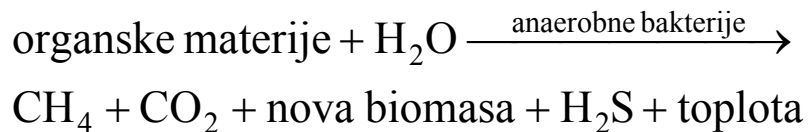


Biološka obrada otpadnih voda – anaerobni procesi

Primena procesa anaerobne digestije za tretman otpadnih voda i muljeva je široko rasprostranjena u svetu.

Po definiciji, **anaerobna digestija** (A/D) je: upotreba mikroorganizama u odsustvu kiseonika za stabilizaciju organskih materija prevođenjem u metan i neorganske produkte, uključujući ugljen-dioksid:



A/D postupak se koristi za tretman **otpadnih voda iz industrijske, poljoprivredne proizvodnje i gradova.**

Industrijske otpadne vode su poreklom iz:

- pivara,
- mlekara,
- proizvodnje hrane,
- hemijske industrije,
- farmaceutske industrije,
- vinarija i dr.

Poljoprivredne otpadne vode mogu biti poreklom sa farmi svinja, goveda, pilića i dr.

Tipični sadržaj **čvrstih komponenata** kod **niskoopterećenih** digestora je **3 do 10 %**, a kod **viskoopterećenih** **10 do 30 %**.

Redukcija HPK varira između **75 i 90 %**.

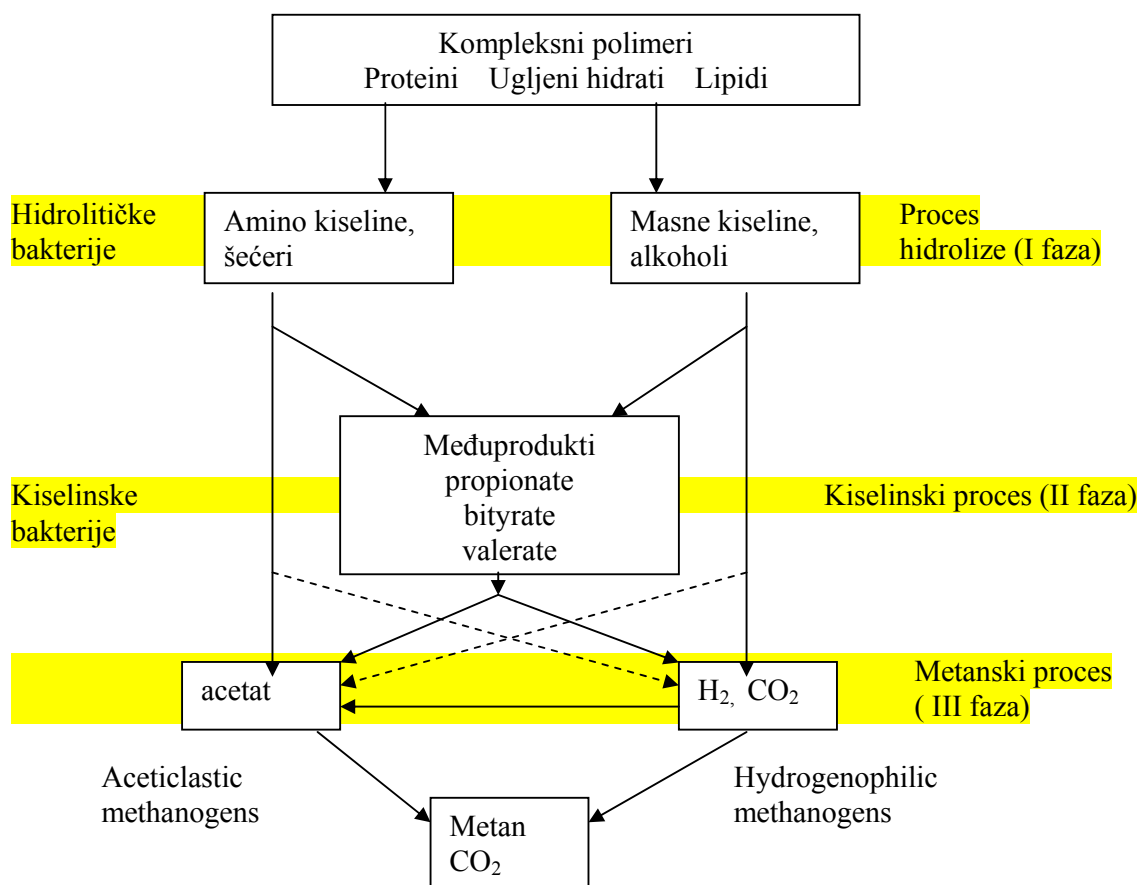
Upotreba A/D je **korisna za:**

- smanjenje zagađujućih komponenata u otpadnim vodama,
- eliminaciju patogenih mikroorganizama,
- dobijanje đubriva (ili goriva) od čvrstog ostatka iz procesa,
- dobijanje biogasa kao energenta.

Mikrobiologija anaerobne digestije

U postupku A/D deluju četiri grupe mikroorganizama (bakterija) čije kumulativno dejstvo omogućava kontinuitet i stabilnost procesa.

U anaerobnoj preradi organskog otpada postoje tri osnovne faze (stupnja), kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1 Faze anaerobne prerade organskog otpada

Gujer i Zehnder (1983) **podelili su anaerobni proces na sedam podprocesa** kao što sledi:

- hidroliza kompleksnih organskih jedinjenja,
- fermentacija amino kiselina i šećera,
- anaerobna oksidacija masnih kiselina i alkohola,
- anaerobna oksidacija međuprodukata,
- dobijanje acetata iz CO₂ i H₂,
- konverzija acetata u metan pomoću aceticlastic methanogens,
- proizvodnja metana pomoću hydrogenophilic methanogens korišćenjem CO₂ i H₂O.

Neki tipični bakterijski sojevi prisutni u različitim stupnjevima i oblastima populacije su navedeni u tabeli 1.

U svakom od stupnjeva gustina populacije (u otpadnom mulju) nalazi se u granicama od 10⁵ do 10⁹ po ml.

Bakterije uključene u A/D proces imaju pH u oblasti od 6 do 8, pri čemu vrednost 7 odgovara optimalnoj aktivnosti.

T. 1 Neki bakterijski sojevi koji učestvuju u anaerobnoj digestiji

Faza (stupanj procesa)	rodovi/sojevi	Populacija komunalnom otpadu, mezofilni uslovi
Hydrolytic acidogenic Hidrolitička kiselinska	Butyrivibrio, Clostridium, Ruminococcus, Acetivibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactabacillus, Streptococcus, etc.	10 ⁸ - 10 ⁹ po ml
Acetogenic Homoacetogenic	Acetobacterium, Acetogenium, Eubacterium, Pelobacter, Clostridium, etc.	≈ 10 ⁵ po ml
Obligate proton reducing acetogens	Methanobacillus omelionskii, Syntrophobacter wolinii, Syntrophomonas wolfei, Syntrophus buswelii, etc	
Methanogenic	Methanobacterium (više sojeva), Methanobrevibacter (više sojeva), Methanococcus (više sojeva), Methanomicrobium (više sojeva), Methanogenium (više sojeva), Methanospirillum hungatei, etc.	≈ 10 ⁸ ml

Neophodni tehnološki uslovi anaerobnog vrenja

Tehnološki proces anaerobnog vrenja uslovljen je postojanjem i ispunjavanjem odgovarajućih uslova - kako bi se postigao rezultat sa višim stepenom razgradnje organskih materija i zadovoljavajući kvalitet i prinos biogasa.

Osnovni tehnološki uslovi za proces anaerobnog vrenja su:

- a - Krupnoća i vrsta materijala,**
- b - Temperatura u toku procesa,**
- c - Pritisak u digestoru,**
- d - Vrednost pH,**
- e - Kvalitet metanskih bakterija,**
- f - Bez kiseonična atmosfera digestora,**
- g - Vreme zadržavanja supstrata u digestiru,**
- h - Odnos ugljenika i azota u supstratu (C/N),**
- i - Mešanje supstrata u digestoru,**
- j - Odnos suve organske materije i vode u supstratu.**

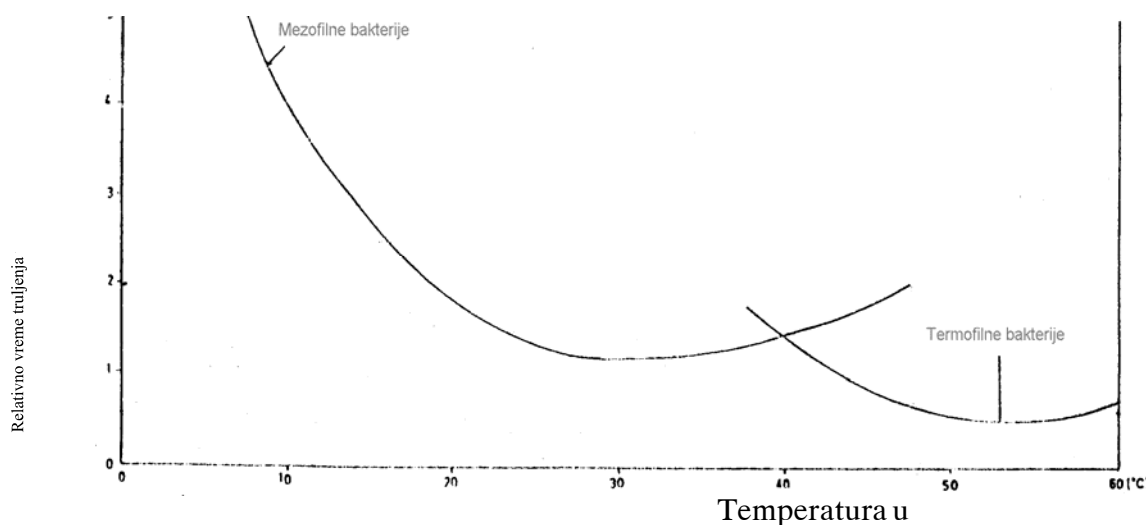
Svaki od navedenih uslova ima određeni stepen uticaja na normalan tok procesa anaerobnog vrenja. Da bi se ti uslovi mogli obezbediti, potrebno je poznavati njihovu prirodu i veličinu uticaja na proces anaerobnog vrenja. Iz tog razloga potrebno je o svakom od uslova znati osnovne činjenice.

a) Krupnoća i vrsta materijala

Organski materijal koji se ulaže u digestor neophodno je da bude što sitniji, kako bi proces vrenja imao normalan tok. Supstrat krupnijih čestica produžava vreme anaerobnog vrenja, što za sobom povlači povećanje potrebne zapremine digestora. Zato je na postrojenju za prečišćavanje gradskih otpadnih voda, neophodna ugradnja rešetaka, peskolova i taložnika za prethodnu obradu.

b) Temperatura odvijanja procesa

Temperatura pri kojoj se odvija proces anaerobnog vrenja veoma je važan parametar, od kojeg ne zavisi samo kojeg tipa će biti proces, nego i koliko će se biogasa dobiti, koliko će dugo trajati proces vrenja i koliki će biti stepen razgradnje organske materije. Na slici 2 prikazan je uticaj temperature na vreme truljenja, odnosno na relativno vreme truljenja (koje predstavlja odnos stvarnog vremena truljenja prema optimalnom).



