



Biogas

Dobijanje i primena

Miroslav Stanojević
Stojan Simić
Aleksandar Jovović
Dejan Radić
Marko Obradović
Dušan Todorović



**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

Prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž. maš.

Prof. dr Stojan Simić, dipl. inž. maš.

Prof. dr Aleksandar Jovović, dipl. inž. maš.

Prof. dr Dejan Radić, dipl. inž. maš.

Marko Obradović, dipl. inž. maš.

Dušan Todorović, dipl. inž. maš.

**BIOGAS
DOBIJANJE I PRIMENA**

I izdanje

Beograd, 2014.

Miroslav Stanojević, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet
Stojan Simić, vanredni profesor, Mašinski fakultet u Istočnom Sarajevu
Aleksandar Jovović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet
Dejan Radić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet
Marko Obradović, asistent, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet
Dušan Todorović, istraživač saradnik, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet

BIOGAS

DOBLJANJE I PRIMENA

pomoćni udžbenik

I izdanje

Recenzenti

Prof. dr Goran Jankes, dipl. inž. maš.
Prof. dr Dušan Golubović, dipl. inž. maš.

Izdavač

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET
Kraljice Marije br. 16, 11120 Beograd 35
Srbija

Za izdavača:

Dekan, prof. dr Milorad Milovančević

Urednik:

Prof. dr Aleksandar Obradović

Tehnički urednik:

Goran Janjić, dipl. inž. maš.

Dizajn korica:

Nemanja Dragojlović

Štampa i povez:

”Planet print”, Ruzveltova br. 10
11000 Beograd

Odobreno za štampu:

Odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu
br. 286/14 od 13.11.2014.

Tiraž:

300 primeraka

ISBN 978-86-7083-796-6

Predgovor

U vremenu kada se rezerve fosilnih goriva smanjuju, potrebe za energijom konstantno rastu, a životnu sredinu ugrožava neadekvatno zbrinjavanje otpada, korišćenje organskih materijala koji nastaju pri obradi komunalnih otpadnih voda i biološkog otpada sve više dobija na značaju u procesu proizvodnje energije. Težnja za smanjenjem zavisnosti od fosilnih goriva i dobijanjem jeftine energije dovela je do značajnih ulaganja u razvoj tehničkih rešenja za iskorišćenje alternativnih izvora energije. U poslednje vreme sve više se razvija biogasna industrija gde se kao produkti anaerobne digestije dobijaju biogas koji se koristi kao energent u različitim oblastima čovekove delatnosti i prevreli supstrat (biođubrivo) za potrebe poljoprivrede.

Pored toga što je relativno jednostavan za skladištenje i što ima visoku toplotnu moć biogas je prihvatljiv kao gorivo sa aspekta emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. U zavisnosti od vrste primene potrebno je obezbediti odgovarajući kvalitet kao i pouzdano snabdevanje krajnjih korisnika biogasom.

Knjiga "Biogas - dobijanje i primena" je nastala kao rezultat višegodišnjeg rada autora u ovoj oblasti. U knjizi je obrađen proces anaerobne digestije sa posebnim osvrtom na dobijanje, svojstva i sastav biogasa u zavisnosti od vrste sirovine i parametara procesa.

Prezentovane su tehničke i eksploatacione karakteristike i primeri proračuna postrojenja za anaerobnu obradu otpadnih materijala različitog porekla.

Materija koja je obradjena u knjizi uključena je u programe više predmeta (Upravljanje otpadom i otpadnim vodama; Peći i kotlovi u industriji i Gorivi, tehnički i medicinski gasovi) na master studijama Modula za procesnu tehniku i zaštitu životne sredine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Kako je u zemljama u regionu literatura iz ove oblasti oskudna, nadamo se da će ova knjiga biti od pomoći stručnjacima koji rade na poslovima projektovanja i eksploatacije biogasnih postrojenja kao i studentima tehničkih fakulteta u čijem nastavnom programu je ova oblast zastupljena.

Zahvaljujemo se svima onima koji su pomogli izdavanje ove knjige, kao i recenzentima koji su nizom korisnih sugestija doprineli da knjiga dobije konačnu formu.

Unapred se zahvaljujemo na svim konstruktivnim primedbama i sugestijama koje ćemo uzeti u obzir i ugraditi u eventualno buduće izdanje ili proširenje ove knjige.

SADRŽAJ

	Uvod.....	8
1.	Značaj primene obnovljivih izvora energije.....	10
1.1.	Vrste energije.....	10
1.2.	Energija biomase.....	18
1.3.	Biogoriva.....	21
2.	Biogas kao produkt anaerobne obrade otpadnih materijala.....	26
2.1.	Supstrat za anaerobnu digestiju.....	26
2.2.	Karakteristike postupka anaerobne digestije.....	29
2.2.1.	Mikrobiologija anaerobne digestije.....	30
2.3.	Potrebni tehnološki uslovi za anaerobnu digestiju.....	34
2.4.	Vrste anaerobne digestije u zavisnosti od broja faza procesa.....	45
2.4.1.	Jednofazni procesi anaerobne digestije.....	46
2.4.2.	Dvofazni procesi anaerobne digestije.....	50
2.5.	Produkcija metana.....	51
3.	Tehničke i tehnološke karakteristike postrojenja za anaerobnu obradu otpadnih materijala.....	53
3.1.	Prinos biogasa iz različitih sirovina.....	55
3.2.	Konstrukciona rešenja digestora.....	61
3.3.	Uslovi za konstruisanje digestorskih postrojenja.....	70
3.4.	Dimenzionisanje digestorskih postrojenja.....	70
3.4.1	Kriterijumi za određivanje veličine digestora.....	71
3.4.2.	Određivanje potrebne veličine digestora.....	74
3.4.3.	Određivanje debljine zida digestora.....	75
3.4.4.	Dimenzionisanje pokretne kupole digestora.....	77
3.4.5.	Dimenzionisanje cevovoda i izbor armature.....	79
3.4.6.	Dimenzionisanje i izbor pumpe za transport supstrata.....	80
3.4.7.	Grejanje i toplotna izolacija digestora.....	84
3.4.8.	Energetski bilans digestora.....	97

3.4.9.	Energija dobijena iz biogasa.....	98
3.4.10.	Punjenje i pražnjenje digestora.....	99
3.4.11.	Ostala oprema i uređaji biogasnih postrojenja.....	101
3.4.12.	Skladištenje biogasa.....	103
3.5.	Prečišćavanje biogasa.....	105
3.5.1.	Prečišćavanje biogasa od ugljen-dioksida.....	107
3.5.2.	Prečišćavanje biogasa od vodonik-sulfida.....	117
3.5.3.	Izdvajanje vlage i elemenata u tragovima iz biogasa.	125
3.5.4.	Uporedni prikaz tehnologija za prečišćavanje biogasa.....	129
3.6.	Praćenje i kontrola procesnih parametara biogasnih postrojenja.....	131
3.7.	Mere sigurnosti biogasnih postrojenja.....	133
3.8.	Biogasna postrojenja.....	134
3.8.1.	Postrojenja za dobijanje biogasa iz poljoprivrednog otpada.....	134
3.8.2.	Postrojenja za dobijanje biogasa iz industrijskog otpada.....	150
3.8.3.	Postrojenja za dobijanje biogasa pri obradi otpadnih voda i stabilizaciji mulja	151
3.8.4.	Postrojenja za dobijanje biogasa iz čvrstog komunalnog otpada.....	160
3.9.	Iskustva industrijski razvijenih zemalja u oblasti biogasne tehnike.....	161
4.	Svojstva i karakteristike biogasa.....	167
4.1.	Svojstva biogasa.....	168
4.2.	Toplotna svojstva biogasa.....	170
4.3.	Sastav biogasa.....	180
4.4.	Primer proračuna parametara procesa sagorevanja biogasa.....	183
5.	Primene biogasa.....	190
5.1.	Mogućnosti primene biogasa.....	190
5.1.1.	Primena biogasa u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju energije.....	191
5.1.2.	Primena biogasa za pogon malih turbina.....	192

5.1.3.	Primena biogasa za gorive ćelije.....	193
5.1.4.	Primena biogasa za pogon motornih vozila i injektovanje u distributivnu gasnu mrežu.....	194
5.1.5.	Primena metana i ugljen-dioksida u hemijskoj industriji.....	195
5.2.	Prednosti primene biogasa.....	195
6.	Postupak proračuna biogasnih postrojenja.....	200
6.1.	Primer postupka proračuna postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda	200
6.1.1.	Materijalni bilans procesa.....	202
6.1.2.	Dimenzionisanje glavnih cevovoda postrojenja.....	211
6.2.	Primer postupka proračuna postrojenja za anaerobni tretman tečnog stajnjaka sa farme svinja.....	213
	Korišćeni termini, skraćenice i oznake.....	220
	Literatura.....	226

UVOD

Stalni porast cena goriva, pre svega nafte i naftnih derivata značajno utiče na troškove proizvodnje u industriji, poljoprivredi i ostalim oblastima čovekove delatnosti. Jedna od glavnih osnova današnjeg visokog stepena tehničko-tehnološkog razvoja je energija.

Racionalizacija korišćenja energije je trajan proces koji obuhvata kako njenu proizvodnju i potrošnju, tako i zaštitu čovekove životne i radne sredine. Karakteristike savremenih energetske postrojenja su visok stepen efikasnosti uz sve manju jediničnu potrošnju energije za potrebe tehnoloških procesa. Uporedo sa naporima za racionalizaciju korišćenja energije, odvija se istraživanje i razvoj novih izvora gde posebno mesto zauzimaju obnovljivi izvori kao što su energija biomase, vetra, Sunca, vodenih tokova, geotermalna energija i energija mora i okeana.

Za tretman organskog otpada najčešće se primenjuju biološki procesi kao što su anaerobna digestija i aerobna razgradnja (kompostiranje). Prednosti anaerobne digestije u odnosu na kompostiranje su jednostavnije upravljanje organskim otpadom sa velikim udelom vlage, dobijanje biogasa kao energenta i kontrola emisije neprijatnih mirisa. Anaerobna digestija je višestepeni biohemijski proces koji se može primeniti na više različitih vrsta organskih materija. Najčešće se primenjuje za procese obrade komunalnih i industrijskih otpadnih voda, stočnog i drugih vrsta organskog otpada pri čemu nastaje biogas i prevreli ostatak koji može predstavljati kvalitetno đubrivo.

Da bi se postigla što veća efikasnost procesa anaerobne digestije potrebno je da budu ispunjeni određeni tehnološki uslovi, kao što su: kvalitet metanskih bakterija, konstantnost temperature i pritiska u toku procesa, *pH* vrednost, kontinualno mešanje i homogenizacija sirovine koja se obrađuje, bezkiseonična atmosfera sredine, potrebno vreme za odvijanje procesa, odnos organske suve materije i vode u digestovanoj masi, i dr.

Biogas se dobija razgradnjom organskih materija u anaerobnim uslovima, pri čemu njegov sastav i svojstva zavise od vrste sirovine i tehnoloških uslova procesa. On je gorivi gas koji se sastoji od metana, ugljen-dioksida, ostalih gasova i elemenata u tragovima. Zbog svojih karakteristika biogas ima široku oblast primene. U zavisnosti od uslova primene vrši se prečišćavanje biogasa da bi se povećala njegova toplotna moć i dobio gas standardnog kvaliteta.

Biogasna postrojenja mogu biti izvedena kao mali pogoni za proizvodnju energije za sopstvene potrebe ili veliki energetske sistemi gde se proizvodjeni biogas koristi za proizvodnju toplotne i električne energije koja se predaje u javnu elektrodistributivnu mrežu. Proizvodni proces biogasnih postrojenja najčešće se odvija u sledećim fazama:

- priprema sirovine za obradu,
- anaerobna digestija,
- skladištenje i upotreba prevrele tečnosti (digestata), i
- skladištenje, prečišćavanje i korišćenje biogasa.

Reaktori (digestori) koji mogu biti sa pokretnom ili nepokretnom kupolom predstavljaju glavni deo biogasnog postrojenja i oni su obično izrađeni od betona, visokokvalitetnog čelika ili različitih vrsta plastičnih materijala otpornih na dejstvo hemijskih jedinjenja, koroziju i udare. Kontinuirano se razvijaju nova konstrukciona rešenja digestora, sistemi za punjenje digestora sirovinom i ostala prateća oprema u cilju povećanja efikasnosti procesa anaerobne digestije.

Danas energija dobijena korišćenjem biogasa ima određen udeo u energetske bilansu većine zemalja i u narednom periodu će rasti naročito u oblastima gde se pojavljuju otpadni materijali organskog porekla.

1. ZNAČAJ PRIMENE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Savremeno čovečanstvo se suočava sa velikim izazovima u nastojanju da istovremeno očuva životnu sredinu i obezbedi dovoljnu količinu energije. Zadovoljenje potreba za energijom postavlja potpuno nove pravce za goriva i tehnologije koje će se u budućnosti primenjivati. U poslednje vreme sve više dolazi do jačanja svesti o potrebi korišćenja obnovljivih izvora energije, kao i povećanja energetske efikasnosti pri proizvodnji i korišćenju energije a sve kao odgovor na ubrzani rast cena fosilnih goriva i predviđanja o njihovom iscrpljivanju u skorijoj budućnosti. Obnovljivi izvori energije se stalno obnavljaju sa malom ili nikakvom aktivnošću čoveka.

