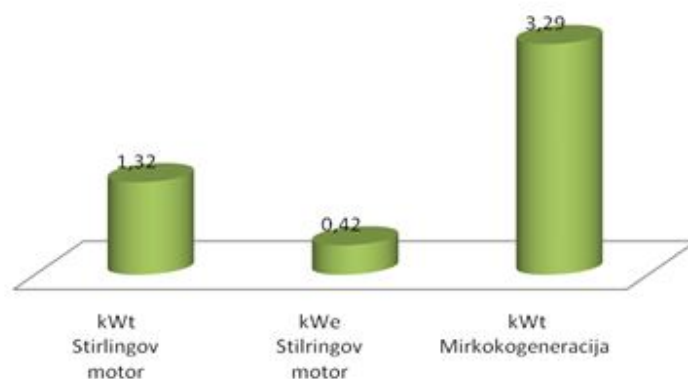
Slika 5.4 Proizvedena i električna toplotna energija sistemom mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom kada se kao biomasa koristi pelet sa masenim protokom goriva 0,5 kg/h



Slika 5.5 Proizvedena električna i toplotna energija sistemom mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom kada se kao biomasa koristi pelet sa masenim protokom goriva 0,2 kg/h

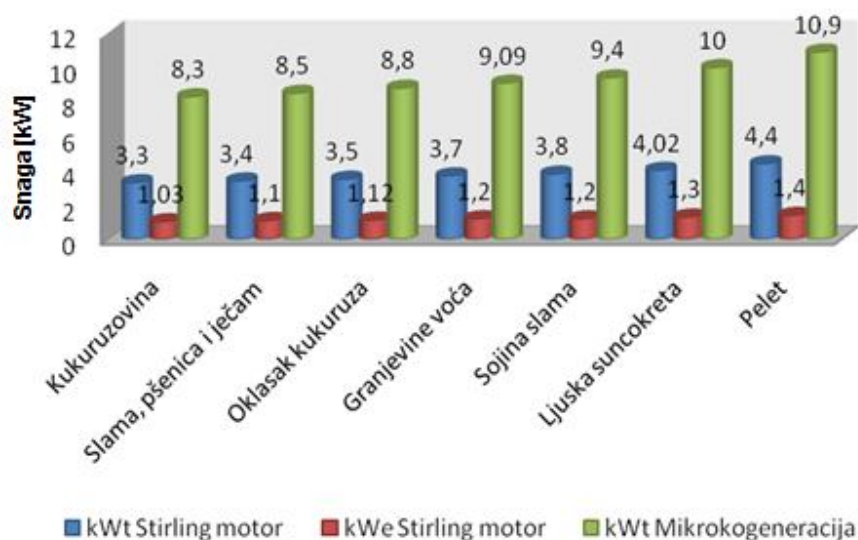


Slika 5.6 Proizvedena električna i toplotna energija sistemom mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom kada se kao biomasa koristi kukuruzovina sa masenim protokom goriva 0,5 kg/h



Slika 5.7 Proizvedena električna i toplotna energija sistemom mikrokogeneracije sa Stirlingovim motorom kada se kao biomasa koristi kukuruzovina sa masenim protokom goriva 0,2 kg/h

Na slikama 5.4÷5.7 prikazano je poređenje proizvedene električne i toplotne energije pomoću Stirlingovog motora i ukupne toplotne energije proizvedene sistemom mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom u zavisnosti od vrste biomase. Prilikom simulacija kao biomasa je korišćen pelet i kukuruzovina pri čemu je maseni protok goriva iznosio 0,5 kg/h i 0,2 kg/h.



Slika 5.8 Poređenje dobijene energije sa masenim protokom goriva 0,5 kg/h u zavisnosti od vrste biomase pomoću sistema mikrokogeneracije sa Stirlingovim motorom

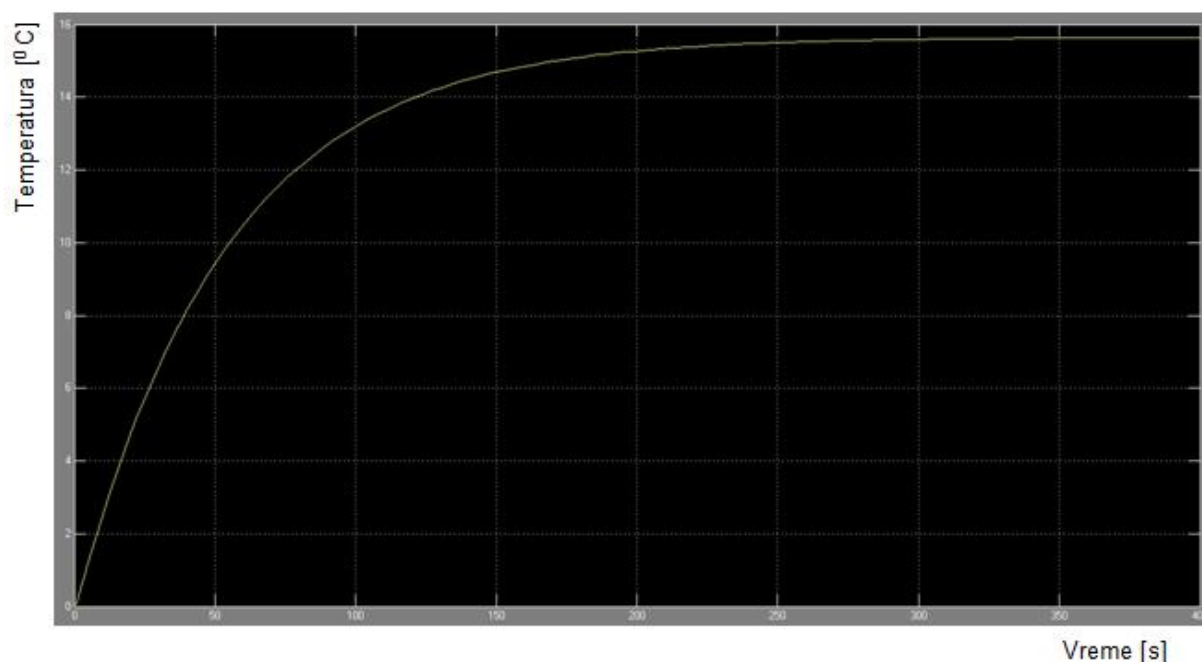
Na slici 5.8 može se primetiti da se najveća količina električne i toplotne energije pomoću sistema mikrokogeneracije sa Stirlingovim motorom dobije kada se kao gorivo koristi drveni pelet, pri čemu se za uložених 5,85 kW toplotne energije (tabela 5.2) koja se sagorevanjem biomase preda Stirlingovom motoru dobije 4,4 kW_t i 1,4 kW_e, dok je ukupna količina toplotne energije mikrokogeneracionog sistema sa Stirlingovim motorom 10,9 kW_t.

5.3 Karakter promene temperature radnog fluida i rashladne vode u Stirlingovom motoru

Za matematički model Stirlingovog motora izveden u odeljku 4 master rada mikro-kogeneracionog postrojenja opisan jednačinama (4.19) i (4.20), usvojene su konkretne vrednosti parametara i izvršena je simulacija rada postrojenja.

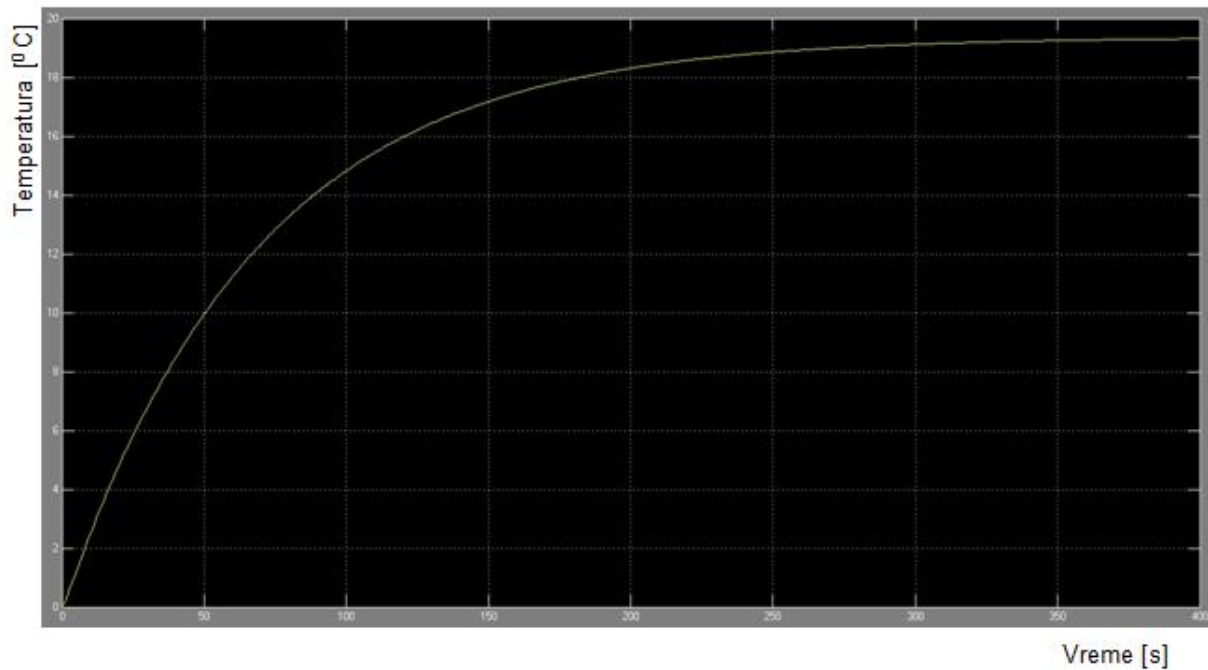
Prilikom simulacije u softverskom paketu "MatLab" korišćeni su parametri prikazani u *tabeli 5.1* koji predstavljaju osnovnu geometriju Stirlingovog motora. Kao radni fluid korišćen je helijum i acetilen, dok je brzina strujanja rashladne vode u izmenjivaču toplote iznosila 0,1 m/s i 0,5 m/s.

