



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**Loomsetest jäätmetest biogaasi tootmine, selle
eraldamine ja kasutamine**

Production, separation and use of biogas from livestock waste

KEEMIASTEHNOLÓGIA ÖPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Margarita Švarkova

Üliõpilaskood: 178328EDKR

Juhendaja: Larisa Grigorieva, PhD,
lektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"...." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

"...." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"...." 20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS

Mina Margarita Švarkova (sünnikuupäev: 19.02.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Loomsetest jäätmetest biogaasi tootmine, selle eraldamine ja kasutamine, mille juhendaja on Larisa Grigorieva,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Margarita Švarkova, 178328EDKR

Õppekava, peeriala: EDKR16/17 Keemiatehnoloogia

Juhendaja(d): lektor, PhD, Larisa Grigorieva, larisa.grigorieva@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Loomsetest jäätmetest boigaasi tootmine, selle eraldamine ja kasutamine*

(inglise keeles) Production, separation, and use of biogas from livestock waste.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida loomsetest jäätmetest biogaasi tootmist, eraldamist ja kasutamist.
2. Arvutada lambakasvatuseks membraanid ja kütuseelemendid.
3. Teha järeldus lõputöös pakutud loomsete jäätmete otstarbeka kasutamise kohta.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjandusandmete kogumine ja töötlemine. Kirjanduse ülevaate kirjutamine.	01.02- 01.03.21
2.	Vajalike arvutuste läbiviimine, tulemuste üldistamine.	02.03- 01.04.21
3.	Lõputöö vormistamine.	02.04- 05.05.21

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." 20.....a

Üliõpilane: Margarita Švarkova
/allkiri/ "....." 20.....a

Juhendaja: Larisa Grigorieva
/allkiri/ "....." 20.....a

Programmijuht: Antonina Zguro.....
/allkiri/ "....." 20.....a

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. TEOREETILINE OSA	9
1.1. Biogaas.....	9
1.2. Biogaasi tootmine.....	11
1.3. Biometaani ja süsihappegaasi eraldamise meetodid biogaasist	15
1.4. Biometaani ja CO ₂ rakendusvaldkonnad	19
1.5. Metaanil töötav kütuseelement	23
2. ARVUTUSLIK OSA.....	26
2.1. Bioreaktori konstruktiivne arvutus	27
2.2. Bioreaktori soojusarvutus	30
2.3. Membraanmoduli arvutamine biogaasi eraldamiseks CH ₄ -ks и CO ₂ -ks	36
JÄRELDUSED.....	44
KOKKUVÕTE	45
SUMMARY.....	46
KIRJANDUS.....	47

EESSÕNA

Selle lõputöö teema oli valitud autori ja juhendaja koostöö raames.

Biogaas on gaas, mis tekib biomassi metaanilise lagunemise teel tänu anaeroobsete bakterite tööle. See sisaldab metaani ja süsihappegaasi. Nendeks komponentideks lahutamine võib tagada rohkem kvalifitseeritud gaaside rakendusvaldkondi.

Lõputöös on vaadeldud sellised teemad nagu biogaasi saamine, eraldamine ja kasutamine. On tehtud bioreaktori konstruktiivne ja soojusarvutus.

Biogaasi lahutamiseks lamba elutegevuse saadustest CH₄-ks ja CO₂-ks kasutati ja arvutati ühte kaasaegsematest meetoditest – membraanmeetod.

Biogaasist eraldatud metaan võib olla nii heaks kütuseks kui ka kütuseelementide lähteaineks.

Autor tänab oma lõputöö juhendajat, PhD lektorit Larisa Grigorievat abi eest arvutusel ja informatsiooni kogumisel.

Võtmesõnad: biogaas, membraanpuhatus, rakenduskõrgharidus, lõputöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

DMEA – dimetüületanoolamiin

H_{m_{bp}} – madalaim biogaasi põlemissoojus

ka – kuivaine

KE – kütuseelement - seade, mis muundab kütuse oksüdeerumisel vabaneva energia vahetult elektrienergiaks.

MEA - monoetanoolamiin

Metaantank – terasest või raudbetoonist valmistatud mahuti, mida kasutatakse reoveepuhastusel tekkinud või muu orgaanikarikka sette (muda) araeroobseks kääritamiseks.

oka – orgaanilised kuivained

Q_{bgö} – biogaas ööpäevas

Reforming – kergete naftafraktsioonide termiline töötlemine enamasti detonatsioonikindla bensiini ja aromaatsete süsivesinikke saamiseks.

S_{tt} – saagis täielikul käärimisel

S_{mt} – saagis mittetäielikul käärimisel

VRA – vahelduva rõhuga adsorptsioon

SISSEJUHATUS

Biogaas tekib biomassi anaeroobse kääritamise tulemusena. See koosneb peamiselt metaanist, süsinikdioksiidist, väävelvesiniku, ammoniaagi ja lämmastikoksiidide lisanditest.

Tänu kõrgele metaanisisaldusele on biogaas kergesti süttiv ja seda saab kasutada sõidukite kütuse energiaallikana.

Biogaasijaam annab võimaluse korraldada põllumajandusettevõtte sõltumatut kütmist ja valgustust. See on eriti oluline kaugematest piirkondades, kus elektrivõrkude ja tsentraliseeritud kütte paigaldamine on majanduslikult ebasoodne. Sel juhul tagab biogaasijaam ettevõttele ja lähimale elamurajoonile valgust ja soojust. Samuti võimaldab biogaasi kasutamine oluliselt vähendada energiavarustuse ja jäätmete utiliseerimise kulusid.

Biogaasi põhikomponentide – biometaani ja CO₂ – eraldamiseks on palju meetodeid. Nende eraldamine annab võimaluse kasutada CH₄ ja CO₂ kvalifitseeritumalt.

Biometaan on puhas autokütus. Selle täielikul põlemisel moodustub ainult CO₂ ja veeaur. Samuti on selle põlemisel süsihappegaasi heide 25% madalam kui bensiini põletamisel. Bensiini ja diislikütuse põlemisel tekivad mürgine vingugaas, lämmastikoksiid, süsivesinikud ja tahm. Gaasil töötavad mootorid tekitavad vähem müra. Kuna gaasi transporditakse gaasijuhtme kaudu, langeb ära vajadus seda autotranspordiga tarnida. Vastavalt sellele väheneb veoauto ja raudteetranspordi koormus. See viib heitmete ja müra vähenemisele.

Töös on esitatud kirjanduslik ülevaade, milles vaadeldakse biogaasi tootmist ja toorainetüüpe, selle eraldamise meetodeid. Näidatud on biogaasi ja süsihappegaasi kasutusvaldkonnad. Arvutatud lambafarmidest biomassi ööpäevane kulu biogaasiks töötlemiseks, reaktori suurused ja maht. Koostatud on bioreaktori ööpäevase tootlikkuse soojusarvutus. Määratud on temperatuurirežiim, käärimise kestus ja bioreaktori laadimise tingimused. Arvutatud membraanmoodul eraldamaks biogaasi, mis sisaldab 70 mahu% metaani ja 30 mahu% süsihappegaasi. Esitatakse biogaasi membraanmeetodil puhastamise kolme võimaliku variandi arvutus.

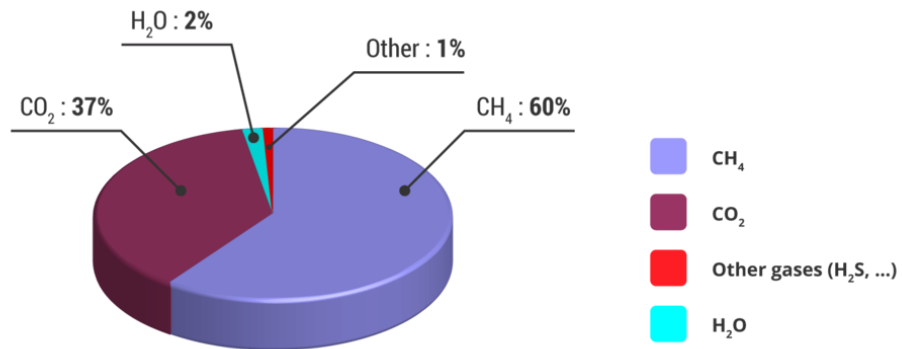
Arvutused võivad olla kasutatud biogaasi tootmise korraldamiseks lambafarmides, selle lahutamiseks CO₂ ja CH₄-ks ning nende kvalifitseeritumaks kasutamiseks.

1. TEOREETILINE OSA

1.1. Biogaas

Biogaas on põlev gaas, mis moodustub biomassi anaeroobsel kääritamisel. See koosneb peamiselt metaanist (55-75%), süsinikdioksiidist (25-45%), väävelvesiniku, ammoniaagi ja lämmastikoksiidide lisanditest (vähem kui 1%). [1]

Biogaasi keskmine koostis on esitatud joonisel 1.1

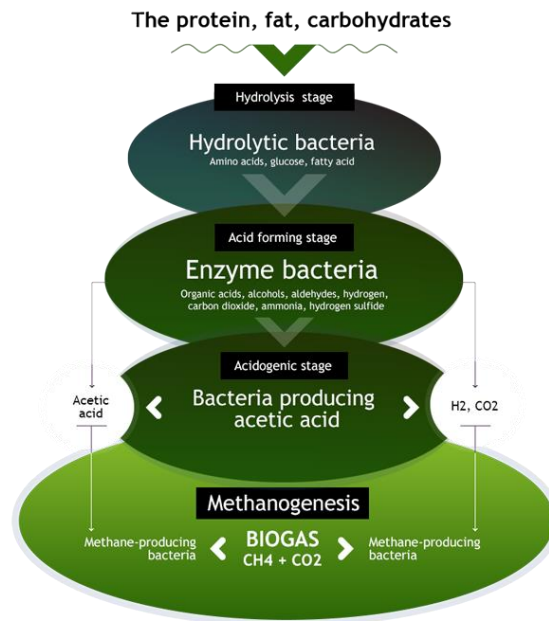


Joonis 1.1. Biogaasi koostis [2]

Tänu kõrgele metaanisisaldusele (tavaliselt 50–75%) on biogaas kergesti süttiv ja seda saab kasutada energiaallikana.

Orgaanilisest toorainest biogaasi tõhusa tootmise eesmärgil tuleb luua soodsad tingimused mitme tüüpi bakterite elutegevuseks hapniku puudumisel. [3]

Orgaaniliste toorainete anaeroobse kääritamise peamised faasid on esitatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Orgaaniliste ainete anaeroobse kääritamise peamised faasid [4]

Biomassi lagunemine toimub kolme peamise bakterirühma füüsikalis-keemiliste protsesside ja sümbiootilise aktiivsuse tulemusena. Mõne bakterirühma ainevahetusproduktid kindlas järjekorras on teiste rühmade toitaineteks.

Esimene rühm on hüdrolüütilised bakterid, teine - atsetogeensed ja kolmas - metaanogeensed.

Anaeroobse kääritamise peamised etapid:

1. Hüdrolüüsi faas. Hüdrolüüsi faasis lagundatakse stabiilsed ained (valgud, rasvad ja süsivesikud) lihtsateks komponentideks (aminohapped, glükoos, rasvhapped). [4]
2. Happemoodustumisfaas. Hüdrolüüsi faasis tekkinud lihtsad komponendid lagunevad orgaanilisteks hapeteks (äädik-, propioon-, võihape), alkoholiks, alkoholoksiidiks, vesinikuks, süsinikdioksiidiks ja gaasideks (ammoniaak ja väävelvesinik). See protsess jätkub seni, kuni moodustunud hapete mõjul bakterite areng aeglustub. [4]
3. Atsetogeenne faas. Atsetogeensete bakterite toimel moodustub happe moodustumise faasis äädikhape. [4]
4. Metanogeenes. Äädikhape laguneb metaaniks, süsinikdioksiidiks ja veeks. Vesinik ja süsinikdioksiid muunduvad metaaniks ja veeks. [4]

Biogaasi tootmise tooraineks võib olla lai spekter agrotööstuskompleksi orgaanilisi, tahkeid ja vedelaid jäätmeid, reoveed, puidutööstuse jäätmed ja tahked majapidamise jäätmed.

Jäätmete kvaliteeti iseloomustab niiskusesisaldus, biogaasi saagis kuivaineühiku kohta ja metaanisisaldus biogaasis.