1.1. Vrste energije

Vrste energije podrazumevaju pojavni oblik, odnosno načine na koji se uočava delovanje energije, što je jednim delom povezano sa njenim izvorima (npr. potencijalna, kinetička, hemijska, električna ili energija vode, vetra, goriva, i dr).

Oblike energije moguće je svrstati u različite kategorije i podeliti prema različitim karakteristikama. Jedna od podela je podela na nagomilane (akumulisane, uskladištene) i prelazne oblike energije. Nagomilani oblici energije mogu se održati u svom obliku kroz duže vremensko razdoblje, dok se prelazni oblici javljaju kratkotrajno. Prelazna energija se pojavljuje kad nagomilana energija menja svoj oblik ili kad nagomilana energija prelazi sa jednog sistema na drugi (sa jednog tela na drugo).

Oblici energije obuhvataju izvore i vrste energije zavisno od njihovog mesta u procesima transformacije i dele se na: primarnu, sekundarnu, finalnu i korisnu energiju.

Primarna energija ili primarni izvori energije se dobijaju direktno iz prirode i oni nisu prošli nijedan proces transformacije, a mogu biti:

- fosilni (ugalj, sirova nafta, prirodni gas, i dr),
- nuklearni (uranijum, torijum, i dr),
- obnovljivi (energija vetra, solarna energija, energija vodenih tokova, i dr).

Sekundarna energija ili sekundarni izvori energije su izvori koji su različitim tehničkim postupcima transformacije dobijeni iz primarnih (npr. koks, briket, obogaćeno nuklearno gorivo, benzin, mazut, električna energija, toplota, i dr). Procesima transformacije menjaju se fizički i hemijski oblici primarnih izvora, što je neophodno jer se većina izvora, u obliku u kojem je dobijena iz prirode, ne može direktno koristiti. Primarna i sekundarna energija često se jednim imenom nazivaju energija goriva.

Finalna energija su izvori ili vrste energije koje krajnjem korisniku stoje na raspolaganju (npr. toplota, električna energija, razna goriva, i dr). O načinu njihove primene odlučuje korisnik i odgovarajućim procesima ih pretvara u korisnu energiju. Stoga, finalnu energiju čine i primarni i sekundarni oblici energiju. Pri procesima transformacije, prenosa i skladištenja energije dolazi do gubitaka, tj. jedan se deo primarne i sekundarne energije ne može iskoristiti.

Korisna energija predstavlja deo energije bez gubitaka koji nastaje pri procesu dobijanja, prerade (proizvodnje), skladištenja i prenosa primarnih i sekundarnih izvora, kao i transformacije finalne energije. Korisna je energija krajnjem korisniku na raspolaganju u njemu najprihvatljivijem obliku.

S obzirom na vremensku mogućnost njihovog eksploatacija prirodni (primarni) oblici energije se dele na neobnovljive i obnovljive izvore energije.

Obnovljivi izvori energije su:

- energija Sunca,
- energija vodotokova,
- energija vetra,
- energija mora i okeana (plima i oseka),
- biomasa.

Neobnovljivi izvori energije su:

- fosilna goriva (ugalj, sirova nafta, prirodni gas),
- nuklearna goriva,
- unutrašnja energija u Zemlji koja se pojavljuje na površini u obliku toplih izvora vode i vulkana, i dr.

Za razliku od neobnovljivih oblika energije, obnovljivi oblici energije ne mogu se vremenom iscrpiti, ali je moguće u potpunosti iscrpiti njihove potencijale. Deo obnovljivih izvora energije nije moguće uskladištiti i transportovati u prirodnom obliku (vetar, zračenje Sunca), a deo jeste (voda u vodotocima i akumulacijama, biomasa i biogas). Izvore energije koje nije moguće uskladištiti treba iskoristiti u trenutku kada se pojave ili ih pretvoriti u neki drugi oblik energije.

Između obnovljivih i neobnovljivih prirodnih oblika energije:

- postoje bitne razlike u konstantnosti,
- mogućnosti uskladištenja i transporta,
- u nivou investicija za izgradnju energetske postrojenja u kojima se ona transformišu u korisne, tj. pogodne oblike,
- u potrebnim troškovima za pogon i održavanje takvih postrojenja.

Potencijalne mogućnosti obnovljivih prirodnih oblika energije se menjaju sa vremenom. Na primer, te promene mogu biti:

- vrlo brze što je slučaj sa vetrom (brzina vetra može se promeniti u samo nekoliko minuta),
- brze što je slučaj sa zračenjem Sunca (intenzitet zračenja zavisi od dela dana, vremenskih prilika, zagađenja vazduha troatomnim gasovima i čvrstim česticama),
- polagane kao kod vodotokova (snaga vodotoka proporcionalna je protoku vode, a može se smatrati da je u toku jednog dana približno stalna),
- vrlo lagane kao što je unutrašnja energija mora i okeana, koja uglavnom zavisi od godišnjeg doba.

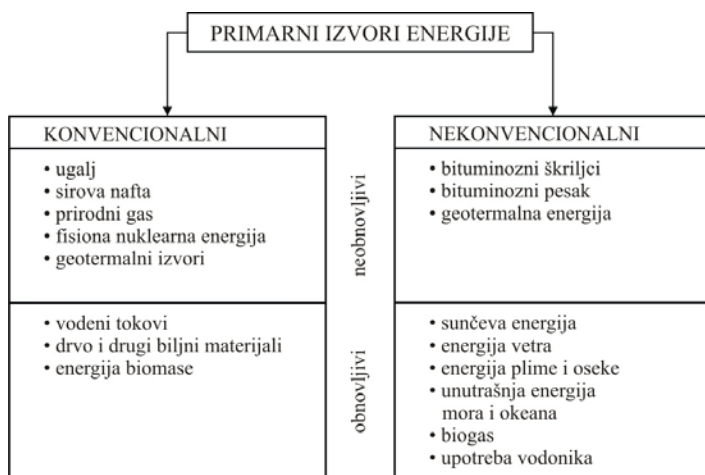
Osnovni razlozi upotrebe prirodnih obnovljivih izvora energije su:

- zaštita životne sredine,
- smanjenje emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte,
- predupređenje rizika koje nosi nuklearna energija,
- poboljšanje energetske sigurnosti,
- smanjenje zavisnosti od uvoza energije i postepeno produženje rezervi goriva fosilnog porekla,
- povećanje ekonomske konkurentnosti,
- stvaranje novih radnih mesta, i
- stvaranje novih mogućnosti za tehnološki napredak.

Prirodni oblici energije prema fizičkim svojstvima dele se na nosioce:

- hemijske energije (ugalj i treset, sirova nafta, prirodni gas, uljni škriljci, biomasa, biogas, drvo i otpaci),
- nuklearne energije (nuklearna goriva),
- potencijalne energije (vodne snage, plima i oseka),
- kinetičke energije (vetar, energija struja i morskih talasa),
- toplotne energije (geotermalna, toplotna energija mora i okeana), i
- energije zračenja (Sunčevo isijavanje).

Prema uobičajenosti upotrebe prirodni oblici energije se dele na konvencionalne i nekonvencionalne. Konvencionalni oblici energije su: drvo, fosilna goriva (ugalj, sirova nafta i prirodni gas), potencijalna energija reka, nuklearna energija, i dr. Nekonvencionalni oblici energije su: kinetička energija vetra, potencijalna energija plime i oseke mora i okeana, toplotna energija iz unutrašnjosti Zemlje koja ne dopire do njene površine, energija Sunca (njeno neposredno korišćenje), unutrašnja energija mora i okeana (korišćenje razlike temperatura vode na površini i velikim dubinama), i dr. Na slici 1.1 prikazana je podela primarnih oblika energije.



Slika 1.1 Podela primarnih oblika energije

U ukupnoj proizvodnji primarne energije u svetu najveći udeo ima energija koja se dobija iz fosilnih goriva (ugalj, sirova nafta i prirodni gas). Struktura potrošnje primarne energije u svetu u 2010. godini bila je sledeća: sirova nafta

2. BIOGAS KAO PRODUKT ANAEROBNE OBRAD OTPADNIH MATERIJALA

Anaerobna digestija je biohemijski proces pri kojem se kompleksna organska jedinjenja razgrađuju delovanjem različitih vrsta bakterija u anaerobnim uslovima (bez prisustva kiseonika). Anaerobna razgradnja je prirodan proces koji se svakodnevno dešava u prirodi, npr. u morskom sedimentu, pri probavi životinja preživara ili prilikom nastanka treseta. Kod biogasnih postrojenja, rezultat procesa anaerobne digestije je nastajanje biogasa i digestata. U slučajevima kada se za proces anaerobne digestije koristi homogena mešavina iz dva ili više susprata, kao na primer tečno stajsko đubrivo i otpad iz prehrambene industrije, postupak se naziva kodigestija. Kodigestija je postupak koji se najčešće primenjuje kod biogasnih postrojenja da bi se postigao što veći prinos biogasa.

U zemljama sa značajnom poljoprivrednom proizvodnjom, kontinuirano pooštavanje propisa koji se odnose na skladištenje i korišćenje stajskog đubriva i otpada organskog porekla, porastao je interes za primenu postupka anaerobne digestije. S druge strane, razvoj tržišta biogasa tokom poslednjih godina stvorio je interes kod poljoprivrednika za uzgoj žitarica i uljarica za potrebe procesa anaerobne digestije u biogasnim postrojenjima. Anaerobna digestija je najčešće primenjivana tehnologija za stabilizaciju primarnog i sekundarnog otpadnog mulja pri obradi komunalnih otpadnih voda, otpada prehrambeno-prerađivačke i fermentacijske industrije, kao i komponenata organskog porekla nastalih pri recikliranju čvrstog komunalnog otpada.

2.1. Supstrat za anaerobnu digestiju

Kao polazni supstrat (sirovina) za anaerobnu digestiju koriste se komunalne i industrijske otpadne vode i biljna biomasa kao otpadni proizvod poljoprivredne proizvodnje. Najčešće se koriste sledeće kategorije supstrata:

- tečni i polutečni stajnjak,
- ostaci i nusproizvodi poljoprivredne proizvodnje,
- razgradivi organski otpad iz poljoprivredne i prehrambene industrije (ostaci biljnog i životinjskog porekla),
- organski deo komunalnog otpada i otpada iz ugostiteljstva,
- otpadni mulj iz postrojenja za obradu komunalnih i pojedinih vrsta industrijskih otpadnih voda,
- poljoprivredne kulture (kukuruz, sirak, različite vrste trava, detelina i dr).

Preduslovi da bi se neka materija mogla koristiti kao sirovina za dobijanje biogasa procesom anaerobne digestije jesu:

- odgovarajući sastav u pogledu sadržaja mikrobiološki razgradivih sastojaka,
- odsustvo toksičnih komponenata da bi se mogla postići visoka produkcija biogasa,
- koncentracija organske materije u supstratu (najpovoljnija koncentracija je između 4 i 8%),
- dovoljna količina tokom cele godine.

Korišćenje životinjskih ekskremenata za anaerobnu digestiju ima odgovarajuće prednosti:

- prirodno sadrže anaerobne bakterije,
- imaju relativno visok sadržaj vode (4 do 8% suve materije u tečnom stajnjaku), koja služi kao rastvarač i omogućava dobro mešanje sa drugim supstratima,
- relativno su jeftini i lako dostupni,
- sakupljaju se kao otpad u stočarskim farmama.

Osim životinjskih ekskremenata vršeno je ispitivanje i drugih supstrata za potrebe procesa anaerobne digestije. Oni uglavnom pripadaju tzv. energetske uševima koji predstavljaju poljoprivredne kulture namenjene isključivo za proizvodnju energije. Energetski zasadi se uglavnom sastoje od jednogodišnjih biljaka (razne vrste trava, kukuruz, repa i dr) ili višegodišnjih drvenastih vrsta (vrba, topola i dr). Pre upotrebe u procesu anaerobne digestije drvenaste vrste se moraju obraditi da bi se uklonio lignin. Tehnologije za uklanjanje lignina su još u fazi razvoja.

Supstrati za anaerobnu digestiju klasifikuju se prema sadržaju suve materije (*SM*), prinosu metana i ostalim kriterijumima značajnim za efikasnost procesa anaerobne digestije. U tabeli 2.1 je dat pregled osnovnih karakteristika supstrata koji se najčešće koriste pri procesu anaerobne digestije.