Sl. 2 Uticaj temperature truljenja u odnosu na relativno vreme truljenja

c) Pritisak u digestoru

Pritisak biogasa u digestoru je uglavnom uslovljen potrebnim pritiskom biogasa kod potrošača i veličinom gubitaka u cevovodu i uređajima za prečišćavanje i regulaciju pritiska. Uzimajući u obzir sve navedeno može se reći da je uobičajena veličina nadpritiska gasa u digestoru između $2,5 \div 4$ kPa.

d) Vrednost pH

Vrednost pH je po važnosti jedan od bitnih tehnoloških uslova anaerobnog vrenja. Za vreme trajanja anaerobnog vrenja, zavisno od toga koja se faza odvija, vrednost pH se menja u granicama od 5,5 do 8,2. U slučaju da se supstrat dodaje u digestor kontinuirano svakog dana, tada se pH vrednost kreće u granicama od 6,5 do 7,5. Inače je poželjno da ovaj interval bude nešto uži, odnosno da se pH vrednost kreće u granicama od 6,8 do 7,2. Važno je znati da što je supstrat u digestoru kiselij, slabiji je rad metanskih bakterija.

e) Kvalitet metanskih bakterija

Brzina i obim proizvodnje biogasa, odnosno njegovog najvažnijeg sastojka - metana, uslovljene su kvalitetom metanskih bakterija. Kvalitet metanskih bakterija zavisi od ostalih uslova koji vladaju u digestoru:

- temperatura,
- pritisak,
- kiselost,
- mešanje supstrata.

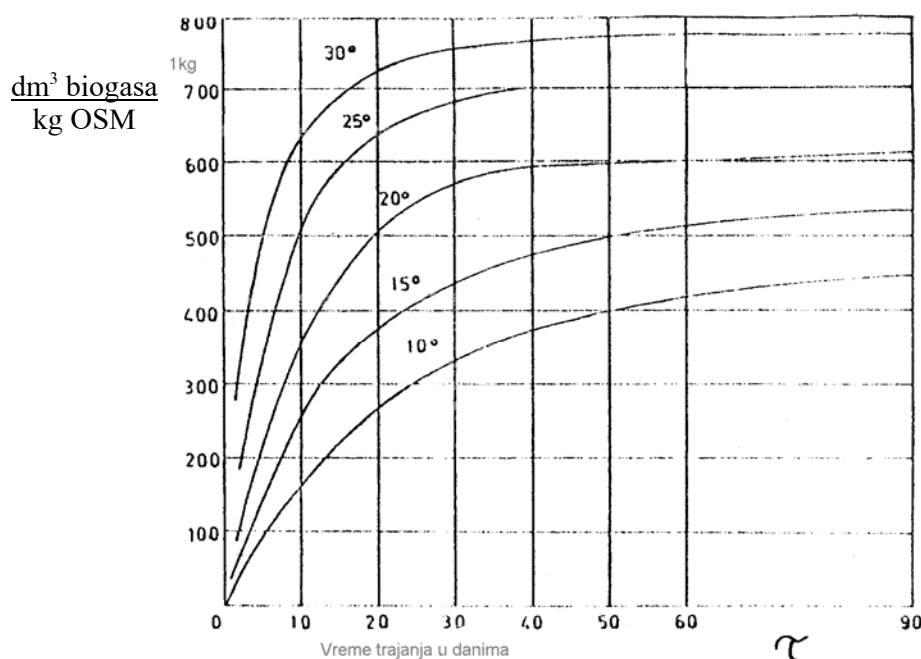
U novije vreme vrše se istraživanja sa ciljem da se stvori hibridna metanska bakterija koja bi imala veću produktivnost i otpornost.

f) Bez kiseonična atmosfera digestora

Bez kiseonična atmosfera u digestoru je osnovni uslov za postojanje procesa anaerobnog vrenja, jer samo u bezkiseoničnoj atmosferi digestora mogu se razvijati i biti aktivne metanske bakterije. Obezbeđenje bezkiseonične atmosfere vrši se dobrim zaptivanjem svih spojeva i sastava konstrukcije i cevovoda. U početku rada digestora proces je aeroban, tj. u kiseoničnoj atmosferi pa se razvijaju aerobne bakterije. Kad one potroše raspoloživi kiseonik, tek onda počinje proces anaerobnog vrenja.

g) Vreme zadržavanja supstrata u digestoru

Vreme zadržavanja supstrata u digestoru zavisi od procesa anaerobnog vrenja, a to znači od temperaturskog režima. Na slici 3 data je zavisnost količine biogasa od temperature i vremena truljenja. Izuzetno skraćanje zadržavanja biomase u digestoru, uz dobre rezultate u prinosu biogasa postiže se putem složenog procesa razdvojenih faza anaerobnog vrenja.



Slika 3 Dobijanje biogasa iz jednog kg suve organske materije zavisno od procesne temperature i vremena truljenja (FAIR i MOOR)

h) Odnos ugljenika i azota u supstratu

Za normalnu aktivnost i reprodukciju metanskih bakterija neophodan uslov je povoljan odnos ugljenika i azota u materiji koja se digestira. Smatra se povoljnim odnos **C:N od 25:1 do 35:1**. Najbolji odnos je **30:1**. Ovakav odnos je potreban zato što metanske bakterije za oko 30 puta brže troše ugljenik nego azot. Na održavanje odnosa ugljenika i azota, kao i na količinu

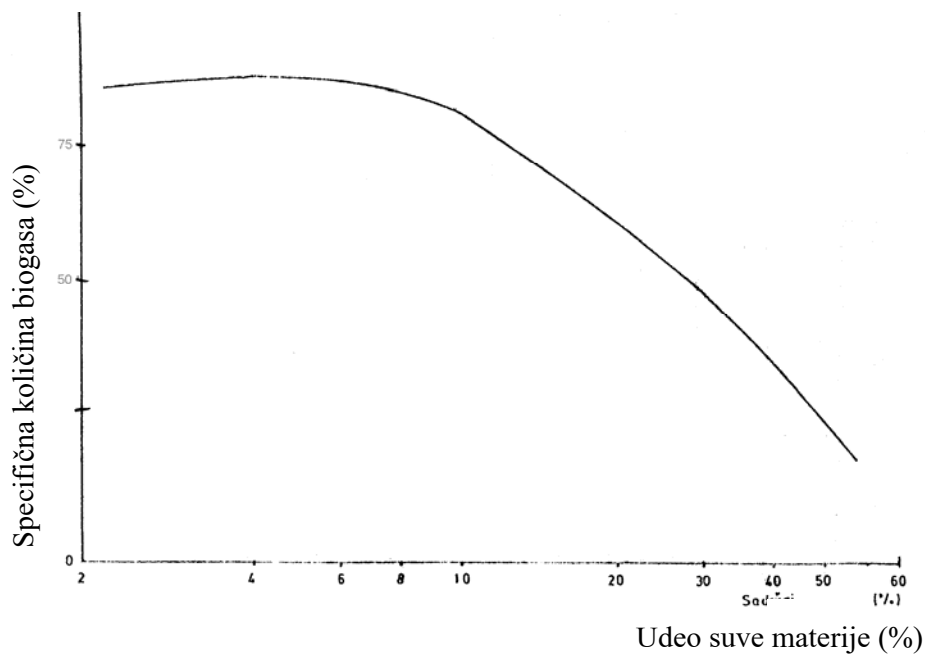
ugljenika u digestoru povoljno deluje svakodnevno dodavanje supstrata i dobro mešanje u digestoru.

j) Mešanje supstrata u digestoru

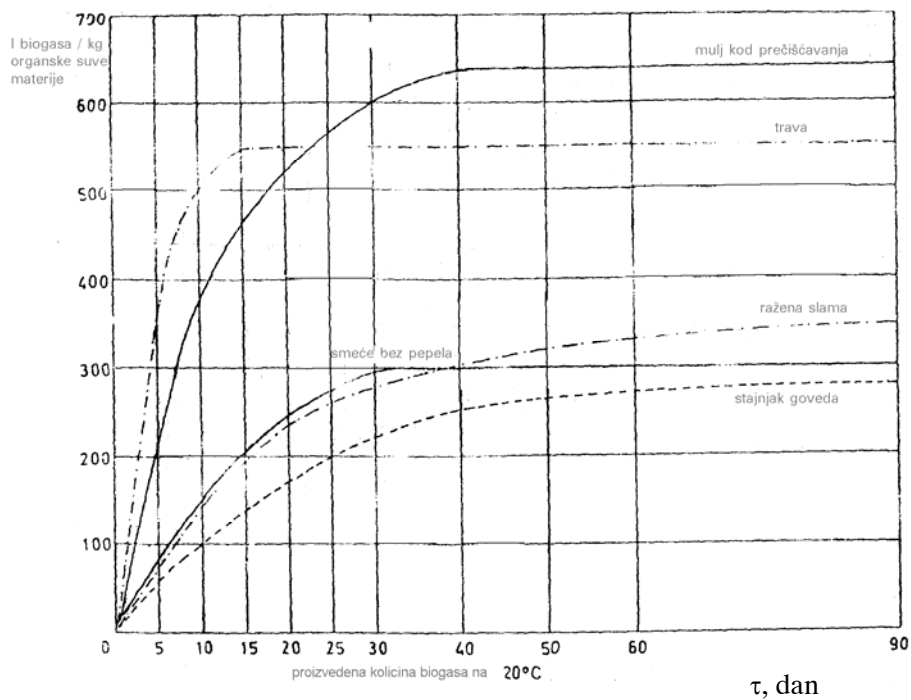
Metanske bakterije su male pokretljivosti a kako se brzo razmnožavaju i još brže koriste sastojke supstrata u svojoj aktivnosti, neophodno je dovesti ih u poziciju da se navedene aktivnosti neometano obavljaju. Mešanje dovedenog supstrata u digestoru ima za cilj da reši problem koji nastaje zbog slabe pokretljivosti metanskih bakterija. Mešanje je povoljno i radi sprečavanja taloženja težih čestica na dno digestora a što vodi smanjenju aktivne zapremine, odnosno zapremine u kojoj su aktivne metanske bakterije.

k) Odnos suve materije i vode u supstratu

U svakoj od faza anaerobnog vrenja vrlo je važan sadržaj vode u supstratu. Ako nema vode u dovoljnoj količini tada se aktivnost metanskih bakterija usporava, a ako je vode previše razgradnja ne može da se obavi u predviđenom obimu pa je materija koja napušta digestor gotovo nerazgrađena. Na slici 4 data je zavisnost uticaja udela suve materije na specifičan prinos biogasa.