Sa *slike 5.9* može se videti porast temperature radnog fluida koji se preko cilindra motora zagreva uz pomoć dimnih gasova koji predstavljaju produkt sagorevanja biomase unutar ložišta kotla. Ovaj porast temperature predstavlja karakter promene temperature u odnosu na temperaturu dimnog gasa unutar kotla. Temperatura radnog fluida nakon 300 sekundi zauzima stabilno stanje, što je ujedno i odlika termodinamičkih sistema, pri čemu Δt iznosi cca 16 stepeni u odnosu na predatu količinu toplote od strane kotla.



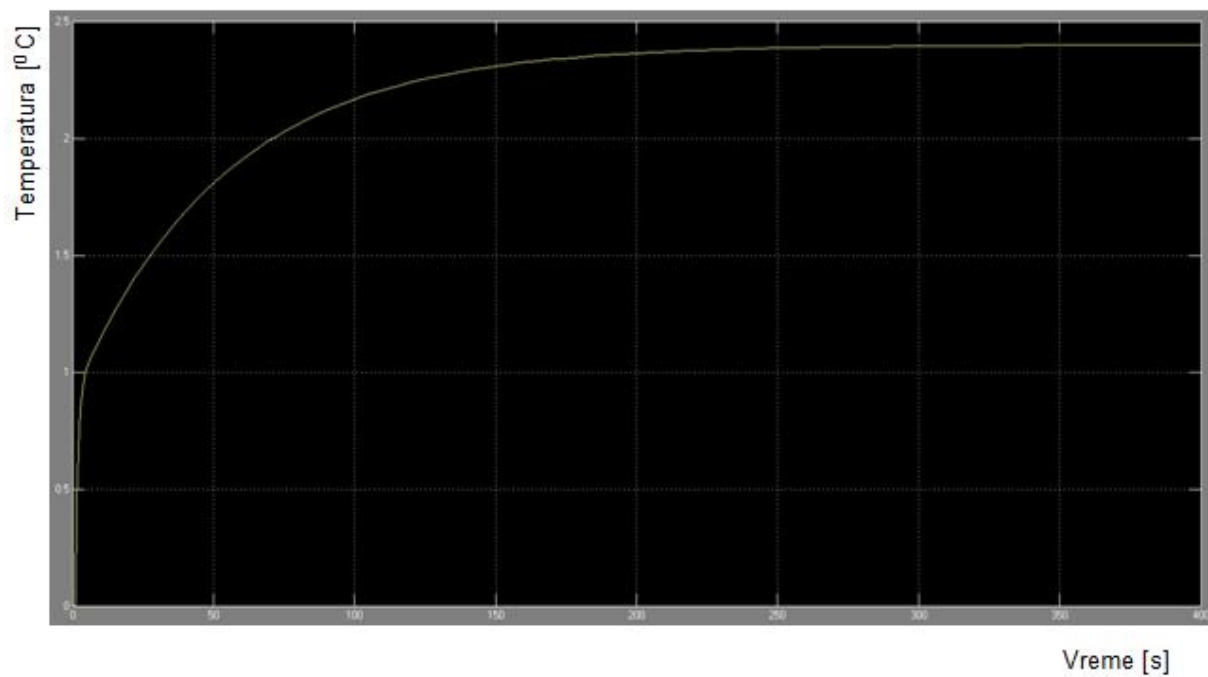
Slika 5.9 Karakter promene temperature radnog fluida – helijum

Na *slici 5.10* prikazan je karakter promene temperature radnog fluida kada se poveća brzina strujanja rashladne vode sa 0,1 m/s na 0,5 m/s. Promena temperature radnog fluida je za cca 19 stepena.



Slika 5.10 Karakter promene temperature radnog fluida prilikom povećanja brzine strujanja rashladne vode

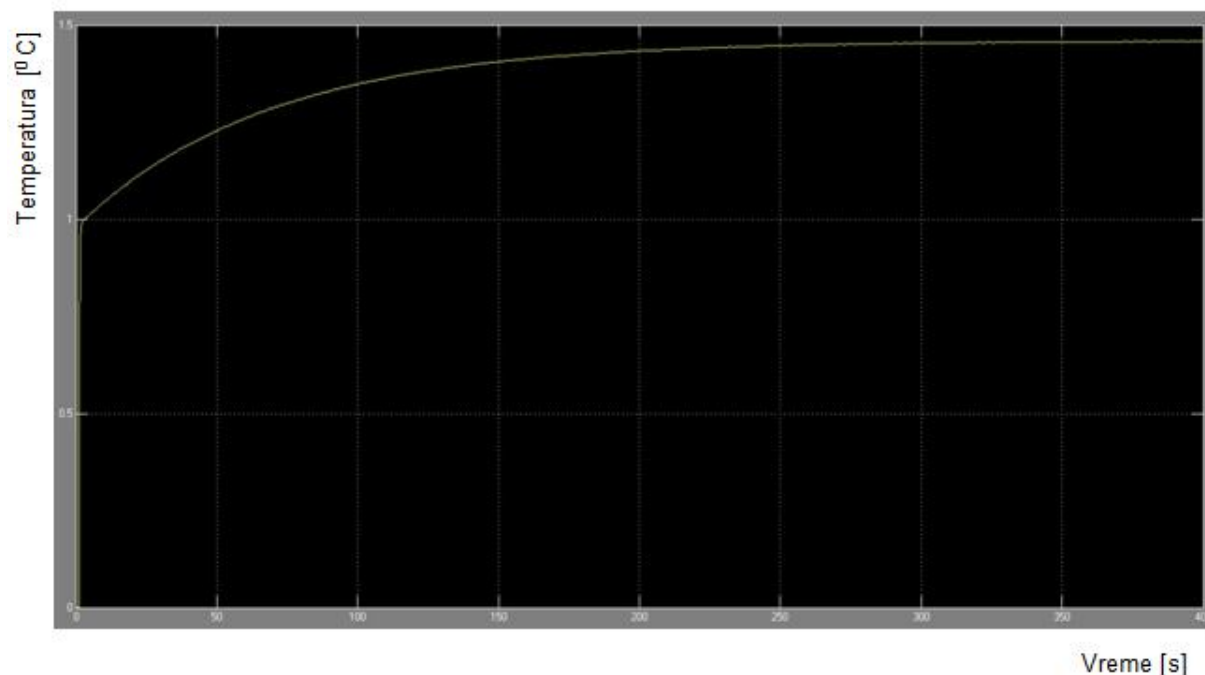
Što se tiče karaktera promene rashladne vode unutar izmenjivača toplote promena je prikazana na *slici 5.11*, pri čemu se može primetiti da Δt iznosi cca 2,5 stepena.



Slika 5.11 Karakter promene temperature rashladne vode

Prilikom povećanja brzine strujanja rashladne vode sa 0,1 m/s na 0,5 m/s ostvaruje se promena od cca 1,5 stepeni.

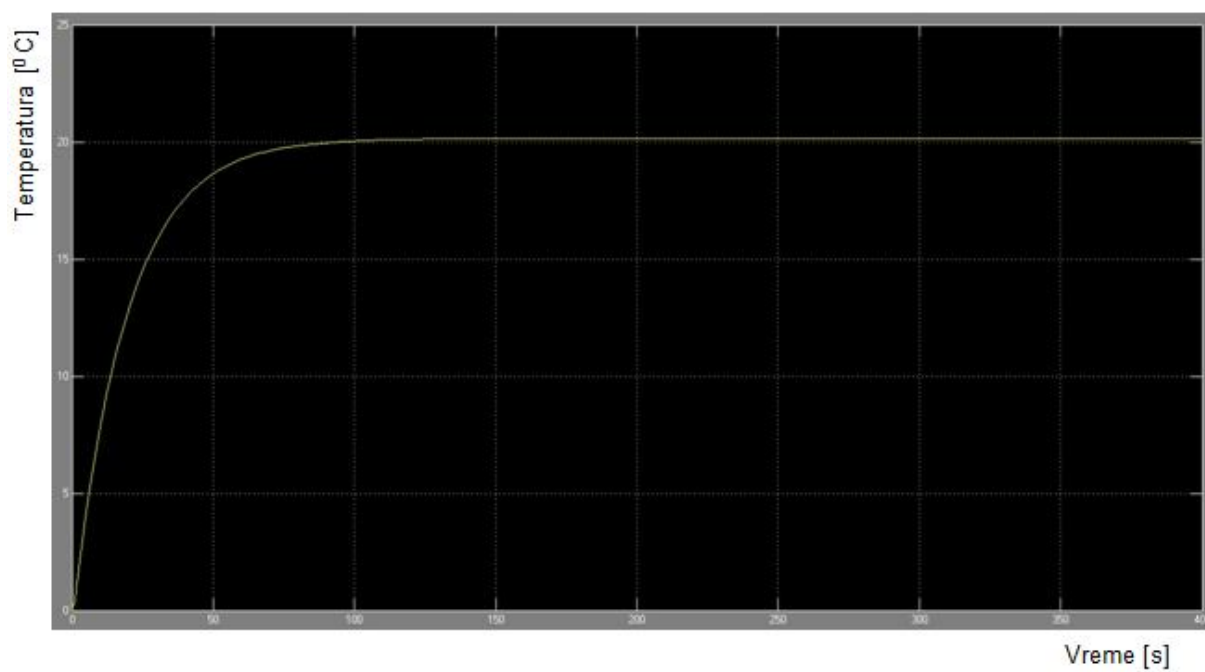
Uočljiva razlika između karaktera promena temperature prilikom povećanja brzine strujanja rashladne vode ostvaruje se iz razloga što se povećava količina rashladne vode koja protokne kroz izmenjivač toplote, što se može videti na *slici 5.12*.



