

Maarit Luoranen

Biokaasun valmistus kasvibiomassasta laboratoriomittakaavan biokaasureaktorilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
29.4.2011

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Maarit Luoranen Biokaasun valmistus kasvibiomassasta laboratoriomittakaavan biokaasureaktorilla 43 sivua 29.4.2011
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	kemiantekniikka
Ohjaaja(t)	yliopettaja Pekka Lehtonen lehtori Jarmo Palm
<p>Insinööriyössä tehtiin kirjallisuusselvitys anaerobisen hajoamisen vaiheista ja biokaasun tuotantoprosesseista sekä biokaasuprosessin käynnistämiseen ja toimintaan vaikuttavista tekijöistä. Insinööriyön tuloksia hyödynnetään myöhemmin Metropolia Ammattikorkeakoulun kemiantekniikan laboratoriotiloihin valmistuvan laboratoriomittakaavan biokaasureaktorin suunnittelussa ja rakentamisessa.</p> <p>Insinööriyön kokeellista osiota varten rakennettiin yksinkertainen laboratoriomittakaavan mädätysreaktori. Reaktorin koeajoilla saatiin tietoa mädätysprosessin kulusta ja vastaantulevista ongelmista. Mädätysreaktori käynnistettiin panostoisesti. Tämän jälkeen tehtiin useita kokeita, ja aina uuden panoksen käynnistämisessä keskityttiin havaittuihin ongelma-kohtiin. Kokeiltiin myös kaksivaiheista prosessia, eli hajotusprosessin kolmen ensimmäisen vaiheen annettiin mennä loppuun ennen varsinaista metaaninmuodostusta. Sitten reaktoriin lisättiin ympäri mikrobikannan varmistamiseksi. Kaasuntuoton käynnistyttyä reaktoriin lisättiin myös pieniä määriä uutta biomassaa, jotta hajotettavaa materiaalia riittäisi mikrobeille. Hajotusprosessin viimeisessä vaiheessa eli metaaninmuodostuksessa kiinnitettiin huomiota pH:n pitämiseen optimaalisena lisäämällä tarvittaessa emästä reaktoriin. Kaasuntuotto saatiin käynnistymään ja jatkumaan kaksivaiheisuuden sekä reaktorin ruokkimisen ansiosta.</p> <p>Reaktorin sisälle saatiin vakaat olosuhteet ja biokaasua saatiin muodostumaan, vaikka määrät jäivät pieniksi aiempiin tutkimustuloksiin verrattuna. Olosuhteet eivät kuitenkaan olleet optimaaliset, koska reaktorista puuttui sekoitus. Anaerobisten olosuhteiden ylläpitäminen ei onnistunut, koska näytteenottoa varten reaktori piti aina avata. Suuri mädätettävän materiaalin määrä aiheutti liiallista pH:n laskua ja hidasti täten metaania muodostavien arkkien toimintaa. Uuden reaktorin rakentamisessa ja käyttöönotossa tulisikin kiinnittää erityistä huomiota muun muassa reaktorin tiiviyteen, biomassan määrään, sekoitukseen ja pH:n reaaliaikaisen mittaamiseen.</p>	
Avainsanat	anaerobinen hajoaminen, mädätys, biokaasu, biokaasureaktori

Author(s) Title Number of Pages Date	Maarit Luoranen Biogas production from plant biomass in a laboratory-scale anaerobic digester 43 pages 29 April 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Instructor(s)	Pekka Lehtonen, Principal Lecturer Jarmo Palm, Lecturer
<p>In this thesis project a literature review was conducted on the stages of anaerobic digestion, processes for biogas production and start-up and operation factors of biogas process. A laboratory-scale anaerobic digester will be completed for the chemical engineering laboratory facilities of Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. The results of this thesis project will be used in the design and construction of the new anaerobic digester.</p> <p>In the experimental part of the project, a simple laboratory-scale anaerobic digester was built. The aim of the experiments was to study the possible problems which may occur during the anaerobic digestion. The reactor was started in batch style. Several experiments were made focussing on the problems perceived when starting a new batch experiment. The two-stage process was also tested. It meant that the three stages of the anaerobic digestion were carried out before the actual formation of methane. Then material which already included bacteria was added to the reactor in order to ensure microbial population. A small amount of new biomass was also added to the reactor so that there was enough nutrient to microbes. It was important to keep the optimum pH at the stage of methane production by adding alkali to the reactor when needed. The gas yield started and continued when the reactor was operated in the two-stage mode and when new biomass was added.</p> <p>The circumstances were made stable inside the reactor and biogas was formed even though the amount was small compared to the previous research results. The conditions were not optimal inside the reactor because the reactor missed a mixture. Maintaining anaerobic conditions was not successful because the reactor had to be opened when taking a sample. A large amount of biomass caused a fall in pH and slowed down the activity of methane-forming microbes. In the construction of the new reactor, special attention should be paid to the compactness of the reactor, the amount of biomass, mixing and the measuring of pH in real time.</p>	
Keywords	anaerobic digestion, digestion, biogas, anaerobic digester

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Biokaasu	3
3	Anaerobinen hajoaminen ja biokaasun tuotanto	5
3.1	Anaerobinen hajoaminen	5
3.2	Anaerobisen hajoamisen vaiheet	5
3.3	Biokaasun tuotannon raaka-aineet	8
4	Biokaasuprosessityypit	10
4.1	Psyko-, meso- ja termofiilinen prosessi	10
4.2	Panostoiminen prosessi	11
4.2.1	Yksivaiheinen prosessi	12
4.2.2	ASBR	12
4.2.3	Panos-UASB-prosessi	13
4.2.4	Fed-batch-reaktori	14
4.3	Jatkuvatoiminen prosessi	15
4.4	Märkäprosessi	16
4.5	Kuivaprosessi	19
4.5.1	Panostoiminen kuivaprosessi, suotopetireaktori	20
4.5.2	Jatkuvatoiminen kuivaprosessi, tulppavirtausreaktori	21
4.6	Yksi- ja monivaiheinen prosessi	22
5	Prosessin toimintaan vaikuttavia tekijöitä	23
5.1	pH ja alkaliniteetti	23
5.2	C/N-suhde	25
5.3	Viipymä ja kuormitus	25
5.4	Hajoamista hidastavat tekijät	26
6	Mädätyskokeet	27
6.1	Mädätysreaktorin rakenne	27
6.2	Prosessityyppi ja olosuhteet	28
6.3	Mädätettävän materiaalin valinta	28
6.4	Reaktorin käynnistäminen	28

6.5	Mikrobidiversiteetin määrittäminen	29
7	Kokeiden toteutus ja tulokset	29
7.1	Koe 1	30
7.2	Koe 2	31
7.3	Koe 3	31
7.4	Koe 4	32
7.5	Koe 5	36
8	Mikrobidiversiteetin analyysitulokset	38
9	Huomioitavia asioita	38
10	Johtopäätelmät	39
	Lähteet	40

1 Johdanto

Mädätystekniikalla tuotetun energian määrä on jatkuvasti lisääntymässä maailmalla. Biomassoihin varastoitunut energia saadaan mädätyksen avulla hyötykäyttöön, jolloin jätteeksi päätyvä määrä pienenee oleellisesti. Jatkuva tutkimus- ja kehitystyö mädätystekniikassa parantavat jo olemassa olevien mädätyslaitosten hyötysuhteita sekä auttavat rakentamaan entistä tehokkaampia laitoksia.

Metropolia Ammattikorkeakoulu on aloittanut mädätykseen liittyvän tutkimus- ja kehitystyön. Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tehdä kirjallisuusselvitys anaerobisen hajoamisen vaiheista, biokaasun tuotannon raaka-aineista, erityyppisistä biokaasun tuotantoprosesseista ja biokaasuprosessin käynnistämiseen sekä toimintaan vaikuttavista tekijöistä. Insinööriyön tuloksia hyödynnetään Metropolia Ammattikorkeakoulun kemiantekniikan laboratorioon parhaillaan rakennettavan laboratoriomittakaavan biokaasureaktorin suunnittelussa ja rakentamisessa. Reaktori rakennetaan yhteistyössä automaatiotekniikan koulutusohjelman kanssa. Biokaasureaktorin rakentamisen ja käyttöönoton tarkoituksena on palvella mahdollisimman hyvin nykyisiä ja tulevia opetus- ja tutkimustarpeita ammattikorkeakoulun eri koulutuslinjoilla.

Tämän insinööriyön kokeellista osiota varten rakennettiin yksinkertainen mädätysreaktori, jonka koeajoilla pyrittiin saamaan tietoa mädätysprosessista ja mahdollisista vastaantulevista ongelmista. Kokeellisen osion tutkimustuloksia voidaan hyödyntää rakennettaessa uutta biokaasureaktoria.

EU on asettanut vuonna 2008 tavoitteeksi, että 20 % energiasta tuotetaan uusiutuvalla energialla vuoteen 2020 mennessä. Suomen tavoite on tuottaa 38 % uusiutuvilla energialähteillä samaiseen vuoteen mennessä. Liikenteen polttoaineista 10 % on tuotettava uusiutuvista lähteistä. (1.) Tavoitteiden taustalla on ilmastomuutoksen hidastaminen sekä kasvihuonekaasu- ja hiukkaspäästöjen vähentäminen. Ilmastomuutoksen lisäksi näköpiirissä oleva öljyvarojen ehtyminen pakottaa kehittämään vaihtoehtoisia polttoaineita. (2.) Uusiutuvan energian käytön lisäämisellä voidaan kehittää kotimaista energiateknologiaa, ja tällä tavoin energiaomavaraisuusaste nousisi, kun energiansaanti ei olisi riippuvaista ulkomaisista toimittajista (3, s. 35–36).

Valtaosa uusiutuvasta energiasta on peräisin auringon säteilystä. Auringon säteilyä varastoituu kasvibiomassaan kemiallisena energiana fotosynteesin eli yhteyttämisen kautta. Varastoitunutta energiaa voidaan hyödyntää bioenergiateknologian avulla. Bioenergia voi olla esimerkiksi biomassasta tuotettua energiaa. (4, s. 4–5.)

Biomassasta tuotettu biokaasu on eräs uusiutuvista energialähteistä. Biokaasu on kaasuseos, jota muodostuu mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa. Biokaasu koostuu pääosin metaanista ja hiilidioksidista. (5; 6.)

Biokaasun sisältämä metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Vapaasti ilmakehään päästessään metaani on yli 20 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu. (5; 7; 8, s. 12.) Biokaasusta voidaan jalostaa puhdasta metaania ajoneuvojen polttoaineksi. Käyttämällä metaania polttoaineena uusiutumattomien luonnonvarojen sijaan voidaan kasvihuonekaasupäästöjä vähentää merkittävästi. (5; 9, s. 26.) Biokaasu on energialähteenä arvokasta ja uusiutuvaa, ja sen ympäristöedut ovat huomattavat. Biokaasua voidaan polttaa ja hyödyntää vapautuva energia sähkön- ja lämmöntuotannossa. (5; 10, s. 152.) Biokaasun talteenotolla ja hyötykäytöllä on siis merkittäviä ympäristönäkökohtaisia etuja (5).