Slika 4 Uticaj udela suve materije na specifični prinos biogasa
 U zavisnosti od vrste organske materije potrebno je da učešće suve materije u vodenom rastvoru bude **6,5 do 12%**. Na slici 5 je prikazano koja se količina biogasa dobije od različitih organskih materija pri istoj temperaturi zavisno od vremena truljenja.



Slika 5 Proizvedena količina biogasa od različitih organskih materija pri istoj temperaturi zavisno od vremena truljenja
Konfiguracija reaktora (digestora)

Različite konfiguracije reaktora (digestora) imaju primenu za industrijski, poljoprivredni i gradski otpad.

Većina otpada koji se tretiraju u digestorima su tečnosti sa **2 do 6 % čvrstih materija**.

Vreme zadržavanja čvrstih materija je tipično **10 do do 30 dana** i ovo je osnovni projektni parametar.

U digestorima je obezbeđeno **mešanje** na jedan od sledećih načina:

- pomoću mehaničkih mešalica,
- recirkulacijom gasa, ili
- recirkulacijom mulja.

Digestori rade u tri moguće temperaturne oblasti:

- psihrofilnoj oblasti (0 - 20 °C)
- mezofilnoj oblasti (\approx 36 °C)
- termofilnoj oblasti (50 - 60 °C).

Nekada su digestori radili **pri temperaturi okoline** sa dugim vremenima zadržavanja.

Najveći deo digestora danas radi u **mezofilnom režimu** i produkcijom oko **2 m³ biogasa / m³ digestora**.

Biogas se sastoji iz **CH₄** i **CO₂** i tipična vrednost za udeo **CH₄ u biogasu je 60 %**.

Projektovanje procesa

Projektovanje procesa obuhvata više parametara:

- vreme zadržavanja čvrste komponente (SRT), dana,
- hidrauličko vreme zadržavanja (HRT), dana,
- opterećenje isparljivim čvrstim materijama, kg VS/m³/dan,
- produkcija čvrstih komponenata, kg SS/m³/dan,
- produkcija gasa, m³ CH₄/dan,
- konfiguracija posude,
- sistem mešanja,
- sistem zagrevanja.

Podaci o radnim parametrima i tipičnoj konstrukciji za proces anaerobne digestije u SAD, u saglasnosti sa ASCE, prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2 Konstrukcija i radni parametri anaerobnih digestora

Veličina	Jedinica	Brojna vrednost
Vrsta:		
mulja koji se dozira		
– primarni	%	15
– iz kapajućeg filtra	%	35
– otpadni aktivni mulj	%	35
prečnik posude	m	12-38
visina posude	m	5-19
muljno opterećenje	(kg VSS/m ³ /d)	≈ 5,5
produkcija gasa	(m ³ /kg VS _{reduced})	≈ 1
metan	%	65
radna temperatura	°C	38

Usvojeno iz ASCE, 1983.

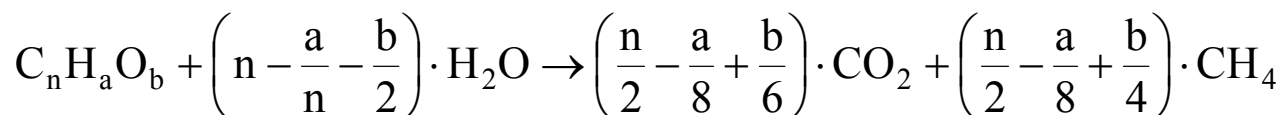
Dominantna radna temperatura je 38 °C i odgovara mezofilnom procesu. Ovo se takođe odnosi i na postrojenja u Evropi.

Od 1983. tehnologija anaerobne digestije je značajno unapređena. Mnogo ovih postrojenja sada rade u termofilnom režimu, čime se obezbeđuje visoka produkcija gasa, kao i visoki udeo čvrste materije

Produkcija metana

Količina proizvedenog metana zavisi od više parametara, ali najviše od vrste otpada, tipa reaktora, temperature i sadržaja čvrstih komponenata.

Bushwell and Meller (1952) su utvrdili da je **stehiometrijska jednačina za produkciju metana:**



Na primer, ako se koristi **čista glukoza**, onda je:



tj. od 1 kg glukoze proizvodi se $3 \cdot 16 / 180 = 0,27$ kg CH₄
(0,373 m³ CH₄).

Slično od 1 kg **ugljenih hidrata** proizvodi se $\approx 0,35$ m³ CH₄.

Za reaktore-digestore sa kontinualnim radom i mešanjem (continuous flow stirred tank reactors - CFSTR) produkcija metana (Tchobanoglous and Schroeder, 1987.) je:

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot (n \cdot Q \cdot c_i - 1,42 \cdot r_g \cdot V)$$

gde su:

- n - udeo biorazgradljivih izraženih preko HPK ($\approx 0,85$)
- Q ,m³/s, - protok,
- c_i ,kg/l, - HPK opterećenje, kg/l
- r_g ,g/m³·s, - brzina mikrobiološkog rasta,
- V ,m³, - zapremina,
- M_{CH₄} ,m³/s, - produkcija metana.

– za približno određivanje produkcije metana, ako se zanemari uticaj rasta mikroorganizama, dobija se:

$$V_{\text{CH}_4} = 0,3 \cdot Q \cdot c_i$$

Svojstva biogasa

Biogas dobijen anaerobnim vrenjem organskih otpadnih materija, spada u grupu gorivih gasova. Sastav i osobine biogasa menjaju se u zavisnosti od vrste polaznog materijala (biomase) i od tehnoloških uslova za vreme procesa digestije.

Analize toplotne moći biogasa se donekle razlikuju od autora do autora, ali se uglavnom kreću oko 20 MJ/m³. Radi poređenja u tabeli 3 su navedene toplotne moći nekih drugih vrsta gasova koji su najčešće u upotrebi.

Tabela 3.: Donje toplotne moći nekih vrsta gasovitih goriva i biogasa

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

Toplotna moć biogasa može se povećati ukoliko se odstrani CO₂. 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, pa zadržava i dalje svoj karakterističan upozoravajući miris.

Sastav biogasa

Biogas kao gorivo nije evidentiran standardom JUS, ali pošto spada u gasovita goriva (po sastavu je blizak prirodnom gasu) razmatranja njegovih karakteristika izvršena su u odnosu na **standard JUS H. F1. 001 za gasovita goriva.**

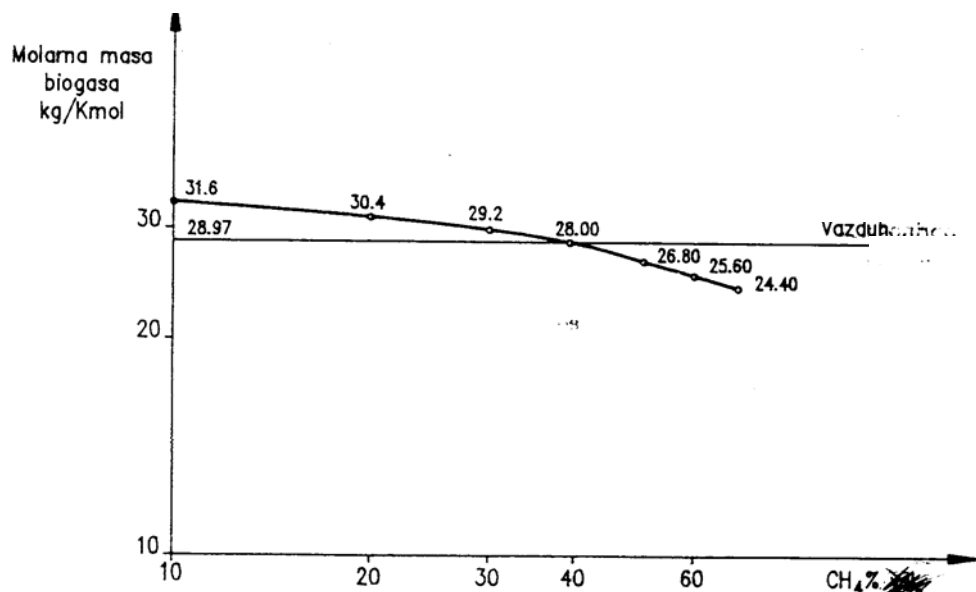
Posmatrano u odnosu na standard JUS H. F1. 001 sastav biogasa predstavlja sadržaj glavnih sastojaka i pratećih elemenata. Sadržaj glavnih sastojaka u biogasu, iskazuje se u zapreminskim, masenim ili molskim udelima (V/V,%, m/m,%, mol/mol,%). Prateće komponente ili primese mogu biti tečne ili gasovite i njihova koncentracija se izražava u mg/m³, cm³/m³, mg/kg.

Uopšte rečeno, biogas se sastoji iz gorivih i negorivih komponenti. Od gorivih je najznačajnije prisustvo metana, a od negorivih gasnih komponenti najizražajnije je prisustvo ugljen-dioksida. U tabeli 4 dat je sastav biogasa koji se uobičajno postiže.

Tabela 4.: Sastav biogasa

Gorivi sastojci biogasa		Negorivi sastojci biogasa	
Naziv gasa	Zapreminski udeo (%)	Naziv gasa	Zapreminski udeo (%)
Metan (CH ₄)	55÷75	Ugljen-dioksid (CO ₂)	25÷45
Vodonik (H ₂)	0÷1	Azot (N ₂)	0÷2
Vodonik-sulfid (H ₂ S)	0÷1	Kiseonik (O ₂)	0÷0,5
		Vodena para (H ₂ O)	0÷2
		Amonijak (NH ₃)	0÷2

S obzirom da je po svom karakteru biogas smeša više gasova, njegova gustina zavisi i menja se prema pojedinačnim zapreminskim udelima svake od zastupljenih gasnih komponenti. Na osnovu dijagrama zavisnosti molarne mase (slika 6) od zapreminskog udela metana u biogasu konstatuje se da je biogas lakši od vazduha sem u slučajevima kad je udeo metana u njemu niži od 40%.



Slika 6. Dijagram zavisnosti molarne mase biogasa od sadržaja metana

Na kvalitet biogasa se može uticati i njegovom doradom posle izlaska iz digestora, naročito u smislu popravke njegovih gorivih osobina. Popravka gorivih osobina biogasa kreće se u pravcu smanjenja negorivih sastojaka i eliminacije štetnih gorivih sastojaka.