Tabela 2.1 Karakteristike supstrata za anaerobnu digestiju [5]

Vrsta supstrata	Organska materija	*Odnos C/N , - ,	Suva materija ,% ,	**Prinos biogasa ,m ³ /kg,	Nepoželjne materije
Svinjski stajnjak	ugljeni hidrati, belančevine, masti	3 ÷ 10	3 ÷ 8	0,25 ÷ 0,50	slama, voda, antibiotici, dezinfekciona sredstva
Goveđi stajnjak	ugljeni hidrati, belančevine, masti	6 ÷ 20	5 ÷ 12	0,20 ÷ 0,30	dlake, slama, voda, zemljište, antibiotici, dezinfekciona sredstva, NH ₄ ⁺
Izmet peradi	ugljeni hidrati, belančevine, masti	3 ÷ 10	10 ÷ 30	0,35 ÷ 0,60	kamenčići, pesak, perje, antibiotici, dezinfekciona sredstva, NH ₄ ⁺
Iznutrice životinja	ugljeni hidrati, belančevine, masti	3 ÷ 5	15	0,40 ÷ 0,68	životinjska tkiva, antibiotici, dezinfekciona sredstva
Surutka	70 ÷ 80% laktoza 20 ÷ 25% belančevine	-	8 ÷ 12	0,35 ÷ 0,80	nečistoće usled transporta
Koncentrisana surutka - plazma	75 ÷ 80% laktoza 20 ÷ 25% belančevine	-	20 ÷ 25	0,80 ÷ 0,95	nečistoće usled transporta
Ostatak procesa fermentacije	ugljeni hidrati	4 ÷ 10	1 ÷ 5	0,35 ÷ 0,78	nerazgradivi delovi voća

alkalija radi regulisanja pH vrednosti. Kod mulja koji nastaje anaerobnim procesom iz proteina i uree koncentracija amonijaka može dostići toksični nivo. Koncentracija amonijaka od 1000 mg/L može biti veoma toksična. Kada otpadna voda sadrži visok nivo sulfida, može doći do problema u toku anaerobnog procesa jer su sulfidi toksični za metanske bakterije pri koncentraciji iznad 200 mg/L.

2.4. Vrste anaerobne digestije u zavisnosti od broja faza procesa

Proces anaerobne digestije je dugo vremena razvijan i usavršavan. Anaerobni procesi najčešće se odvijaju u jednom ili dva reaktora (digestora), pa se shodno tome dele na jednofazne i dvofazne. Jednofazni procesi, u zavisnosti od kapaciteta i stepena zagađenja, najčešće se izvode kao konvencionalni nisko opterećeni i konvencionalni visoko opterećeni proces ili kao dvostepeni proces. U novije vreme se primenjuju i anaerobni sekvencionalni šaržni procesi najčešće pri tretmanu specifičnih industrijskih otpadnih voda.

2.4.1. Jednofazni procesi anaerobne digestije

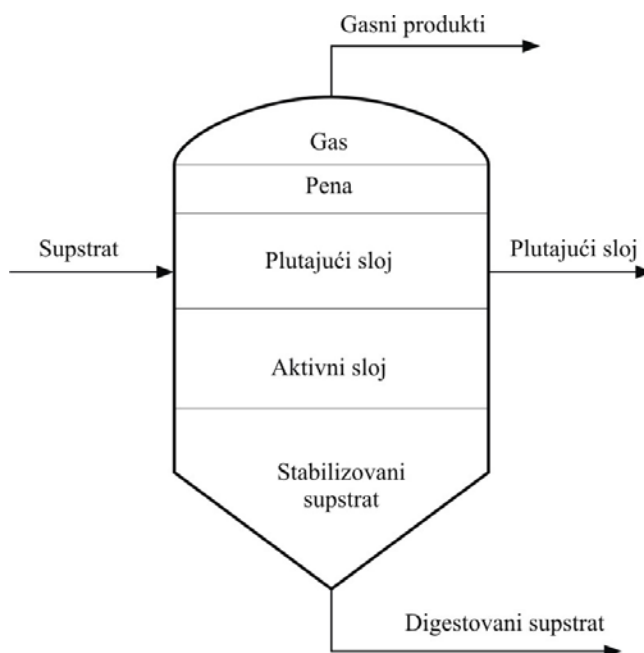
Konvencionalni nisko opterećeni proces anaerobne digestije

Procesi ovog tipa spadaju u najstariji način anaerobnog tretmana otpadnih materijala. Osnovni elementi sistema su prikazani na slici 2.9. U principu, to je jedan digestor u obliku cilindra čiji je donji deo konusno, a gornji torisferično ili ravno dance. Može biti opremljen spoljašnjim elementima za zagrevanje, ali to nije obavezno i ne poseduje sistem za mešanje. Gas koji se stvara i kreće ka površini obezbeđuje slabo mešanje mase koja se nalazi u digestoru. Kada dođe do stabilizacije mase unutar digestora, dolazi do stvaranja nekoliko slojeva kao što je prikazano na slici 2.9.

Plutajući sloj (supernatant) se izdvaja u procesu i sistemom recirkulacije odlazi na ponovnu obradu. Stabilizovana biomasa koja se taloži na dnu digestora, povremeno biva drenirana da bi se oslobodio prostor za priliv nove sirovine. Metan koji se generisao tokom mikrobiološke aktivnosti, odvodi se iz procesa kroz otvore koji se nalaze iznad površine radne materije, najčešće kroz dance. Nedostatak ovog procesa je u tome što je vreme zadržavanja radne materije u proseku 30 do 60 dana. Nisko opterećeni proces anaerobne digestije se primenjuje kod postrojenja čiji je dnevni kapacitet manji od 3800 m³.

Konvencionalni visko opterećeni proces anaerobne digestije

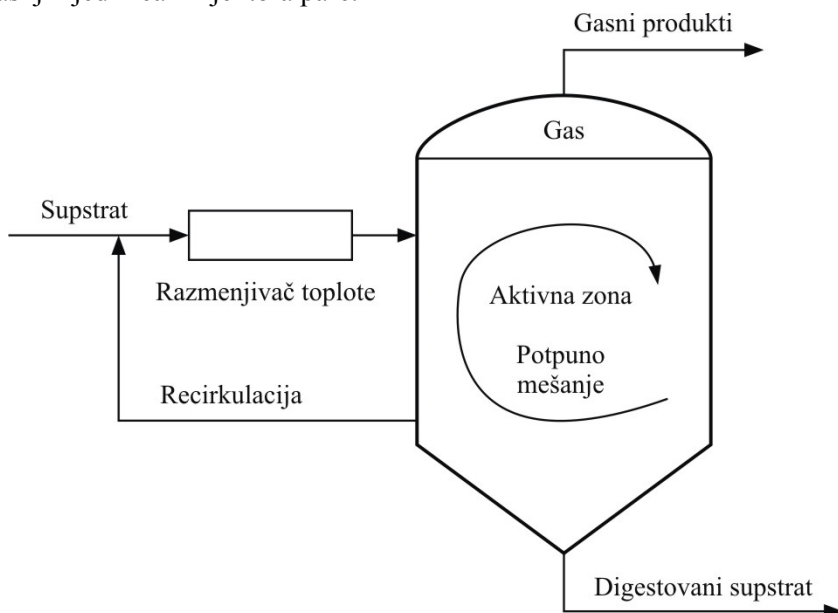
Tokom pedesetih godina prošlog veka, izvršena su određena tehnološka unapređenja procesa anaerobne digestije sa niskim stepenom opterećenja. Zagrevanje, mešanje, ugušćivanje i kontinuirano dovodenje supstrata u proces se vrši u cilju obezbeđenja jednakih uslova po celoj zapremini digestora. Tehnološki proces sa prethodno navedenim poboljšanjima se naziva visoko opterećeni proces anaerobne digestije. Kao rezultat toga, smanjena je zapremina digestora, a stabilnost i efikasnost procesa značajno povećana. Na slici 2.10 prikazana je šema visoko opterećenog procesa anaerobne digestije.



Slika 2.9 Šema nisko opterećenog procesa anaerobne digestije [7]

Zagrevanje je izuzetno važno za odvijanje ovog procesa jer od temperature zavisi mikrobiološki rast, a samim time i brzina digestije i produkcija metana. Sa porastom temperature dolazi do ubrzavanja ovih procesa. Ovaj tip anaerobne digestije najčešće se odvija u mezofilnom temperaturnom režimu. Pri ovom procesu, sadržaj u digestoru se zagreva i temperatura održava u opsegu ± 1 °C u odnosu na projektovanu, jer su metanogene bakterije veoma osetljive na promenu temperature. Zagrevanje se najčešće vrši spoljašnjim uređajima jer su fleksibilni i

jednostavni za održavanje. Postoje i druga tehnička rešenja zasnovana na primeni unutrašnjih jedinica i injektora pare.



Slika 2.10 Šema visoko opterećenog procesa anaerobne digestije [7]

Pri visoko opterećenom procesu anaerobne digestije dodatno mešanje supstrata u digestoru je korisno iz više razloga:

- smanjuje se potrebna količina toplote za zagrevanje,
- vrši se raspršivanje mase koja se obrađuje i obezbeđuje bolji kontakt,
- smanjuje se količina pene i skrame na površini supstrata,
- dolazi do razređivanja svih neophodnih materija koje se sa suspratom unose u sistem,
- povećava se efektivna zapremina digestora,
- omogućava se lakše izdvajanje dobijenog gasa,
- neorganske komponente sklone taloženju održavaju se u plivajućem stanju, i dr.

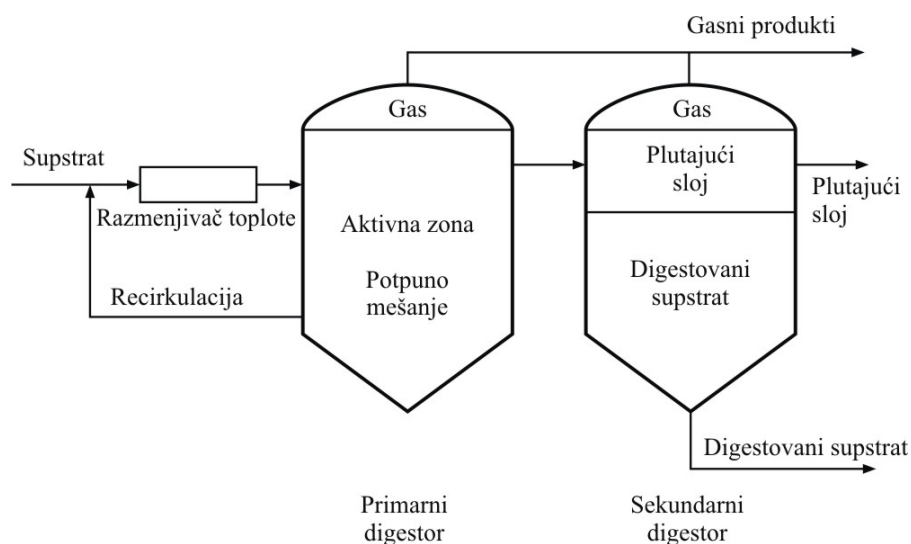
Početak pedesetih godina prošlog veka došlo se do zaključka da je ugušćivanje supstrata pre procesa anaerobne digestije korisno iz više razloga. Na ovaj način se smanjuje zapremina sirovine koja se obrađuje, a time i potrebna zapremina digestora. Takođe se smanjuje potrebna količina energije za zagrevanje digestora. Ugušćivanjem se postiže izdvajanje manje količine supernatanta (plutajući sloj) pri procesu anaerobne digestije. Supernatant koji nastaje

ugušćivanjem supstrata ima bolji kvalitet od supernatanta dobijenog procesom anaerobne digestije. Prilikom ugušćivanja treba voditi računa da koncentracija čvrstih komponenata ne pređe 7%, jer u tom slučaju može doći do problema pri mešanju supstrata i radu pumpi. Previsoka koncentracija čvrstih komponenata u suspratu, može dovesti do visokih koncentracija elemenata u digestoru koji nepovoljno utiču na aktivnost mikroorganizama.

Doziranje supstrata odnosno punjenje digestora se vrši kontinuirano ili u redovnim vremenskim intervalima da bi se obezbedio stabilan rad bez većih promena uslova u digestoru. S obzirom da su metanogene bakterije osetljive na promenu koncentracije isparljivih komponenata uniformnim doziranjem se obezbeđuje da se izbegne nagli poremećaj koji se može desiti prilikom šaržnog punjenja. Poboljšanju uniformnosti prihrane pomaže povećanje broja mesta za doziranje po obodu digestora. Naglo punjenje digestora može sniziti temperaturu supstrata i alkalnost neophodnu za regulisanje pH vrednosti.

Jednofazni dvostepeni proces anaerobne digestije

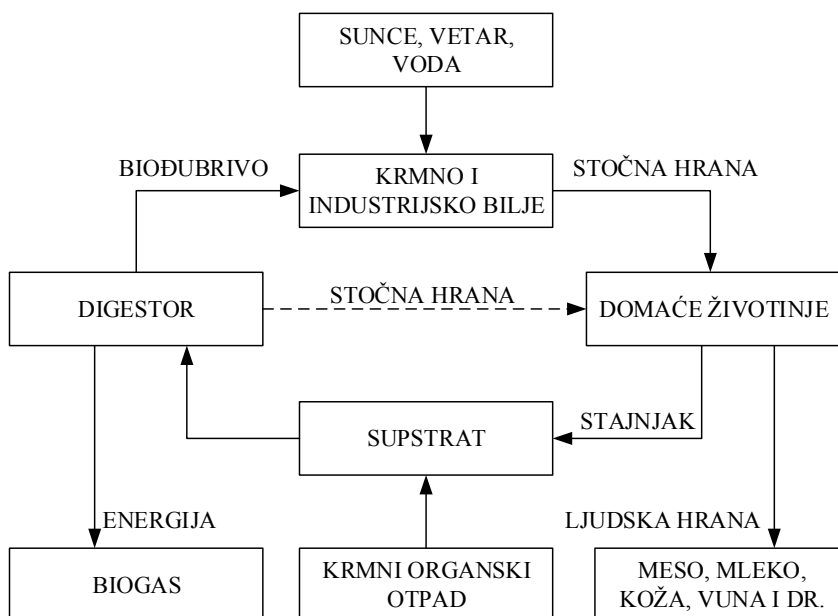
Proces anaerobne digestije se odvija u dva visoko opterećena digestora povezana redno kao što je prikazano na slici 2.11.