Biokaasun tuotannon edelläkävijämaa on Saksa, joka tuottaa biokaasulla energiaa yli 22 000 GWh vuodessa (11). Suomessa biokaasua tuotettiin 144,49 milj. m³ vuonna 2009, ja lisäksi kaatopaikoilta kerättiin kaasua yhteensä 110,9 milj. m³. Biokaasulla tuotettu energiamäärä oli 436,4 GWh (lämpöenergiaksi 378,3 GWh ja sähköksi 58,1 GWh). Määrä on alle 1 % Suomessa tuotetusta energiamäärästä. Biokaasun hyödyntämistä tulisikin lisätä, sillä mahdollisuuksia tähän kuitenkin on. Sähkö- ja lämpöenergian lisäksi biokaasusta voidaan jalostaa ajoneuvopolttoainetta. Suomessa toimii tällä hetkellä vain yksi ajoneuvopolttoainetta jalostava laitos. Viime aikoina onkin lisätty polttoaineisiin liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä, joiden tarkoituksena on selvittää polttoaineena käytettävän biokaasun lisäämistä ja verkostoitumista laajemmalle. (8, s. 13.)

Metropolia Ammattikorkeakoulu haluaa omalta osaltaan perehtyä mädätystekniikkaan, sillä tässä insinööriyössä ja myös myöhemmin suoritettavien kokeiden avulla saatu

tieto auttaa parantamaan esimerkiksi opiskelijoiden mahdollisuuksia työllistyä tällä osa-alueella.

2 Biokaasu

Biokaasun koostumus on tyypillisesti 40–70 % metaania (CH_4) ja 30–60 % hiilidioksidia (CO_2) (5; 8, s. 11). Biokaasun koostumus vaihtelee orgaanisen aineksen koostumuksen mukaan. Biokaasu voi lisäksi sisältää pieniä määriä muita yhdisteitä, kuten typpeä (N_2), rikkivetyä (H_2S) ja hiilimonoksidia (CO). Yleensä näiden pitoisuudet ovat alle yhden prosentin. (5; 6; 12.)

Biokaasua muodostuu luonnossa jatkuvasti paikoissa, joissa happea ei ole läsnä, kuten soilla, vesistöjen pohjakerroksissa, kaatopaikoilla ja eläinten suolistossa (5; 6; 8, s. 11).

Biokaasua voidaan tuottaa kontrolloidusti useilla erilaisilla teknisillä vaihtoehdoilla, kuten biokaasureaktoreilla, tai biokaasua voidaan kerätä kaatopaikoilta pumppaamalla. Biokaasua voidaan tuottaa lähes kaikesta biomassasta. Tärkeimpiä lähteitä ovat jätevedenpuhdistamojen lietteet, kaatopaikkojen hallittu kaasunkeräys, eläinten lanta, teurastamo- ja biojätteet sekä peltobiomassat. (8, s. 11; 13; 14.) Biokaasun tuotantoprosessia voidaan kutsua mädätykseksi, anaerobiseksi käsittelyksi tai biokaasutukseksi (5). Biokaasu soveltuu lämpöarvoltaan, joka on noin 5,0–5,5 kWh/m³, hyvin energiantuotantoon. Maakaasun vastaava arvo on 10 kWh/m³. (15.)

Kuviossa 1 on esitetty biokaasuprosessin kulku mädätettävän materiaalin vastaanotosta aina tuotetun biokaasun hyötykäyttöön asti.



Kuvio 1. Biokaasun tuotantoketju. Tuotannossa raaka-aineina käytetään maatalous-, jätevedenpuhdistamo-, yhdyskunta- ja kotitalousjätteitä. Mädätysreaktorissa tapahtuu materiaalin hajoamista, jonka seurauksena syntyy biokaasua. Mädätysjäännöstä hyötykäytetään esimerkiksi lannoitteena. (16.)

Biokaasu on ympäristöystävällistä energiaa, koska se tuotetaan uusiutuvista luonnonvaroista. Biokaasu on hyvin samanlaista fossiilisen maakaasun kanssa, joissa kummasakin pääyhdisteenä on metaani. Maakaasun hiilidioksidi on kuitenkin kierrosta poistunut ja maan alle varastoitunutta, ja maakaasua poltettaessa tämä varastoitunut hiilidioksidi pääsee ilmakehään kasvattaen kasvihuonepäästöjä. Biokaasun hiilidioksidi taas on peräisin biomassasta, joiden hajotessa hiilidioksidi vapautuisi silti ilmakehään riippumatta siitä, otetaanko biokaasu talteen vai ei. Toisin sanoen biokaasun käyttö ei lisää ilmakehän hiilidioksidin määrää, joten energiantuotannon ja ympäristöystävällisyyden kannalta biokaasun käyttö on järkevää. (17.)

Suomessa toimi vuoden 2009 lopussa 19 biokaasureaktorilaitosta jätevedenpuhdistamoiden tai teollisuuden yhteydessä. Maatilojen yhteydessä oli 10 laitosta. Yhdyskuntajätteitä käsiteltiin neljässä yhteismädätyslaitoksessa. Lisäksi suunnitteilla on 10 uuden laitoksen rakentaminen maatilojen yhteyteen. (8, s. 23–24.)

3 Anaerobinen hajoaminen ja biokaasun tuotanto

3.1 Anaerobinen hajoaminen

Mätäneminen on orgaanisen aineksen hajoamista anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa. Mätäneminen on biologinen prosessi, joka perustuu useiden eri mikrobien yhteistoimintaan. Mikrobit hajottavat orgaanisen aineksen ravinteita, ja tämän toiminnan seurauksena syntyy biokaasua. Mikrobikanta koostuu usein jopa 30–40 eri bakteerityypistä, jotka elävät yhdessä ja ovat riippuvaisia toisistaan. Mikrobien kannalta katsottuna biokaasu on vain hyödytön sivutuote niiden metabolisen toiminnan seurauksena. (18.)

3.2 Anaerobisen hajoamisen vaiheet

Mädätysprosessi tapahtuu ketjussa, joka voidaan pilkkoa neljään päävaiheeseen. Nämä vaiheet ovat hydrolyysi, asidoneesi eli happokäyminen, asetogeneesi eli etikkahapon muodostuminen ja metanogeneesi eli metaanintuotto. (10, s. 153–154; 19; s. 405–406.) Jokainen vaihe sisältää eri mikrobien aikaansaamia erilaisia biokemiallisia reaktioita (10, s. 154).

Ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hajottavat käsiteltävän materiaalin sisältämät suurimolekyyliset yhdisteet, joita ovat hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat, yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi, joita ovat esimerkiksi sokerit, pitkäketjuiset rasvahapot (Long Chain Fatty Acids, LCFA), glyseroli ja aminohapot. (19, s. 405; 20, s. 4–5.) Hydrolyysivaihe voi olla hidaskäyminen riippuen käsiteltävän materiaalin koostumuksesta, joten vaihe voi olla koko anaerobisen hajoamisprosessin ajallisesti rajoittavin vaihe (19, s. 405).

Ensimmäisessä vaiheessa läsnä ovat fakultatiiviset (joko hapellinen tai hapeton elinympäristö) tai ehdottoman anaerobiset bakteerit, joita ovat muun muassa *Streptococcus*, *Peptococcus*, *Micrococcus* ja *Clostridium* (19, s. 405).

Toinen vaihe on asidoneesi, jossa anaerobiset bakteerit hajottavat ensimmäisen vaiheen hydrolyysituotteet lyhytketjuisiksi rasvahapoiksi (Short-Chain Fatty Acids, SCFA),

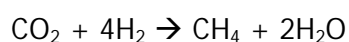
hiilidioksidiksi ja vedyksi (19, s. 405). Lyhytketjuisia rasvahappoja ovat muun muassa etikka-, propioni-, maito- ja voi happo. Pieni määrä alkoholeja, kuten metanolia, etanolia, glyserolia ja butanolia, sekä muita liuottimia, kuten asetonia, voi myös muodostua riippuen käsiteltävän materiaalin koostumuksesta ja käytettävästä prosessista. (19, s. 405.)

Asidoneesivaiheessa mädätysprosessi voi epäonnistua, mikäli käsiteltävää jätettä, joka sisältää helposti hajoavaa materiaalia, syötetään reaktoriin suuria määriä, koska tällöin rasvahappoja muodostuu liikaa aiheuttaen prosessiin epäedulliset olosuhteet (4, s. 27; 19, s. 405). Toisessa vaiheessa läsnä olevia bakteereita ovat muun muassa *Clostridium*, *Pseudomonas* ja *Ruminococcus* (19, s. 405).

Kolmas vaihe on asetogeneesi, jossa vetyä ja asetaattia tuottavat asetogeeniset bakteerit (kuten *Syntrophomonas wolfei* ja *Syntrophobacteri wolinii*) hajottavat lyhytketjuiset rasvahapot asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi (10, s. 154; 19, s. 405). Bakteerit muuttavat edellä mainittuja tuotteita vain niistä yhdisteistä, joissa hiiliä on kolme tai enemmän. Tämä vaihe on mädätysprosessin toinen rajoittava vaihe johtuen asetogeenisten bakteerien hitaasta kasvusta. (19, s. 405.)

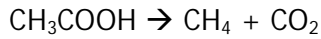
Neljäs eli viimeinen vaihe on metanogeneesi, jossa metanogeeniset arkit tuottavat kolmannen vaiheen yhdisteistä metaania ja hiilidioksidia. Tämä vaihe on koko mädätysprosessin kolmas rajoittava vaihe, koska metanogeenit ovat riippuvaisia muun muassa prosessin pH:sta ja lämpötilasta. (10, s. 155; 19, s. 405.) Metanogeenit ovat erityisen herkkiä pH:n muutoksille, ne kasvavat hitaasti ja ovat ehdottoman anaerobisia. (10, s. 155; 19, s. 405; 21). Lisäksi arkit pystyvät hajottamaan vain yhdisteitä, joissa on vähemmän kuin kaksi hiiliatomia. Tämän takia muiden bakteerien on ensin hajotettava materiaali asetaatiksi tai vedyksi ja hiilidioksidiksi. (4, s. 22–23; 22, s. 39–47.)

Metanogeeniset arkit jaetaan kahteen alakategoriaan sen mukaan, mitä yhdisteitä ne käyttävät hyväkseen metaanin muodostuksessa. Hydrogenotrofiset metanogeenit tuottavat hiilidioksidista ja vedystä metaania (10, s. 154; 19, s. 406–407):



Hydrogenotrofisia metanogeeniä ovat esimerkiksi *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter* ja *Methanococcus* (19, s. 407).