Na centralnom postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda (CPPOV) - Kragujevac urađena je višestruka analiza uzoraka biogasa u periodu februar-mart 1991. god. Uzorci su uzeti pri normalnom radu postrojenja. Dobijene vrednosti su date u tab. 5.

Tabela 5.: Sastav biogasa dobijenog prečišćavanjem otpadnih voda grada Kragujevca

Komponenta	Jedini ca	Brojna vrednost
Metan	%	63,885
Azot	%	0,005
Ugljen-dioksid	%	36,110
Ukupan sumpor	mg/m ³	47
Prašina (čestice)	mg/m ³	7,5
Ukupni halogeni ugljovodonici	mg/m ³	17,8

Amonijak	mg/m ³	1,7
----------	-------------------	-----

Za razmatranje pojedinih karakteristika usvojen je sastav biogasa prikazan u tabeli 6. U tabeli 7. prikazane su karakteristike komponenata koje ulaze u sastav biogasa.

Tabela 6.: Sastav biogasa

Komponenta	Jedinica	Zapreminski udeo
Metan (CH ₄)	%	65
Vodonik (H ₂)	%	2
Vodonik-sulfid (H ₂ S)	%	1,5
Ugljen-dioksid (CO ₂)	%	30
Amonijak (NH ₃)	%	0,5
Azot (N ₂)	%	1

Tabela 7.: Osnovne karakteristike komponenata biogasa

Komponenta	Molska masa M kg/kmol	Gustina ρ^* kg/m ³	Gasna konst. R J/kg K	Specif. toplota Cp J/kg K	Specif. toplota Cv J/kg K	Eksp. adijabate κ	Kritična temp. T _k K	Kritični pritisak P _k bar	Dinam. viskoz. μ 10 ⁶ kg/m s
Metan (CH ₄)	16,03	0,717	518,8	2225	17,00	1,31	190,85	46,2	10,3
Vodonik (H ₂)	2,016	0,0895	4125	14266	10130	1,407	33,1	12,97	8,42
Ugljen-dioksid (CO ₂)	44,01	1,976	189	837	653	1,3	304,1	73,9	13,7
Vodonik-sulfid (H ₂ S)	34,09	1,539	244,2	1058	804	1,3	373,4	191,4	11,66
Amonijak (NH ₃)	17	0,771	489	2200	1710	1,28	405,4	113	9,18
Azot (N ₂)	28	1,429	259,9	913	653	1,4	154,18	50,37	20,3

*- gustina na normalnim uslovima t=0 °C, p=101325 Pa

Dobijanje biogasa u postrojenjima na farmama

Izgradnja postrojenja biološke anarobne prerade otpadnih voda na farmama (poljoprivrednim gazdinstvima) ima za cilj da se smanje velike ekološke štetnosti usled emisije zagađujućih

materija. Osim toga, biogas i đubrivo koji nastaju kao nus produkt procesa anarobne digestije imaju svoju značajnu upotrebnu vrednost.

Posle određenog nivoa prečišćavanja, koji zavisi od načina korišćenja biogasa, on se može koristiti:

- u kotlovima za proizvodnju toplotne energije,
- u gasnim turbinama,
- u kogenerativnim postrojenjima za proizvodnju toplotne i električne energije,
- u vozilima kao gorivo za motore sa unutrašnjim sagorevanjem.

Izgradjen je veliki broj individualnih postrojenja na farmama širom sveta.

U poslednjih deset godina u nekim državama sa razvijenom poljoprivrednom proizvodnjom, poput **Danske**, usvojen je koncept izgradnje **centralizovnih postrojenja** anarobne digestije.

Do ovih postrojenja otpadni materijal se transportuje sa različitih farmi, a često se i zajednički obradjuje sa industrijskim ili komunalnim organskim otpadnim materijalom. Uobičajeno je da mešavinu čini **75% organskog otpada sa farmi i 25% ostalog organskog otpada.**

Prema raspoloživim podacima u Danskoj je u radu 18 velikih centralizovanih postrojenja ovog tipa. Na centralizovanim postrojenjima se obradjuje otpad sa oko **600 farmi**. Kapaciteti ovih postrojenja su od **50 do 500 tona** otpadnog materijala na dan. **Ukupno oko 1 milion tona otpadnog materijala je obradjivano godišnje u 1996. godini.**

Veliki broj **postrojenja** anarobne digestije je izgradjen i u **Nemačkoj.**

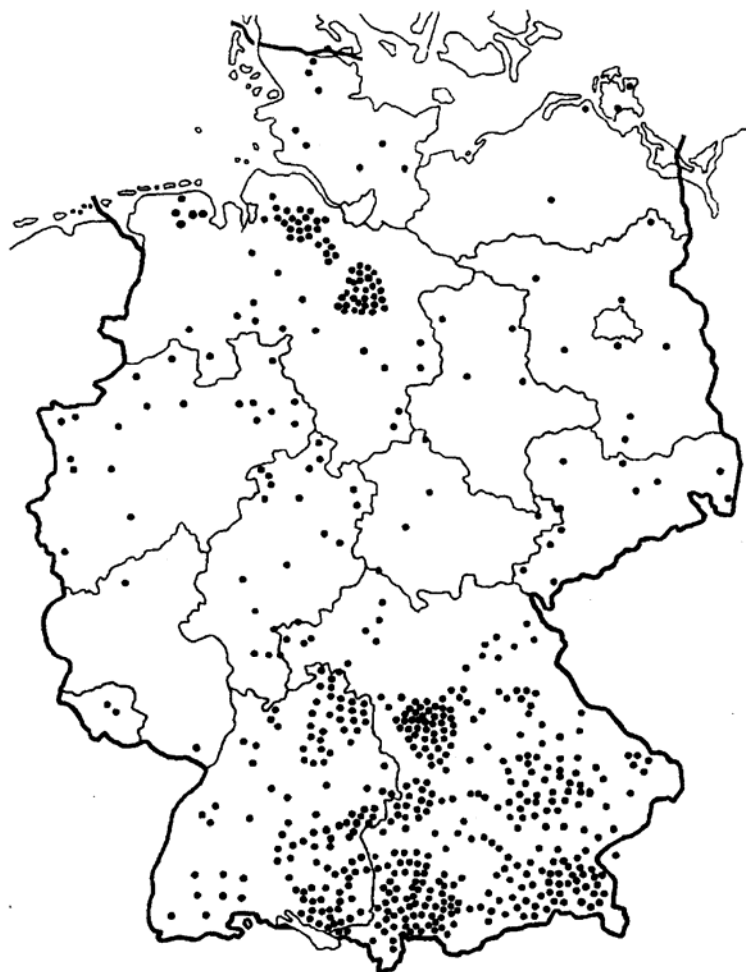
Ukupan broj ovih postrojenja, koji obrađuju poljoprivredni organski otpadni materijal, je **preko 800**. Od toga je oko **30 centralizovanih**.

Samo tokom 1998. godine izgradjeno je preko 150 novih postrojenja.

Na ovim postrojenjima **proizvodi se električna energija** koja se zatim distribuira u javnu mrežu. Prosečna instalirana električna snaga ovih postrojenja iznosi $60 \text{ kW}_{\text{el}}$, a njihova uobičajena produkcija $48 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Svi digestori proizvode oko **250 miliona m^3 gasa godišnje**.

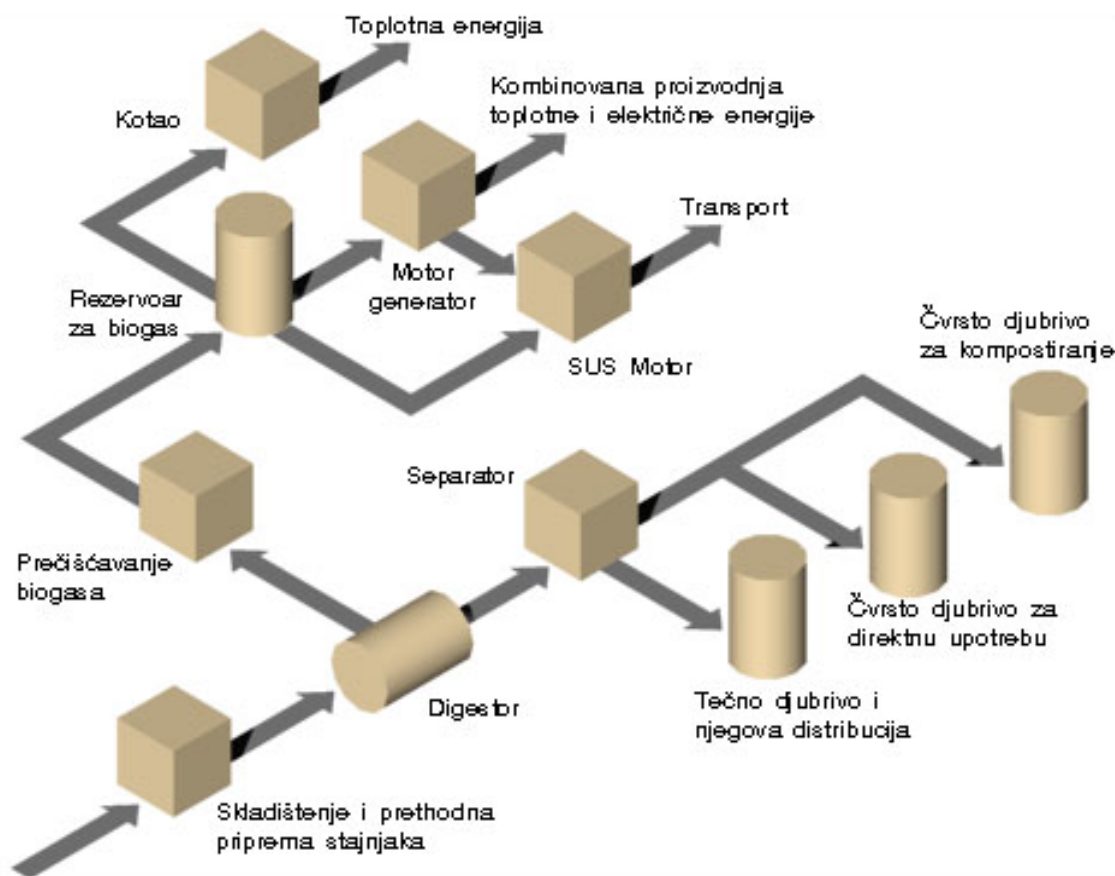
Lokacije **postrojenja** anarobne digestije u Nemačkoj su date na slici 7.



Slika 7. Poljoprivredna biogasna postrojenja u Nemačkoj

Pojedinačni kapacitet svakog od postrojenja je 200 do 500 kW_{el}. Digestorska postrojenja su zapremine od 100 do 500 m³, a izvestan broj postrojenja je zapremine od 1000 do 1500 m³.