Slika 2.11 Šema dvostepenog visoko opterećenog procesa anaerobne digestije [7]

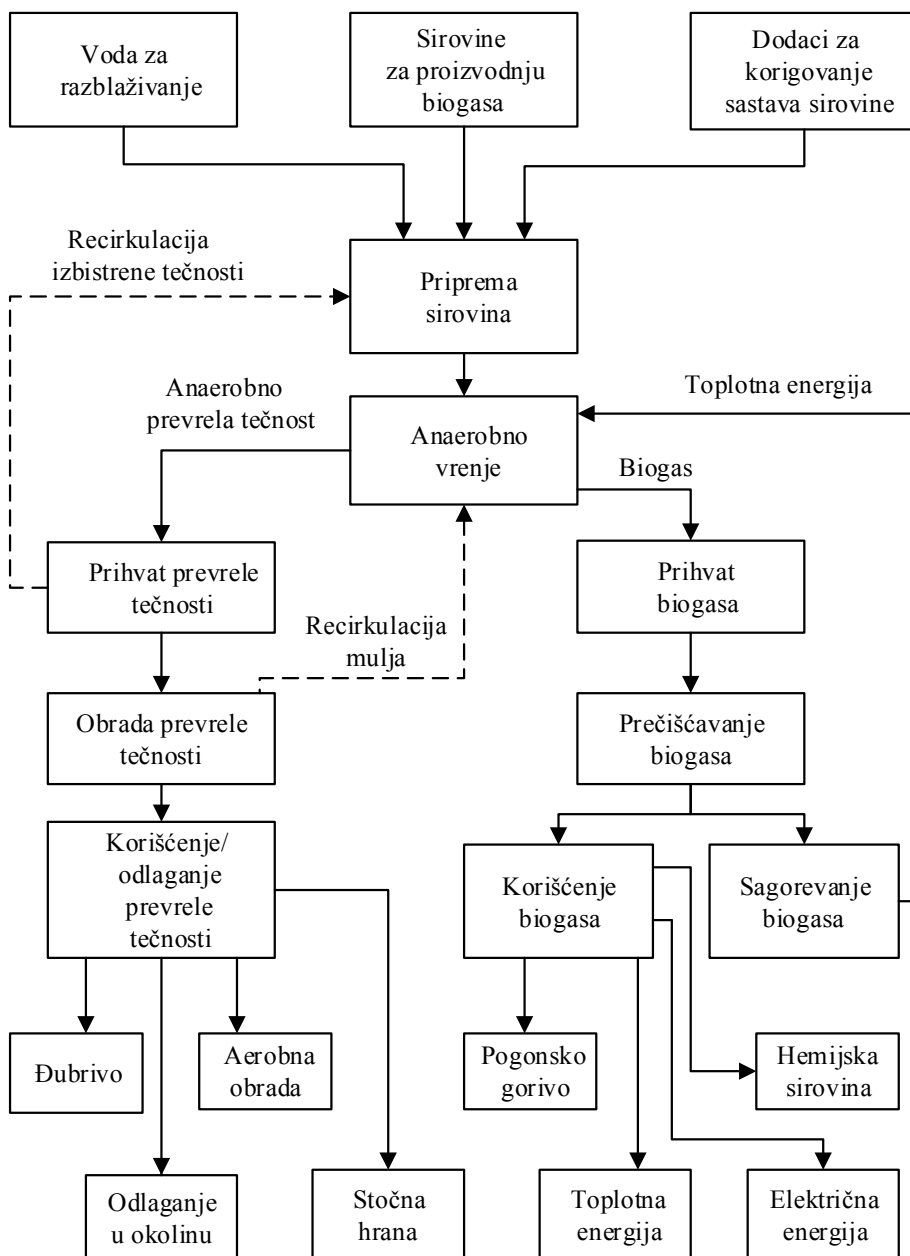
3. TEHNIČKE I TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE POSTROJENJA ZA ANAEROBNU OBRADU OTPADNIH MATERIJALA

Biogasna postrojenja mogu se ukomponovati u prirodni ciklus proizvodnje hrane, tako da pored proizvodnje biogasa imaju i funkciju proizvodnje biodubriva (slika 3.1). Iz otpadaka koji se javljaju na farmama (stajnjak, krmni i organski otpaci), dobijaju se biogas (koji se koristi za sušenje sena, žitarica i dr) i biodubrivo koje povećava i ubrzava proizvodnju krmnog i industrijskog bilja. Ovi procesi imaju funkciju zaštite čovekove životne i radne sredine (uklanjanja čvrstih i tečnih otpadaka). Sve češće se susreću rešenja koja objedinjavaju sva tri cilja.



Slika 3.1 Proizvodnja biogasa u sklopu prirodnog ciklusa proizvodnje hrane

Tehnološki proces dobijanja biogasa (slika 3.2), bez obzira na tip digestora, obuhvata tri osnovne faze: pripremu sirovina, samu anaerobnu digestiju i prihvati i obradu proizvedenog gasa i anaerobno prevrele tečnosti.



Slika 3.2 Blok - dijagram tehnološkog procesa dobijanja i korišćenja biogasa

postrojenja. Prečnik cevovoda za sveži supstrat trebao bi biti veći od 300 mm. Pri projektovanju potrebno je obratiti pažnju na nagib cevovoda kako bi se obezbedilo njegovo potpuno pražnjenje. Cevovod za biogas, takođe, mora imati dovoljan nagib i mora biti opremljen ventilima za ispuštanje kondenzate. Male količine kondenzata mogu dovesti do pada pritiska u cevovodu i zaustavljanja transporta biogasa kroz cevovod. Poželjno je da prečnik glavnog biogasnog cevovoda ne bude manji od 20 mm.

Za određivanje nazivnog prečnika cevi najčešće se koristi izraz:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{3600 \cdot \pi \cdot w}}, \text{m}, \quad (3.26)$$

gde su:

\dot{V} , $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, - protok fluida,

w , $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, - brzina strujanja fluida u cevovodu.

Preporučene brzine strujanja fluida u cevovodu su:

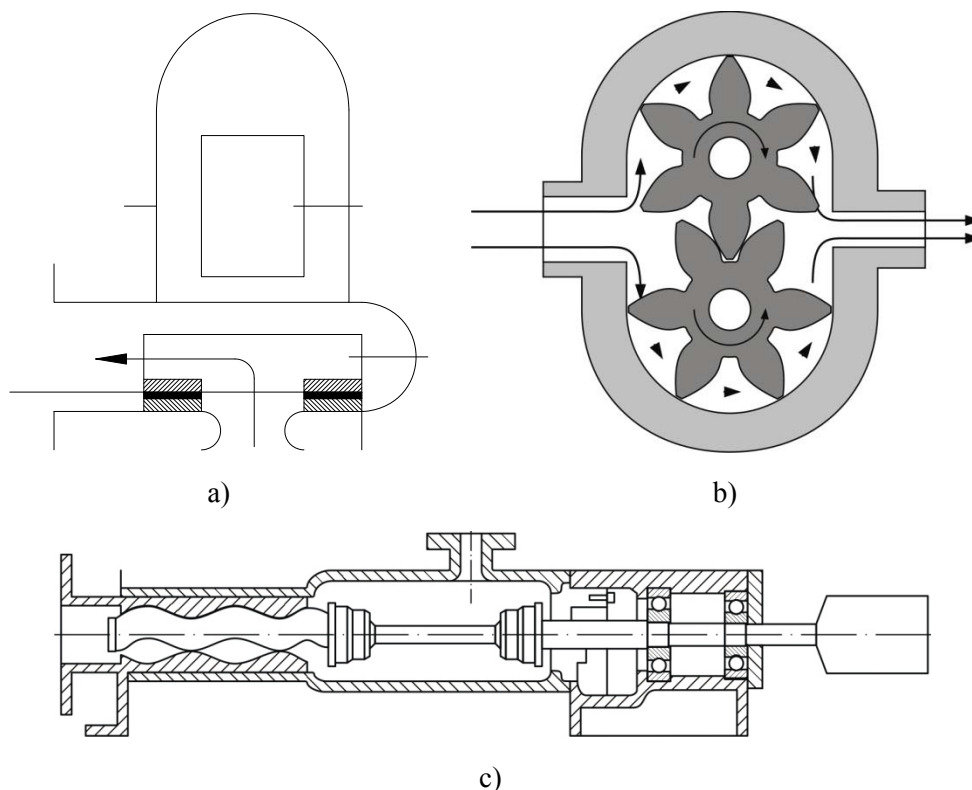
- za tečni sveži i prevreli supstrat od 0,2 do 0,8 m/s;
- za toplu i sanitarnu vodu od 0,8 do 2,0 m/s;
- za biogas od 5 do 8 m/s.

Cevovod treba nakon izrade, a pre puštanja u rad, ispitati na nepropusnost i čvrstoću. Ispitivanje se vrši vodom pod pritiskom koji je za 50% (1,5 puta) veći od radnog pritiska. Ispitivanje i kontrola cevovoda traje 1 h. Ostali uslovi su isti kao za posude pod pritiskom. Cevi kojima se transportuje biogas treba u toku rada kontrolisati na popuštanje (naročito na spojevima).

3.4.6. Dimenzionisanje i izbor pumpe za transport supstrata

Za transport supstrata iz skladišnog rezervoara u digestor koriste se pumpe različite konstrukcije. Najčešće se primenjuju centrifugalne muljne pumpe (spoljašnje i potapajuće) i pumpe za potiskivanje fluida. Za transport supstrata u kome se nalaze vlaknasti materijali (slama, ostaci stočne hrane i dr) koriste se pumpe koje imaju uređaj za sečenje ili usitnjavanje tih materijala. Pumpe za potiskivanje (rotacione klipne i ekscentrične zavojne pumpe) pogodne su za

primenu zato što pri smanjenom kapacitetu održavaju relativno visok pritisak. Na slici 3.15 prikazane su pumpe koje se najčešće upotrebljavaju za transport supstrata u biogasnim postrojenjima.



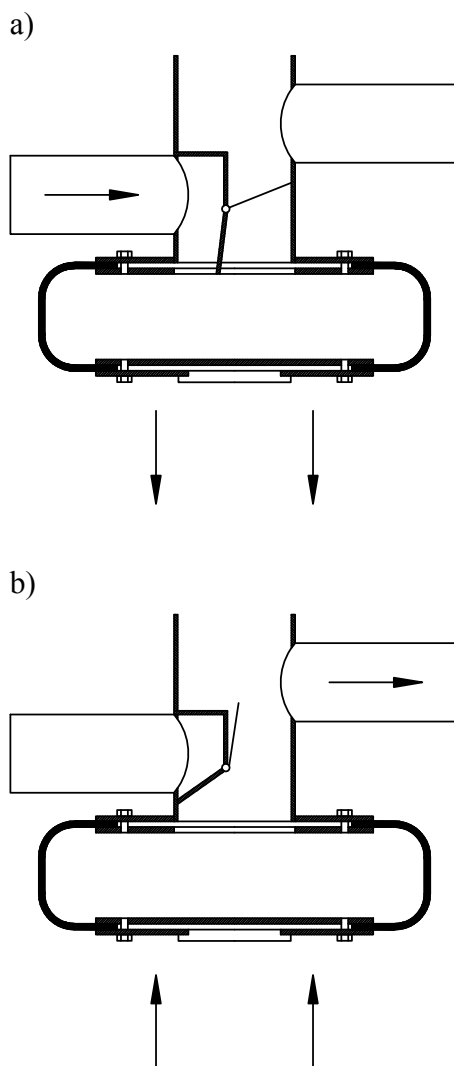
Slika 3.15 Tipovi pumpi za punjenje digestora supstratom: a – centrifugalna muljna pumpa (potapajuća), b – rotaciona klipna pumpa, c – ekscentrična vijčana pumpa

Izbor pumpe zavisi od karakteristika supstrata koji će se transportovati (udeo suve materije, veličina komada, vrsta i pripremljenost sirovine). Dosadašnje iskustvo pokazuje da se začepjenja na ulazu ili izlazu iz pumpe mogu sprečiti izborom odgovarajućeg prečnika cevi. Cevi pod pritiskom, za punjenje digestora i mešanje supstrata, potrebno je da imaju minimalan prečnik 150 mm. Cevi koje nisu pod pritiskom (cevi za pretakanje) moraju imati minimalan prečnik 200 mm za transport tečnog stajnjaka, a 300 mm pri velikom udelu slame u stajnjaku.

Svi pokretni delovi pumpe su izloženi trošenju (habanju), pa je potrebna njihova povremena zamena. Zamenu treba izvršiti bez zaustavljanja proizvodnog

procesa biogasnog postrojenja. Zato cevne instalacije moraju biti opremljene sa armaturom koja obezbeđuje jednostavno punjenje i pražnjenje digestora i cevi. Pumpe i cevi moraju biti lako dostupne sa dovoljno radnog prostora za potrebe poslova održavanja.

Membranska pumpa je u potpunosti otporna na čvrste komade koji se nalaze u supstratu. Ove pumpe su robusne, jednostavne za održavanje, relativno jeftine i imaju malu potrošnju električne energije. Na slici 3.16 prikazan je izgled membranske pumpe.