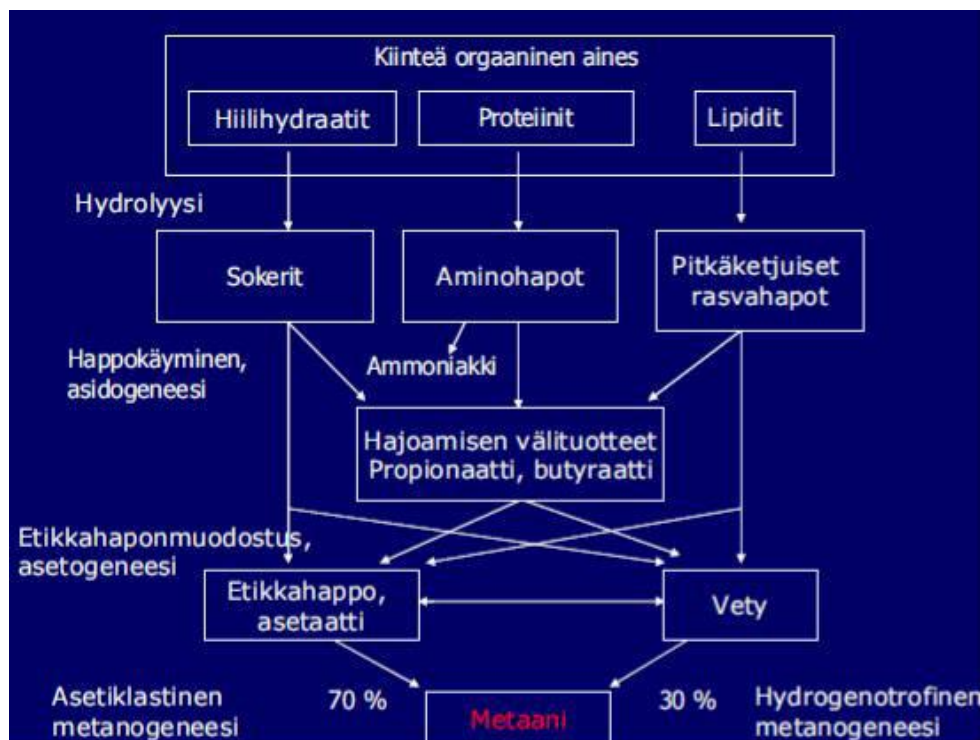
Asetiklastiset metanogeenit muuntavat asetaatista metaania (10, s. 154; 19, s. 407):



Asetiklastisia metanogeeniä ovat *Methanosarcina* ja *Methanosaeta* (10, s. 155; 19, s. 407).

Asetiklastiset metanogeenit tuottavat noin 70 % syntyvästä metaanikaasusta, ja loput tulevat hydrogenotrofisten metanogeenien tuotoksesta (19, s. 407; 23, s. 30). Tämän takia on mielenkiintoista huomata, että biokaasun sisältämän metaanin suhde hiilidioksidiin on aina suurempi kuin yksi (18).

Kuviossa 2 on esitetty anaerobinen hajoamisprosessi. Kuviossa näkyvät tärkeimmät vaiheet ja tuotteet.



Kuvio 2. Orgaanisen aineen hajoaminen neljässä päävaiheessa anaerobisessa ympäristössä ja eri vaiheiden tärkeimmät tuotteet (23, s. 30).

3.3 Biokaasun tuotannon raaka-aineet

Biokaasua voidaan tuottaa mädättämällä kaikesta orgaanisesta jätteestä puuta ja muuta paljon ligniiniä sisältävää ainesta lukuun ottamatta, koska ligniini hajoaa hitaasti (5). Tärkeimpiä biokaasun raaka-aineita ovat teuraseläintuotannon jätteet, peltobiomassat, biojätteet ja jätevedenpuhdistamolietteet. Raaka-aineita voidaan käsitellä yksin tai niitä voidaan sekoittaa keskenään. (9, s. 26; 24.) Yhteiskäsittely voi tasapainottaa käsiteltävän materiaalin ravinnekoostumusta, jolloin orgaanisen aineksen hajotus paranee ja metaanintuotto lisääntyy (6). Vaikeasti käsiteltäviä materiaaleja voidaan laimentaa lannan avulla, jolloin käsittely helpottuu (14).

Taulukosta 1 voidaan todeta, että teurastamo- ja biojätteen metaanintuottopotentiaali on korkea, sillä jätteestä saadaan metaania jopa 500–600 m³ tonnia orgaanista ainetta kohden (4, s. 19). Tämä tarkoittaa sitä, että vain 1 kg orgaanista ainesta voi tuottaa jopa 500–600 dm³ metaania. Karkeasti sanottuna 1 m³ metaania vastaa yhtä litraa öljyä, joka vastaa noin 10 kWh:a sähköenergiaa. (9, s. 27.)

Taulukko 1. Esimerkkejä eri syötteiden metaanintuottopotentiaaleista (9, s. 27; 23, s. 23).

Syöte	Metaanintuottopotentiaali	
	m ³ CH ₄ /t orgaanista ainetta	m ³ CH ₄ /t märkäpaino
Teurastamojäte	570	150
Biojäte	500–600	100–150
Energiakasvit	300–500	30–150
Jätevesiliete	310–640	8–16
Lanta	100–400	7–20

Eläinten lanta on hyvä perusmateriaali biokaasuprosessiin, koska se sisältää monipuolisesti mikrobien tarvitsemia ravinteita ja sen puskurikapasiteetti on korkea. Puskurikapasiteetilla tarkoitetaan materiaalin kykyä estää pH:n vaihtelut. Mitä suurempi kapasiteetti on, sitä paremmin se estää pH:n muutokset. (9, s. 26.) Lantaa on lisäksi saatavana suuria määriä ja sitä on helposti saatavilla (24). Käsittelemällä pelkästään lantaa metaanintuotto reaktoritilavuutta kohden jää kuitenkin usein alhaiseksi lannan vähäisen kuiva-ainepitoisuuden takia. Tästä johtuen biokaasulaitoksen metaanintuottoa parannetaan yhteiskäsittelyllä, jossa lantaa ja muuta materiaalia käsitellään yhdessä. (9, s. 26.)

Puhdistamolietettä syntyy jätevedenpuhdistuksesta. Puhdistamolietete on lannan ohella hyvä perusmateriaali. Puhdistamolietteen mädätyksessä lisäkustannuksia tuovat sen sisältämät taudinaiheuttajat, joten lietteen hygienisointi ennen jatkokäyttöä on tärkeää. (24.)

Peltobiomassoihin lukeutuvat erityisesti energiantuotantoa varten viljellyt kasvit ja kasvintuotannon sivutuotteet sekä jätteet. Kasvibiomassat soveltuvat hyvin biokaasun tuotantoon, koska useimpien kasvien metaanintuottopotentiaali on 300–450 dm³ metaania/ 1 kg orgaanista ainetta. Rehuna käytettävät heinäkasperit ovat helppoja viljellä, ja ne ovat vaatimattomia kasvuolosuhteiltaan. Rehukasvit soveltuvat hyvin biokaasun tuotantoon juuri vaatimattomuutensa ja helppoutensa ansiosta. Rehukasvit ovat lisäksi helppoja varastoida, ja varastointi usein jopa parantaa kasvien metaanintuottopotentiaalia. (9, s. 26.) Taulukossa 2 on esitetty muutamien eri kasvien metaanintuottopotentiaaleja.

Taulukko 2. Esimerkkejä eri kasvien metaanintuottopotentiaaleista (9, s. 27).

Kasvi	Metaanintuottopotentiaali		
	dm ³ CH ₄ /kg orgaanista ainetta	dm ³ CH ₄ /kg kuiva-ainetta	m ³ CH ₄ /t märkäpaino
Ruokohelpi	340–430	330–420	97–167
Timotei-apila-nurmi	370–380	340–360	72–85
Maa-artisokka	360–370	340	93–110
Virna-kaura	400–410	370	57–95
Nokkonen	210–420	170–360	25–60
Lupiini	310–360	290–330	40–41
Rehukaali	310–320	280–290	37–38
Apila	280–300	260–270	41–68
Sokerijuurikas (juurikas+naatti)	450	400	80
Sokerijuurikas (pelkät naatit)	340	290	34
Olki	240–320	220–290	199–260

Hehtaarista heinäsatoa voidaan tuottaa noin 2 000–3 000 m³ metaania, joka vastaa 20–30 MWh energiaa. Jos kyseinen metaanimäärä käytettäisiin henkilöautojen poltto-

aineena, se riittäisi vuosittain noin 25 000–40 000 ajokilometriin. Henkilöauto kuluttaa metaania keskimäärin noin 8 m^3 100 km:ä kohden. Tällä määrällä voitaisiin siis kattaa yhden tai kahden henkilöauton vuotuiset polttoainekulutukset. (9, s. 27.)

4 Biokaasuprosessityypit

Biokaasun tuotantovaiheet ovat mädätettävän materiaalin vastaanotto ja esikäsittely, mädätys eli reaktorivaihe, mädätysjäännöksen jälkikäsittely, biokaasun puhdistus, kaasun jalostus ja paineistus (11). Esikäsittelyssä biomassassa esimerkiksi murskataan, jolloin biomassan pinta-ala kasvaa ja kaasuntuotto paranee.

Biokaasuprosessit voidaan jaotella monella eri tavalla. Seuraavassa on esitetty jaottelu lämpötilan, syöttötavan, kiintoainepitoisuuden ja prosessin vaiheiden lukumäärän mukaan.

4.1 Psykro-, meso- ja termofiilinen prosessi

Mädätysprosesseja voidaan operoida eri lämpötiloissa. Usein prosessit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan lämpötilansa perusteella: psykro-, meso- ja termofiiliseen prosessiin. (10, s. 157.) Lämpötila valitaan usein bakteerien optimilämpötilan alueelta, jolloin saadaan hyvät prosessiolosuhteet ja kaasuntuotanto voidaan maksimoida (4, s. 31).

Psykrofiilinen lämpötila-alue on 0–15 °C (22, s. 19–21). Psykrofiilistä prosessia operoidaan lämpötilassa 10–15 °C. Prosessia sovelletaan subtrooppisilla ja trooppisilla ilmastovyöhykkeillä, koska ympäristön lämpötila riittää prosessin lämmittämiseen. Reaktorit ovat edullisia rakentaa ja niitä on helppo operoida, koska ylimääräistä lämmitystä ei tarvita. (10, s. 157.)