Na slici 8 prikazana je opšta šema **postrojenja** anarobne digestije za preradu otpadnih voda sa farmi.



Slika 8. Opšta šema postrojenja anarobne digestije.

Primer postrojenja za anaerobnu obradu otpada sa farmi u Danskoj (firma Kruger)

Postrojenje **opslužuje 19 lokalnih farmi** sa kojih se dovozi stajnjak na obradu.

Proizvedeni biogas služi kao energent u kombinaciji sa prirodnim gasom. Goriva se koriste za pogon dve gasne turbine pri čemu u ukupnoj potrošnji svako gorivo učestvuje oko 50 %.

Postrojenje obezbedjuje **grejanje i električnu energiju za dva naselja sa oko 400 domaćinstava.**

Godišnja kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije iznosi: 8500 MWh električne energije kojom se snabdeva mreža, i 14000 MWh toplotne energije za gradsko grejanje.

Potrošnja toplote i električne energije za rad biogasnog postrojenja je određenim racionalizacijama snižena i iznosi oko **10 % od količine proizvedenog biogasa.**

Primenom **visokoefikasnih razmenjivača toplote** sastavljenih od tri modula moguće je vratiti od 60 do 90 % toplote dovedene za potrebe procesa u pasterizatoru i digestoru.

Osnovni tehnički podaci o postrojenju:

- početak rada: 1994.
- **kapacitet: 150 t/d** (mešanog stajnjaka i drugog organskog otpada),
- prijemni bazeni: 2 x 600 m³,
- rezervoari za pasterizaciju: 2 x 30 m³,
- **digestor: 3000 m³,**
- skladišni rezervoar: 1200 m³,
- skladišni prostor za gas: 2200 m³,
- **proizvodnja gasa: 6000 m³/d,**

- snaga za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije: max. 760 kW (električne energije) i 1214 kW (toplotne energije).

Način funkcionisanja gasnog rezervoara

Na vrhu skladišnog rezervoara, nalazi se skladišni prostor za gas zapremine 2200 m³. Ovaj prostor ima tri funkcije:

1. Prikupljanje biogasa proizvedenog u skladišnom rezervoaru (približno 5 % od ukupne proizvodnje biogasa). Na taj način su zadržani mirisi i sprečeni drugi uticaji na okolinu iz skladišnog rezervoara.
2. Biogas se skladišti u rezervoaru u periodu dana kada je povoljnije zaustaviti motor jer je tada niska cena električne energije. Gasni rezervoar može primiti gasnu produkciju za period od 8 sati.
3. Pomoću kontrolisanog uvođenja vazduha u gasni rezervoar, moguće je biohemijskim putem redukovati količinu vodonik-sulfida u biogasu ispod kritične granice tako da naknadni tretman nije neophodan.

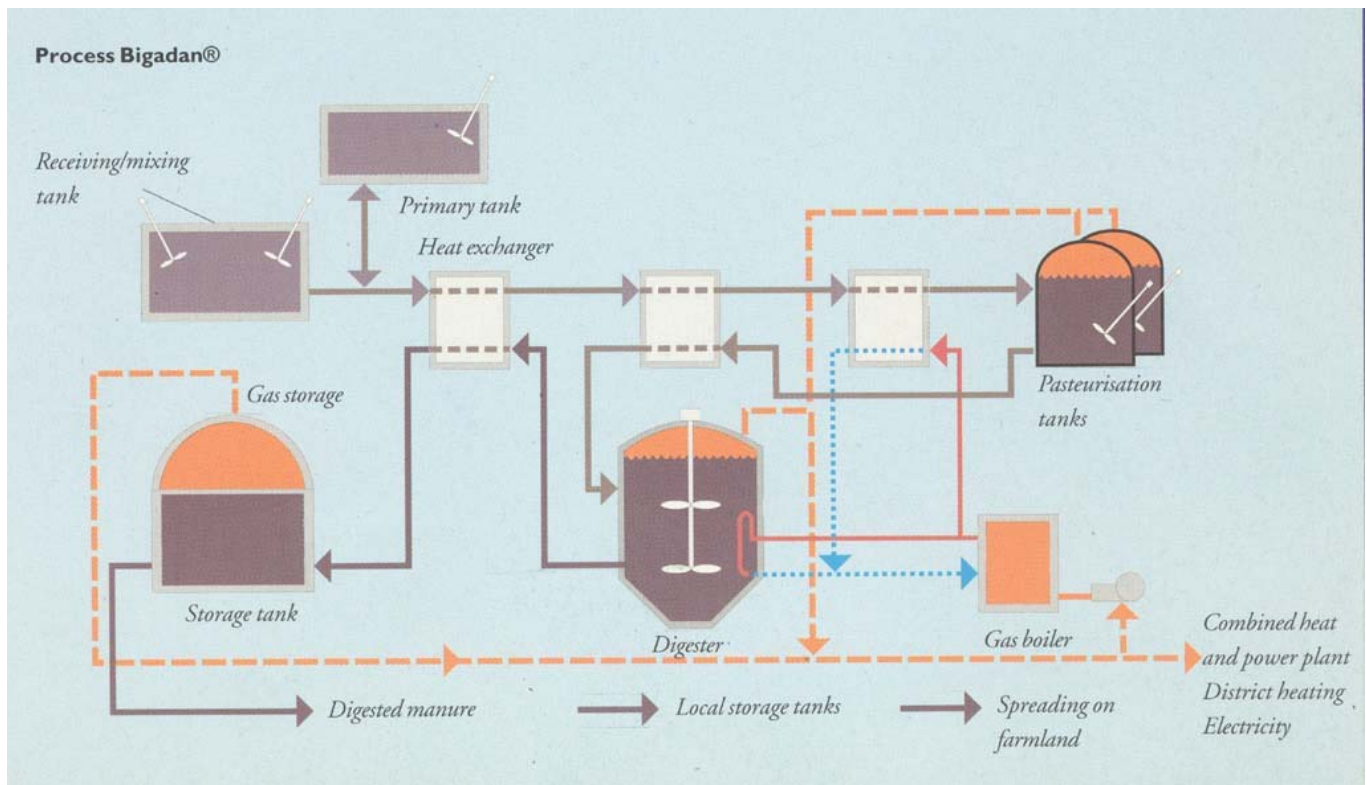
Dejstvo pasterizacije

Pre procesa digestije sva biomasa se toplotno tretira u periodu od 1 h pri temperaturi 70 °C.

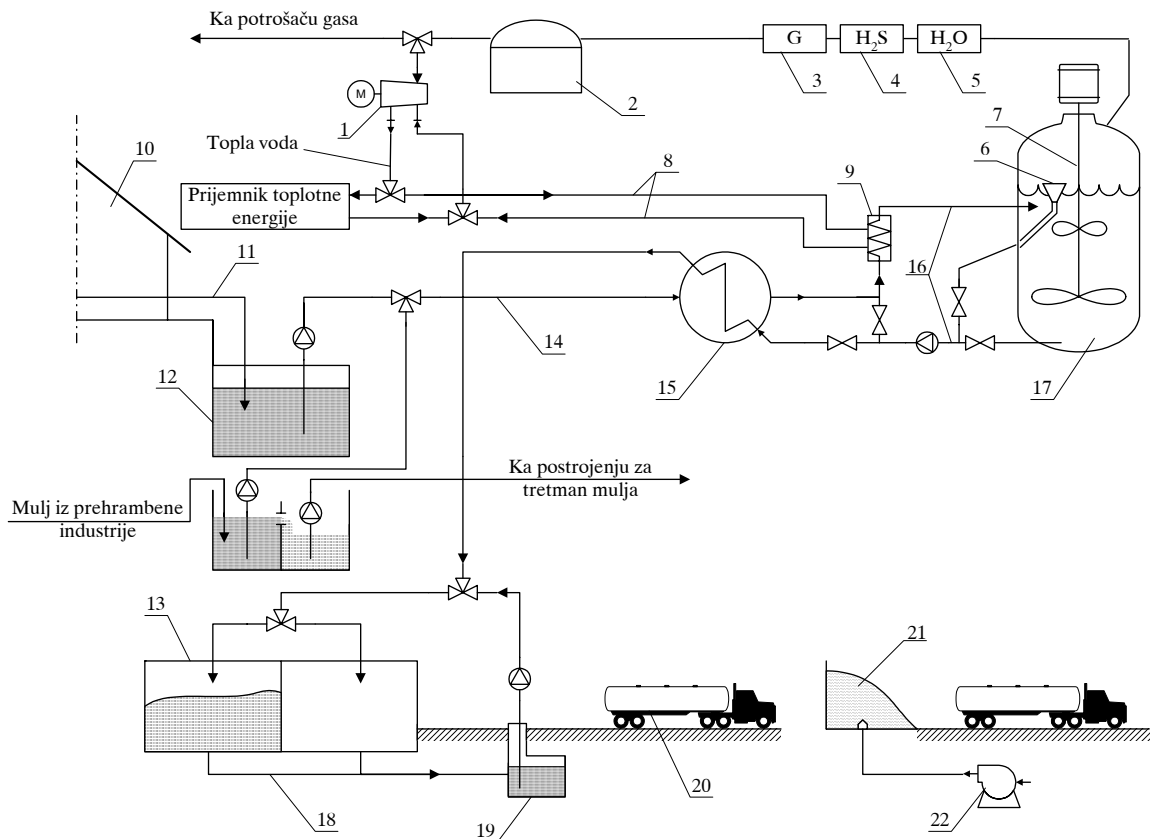
Ovaj tretman ima odredjenih prednosti:

1. Uništavanje svih nepoželjnih mikroorganizama što eliminiše rizik od infekcije,
2. Visoke temperature prouzrokuju razgradnju teško razgradljivih ugljenih hidrata koji se kasnije mnogo lakše transformišu u biogas u procesu digestije.

Firma Kruger je isporučila više od 20 biogasnih postrojenja za tretman stajnjaka, organskog industrijskog otpada i kućnog otpada. Takodje je konstruisala više od 100 digestora za stabilizaciju mulja u postrojenjima za tretman gradskog otpada.