Slika 3.16 Membranske pumpe: a – tok fluida na gore, b – tok fluida na dole

Izbor odgovarajuće pumpe se vrši na osnovu veličine potrebnog protoka i napora pumpe, uz opredeljenje za tip pumpe. Potreban protok pumpe se određuje na osnovu veličine dnevnog ulaza supstrata u digestor i vremena potrebnog za punjenje digestora [8]:

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{V}_s}{\tau}, \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad (3.27)$$

gde su:

$$\dot{V}_s, \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}, \text{ - dnevni ulaz supstrata u digestor,}$$

$$\tau, \frac{\text{h}}{\text{dan}}, \text{ - vreme punjenja digestora.}$$

Uobičajeni kapacitet pumpi za punjenje digestora se kreće od 3,6 do 72 m³/h.

Napor pumpe za transport supstrata se određuje na osnovu potrebnog ili ostvarenog položaja pumpe u odnosu na digestor i otpora u cevovodu. U opštem slučaju stvarna visina koju pumpa savladava (napor pumpe) izračunava se prema izrazu [8]:

$$H_s = H + H_g + H_p, \text{m}, \quad (3.28)$$

gde su:

$$H, \text{m}, \text{ - napor pumpe potreban za savladavanje visinskog nivoa usisa, razlike između nivoa pumpe i dna digestora, i nivoa supstrata u digestoru,}$$

$$H_g, \text{m}, \text{ - napor potreban za savladavanje linijskih gubitaka u cevovodu, cevnim kolenima, cevnim zatvaračima i u pumpi,}$$

$$H_p, \text{m}, \text{ - napor pumpe potreban za savladavanje nadpritiska u digestoru.}$$

3.4.7. Grejanje i toplotna izolacija digestora

Održavanje konstantne temperature od 35 °C za mezofilne procese i 55 °C za termofilne procese je od izuzetnog značaja za efikasnost procesa anaerobne digestije. Zagrevanjem se sveži supstrat dovodi na potrebnu radnu temperaturu pre

ulaska u digester i na taj način se kompenzuje toplota izgubljena kroz pod, zidove (plašt) i kupolu digestora.

Za održavanje potrebne temperature digestije, odnosno supstrata u digesteru, neophodno je da bude rešeno grejanje čiji je zadatak da se kroz održavanje potrebne temperature obezbedi [8]:

- nadoknađivanje gubitaka toplote kroz plašt digestora u okolinu,
- zagrevanje supstrata na temperaturu koja je u digesteru, ukoliko je punjenje izvršeno svežim supstratom niže temperature.

Dovođenje toplotne energije u digester najčešće se vrši cevnim toplovodnim grejačima ili cirkulacijom tople vode kroz međuprostor dvostrukog plašta digestora. Ređe se upotrebljavaju električna grejna tela.

Pri punjenju digestora svežim supstratom, koji ima nižu temperaturu od temperaturu na kojoj se odvija proces digestije, dolazi do izvesnog pada temperature supstrata u digesteru.

Za dovođenje supstrata na temperaturu procesa anaerobne digestije potrebna količina toplote se izračunava pomoću izraza:

$$Q_z = m_s \cdot C_s \cdot (T_1 + T_2) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{dan}}, \quad (3.29)$$

gde su:

m_s , $\frac{\text{kJ}}{\text{dan}}$, - masa dnevnog priliva supstrata,

C_s , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, - specifični toplotni kapacitet supstrata,

T_1 ,K, - temperatura pri kojoj se odvija proces u digesteru,

T_2 ,K, - temperatura supstrata na ulazu u digester.

Specifični toplotni kapacitet supstrata koji je pripremljen za punjenje digestora izračunava se prema izrazu:

$$C_s = \frac{I}{m_s} \sum_{i=1}^n m_{is} \cdot C_{is} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{dan}}, \quad (3.30)$$

gde su:

m_s ,kg, - ukupna masa tečnog supstrata,

m_{is} ,kg, - udeo mase i-te komponente supstrata,

Cevovod za transport proizvedenog biogasa je priključen na gasnu baklju (26) koja služi za spaljivanje viška biogasa i predstavlja osigurač od izvrtanja zvana.

Sagorevanje biogasa se vrši u toplovodnom kotlovskom postrojenju (17) koje se koristi za centralno grejanje farme i održavanje potrebne temperature u digestoru. Za početno zagrevanje digestora i održavanje temperature digestije do pojave biogasa kao gorivo u kotlu koristi se gas propan-butan. U kotlarnici je smeštena i komandna tabla sa merno-upravljačkom opremom celog procesa.

Laguna (25) predstavlja skladišni prostor prevrelog stajnjaka, izvedena je u obliku betonskog bazena i smeštena je neposredno pored biogasnog postrojenja. U laguni se odvija dodatna stabilizacija prevrelog stajnjaka, jer njegovo organsko zagađenje može biti opasno po prirodne recipijente.

Prva faza rada postrojenja se odvija u šaržnom režimu. Uneta količina stajnjaka se zagreva pri temperaturi mezofilne digestije od 35 °C. Postignuta temperatura se automatski reguliše pomoću kontaktnog termometra (6), a vizuelno proverava preko termometra (10). U slučaju pada temperature uključuje se cirkulaciona pumpa (15) koja potiskuje toplu vodu maksimalne temperature 50 °C kroz cevnu zmiju (13). Maksimalna temperatura tople vode se reguliše merno-regulacionom opremom na samom kotlu, a određena je tako da ne dođe do pregrevanja stajnjaka i poremećaja mezofilnog režima digestije.

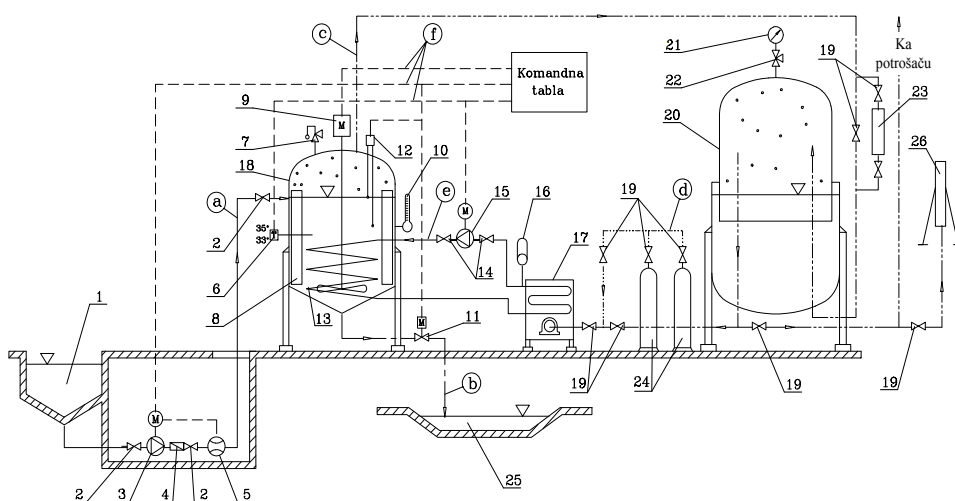
Uneta šarža održava se pri temperaturi mezofilne digestije u periodu od 15 dana. Već nakon 10 dana mogu se uočiti prvi znaci proizvodnje biogasa. Biogas dobijen u ovoj fazi predstavlja složenu smešu gasova sa niskim udelom metana (do 30%). Osnovni razlog izvođenja digestije u šaržnim uslovima je primarna proizvodnja mikroorganizama neophodnih za nastavak procesa digestije i proizvodnje biogasa u polukontinualnim uslovima rada postrojenja.

Po završenom procesu digestije u uslovima šaržnog (diskontinualnog) režima rada, posle 15 dana, pristupa se prilagođavanju sistema za polukontinualni (ciklično-šaržni) režim rada. Polukontinualni rad postrojenja ostvaruje se redovnim ubacivanjem dnevne količine svežeg stajnjaka. Dovođenje svežeg stajnjaka iz sabirne jame u digestor vrši se pomoću muljne pumpe (3). Elektromagnetni merač protoka (5) registruje količinu stajnjaka koja protekne i posle postignute definisane (dnevne) količine automatski isključuje elektromotor muljne pumpe. Pokazivač nivoa (12) uključuje se automatski po dostizanju maksimalnog nivoa i šalje signal do elektromotornog ventila (11) koji se otvara da bi se isпустиła približno ista količina prevrelog stajnjaka.

Posle završenog ciklusa punjenja i pražnjenja digestora uključuje se mešalica (9), čija je osnovna uloga homogenizacija tečnog stajnjaka, ujednačenje

temperaturskog polja i razbijanje kore na površini stajnjaka. Mešanje se izvodi odmah posle završenog postupka izbacivanja prevrelog stajnjaka i još dva puta u toku dana (u trajanju od po 1 h). Automatizacija procesa mešanja se postiže vremenski programiranim uključivanjem elektromotora mešalice preko komandne table.

Unutar digestora postavljene su četiri metalne letve-razbijača mlaza (8) radi ujednačavanja efekta mešanja po celoj zapremini digestora, kao i smirivanja površine stajnjaka. Kontrola pritiska u digestoru se vrši pomoću manometra, a regulacija pomoću ventila sigurnosti sa tegom (7).



Slika 3.47 Tehnološka šema biogasnog postrojenja: a - linija svežeg stajnjaka, b - linija prevrelog stajnjaka, c - linija za biogas, d - linija za snabdevanje butan-propan gasom, e - linija vode za zagrevanje, f - komandno regulaciona linija; 1- sabirna jama, 2 - ručni ventil, 3 - muljna pumpa, 4 - nepovratna klapna, 5 - elektromagnetni merač protoka, 6 - kontaktni termometar, 7 - ventil sigurnosti, 8 - razbijač mlaza, 9 - turbinska mešalica, 10 - termometar, 11 - elektromotorni ventil, 12 - merač nivoa, 13 - cevna zmijsa, 14 - ručni ventil, 15 - cirkulaciona pumpa, 16 - ekspanzionna posuda, 17- gasni kotao, 18 - digestor, 19 - ventil, 20 - rezervoar za biogas, 21 - manometar, 22 - trokraka slavina, 23 - merač protoka gasa, 24 - butan-propan boce, 25 - laguna, 26 - gasna baklja

4. SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE BIOGASA

Razvoj biotehnoloških postupaka proizvodnje goriva iz obnovljivih izvora otvara perspektivu, zajedno sa drugim alternativnim izvorima energije, za delimičnu zamenu fosilnih goriva.

Industrijsku primenu najviše imaju procesi proizvodnje pogonskog alkohola i proizvodnje biogasa. Biogas se proizvodi biotehnološkim postupcima za preradu otpadnih materijala organskog porekla, u cilju zaštite životne sredine.

Proizvodnja biogasa definiše se kao proces anaerobne digestije, tj. proces truljenja organskih materija u tečnosti, pri određenoj temperaturi bez prisustva vazduha, odnosno kiseonika. Postrojenja različitih konstrukcija, u kojima se produkuje biogas, nazivaju se digestori.

Biogas se koristio za grejanje vode još u Siriji 1000 godina p.n.e. Prvi moderni biodigestor je pušten u rad u koloniji gubavaca 1859. godine u Bombaju. Proizvodnja i sakupljanje biogasa iz biološkog postupka prvi put je zabeležena u Velikoj Britaniji 1895. godine gde se koristio za osvetljavanje gradića Exeter-a.

Intenzivan razvoj biogasne tehnologije započinje šezdesetih godina prošlog veka. U zemljama u razvoju, gde nisu bili razvijeni sistemi prenosa energije, građena su biogasna postrojenja (digestori), radi zadovoljenja energetske potreba sa malim ulaganjima. Povećano interesovanje za biogasnu tehnologiju u razvijenim zemljama javilo se sa početkom energetske krize sedamdesetih godina. Interesovanje se povećalo zbog globalnih napora usmerenih na zamenu fosilnih goriva obnovljivim izvorima, kao i pronalaženju ekološki prihvatljivog rešenja za obradu životinjskih ekskremenata i ostalog organskog otpada.

Samo u azijskim zemljama, a naročito u Kini, Indiji, Nepal i Vijetnamu, postoji nekoliko miliona vrlo jednostavnih, malih biogasnih postrojenja koja proizvode gas za potrebe u domaćinstvima. U Evropi i severnoj Americi svakodnevno raste broj biogasnih postrojenja u sastavu poljoprivrednih gazdinstava, a danas ih funkcioniše nekoliko hiljada od kojih većina koristi savremene tehnologije anaerobne digestije.

Komponente koje ulaze u sastav biogasa su: metan (oko 2/3), ugljen-dioksid (oko 1/3), vodonik, vodonik-sulfid, azot, kiseonik, vodena para i amonijak u neznatnim zapreminskim udelima.

Osnovna svojstva biogasa značajna za njegovu primenu su: toplotna moć, Vobeov (Wobb) broj, eksplozivnost, i dr.

4.1. Svojstva biogasa

Biogas je mešavina metana i ugljen-dioksida, koja se dobija prilikom razgradnje organskih materija pri anaerobnim uslovima. Sastav i svojstva biogasa menjaju se u zavisnosti od vrste polaznog materijala (biomase) i od tehnoloških uslova za vreme procesa digestije.

Biogas je lakši od vazduha za 20%, a temperatura paljenja mu je u rasponu od 650 do 750 °C. To je gas bez boje i jakog mirisa. Kada sagoreva, gori čisto plavim plamenom, slično kao prirodni gas. Vrednost toplotne moći biogasa se kreće od 20 do 30 MJ/m³. U tabeli 4.1 je prikazana donja toplotna moć biogasa i gasova koji su najčešće u upotrebi.