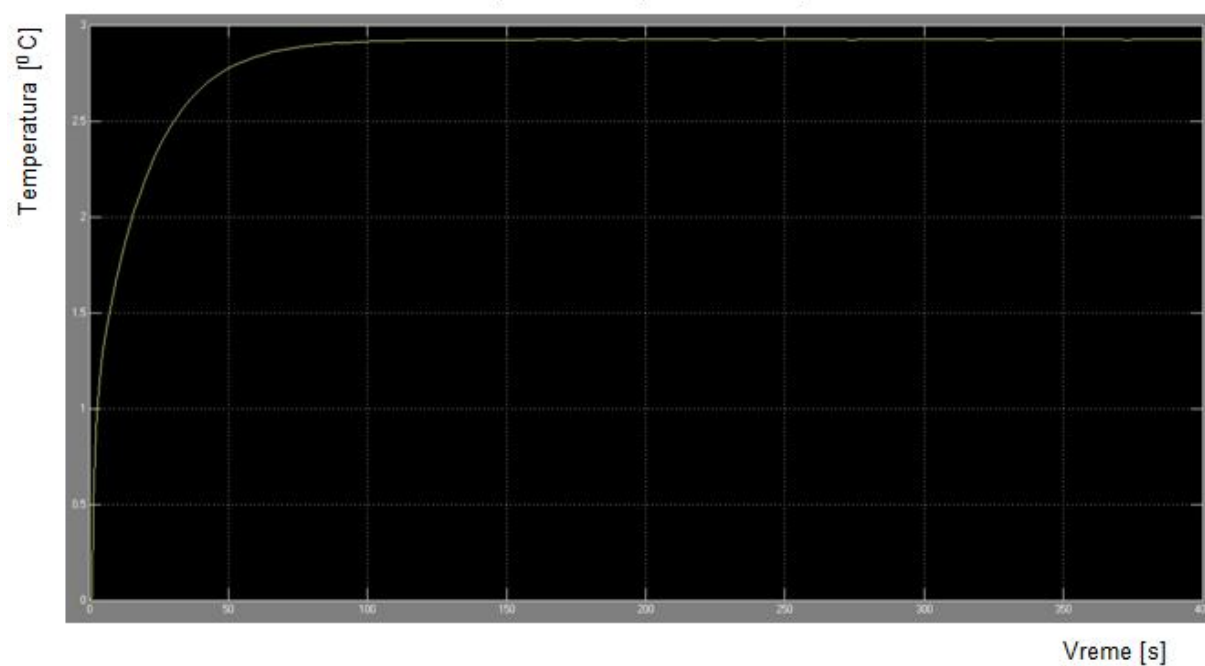
Slika 5.12 Karakter promene temperature rashladne vode prilikom povećanja brzine strujanja rashladne vode

Ukoliko se kao radni fluid umesto helijuma koristi acetilen, karakteri promena temperature radnog fluida i rashladne vode prikazani su na *slici 5.13* i *slici 5.14*.

Na slikama se može videti da se promenom radnog fluida, u ovom slučaju umesto helijuma koristi se acetilen, menjaju i karakteri promena temperature radnog fluida i rashladne vode.



Slika 5.13 Karakter promene temperature radnog fluida – acetilen



Slika 5.14 Karakter promene temperature rashladne vode – acetilen

Upoređujući *sliku 5.9* i *sliku 5.13* na kojima su prikazani karakteri promene temperature radnog fluida (helijum-acetilen) može se zaključiti da primenom acetilena kao radnog fluida sistem za cca 100 s zauzima stabilno stanje, dok primenom helijuma kao radnog fluida stabilno stanje sistema se uspostavlja nakon 300 s.

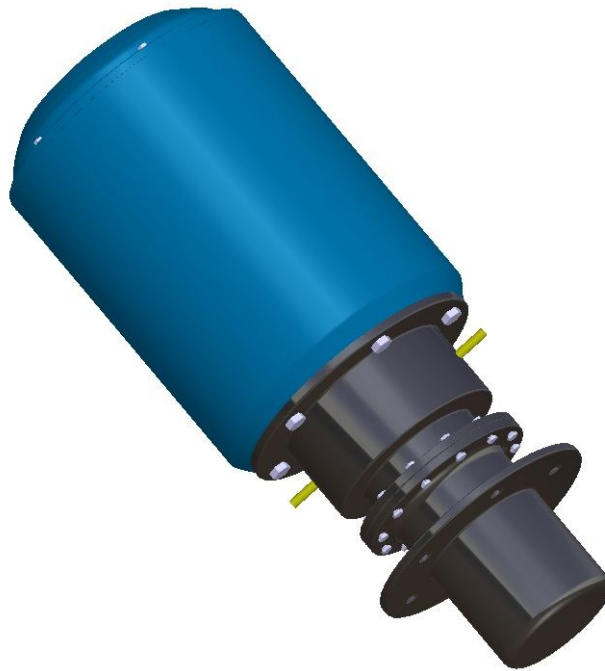
Na osnovu izvršenih simulacija može se zaključiti da je sistem osetljiv na promenu radnog fluida unutar Stirlingovog motora, zatim na promenu brzine strujanja rashladne vode, na promenu biomase kao goriva, promenu masenog protoka goriva u kotlu.

Primena drvnog peleta kao goriva predstavlja bolje rešenje kako zbog visoke toplotne moći koju ovo biogorivo poseduje tako i zbog automatskog sistema doziranja količine peleta koja se sagoreva u kotlu.

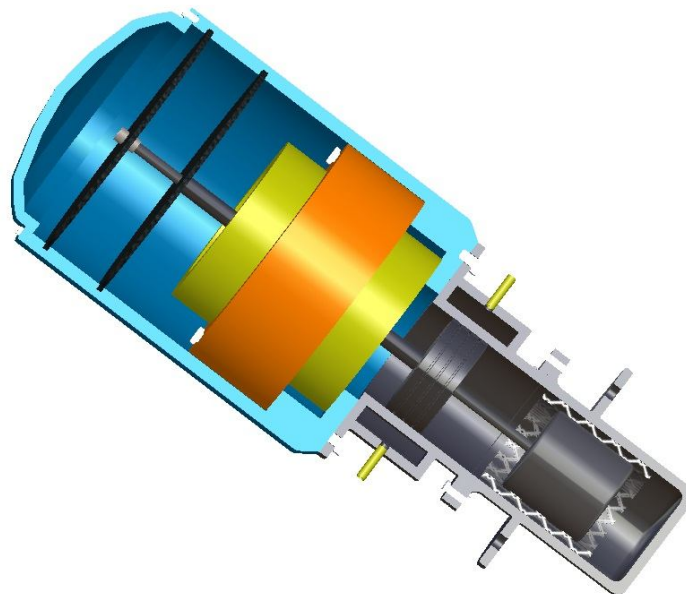
Iz svega navedenog potrebno je pažljivo pristupiti dimenzionisanju jednog ovakvog sistema kako bi se prilikom eksploatacije postigli najekonomičniji uslovi.

6. 3D MODEL MIKRO-KOGENERACIONOG POSTROJENJA

Na osnovu svega prethodno navedenog, i uz pomoć kataloga proizvođača [26, 27], softverskog paketa „CATIA V5R19“ urađen je 3D model mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom. Na *slici 6.1* i *slici 6.2* prikazan je Stirlingov motor sa linearnim alternatorom.