Slika 9. Sema biogasnog postrojenja firme Kruger (proces Bigadan)

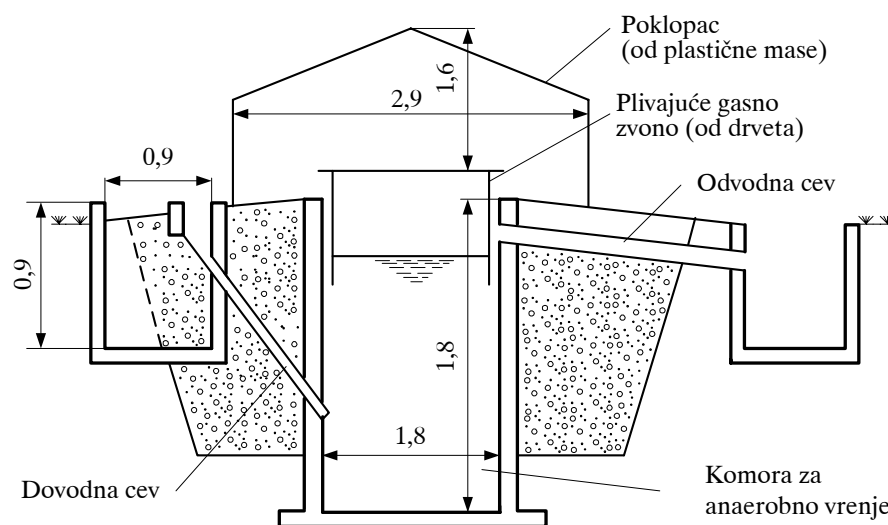


Slika 10. Šema postrojenja za obradu poljoprivrednog otpada

1–generator (380 V); 2–**rezervoar za biogas**; 3–gasometar; 4–izdvajanje H_2S ; 5–izdvajanje vlage; 6–prelivnik; 7–mešalica; 8–cevovod za vodu; 9–izmenjivač toplote: voda-stajanjak; 10–farma; 11–cevovod za transport stajanjaka; 12–prihvatni rezervoar; 13–rezervoar za otpadni stajnjak; 14–napojni cevovod; 15–izmenjivač toplote: stajnjak-stajnjak; 16–cevovod za mešanje; 17–**digester**; 18–drenaža (isušivanje otpadne mase); 19–refluksni rezervoar; 20–vozilo za odnošenje biođubriva; 21–skladištenje biođubriva; 22–ventilator

Konstruktivna rešenja anaerobnih digestora

Razvojem tehnologije prerade otpadnih voda poslednjih 25 godina usavršavane su i konstrukcije digestora. Na to su uticali razvijenost tehnike i tehnologije, energetike, energetske mreže i klimatski uslovi pojedinih zemalja u kojima su digestori najviše u primeni. Na nekoliko primera može se videti kako je tekao razvoj pojedinih konstrukcija digestora. Digestor prikazan na slici 11 predstavlja tipičnu konstrukciju takozvanog **azijskog digestora**, koji se gradi od betona i postavlja ispod površine zemlje.

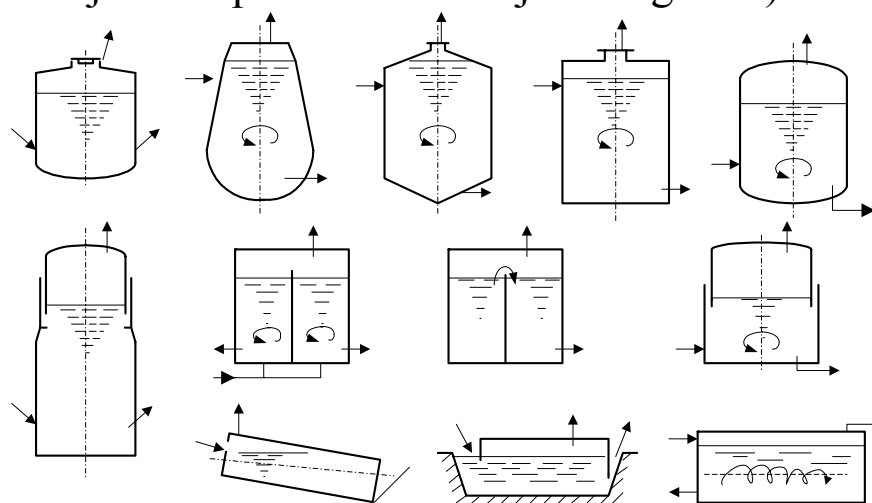


Slika 11. Presek biogasnog postrojenja jednostavne konstrukcije, koje je u primeni u Aziji (dimenzije su date u m)

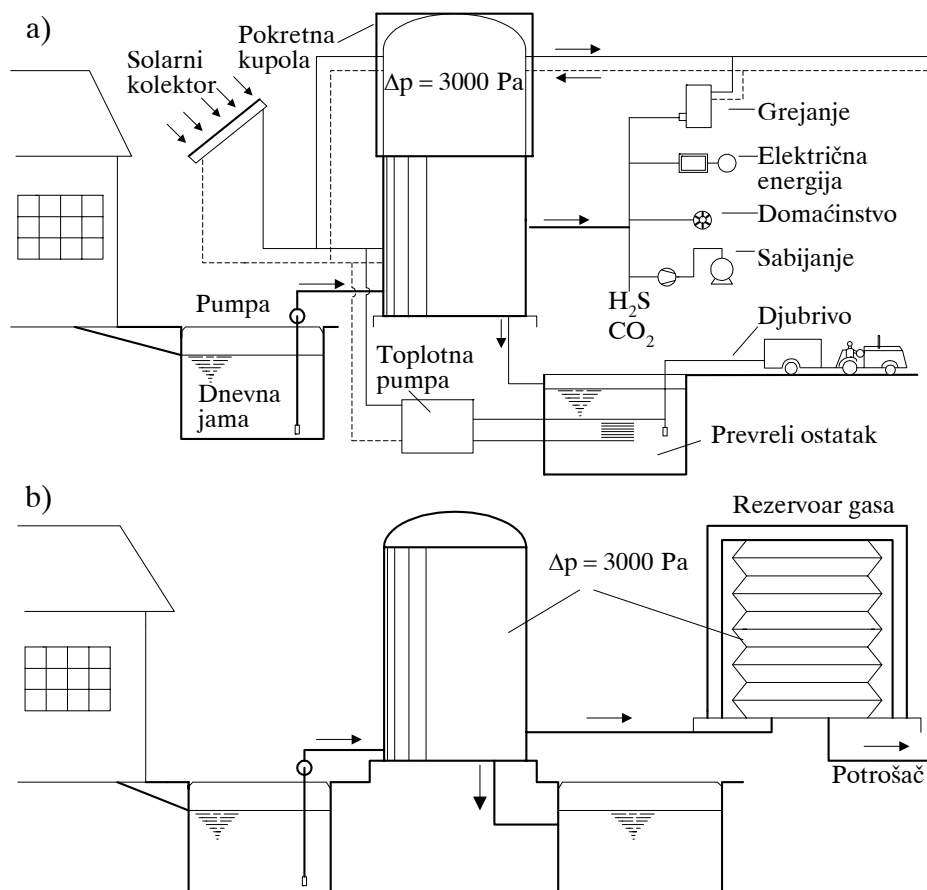
Osnovne karakteristike ovih digestora su: zapremina od 6 do 15 m³ (ređe do 20 m³), radni natpritisak od 0,5 do 2,0 kPa, radna temperatura od 8 do 25°C. Digestor ima pokretnu kupolu, što omogućava regulaciju pritiska unutar digestora i cevnih spojeva. Supstrat se u digestoru ne zagreva dodatno, njegova temperatura zavisi od temperature okolnog vazduha i tla, tako da je digestor u pogonu najviše devet meseci godišnje. Mešanje se vrši povremeno kroz otvor za punjenje i delom putem preliivanja supstrata preko pregrade unutar digestora.

Razvojem ili usavršavanjem azijskog tipa digestora, nastale su različite varijante konstrukcije digestora prikazane šematski na slici 12.

U Evropi su ređe konstrukcije digestora od betona koje se postavljaju podzemno. Digestori koji se postavljaju nadzemno grade se uglavnom od čeličnog lima. Na slici 13 prikazane su dve tipične vertikalne konstrukcije ovih digestora (sa pokretnom kupolom i bez nje). Osnovne karakteristike su rešeno mešanje, iskorišćenje toplote izlazećeg prevrelog ostatka, više mogućnosti zagrevanja, tj. održavanja temperature supstrata u digestoru, potpuna automatizacija procesa, radna zapremina do 2000 m³ i radni natpritisak do 3 kPa. Punjenje se vrši jednom ili dva puta dnevno, u zavisnosti od broja izđubriivanja u stajama, a za druge organske otpatke reguliše se prema raspoloživosti materijala. Grejanje u digestoru vrši se pomoću ugrađenih grejača kroz koje struji topla voda koja se dovodi iz gasnog kotla etažnog grejanja, gasnog bojlera ili solarnog kolektora. Gubici toplote u okolinu su minimalni zbog dobre izolacije (od staklene ili mineralne vune postavljene u oplati od aluminijumskog lima)



Slika 12. Šematski prikaz različitih konstrukcionih rešenja digestora



Slika 13. Šematski prikaz nadzemnog metalnog digestora; a) sa pokretnom kupolom, b) bez pokretne kupole sa posebnim rezervoarom biogasa

Na slici 14 prikazana je šema postrojenja za proizvodnju biogasa iz tečnog stajnjaka sa farme svinja. Sabirna jama (1) je cilindričnog oblika, izrađena od betona; ukopava se u zemlju i služi za prihvatanje svežeg tečnog stajnjaka. U sabirnoj jami se vrši dodatno razređivanje stajnjaka i njegova homogenizacija. Digestor (18) je cilindrični sud izrađen od nerđajućeg čelika i termički izolovan sa izolacijom od mineralne vune u oplati od aluminijumskih limova, čime se postiže smanjenje toplotnih gubitaka, odnosno sprečava hlađenje zagrejanog stajnjaka. Dno digestora je konusno, kako bi se omogućilo bolje izdvajanje nataloženih težih frakcija prevrelog stajnjaka. Digestor je opremljen odgovarajućim priključcima za: punjenje svežim

stajnjakom, ispuštanje prevrelog stajnjaka, uzorkovanje digestorskog sadržaja, cevnu zmiju (13), kontaktni termometar (6), pokazivač nivoa stajnjaka (12), odvod biogasa u rezervoar za biogas i mešalicu (9). Na cilindričnom delu digestora nalazi se revizioni otvor za čišćenje digestorskog prostora i cevne zmije.

Rezervoar za biogas (20) je cilindrični sud delom ispunjen vodom u koji je uronjeno čelično zvono koje služi kao skladišni prostor za sakupljanje biogasa. U zavisnosti od produkcije, odnosno potrošnje biogasa, menja se zapremina skladišnog prostora vertikalnim pomeranjem čeličnog zvona. Na čeličnom sudu rezervoara za biogas nalaze se priključci za dovod i odvod biogasa i ispuštanje vode. Na čeličnom zvonu nalazi se trokraka slavina (22) za uzorkovanje biogasa i manometar (21) za očitavanje natpritiska pod kojim se biogas nalazi. Ovaj natpritisk iznosi 0,03 bar i obezbeđuje se težinom čeličnog zvona. Na dnu rezervoara nalazi se električni grejač koji se povremeno uključuje zimi kako ne bi došlo do stvaranja leda. Cevovod za transport proizvedenog biogasa je priključen na gasnu baklju (26) koja služi za spaljivanje viška biogasa i predstavlja osigurač od izvrtnja zvona.