Kaasaegsed tehnoloogiad võimaldavad töödelda mis tahes tüüpi orgaanilist toorainet biogaasiks. Biogaasitehnoloogiaid kasutatakse kõige tõhusamalt looma- ja linnukasvatuse-, agrotööstusettevõtete ning reovee puhastamiseks. [5]

1.2. Biogaasi tootmine

Biogaasi tootmiseks paigutatakse peenestatud ja niisutatud orgaanilised jäätmed reaktorisse, kus neid käärivad anaeroobsed (õhuga mitte kanduvad) bakterid. Metaanibakterite elujõulisus nõuab teatud tingimustest kinni pidamist: reaktoris on vaja säilitada sobiv temperatuur (40–70 °C), perioodiliselt segada toitainete segu, aidates bakteritel kogu reaktoriruumis levida. [6]

Mida peenemad on orgaanilise aine osakesed, seda hõlpsamini kulgeb käärimisprotsess. Seetõttu tuleb orgaaniline tooraine enne reaktorisse viimist peenestada homogeniseeritud olekuni (homogeniseerida). Ensüümide kasutamine hõlbustab töötlemist ja suurendab gaasi saagist. Kaasaegses biogaasi jaamas toodetakse ühest kilogrammist kuivtoorainest 350–500 liitrit biogaasi. [6]

Loomakasvatuse toorainete tüübid

Veiste sõnnik

Kuna metaani tootvad bakterid juba esinevad veiste maos, on see sõnnik biogaasi jaamades töötlemiseks kõige sobivamaks tooraineks. Veistesõnniku homogeensus võimaldab seda kasutada pideva kääritamise jaamades.

Sete ja kooriku vältimiseks segatakse värske sõnnik veega ja valitakse sellest seedimata põhk. Veiste uriin suurendab oluliselt toodetava biogaasi hulka. Seetõttu on soovitatav ehitada farmid betoonpõranda ja väljaheidete otsese veeäravooluga tooraine segamisnõusse.

Sea sõnnik

Õige konsistentsi saavutamiseks lahjendatakse seasõnnikut enne töötlemist veega. Järgmisena tuleb lahjendatud tooraine jätta segamisnõusse, et liiv settiks ja ei satuks reaktorisse. Reaktorisse sisenev liiv tuleb välja puhastada. Sigade pidamiseks ja hea tooraine saamiseks on vaja ehitada farmid betoonpõranda ja väljaheidete otsese veeäravooluga tooraine segamisnõusse.

Lamba- ja kitsesõnnik

Kitsefarm on ainsaks kohaks tooraine piisava hulga kogumiseks. Kuna kitsede ja lammaste pidamiseks kasutatakse aluspõhku, sisaldab tooraine sõnnikut ja põhku.

Sellist toorainet töödeldakse portsjonilise laadimisrežiimiga jaamades, kus sõnniku, vee ja põhu segu laaditakse ilma eelneva ettevalmistuseta. Lahjendatud tooraine jääb reaktorisse pikemaks ajaks kui puhas sõnnik.

Kana väljaheited

Selleks, et oleks võimalik kanasõnnikut kasutada, on linde vaja hoida puurides või paigaldada õrs sõnniku kogumisala kohal. Lindude põrandal hoidmise korral on väljaheites liiva, saepuru ja põhu sisaldus liiga kõrge.

Kanasõnnikut saab veisesõnnikuga hästi kombineerida ja sellega koos töödelda. Kodulindude puhta sõnniku kasutamisel on olemas kõrge ammoniaagi kontsentratsiooni oht.

Gaasi saagis ja metaanisisaldus

Tabelis 1.1 on näidatud biogaasi saagis kuivaine kilogrammi kohta erinevat tüüpi toorainete jaoks, samuti metaani sisaldus selles. Väärtused on määratud pärast 10–20 päeva kestnud kääritamist mesofiilsel temperatuuril. [7]

Tabel 1.1. Biogaasi saagis ja metaani sisaldus selles erinevat tüüpi toorainete kasutamisel [7]

Tooraine tüüp	Gaasi saagis, m³ kuivaine kg kohta	Metaani sisaldus, %
Veise sõnnik	0,250-0,340	65
Sea sõnnik	0,340-0,580	65-70
Linnusõnnik	0,310-0,620	60
Hobuse sõnnik	0,200-0,300	60-65
Lamba sõnnik	0,300-0,620	70

Biogaasi tootmise tooraine kvaliteedikarakteristikud

Niiskus

Antud näitaja iseloomustab biogaasi saagist ja metaani kontsentratsiooni. Tooraine soovitatav niiskusesisaldus on suveperioodil 91% ja talveperioodil 86%. [7]

Mikroorganismide aktiivsus

Kääritatavatest massidest biogaasi saamise eest vastutab mikroorganismide aktiivsus. Nende aktiivsuse suurendamiseks ja biogaasi maksimaalsete mahtude saamiseks tuleb hoida vajalikku substraadi viskoossust. Kui tooraine sisaldab kuivi, suuri ja tahkeid elemente, siis metaani kääritamise protsessid aeglustuvad. Selliste elementide juuresolekul võib moodustuda koor, mis viib substraadi kihistumiseni ja biogaasi

eraldumise peatumiseni. Selle vältimiseks enne tooraine laadimist bioreaktoritesse seda peenestatakse ja segatakse ettevaatlikult.

pH väärtus

Toorme optimaalne pH väärtus on 6,6–8,5. [7] pH tõstmiseks vajalikule tasemele sisestatakse doseeritult substraati purustatud marmorist valmistatud segu.

Maksimaalne biogaasi saagis

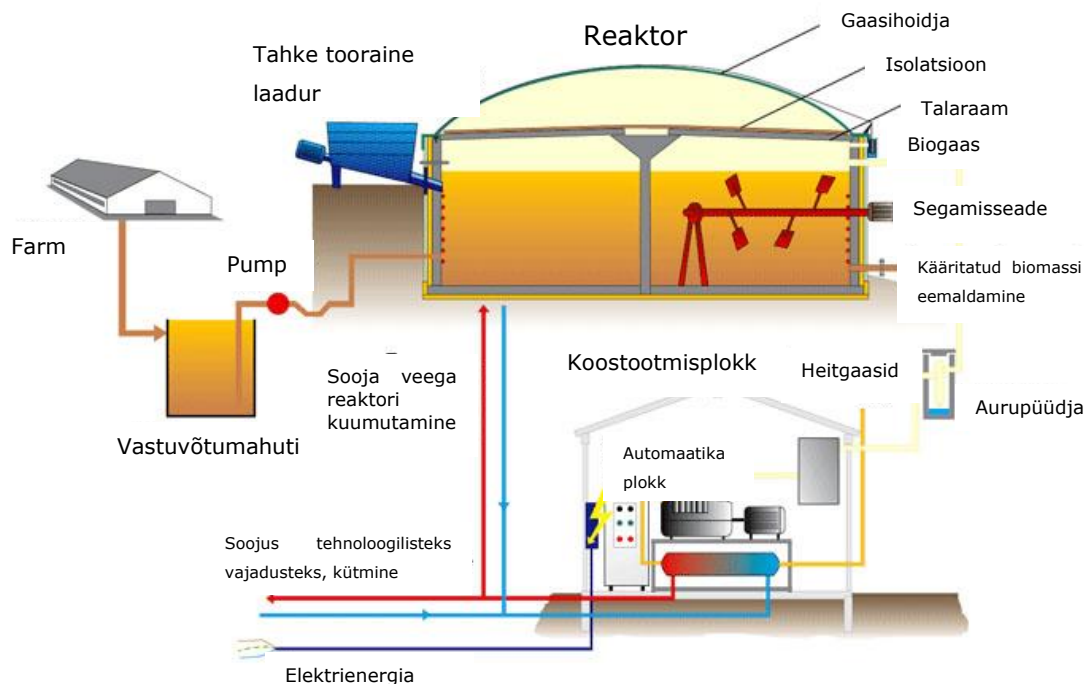
Substraadi kavitatsiooniga töötamise abil on biogaasi maksimaalse saagikuse tagamiseks lubatud segada erinevat tüüpi toorainet. Töödeldud biomassi optimaalne süsihappegaasi ja lämmastiku suhe on 8: 5.

Seetõttu on biogaasijaamade tooraine valimisel mõttekas pöörata suurt tähelepanu selle kvaliteedinäitajatele.

Biogaasi saamise tehnoloogia

Biogaasi saamiseks on vaja spetsiaalset seadet: biogaasijaama. Biogaasijaam on insenerkonstruktsioonide kompleks. See koosneb seadmetest ja mahutitest, mis on ette nähtud tooraine ladustamiseks ja ettevalmistamiseks, biogaasi tootmiseks, samuti selle kogumiseks ja puhastamiseks, selliste töötlemise kõrvalsaaduste nagu kuiv osa eraldamiseks. Seda kasutatakse kõrgkvaliteetsete mineraalväetiste ja vee tootmiseks. Elektri tootmiseks võib biogaasijaam olla kombineeritud mini-gaasiturbiini või muud tüüpi generaatoriga. Mitte ainult elektri-, vaid ka soojusenergia tootmise eesmärgil biogaasijaama varustatakse koostootmisüksustega.

Biogaasi tootmise tehnoloogia on skemaatiliselt kujutatud joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Biogaasi tootmise tehnoloogia [8]

Biogaasi tootmine toimub spetsiaalsetes kääritites. Kääritid on korrosioonikindlad silindrilised hermeetilised tsisternid. Nendes toimub käärimisprotsess. Enne tooraine käärititesse sisestamist laaditakse see vastuvõtumahutisse. Seal segatakse tooraine veega spetsiaalse pumba abil ühtlase olekuni. Seejärel viiakse ettevalmistatud tooraine vastuvõtjast käärititesse. Seejuures segamisprotsess ei peatu ja jätkub seni, kuni vastuvõtumahutis pole midagi järele jäänud. Seejärel seiskub pump automaatselt. Pärast kääritamisprotsessi alustamist hakkab eralduma biogaas, mis juhitakse spetsiaalsete torude kaudu läheduses asuvasse gaashoidlasse. [8]

Ohutusnõuete kohaselt asub bioreaktor eraldi ruumis. Biogaasi tootmisel on vaja pidevalt hoida temperatuuri 30-50°C.[8] Biogaasi saamise tehnoloogia nõuab kääritatavate ainete segu perioodilist segamist. [8] See takistab nende kihistumist ja käärimisprotsessi peatumist. [8] Suured tükid kääritamiseks ettevalmistatud tooraines tuleb peenestada. Suured tükid aeglustavad metaani eraldumise kiirust, pidurdades seeläbi tehnilist protsessi.

Saadud biogaasi saab põletada tööstuslike kasvuhoonete, farmipidamiste jms kütmiseks.

Biogaasijaam on tavaliselt varustatud lisamoodulitega. Seetõttu on metaani tootmine biogaasist praktiliselt jäätmetevaba. Spetsiaalne puhastussüsteem võimaldab eemaldada metaanist süsihappegaasi, mis on samuti väärtuslik tööstusprodukt. Pärast kääritamist jäänud jäätmeid kasutatakse ökoloogiliselt puhaste mineraalväetiste

tootmiseks. Kui biogaasijaam on ühendatud koostootmisploriga, saab lisaks soojusele toota ka puhast elektrienergiat. [8]

1.3. Biometaani ja süsihappegaasi eraldamise meetodid biogaasist

Süsihappegaas on peamine komponent, mida tuleb biogaasist eraldada, eesmärgiga suurendada metaani kontsentratsiooni. Lisaks puhastatakse biogaas sellistest lisanditest nagu H₂S, niiskus, siloksaanid. [9]

Biogaasi kütteväärtus suureneb biogaasist CO₂ eemaldamisega.

CO₂, H₂S ja lisandite eemaldamist biogaasist nimetatakse tavaliselt väärimiseks. Biogaasi väärimine parandab kvaliteeti gaasil, mis peab sisaldama üle 88% CH₄. [9] Selle termiline efektiivsus suureneb. Seda saab kasutada gaasivõrkudes ja transpordivahendites.

Peamised biogaasi väärimiseks kasutatavad tehnoloogiad on sorptsioon-, filtreerimis- ja krüogeensed meetodid. On olemas kuus peamist tehnoloogiat:

- Vahelduva rõhuga adsorptsioon (VRA)
- Absorptsioon veega (veega skraber)
- Füüsikaline absorptsioon orgaaniliste sorbentidega
- Keemiline absorptsioon orgaaniliste sorbentidega
- Membraaneraldus
- Krüoogeenne eraldamine.

Vahelduva rõhuga adsorptsioon (VRA)

VRA meetodi olemus seisneb CO₂ molekulide sorptsioonis materjalide pinnal biogaasi suurendatud rõhul. Sorbeerivate materjalidena kasutatakse tavaliselt aktiivsütt ja molekulaarsõelu. Protsessis eemaldatakse samuti O₂ ja N₂. Materjalide regenereerimine toimub desorptsiooni teel rõhu alandamisel. Antud meetodi korral eemaldatakse niiskus ja H₂S eelneval etapil. [9]

Seadme plussid:

- lähtegaas võib sisaldada saasteaineid.

Puudused:

- madalam metaanisaldus kui füüsikalise absorptsiooni korral;
- keeruline reguleerimine.