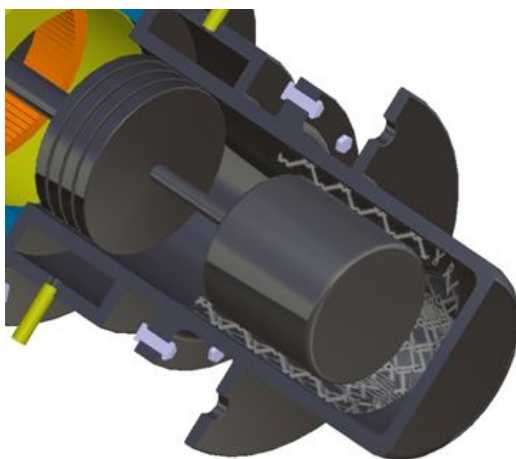


Slika 6.1 Stirlingov motor sa linearnim alternatorom



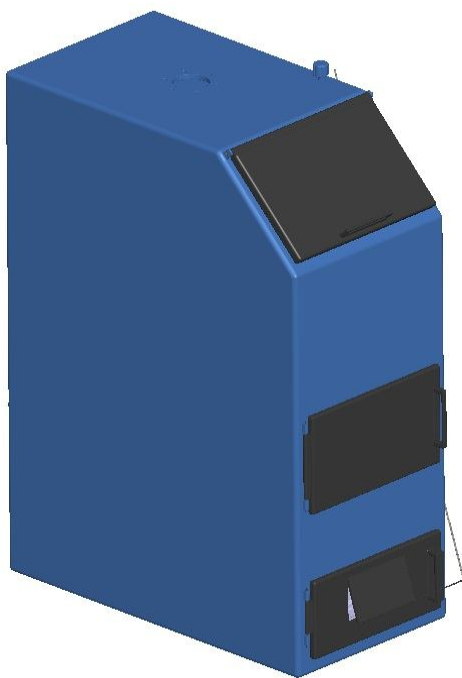
Slika 6.2 Presek Stirlingovog motora sa linearnim alternatorom

Topli cilindar koji prihvata toplotu koja se sagorevanjem biomase u kotlu predaje motoru prikazan je na *slici* 6.3. Na istoj slici se može videti i hladni cilindar u kome se radni fluid na niskoj temperaturi održava uz pomoć rashladne vode koja cirkuliše u izmenjivaču toplote koja obavlja hladni cilindar motora. Takođe se može primetiti i raspored pomeračkog klipa, “displejsera” i regeneratora unutar cilindra motora.



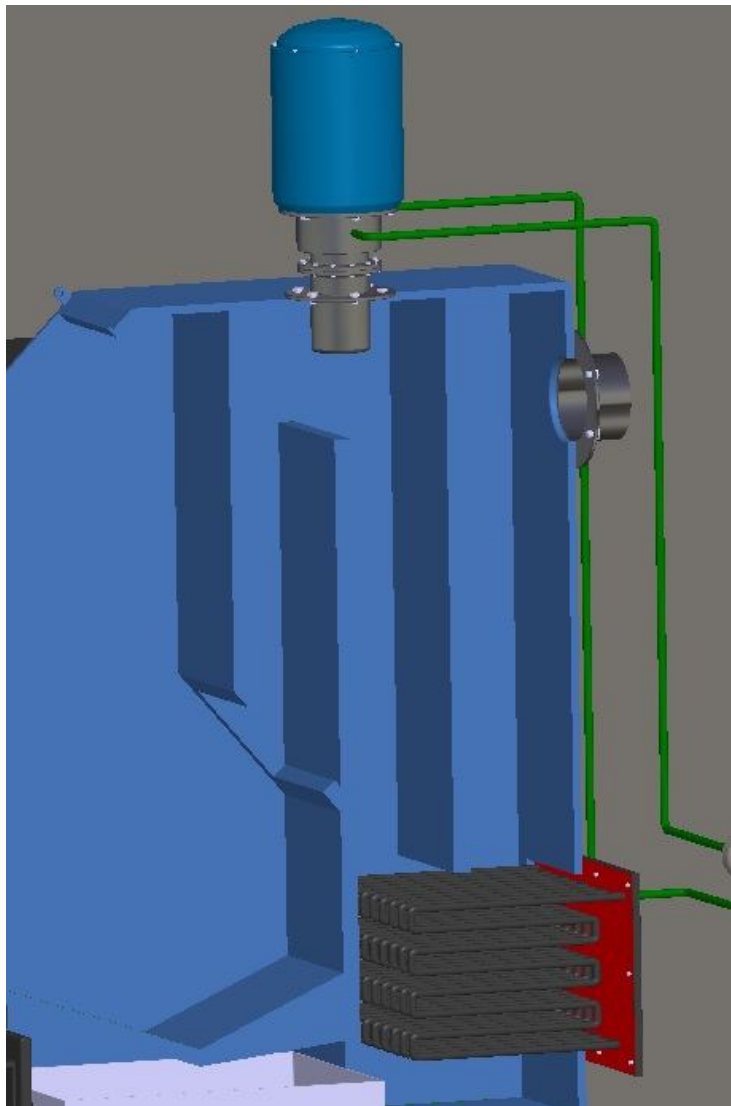
Slika 6.3 Topli i hladni cilindar Stirlingovog motora

Kotao u kome se sagoreva biomasa prikazan je na *slici* 6.4.



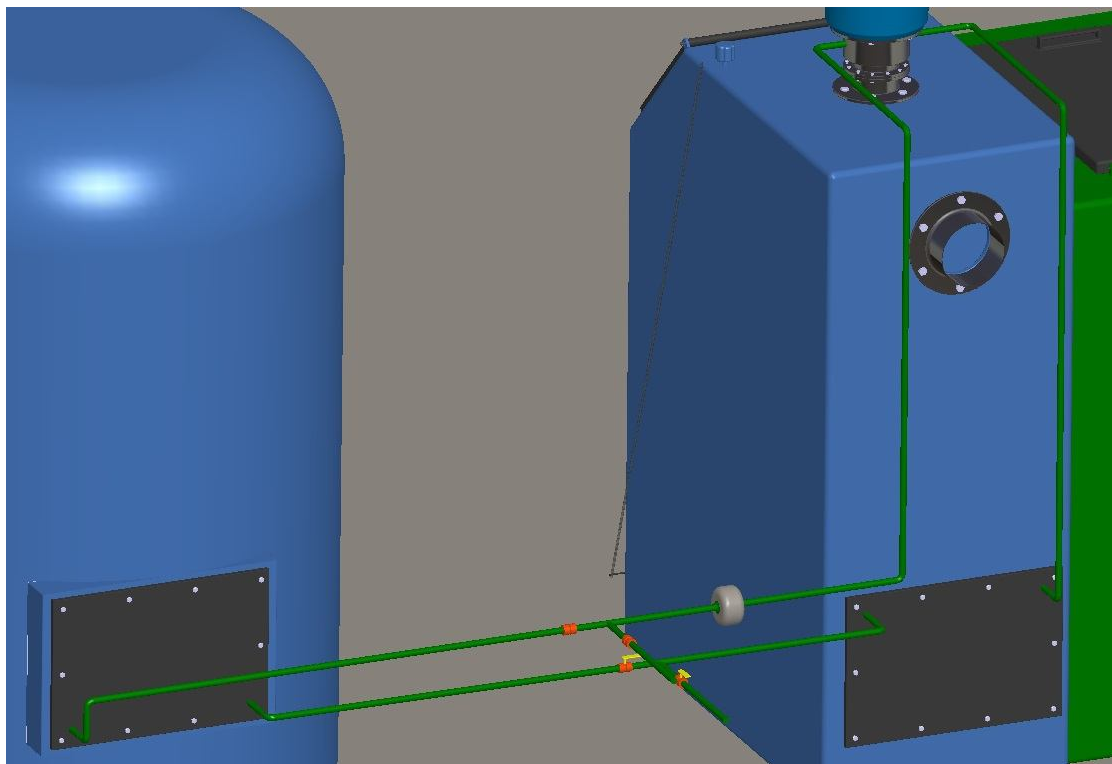
Slika 6.4 Kotao na biomasu

Na *slici 6.5* prikazan je sklop Stirlingovog motora i kotla na biomasu. Sagorevanjem biomase u kotlu oslobađa se toplota koja se u vidu dimnih gasova uz pomoć usmerivačkih kanala unutar kotla usmerava na primarni izmenjivač toplote koji je u ovom slučaju topli cilindar Stirlingovog motora, a zatim se dimni gas usmerava na sekundarni izmenjivač toplote u kome se zagreva voda.

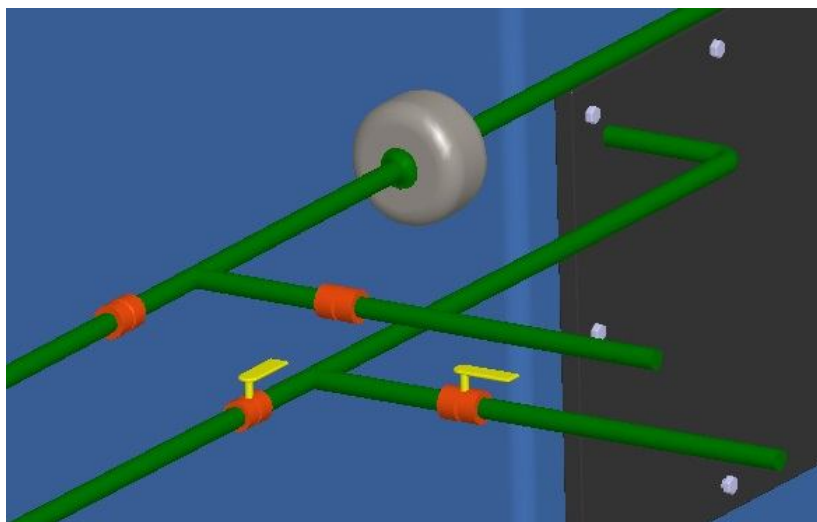


Slika 6.5 Sklop kotla na biomasu i Stirlingovog motora

Rashladna voda cirkuliše od hladnog cilindra motora do izmenjivača toplote unutar kotla, a zatim preko cevnog sistema do rezervoara tehničke vode (letnji režim rada) ili do sistema grejanja (zimski režim rada). Nakon toga voda se uz pomoć pumpe odlazi u izmenjivač toplote koji obavlja hladni cilindar Stirlingovog motora.