Psykrofiilisen prosessin haittapuolena on verrattuna meso- ja termofiilisiin prosesseihin, että hajoamisreaktiot tapahtuvat hitaasti, koska alhaisissa lämpötiloissa mikrobien toiminta on hidasta. Käsittelyajat on pidettävä pitkinä tai reaktorit on rakennettava suuriksi, jotta biokaasun tuottaminen olisi taloudellisesti kannattavaa. (10, s. 157.)

Mesofiilisille bakteereille lämpötila-alue on 15–45 °C (22, s. 19–21). Mesofiilista prosessia operoidaan yleisimmin lämpötilassa 35–37 °C (23, s. 29). Mesofiilinen prosessi on yleisin käytössä oleva prosessi, koska se on helppo käynnistää, vakaa toiminnaltaan ja mikrobien toiminta on kohtuullisen nopeaa (10, s. 158). Lämmityksen tarve mesofiilissä prosessissa on pieni, jolloin energiaa kuluu vähemmän (4, s. 31–32).

Mesofiilisen prosessin mädätysjäännöksen hygieenisuus ei kuitenkaan yllä termofiilisen prosessin tasolle, koska matala lämpötila ei eliminoi patogeenejä eli taudinaiheuttajia. Mädätysjäännös on hygienisoitava erikseen ennen jatkokäyttöä. (14.)

Termofiilisen prosessin lämpötila-alue on 50–75 °C. Termofiilisten bakteerin optimaalinen kasvualue on 50–60 °C. (22, s. 19.) Termofiilisessä prosessissa käsiteltävän materiaalin hajoaminen on nopeampaa ja mädätysjäännöksen koostumus hygieenisempää taudinaiheuttajien kuollessa prosessin aikana korkean lämpötilan johdosta (4, s. 31–32). Nopean hajoamisen vuoksi prosessin kuormitus on korkeampaa ja reaktorirakenteet ovat pienempiä (14). Termofiilinen prosessi saattaa myös tuottaa enemmän biokaasua kuin alemmissä lämpötiloissa toimivat prosessit (4, s. 31–32).

Termofiilisen prosessin käynnistäminen voi olla hidasta ja hankalaa korkean lämpötilan takia (10, s. 161). Prosessi on herkkä pH:n ja lämpötilan muutoksille. Inhiboivat tekijät eli tekijät, jotka aiheuttavat mikrobitoiminnan hidastumista, vaikuttavat kyseiseen prosessiin myös herkemmin. Ammoniakki on yksi metaanintuottoa inhiboiva tekijä, jonka määrä nousee pH:n ja lämpötilan noustessa. Lisäksi termofiilisen prosessin materiaalin nopea hajoaminen voi johtaa liukoisen orgaanisen aineen kasvuun ja sitä kautta rasvahappojen kertymiseen, mikä myös vähentää metaanintuottoa. (4, s. 32.) Termofiilinen prosessi kuluttaa enemmän energiaa, koska lämmöntarve on suurempi (23, s. 34).

4.2 Panostoiminen prosessi

Biokaasureaktorit voidaan jakaa kahteen perustyyppiin sen mukaan, onko kyseessä panos- vai jatkuvatoiminen prosessi (10, s. 182). Panosprosessissa biokaasureaktori täytetään halutulla määrällä syötettä, minkä jälkeen reaktori suljetaan. Materiaalin annetaan hajota haluttu aika, ja lopuksi reaktori tyhjenetään. Uuteen käsiteltävään mädätysjärään lisätään usein jo käsiteltyä materiaalia eli ymppiä, joka sisältää mädätys-

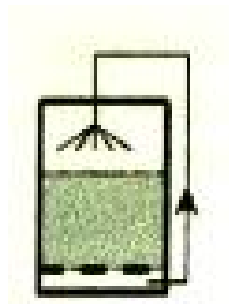
bakteereja. Ympin lisäyksellä taataan hajotusprosessin nopeampi ja varmempi käynnistyminen. (24.) Ympin määrän tulisi olla vähintään 10 % reaktorin tilavuudesta, joten ympin lisäys on huomioitava prosessin mitoituksessa (22, s. 63; 24).

Panosprosessia käyttävässä laitoksessa reaktoreita on useita rinnakkain, jolloin kaasuntuotto on tasaisempaa, koska kaasuntuoton käynnistyminen uudessa panoksessa kestää useita päiviä. Panosreaktorin täyttö ja tyhjennys ovat aikaa vieviä vaiheita, mutta muuten panosprosessi voi toimia vähällä hoidolla. (4, s. 34.)

Panosprosessit jaetaan kolmeen perustyyppiin, jotka ovat yksivaiheinen prosessi (single-stage), peräkkäispanosprosessi (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR) ja panos-UASB-prosessi (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) (25).

4.2.1 Yksivaiheinen prosessi

Yksivaiheisessa prosessissa on nestekierrätys, eli reaktorin pohjasta kerättyä nestettä kierrätetään takaisin reaktoriin yläosasta. Suotopetireaktori, joka esitetään kohdassa 4.5.1, toimii tämän periaatteen mukaan. Kuviossa 3 on esitetty yksivaiheisen prosessin toimintaperiaate.

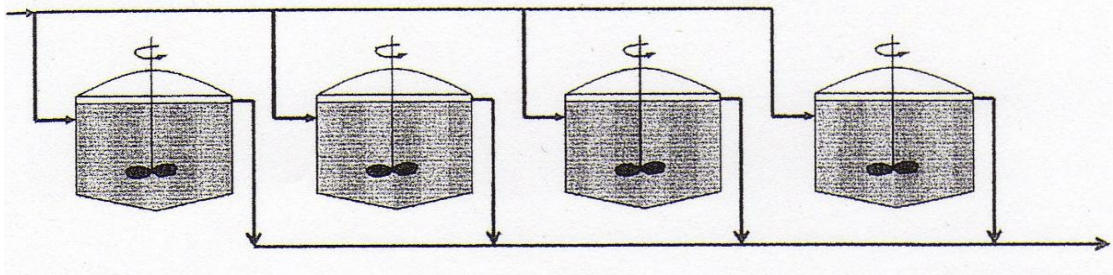


Kuvio 3. Single-stagen eli yksivaiheisen prosessin perusrakenne (25).

4.2.2 ASBR

ASBR:n toiminta sisältää neljä vaihetta, jotka ovat kuormitus, reaktio, laskeutuminen ja kaataminen (toiseen astiaan). Kuormituksessa orgaaninen aine siirretään reaktoriin. Reaktiovaiheessa tapahtuu anaerobinen hajoaminen, ja vaiheen kesto on 15–30 päi-

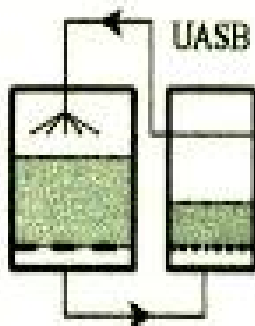
vää. Reaktiovaiheen jälkeen sekoitus lopetetaan, jolloin kiintoaines laskeutuu pohjalle. Yläpuolelle erottunut neste poistetaan reaktorista, ja pohjalle laskeutunut aines käytetään ympäriin seuraavan panoksen käynnistyksessä. Ensimmäisen panoksen käynnistyminen vie yleensä aikaa, mutta muodostunut mädäteaine pysyy hyvin stabiilina seuraavissa panoksissa. ASBR:n etuja ovat tehokkuus ja stabiilisuus. (10, s. 192–193.) Kuviossa 4 on ASBR:n toimintaperiaate.



Kuvio 4. ASBR:n toimintaperiaate (10, s. 193).

4.2.3 Panos-UASB-prosessi

Panos-UASB-yhdistelmä toimii kuten kaksivaiheinen prosessi. Ensimmäinen reaktori on tavallinen panosreaktori. Toisessa reaktorissa tapahtuu metaanintuotto, ja reaktori-tyyppinä on UASB, joka esitetään tarkemmin kohdassa 4.3. (25.) Kuviossa 5 on esitetty panos-UASB:n toimintaperiaate.



Kuvio 5. Panos-UASB-prosessin toimintaperiaate. Panosreaktorin yhteydessä on UASB-reaktori, jolloin metaaninmuodostumisvaihe voidaan suorittaa erillään muista vaiheista. (25.)

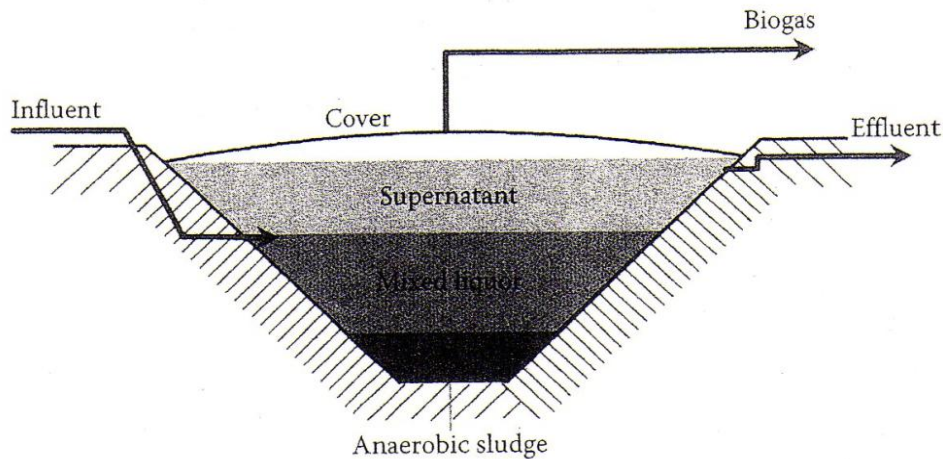
4.2.4 Fed-batch-reaktori

Fed-batch-reaktori toimii kuten panosreaktori, mutta erona on reaktorin täyttötyyli. Reaktoriin syötetään alussa materiaalia vain osittain, minkä jälkeen materiaalin annetaan hajota melkein loppuun. Tämän jälkeen lisätään taas syötettä niin monta kertaa, kunnes reaktori on täynnä, jolloin se tyhjennetään ja täytetään taas osittain. Fed-batch-reaktorit ovat tilavuudeltaan suuria, yksinkertaisia sekä edullisia. Reaktoria käytetään usein matalan kiintoainepitoisuuden omaavalle syötteelle. (22, s. 14–15, 182–185.)

Tyypillinen fed-batch-reaktori on niin sanottu laguunissa toimiva reaktori. Laguuni on vanhin ja yksinkertaisin mädätysprosessi. Se voi olla avoin tai peitetty, sekoittamaton tai sekoituksella toimiva. Reaktorissa ei ole erillistä lämmitystä, joten se toimii lämpötila-alueella 15–25 °C. Kyseisiä reaktoreita käytetäänkin usein vain subtrooppisilla tai trooppisilla vyöhykkeillä. (26.) Avoimen laguunin viipymäaika on 60–180 päivää. Avoimen laguunin ongelmia ovat erityisesti haju- ja ammoniakkipäästöt. (10, s. 193–194.)