Absorptsioon veega (veega skraber)

Metaani lahustuvus vees on 25 korda väiksem kui süsihappegaasi lahustuvus ja 74 korda väiksem kui väävelvesiniku lahustuvus. [9] See füüsikaline omadus on antud gaaside eraldamise meetodi aluseks. Absorptsioon toimub veega skraberis kuni 5–10 baari kõrgendatud rõhul. [9] CO₂ ja H₂S desorptsioon veest toimub siis, kui rõhk langeb atmosfäärirõhuni. Desorptsiooni tõhustamiseks kasutatakse gaaside ülepuhumist õhuga. [9] Selleks, et vältida bioloogilist kasvu puhastusjaama veeringluse süsteemis, soovitatakse väävelvesinik eemaldada juba eelstaadiumis. Pärast rikastusstaadiumi eemaldatakse veeaur. Tehnoloogia eripäraks on pärast õhuga ülepuhumist koos veega biometaani sattuva hapniku sisalduse kontrollimine.

Kolonnist väljuv vedelik on rikastatud süsinikdioksiidiga ja gaasiks on CH₄.

Füüsikaline absorptsioon on kõige levinum viis biogaasi kvaliteedi parandamiseks.

Protsessi käigus on võimalik saavutada metaanisaldust 98%. [9] Kuid väävlit sisaldavad ained on samuti vees lahustuvad.

Eeliseks on gaasi puhastamise lihtsus.

Puudused:

- suur kogus vett;
- metaani heide atmosfääri;
- korrosioon;
- järgnev järelpuhastus.

Füüsikaline absorptsioon orgaaniliste sorbentidega

Mõned orgaanilised ained suudavad CO₂ ja H₂S-i aktiivsemalt neelata. Sellise sorbendina kasutatakse tavaliselt polüetüleenglükooli (näiteks kaubamärgid Selexol ja Genosorb). Peamised protsessid kulgevad antud juhul analoogselt veega skraberite tehnoloogiaga. Väävelvesinik soovitatakse eemaldada eelneval etapil, kuna orgaanilise sorbendi regenereerimine nõuab selle eemaldamiseks märkimisväärset energia kogust. [9]

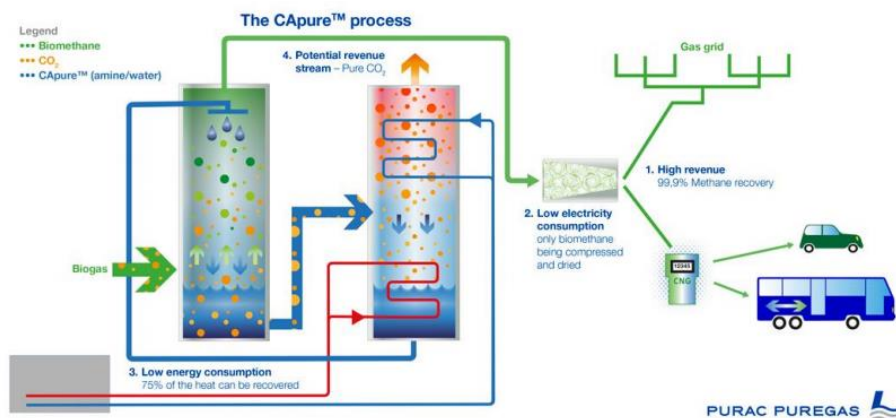
Eelis:

- kõrge metaanisaldus.

Puudused:

- seadme kõrge hind;
- suur töövedeliku kulu, vajadus selle uuendamise järele.

Puhastusseadme tööpõhimõtte on näidatud joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Absorptsioon puhastuse põhimõtte skeem [10]

Keemiline puhastus

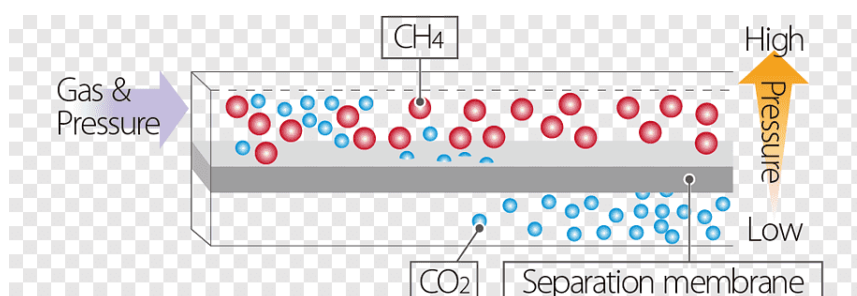
Biogaas pestakse amiinide lahustega. Kõigepealt süsihappegaas absorbeerub ja seejärel reageerib amiinidega. Keemiliseks pesemiseks kasutatakse monoetanoolamiini (MEA) ja dimetüületanoolamiini (DMEA).

Metaani kadu ei ületa 0,1%. [9] Osa lahusest aurustub ja seda asendatakse. Süsihappegaasiga reageerinud amiinilahus regenereeritakse kuumutamise abil. Siis on lahusti regenereerimiseks vaja rohkem soojust. Seetõttu eemaldatakse väävelvesinik enne pesemist. Meetodi kasutamine on suhteliselt kalline, kuid biogaasi puhastamise aste on kõrge. Kasutatavad kemikaalid nõuavad rangeid käitlemisreegleid ja nõudeid.

Biogaasi membraanpuhastus

Gaaside membraanpuhastus on tehnoloogia, mis kasutab gaaside filtreerimise põhimõtet spetsiaalsete membraanide kaudu. Gaaside membraanpuhastusseade sisaldab membraanmoodulite ploki, millest ettevalmistatud gaas puhutakse läbi. Pärast seda tarnitakse see tarbijale või pumbatakse reservuaari.

Membraanpuhastuse skeem on näidatud joonisel 1.5.



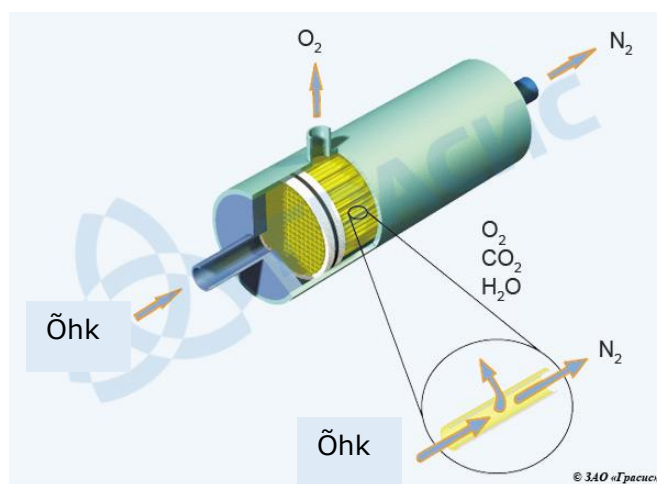
Joonis 1.5. Biogaasi membraanpuhastuse skeem [11]

Gaaside membraanpuhastuse tehnoloogiate jaoks kasutatakse kaasaegset õõneskiud membraani. See koosneb poorsast polümeerkiust. Selle välispinnale on kantud gaaside

eralduskiht. Poorne kiud omab keerulist asümmeetrilist struktuuri. Lähenedes kiu välispinnale polümeeri tihedus suureneb. Asümmeetrilise struktuuriga poorsete kandjate kasutamine võimaldab eraldada gaase kõrgetel rõhkudel (kuni 6,5 MPa). [12]

Gaasieralduskiu kihi paksus ei ületa 0,1 μm . [12] See tagab gaaside kõrge eriläbilaskvuse läbi polümeermembraani. Olemasolev tehnoloogia arengu tase lubab toota polümeere, mis omavad kõrget selektiivsust erinevate gaaside eraldamisel. Seega tagatakse gaasiliste saaduste kõrge puhtusastme. Kaasaegne membraanmoodul koosneb vahetatavast membraankassetist ja korpusest. Kasseti kiudude pakkimistihedus ulatub väärtusteni 3000–3500 ruutmeetrit kiudu ühe kuupmeetri kasseti kohta. [12] See võimaldab gaaside eraldusseadmete mõõtmeid minimeerida.

Gaaside eraldusmooduli skemaatiline kujutis on esitatud joonisel 1.6.

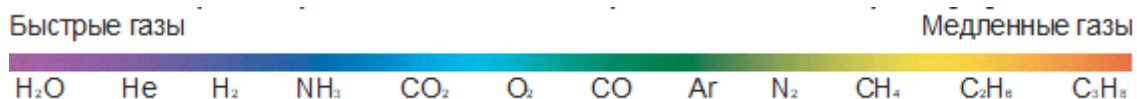


Joonis 1.6. Gaaside eraldusmoodulite skemaatiline kujutis [12]

Mooduli korpuses on üks harutoru lähtegaasisegu sisestamiseks ja kaks harutoru eraldatud komponentide väljumiseks. [12]

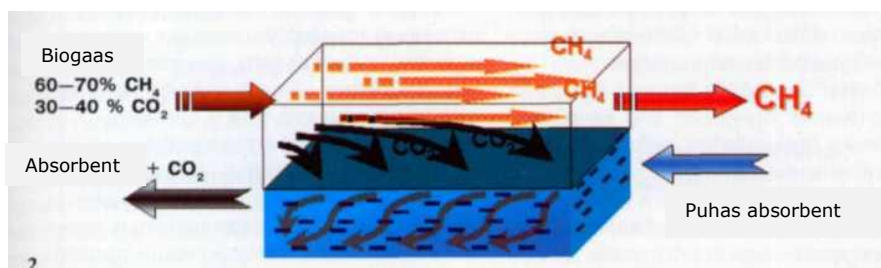
Segu eraldamine membraantehnoloogia abil toimub õõneskiudmembraani välis- ja sisepindade partsiaalrõhkude erinevuse arvelt. Gaasid, mis tungivad läbi polümeermembraani „kiiresti“ (näiteks H_2 , CO_2 , O_2 , veeaur, kõrgemad süsivesinikud), sisenevad kiududesse ja väljuvad membraanikassetist ühe väljalasketoru kaudu. Gaasid, mis tungivad läbi membraani "aeglaselt" (nt CO , N_2 , CH_4), lahkuvad membraanmoodulist teise väljalasketoru kaudu. [12]

Joonisel 1.7 on näidatud gaaside membraanide läbitungimise kiirus. Antud skeemi abil saab määrata gaasisegu eraldamise lihtsuse. Metaan ja süsihappegaas asuvad üksteisest piisaval kaugusel. See viitab sellele, et neil on märkimisväärne erinevus membraani läbitungimise kiiruses. Seetõttu on sellist segu lihtne eraldada.



Joonis 1.7. Gaaside membraanide läbitungimise kiirus [12]

Antud meetodit saab kombineerida absorptsiooni eraldamise meetodiga (joonis 1.8). Sellised seadmed tagavad tootlikkuse 50 m³/h. [9]



Joonis 1.8. CH₄ ja CO₂ eraldamine absorptsiooni- ja membraanpuhatusmeetoditega [13]

Suru- või vedelgaasi võib kasutada transpordivahendites kütusena.

Membraanpuhastamist kasutatakse biogaasi väärindamiseks selle madalama energiatarbimise, hea selektiivsuse, hõlpsasti konstrueeritavad moodulite ja seega madalamate kulude tõttu. Antud eraldusmeetodi abil on võimalik saavutada kõrget CH₄ eraldamise efektiivsust (>96%). Samal ajal sellega saadakse puhas CO₂. Membraaneralduse peamiseks puuduseks on see, et kõrge puhtuse saavutamiseks on vaja palju etappe.

Membraantehnoloogia eelised:

- autonoomia;
- töökindlus;
- konkurentsivõimeline hind;
- töö ja hoolduse lihtsus;
- kompaktsus;
- ökoloogiline puhtus;
- tule- ja plahvatusohutus;
- saab kasutada vesiniku eraldamiseks, mis on viimasel ajal üha enam nõutud, sh. madalsüsiniku energeetikas kütusena.

1.4. Biometaani ja CO₂ rakendusvaldkonnad

Biometaan saadakse looduslike materjalide bioloogilisel lagunemisel. Biometaani põhikomponent on metaan. Selle põlemisel vabaneb energia. Seega on soojuselektrijaama abil võimalik biometaanist toota elektri- ja soojusenergiat.

Puhastatud biometaani kasutatakse mootorikütusena või suunatakse üldisesse maagaasivõrku. Samuti biometaani võib segada maagaasiga. [14]

Biometaan on väga puhas autokütus. Selle täielikul põlemisel moodustuvad ainult CO₂ ja veeaur. Süsihappegaasi heide on 25% madalam kui bensiini põletamisel. [15] Bensiini ja diislikütuse põletamisel tekib mürgine vingugaas, lämmastikoksiid, süsivesinikud ja tahm. Gaasil töötavad mootorid tekitavad vähem müra. Kuna gaasi transporditakse gaasijuhtme kaudu, langeb ära vajadus seda autotranspordi abil tarnida. Vastavalt sellele väheneb veoauto ja raudteetranspordi koormus. Selle tulemuseks on heitmete ja müra vähenemine. [15]

Kui kasutada kütusena surugaasi, on kilomeetri maksumus umbes kaks korda madalam kui tavakütuse kasutamisel.