Toplotna moć biogasa može se povećati ukoliko se odstrani ugljen-dioksid. Takođe, može biti korisno odstraniti vlagu iz biogasa, tj. osušiti ga. Sušenjem biogasa vodonik-sulfid (H₂S) koji se u njemu nalazi prestaje da bude korozivan, ali i dalje zadržava svoj karakterističan miris.

Osnovne komponente biogasa su metan i ugljen-dioksid, a amonijak, vodonik, azot, vodonik-sulfid, ugljen-monoksid i vodena para se nalaze u tragovima. Osnovna fizička svojstva komponenata biogasa navedena su u tabeli 4.2.

Tabela 4.1 Donja toplotna moć biogasa i gasova koji imaju najširu primenu

Vrsta gasa	Donja toplotna moć		
	kJ/m ³	kcal/m ³	kWh/m ³
Biogas	22000	5200	6,1
Gradski gas	18000	4000	5,0
Čisti metan	35880	8571	9,9
Prirodni gas	38500	9200	10,7

Osnovne komponente biogasa su metan i ugljen-dioksid, a amonijak, vodonik, azot, vodonik-sulfid, ugljen-monoksid i vodena para se nalaze u tragovima. Osnovna fizička svojstva komponenata biogasa navedena su u tabeli 4.2.

5. PRIMENE BIOGASA

Da bi korišćenje bilo ekonomično i bezbedno, neophodno je dobro poznavati svojstva biogasa i poznavati uslove njegovog sakupljanja, prečišćavanja, skladištenja, transporta i upotrebe. Kvalitet sirovog biogasa u potpunosti odgovara određenim oblicima njegove upotrebe. Relativno velika toplotna moć biogasa čini ga interesantnim izvorom energije što mu omogućava različite primene [20].

5.1. Mogućnosti primene biogasa

Kao i drugi gorivi gasovi, tako i biogas ima široku oblast primene. Biogas se najčešće koristi za proizvodnju toplotne energije, električne energije pomoću energetskih ćelija ili malih turbina (mikroturbina), u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju toplotne i električne energije, i kao pogonsko gorivo za motorna vozila.

Biogas se koristi kao gorivo u domaćinstvu, na poljoprivrednim dobrima i stočarskim farmama. Primena u domaćinstvu obuhvata: osvetljenje, grejanje (gasne grejalice, gasni kotlovi), hlađenje (klima uređaji, gasni hladnjaci), pripremu tople sanitarne vode (gasni bojleri), kuvanje i slično. Na poljoprivrednim gazdinstvima i stočarskim farmama biogas se koristi kao gorivo u sušarama poljoprivrednih proizvoda (žita, sena i dr), za pogon traktora, irigacionih pumpi, u kovačkim pećima, pripremu vode za grejanje staklenika, loženje u pekarama, agregatima za proizvodnju električne energije i dr. [8].

U velikim digestorskim postrojenjima dobija se biogas koji se koristi za proizvodnju električne energije i sagorevanje u gasnim kotlovima etažnog ili centralnog grejanja.

Najjednostavniji i najrašireniji način korišćenja biogasa je u gasnim kotlovima za dobijanje toplotne energije. Ovakav način primene je uobičajen za biogas koji nastaje u malim postrojenjima (zapremina digestora 6 do 8 m³). Za proizvodnju toplotne energije biogas se može koristiti na mestu produkcije ili se gasovodom

transportovati do krajnjih korisnika. Pri proizvodnji toplotne energije biogas nije potrebno dodatno prečišćavati jer prisustvo nečistoća do određenog nivoa ne predstavlja ograničenje, kao što je to slučaj za druge načine primene. Pre upotrebe vrši se kondenzacija, eliminacija čestica, kompresija, hlađenje i sušenje biogasa.

5.1.1. Primena biogasa u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju energije

Proizvodnja toplotne i električne energije kogeneracijom predstavlja efikasan način korišćenja biogasa. Pre korišćenja u kogeneracijskim postrojenjima biogas se suši i obogaćuje odgovarajućim komponentama u cilju postizanja potrebnog kvaliteta. Većina gasnih motora ima ograničenje na udeo vodonik-sulfida, halogenih ugljenih hidrata i siloksana u neobrađenom biogasu. Stepenn iskorišćenja savremenih generatora za kogeneraciju je do 90%, pri čemu proizvodnja toplotne energije iznosi 65, a električne 35%.

Kogeneracijska postrojenja na biogas su najčešće termoelektrane iz više blokova sa motorima za sagorevanje direktno povezanim sa generatorom. Motor generatora može biti gasni-oto motor, gasni-dizel motor ili gasni-dizel motor sa pilot paljenjem. Alternativa ovim tipovima motora su male gasne turbine, Stirlingovi (Stirling) motori i gorive ćelije. Ove su tehnologije još u fazi istraživanja i razvoja ili izrade prototipa.

Gasni-oto motori su specijalno razvijeni motori za korišćenje biogasa. Kod ovih motora se formira smeša sa koeficijentom viška vazduha tako da se minimizira emisija ugljen-monoksida. Na ovaj način se smanjuje potrošnja gasa, ali je i manja efikasnost motora, što se kompenzuje korišćenjem turbo punjača pogonjenog izduvnim gasovima.

Kod gasnih-oto motora minimalan udeo metana u biogasu je 45%. Gasni-oto motori snage do 100 kW su najčešće oto motori. Ukoliko su zahtevi za proizvodnjom električne energije veći, koriste se prilagođeni dizel agregati sa svećicama. Obe vrste motora se nazivaju gasni-oto motori s obzirom da se njihov način rada zasniva na oto ciklusu. Ovi motori kao pogonsko gorivo mogu koristiti biogas ili druge vrste goriva, kao što je prirodni gas [5].

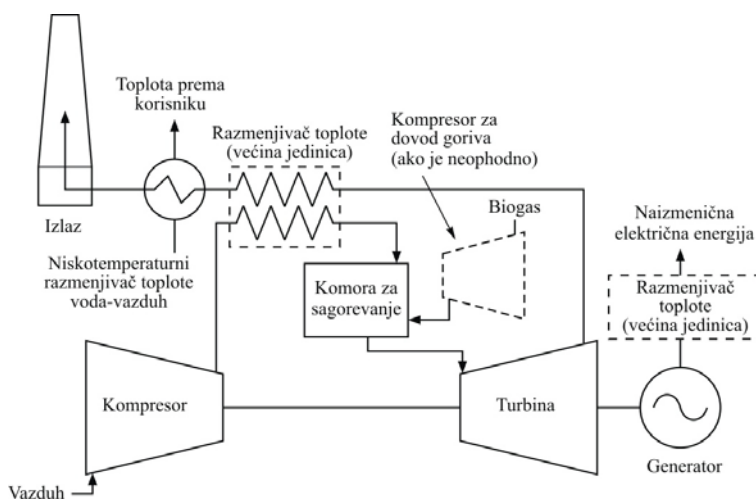
Gasni-dizel motori sa pilot paljenjem imaju isti princip rada kao i klasični dizel motori na tečno gorivo. Ovaj tip motora najčešće se koristi za pogon traktora i teretnih vozila. Kao pogonsko gorivo koristi se biogas pomešan u gasnu smešu sa vazduhom u odgovarajućem odnosu. Ova mešavina se ubrizgava u komoru za sagorevanje gde se zapali pomoću ubrizganog ulja za potpaljivanje. Obično se

ubrizgava do 10% ulja za potpaljivanje. Gasni-dizel motori sa pilot punjenjem rade sa velikim koeficijentom viška vazduha. U slučaju prekida dovoda biogasa motor bez problema može raditi na čisto ulje za potpaljivanje ili dizel gorivo.

Stirlingov motor radi bez unutrašnjeg sagorevanja. Kod ovog tipa motora koristi se princip promene temperature gasa koja dovodi do promene zapremine. Klipovi motora pokreću se usled ekspanzije gasa, koja je uzrokovana ubrizgavanjem gasa iz okoline. Potrebna toplota može biti obezbeđena iz različitih izvora kao što je npr. gasni gorionik koji koristi biogas. Za korišćenje biogasa kao pogonskog goriva u Stirlingovom motoru neophodne su određene tehničke korekcije motora. S obzirom da se radi o spoljašnjem sagorevanju kod motora ovog tipa može se koristiti biogas sa manjim udelom metana. Sa aspekta proizvodnje električne energije efikasnost ovih motora je između 24 i 28%, što je niže od efikasnosti gasnih-oto motora. Kapacitet Stirlingovih motora je najčešće niži od 50 kW, a temperatura izduvnih gasova se kreće od 250 do 300 °C. Ovaj tip motora se može koristiti u termoelektranama sa više blokova.

5.1.2. Primena biogasa za pogon malih turbina

Biogas je našao primenu kao energent za pogon malih turbina (mikroturbine). U malim biogasnim turbinama se vazduh pomešan sa biogasom uvodi u komoru za sagorevanje pod visokim pritiskom. Mešavina vazduha i biogasa sagoreva i usled porasta temperature dolazi do ekspanzije gasne smeše. Na slici 5.1 prikazana je tehnološka šema male gasne turbine.



Slika 5.1. Mala gasna turbina [5]

6. POSTUPAK PRORAČUNA BIOGASNIH POSTROJENJA

Pre izgradnje biogasnog postrojenja potrebno je definisati parametre kompletnog procesa. U zavisnosti od vrste supstrata za anaerobnu digestiju različiti su polazni podaci za proračun. U ovom poglavlju prikazani su primeri postupaka proračuna postrojenja za anaerobni tretman otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda (primer 6.1) i tečnog stajnjaka sa farme svinja (primer 6.2).

6.1. Primer postupka proračuna postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda

Potrebno je dimenzionisati postrojenje za anaerobnu obradu (digestor) u kojem se kao sirovina koristi otpadni mulj iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda kapaciteta $n = 126000$ ekvivalentnih stanovnika (*ES*). Proces prečišćavanja gradskih (sanitarnih) otpadnih voda sastoji se od primarnog i sekundarnog tretmana (aerobne biološke obrade), i obrade otpadnog mulja procesom anaerobne digestije. Predviđena je anaerobna stabilizacija mulja u toku koje nastaje biogas i prevreli ostatak. Biogas se koristi za proizvodnju toplotne i električne energije sagorevanjem u gasnim motorima. Dobijeni prevreli ostatak (digestat) se koristi kao biođubrivo u poljoprivredi.

Ukupnu dnevnu količinu mulja, koju treba tretirati u postrojenju za anaerobnu obradu, čine mulj iz primarnih taložnika i višak aktivnog mulja (iz bioaeracionog bazena) koji se izdvaja iz recirkulacionog toka. Tretman izdvojenog mulja se sastoji iz sledećih procesa:

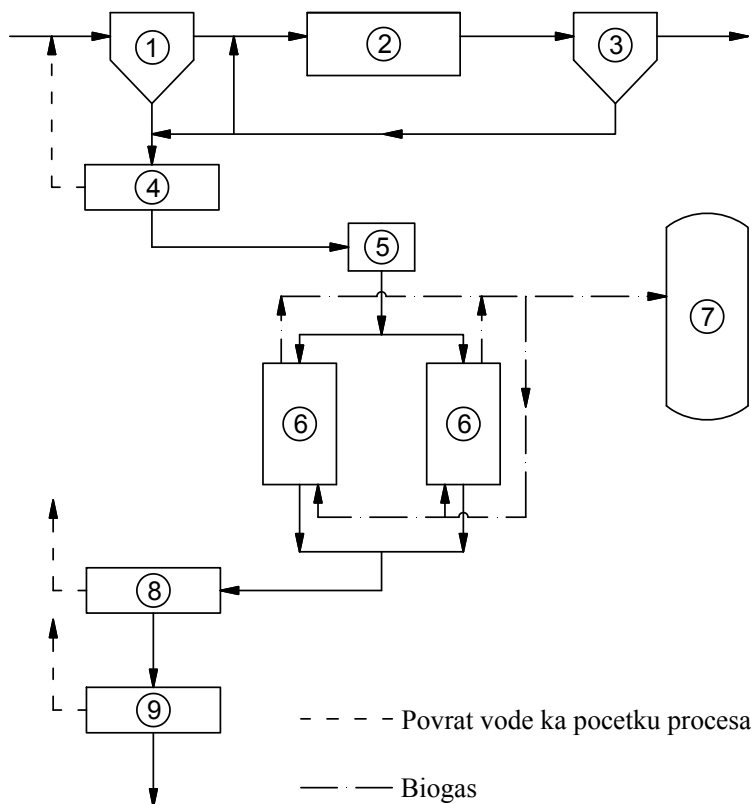
- primarno ugušćivanje,
- anaerobna digestija,
- sekundarno ugušćivanje i kondicioniranje, i

- obezvodnjavanje mulja.

Postupak proračuna postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda obuhvata određivanje:

- materijalnog bilansa procesa,
- dimenzionisanje glavnih cevovoda postrojenja.

Na slici 6.1 prikazana je tehnološka šema obrade otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda.