Kaasuntuottoa ja mädätteen hygieenisyyttä voidaan parantaa peittämällä ja sekoittamalla (26). Peitettyyn laguuniin muodostuu anaerobisen käsittelyn aikana kolme osaa, jotka on esitetty kuviossa 6. Ylin osa koostuu nesteestä, jossa on mukana vain vähän kiintoainetta. Keskimmaisessä osassa tapahtuu biokaasun muodostuminen, kun syötetty orgaaninen aines ja anaerobinen bakteerikanta sekoittuvat. Vanhat bakteerit vajovat laguunin alimpaan osaan, jonne muodostuu sakea liete. Yleensä laguunissa ei ole sekoitusta, mutta sekoituksen avulla muodostuneiden kaasukuplien vapautuminen materiaalista helpottuu. Mahdollinen sekoitus tapahtuu keskimmaisessä osassa. Peitetyn laguunin viipymäaika on 50–70 päivää. (10, s. 193–194.)

Pitkien viipymäaikojen ansiosta laguuni sopeutuu orgaanisen kuormituksen ja kiintoaineen määrän vaihtelevuuteen. Vanhojen bakteerien hajoaminen vapauttaa ravinteita uusien bakteerien käyttöön. Laguunien rakentaminen on edullista ja operoiminen helppoa. Tärkein haittapuoli on laguunin suhteellisen suuri tilavuus, jolloin se vie paljon pinta-alaa. Biokaasun määrä on merkittävästi pienempi useimpiin muihin reaktoreihin verrattuna. (10, s. 193–194.)



Kuvio 6. Peitetty laguuni. Kuvassa on selvennetty sisään- ja ulostulovirrat sekä muodostuneen biokaasun kerääminen. Laguuniin muodostuu kolme osaa. Ylin osa eli supernatant-osa koostuu nesteestä, jossa on vähän kiintoainetta mukana. Mixed liquor -osassa tapahtuu kaasunmuodostuminen. Alin osa eli anaerobic sludge -osa koostuu vanhoista bakteereista. (10, s. 194.)

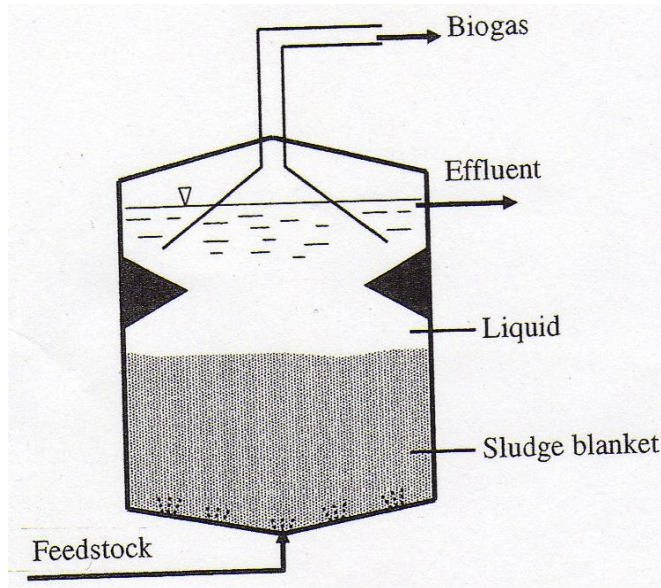
4.3 Jatkuvatoinen prosessi

Jatkuvatomisessa prosessissa käsiteltävää materiaalia pumpataan reaktoriin samalla kun sieltä poistuu käsiteltyä materiaalia. Jatkuvatomiseen reaktoriin ympin lisäksi on tarpeen vain prosessin käyttöönotossa. Jatkuvatomisilla prosesseilla on erilaisia teknologisia ratkaisuja, joista tyypillisimmät ovat jatkuvasekoitteinen (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR) ja tulppavirtausreaktori (Plug Flow Reactor, PFR). Reaktoryypit on esitetty kohdissa 4.4. ja 4.5.2. Aiemmin mainittua UASB:tä voidaan käyttää panostamisen reaktorin rinnalla, mutta itsessään kyseinen reaktoryyppi on jatkuvatoiminen. UASB esitellään tarkemmin seuraavassa. Käytettävä prosessi valitaan syötteen koostumuksen mukaan: esimerkiksi jatkuvasekoitteinen sopii lietemäisille syötteille, tulppavirtausreaktori taas kuivalle syötteelle. (24.)

UASB

UASB-reaktorin toiminta perustuu havaintoon, että anaerobisissa olosuhteissa lietteestä muodostuu rakeita, jotka asettuvat sopivaan muotoon reaktorin alaosaan muodostaen vaipan, johon tarvittava mädätysmikrobikanta muodostuu. Mädätettävä materiaali virtaa alhaalta ylöspäin vaipan läpi, jolloin mikrobit hajottavat materiaalia tuottaen biokaasua. Tulevaa materiaalia syötetään reaktoriin riittävällä nopeudella, jolla taataan

vaipan ja materiaalin sekoittuminen. Reaktorin alaosan toimiessa biokaasun muodostajana yläosassa tapahtuu kiinteä-neste-kaasuerotusta, jolloin vapautuvat biokaasukuplat voidaan kerätä nousevasta lietemassasta. (19, s. 417–418.) Kuvio 7 havainnollistaa UASB:n rakenteen.



Kuvio 7. UASB-reaktorin rakenne. Syöttö tapahtuu reaktorin pohjasta, jonne on muodostunut mikrobivaippa. Yläosassa tapahtuu nesteen, kiintoaineen ja kaasukuplien erottuminen. (19, s. 418–419.)

Rakeet muodostuvat bakteerien hyödyttäessä eli koaguloitessa epäorgaanista kiintoainesta. Rakeiden muodostuminen kestää yleensä muutamia kuukausia, ja halkaisijaltaan rakeet ovat 1–3 mm. (19, s. 418–419.)

UASB:tä käytetään jätevesilietteen mädätyksessä. Reaktori toimii parhaiten korkean hiilihydraattipitoisuuden jätevesilietteessä, suuret proteiinipitoisuudet pilaavat raemuodostuman. UASB:ssä ei tarvita erillistä lietteen kierrätystä, koska korkea orgaaninen kuormitus ei haittaa rakeiden toimintaa. Tämä vähentää huomattavasti reaktorin toimintakustannuksia. (10, s. 190–191.)

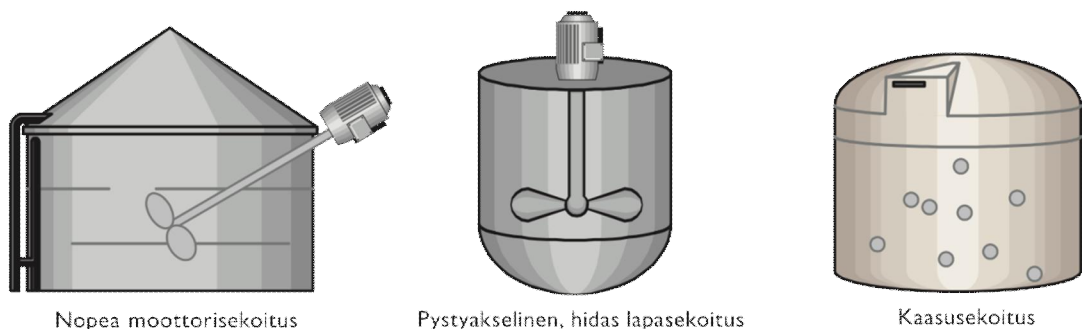
4.4 Märkäprosessi

Prosessityypit voidaan jakaa sen mukaan, missä muodossa mädätettävä materiaali syötetään reaktoriin. Märkäprosessi on perinteisin ja yleisin biokaasuprosessityyppi. (14;

27.) Märkäprosessissa käsitellään materiaaleja, joilla on alhainen kuiva-ainepitoisuus, tyypillisesti noin 10–13 %. Materiaali on lietemäistä, joten se pumpataan reaktoriin. (14.)

Märkäprosessin reaktorit ovat usein jatkuvatoimisia ja -sekoitteisia (14). Reaktorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja usein varmatoimisia. Märkäprosessin reaktorit sopivat myös pienten mädätysmäärien käsittelyyn. (27.) Reaktori tulisi mitoittaa noin 20–30 % suunniteltua käsiteltävää materiaalmäärää suuremmaksi. Tällöin mahdolliselle vaah-toamiselle, kaasun kerääntymiselle lietemassan päälle sekä mahdollisille syötemäärien vaihteluille jää tilaa. (23, s. 30.)

Reaktorin sekoitus tapahtuu mekaanisesti sekoittimien, lietteen kierrätyksen tai kaasuku- plien avulla. Sekoituksen tarkoituksena on taata hyvä kontakti mädätettävän materi- aalin ja mikrobien välillä, lämmön tasainen jakaantuminen reaktorissa ja muodostuneiden biokaasukuplien vapauttaminen materiaalista. (4, s. 32; 23, s. 31.) Kuviossa 8 on esitetty erilaisista sekoitintyypeistä moottori-, lapa- ja kaasusekoitus.



Kuvio 8. Erilaisia sekoitusratkaisuja, joita käytetään märkäprosessiin perustuvassa biokaasure- aktorissa (23, s. 31).

Märkäprosessilla toimivaan reaktoriin ei saa syöttää liian kuivaa materiaalia, koska täl- löin riski sekoittimien ja pumppujen toimintahäiriöille ja rikkoontumisille kasvaa (23, s. 24).

Märkäprosessin käsittelyaika on noin 12–30 vuorokautta, mikä riippuu käsiteltävän ma- teriaalin koostumuksesta, sekoituksesta ja käytetystä prosessista (23, s. 29). Märkä- prosessin lopputuotteen eli mädätteen jatkokäsittely tulee ottaa huomioon kustannuk-

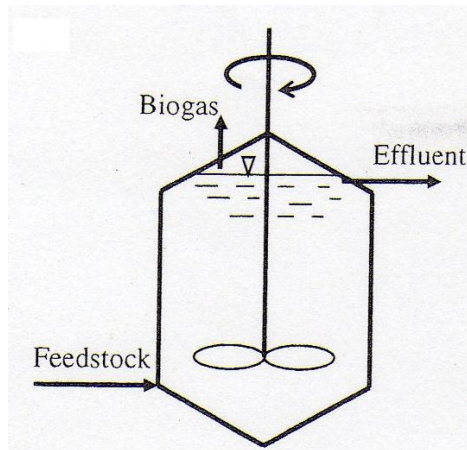
sisä. Määdätteelle on varattava varastointitilaa, ja sen kuivaus on suoritettava tehokkaasti. Määdätteen kiinteä aines voidaan levittää pelloille, mutta määdätteestä erotettava rejektiviesi on puhdistettava ennen jatkokäyttöä. (27.)