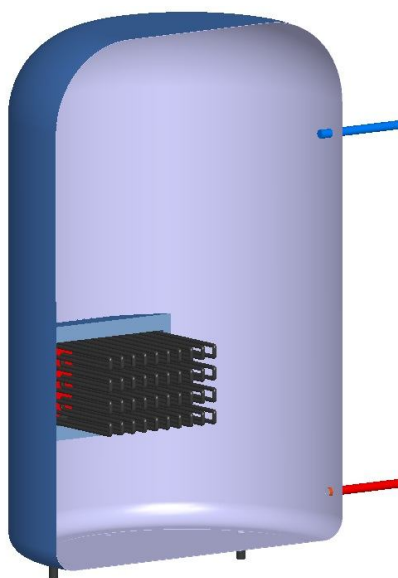


Slika 6.6 Cevni sistem mikro-kogeneracionog postrojenja



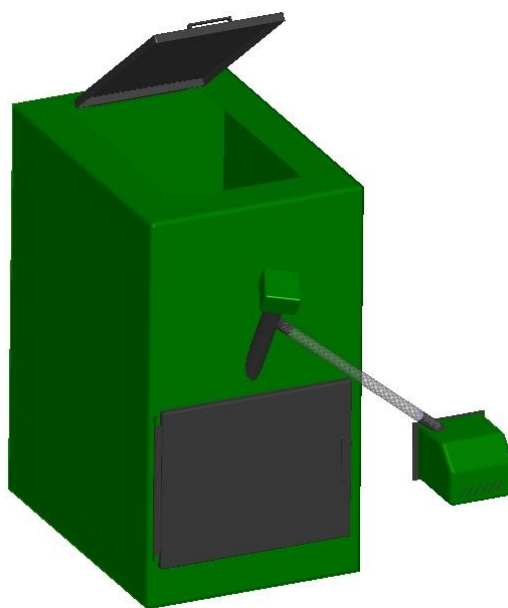
Slika 6.7 Cevni sistem ka rezervoaru tehničke vode i ka sistemu grejanja

Na *slici 6.8* nalazi se rezervoar tehničke vode unutar koga se može primetiti izmenjivač toplote preko koga se toplota vode predaje tehničkoj vodi.



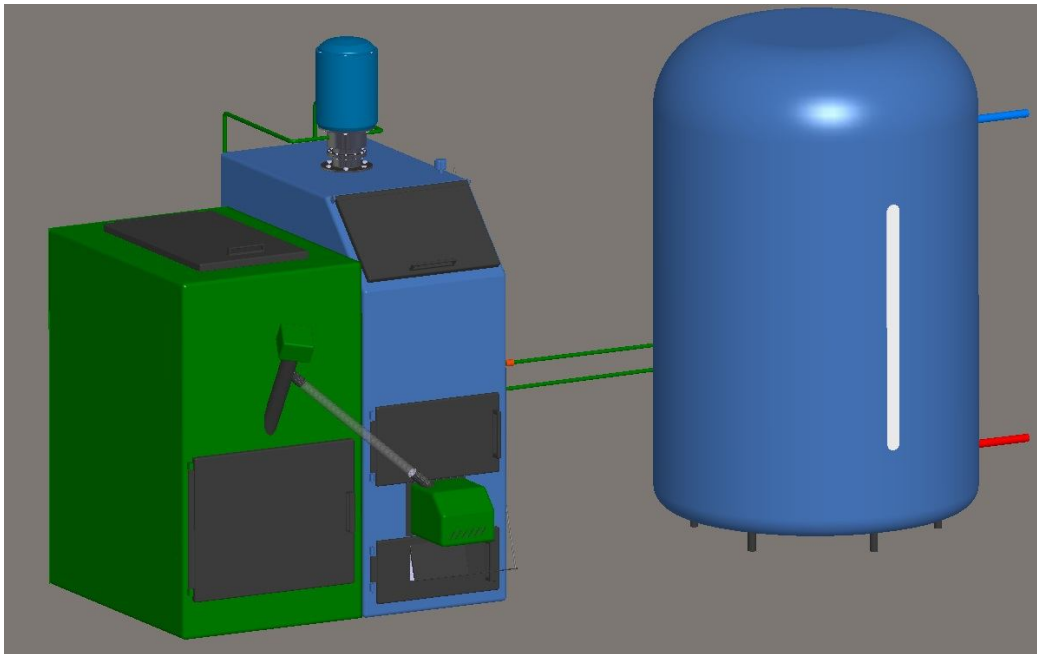
Slika 6.8 Presek rezervoara tehničke vode

Kotao se snabdeva biomasom (peletima) uz pomoć sistema za automatsko doziranje goriva. Sistem se sastoji iz rezervoara, pužnog transportera i dozatora peleta. Sistem je prikazan na *slici 6.9*.

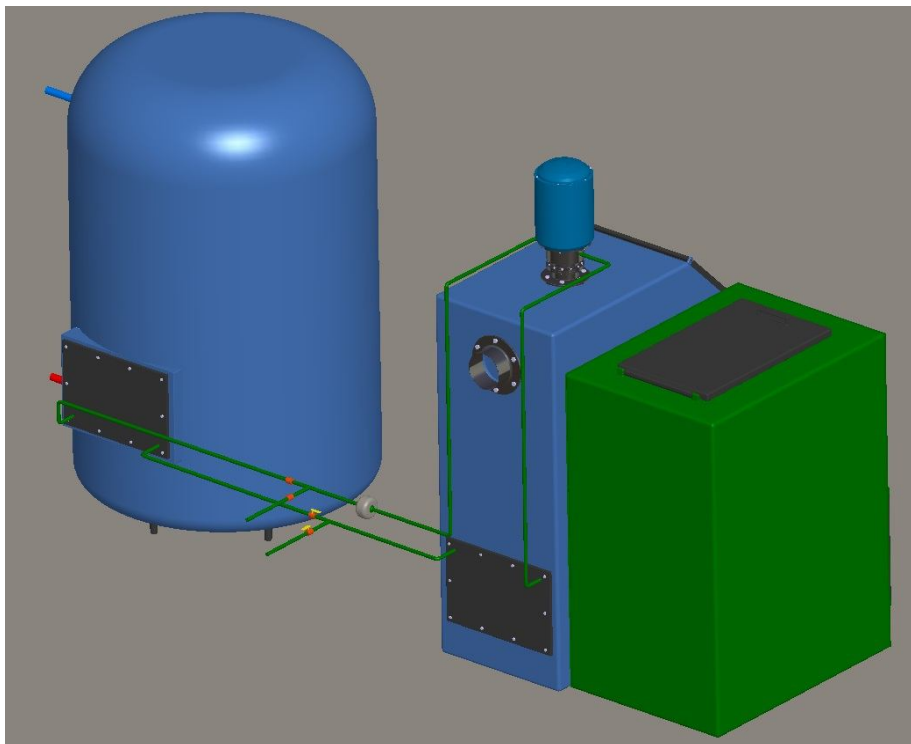


Slika 6.9 Sistem za snabdevanje kotla biomasom

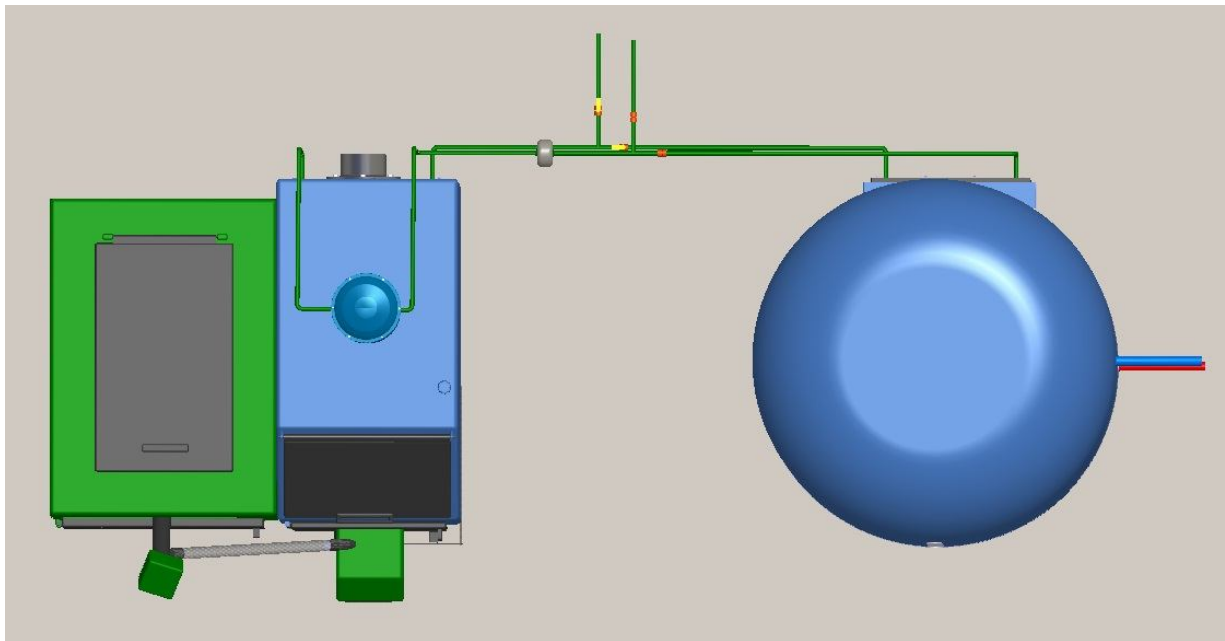
Celokupni sistem mikro-kogeneracionog postrojenja sa Stirlingovim motorom prikazan je na slikama 6.10 ÷ 6.12.