Slika 6.1 Tehnološka šema obrade otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda: 1 - primarni taložnik, 2 - bioaeracioni bazen, 3 - sekundarni taložnik, 4 - primarni ugušivač, 5 - razmenjivač toplote, 6 - digestor, 7 - rezervoar za skladištenje biogasa, 8 - sekundarni ugušivač, 9 - filter presa

6.1.1. Materijalni bilans procesa

Za proračun postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog mulja iz postrojenja za prečišćavanje gradskih (sanitarnih) otpadnih voda polazni podaci su:

- količina otpadne vode po ekvivalentnom stanovniku

$$(q_{OV})_{ES} = 315 \frac{\text{L}}{\text{ES} \cdot \text{dan}},$$

- ukupni dnevni protok otpadne vode

$$\dot{V}_{OV} = (q_{OV})_{ES} \cdot n = 315 \cdot 10^{-3} \cdot 126000 = 39690 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}},$$

- opterećenje otpadne vode (suspendovanim materijama) po ekvivalentnom stanovniku

$$SM_{ES} = 60 \text{ g SM} / (\text{ES} \cdot \text{dan}),$$

- koncentracija suspendovanih materija na ulazu

$$c_{ul} = \frac{SM_{ES}}{(q_{OV})_{ES}} = \frac{60 \cdot 10^3}{315} = 190 \frac{\text{mg}}{\text{L}}.$$

Količina mulja (suspendovanih materija) koji dolazi u postrojenje za obradu:

$$\dot{m}_{SM} = n \cdot SM_{ES} = 126000 \cdot 0,06 = 7560 \frac{\text{kg}}{\text{dan}}. \quad (6.1)$$

Na osnovu vrednosti opterećenja na prelivu primarnih taložnika izražava se efikasnost uklanjanja suspendovanih materija.

Stepen izdvajanja mulja (suspendovanih materija) u primarnim taložnicima je $\eta_{SM} = 60 \%$

Dnevna količina izdvojenih suspendovanih materija iz procesa primarnog taloženja iznosi:

$$\left(\dot{m}_{SM} \right)_{PT} = \frac{\dot{m}_{SM} \cdot \eta_{SM}}{100} = \frac{7560 \cdot 60}{100} = 4536 \frac{\text{kg}}{\text{dan}}. \quad (6.2)$$

Iz procesa bioeracije dnevno se uklanja određena količina aktivnog mulja (višak mulja) koja iznosi 0,55%.

Količina suspendovanih materija viška aktivnog mulja iznosi:

$$\left(\dot{m}_{SM} \right)_{VM} = 0,55 \cdot \frac{7560 \cdot 40}{100} = 0,55 \cdot 3204 = 1673 \frac{\text{kgSM}}{\text{dan}}. \quad (6.3)$$

KORIŠĆENI TERMINI, SKRAĆENICE I OZNAKE

Rečnik stručnih termina

anaerobna digestija	mikrobiološki proces razgradnje organskih materija pomoću mikroorganizama u sredini bez prisustva kiseonika; osnovni produkti anaerobne digestije su biogas i digestat (prevreli ostatak)
biohemijska konverzija	korišćenje biohemijskog procesa za proizvodnju goriva i hemikalija iz organskih sirovina
biogas	gorivi gas koji nastaje razgradnjom organskih materija pri anaerobnim uslovima, predstavlja mešavinu metana, ugljen-dioksida, ostalih gasova i elemenata u tragovima
biogoriva	goriva koja spadaju u biomasu ili su nastala preradom biomase, tj. živih organizama (biljke, životinje, mikroorganizmi)
bioreaktor (digestor)	uređaj sa pratećom merno-regulacionom opremom koji se zagreva na određenu temperaturu potrebnu za odvijanje procesa anaerobne razgradnje organske materije
digestat	tretirani supstrat (prevreli ostatak nastao u procesu anaerobne digestije)
ekvivalentni broj stanovnika (<i>ES</i>)	definiše zagađenje neke otpadne vode u pogledu sadržaja <i>BPK₅</i> u odnosu na uobičajene vrednosti za komunalne otpadne vode koje se daju u jedinicama <i>BPK₅</i> po stanovniku i danu, na taj način se opterećenja industrijskih otpadnih voda izražavaju odgovarajućim ekvivalentnim brojem stanovnika kao i za komunalne otpadne vode
faktor brojnosti životinja	predstavlja odnos prosečne mase životinje i mase izražene jednom stočnom jedinicom

fosilno gorivo	čvrsto, tečno ili gasovito gorivo koje je nastalo u Zemljinoj unutrašnjosti, prilikom hemijskih i fizičkih promena biljnih i životinjskih ostataka pri visokoj temperaturi i pritisku
generator	uređaj za pretvaranje mehaničke u električnu energije
goriva ćelija	uređaj koji energiju nekog goriva elektrohemijomskom reakcijom pretvara direktno, bez sagorevanja, u električnu energiju i toplotu
hidrauličko vreme zadržavanja	predstavlja odnos ukupne količine supstrata koji se nalazi u digestoru sa količinom supstrata koji u toku dana napusti digestor
kodigestija	kada se pri procesu anaerobne digestije koristi homogena mešavina dva ili više supstrata
kogeneracija	kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije
metanske (metanogene) bakterije	mikroorganizmi koji žive i vrše reprodukciju u životnoj sredini u kojoj nema slobodnog ili rastvorenog kiseonika
metanski broj	predstavlja meru otpornosti gasovitih goriva prema eksplozivnom sagorevanju
mezofilna digestija	digestija koja se odvija pri temperaturi od 37 do 41 °C ili temperaturi okoline između 20 i 45 °C, uz prisustvo mezofilnih mikroorganizama
obnovljivi izvori energije	energetski izvori koji su prirodno obnovljivi i neiscrpnji, ali je njihova korisna energija u jedinici vremena ograničena
pasterizacija	toplotno tretiranje supstrata pre procesa anaerobne digestije (oko 1 h pri temperaturi od 70 °C)
<i>pH</i> vrednost	veličina kojom se iskazuje intenzitet kiselosti odnosno bazičnosti nekog rastvora; određena je koncentracijom vodonikovih jona u nekom rastvoru (vrednost <i>pH</i> može biti od 0 do 14, gde 0 predstavlja najkiseliju vrednost, a 14 najveću bazičnost, dok je rastvor sa <i>pH</i> = 7 neutralan)
specifična produkcija biogasa	dnevna količina nastalog biogasa po m ³ zapremine digestora
stočna jedinica (<i>SJ</i>)	označava meru priliva stajnjaka koja odgovara životinji ili više njih, mase 500 kg

supernatant	isplivala masa na površinu supstrata koji se obrađuje u digestoru
supstrat	organska materija koja predstavlja sirovinu za proces anaerobne digestije (energetski usevi, biomasa, organski deo čvrstog komunalnog otpada, mulj komunalnih otpadnih voda, i dr)
suva materija	ostatak nakon isparavanja vode sušenjem materije na određenoj temperaturi
termofilna digestija	anaerobna digestija koja se odvija pri temperaturi od 50 do 52 °C (temperatura može biti do 70 °C), uz prisustvo termofilnih mikroorganizama
vreme zadržavanja čvrste faze	predstavlja odnos čvrste materije koja se nalazi u digestoru sa masom izdvojene čvrste materije iz digestora u toku jednog dana

Skraćenice

<i>BPK₅</i>	mg/L	biohemijski potrebna količina kiseonika za oksidaciju organskih materija heterotrofnim mikroorganizmima u aerobnim uslovima u trajanju od pet dana pri temperaturi od 20 °C
<i>f_b</i>	SJ/kom	faktor brojnosti životinja
<i>HPK</i>	mg/L	hemijski potrebna količina kiseonika
<i>HRT</i>	dan	hidrauličko vreme zadržavanje supstrata u digestoru
<i>SRT</i>	dan	vreme zadržavanja čvrste faze u digestoru
<i>TOC</i>	mg/L	ukupni organski ugljenik
<i>OSM</i>		organska suva materija
ASCE		American Society of Civil Engineers
C:N		odnos ugljenika i azota
MCFC		gorive ćelije sa rastvorenim ugljenikom
MEA		monoetanolamin
PAFC		gorive ćelije sa fosfornom kiselinom
PEM		gorive ćelije sa polimerno - elektrolitnom membranom
ppm		milioni deo (eng. <i>parts per million</i>) koristi se kao jedinica za izražavanje niske koncentracije zagađujućih komponenata u vazduhu, vodi, tečnostima i dr; 1 ppm = 1 mg/L = 1 mg/dm ³ ili 1 ppm = 0,0001%
PVC		polivinil hlorid
<i>SJ</i>		stočna jedinica
<i>SM</i>		suva materija
SOFC		visokotemperaturne gorive ćelije sa kiseonikom u čvrstom stanju
ten		tona ekvivalenta nafte (1 ten = 42,5 GJ = 11,8 MWh)
UAMP reaktor		reaktor sa uzvodnim anaerobnim muljnim prekrivačem
<i>UG</i>		uslovno grlo

Spisak oznaka

<i>Veličine</i>		
Oznaka	Jedinica	Naziv veličine
A	m^2	površina
a	m^3/m^3	zapreminski udeo kiseonika u vazduhu
B	mm	širina
c	mg/L	masena koncentracija
c_i	kg/L	<i>HPK</i> opterećenje
c_p	kJ/(kg·K)	specifični toplotni kapacitet pri $p = \text{const.}$
c_v	kJ/(kg·K)	specifični toplotni kapacitet pri $V = \text{const.}$
D, d	m	prečnik
d	-	relativna gustina gasa
E	kW	energetska vrednost biogasa
f_b	SJ/kom	faktor brojnosti životinja
f_{bg}	$m^3/(\text{dan} \cdot \text{SJ})$	prosečan prinos biogasa po stočnoj jedinici (<i>SJ</i>)
G	N	težina
g	m/s^2	ubrzanje sile Zemljine teže
g_{HPK}	-	udeo biorazgradivih komponenata izraženih preko <i>HPK</i>
g_{OSM}	%	maseni udeo organske suve materije (<i>OSM</i>) u tečnom stajnjaku
H, h	m	visina
H	m	napor pumpe
h	kJ/kg	entalpija produkata sagorevanja
H_g	kJ/ m^3	gornja toplotna moć gasovitog goriva
H_d	kJ/ m^3	donja toplotna moć gasovitog goriva
HRT	h, dan	hidrauličko vreme zadržavanja supstrata u digestoru
K	-	faktor uvećanja zapremine digestora
k	W/($m^2 \cdot K$)	koeficijent prolaza toplote
κ	-	eksponent adijabate
L	m	dužina
M	kg/kmol	molekularna masa
m	kg	masa

\dot{m}	kg/h, kg/dan	maseni protok
Nu	-	Nuseltov (Nusselt) broj
$O_{2,min}$	m ³ /kg	minimalna potrebna količina kiseonika za sagorevanje
p	Pa	pritisak
Pr	-	Prantlov (Prandt) broj
R	J/(kg·K)	gasna konstanta
R	-	toplotni učinak izolacije
R	kg/(m ³ ·dan)	opterećenje digestora
R	kg SM/(m ² ·dan)	opterećenje ugušćivača mulja
Re	-	Rejnoldsov (Reynolds) broj
r_g	g/(m ³ ·s)	brzina mikrobiološkog rasta
R_{isp}	%	stepen redukcije isparljivih materija
r	-	relativni zapreminski udeo
S	-	stepen sigurnosti
s	mm	debljina zida
SM	kg SM/dan	količina suve materije
SRT	h, dan	vreme zadržavanja čvrste faze u digestoru
T	K	apsolutna temperatura
t	°C	temperatura
V	m ³	zapremina
v	m ³ /kg	specifična zapremina
\dot{V}	m ³ /h	zapreminski protok
$V_{v,min}$	m ³ /kg	minimalna količina vazduha za sagorevanje
$V_{v,stv}$	m ³ /kg	stvarna količina vazduha za sagorevanje
V_{rw}	m ³ /m ³	količina vlažnih produkata sagorevanja
V_{rs}	m ³ /m ³	količina suvih produkata sagorevanja
Z	-	koeficijent kompresibilnosti (stišljivosti)
z	kom	broj komada ili grla životinja
Z_{SJ}	SJ	broj stočnih jedinica
α	W/(m ² ·K)	koeficijent prelaza toplote
η	-	stepen korisnog dejstva
Y	kg/kg	masena koncentracija
Q	kJ/dan, kJ/h	količina toplote za zagrevanje

λ	W/(m·K)	koeficijent provođenja toplote
λ	-	koeficijent viška vazduha
μ	kg/(m·s), Pa·s	koeficijent dinamičke viskoznosti
ν	mm ² /s	koeficijent kinematske viskoznosti
ν	-	koeficijent valjanosti (oslabljenja) zavarenog spoja
ρ	kg/m ³	gustina fluida
σ_d	N/mm ²	dozvoljeno naprezanje na zatezanje
τ	h, dan	vreme
w	m/s	brzina strujanja fluida
W_g	kJ/m ³	gornji Wobeov (Wobb) broj
W_d	kJ/m ³	donji Wobeov (Wobb) broj

Indeksi	
<i>AD</i>	anaerobna obrada (digestija)
<i>b</i>	balast
<i>bg</i>	biogas
<i>čk</i>	čvrsta komponenta
<i>d</i>	dozvoljeno
<i>dig</i>	digestor
<i>e</i>	ekvivalentni
<i>ef</i>	efektivno
<i>FP</i>	filtar presa
<i>g</i>	gubici
<i>gp</i>	gasni prostor digestora
<i>i</i>	ispitni
<i>iz</i>	izlaz
<i>iz</i>	toplotna izolacija
<i>isp. čvrsto</i>	isparljive komponente u čvrstom delu stajnjaka
<i>k</i>	kupola digestora
<i>k</i>	kritično
<i>M</i>	mulj
<i>max</i>	maksimalno
<i>n</i>	normalni uslovi
<i>o</i>	poljoprivredni otpad ili kultura (uopšte otpad)
<i>o</i>	nulta potrošnja