Märkäprosessin etuna kuivaprosessiin verrattuna on helpompi automatisointi ja hallittavuus. Kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohden saattaa kuitenkin jäädä alhaisemmaksi korkean nestepitoisuuden takia. (4, s. 32.) Kaasuntuottoa voidaan parantaa lisäämällä reaktoriin esimerkiksi peltobiomassoja, joiden lisäys ei kuitenkaan vaikuta reaktorikokoon (27). Märkäprosessireaktorin lämmittäminen vie energiaa noin 10–40 % tuotetun biokaasun energiasta (23, s. 30).

Jatkuvatoiminen ja -sekoitteinen märkäprosessi CSTR

Biokaasuteknologiassa yleisin käytössä oleva reaktorityyppi on jatkuvatoiminen ja -sekoitteinen eli CSTR (10, s. 183). CSTR on ensimmäinen kehitetty ja käyttöönotettu biokaasureaktori (19, s. 413). Käsiteltävä materiaali pumpataan reaktorin pohjalle, josta se virtaa ylöspäin sekoituksen vaikutuksesta ja poistuu reaktorin yläosasta. Reaktoriin tulevan ja sieltä poistuvan materiaalin virtaus on säädetty siten, että tilavuus reaktorin sisällä pysyy samana. (4, s. 34; 10, s. 183; 19, s. 413–414.) CSTR:n sisällä olevan massan pitoisuus pysyy aina samana, koska reaktorin sisällä tapahtuu laimentumista. Tämä tapahtuu siten, että kun reaktoriin syötetään materiaalia, sisällä olevan massan pitoisuus laskee samalle tasolle pois lähtevän jätteen kanssa. Kyseisen laimentumisilmiön ansiosta CSTR:ssä pystytään käsittelemään pitoisuuksiltaan vaihtelevia syötteitä tuotantotehon pysyessä aina hyvänä. (10, s. 183.) Keskimääräinen viipymäaika reaktoriin on 14–30 vuorokautta (24).

CSTR:n rakenne ja päävirrat on esitetty kuviossa 9. Biokaasu keräytyy reaktorin yläosaan. Yksinkertaisuutensa takia CSTR on helppo rakentaa ja operoida. (10, s. 183–184; 19, s. 413.) Jatkuvatoimisen prosessin etuna on tasainen kaasuntuotto ja automatisoinnin helppous (4, s. 34).



Kuvio 9. CSTR:n rakenne. Materiaalin syöttö tapahtuu reaktorin alaosaan ja käsitelty materiaali poistuu yläosasta. Muodostunut kaasu vapautuu reaktorin yläosaan. (19, s. 414.)

CSTR on tarkoitettu vain märälle syötteelle. Reaktoria ei voida ajaa korkeilla kuormituksilla, koska märän syötteen takia läpimenoajat kaksinkertaistuvat. Reaktori ei sovellu syötteelle, joka sisältää pieniä määriä helposti hajoavaa materiaalia, koska tällöin kaasuntuotto jää pieneksi ollen täten pitkällä tähtäimellä taloudellisesti kannattamatonta. (19, s. 413–414.)

4.5 Kuivaprosessi

Kuivaprosessissa käsitellään materiaalia, jonka kuiva-ainepitoisuus on noin 20–50 % (27). Käsiteltyä materiaalia tulee vähemmän, koska kiintoainepitoisuus on korkeampi. Kuivaprosessissa biokaasun tuotto reaktoritilavuutta kohden on suurempi, jolloin reaktorit voivat olla pienempiä. (14.) Muita kuivaprosessin etuja verrattuna märkäprosessiin ovat vähäisempi lämmitysenergian tarve ja pienemmät hajupäästöt (28). Kuivaprosessissa syntyy rejektivesiä huomattavasti vähemmän tai ei ollenkaan (27). Reaktorin lämmittämiseen kuluu vähemmän energiaa alhaisemman nestepitoisuuden takia. (4, s. 33).

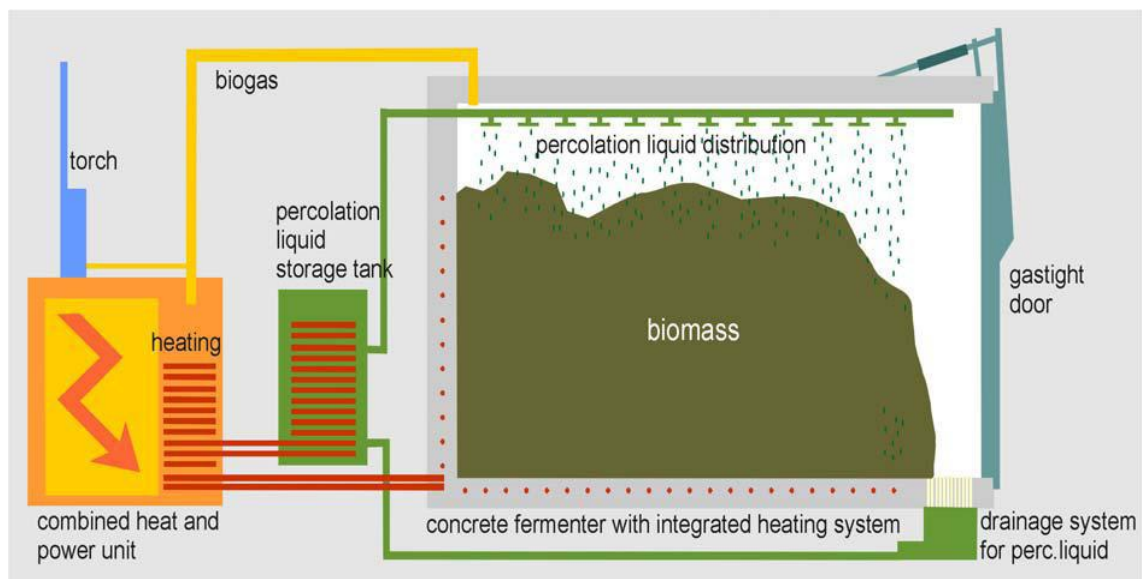
Kuivaprosessin haittapuolena on, että jopa 50 % mädätetystä jäännöksestä tarvitaan ympiksi uudelle mädätyserälle, joten reaktoritilavuutta tarvitaan enemmän (4, s. 33; 14). Kuivamädätyksen viipymäaika voi olla jopa kolme kertaa pidempi kuin märkämädätyksen vaatien näin ollen myös enemmän reaktoritilavuutta. Panostoimisen kuivaprosessin toiminnassa on aikaa vieviä vaiheita, kuten tyhjentäminen ja uudelleensyöttö.

(14.) Kuivaprosessissa saattaa esiintyä myös alhaista puskurikapasiteettia, joten prosessin valvonta ja ohjaus on tarkempaa (4, s. 33).

Kuivaprosessia voidaan operoida panos- tai jatkuvatoimisena (4, s. 34; 23, s. 33). Seuraavassa on esitetty kyseisten prosessien yleisimmät reaktorityypit.

4.5.1 Panostoiminen kuivaprosessi, suotopetireaktori

Panostoiminen kuivaprosessi on usein niin kutsuttu suotopetiprosessi, jonka rakenne on konttimallinen. Reaktori täytetään ja tyhjennetään kauhakuormaajalla. Reaktori on varustettu suotovesien kierrätyksellä, jonka avulla panosta kastellaan. (4, s. 34.) Suotovesi toimii ympin tavoin ja tarkoituksena on mikrobien, ravinteiden ja hajoamistuotteiden tasainen jakaantuminen käsiteltävään materiaaliin. (4, s. 33; 29.) Suotopetireaktorin toimintaperiaate on esitetty kuviossa 10.

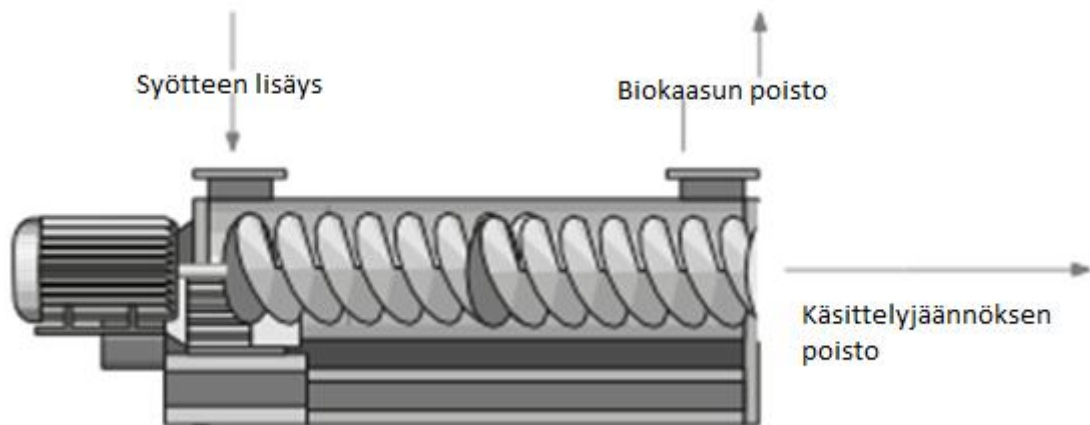


Kuvio 10. Panostoiminen kuivaprosessireaktori eli suotopetireaktori. Biomassaa kastellaan kiertettävällä ympyviedellä, joka kerätään reaktorin pohjalla olevasta viemäroinnistä. Ympivesi johdetaan lämmitettävään säiliöön ja siitä edelleen takaisin prosessiin. (30.)

Panostoimisia reaktoreita on useita rinnan, millä varmistetaan tasainen kaasuntuotto, koska kaasuntuoton käynnistyminen uudessa panoksessa vie useita päiviä (4, s. 34).

4.5.2 Jatkuvatoiminen kuivaprosessi, tulppavirtausreaktori

Jatkuvatoimiset kuivaprosessit ovat usein tulppavirtausperiaatteella toimivia (4, s. 33; 23, s. 32). Reaktori on rakenteeltaan yleensä vaakatasossa oleva teräksinen tai betoni-nen putki, jonka sisällä olevan ruuvin avulla käsiteltävää materiaalia siirretään syöttö-järjestyksessä putkessa eteenpäin kohti loppupäätä. Ruuvin avulla massa sekoittuu sen verran, että biokaasu vapautuu massasta. Vapautunut kaasu kerätään talteen reaktorin yläosasta. Reaktorissa on ympäristökierrätys, joka kerätään reaktorin loppupäästä ja kierrätetään reaktorin alkupäähän. (23, s. 32.) Kierrätysveden toisena tarkoituksena mikrobikasvuston turvaamisen lisäksi on inhibitioiden ehkäiseminen. Inhibitio voi syntyä esimerkiksi, jos syötteen pitoisuus kasvaa tuntuvasti. (10, s. 187.) Kuviossa 11 on esi-tetty tulppavirtausreaktorin toimintaperiaate.