Slika 6.10 Mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom-pogled sa prednje strane



Slika 6.11 Mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom-pogled sa zadnje strane



Slika 6.12 Mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom-pogled odozgo

7. TEHNO - EKONOMSKA ANALIZA

Kogeneracijom biomase ne može se ostvariti cena proizvodnje električne i toplotne energije koja je niža ili jednaka od cene dobijene korišćenjem fosilnih goriva. Ipak, cilj je da se kogeneracija korišćenjem biomase sprovede tako da ekonomski pokazatelji budu što povoljniji [12].

Ekonomskom analizom utvrđuje se cena koštanja proizvodnje električne i toplotne energije u postrojenjima za kogeneraciju, i ona veličina otkupne cene električne energije pri kojoj se ostvaruje nulta rentabilnost proizvodnje. Pri proračunu pojedinačnih i ukupnih troškova polazi se od standardnih šema za izradu kalkulacija i podele troškova. Troškovi su svrstani u četiri grupe, i to [13]:

- ❖ troškovi osnovnih sredstava (investiciona ulaganja),
- ❖ troškovi goriva,
- ❖ pogonski troškovi,
- ❖ ostali troškovi.

Na ekonomske pokazatelje takođe uticaj ima angažovanje postrojenja u toku godine i iskorišćenje toplotne energije, stepen korisnosti (električni, termički i ukupni), cena električne i toplotne energije [12].

Ukupni prihod obračunava se na bazi uštede u smanjenoj kupovini električne i toplotne energije kao rezultata korišćenja električne i toplotne energije, dobijene u sopstvenom pogonu, korišćenjem biomase.

Pri utvrđivanju cene koštanja električne i toplotne energije raspodela ukupnih troškova zasniva se na udelu vrednosti toplotne i električne energije u ukupnom prihodu [13].

7.1 *Investiciona ulaganja*

Investiciona ulaganja u izgradnju mikro-kogeneracionog postrojenja obuhvataju ulaganja u kotao na pelet, sistem dozatora peleta i gorionik, Stirlingov motor, rezervoar tehničke vode, cevni sistem i prateći troškovi kao što je montaža sistema i sl.

Osim vrste tehnologije na specifičnu cenu, po kW nazivne električne snage, utiče i veličina postrojenja.

Pregledom ponuda više proizvođača kotlova na pelet došlo se do odabira kotla tipa "TOBY 12 B" domaćeg proizvođača "Termomont" [29].

Izabrani rezervoar tehničke vode je proizvođača "Centrometal" tip "CAS 1001" [30].

Što se tiče Stirlingovog motora cena je preuzeta iz stručnih radova stranih autora [31] iz razloga što u našoj zemlji ova tehnologija još uvek nije dovoljno razvijena. Kao prosečna cena

za Stirlingov motor proizvođača „Whispertech” električne snage 1 kW_e uzeta je vrednost od 10000 €. Investicija cevnog sistema sa armaturom i ostali investicioni troškovi su u proseku cca 500 €.

U *tabeli 7.1* prikazana je vrednost i struktura investicionih ulaganja u razmatrano postrojenje.

<i>Investicija</i>	<i>Ukupna investiciona ulaganja [€]</i>	<i>Specifična investiciona ulaganja [€/kW]</i>
<i>Kotao na pelet sa rezervoarom i gorionikom</i>	<i>1430</i>	<i>119,1</i>
<i>Stirlingov motor</i>	<i>10000</i>	<i>834</i>
<i>Rezervoar tehničke vode</i>	<i>785</i>	<i>65,4</i>
<i>Cevni sistem sa pratećom opremom</i>	<i>200</i>	<i>16,6</i>
<i>Ostalo</i>	<i>300</i>	<i>25</i>
<i>Ukupno</i>	<i>12715</i>	<i>1060</i>

Tabela 7.1 Vrednost i struktura investicionih ulaganja

7.2 Troškovi proizvodnje električne i toplotne energije

Troškovi osnovnih sredstava obuhvataju troškove amortizacije i troškove održavanja. Podloge za proračun ovih troškova su [13]:

- ❖ osnovice za amortizaciju ustanovljene su prema nabavnim cenama osnovnih sredstava. Pri tome, uzima se da je vek trajanja kotla na biomasu i Stirlingovog motora cca 12-15 godina, i iznose 6% od investicionih ulaganja u mikro-kogeneracioni sistem.
- ❖ troškovi održavanja utvrđeni su u visini određenog procenta od vrednosti osnovnih sredstava. Godišnji troškovi održavanja za kotao iznose 4% od nabavne vrednosti, a za Stirlingov motor 2% od njihove nabavne vrednosti,

Troškovi goriva utvrđuju se u skladu s utrošenim količinama biomase [13]. Cena peleta zajedno sa troškovima transporta, manipulisanja i skladištenja iznosi u proseku cca 120 €/t [32]. Sa masenim protokom goriva od 1,5 kg/h i eksploatacijom kotla od 8400 h godišnje potrebno je 12,6 tona peleta za potrebe snabdevanja kotla, što u proseku iznosi cca 1,05 t mesečno.

U većini slučajeva čvrsta biomasa dospeva sezonski, pri čemu je potrebno da se celokupna količina blagovremeno nabavi i uskladišti. To je nepovoljnije od korišćenja fosilnih goriva, koja mogu da se nabavljaju postepeno, prema potrebi. Ulaganje u kupovinu čvrste

biomase, sa obaveznom rezervom, dodatno opterećuje cenu i pri detaljnoj ekonomskoj analizi mora da se uzme u obzir [12].

Pogonski troškovi obuhvataju troškove sopstvene potrošnje električne energije, troškove iznošenja i odlaganja pepela i ostale pogonske troškove. Ukupna potrošnja električne energije za potrebe postrojenja je cca 50 W/h. Ostali pogonski troškovi su procenjeni na 1% od ukupnih investicionih ulaganja.

Ostali troškovi obuhvataju razne takse, članarine, doprinose itd. Visina ovih troškova određuje se u visini određenog procenta od vrednosti investicionih ulaganja. U ovom primeru ostali troškovi su vrednovani sa 0,8% od vrednosti ukupnih investicionih ulaganja [13]. Troškovi proizvodnje su sistematizovani i prikazani u tabeli 7.2.

Vrsta troška	Iznos (€)
<i>Troškovi amortizacije</i>	763
<i>Troškovi održavanja</i>	258
<i>Godišnja potrošnja goriva</i>	1512
<i>Pogonski troškovi (sopstvena potrošnja el.energije)</i>	25
<i>Ostali pogonski troškovi</i>	128
<i>Ostali troškovi</i>	102
Ukupni troškovi	2788

Tabela 7.2 Ukupni godišnji troškovi proizvodnje

7.3 Prihod ostvaren proizvodnjom električne i toplotne energije

U tabeli 7.3 data je visine prihoda ostvarenog na osnovu proizvedene toplotne i električne energije.

Pokazatelj	Količina energije kWh	Godišnji prihodi €
<i>Električna energija</i>	1,39	643
<i>Toplotna energija</i>	12	7258
Ukupno	13,39	7900

Tabela 7.3 Prihod ostvaren proizvodnjom električne i toplotne energije

Veliki uticaj na ekonomske pokazatelje postrojenja za kogeneraciju imaju cena električne i toplotne energije, koje korisnik plaća. Cena toplotne energije kreće se cca 8 din/kWh [33], odnosno prema trenutnom kursu cca 7 €cent/kWh pri čemu krajnji kupac dodatno plaća troškove instalacije i službe koja energiju distribuira i obavlja druge servise, održavanje i naplaćivanje [12].

Sadašnja cena električne energije u Srbiji, u proseku cca 5,5 €cent/kWh [33] može samo u izuzetnim slučajevima da pokrije troškove njene proizvodnje u postrojenjima za kogeneraciju, koja koriste biomasu. To je, na primer, slučaj kada se koristi otpad koji, inače, treba da se ukloni, pa je cena goriva nula.

U drugim slučajevima, a to je većina, povoljni ekonomski pokazatelji mogu da se ostvare samo ukoliko cena „zelene“ električne energije bude viša. Osnova za utvrđivanje visine cene „zelene“ električne energije je doprinos zaštiti životne sredine i smanjenju emisije GHG (Greenhouse Gases) [12].

Na osnovu Uredbe o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije, „Sl.glasnik RS“, br 99/2009 cena otkupa proizvedene električne energije za proizvodnju do 0,5 MW u elektrani na biomasu iznosi 13,6 €/kWh [34].