<i>OCV</i>	oceđena voda
<i>P</i>	pumpa
<i>P</i>	početak procesa
<i>p</i>	potrošnja
<i>pr</i>	prosečno
<i>PT</i>	primarni taložnik
<i>PU</i>	primarni ugušćivač mulja
<i>r</i>	rezervoar
<i>r</i>	radno
<i>raz</i>	razmenjivač toplote
<i>RD</i>	radni dan
<i>s</i>	supstrat
<i>SM</i>	suspendovane materije
<i>s,p</i>	supstrat pre dodavanja vode
<i>SU</i>	sekundarni ugušćivač mulja
<i>t</i>	tovljenik (domaća životinja)
<i>ts</i>	tečni stajnjak
<i>ts,8</i>	tečni stajnjak pri masenom udelu <i>OSM</i> od 8%
<i>ts,11</i>	tečni stajnjak pri prosečnom masenom udelu <i>OSM</i> od 11%
<i>u</i>	ukupno
<i>u</i>	unutrašnji
<i>z</i>	zagrevanje
<i>z</i>	zemljište
<i>zim</i>	zimski period
<i>v</i>	dodatna voda
<i>VM</i>	višak mulja

LITERATURA

- [1] *** BP Statistical Review of World Energy, June, 2011., <http://www.bp.com/statisticalreview>
- [2] *** https://www.schrack.rs/.../Dr_ZeljkoDespotovic_Info_dani_april_2012_SCHRACK.pdf
- [3] Dodić, J., J. Grahovac: Study over renewable energy sources, The project is co-funded by EU through the Bulgaria-Serbia, IPA Cross-border Programme, 2013.
- [4] Schüßler, M.: Obnovljiva energija – kratki pregled Nemačke i Bavarske, Prezentacija, Srbijagas, Novi Sad i Beograd, 05-06.05.2012.
- [5] Al Seadi, T., D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, R. Janssen: Big East, Biogas for Eastern Europe, Priručnik za bioplin, Prevod sa engleskog jezika, Zagreb, 2008.
- [6] Ward, J. A., P. J. Hobbs, P. J. Holliman, D. L. Jones: Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresource Technology*, 99 (2008), pp. 7928-7940.
- [7] Turovskiy, I.: Wastewater Sludge Processing, Wastewater Sludge Treatment Jacksonville, Florida, 2006.
- [8] Đulbić, M.: Biogas – dobijanje, korišćenje i građenje uređaja, Tehnička knjiga, Beograd, 1986.
- [9] *** Sizing biogas plant, <http://www.gate.gtz.de>
- [10] Bogner, M., A. Petrović: Konstrukcije i proračun procesnih aparata, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [11] Semenovoj, T. A., I. L. Lejtesa: Očistka tehnoloških gazov, Himija, Moskva, 1977.
- [12] Epifanova, V. I., Akselrod, L. S.: Razdelenie vozduha metodom glubokogo ohlaždenija, Mašinstroenie, Moskva, 1973.
- [13] *** Specificatoin off molecular sieve, adsorption system, Grace Italiana S. P. A., Milano, Prospektna dokumentacija.
- [14] Vuković, D., M. Bogner: Tehnika prečišćavanja, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [15] Guštin, S., M. Vebrič, D. Ilić: Proizvodnja biogasa iz svinjskog stajnjaka i klaničkih otpadaka na farmi Ihan, XI YUCORR, International Conference, Tara, 17-20.05.2009., str. 122-128.

- [16] Rehm, H. J., Reed G., Schonborn W.: *Biotechnology, Volume 8, Microbial Degradation*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1986.
- [17] Uzelac, S., M. Komatina, V. Vasić, G. D. Zupančić, B. Bugarski, V. Nedović: *Biogas kao obnovljivi izvor energije za ekonomičnu i ekološki održivu proizvodnju piva i napitaka*, KGH, 2 (2012), str. 37-43.
- [18] *** *Bioenergy in Germany: Facts and Figures*, January 2012.
- [19] Antić, M.: *Tehničke mogućnosti i aspekti primene gasovitih goriva*, Zbornik radova, *Gasovita goriva u industriji i širokoj potrošnji*, SMEITS, Beograd, 1974., str. 201-259.
- [20] Toti Bag, A.: *Proizvodnja i korišćenje biogasa u stočarstvu*, [www.http//kgh.kvartetv.com/fajlovi/36.%20kongres/36-42.pdf](http://kgh.kvartetv.com/fajlovi/36.%20kongres/36-42.pdf)
- [21] Rešidović, M.: *Studija termofizičkih karakteristika prirodnog gasa koji se koristi za smanjenje aerozagađenja u Sarajevu*, *Stručni časopis, Požar, eksplozija preventiva*, Broj 1, 2, 3, Sarajevo, 1985.
- [22] Kozić, Đ., B. Vasiljević, V. Bekavac: *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [23] Jaćimović, B., S. Genić: *Toplotne operacije i aparati*, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [24] Jaćimović, B., S. Genić, J. Nađ, J. Laza: *Problemi iz toplotnih operacija i aparata*, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [25] Jankes, G., M. Stanojević, M., Karan: *Industrijske peći i kotlovi*, *Priručnik za vežbanje sa rešenim zadacima*, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [26] Wellinger, A.: *Process design of agricultural digesters*, Ettenhausen, 1999.
- [27] Higham, I.: *Economics of anaerobic digestion of agricultural waste*, AEA Technology Environment, 1998.
- [28] Bogner, M., V. Voinović, N. Ivanović: *Propisi i standardi za stabilne i pokretne posude pod pritiskom*, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [29] Kuburović, M. M. Stanojević: *Biotehnologija – procesi i oprema*, *Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije*, Mašinski fakultet Beograd, 1997.
- [30] Bogner, M.: *Termotehničar, tom 1 i 2*, *Priručnik za termotehniku, termoenergetiku i procesnu tehniku*, *Poslovna politika*, Beograd, 2004.
- [31] Bogner, M., S. Ćirić: *Tehnički gasovi*, *Građevinska knjiga*, Beograd, 1984.
- [32] Hobson, P. N., A. D. Wheatley: *Anaerobic digestion modern theory and practice*, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1993.
- [33] Pain, B. F., R. Q. Hephherd: *Anaerobic digestion of farm waste*, *The National Institute for Research in Dairying*, Reading, England, 1985.

- [34] Bruce, A. M., A. Kouzeli – Katsiri, P. J. Newman: Anaerobic digestion of sewage sludge and organic agricultural waste, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1984.
- [35] Bent, E., P. Billins: Anaerobic Digestion of Farm and Food Processing Residues, John Wiley & Sons, 1997.
- [36] *** Book on Biogas and its Applications, National Institute of Industrial Research, Delhi, India, 2004.
- [37] Stanojević, M., D. Radić, M. Petrović: Mogućnosti energetskog iskorišćenja organskih sastojaka prisutnih u komunalnim otpadnim vodama, "Procesna tehnika", SMEITS Beograd, Processing 2006., Beograd, 14-16.06.2006.
- [38] Marinković, Z.: Zašto biogas, Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Međunarodna konferencija, Subotica, 10-12.04.2013., str. 136-140.
- [39] *** Directive 1999/92/EC of the european parliament and of the council, December 1999.
- [40] *** Izveštaj po podprojektu razvoj i optimizacija procesa proizvodnje biogasa na stočnim farmama, Institut "Kirilo Savić", Beograd, 1987.
- [41] *** Razvoj i optimizacija procesa proizvodnje biogasa na malim stočnim farmama, Institut "Kirilo Savić", Beograd, 1987.
- [42] Babić, S., M. Despotović, B. Milosavljević: Analiza energetskog bilansa proizvodnje biogasa iz kukuruzne silaže u Srbiji, 5. Nacionalna konferencija o kvalitetu života, Festival kvaliteta, Kragujevac, 2010., <http://www.cqm.rs/2010/pdf/5/20.pdf>
- [43] Milosavljević, B., M. Despotović, S. Babić: Anaerobna digestija životinjskog stajnjaka, tehnologija i iskustva u Evropi i Srbiji, 5. Nacionalna konferencija o kvalitetu života, Festival kvaliteta, Kragujevac, 2010.
- [44] Ahring, B., I. Angelidaki: Monitoring and controlling the biogas process, The Future of Biogas in Europe, September, 1997.
- [45] *** Waste to Energy Technologies, <http://www.acre.murdoch.edu.au/refiles/waste/text/technologies.htm>
- [46] Radosavljević, M.: Korišćenje biogasa za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije, Procesna tehnika, Beograd, XII, Broj 3-4/1996, str. 286-289.
- [47] Kuburović, M., M. Stanojević, V. Knežević: Elementi projektovanja postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog materijala, Procesna tehnika, Beograd, X, Broj 3-4/1994, str. 101-105.

- [48] Venečanin, B., V. Čukić: Efekti proizvodnje i korišćenja biogasa na sistemu za obradu otpadnih voda svinjogojske farme "Surčin", Konferencija o aktuelnim problemima zaštite voda, Tara, 1995., Zbornik radova, str. 363-366.
- [49] Đulbić, M.: Proizvodnja i korišćenje biogasa, Procesna tehnika, Beograd, III, Broj 2/1987, str. 47-57.
- [50] Deublein, D., A. Steinhauser: Biogas from Waste and Renewable Resources, Weinheim, 2008.
- [51] Gerardi, M.: The Microbiology of Anaerobic Digestes, A John Wiley & Sons, 2003.
- [52] Werner, U., U. Stöhr, N. Hees: Biogas Plants in Animal Husbandry, Gate, Wiesbaden, Vieweg, 1989.
- [53] Bitton, G.: Wastewater Microbiology, Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, Gainesville, Florida, 2005.
- [54] Amon, T., B. Amon, V. Kryvoruchko, A. Machmüller, K. Hopfner-Sixt, V. Bodiroza, R. Hrbek, J. Friedel, E. Pötsch, H. Wagenristl, M. Schreiner, W. Zollitsch: Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations, Bioresource Technology 98 (2007), pp. 3204–3212.
- [55] Šišić, I., N. Pračić, S. Hodžić: Tehnološko-ekonomske osnove proizvodnje bioplina sa farmi na Unsko-sanskom kantonu, 7. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem, Kvalitet 2011., Neum, 01-04.06.2011., str. 689-694.
- [56] *** http://www.tf.ni.ac.rs/IPA_Bul_Ser/pdf6.pdf
- [57] Milosavljević, B., M. Despotović, S. Babić: Proizvodnja biogasa sa farmi krava muzara u centralnoj Srbiji, <http://www.cqm.rs/2010/pdf/5/18.pdf>
- [58] Epp, K., D. Rutz, M. Köttner, T. Finsterwalder: Vodič za odabir povoljne lokacije za bioplinsko postrojenje, Projekat Big East, Biogas for Eastern Europe, Prevod sa engleskog jezika, Zagreb, 2009.
- [59] Vasić, V., G. D. Zupančić, F. Kokalj: Biogas kao perspektivna alternativa u sistemima za snabdevanje prirodnim gasom, KGH, 3 (2012), str.75-80., <http://www.kgh-drustvo.rs/drustvo/docs/kgh3-12-5.pdf>
- [60] Schaller, M.: Biogas – energija na koju se računa, KGH, 4 (2009), str. 47-49.
- [61] Pejin, R.: Produkcija biogasa iz biološkog otpada – ekološka opravdanost, Energija, ekonomija, ekologija, List Saveza energetičara, Energetika 2 (2010), str. 103-107.

- [62] Stefanović, G., S. Heckmann, Lj. Čojbašić: Dobijanje biogasa iz organskog otpada, Procesna tehnika, Beograd, XII, Broj 3-4/1996, str. 281-285.
- [63] Matić, A., S. Petrović: Kogenerativna proizvodnja energije na bazi biogasa u mlekarskoj industriji – energetski i ekološki aspekt, 44. Međunarodni kongres i izložba o grejanju, hlađenju i klimatizaciji, Beograd, 04-06.12.2013.
- [64] Povrenović, D., M. Knežević: Osnove tehnologije prečišćavanja otpadnih voda, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2013.
- [65] Tica, G., P. Gvero, S. Jelisić, D. Stojiljković: Biogas kao energetski izvor, <http://www.simterm.masfak.ni.ac.rs/proceedings/12-2005>
- [66] Despotović, M., S. Savić, S. Jovanović, D. Mitrović: Neke mogućnosti unapređenja energetske i ekološke efikasnosti centralnog postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u Kragujevcu, Reciklažne tehnologije i održivi razvoj, IV SRTOR, Kladovo, 03-06.11.2009., str. 331-337.
- [67] *** Biogas production in Germany, Federal Environment Agency Dessau – Rosslau, January 2012.
- [68] Ždrale, A.: Elektrana na biogas sa upotrebom mesnih otpadaka klanične industrije, Druga međunarodna naučno-stručna konferencija o upravljanju otpadom, Industrijski otpad II, Tara, 14-17.09.2009., str. 204-208.