Biogas se sagoreva 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 fermentacije 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 postrojenja za dobijanje biogasa. 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 mezofilnog vrenja

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 vrenja. Uneta šarža održava se pri temperaturi mezofilnog vrenja 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 fermentacije u šaržnim uslovima je primarna proizvodnja mikroorganizama neophodnih za nastavak procesa fermentacije i proizvodnje biogasa u polukontinualnim uslovima rada postrojenja.

Po završenom procesu fermentacije 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.

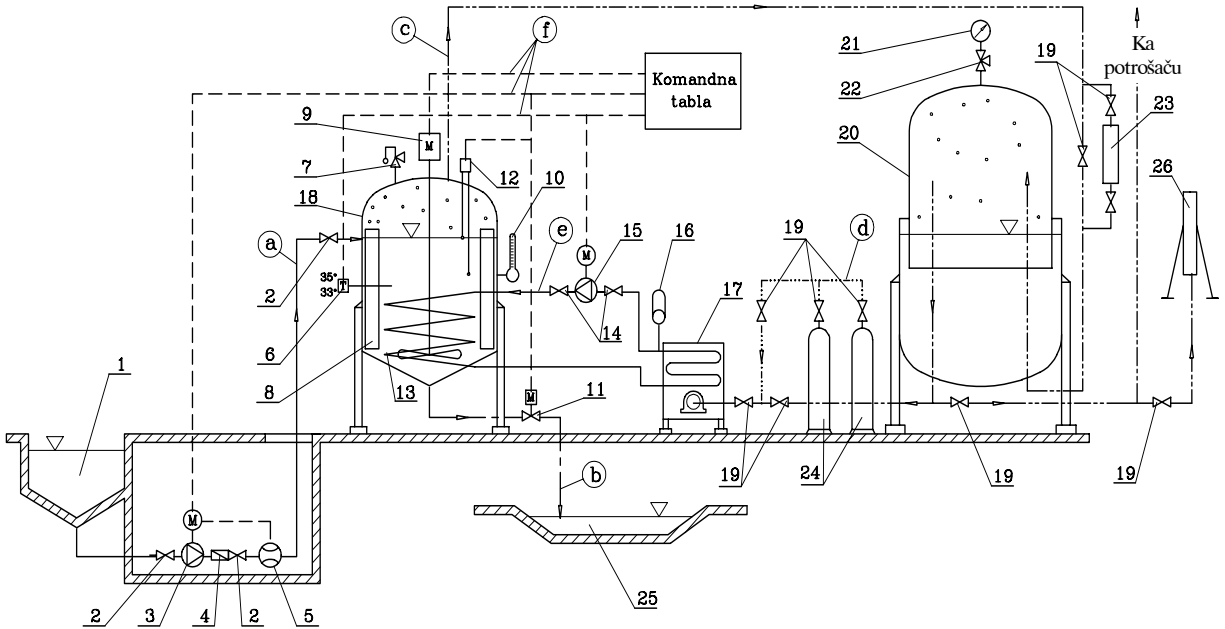
Posle završenog ciklusa punjenja i pražnjenja digestora uključuje se mešalica (9), čija je osnovna uloga homogenizacija tečnog stajnjaka, ujednačenje temperaturskog polja i razbijanje kore na površini stajnjaka. Mešanje se izvodi odmah posle završenog postupka izbacivanja prevrelog stajnjaka i još dva 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 Urazbijača 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).

Razvoj tehnike i tehnologije proizvodnje biogasa ide u pravcu skraćivanja vremena zadržavanja supstrata u digestoru. U tom pravcu razvijena su dva postupka:

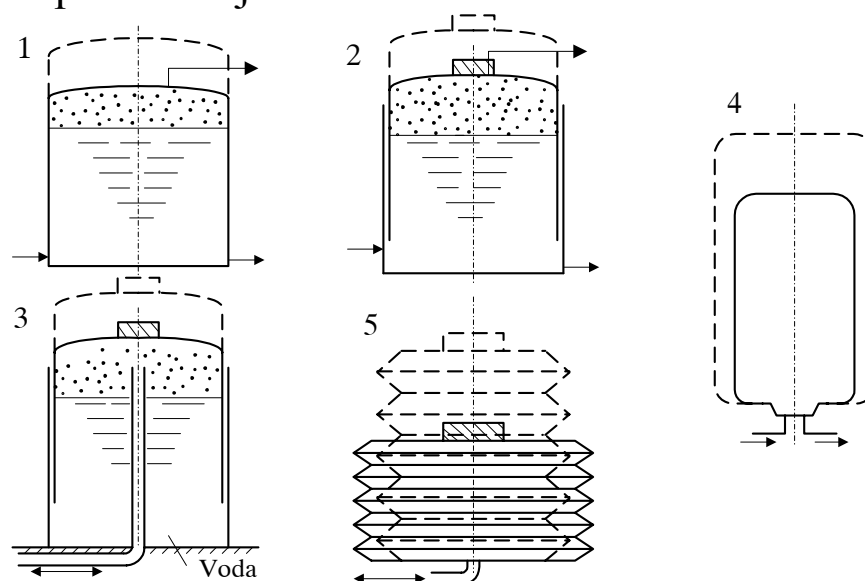
- postupak sa korišćenjem produktivnijih hibridnih metanskih bakterija (čime se skraćuje vreme zadržavanja za 10%, a povećava stepen razgradnje supstrata na 50-70%),
- postupak sa razdvojenim fazama vrenja u kome se dobija biogas sa visokim sadržajem metana od 80 do 85%, vreme zadržavanja supstrata od 4 do 6 dana i povećanje stepena razgradnje organske materije do 80-90 %.



Slika 14. Postrojenje za proizvodnju biogasa; 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 zmija, 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

Skladištenje biogasa

Proizvodnja i potrošnja biogasa kod jednog ili više potrošača ne mogu se tačno uskladiti pa je potrebno vršiti njegovo skladištenje. Primenjuje se tehnika niskopritisnog (do 0,3 bara) i visokopritisnog (od 40 do 200 bara) skladištenja. Načini niskopritisnog skladištenja biogasa prikazani su na slici 15. Ono se primenjuje u sistemu gde je potrošač povezan cevovodom sa digestorom, što omogućava amortizaciju neusklađenosti između potrošnje i proizvodnje.



Slika 15. Šeme konstrukcija rezervoara za niskopritisno skladištenje biogasa; 1 - povećan gasni prostor u digestoru, 2 - digestor sa pokretnom kupolom, 3 - poseban rezervoar (gazometar) sa pokretnom kupolom, 4 - rezervoar izrađen od gipkog plastičnog ili gumiranog materijala (sa regulacijom pritiska pomoću tereta), 5 - rezervoar izrađen od gipkog plastičnog ili gumiranog materijala (bez sopstvene regulacije pritiska biogasa)

Visokopritisno skladištenje vrši se pomoću različitih mobilnih posuda pod pritiskom (čeličnih boca). Tehnika visokopritisnog skladištenja primenjuje se u slučaju kada je mesto potrošnje udaljeno od postrojenja za proizvodnju biogasa.

Prečišćavanje biogasa

U zavisnosti od uslova primene, potrebno je biogas prečišćavati od određenih komponenata (vode, ugljen-dioksida, i vodonik-sulfida). Voda se odstranjuje bez obzira na dalju primenu biogasa, jer predstavlja smetnju za skladištenje u rezervoarima pod visokim pritiskom. Vodonik-sulfid je potrebno odstraniti u slučaju primene biogasa u motorima SUS, a smanjiti sadržaj u slučaju primene u gasnim kotlovima. Pošto je odstranjivanje vodonik-sulfida u potpunosti veoma skupo, prihvatljivo je da ga u biogasu ima do $1,1 \text{ g/m}^3$, što je maksimalno dozvoljena koncentracija kada se njegova korozivna svojstva još ne ispoljavaju.

Ugljen-dioksid se izdvaja iz biogasa kada je potrebno dobiti gas veće toplotne moći. Vlaga se iz biogasa izdvaja na kraju linije prečišćavanja, jer se u procesu prečišćavanja mokrim postupkom pojavljuje dodatna vlaga. Odstranjivanje vlage se najčešće vrši u ciklonskim i regenerativnim hemijskim odvajačima sa punjenjem silikagela.

Vodonik-sulfid se odvaja na više načina po suvom ili mokrom postupku. Mokri postupak se zasniva na rastvorljivosti vodonik-sulfida u vodi, odnosno odvija se tako što se biogas provodi kroz ovlaživače (tuševe) ili vodenu zapreku. Suvi postupak se odvija provođenjem biogasa kroz aparat ispunjen oksidom gvožđa sa kojim on formira gvožđe-sulfid. Gvožđe-sulfid se regeneriše produvanjem zagrejanog vazduha.

Ugljen-dioksid se u slučaju primene mokrog postupka za izdvajanje vodonik-sulfida izdvaja u istom uređaju, jer je i ugljen-dioksid rastvorljiv u vodi. Za bolje izdvajanje ugljen-dioksida umesto obične koristi se krečna voda.

U većim biogasnim postrojenjima, gde se proizvedeni biogas koristi za pogon dizel-električnog agregata, moguće je korišćenje Benfieldovog procesa za istovremeno apsorpciono odvajanje vodonik-sulfida i ugljen-dioksida. Kao apsorber u ovom procesu koristi se kalijum-karbonat. Ovaj postupak se

dosta primenjuje za prečišćavanje zemnog gasa, blizu bušotine, da vodonik-sulfid ne bi izazvao koroziju gasovoda.

Uslovi za konstruisanje digestorskih postrojenja

Za konstruisanje digestorskih postrojenja koriste se metodologija i tehnička regulativa (proračuni, propisi, normativi i standardi) koji se odnose na opremu i sudove pod pritiskom, sa uzimanjem u obzir specifičnosti vezanih za biogas. Za definisanje zapremine digestora polazni podaci su: broj dana hidrauličkog zadržavanja supstrata u digestoru, količina supstrata dnevnog punjenja, tip digestorske kupole (pokretna ili nepokretna).

Debljina zidova svih posuda i cevovoda u sastavu digestorskog postrojenja određuje se prema tehničkoj regulativi za posude pod pritiskom.