Kuvio 11. Tulppavirtausreaktorin rakenne. Ruuvin avulla syötettä kuljetetaan putkessa eteen-päin ja vapautunut biokaasu poistetaan yläosasta. (23, s. 32.)

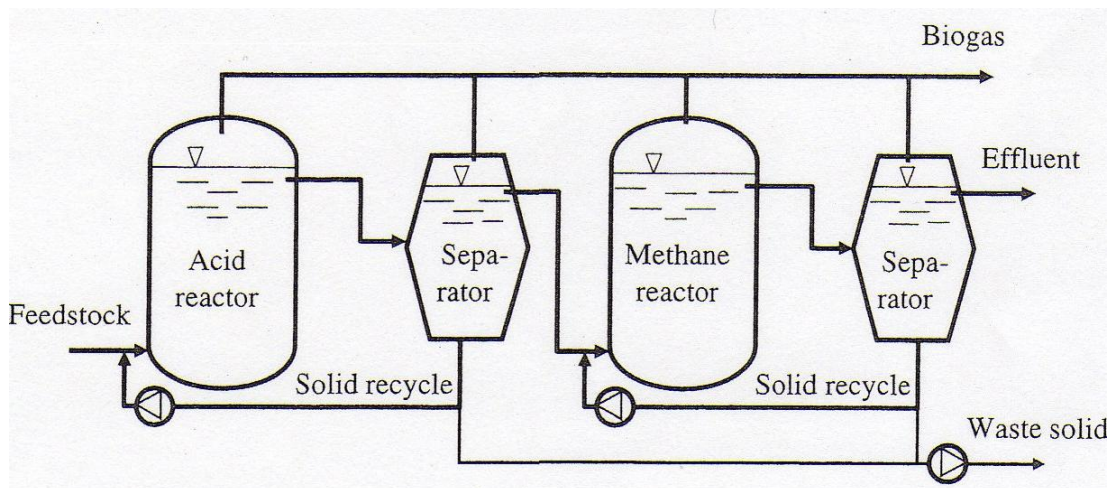
Tulppavirtausreaktorissa syötteen optimimaalinen kuiva-ainepitoisuus on noin 30 %, mutta vaihteluväli voi olla 15–50 % (23, s. 32). Käsiteltävän materiaalin viipymäaika reaktorissa on noin 30 päivää. Kaasuntuotto on tasaista, koska materiaalivirta reaktorin sisällä pysyy samana. (29.) Syötteen pitoisuus ei saisi vaihdella merkittävästi, koska liian suuri pitoisuus voi inhiboida anaerobisten bakteerien toimintaa aiheuttaen me-taanintuoton hidastumisen tai täydellisen pysähtymisen (10, s. 183). Sekoituksen puut-tuminen aiheuttaa haasteita jäännöksen tasalaatuisuudessa, ja usein jäännös joudu-taan vielä esimerkiksi jälkikompostoimaan. Tulppavirtausreaktorit kuluttavat paljon

energiaa, koska automatisointi on haasteellista kuivalle materiaalille. Materiaalia joudutaan kuljettamaan hihnoilla tai suurilla työkoneilla. (24.)

4.6 Yksi- ja monivaiheinen prosessi

Biokaasuprosessit voivat olla yksi- tai monivaiheisia. Suurin osa käytössä olevista reaktoreista toimii yksivaiheisina. Yksivaiheinen reaktori on helppo rakentaa ja operoida. Reaktorilla on kuitenkin useita haittapuolia, joita ovat poistulevan mädätteen määrän ja laadun vaihtelevuus, alhainen kuormitusaste, hidas orgaaninen poistuvuus sekä suhteellisen pieni kaasuntuotto. (19, s. 423.)

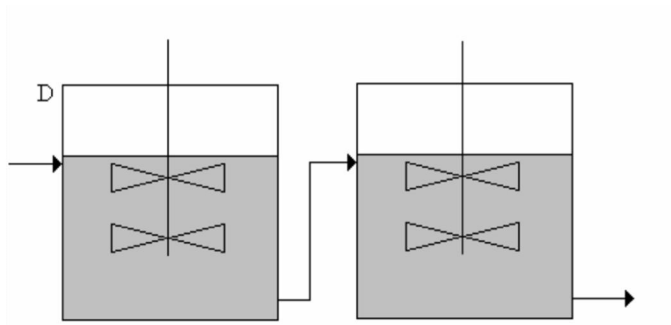
Monivaiheisessa prosessissa anaerobisen hajoamisen eri vaiheet voidaan erottaa tapahtumaan eri reaktoreissa. Tällöin olosuhteet voidaan säätää hajoamisen eri vaiheissa toimiville mikrobeille sopiviksi. Kaksivaiheinen prosessi voidaan jaotella kuvion 12 mukaan siten, että hajoamisen vaiheista hydrolyysi ja asidoneesi tapahtuvat ensimmäisessä reaktorissa ja toisessa reaktorissa tapahtuvat aseto- ja metanogeneesi. (4, s. 34; 19, s. 423–424.)



Kuvio 12. Kaksivaiheinen prosessi. Anaerobisen hajoamisen vaiheista hydrolyysi ja asidoneesi tapahtuvat ensimmäisessä eli happoreaktorissa. Aseto- ja metanogeneesi tapahtuvat jälkimmäisessä eli metaanireaktorissa. (19, s. 423–424.)

Monivaiheisella prosessilla voidaan myös pyrkiä kokonaisviipymän pidentämiseen ilman, että hajotusvaiheita erotetaan eri reaktoreihin. Tällä pienennetään riskiä, että syötettä-

vä materiaali virtaisi suoraan ulos reaktorista, jolloin kaasuntuotto alenee. (4, s. 34–35.) Kuviossa 13 on esitetty kaksivaiheisen märkämädätysprosessin periaate.



Kuvio 13. Kaksivaiheinen märkämädätysprosessi, jonka tarkoituksena on kokonaisviipymän pidentäminen (20, s. 201–228).

Kaksivaiheisen prosessin etuja ovat stabiilisuus, suurempi metaanintuotto, kasvanut kuormitusaste ja pienemmät reaktoritilavuudet. Kaksivaiheisen reaktorin rakentaminen ja operointi maksavat huomattavasti enemmän, mutta käyttövarmuuden selvä parantuminen on kustannuksia tärkeämpi tekijä. (19, s. 424.)

5 Prosessin toimintaan vaikuttavia tekijöitä

5.1 pH ja alkaliniteetti

Mädätysprosessin optimi-pH vaihtelee kunkin hajotusvaiheen mukaan. Hydrolyysin ja asetogeneesin optimi-pH on 5–6, mutta nämä vaiheet toimivat myös pH:ssa 7–8. (24.) Viimeisen vaiheen eli metanogeenin optimi-pH on 6,5–8 (4, s. 25; 23, s. 34–35). Tässä vaiheessa, jos pH laskee alle 6,5:n, olosuhteet tulevat liian happamiksi ja prosessi inhiboituu tai pahimmassa tapauksessa pysähtyy kokonaan. (19, s. 408). Metanogeenit ovat erityisen herkkiä pH:n muutoksille (4, s. 25). Taulukko 3 selventää, kuinka tarkat kasvualueet eri metanogeeneillä on pH:n suhteen.

Taulukko 3. Metanogeenien optimikasvun pH-alueet (31, s. 101).

Suku	pH
<i>Methanosphaera</i>	6,8
<i>Methanothermus</i>	6,5
<i>Methanogenium</i>	7,0
<i>Methanolacinia</i>	6,6–7,2
<i>Methanomicrobium</i>	6,1–6,9
<i>Methanospirillum</i>	7,0–7,5
<i>Methanococcoides</i>	7,0–7,5
<i>Methanohalobium</i>	6,5–7,5
<i>Methanolobus</i>	6,5–6,8
<i>Methanotherix</i>	7,1–7,8

Toimiessaan normaalisti mädätysprosessi on itsepuskuroiva eli pysyy itsestään optimaalisella pH-alueella. Haponmuodostusvaiheessa pH voi laskea, mikäli reaktoriin syötetään liikaa käsiteltävää materiaalia, koska tällöin bakteerien aktiivisuus lisääntyy ja rasvahappojen pitoisuus nousee nopeasti. Jos tässä vaiheessa pH laskee liian alas, mädätysprosessi pysähtyy. (23, s. 34.) Mikäli mädätysprosessin toiminta halutaan varmistaa, kannattaa pH säätää optimaaliseksi käyttöön soveltuvilla kemikaaleilla, esimerkiksi natriumhydroksidilla (NaOH). Kalkkia ei suositella käytettäväksi, koska se muodostaa hiilidioksidin kanssa saostuvaa kalsiumkarbonaattia, joka kertyy laitteistoihin. (24.)

Alkaliniteetti kuvaa reaktorin puskurikapasiteettia eli kykyä vastustaa pH:n muutoksia happoa lisättäessä. Alkaliniteetti ilmoitetaan muodossa mg CaCO₃/l tai mmol/l. Alkaliniteetti ja pH liittyvät kiinteästi toisiinsa. Alkaliniteetin laskiessa myös pH laskee. Suositeltava alkaliniteettitaso biokaasuprosessissa on 3 500–5 000 mg CaCO₃/l. (23, s. 36; 32.) Korkeampi alkaliniteetti saattaa olla mädätysprosessin aloituksessa hyödyllinen, koska mikäli rasvahappoja muodostuu alussa suuria määriä, pH ei kuitenkaan laske liian alas (32). Alkaliniteetin muutoksien avulla voidaan korjata prosessia jo ennen kuin häiriintynyt tila vaikuttaa pH-lukuun. Tällöin määritetään SCFA:n ja kokonaisalkaliniteetin suhde, joka on toimivassa biokaasureaktorissa 0,25 tai pienempi. (23, s. 36.)

Biomassan pH:n ja alkaliniteetin säätöön käytettäviä kemikaaleja on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Biomassan pH:n ja alkaliniteetin säädössä käytettyjä kemikaaleja (31, s. 102).