Biogaasi kasutamise peamised suunad ja maailma liidrid

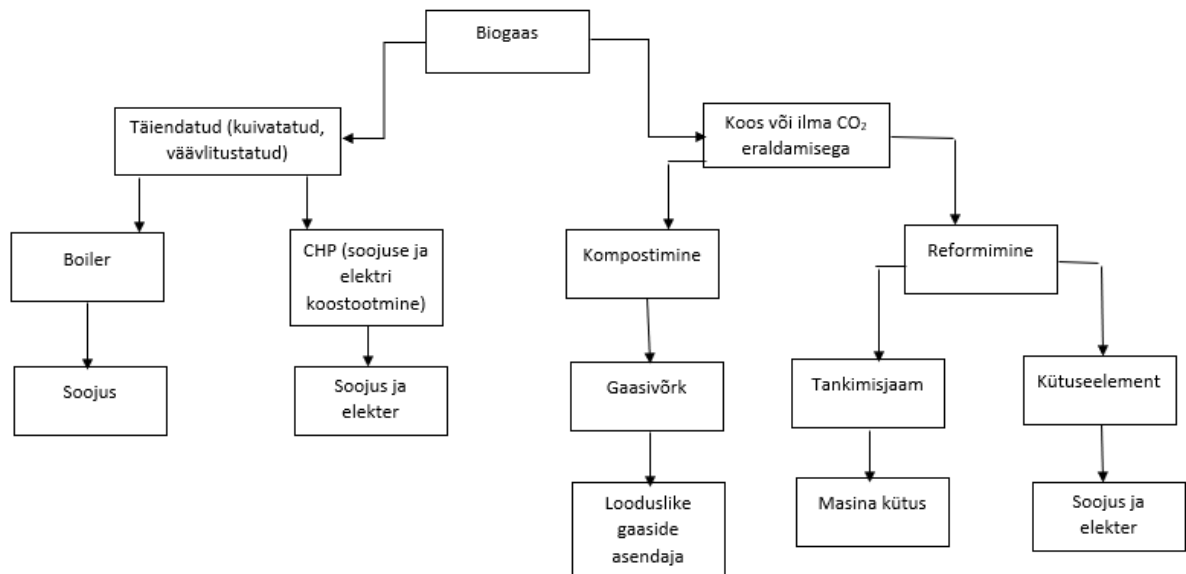
Küllaltki kõrge metaanisaldus biogaasis, selle kõrge kütteväärtus tagavad laia biogaasi kasutusspektri. Biogaasi energia kasutamise seisukohast võib eristada järgmisi põhisuundi:

- oma energiavajaduse katmine (aasta kõige külmemal perioodil kasutatakse jaama energiaga varustamiseks peaaegu kogu biogaasi potentsiaali);
- kütusena kuuma vee või auru saamiseks puhastusrajatiste või põllumajandustootmise tehnoloogiliste vajaduste katmiseks;
- kääritatud sademe kuivatamine;
- kütusena sooja õhu või kuumade gaaside saamisel põllumajandussaaduste kuivatamisel, põllumajandushoonete kütmisel;
- taimede küte ja lisaõõtmine kasvuhoonetes süsihappegaasiga;
- raske kütteõli asendamine jäätmete termilisel;
- transpordivahendite mootorite kütusena;
- elektrienergia tootmine;
- maagaasivõrkude koosseisus.

Nii karburaator- kui ka diiselmootorid võivad töötada metaanil. Metaan on kõrge oktaanarvuga kütus, seega on seda efektiivsem kasutada diiselmootorites.

Peale biogaasi saamist põllumajandusettevõtetes kasutatakse töödeldud sõnnikut väetisena. Sõnniku metaankääritamine tagab selle desodoreerimise, dehelmintiseerimise, umbrohuseemnete idanemisvõime rikkumise, väetiste viimise mineraalsesse vormi, mis on taimede poolt kergesti omastatav. Samal ajal ei lähe toitained (taimede jaoks) - lämmastik, fosfor ja kaalium - praktiliselt kaduma.

Joonisel 1.9 on näidatud biogaasi kasutusvaldkonnad. Soojuse ja elektrienergia tootmiseks kasutatakse kütuseelemente. Kuna biogaasi põhikomponent on metaan, käsitleme allpool lühidalt metaani kasutatavate kütuseelementide tööpõhimõtet.



Joonis 1.9. Biogaasi kasutusvaldkonnad

Süsihappegaasi peamised kasutusvaldkonnad

Süsihappegaasi kasutamine tööstuse erinevates valdkondades on seotud aine füüsikalise-keemiliste omadustega. See ei põle, ei ole minimaalsetes kontsentratsioonides inimestele ja loomadele ohtlik. CO₂ on taimede elutegevuse jaoks peamine komponent.

Keemiatööstus:

- osaleb tehiskemikaalide sünteesis;
- reguleerib reaktsioonides temperatuuri;
- neutraliseerib leelised;
- puhastab loomade ja taimede kudesid;
- on võimeline taanduma metaaniks. [16]

Metallurgia:

- sadestab väljuva suitsu;
- reguleerib kaevandustest vee ärajuhtimisel voolusuunda;
- mõned laserid kasutavad energiaallikana CO₂ (neoon). [16]

Paberi tootmine:

- reguleerib puidumassi või tselluloosi vesinikueksponenti;
- suurendab tootmasinate võimsust. [16]

Kuival jääl on eriline roll tööstuses ja naabervaldkondades. Seda kasutatakse:

- jahutamise allikana sügavkülmikutes transportimise ajal;
- sulamite tahkestamisel;
- seadmete puhastamisel kuiva jääga (cryoblasting). [16]

Kasutamine teistes tegevusvaldkondades:

- keevitamisel. Kaitseb metalli kuumuse ja oksüdatsiooni eest, voolates elektrikaare ümber.
- põllumajanduses. Süsihappegaas koos päikesevalgusega on ideaalne viis mistahes kultuuride väetamiseks. Gaasi pihustamine kasvumajas või kasvuhoones suurendab viljakkust 2-3 korda; [16]
- meditsiinis kasutatakse seda operatsioonides kunstlike elunditega. See on stimulaatoriks patsiendi hingamise taastamiseks, samuti narkoosi viimisel;
- Instrumendid ja seadmed. Jahutab seadmeid ja agregaatide mooduliteks valimatult, toimib abrasiivse puhastuselemendina;
- Keskkonnakaitse. Reguleerib heitvee vesinikueksponenti;
- Toidutööstus. Kasutatakse säilitusaine ja kergitusainena. Lisatakse jookidele, muutes need karboniseerituteks;
- pneumaatilistes relvades surve tekitamiseks. [16]

Süsihappegaasi kasutamine on eriti nõutud tulekustutusüsteemides. See täidetakse süsihappegaasi kustutitesse. Tulekahju korral võimaldab see eraldada tulekahjukolde hapnikuallikast. Ilma õhuvarustusest ei saa põlemine jätkuda pikka aega. Gaasistamine süsinikdioksiidiga hoiab ära õhu juurdepääsu tulele. [16]

Alkohoolisel kääritamisel tekkinud süsihappegaasi kasutatakse jookide karboniseerimiseks.

Süsihappegaas on suurepäraseks keskkonnaks lillede kasvatamise, köögiviljade ja veealuste taimede lisatoitmise jaoks. See kiirendab fotosünteesi ja parandab ainevahetusprotsesse taimerakkudes. Peaasi, et sellel on taskukohane hind ka tavalistele inimestele.

Süsinikdioksiidi võib kasutada ka krüodestruktioonis, külmutusena. See põletab külma tüügaste ja moolide pinda, põhjustades nende ärakukkumist, kuid ei jäta skalpelli arme ja õmbluseid.

1.5. Metaanil töötav kütuseelement

Kütuseelement (KE) on seade, mis genereerib tõhusalt elektrokeemilise reaktsiooni abil vesinikurikkast kütusest alalisvoolu ja soojust.

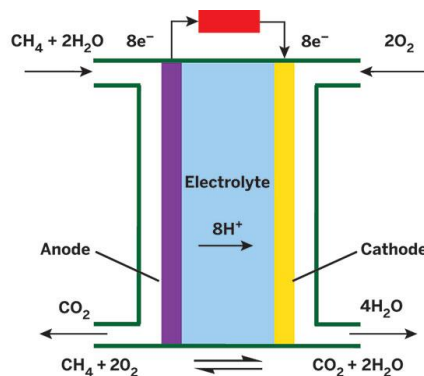
Kütuseelement sarnaneb akuga selle poolest, et see tekitab alalisvoolu keemilise reaktsiooni tulemusena. Kütuseelement sisaldab anoodi, katoodi ja elektrolüüti. Erinevalt akudest ei ole see võimeline elektrit salvestama, ei tühjene ega vaja laadimiseks elektrit. Kütuseelemendid saavad toota elektrit pidevalt, kui neil on kütuse- ja õhuvaru. Õige termin töötava kütuseelemendi kirjeldamiseks on elementide süsteem, kuna korralikuks toimimiseks on vaja mõnda abisüsteemi.

Erinevalt teistest elektrigeneraatoritest, nagu sise põlemismootorid või turbiinid, mis töötavad gaasil, kivisöel, raskel kütteõlil jne, ei põleta kütuseelemendid kütust. See tähendab kõrgsurverootori müra, tugevat väljalaskemüra ja vibratsiooni puudumist. Kütuseelemendid toodavad elektrit vaikse elektrokeemilise reaktsiooni abil. Kütuseelementide teiseks eripäraks on see, et need muundavad kütuse keemilise energia otse elektriks, soojuseks ja veeks. [17]

Kütuseelemendid toodavad elektrienergiat ja soojust elektrolüüdi, katoodi ja anoodi abil toimuva elektrokeemilise reaktsiooni tulemusena. [17]

Kuna töös vaadeldakse metaani eraldamist, tuleb märkida selle kasutamist KEs.

On olemas KE-sid, mis kasutavad metaani lagundamiseks platinast katalüsaatorit (joonis 1.10), eesmärgiga toota elektrienergiat madalatel temperatuuridel, tekitades rohkem energiat kui ükski eelnev otsene kütuseelement metaani baasil.



Joonis 1.10. Metaanil töötav KE [18]

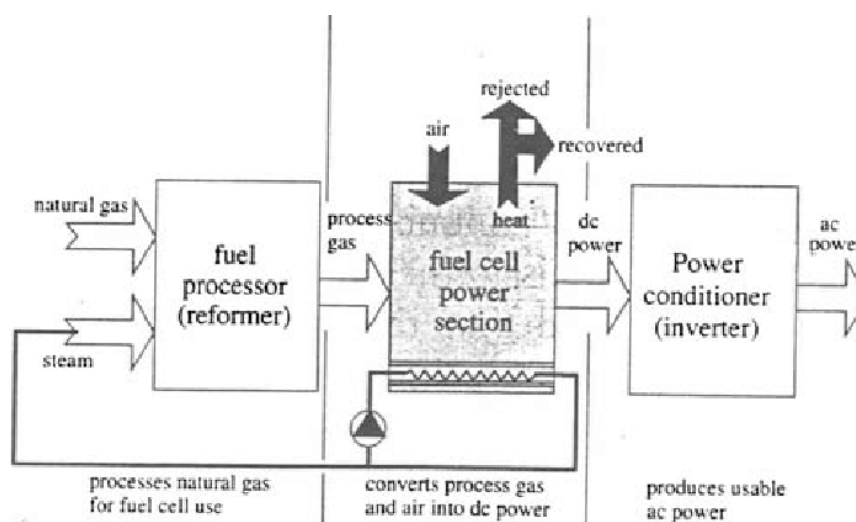
Kaasajal põletatakse metaani, maagaasi põhikomponenti, kodude ja ettevõtete jaoks soojuse ja muu energiavormide tootmiseks. Kütuseelemendid, mis kasutavad metaani otse, muutmata seda eelnevalt vesinikuks, suudavad energiat toota tõhusamalt kui põlemisel põhinevad meetodid.

Kuid sellised kütuseelemendid peavad lõhkuma metaani tugevaid C-H sidemeid, aga see nõuab tavaliselt kõrgeid töötemperatuure vahemikus 650–1100°C. [17] See suurendab oluliselt seadme eksploatatsioonikulusid.

Platinast valmistatud KE anood katalüüsib oksüdatsiooniprotsessi, mille tulemusena vabanevad süsihappegaas, elektronid ja prootonid. Seejärel reageerivad prootonid katoodil hapnikuga, moodustades vett.

Selles protsessis muundub metaan otseselt elektriks temperatuuril 80°C ja toodab viis korda rohkem energiat kui ükski eelnev madalatemperatuuriline otsene kütuseelement metaani baasil. Kuid sellel on piirangud: katalüsaator deaktiveerub aja jooksul, metaani difusioon anoodi on piiratud, maksimaalne võimsustihedus on reaalseks kasutamiseks veel siiski liiga madal.

«PC25 Model C» kütuseelemendi skeem on toodud joonisel 1.11.