Zaptivanje na segmentima digestorskog postrojenja (između pokretne kupole i glavne digestorske posude, na priključcima mernih uređaja, na vratilu mešalice, na prirubnicama cevovoda) izvodi se raznim vrstama zaptivača od veštačkih materijala, gume, bakra, aluminijuma i itd. Rezervoari biogasa, za niskopritisno skladištenje izrađuju se od materijala otpornih na stvaranje elektrostatičkog napona.

Cevovodi biogasa za kraće deonice izrađuju se od veštačkih materijala, što obezbeđuje i zaštitu od pojave elektrostatičkog napona. Za cevnu armaturu najčešće se koriste kuglaste slavine sa teflonskim zaptivačima. Za punjenje digestora koriste se različite vrste pumpi, a kao najpouzdanije pokazale su se pužne i centrifugalne muljne pumpe (spoljašnje i potapajuće).

Sigurnosna oprema obuhvata uređaje za zaštitu od povećanja pritiska biogasa iznad dozvoljene vrednosti i sprečavanje povratka plamena kroz cevovod prema rezervoaru ili prema gasnom prostoru digestora.

Osnovni parametri koji se kontrolišu mernim instrumentima su nivo supstrata u digestoru, temperatura supstrata i pritisak biogasa u digestoru.

Primer proračuna dimenzija digestora

PRIMER 1

Za farmu kapaciteta $z = 100$ komada tovnih svinja predviđeno je da se tečni stajnjak prerađuje u digestoru - postrojenju za proizvodnju biogasa. Za definisani tečni način izđubriivanja maseni udeo organske suve materije (OSM) u tečnom stajnjaku je $g_{OSM} = 8\%$. Odrediti sledeće:

- a) dnevni maseni priliv organske suve materije i tečnog stajnjaka,
- b) zapreminu digestora sa fiksnim poklopcem koji ima zasebni rezervoar za smeštaj biogasa,
- c) prečnik i visinu digestora (za usvojeni odnos visine prema prečniku digestora $H/D_u = 2,2$),
- d) visinu koju će tečni stajnjak zauzeti u digestoru,
- e) dnevnu proizvodnju biogasa.

Polazni podaci za proračun su:

- prosečna masa jedne toвне svinje je $m_{ts} = 60$ kg,
- prosečan dnevni priliv tečnog stajnjaka (pri masenom udelu OSM od 11%) iznosi $m_{11} = 26$ kg/(dan·SJ),
- maseni udeo OSM u tečnom stajnjaku je $g_{OSM} = 8\%$,
- gustina tečnog stajnjaka je $\rho_{ts} = 1025$ kg/m³,
- procenjena masa OSM koja se unosi u digestor po stočnoj jedinici iznosi $m_{OSM} = 2,86$ kg OSM/(dan·SJ),
- preporučeno hidrauličko vreme zadržavanja je $\tau = 15$ dana,
- prosečan prinos biogasa iznosi $V_{BG} = 0,465$ m³/kg OSM (pri ostvarenom stepenu razgradnje OSM od 55%),
- faktor uvećanja zapremine digestora sa fiksnim poklopcem je $k = 1,2$.

Stočna jedinica (SJ) predstavlja životinju ili životinje mase 500 kg i koristi se kao mera pri definisanju količine tečnog stajnjaka i drugih veličina.

REŠENJE

a) Dnevni maseni priliv organske suve materije i tečnog stajnjaka

Faktor brojnosti je:

$$f_B = \frac{m_{ts}}{500} = 0.12 \frac{\text{SJ}}{1 \text{ kom.}}$$

Broj stočnih jedinica za $z = 100$ tovljenika iznosi:

$$z_{SJ} = z \cdot f_B = 100 \cdot 0.12 = 12 \text{ SJ}, \quad (1)$$

a ukupan dnevni maseni priliv organske suve materije (OSM):

$$\dot{m}_{OSM} = m_{OSM} \cdot z_{SJ} = 2.86 \cdot 12 = 34.32 \frac{\text{kg}}{\text{dan}}. \quad (2)$$

Dnevna masa tečnog stajnjaka po jednoj stočnoj jedinici sa masenim udelom OSM od 8% je:

$$m_8 = 11 \cdot \frac{m_{11}}{p} = 11 \cdot \frac{26}{8} = 35.75 \frac{\text{kg}}{\text{dan} \cdot \text{SJ}}, \quad (3)$$

odnosno izraženo u $\text{m}^3 / (\text{dan} \cdot \text{SJ})$:

$$V_{ts} = \frac{m_8}{\rho_{ts}} = \frac{35.75}{1025} = 0.035 \frac{\text{m}^3}{\text{dan} \cdot \text{SJ}}. \quad (4)$$

Ukupan dnevni zapreminski priliv tečnog stajnjaka je:

$$\dot{V}_{ts} = z_{SJ} \cdot V_{ts} = 12 \cdot 0.035 = 0.42 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}, \quad (5)$$

a ukupan dnevni maseni priliv tečnog stajnjaka je:

$$\dot{m}_{ts} = \dot{V}_{ts} \cdot \rho_{ts} = 0.42 \cdot 1025 = 430.5 \frac{\text{kg}}{\text{dan}}. \quad (6)$$

b) Zapremina digestora

Zapremina digestora je:

$$V_{\text{dig}} = k \cdot \dot{V}_{\text{ts}} \cdot \tau = 1.2 \cdot 0.42 \cdot 15 = 7.56 \text{ , m}^3. \quad (7)$$

Usvaja se zapremina $V_{\text{dig}} = 8 \text{ m}^3$.

c) Prečnik i visina digestora

Prečnik digestora za poznatu zapreminu izračunava se prema izrazu:

$$D_u = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{dig}}}{2.2 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 8}{2.2 \cdot \pi}} = 1.67 \text{ m,}$$

Usvaja se $D_u = 1700 \text{ mm}$.

Za $H = 2.2 \cdot D_u$ dobija se visina digestora $H = 2.2 \cdot 1700 = 3740 \text{ mm}$.

d) Visina tečnog stajnjaka u digestoru

Visina koju će tečni stajnjak zauzeti u digestoru računa se iz jednakosti zapremina:

$$\tau \cdot \dot{V}_{\text{ts}} = \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot h_{\text{ts}}, \quad (8)$$

$$h_{\text{ts}} = \frac{4 \cdot \tau \cdot \dot{V}_{\text{ts}}}{D_u^2} = \frac{4 \cdot 15 \cdot 0.42}{1.7^2 \cdot \pi} = 2.80 \text{ m.} \quad (9)$$

$h_{\text{ts}} = 2800 \text{ mm}$.

e) Dnevna proizvodnja biogasa

Prinos biogasa (po stočnoj jedinici i danu) je:

$$V'_{\text{BG}} = V_{\text{BG}} \cdot m_{\text{OSM}} = 0.425 \cdot 2.86 = 1.2155 \frac{\text{m}^3}{\text{dan} \cdot \text{SJ}}. \quad (10)$$

Dnevna proizvodnja biogasa je:

$$\dot{V}_{\text{BG}} = V'_{\text{BG}} \cdot z_{\text{SJ}} = 1.2155 \cdot 12 = 14.59 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}. \quad (11)$$

Literatura

- [1] **Berthouex, P., Rudd, D.:** *Strategy of Pollution Control*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
- [2] **Baader, W., Dohne, E., Brenndorfer, M.:** *Biogas in Theorie und Praxis*, prevod na ruski, Kolos, Moskva, 1982.
- [3] **Đulbić, M.:** *Biogas, dobijanje, korišćenje i gradnja uređaja*, Tehnička knjiga, Beograd, 1986.
- [4] **Đulbić, M.:** *Proizvodnja i korišćenje biogasa*, Procesna tehnika, Beograd, III, br. 2/1987, str. 47-57.
- [5] **Rehm, H. J., Reed, G., Schonborn, W.:** *Biotechnology, Vol. 8, Microbial Degradations*, VCH Verlagsgesellschaft, mbH, Weinheim, 1986.
- [6] **Baras, J., Knežić, L.:** *Obrada otpadnih voda*, II deo, Biološka obrada, Savez hemičara i tehnologa Srbije, Beograd, 1979.
- [7] **Синев, О. П.:** *Интенсификаци биологической очистки сточных вод*, Техника, Киев, 1983.
- [8] **Kuburović, M., Stanojević, M., Knežević, V.:** *Elementi projektovanja postrojenja za anaerobnu obradu otpadnog materijala*, Procesna tehnika, Beograd, X, br. 3-4/1994, str. 101-105.
- [9] **Venečanin, B., Čukić, V.:** *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.
- [10] **Knežević, V., Kuburović, M., Stanojević, M.:** *Aspekti izbora opreme i uređaja u postupku kompostiranja otpadaka*, Procesna tehnika, Beograd, XI, br. 3-4/1995, str. 170-175.
- [11] **Kuburović, M., Stanojević, M., Knežević, V.:** *Technical and exploitation aspects of waste treatment composting*, I Regional Symposium: Chemistry and the Environment, Vrnjačka Banja, 25-29.09. 1995, Conference Proceedings, Vol. II, pp. 799-802.
- [12] **Stefanović, G., Heckmann, S., Čojbašić, Lj.:** *Dobijanje biogasa iz organskog otpada*, Procesna tehnika, Beograd, XII, br. 3-4/1996, str. 281-285.
- [13] **Radosavljević, M.:** *Korišćenje biogasa za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije*, Procesna tehnika, Beograd, XII, br. 3-4/1996, str. 286-289.
- [14] **Kuburović, M., Petrov, A.:** *Zaštita životne sredine*, SMEITS i Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [15] **Voronjec, D., Dragojević, Ž., Grgurević, D., Perović, G.:** *Razvoj i optimizacija procesa proizvodnje biogasa na stočnim farmama*, studija, Institut "Kirilo Savić", str. 55, Beograd, 1987.
- [16] **Voronjec, D., Gabriel, D., Dragojević, Ž., Grgurević, D., Perović, G.,:** *Razvoj i optimizacija procesa proizvodnje biogasa na malim stočnim farmama*, studija, Institut "Kirilo Savić", Beograd, str. 145, 1987.
- [17] **M. Kuburović, M. Stanojević,** "Biotehnologija: procesi i oprema", Smeits, Beograd, 1997.
- [18] **Gerard Kiely,** Environmental engineering, Chapter thirteen, Anaerobic digestion and sludge treatment, McGraw-Hill, 1998.
- [19] **Ivoš, J., Krsnik, V., Kovačević, S.:** Korišćenje bioenergije u stočarstvu, časopis Veterinarska stanica br.4, 1982, str. 5-28.
- [20] **Desnica, D.:** Studija: Bio-plin, mogućnosti i praktična rešenja, Zagreb 1985.
- [21] **Sekulović, Z., Čosić, S., Stišović, S.:** Studija: Alternativne energije, Stručni časopis Energoprojekt, br.3, 1992. str.131-137.