7.4 Period povratka investicionih ulaganja

Period povratka investicionih ulaganja u mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom prikazan je u tabeli 7.4, i dobija se kada se ukupna investiciona ulaganja podele sa razlikom između ukupnih prihoda i ukupnih troškova ostvarenih u toku godine.

Pokazatelj	Iznos
<i>Investicija</i>	12715 €
<i>Razlika prihoda i troškova na nivou godine</i>	5112 €
Period povratka investicija	2,49 god

Tabela 7.4 Period povratka investicionih ulaganja

Može se zaključiti da je period povratka investicionih ulaganja u mikro-kogeneraciono postrojenje sa Stirlingovim motorom snage 12 kW_t i 1,4 kW_e u proseku cca 2,5 godina, što ovakav sistem čini veoma isplativim. Važno je napomenuti da sa povećanjem broja radnih sati brži je i period otplate.

7.5 Potencijalni podsticajni fondovi

Gradnja postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije korišćenjem biomase, kao goriva, finansijski se podstiče u većini uređenih država. Fondovi za podsticaj su od privatnih, preko regionalnih unutar države, nacionalnih, internacionalnih i svetskih.

Povoljni krediti, pa i nepovratna sredstva, ne utiču značajno na ekonomske pokazatelje, ali dodatno motivišu investitore, kojima je olakšano zatvaranje finansijske konstrukcije. Davanje bespovratnih sredstava, i preko 50%, tipično je za izgradnju demonstracionih postrojenja.

Korisnik je tada u obavezi da svoje postrojenje da na uvid javnosti i da, u skladu sa ugovorom, omogući posete. Podsticaji su još veći ukoliko je reč o pilot postrojenju na kojem se obavljaju dodatna ispitivanja u cilju unapređenja. Tipično je da se izrada idejnog projekta, ispitivanje i eksperimentalni rad na demonstracionim postrojenjima plaća iz javnih fondova, kako materijalni troškovi, tako i stručna radna snaga [13].

Za finansiranje budućih demonstracionih i komercijalnih postrojenja na raspolaganju su brojne mogućnosti. Jedna od najznačajnijih je karbon kredit (prilog 2).

Osim toga, postoje različiti podsticajni fondovi Evropske unije, namenjeni članicama, zemljama kandidatima, potencijalnim kandidatima pa i trećim zemljama, ukoliko je reč o proverenom doprinosu zaštiti životne sredine ili podsticaju razvoja. Takođe, na raspolaganju su i brojni nacionalni fondovi, kako za gradnju demonstracionih postrojenja, tako i ostalih.

ZAKLJUČAK

Energija je neophodan resurs za tehnički i ekonomski razvoj savremenog sveta i uključena je u sve aspekte društvenog života. Upravo zbog toga, racionalno upravljanje energijom jedna je od ključnih pretpostavki održivog razvoja. Racionalno upravljanje energijom uključuje pre svega maksimalno iskorišćenje primarne energije u svim energetske procesima.

Sa svakodnevnim povećanjem potrošnje električne energije, neophodno je voditi računa o njenom korišćenju, kao i primeni sistema kojima se postiže rasterećenje mreže, decentralizacija proizvodnje i povećanje efikasnosti sistema. Upravo u tim aspektima mikro-kogeneracija pokazuje odlične rezultate, zbog čega se i očekuje njen prodor na tržište.

Da bi se postiglo smanjenje potrošnje električne energije i emisije štetnih gasova u atmosferu, posebnu pažnju treba posvetiti izboru mikro-kogeneracionog postrojenja i goriva koje je neophodno za rad ovih postrojenja.

Koristi mikro-kogeneracionih postrojenja kao što su smanjenje troškova za energijom, povećanje sigurnosti i pouzdanosti snabdevanja električnom energijom, očuvanje prirodnih resursa, boljom iskorišćenošću primarnog goriva, snižene emisije "Green House Gases" i emisije NO_x oksida, navode na sve veću primenu ove tehnologije.

Mikro-kogeneraciona postrojenja sa Stirlingovim motorom trebalo bi da imaju najveću mogućnost prodaje s obzirom da imaju najniže troškove, najkraći period povratka investicija i mogu se koristiti efikasno u najvećem broju stambenih objekata.

Izgradnjom mikro-kogeneracionog postrojenja doprinosi se održivom razvoju društva jer je ekonomski izvodljiv, ekološki prihvatljiv i obezbeđuje decentralizovanu proizvodnju električne i toplotne energije za pokrivanje sopstvenih potreba za energijom stambenog objekta. Rad mikro-kogeneracionih postrojenja je pouzdan i odlikuje ih dug životni vek bez značajnih zahvata osim redovnog održavanja opreme.

Osnovna ideja master rada bila je da se prikaže mogućnost primene mikro-kogeneracionog postrojenja sa biomasom kao oblika obnovljivog izvora energije u Srbiji i time još više podigne svest, zainteresovanost i olakša put za realizaciju ovakvog jednog projekta.

Master radom prikazane su mikro-kogeneracione tehnologije koje se najčešće primenjuju, sa svojim karakteristikama i načinom rada. Za konkretan primer odabrana je tehnologija sa Stirlingovim motorom koji je postavljen na kotao koji sagoreva biomasu (pelet). Ukupna snaga odabranog postrojenja je cca 12 kW_t. Postavljenim matematičkim modelom izvršene su simulacije u softverskom paketu "MatLab" i "Excel" i dobijene vrednosti grafički prikazane. U okviru master rada urađena je i tehno ekonomska analiza za posmatrani sistem i dobijena vrednost od 2,5 godine perioda otplate, što ovakav sistem čini relativno isplativim.

Na ovom primeru pokazalo se koliko je sistem mikro-kogeneracije energetski isplativiji od postojećeg konvencionalnog sistema. Svakako je za ovaj sistem povoljnije da je cena električne energije što viša, a goriva što niža.

Primena obnovljivih izvora energije podržavana je na svetskom nivou, s ciljem da se smanji debljina ugljen-dioksida u atmosferi, odnosno da se umanji efekat staklene bašte. Drugi razlog za primenu obnovljivih izvora energije jeste da se smanji korišćenje fosilnih izvora energije čije su rezerve ograničene. Biomasa predstavlja jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije u svetskim razmerama.

Srbija, ukoliko istraje na putu ka pridruživanju Evropskoj uniji, ima obavezu da prati energetske politiku Unije, a to znači da što više koristi obnovljive izvore energije. Druga međunarodna obaveza proističe iz potpisivanja Kyoto protokola. Korišćenje biomase za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije jedan je od najperspektivnijih postupaka za ispunjavanje tih obaveza. Osim toga, korišćenjem domaćih resursa, potpomaže se privreda zemlje, a postiže i, strateški važna, manja zavisnost od uvoza energenata.

Tehnologije za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije iz biomase brzo se razvijaju. Brojni postupci su na nivou potpune zrelosti za primenu u praksi. Tom stepenu zrelosti približava se korišćenje mikro-kogeneracije sa Stirlingovim motorom. Ekonomski pokazatelji mikro-kogeneracije korišćenjem biomase zavise od cene postrojenja (investicija), cene goriva, angažovanja u toku godine, troškova rada, stepena korisnosti, cene električne i toplotne energije. Svaki od ovih parametara može da ima odlučujući uticaj na ekonomske pokazatelje.

Može se zaključiti da su mikro-kogeneraciona postrojenja tehnologija budućnosti. Ona će svakako naći svoju primenu ako Srbija odluči pratiti svetske energetske trendove. Stvaranje povoljnih uslova za ostvarenje ovih predviđanja značilo bi učiniti nekoliko stvari. Pre svega to je uređenje zakonodavnog okvira koji će biti podsticajan za tehnologije prihvatljive za životnu sredinu. Poželjni su takođe razni novi oblici finansiranja, a u cene otkupa električne energije trebale bi biti uključene razvojna i ekološka komponenta. U slučaju integrisanja Srbije u Evropsku Uniju takav scenario postaje realan.

Prilog 1

Usvojeni koeficijenti matematičkog modela

$$a_1 = - \left(\frac{UA_{HX}}{m_{eng} c_{p,eng}} + \frac{UA_{loss}}{m_{eng} c_{p,eng}} \right),$$

$$a_2 = \frac{UA_{HX}}{m_{eng} c_{p,eng}},$$

$$a_3 = \frac{UA_{HX}}{m_{cw} c_{p,cw}},$$

$$a_4 = - \left(\frac{UA_{HX}}{m_{cw} c_{p,cw}} + \frac{\dot{m}_{cw}}{m_{cw}} \right)$$

$$b_1 = \frac{1}{m_{eng} c_{p,eng}},$$

$$b_2 = \frac{\dot{m}_{cw}}{m_{cw}},$$

$$d_1 = \frac{UA_{loss}}{m_{eng} c_{p,eng}}$$

Prilog 2

Karbon kredit

Namena davanja karbon kredita je da se smanji emisija CO₂ u atmosferu, a time povećanje debalansa i uticaj na povećanje efekta staklene bašte. Karbon kredit je jedan od mehanizama za ostvarenje zahteva Kyoto protokola. Karbon kredit može da se odobri za više aktivnosti, a najčešće za one kojima se:

- ❖ smanjuje ili eliminiše emisija CO₂, na primer, korišćenjem biomase ili vodotokova,
- ❖ deluje na očuvanje životne sredine i negativnog efekta GHG⁹.