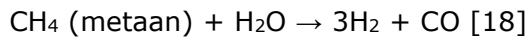


Joonis 1.11. PC25 kütuseelemendi skeem [19]

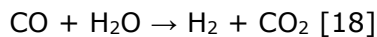
Antud kütuseelement koosneb kolmest põhiosast: kütuseprotsessorist, elektritootmissektioonist ja pingemuundurist.

Elektrokeemiline protsess kulgeb temperatuuril 177°C. [18] Seetõttu tuleb käivitamise momendil patarei kuumutada ja eksploatatsiooni ajal sellelt soojust ära juhtida. Selleks on kütuseelemendi koostises eraldi veeahel. Patarei on varustatud spetsiaalsete jahutusplaatidega.

Kütuseprotsessor võimaldab maagaasi muunda elektrokeemilise reaktsiooni jaoks vajalikuks vesinikuks. Seda protsessi nimetatakse reforminguks. Kütuseprotsessori põhielement on reformer. Reformeris reageerib maagaas (või muu vesinikku sisaldav kütus) veeauruga kõrgel temperatuuril (900°C) ja kõrgel rõhul katalüsaatori - nikli juuresolekul.[18] Seejuures toimuvad järgmised keemilised reaktsioonid [18]:

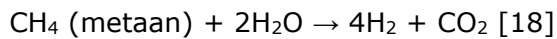


(endotermiline reaktsioon, soojuse neeldumisega);



(eksotermiline reaktsioon, soojuse eraldumisega).

Üldine reaktsioon on väljendatav võrrandiga:



(endotermiline reaktsioon, soojuse neeldumisega).

Selleks, et tagada kõrge temperatuur, suunatakse kütuseelementide patareist osa kasutada kütusest põletisse, mis hoiab reformeril nõutavat temperatuuri.

Reforminguks vajalik aur tekib kütuseelemendi töö käigus moodustunud kondensaadist. Seejuures kasutatakse kütuseelementide patareist ära juhitavat soojust. [18]

Kütuseelementide patareis tekib ebapüsiv alalisvool. See erineb madala pinge ja kõrge voolutugevuse poolest. Selle muundamiseks tööstusharu standarditele vastavaks vahelduvvooluks kasutatakse pingemuundurit. Peale selle sisaldab pingemuunduri üksus erinevaid juhtimisseadmeid ja kaitseblokeeringu ahelaid. Need võimaldavad erinevate rikete korral kütuseelemendi välja lülitada.

Sellises kütuseelemendis saab umbes 40% kütuseenergiast muundada elektrienergiaks. [18] Ligikaudu sama kogus, umbes 40% kütuseenergiast, muundatakse soojusenergiaks. [18] Seda kasutatakse soojusallikana kütteks, soojaveevarustuseks ja sarnasteks sihtideks. Seega võib sellise rajatise summaarne kasutegur ulatuda 80% - ni. [18]

Sellise soojuse- ja elektrivarustuseallika oluline eelis on selle automaatse töö võimalus. Rajatise, kus on paigaldatud kütuseelement, hooldamine ei vaja spetsiaalselt koolitatud personali pidamist. Perioodilist hooldust saavad teostada ekspluateeriva organisatsiooni töötajad.

2. ARVUTUSLIK OSA

Ülesande püstitamine ja lähteandmed

Lähteandmed:

Biogaasijaama arvutamine viidi läbi loomakasvatusekompleksi jaoks, kus kasvatatakse lambaid arvus 250 pead. Lammaste biomassi käärimisprotsess on mesofiilne, käärimistemperatuur on + 35°C, lubatud temperatuurimuutused on $\pm 1^\circ\text{C}$, laaditud biomassi temperatuur on 22°C. Kääritamisprotsessi keskmine kestus on 10 ööpäeva. Biomassi laadimine reaktorisse viiakse läbi pidevalt, laadides iga päev 1/10 osa biomassi. Sõnniku päevane toodang igalt loomalt on 2,86 kg/ööp, orgaanilise kuivaine sisaldus biomassis on 76,09% [19].

Metaantank kujutab endast täismetallkonstruktsiooni, mis on valmistatud 0,6 cm paksusest terasest. Bioreaktori keskkonda soojuskao vähendamise eesmärgil on see termiliselt isoleeritud 5 cm paksuse mineraalvillaga. Temperatuuri metaantangis hoitakse vesi-vesi soojusvaheti abil. Biomassi segamine on mehaaniline.

Ülesande püstitamine:

1. Arvutada lammastelt arvus 250 pead saadud biomassi ööpäevane tarbimine
2. Määrata teoreetiline biogaasi saagis pärast kääritit
3. Teha bioreaktori konstruktiivne arvutus
4. Koostada metaantangi soojusbilanss.

2.1. Bioreaktori konstruktiivne arvutus

Kääritamiseks mõeldud biomassi ööpäevane saagis on võrdne:

$$M_{\text{ööp}} = \sum K_i m_i, \quad (2.1) [20]$$

kus K_i – loomade arv,

m_i – ööpäevane sõnniku toodang igast loomast, kg/ööp

$$M_{\text{ööp}} = 250 \text{ lammast} \cdot 2,86 \frac{\text{kg}}{\text{ööp}} = 715 \text{ kg/ööp}$$

Ööpäevane sõnniku toodang lisandite arvestamisega, arvutatakse valemi järgi:

$$M_{\text{ööp.üld.}} = k_n \cdot m_{\text{üld.}}, \quad (2.2) [20]$$

kus k_n – paranduskoefitsiendi väärtus, mis võtab arvesse sööda ja aluspõhu jääke (kuulub vahemikku 1,3-1,6) [20],

$m_{\text{üld.}}$ – igaööpäevane sõnniku maht kõikidelt loomadelt, kg/ööp

Meie puhul $k_n=1,5$

$$M_{\text{ööp.üld.}} = 1,5 \cdot 715 \frac{\text{kg}}{\text{ööp}} = 1072,5 \text{ kg/ööp}$$

Biomassi kuivainesisalduse arvutamine toimub järgmise valemi järgi:

$$M_{ka} = M_{\text{ööp.üld.}} \cdot \left(1 - \frac{W\%}{100}\right), \quad (2.3) [20]$$

kus $W\%$ - biomassi niiskus

Võtame $W_{ka}=68\%$

$$M_{ka} = 1072,5 \cdot (1 - 0,68) = 343,2 \text{ kg/ööp}$$

Biomassis orgaaniliste kuivainete sisaldus võrdub:

$$M_{oka} = M_{ka} \cdot \frac{R_{oka\%}}{100}, \quad (2.4) [20]$$

kus $R_{oka\%}$ - biomassis orgaaniliste kuivainete sisaldus, $R_{oka} = 76,09\%$

$$M_{oka} = 343,2 \cdot \frac{76,09}{100} = 261,14 \text{ kg/ööp}$$

Teoretiline biogaasi saagis täielikul käärimisel:

$$S_{tt} = M_{oka} \cdot N, \quad (2.5) [20]$$

kus N – keskmine biogaasi saagis 1 kg-st lammaste orgaanilisest ainest, $N=0,46$ m^3/kg ,

M_{oka} – orgaaniliste kuivainete sisaldus biomassis.

$$S_{tt} = 261,14 \cdot 0,46 = 120,12 \text{ m}^3$$

Teoretiline biogaasi saagis mittetäielikul käärimisel:

$$S_{tm} = S_{tt} \cdot \left(\frac{F\%}{100}\right), \quad (2.6) [20]$$

kus $F\%$ - biomassi kääritamise tase (võetakse vahemikus 60-70%),

S_{tt} – teoretiline biogaasi saagis substraadi täieliku lagunemise tingimustes

$$S_{tm} = 120,12 \cdot 0,65 = 78,08 \text{ m}^3$$

Biomassi kääritamiseks on vaja suurendada biomassi niiskusesisaldust 68% -lt 92%-ni. Biomassi niiskuse 1% suurenemise tagamiseks tuleb sõnniku ühe tonni kohta lisada 100 kg vett:

$$M_{ööp.niisk.} = 1,0725 + 0,6 \cdot 1,0725 = 1,716 \text{ t/ööp}$$

Metaantangi projektiivne maht, ettenähtus täiskoormuse jaoks, määratakse järgmise valemiga:

$$V_{täiskoorm.} = \frac{M_{ööp.üld.niisk.} \cdot K_{ööp}}{\tau_{ööp} \cdot T}, \quad (2.7) [20]$$

kus $K_{ööp}$ – kääritamise kestus, ööp, võtame 12 ööpäeva,

T – biomassi tihedus, kg/m^3 ,

$M_{ööp.üld.niisk.}$ – biomassi ööpäevane maht koos lisanditega,

τ – bioreaktorisse laadimiste arv ööpäevas.

Lammaste biomassi tihedus – 370 kg/m³

$$V_{\text{täiskoorm.}} = \frac{1716 \cdot 10}{1 \cdot 370} = 46,38 \text{ m}^3/\text{ööp}$$

Täiskoormuse ja metaantangi mahude suhe peaks jääma vahemikku 0,7-0,9. [20]
Võtame 0,8.

Metaantangi maht:

$$V_M = \frac{46,38}{0,8} = 57,98 \approx 60 \text{ m}^3$$

10-päevase tsükliga ja loomade arvuga 250, valime metaantank mahuga 60 m³.

Reaktori diameetri arvutus

Silindrilise kujuga reaktorite korral võtame kõrguse ja selle diameetri suhte $H/D=0,9\dots1,3$, [20] vastavalt V_r väärtusele võime leida S .

$$S = (\pi D \cdot H) + \frac{2\pi D^2}{4}, \text{ võtame, et } H=1,2D, \text{ siis} \quad (2.8) [20]$$

$$\pi \cdot D \cdot 1,2D + \frac{\pi D^2}{2} = V_r$$

$$1,2\pi D^2 + \frac{\pi D^2}{2} = V_r \mid \cdot 2$$

$$2,4\pi D^2 + \pi D^2 = 2V_r$$

Siit metaantangi diameeter:

$$D = \sqrt{\frac{2V_r}{3,4\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 60}{3,4 \cdot 3,14}} = 3,35 \text{ m}$$

Metaantangi kõrgus:

$$H = 1,2D = 1,2 \cdot 3,35 = 4,02 \text{ m}$$

Reaktori välispinna pindala, m²

$$S = 3,14 \cdot 3,35 \cdot 4,02 + \frac{3,14 \cdot 3,35^2}{2} = 59,90 \text{ m}^2$$

2.2. Bioreaktori soojusarvutus

Biogaasiijaama soojuskaod keskkonda määratakse 2.9 valemi järgi:

$$Q_j = k \cdot S \cdot (t_k - t_{\text{ü.k.}}), \quad (2.9) [20]$$

kus k – soojusülekanne koefitsient substraadilt keskkonnale, $W/(m^2 \cdot K)$,

S – metaantangi pinna pindala, m^2 ,

T_k – käärimistemperatuur, $^{\circ}C$,

$T_{\text{ü.k.}}$ – ümbritseva keskkonna temperatuur, $^{\circ}C$

Biomassi segamiseks vajaliku energia arvutamine määratakse 2.10 valemi abil:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_v}}, \quad (2.10) [20]$$

kus α_s ja α_v – metaantangi sise- ja välispindade soojusülekannekoefitsiendid, $W/(m^2 \cdot K)$,

δ_i – metaantangi sein ja soojustite kihtide paksus, m ,

λ_i – metaantangi sein ja soojustite soojusjuhtivuse koefitsient, $W/(m^2 \cdot K)$.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{5288.2} + \frac{0.006}{46.5} + \frac{0.05}{0.048} + \frac{1}{1860.21}} = 0.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Määrame substraadilt seinale soojusülekanne koefitsient lihtsustatus Nusselti (2.11) valemi abil:

$$\alpha_s = 1,15 \cdot \frac{B}{(\Delta t \cdot H)^{0.25}} = \frac{1.15 \cdot 7549}{(1 \cdot 4.02)^{0.25}} = 6015,31 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (2.11) [20]$$

kus H – ülalpool arvatud reaktori kõrgus, $H=4,02 \text{ m}$,

B – empiiriline väärtus, mis arvutatakse liigikaudse valemi abil:

$$B = 5700 + 56t_k - 0,09t_k^2, \quad (2.12) [20]$$

kus t_6 – substraadi (või reaktorisse juhtiva vee) temperatuur reaktoris, võtame temperatuuri 35°C – mesofiilne režiim.

$$B = 5700 + 56 \cdot 35 - 0,09 \cdot 35^2 = 7549$$

$$\Delta t = t_k - t_{s1}, (\text{°C}), \quad (2.13) [20]$$

kus Δt – temperatuuri erinevus substraadi ja reaktori välisseina sisepinna vahel, °C. Metallreaktorite puhul võib reaktori sisepinna ja biomassi temperatuur erineda väga vähesel määral $\Delta t = 0,5 - 1,0^\circ\text{C}$.

t_{s1} – reaktori välisseina sisepinna temperatuur, võtame $t_{s1} = 34^\circ\text{C}$.

$$\Delta t = t_k - t_{s1} = 35,0 - 34,0 = 1^\circ\text{C}$$

Määrame ligikaudne seina temperatuur (2.14) reaktori välisküljel

$$t_{s2} = t_{s1} - \left[\frac{\delta_s}{\lambda_s} + \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) \right] \cdot q, \quad (2.14) [20]$$

kus δ_s – metaantangi seina paksus, m. Metallreaktorite jaoks $\delta_s = 2 \dots 6 \text{ mm}$, [20]

λ_s – materjali soojusjuhtivuse koefitsient, terase jaoks $\lambda_{\text{CT}} = 40 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kraad}$, [20]

$\frac{\delta}{\lambda}$ – pinna määrdumise koefitsient. Bituumeniga kaetud teraspinna jaoks

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{1500} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kraad},$$

q – termiline pinge või soojusvoog.

Leiame termilise pinge

$$q = \alpha_s \cdot \Delta t = 5161,59 \cdot 1 = 5161,59 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (2.15) [20]$$

kus α_s – soojusvahetuse koefitsiendid metaantangi sisepinnal, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

Δt_{isol} – isolatsiooni temperatuurivahe.

$$t_{s2} = 34 - \left(\frac{0,006}{40} + \frac{1}{1500} \right) \cdot 6015,31 = 29,09^\circ\text{C}$$

Isolatsiooni pinnalt välisõhku soojusülekanne koefitsiendi (2.16) arvutamine

Leiame isolatsiooni välispinna temperatuuri ligikaudse valemi järgi tingimusel, et $t_{s1} < 50^\circ\text{C}$:

$$t_{isol} = t_{s2} - \Delta t_{isol}, \quad (2.16) [20]$$

kus t_{isol} – ületav temperatuur ümbritseva keskkonna temperatuuri suhtes, °C.

$$t_{isol} = 29,09 - 26,18 = 2,91^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{isol} = 0,9 t_{s2}, (\text{°C}), \quad (2.17) [20]$$

kus Δt_{isol} – isolatsiooni temperatuurivahe (kuulub vahemikku 0,9...0,95). Võtame 0,9.

$$\Delta t_{isol} = 0,9 \cdot 29,09 = 26,18^\circ\text{C}$$

Temperatuurierinevus reaktori välispinna ja isolatsiooni välispinna vahel

$$\Delta t = t_{s2} - t_{isol} = 29,09 - 2,91 = 26,18^\circ\text{C} \quad (2.18) [20]$$

Määrame lihtsustatud Nusselti valemi abil soojusülekanne koefitsient välisseinast ümbritsevasse keskkonda α_v

$$\alpha_v = 1,15 \cdot \frac{B}{(\Delta t_{isol} \cdot H)^{0,25}}, \quad (2.19) [20]$$

kus B – empiiriline väärtus, arvutatakse ligikaudse valemi järgi:

$$B = 5700 + 56 \cdot \Delta t - 0,09 \cdot t_{isol}^2 = 5700 + 56 \cdot 2,91 - 0,09 \cdot 2,91^2 = 5862 \quad (2.20) [20]$$

H – ülalpool arvatud reaktori kõrgus, m.

$$\alpha_v = 1,15 \cdot \frac{5862}{(26,18 \cdot 4,02)^{0,25}} = 2104,72 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Metaantangi seinate soojusjuhtivus

Metaantank on valmistatud terasest paksusega 0,6 cm. Metaantangi ümbritsevasse keskkonda soojuskadude vähendamise eesmärgiga soojustatakse see 5 cm mineraalvilla kihiga. Villa peale kantud hüdrobarjäär (hüdrolatsioonikile) 0,18 mm. Põhja soojustamiseks rajatakse 2 m vundamenti (betoon).

Soojusülekannekoefitsiendi arvutamiseks võeti teatmeteosest λ_i :

- terase jaoks $\lambda_{terase} = 46,5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, $\delta = 0,006 \text{ m}$ [21]
- mineraalvilla kihi jaoks $\lambda_{mv} = 0,048 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, $\delta = 0,05 \text{ m}$ [22]

Biogaasijaama soojuskaod määratakse 2.21 valemi järgi:

$$Q_j = k \cdot S \cdot (t_k - t_0), \quad (2.21) [20]$$

kus k – koefitsient, mis iseloomustab biomassist soojusülekanne looduslikku keskkonda, arvatud ülalpool $k=0,96$, $W/(m^2 \cdot K)$,

S – metaantangi pindala suurus,

t_k – kääritamise temperatuur,

t_0 – õhu temperatuur.

$$Q_j = 0,96 \cdot 59,9 \cdot (35 - 15) = 1150,08 \text{ W} = 988,89079 \text{ kcal} = 4,140 \text{ MJ}$$

Energiakulu substraadi eelsoojendamiseks nõuatava kääritamistemperatuurini

$$Q_t = M_{\text{ööp.üld}} \cdot C \cdot (t_k - t_{lb}), \quad (2.22) [20]$$

kus $M_{\text{ööp.üld}}$ – kääritamiseks ettenähtud biomassi ööpäevane maht,

C – biomassi keskmine soojusmahtuvus ($C=4,18 \cdot 10^{-3}$ MJ/(kg·K)) [20],

t_k – kääritamistemperatuur +35°C mesofiilse meetodi korral,

t_{lb} – laaditud biomassi temperatuur, võtame +8°C.

$$Q_t = 1072,5 \cdot 4,18 \cdot 10^{-3} \cdot (308 - 281) = 121,04 \text{ MJ}$$

Biomassi segamiseks vajaliku energia arvutamine

$$Q_s = q \cdot V_M \cdot Y, \quad (2.23) [20]$$

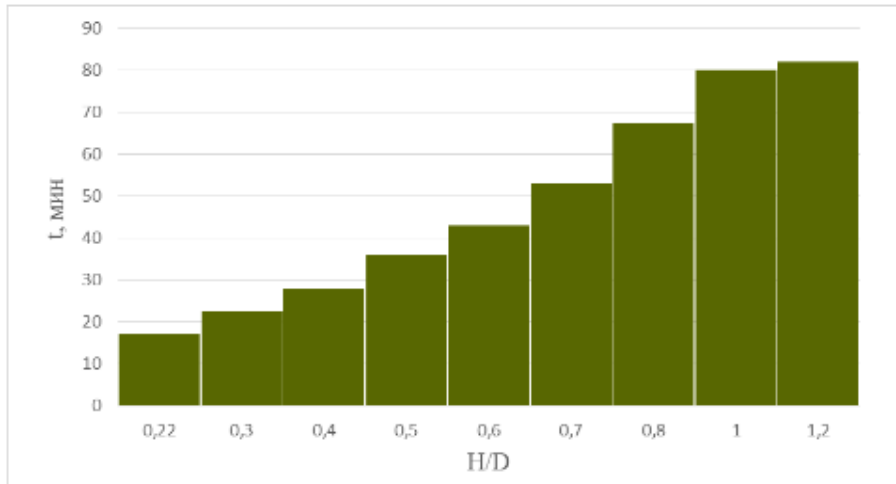
kus q – segamiseadme erikoormuse väärtus. Võtame $50 \text{ W}/m^3 \cdot h'$

V_M – metaantangi maht,

Y – seguri töö kestus.

$$Y = t_y \cdot n, \quad (2.24) [20]$$

kus t_y – segamise kestus ühe korra kohta, valime sõltuvalt metaantangi H/D-st (joonis 2.1)



Joonis 2.1. Segamisaeg tüüpilise segamissüsteemi kasutamisel sõltuvalt metaantangi kõrguse ja diameetri suhtest (H/D) [20]

Joonisest 2.1. me võtame 1,35 H/D=1,2 juures, siis $t_y = 1,35 \cdot 3 = 4,05$.

$$Q_s = 50 \cdot 60 \cdot 4,05 = 12150 \text{ W} = 10477,11952 \text{ kcal} = 43,865 \text{ MJ}$$

Ööpäevas eraldunud biogaasist saadav soojusenergia

$$Q_{bg\ddot{o}} = S_{tt} \cdot H_{mbp} \quad (2.25) [20]$$

kus H_{mbp} – puhastamata biogaasi madalaim põlemissoojus (6000–7000 kcal/m³)

$$Q_{bg\ddot{o}} = 47,36 \cdot 6000 = 284,160 \text{ kcal} = 1188,925 \text{ MJ}$$

Tsüklis eraldunud biogaasi soojusenergia

$$Q_{bg\ddot{o}} = Q_{bg\ddot{o}} \cdot T_{ts} \quad (2.26) [20]$$

kus T_{ts} – kääritamistsükkel.

$$Q_{bg\ddot{o}} = 1188,925 \cdot 1 = 1188,925 \text{ MДж}$$

Põlemisprotsessis kasuliku energia ööpäevane tootmine biogaasiseadmetel

$$Q_k = B_{bg\ddot{o}} - Q_t - Q_j - Q_s \quad (2.27) [20]$$

kus $B_{bg\ddot{o}}$ – ööpäevas eraldunud biogaasist saadav teoreetiline soojusenergia,

Q_t – igapäevaselt laetava biomassi nõutava käärimistemperatuurini soojendamiseks vajalik soojushulk,

Q_j – biogaasijaama soojuskaod,

Q_s – biomassi segamiseks vajalik energia.

$$Q_k = 1188,925 - 121,04 - 4,140 - 43,865 = 1019,88 \text{ MJ}$$

2.3. Membraanmooduli arvutamine biogaasi eraldamiseks CH₄-ks ja CO₂-ks

Ülesande püstitamine ja lähteandmed

Lammaste elutegevuse jäätmetest saadud biogaas sisaldab koos CH₄-ga 30% süsihappegaasi. Süsinikdioksiid mõjutab negatiivselt KE. Seetõttu on vaja biogaasi täiendavalt puhastada CO₂-st.

Biogaasijaama arvutus on toodud farmi jaoks lammastega arvus 250 pead. Pärast kääritud suunatakse membraanmeetodil eraldamiseks 120,12 m³ biogaasi, mis sisaldab 70% CH₄ ja 30% CO₂. Võtame rõhud surve- ja drenaažikanalites $p_h = 10^6$ Pa ja $p_l = 10^5$ Pa. [23] Membraanist väljuva biogaasi koostis moodustab: 80, 90, 98 mahu% CH₄.

Gaaside membraanpuhatus

Membraanmooduli materjalbilansi arvutamine kolme variandi jaoks viidud läbi valemite järgi:

Üldine bilansi võrrand:

$$L_f = L_p + L_r, \quad (2.28)[24]$$

kus L_f – lähtegaasi CH₄ ja CO₂ kulu, mol/s,

L_p – permeaadi kulu, mol/s,

L_r – retentaadi kulu, mol/s.

Materjalbilansi võrrand CO₂ jaoks:

$$L_f \cdot x_f = L_p \cdot x_p + L_r \cdot x_r, \quad (2.29)[24]$$

kus x_f – CO₂ moolimurd lähtegaasis,

x_p – CO₂ moolimurd permeaadis,

x_r – CO₂ moolimurd retentaadis.

Eraldamise koefitsient - selektiivsus:

$$a = \frac{K_{CO_2}}{K_{CH_4}} \quad (2.30) [25]$$

Permeaadi moolimurd:

$$\frac{x_p}{(1-x_p)} = a \cdot \frac{\left(x_r - \frac{p_h}{p_l} x_p\right)}{\left[(1-x_r) - \frac{p_h}{p_l} (1-x_p)\right]} \quad (2.31) [26]$$

Peale teisendust x_p suhtes, saame ruutvõrrand:

$$ax_p^2 + bx_p + c = 0 \quad (2.32)$$

Määrame permeaadi x_p kontsentratsioon valemi järgi:

$$x_p = B - \left[B^2 - \frac{\alpha}{(\alpha-1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l\right]^{0,5}, \quad (2.33) [25]$$

kus $P_r = \frac{p_l}{p_h}$ - rõhku suhe dreanaaži- ja survekanalites. [26]

$$B = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(\alpha-1) \cdot P_r} + \frac{\bar{x}_l}{P_r} \right] \quad (2.34) [25]$$

Tooraine kontsentratsiooni erinevuse logaritmiline keskmine väärtus

$$\bar{x}_l = \frac{x_f - x_r}{\ln \frac{x_f}{x_r}} \quad (2.35) [26]$$

Määrame gaaside tihedused, kg/m^3 , rõhu juures $p_h = 1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$:

$$\rho_{\text{gaasi}} = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (2.36)$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = 1,9769 \cdot \frac{1 \cdot 10^6}{1,01325 \cdot 10^5} \cdot \frac{273}{293} = 18,178 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{CH}_4} = 0,7168 \cdot \frac{1 \cdot 10^6}{1,01325 \cdot 10^5} \cdot \frac{273}{293} = 6,591 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{segu}} = x_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} + x_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} = 0,3 \cdot 18,178 + 0,7 \cdot 6,591 = 10,067 \text{ kg/m}^3 \quad (2.37)$$