Najbolji način da se ispita mogućnost dobijanja Karbon kredita jeste da se o tome obavesti nacionalna institucija zadužena za ovu oblast. Druga mogućnost je da se kontaktira UNFCC¹⁰ [13].

Pravo na trgovinu Karbon kreditima imaju industrijski razvijene zemlje (tzv. Aneks I zemlje), koje imaju obavezu smanjenja emisija GHG do 2012. godine, uz obavezu vođenja i dostavljanja emisije tih gasova svake godine (EU preuzela obavezu prema Kyoto protokolu da smanji emisiju CO₂ za 8% u odnosu na 1990. godinu u periodu 2008-2012. godina) [35]. Takođe pravo na karbon kredit mogu da ostvare i zemlje u razvoju (tzv. ne-Aneks I zemlje), koje nemaju obaveze u pogledu smanjenja emisija, ali mogu da doprinesu smanjenu emisija GHG, putem realizacije projekata kroz Mehanizam čistog razvoja¹¹ Kyoto protokola [35].

Skupština Srbije je 24.9.2007. godine ratifikovala Kyoto protokol kao „ne-Aneks I” zemlja (*Službeni glasnik*, 88/07) i potpisala Sporazum o energetske zajednici evropskih i zemalja jugoistočnog Balkana [13].

Pod Kyoto Protokolom, stvorena su tri fleksibilna mehanizma da bi se ohrabрили novi projekti koji stvaraju kapacitete za smanjenje emisije ugljen-dioksida. Ta tri mehanizma su:

- ❖ Međunarodna trgovina emisijama (International Emission Trading – IET) koja omogućava državama iz „Aneksa I” da međusobno prenose njima “dodeljene emisije” (Assigned Amount Units – AAU).
- ❖ Zajednička implementacija (Joint Implementation – JI) dozvoljava državama upotrebu “karbon kredita” za ostvarenje svoje obaveze prema Protokolu, a koji nastaju kroz smanjenje emisije prilikom investiranja u drugoj industrijalizovanoj državi i rezultira prenosom odgovarajućeg iznosa “jedinica smanjenja emisije” (Emission Reduction Units – ERU) između država.
- ❖ Mehanizam čistog razvoja (Clean Development Mechanism – CDM) dozvoljava projekte smanjenja emisije, podržavajući održivi razvoj zemlje u razvoju, kojima se generiše “sertifikovano smanjenje emisije” (Certified Emission Reductions – CER) i koje može koristiti investitor za potrebe ispunjenja obaveza matične zemlje [35].

⁹ Greenhouse Gas

¹⁰ United Nations Framework Convention Climate Change

¹¹ Clean Development Mechanism, CDM

Prva dva fleksibilna mehanizma Kyoto protokola se tiču samo zemalja „Aneksa I”. Mehanizam čistog razvoja Kyoto protokola (CDM) je mehanizam u okviru protokola, koji omogućava pravnim licima iz industrijski razvijenih zemalja (Aneks I zemlje) da investiraju u projekte koji smanjuju emisije GHG, a realizuju se na teritorijama zemalja u razvoju (ne-Aneks I zemlje).

Svrha CDM-a je zapravo pomoć zemljama domaćinima (ne-Aneks I zemlje) da, na finansijski povoljniji način, postignu održivi razvoj doprinoseći smanjenju emisija GHG i da pri tome pomognu „Aneks I” zemljama u ispunjavanju svojih obaveza prema Kyoto protokolu. Postignuti rezultati smanjenja emisija se obračunavaju kao *verifikovana smanjenja emisija* (Certified Emission Reductions, CER), koja imaju svoju vrednost na tržištu.

Važno je napomenuti da "ne-Aneks I" zemlje, na čijim se teritorijama realizuju CDM projekti, takođe imaju koristi, jer na taj način privlače značajne investicije, povećavaju transfer novca i omogućavaju uvođenje modernih ("zelenih") tehnologija, koje su ekološki prihvatljivije, tehnološki naprednije i energetske efikasnije. Prodajom CER-ova, koji nastaju kao rezultat realizacije CDM projekata, moguće je čak i finansijski neatraktivne, a ekološki prihvatljive projekte učiniti isplativim i privlačnim za investitore [35].

LITERATURA

- [1] „Priručnik za poboljšanje energetske efikasnosti i racionalnu upotrebu energije u industriji“, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, mreža za energetske efikasnost u industriji Srbije, Beograd 2009. god.
- [2] KYOTO PROTOKOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, UNITED NATIONS, 1998
- [3] DIRECTIVE 2003/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 8. May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport
- [4] DIRECTIVE 2001/77/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market
- [5] **M.Radaković**, „Bio-dizel, gas, masa“ AGM knjiga, Beograd 2009. god.
- [6] **M.Despotović, M.Babić**, „Energija Biomase“ Monografija, Mašinski Fakultet Kragujevac, 2007. god.
- [7] <http://sr.wikipedia.org/sr/kogeneracija> pristupljeno 20.02.2013. god.
- [8] <http://sr.wikipedia.org/sr/biomasa> pristupljeno 26.02.2013. god.
- [9] **Maslo Merima** „ANALYSIS THE EFFICIENCY OF MICRO COGENERATION IN TERMS OF FUELTYPES“ Faculty of Engineering and Computing – University of Mostar Matice Hrvatske b.b., 88000 Mostar Bosnia and Herzegovina
- [10] DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 11. February 2004 on the promotion of cogeneration based on useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EC
- [11] **Tuula Mäkinen, Jaakko Larjola, Jussi Heinimö** “Micro and small-scale CHP from biomass (< 300 kWe) for distributed energy”, OPET Finland, VTT, 11/2003. god.
- [12] „Mogućnosti kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije iz biomase u AP Vojvodini“, Republika Srbija Autonomna pokrajina Vojvodina Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine, Univerzitet u Novom Sadu Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, April 2008. god.
- [13] „Studija mogućnosti kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije iz biomase“, Republika Srbija Autonomna pokrajina Vojvodina Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine, Univerzitet u Novom Sadu Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Februaara 2008. god.
- [14] <http://www.capstoneturbine.com/> pristupljeno 02.04.2013.
- [15] **Günter R. Simader, Robert Krawinkler, Georg Trnka** “Micro CHP systems: state-of-the-art”, Austrian Energy Agency, Vienna, March 2006. god.
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Brayton_cycle pristupljeno 02.04.2013.

- [17] <http://sr.wikipedia.org/stirlingengine> pristupljeno 03.04.2013.
- [18] **Maier Christoph, Gil Arnaud, Aguilera Rafael, Shuang Li, Yu Xue** „Stirling Engine“, University of Gävle, November 2007.
- [19] **Bancha Congtragool, Somchai Wongwises**, „A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 3 October 2002.
- [20] **Ian Beausoleil-Morrison (Natural Resources Canada), Alex Ferguson (Natural Resources Canada), Brent Griffith (National Renewable Energy Laboratory), Nick Kelly (University of Strathclyde), François Maréchal (École Polytechnique Fédéral de Lausanne), Andreas Weber (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research)** „Specifications for Modelling Fuel Cell and Combustion-Based Residential Cogeneration Devices within Whole-Building Simulation Programs“, Annex 42 of the International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, October 2007.
- [21] **Masoud Ziabasharhagh, Mostafa Mahmoodi** "Numerical Solution of Beta-type Stirling Engine by Optimizing Heat Regenerator for Increasing Output Power and Efficiency", Journal of Basic and Applied, 2012
- [22] http://sl.wikipedia.org/wiki/Specificna_toplota pristupljeno 18.04.2013.
- [23] **Youssef Timoumi , Iskander Tlili, Sassi Ben Nasrallah** "Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines", , Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Énergétiques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Rue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie, 30 May 2007
- [24] **M. Kuosa, J. Kaikko, L. Koskelainen** "The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the Stirling engine", Lappeenranta University of Technology, Department of Energy and Environmental Technology, P.O. Box 20, FI-53851 Lappeenranta, Finland, 02 October 2006
- [25] http://polj.uns.ac.rs/Files/tehnologijapp/ENERGETIKA_OBNOVLJIVI_ZVORI_ENERGIJE pristupljeno 17.04.2013.
- [26] <http://www.centrometal.hr/> pristupljeno 15.04.2013. godine
- [27] <http://www.boilersforpellets.com/> pristupljeno 20.04.2013. godine
- [28] **Sham Tickoo, Vivek Singh**, „CATIA V5R18 za mašinske inženjere“, Beograd Mikroknjiga 2009
- [29] <http://www.termomont.co.rs/> pristupljeno 18.05.2013. godine
- [30] <http://www.centrometal.hr/> pristupljeno 18.05.2013. godine
- [31] **Michel De Paepe, Peter D'Herdt, David Mertens**, „Micro-CHP systems for residential applications“, Energy Conversion and Management 47, 28 february 2006.god.
- [32] <http://www.bioenergy-point.rs/> pristupljeno 18.05.2013. godine
- [33] <http://www.servisinfo.com/> pristupljeno 18.05.2013. godine

- [34] Uredba o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije, „Sl.glasnik RS“, br 99/2009
- [35] “Energija, energetski menadžment i uticaj koji korišćenje energije ima na životnu sredinu”, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski Fakultet, Katedra za Energetiku i procesnu tehniku, Regionalni Evro centar za energetske efikasnost (RECEEKG), 2009.god.