Gaasi kulu, mol/s :

$$M = x_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} + x_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CH}_4} = 0,3 \cdot 44 + 0,7 \cdot 16 = 24,4 \text{ mol/s} \quad (2.38)$$

$$L_f = \frac{120,12 \cdot 10,07}{24,4 \cdot 3600} = 0,013770 \text{ kmol/s} = 13,770 \text{ mol/s}$$

I variant: membraanmooduli väljumisel gaas sisaldab 2 mahu% CO₂ ja 98 mahu% CH₄

Arvutamiseks valime polüettersulfooni (PES) – tseoliit 4A õõneskiudmembraani CO₂/CH₄ eraldamiseks, selektiivsus $\alpha = 28$, membraani läbilaskvus $K_{CO_2} = 6,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$. [27] Võtame CO₂ kontsentratsiooni retentaadis $x_r = 0,02$, rõhud vastavalt surve- ja drenaazikanalis valime $p_h = 10^6 \text{ Pa}$, $p_l = 10^5 \text{ Pa}$. [23]

$$\bar{x}_l = \frac{0,3 - 0,02}{\ln \frac{0,3}{0,02}} = 0,1034$$

$$B = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right] = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(28 - 1) \cdot 0,1} + \frac{0,1034}{0,1} \right] = 1,202$$

$$x_p = B - \left[B^2 - \frac{\alpha}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right]^{0,5} = 1,202 - \left[1,202^2 - \frac{28}{(28 - 1) \cdot 0,1} \cdot 0,1034 \right]^{0,5} = 0,592$$

Määrame permeaadi ja retentaadi kulu:

$$L_p = \frac{L_f(x_f - x_r)}{x_p - x_r} = \frac{13,770 \cdot (0,3 - 0,02)}{0,592 - 0,02} = 6,740 \text{ mol/s}$$

$$L_r = L_f - L_p = 13,770 - 6,740 = 7,030 \text{ mol/s}$$

Arvutame membraanide tööpinda võrrandi järgi:

$$F = \frac{L_p \cdot x_p}{K_{CO_2} \cdot (\bar{x}_l p_h - x_p p_l)} = \frac{6,740 \cdot 0,592}{6,8 \cdot 10^{-9} \cdot (0,1034 \cdot 10^6 - 0,592 \cdot 10^5)} = 13275 \text{ m}^2 \quad (2.39)[26]$$

Võtame, et mooduli üks m³ sisaldab 13200 m² õõneskiudmembraani.

$$V_{moodul} = \frac{13275}{13200} = 1 \text{ m}^3$$

Üldine materjalibilansi võrrand:

$$L_f = L_r + L_p$$

$$13,770 = 7,030 + 6,740$$

$$13,770 = 13,770$$

Materjalibilansi võrrand CO₂ kohta:

$$L_f \cdot x_f = L_r \cdot x_r + L_p \cdot x_p$$

$$13,770 \cdot 0,3 = 7,030 \cdot 0,02 + 6,740 \cdot 0,592$$

$$4,131 = 4,131$$

II variant: membraanmoodulist väljumisel gaas sisaldab 10 mahu% CO₂ ja 90 mahu% CH₄

Arvutamiseks valime polüetersulfooni (PES) – tseoliit 4A õõneskiudmembraani CO₂/CH₄ eraldamiseks, selektiivsus $a = 28$, $K_{CO_2} = 6,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$. [27] Võtame CO₂ kontsentratsiooni retentaadis $x_r = 0,1$, rõhud vastavalt surve- ja drenaažikanalis valime $p_h = 10^6 \text{ Pa}$, $p_l = 10^5 \text{ Pa}$. [23]

$$\bar{x}_l = \frac{0,3 - 0,1}{\ln \frac{0,3}{0,1}} = 0,1820$$

$$B = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right] = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(28 - 1) \cdot 0,1} + \frac{0,1820}{0,1} \right] = 1,595$$

$$x_p = B - \left[B^2 - \frac{\alpha}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right]^{0,5} = 1,595 - \left[1,595^2 - \frac{28}{(28 - 1) \cdot 0,1} \cdot 0,1820 \right]^{0,5} = 0,785$$

Määrame permeaadi ja retentaadi kulu:

$$L_p = \frac{L_f(x_f - x_r)}{x_p - x_r} = \frac{13,770 \cdot (0,3 - 0,1)}{0,785 - 0,1} = 4,020 \text{ mol/s}$$

$$L_r = L_f - L_p = 13,770 - 4,020 = 9,750 \text{ mol/s}$$

Arvutame membraanide tööpinda võrrandi järgi:

$$F = \frac{L_p \cdot x_p}{K_{CO_2} \cdot (\bar{x}_l \cdot p_h - x_p \cdot p_l)} = \frac{4,020 \cdot 0,785}{6,8 \cdot 10^{-9} \cdot (0,1820 \cdot 10^6 - 0,785 \cdot 10^5)} = 4483,80 \text{ m}^2$$

Võtame, et mooduli üks m³ sisaldab 13200 m² õõneskiudmembraani.

$$V_{\text{модуля}} = \frac{4483,80}{13200} = 0,34 \text{ m}^3$$

Üldine materjalibilansi võrrand:

$$L_f = L_r + L_p$$

$$13,770 = 9,750 + 4,020$$

$$13,770 = 13,770$$

Materjalibilansi võrrand CO₂ kohta:

$$L_f \cdot x_f = L_r \cdot x_r + L_p \cdot x_p$$

$$13,770 \cdot 0,3 = 9,750 \cdot 0,1 + 4,020 \cdot 0,785$$

$$4,131 = 4,131$$

III variant: membraanmoodulist väljumisel gaas sisaldab 20 mahu% CO₂ ja 80 mahu% CH₄

Arvutamiseks valime polüeetersulfooni (PES) – tseoliit 4A õõneskiudmembraani CO₂/CH₄ eraldamiseks, selektiivsus $a = 28$, $K_{CO_2} = 6,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$. [27] Võtame CO₂ kontsentratsiooni retentaadis $x_r = 0,2$, rõhud vastavalt surve- ja drenaažikanalis valime $p_h = 10^6 \text{ Pa}$, $p_l = 10^5 \text{ Pa}$. [23]

$$\bar{x}_l = \frac{0,3 - 0,2}{\ln \frac{0,3}{0,2}} = 0,2467$$

$$B = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right] = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{1}{(28 - 1) \cdot 0,1} + \frac{0,2467}{0,1} \right] = 1,919$$

$$x_p = B - \left[B^2 - \frac{\alpha}{(\alpha - 1) \cdot P_r} \cdot \bar{x}_l \right]^{0,5} = 1,919 - \left[1,919^2 - \frac{28}{(28 - 1) \cdot 0,1} \cdot 0,2467 \right]^{0,5} = 0,859$$

Määrame permeaadi ja retentaadi kulu:

$$L_p = \frac{L_f(x_f - x_r)}{x_p - x_r} = \frac{13,770 \cdot (0,3 - 0,2)}{0,859 - 0,2} = 2,089 \text{ mol/s}$$

$$L_r = L_f - L_p = 13,770 - 2,089 = 11,681 \text{ mol/s}$$

Arvutame membraanide tööpinda võrrandi järgi:

$$F = \frac{L_p \cdot x_p}{K_{CO_2} \cdot (\bar{x}_l \cdot p_h - x_p \cdot p_l)} = \frac{2,089 \cdot 0,859}{6,8 \cdot 10^{-9} \cdot (0,2467 \cdot 10^6 - 0,859 \cdot 10^5)} = 1641,10 \text{ m}^2$$

Võtame, et mooduli üks m³ sisaldab 13200 m² õõneskiudmembraani.

$$V_{\text{модуля}} = \frac{1641,10}{13200} = 0,13 \text{ m}^3$$

Üldine materjalibilansi võrrand:

$$L_f = L_r + L_p$$

$$13,770 = 11,681 + 2,089$$

$$13,770 = 13,770$$

Materjalibilansi võrrand CO₂ kohta:

$$L_f \cdot x_f = L_r \cdot x_r + L_p \cdot x_p$$

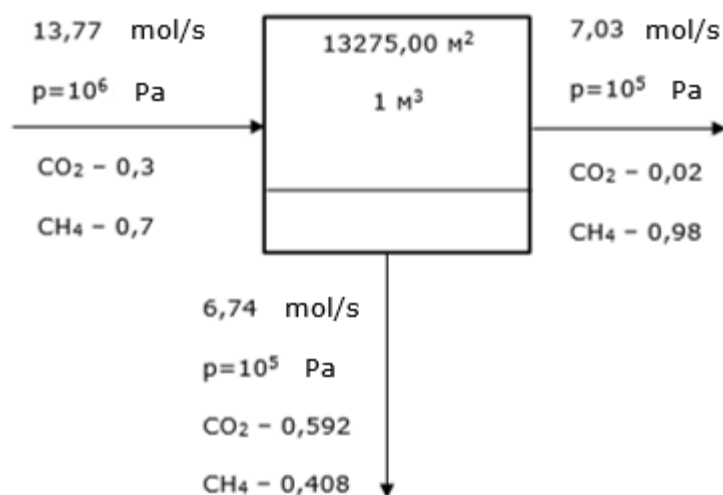
$$13,770 \cdot 0,3 = 11,681 \cdot 0,2 + 2,089 \cdot 0,859$$

$$4,131 = 4,131$$

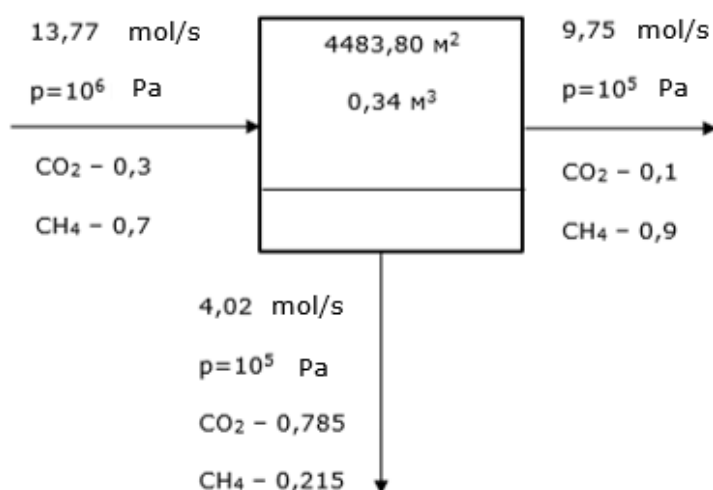
Membranide arvutuste tulemused sõltuvalt CO₂ sisaldusest väljuvas gaasis on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Membranide karakteristikud sõltuvalt CO₂ sisaldusest retentaadis ($\alpha = 28$)

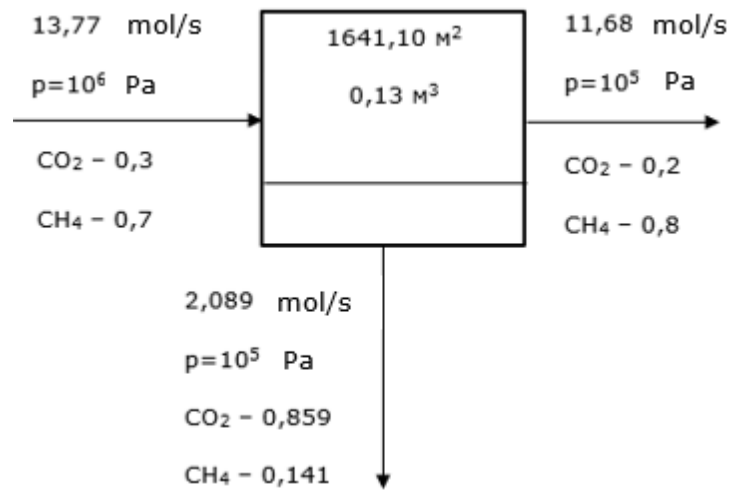
CO ₂ moolimurd retentaadis, $x_r^{CO_2}$	Polüetersulfooni (PES) – tseoliit 4A õõneskiudmembraan CO ₂ /CH ₄ eraldamiseks	
	Membraani tööpind, F, m ²	V _{mooduli} , m ³
0,02	13275,00	1,00
0,10	4483,80	0,34
0,20	1641,10	0,13



Joonis 2.2. Membraantehnoloogia abil biogaasi eraldamise materjalbilansi skeem, $x_r = 0,02$



Joonis 2.3. Membraantehnoloogia abil biogaasi eraldamise materjalbilansi skeem, $x_r = 0,1$



Joonis 2.4. Membraantehnoloogia abil biogaasi eraldamise materjalbilansi skeem, $x_r = 0,2$

JÄRELDUSED

Lõputöö käigus:

1. Tehti kirjanduslik ülevaade biogaasi saamise ja eraldamise CH₄-ks ja CO₂-ks meetoditest. Arvutuste jaoks on valitud kaasaegne gaaside membraanpuhatus meetod. Meetod võimaldab lahutada biogaasi praktiliselt puhasteks komponentideks. Membraan ei vaja täiendavat regenereerimist ja puhastamist. Membraani kasutusiga on kuni 10 aastat.
2. Vaadeldi farmipidamise biogaasist elektrienergia ja soojuse saamise tehnoloogiat.
3. Viidi läbi bioreaktori arvutus lambafarmi jaoks peade arvuga 250. Saadud andmed olid järgmised: biogaasitoodang peale käärimisreaktorit oli 120 m³/ööp; 10-päevase tsükliga täiskoormuse jaoks kavandatud metaantangi maht on 60 m³; metaantangi diameeter 3,35 m; kõrgus 4,02 m; reaktori välispinna pindala on 59,9 m².
4. Koostati bioreaktori soojusarvutus. Saadud põlemiseks kasuliku energia väärtus on võrdne 1019,88 MJ.
5. Viidi läbi biogaasi metaaniks ja süsinikdioksiidiks lahutamiseks mõeldud membraanmooduli kolme variandi arvutamine. On näidatud, et membraantehnoloogia võimaldab eraldada 98, 90, 80% puhatusega metaani. Valitud õõneskuidmembraan valmistatud materjalist: Polyethersulfone (PES) – zeolite 4A.
6. Näidati, et 98% metaani sisaldavat gaasi saab kasutada kütuseelementide lähtena.

KOKKUVÕTE

Viimasel ajal on suurenenud huvi taastuvate energiaallikate vastu. Biogaasi saab toota karja- ja põllumajandusjäätmetest, reoveesetetest ja biolagunevatest jäätmetest. Biogaas tekib biomassi metaani lagundamisel, anaeroobsete bakterite töö tulemusena. Selle kasutamine võimaldab vähendada nii elektrikulusid kui ka kahjulike gaaside heidet atmosfääri.

Membraanimeetodi abil saab biogaasi lagundada metaaniks ja süsinikdioksiidiks. Meetod võimaldab lagundada biogaasi praktiliselt puhasteks komponentideks. Membraan ei vaja täiendavat regenererimist ja puhastamist. Membraani kasutusiga on kuni 10 aastat.

Selle lõputöö põhieesmärk on biogaasi saamine, selle põhikomponentideks CO₂ ja CH₄ jagamine kvalifitseeritumaks kasutamiseks.

On tehtud ülevaade kirjandusest biogaasi tootmise, võimalike CO₂ eraldamise viiside, samuti CO₂ ja CH₄ kasutusvaldkondade kohta. Tooraineks valiti lammaste elutegevuse jäätmed. Vaadeldi talu biogaasist elektri ja soojuse tootmise tehnoloogiat.

Töös on läbi viidud bioreaktori konstruktiivne arvutus. On kindlaks määratud selle maht, läbimõõt, kõrgus ja välispind. Saadud andmete põhjal koostati bioreaktori termiline arvutus, mille alusel arvutati gaasipõlemisel saadud kasuliku energia hulk.

Lambakasvatuse jäätmete biogaas sisaldab metaani CH₄ - 70% ja süsinikdioksiidi CO₂ - 30%. Lõputöös tehti ettepanek eraldada see segu membraanide abil tänapäevase meetodiga.

Arvutati biogaasi eraldamiseks CH₄-ks ja CO₂-ks membraanimoodulite kolm varianti. Näidati, et membraanitehnoloogia võimaldab eraldada metaani puhtusastmega, mahu%: 98, 90 ja 80. Segu CH₄/CO₂ eraldamise arvutused viidi läbi õõneskiudmembraani jaoks, mis on valmistatud materjalist Polyethersulfone (PES) – zeolite 4A. On näidatud, et membraanimoodulite maht võib varieeruda vahemikus 0,13 kuni 1,0 m³, sõltuvalt CO₂ sisaldusest lõppgaasis.

SUMMARY

Recently, there has been an increasing interest in renewable energy sources. Biogas can be produced from the waste of livestock and agriculture, sewage sludge, and biodegradable waste. Biogas is formed when biomass is decomposed by methane, thanks to the work of anaerobic bacteria. Its use will not only reduce electricity costs, but also reduce the emission of harmful gases into the atmosphere.

Using the membrane method, biogas can be divided into methane and carbon dioxide. The method allows to divide the biogas into almost pure components. The membrane does not require additional regeneration and cleaning. The service life of the membrane is up to 10 years.

The main purpose of this Degree thesis is to obtain biogas, dividing it into the main components of CO₂ and CH₄ for more qualified use.

A literature review of the production of biogas, possible methods of extracting CO₂ from it, as well as applications of CO₂ and CH₄ was made. The waste products of sheep-farms were selected as raw materials. The technology of generating electricity and heat from livestock biogas was considered.

In this paper, a constructive calculation of the bioreactor was performed. Its volume, diameter, height, and outer surface area were determined. On the basis of the obtained data, a thermal calculation of the bioreactor was made, from which the amount of useful energy obtained during gas combustion was calculated.

Biogas, from sheep-farm waste, contains methane CH₄ of 70% and carbon dioxide CO₂ of 30%. In the degree thesis, it is proposed to separate this mixture in a modern way using membranes.

Three variants of membrane modules for the separation of biogas into CH₄ and CO₂ were calculated. It is shown that the membrane technology makes it possible to isolate methane with a degree of purity, % vol: 98, 90 and 80. The CH₄/CO₂ mixture separation calculations were performed for a hollow fiber membrane made of Polyethersulfone (PES) – zeolite 4A. It is shown that the volume of the membrane modules can vary from 0.13 to 1.0 m³ depending on the CO₂ content in the final gas.

KIRJANDUS

1. Биогаз. Технология производства. [Online] <https://biokompleks.ru/technologies/biogaz/> (18.03.2021)
2. Purification of biogas. [Online] <https://www.valocarb.com/photos/screen/schemas/schema-biogaz-en.png> (20.04.2021)
3. What is biogas? A beginners guide. [Online] [https://www.homebiogas.com/Blog/142/What is Biogas%7Cfq%7C A Beginners Guide](https://www.homebiogas.com/Blog/142/What%20is%20Biogas%7Cfq%7C%20A%20Beginners%20Guide) (14.03.2021)
4. Biogas. [Online] <http://energoplus.te.ua/en/biogas/index.html> (20.04.2021)
5. Биогаз: основные характеристики и технология получения. [Online] http://www.cleandex.ru/articles/2015/07/22/biogas_article1 (18.03.2021)
6. Производство биогаза. [Online] [http://biogaz-russia.ru/proizvodstvo-biogaza/#:~:text=%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%20%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B7%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F,%25%20\(%D0%B8%D0%B7%20%D0%B6%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2\).](http://biogaz-russia.ru/proizvodstvo-biogaza/#:~:text=%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%20%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B7%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F,%25%20(%D0%B8%D0%B7%20%D0%B6%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2).) (18.03.2021)
7. Типы сырья. [Online] http://www.fluid-biogas.com/?page_id=129 (23.03.2021)
8. Технология получения биогаза. [Online] <http://gl-engineer.com/articles/tehnologiya-polucheniya-biogaza> (22.03.2021)
9. Перспективы использования и производства биогаза в украине. [Online] <https://biogas.com.ua/assets/files/%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B01.pdf> (21.04.2021)
10. Puras puregas. [Online] <https://slideplayer.com/slide/9352257/> (20.04.2021)
11. Мембранная сепарация. [Online] <https://www.pngwing.com/ru/free-png-tkabn> (20.04.2021)
12. Мембранное разделение биогазов. [Online] <https://www.grasys.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-gazov/> (22.04.2021)
13. Получение биогаза. [Online] <https://works.doklad.ru/view/1VpJJkpQskI/all.html> (24.04.2021)

14. Биометан. [Online] <https://www.alexela.ee/ru/toplivo/biometan#prosmotr=karta;uslugi=vse;toplivo=cng;tip-punkta-obslyzhivaniya=azs;region=vse> (24.04.2021)
15. Предприятие Eesti Gaas первым начало продажу биометана в Эстонии. [Online] <https://www.gaas.ee/ru/predpriyatie-eesti-gaas-pervym-nachalo-prodazhu-biometana-v-estonii/> (24.04.2021)
16. Применение углекислого газа в промышленности и способы его получения. [Online] <https://uglekislygaz.ru/dioksid-ugleroda/co2-v-promyshlennosti/> (24.04.2021)
17. Топливные элементы. [Online] <https://energy-units.ru/toplivnye-elementy/> (20.03.2021)
18. Использование топливного элемента для энергоснабжения зданий. [Online] https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2340 (24.04.2021)
19. Проект биогазовой установки. [Online] <http://biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki/> (30.04.2021)
20. Обоснование инвестиций строительства биогазовой установки. [Online] <https://docplayer.ru/59065595-Obosnovanie-investiciy-stroitelstva-biogazovoy-ustanovki-vypusknaya-rabota-bakalavra-napravlenie-stroitelstvo.html> (30.04.2021)
21. Коэффициенты теплопередачи стали и других материалов. [Online] <https://obrabotkametalla.info/stal/koefficient-teploprovodnosti-i-teploperedachi-stali> (15.03.2021)
22. Выбор утеплителя, чем утеплить дом. [Online] <https://dompodrobno.ru/vybor-uteplitelya/> (15.03.2021)
23. Корвин. Доходы из отходов: как российские ученые получили энергию биомассы. [Online] <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2011/dokhody-iz-otkhodov-kak-rossiiskie-uchenye-poluchili-energiyu-biomassy> (16.03.2021)
24. Борисов Г., Брыков В., Дытнерский Ю. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. Москва, 2008.
25. Мембраны в медицине. [Online] <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.files/medmemb14.pdf> (17.03.2021)
26. Процессы и аппараты химических технологий. [Online] http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/10_protssy_i_apparaty_khimicheskikh_tekhnologiy_chast_II/7116 (17.03.2021)
27. Review of CH₄/CO₂ separation membranes. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444537287000057> (17.03.2021)

28. Chen X. Y., Ramirez A. A., Vinh H., Kaliaguine S. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. RSC Advances, February, 2015.
29. Производство биогаза. [Online] [http://biogaz-russia.ru/proizvodstvo-biogaza/#:~:text=%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%20%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B7%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F,%25%20\(%D0%B8%D0%B7%20%D0%B6%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2\).](http://biogaz-russia.ru/proizvodstvo-biogaza/#:~:text=%D0%91%D0%B8%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%20%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D0%B2%20%D1%80%D0%B5%D0%B7%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%20%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F,%25%20(%D0%B8%D0%B7%20%D0%B6%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2).) (18.03.2021)
30. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
31. Типы топливных элементов. [Online] <http://masters.donntu.org/2011/fkita/petrenko/library/translate.htm> (20.03.2021)
32. Basic structure of PEM fuel cell. [Online] https://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/AE_PEM_fuel_cell.html (20.03.2021)
33. Сырье для получения биогаза. [Online] <http://biogaz-russia.ru/syrje-dlya-biogaza/> (24.03.2021)
34. Химия: получение биогаза. [Online] <https://uchil.net/?cm=107094> (29.03.2021)
35. Сушка биогаза. [Online] <https://condorchem.com/ru/%D1%81%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0-%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%B0/> (30.03.2021)
36. What is pressure swing adsorption? [Online] <https://www.thomasnet.com/insights/what-is-pressure-swing-adsorption/> (31.03.2021)
37. Tallinna Tehnikaülikool, soojustehnika instituut. Eesti tingimustesse sobivate biogaasi metaaniks puhastamise tehnoloogiate rakendatavus ning keskkonna ja majanduslikud mõjud. Tallinn, 2014.
38. Purification of biogas. [Online] <https://www.valocarb.com/photos/screen/schemas/schema-biogaz-en.png> (20.04.2021)
39. Biogaas transpordikütuseks puhastamise tehnoloogiad ja seadmed. [Online] <https://www.eby.ee/wp-content/uploads/2019/06/Biogaasi->

- [transpordik%c3%bctuseks-puhastamise-tehnoloogiad-ja-seadmed.pdf](#)
(20.04.2021)
40. Reoveesette kääritamisel saadud biogaasi kasutamise võimalused Tartu linna ühistranspordis. Uuringu aruanne. Mõnus Minek OÜ, 2009, 103 lk.
41. Arol energy: amines. [Online] <http://arol-energy.com/en/produits/amines/>
(20.04.2021)
42. Газоразделительное оборудование. [Online] <https://neftegaz.ru/tech-library/neftegazopromysel/630722-gazorazdelitelnoe-oborudovanie/>
(24.04.2021)
43. Best Effort Yet To Make Direct Methane Fuel Cell A Reality. [Online] <https://cen.acs.org/articles/93/i43/Best-Effort-Yet-Make-Direct.html>
(24.04.2021)
44. Biogaasi tootmise ja kasutamise võimalused Järvamaa Kutsehariduskeskusesse rajatava õppekompleksi näitel. [Online] https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/31439/Oraste_Egon.pdf?sequence=1&isAllowed=y (30.04.2021)
45. Проект биогазовой установки. [Online] <http://biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki/> (30.04.2021)