Kemikaali	Kaava	Puskuroiva kationi
Natriumvetykarbonaatti	NaHCO ₃	Na ⁺
Kaliumvetykarbonaatti	KHCO ₃	K ⁺
Natriumkarbonaatti	Na ₂ CO ₃	Na ⁺
Kaliumkarbonaatti	K ₂ CO ₃	K ⁺
Kalsiumkarbonaatti	CaCO ₃	Ca ²⁺
Kalsiumhydroksidi	Ca(OH) ₂	Ca ²⁺
Ammoniakki (kaasu)	NH ₃	NH ₄ ⁺
Natriumnitraatti	NaNO ₃	Na ⁺

5.2 C/N-suhde

C/N-suhde eli carbon/nitrogen-suhde kuvaa hiilen ja typen suhdetta reaktorissa mädätyksen aikana. Optimaalinen C/N-suhde on 20–30, jolloin anaerobiset bakteerit saavat ravinteita oikeassa suhteessa. Mikäli typpeä on liian vähän eli C/N-arvo on suuri, mikrobit kuluttavat typen omien proteiinitarpeidensa tyydyttämiseen, jolloin ne eivät enää reagoi hiilen kanssa. Tällöin hajotustoiminta ja kaasuntuotto hidastuvat. Jos typpeä on liikaa eli C/N-arvo on pieni, hajoamisen yhteydessä muodostuu tavallista enemmän ammoniakkia. Jos pH nousee liian korkealle (yli 8,5) ammoniakin muodostumisen takia tai ammoniakki aiheuttaa inhibition, hajotusprosessi voi pysähtyä. (21; 22, s. 15–16.) C/N-suhteeseen voidaan vaikuttaa lisäämällä puuttuvaa ravinnetta käsiteltävään materiaaliin (21; 22, s. 155).

5.3 Viipymä ja kuormitus

Viipymäaika (Retention Time, RT) kertoo, kuinka kauan syöte keskimäärin viipyy reaktorissa anaerobisten bakteerien alaisena. Mitä pidempi viipymä on, sitä kauemmin mikrobit ehtivät hajottaa syötettä. Pidemmällä viipymällä voidaan taata, että orgaaninen aines hajoaa mahdollisimman hyvin, jolloin biokaasua syntyy mahdollisimman paljon. Lisäksi mädätteen koostumus paranee. Viipymäajan pituuteen vaikuttavat käytettävä prosessilämpötila, syötteen koostumus, reaktorin kuormitus ja käytettävä tekniikka. (22, s. 259.)

Kuormitus (Loading Rate) kuvaa, kuinka paljon syöte kuormittaa prosessia reaktoritilavuutta kohden. Kuormitus voidaan ilmoittaa syötteen määrällä (kg) reaktoritilavuutta (m^3) kohden päivässä, jolloin kuormitusasteen yksiköksi saadaan kg/m^3d . Kuormitus voidaan ilmaista myös kemiallisena hapenkulutuksena (Chemical Oxygen Demand, COD), biologisena hapenkulutuksena (Biochemical Oxygen Demand, BOD), kiintoainepitoisuutena (Total Solids, TS) tai orgaanisena kiintoaineena (Volatile Solids, VS). Kuormitus pyritään pitämään mahdollisimman korkeana mutta kuitenkin niin alhaisena, että orgaaninen aines ehtii hajota eikä häiriötiloja synny. (22, s. 259.)

5.4 Hajoamista hidastavat tekijät

Inhibitiot ovat yleensä kemiallisen tai fysikaalisen tekijän aiheuttamia haittavaikutuksia, jotka hidastavat tai pahimmassa tapauksessa pysäyttävät koko mädätysprosessin. Inhibition huomataan usein metaanintuoton heikentymisenä tai estymisenä. Inhibition voivat aiheuttaa normaalin anaerobisen hajotustoiminnan välituotteet, erityisesti rasvahapot, joiden liiallinen kertyminen inhiboi prosessia. Prosessiin syötettävä materiaali voi myös sisältää sellaista yhdistettä, joka inhiboi prosessia. (4, s. 26; 22, s. 47.)

Inhibitioita voivat aiheuttaa pitkä- ja lyhytketjuiset rasvahapot (LCFA ja SCFA), jotka mainittiin kohdassa 3.2. LCFA:t voivat inhiboida jo hajotusprosessin ensimmäistä vaihetta eli hydrolyysiä, jolloin anaerobinen hajoaminen ei etene lainkaan. SCFA:n kertyminen on yleensä merkki prosessin epätasapainosta. Liiallinen SCFA:n kertyminen alentaa pH:ta, ja mitä pienempi prosessin puskurointikyky on, sitä enemmän pH alenee. (4, s. 26.) Muita inhibiittoreita voivat olla ammoniakki, sulfaatin pelkistyessä muodostuva rikkivety (H_2S) ja jotkin metallit (10, s. 167–175). Inhibitioita voidaan ehkäistä välttämällä prosessin ylikuormitusta ja laimentamalla syötettävää materiaalia ei-inhiboivilla materiaaleilla (4, s. 28).

6 Mädätyskokeet

6.1 Mädätysreaktorin rakenne

Kokeiden tarkoituksena oli käynnistää mädätysreaktori ja säätää reaktorin sisälle opti- miolosuhteet, jolloin kaasuntuotto saadaan mahdollisimman hyväksi. Kokeita varten rakennettiin yksinkertainen mädätysreaktori. Kuviossa 14 on esitetty mädätysreaktorin rakenne. Mädätettävä materiaali laitetaan reaktoriin (kuviossa kohta 1). Biokaasu va- pautuu mädätettävästä materiaalista reaktorin yläosaan, josta se kulkee letkua pitkin kaasunkeräyspulloon (2), joka on täytetty vedellä. Vettä syrjäytyy letkua pitkin erilli- seen astiaan (3) sitä mukaa kuin kaasua tulee kaasunkeräyspulloon. Syrjäytyneen ve- den määrän perusteella saadaan syntyneen biokaasun määrä. Reaktorin yläosassa ole- va putki (4) on tarkoitettu näytteenottoa varten. Reaktori on vesihauteessa, jota läm- mitetään erillisen termostaatilla varustetun lämmitysvastuksen (5) avulla.



Kuvio 14. Mädätysreaktorin rakenne: reaktori (1), kaasunkeräyspullo (2), syrjäytyneen veden keräysastia (3), näytteenottoputki (4) ja termostaatilla varustettu lämmitysvastus (5).

6.2 Prosessityyppi ja olosuhteet

Mädätysreaktori käynnistettiin panostoimisesti ja mädätettävä materiaali syötettiin märkänä. Käytettäväksi lämpötila-alueeksi valittiin mesofiilinen, sillä reaktorin operointi on tällä lämpötila-alueella vakaampaa kuin termofiilisellä alueella. Mädätysreaktoria lämmitettiin vesihauteen avulla, jonka lämpötila säädettiin 37 °C:seen.

Mädätysreaktorissa ei ollut mekaanista sekoitusta, mikä vaikutti syntyvien kaasukuplien vapautumisen vaikeutumiseen ja mahdollisesti kaasuntuoton pienenemiseen. Sekoituksen puuttuminen vaikutti lisäksi mädätettävän materiaalin lämpötilaan, koska ympäröivä vesihaude ei pystynyt lämmittämään koko biomassaa, vaan sisälle saattoi muodostua lämpötilakerroksia. Bakterimassa ei myöskään sekoittunut tasaisesti materiaaliin.

6.3 Mädätettävän materiaalin valinta

Mädätyskokeissa käytettiin kotitalouden biojätteitä, jotka eivät sisältäneet eläinperäisiä jätteitä. Eläinperäisten jätteiden mädätys rajattiin tästä insinööriyöstä pois, koska ne voivat sisältää patogeenejä eikä näiden tuhoutuminen käytettävissä olevissa olosuhteissa ole mahdollista.

6.4 Reaktorin käynnistäminen

Reaktorin käynnistäminen suoritettiin jokaisessa kokeessa samalla tavalla. Mädätettävä materiaali jauhettiin lihamyllyllä, jolloin sen pinta-ala saatiin mahdollisimman suureksi. Kuviossa 15 on havainnollistettu jauhettun materiaalin koostumusta. Materiaali siirrettiin tilavuudeltaan viiden litran reaktoriastiaan, johon lisättiin noin kaksi litraa vettä. Massaa kuplitettiin typpikaasulla, jotta olosuhteet saatiin hapettomiksi. Kuplituksen jälkeen reaktori suljettiin tiiviisti.



Kuvio 15. Mädätettävän materiaalin rakenne jauhatuksen jälkeen.

6.5 Mikrobidiversiteetin määrittäminen

Mädätettävään materiaaliin muodostuneen mikrobidiversiteetin määrittämiseen saatiin apua Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratorioalan koulutusohjelman opiskelijoilta, jotka ottivat biomassasta näytteitä mädätysprosessin eri vaiheista. Näytteistä tutkittiin molekyylibiologisesti bakteerien ja arkkien esiintyvyyttä. Neste- ja kiintoainenäytteistä eristettiin DNA. Tämän jälkeen tehtiin PCR (polymeraasiketjureaktio), jossa DNA:ta monistettiin jatkotutkimuksia varten. Viimeisenä tehtiin DGGE (denaturoiva gradientti-geelielektroforeesi), jonka avulla määritettiin, ovatko näytteissä olevat bakteerit tai arkit samoja mädätysprosessin eri vaiheissa.

7 Kokeiden toteutus ja tulokset

Tässä luvussa on esitetty suoritettut mädätyskokeet ja niiden aikana havaitut ongelmat. Seuraavissa kokeissa on keskitytty ongelmakohtien korjaamiseen, jotta saataisiin mahdollisimman hyvin toimiva mädätysreaktori.

7.1 Koe 1

Mädätettävä materiaali sisälsi perunaa, kaalia ja porkkanaa. Reaktoriin laitettiin noin 770 g mädätettävää materiaalia. Kaasuntuotto käynnistyi jo seuraavan päivän aikana. Parin ensimmäisen päivän aikana muodostui paljon hiilidioksidia. Tämän jälkeen prosessi pysähtyi. Mädätettävän materiaalin pH:ksi mitattiin alle 4, joka oli liian alhainen. Alhainen pH johtui rasvahapoista, joiden suuri määrä sai pH:n laskemaan liikaa aiheuttaen hajotusprosessin pysähtymisen. pH nostettiin neutraaliksi lisäämällä 2,0 mol/l NaOH:a. Seuraavina päivinä pH laski edelleen, ja reaktoriin lisättiin aina NaOH:a, jotta pH saatiin neutraaliksi. Kaasuntuotto käynnistyi pH:n säädön jälkeen, ja se jatkui noin kaksi viikkoa.

Kuviossa 16 on esitetty näytteenottomenetelmä. Näyte otettiin pH:n mittausta varten. Imupullon yläosassa oleva putki menee vesisuihkupumppuun ja sivukaulassa oleva putki reaktoriin. Vesivirtauksen avulla pulloon saadaan alipaine, jonka avulla putki imee reaktorista massaa imupulloon.



Kuvio 16. Näytteenottomenetelmä. Näyte saatiin imupulloon alipaineen avulla.

Ensimmäisen kokeen merkittävin tieto oli pH:n merkitys mädätysprosessin toimivuuteen, sillä metaania muodostavat bakteerit eivät voi toimia liian alhaisessa pH:ssa.

7.2 Koe 2

Toisessa kokeessa kokeiltiin suurempaa biojättemäärää. Mädätettävä materiaali koostui salaattista, porkkanasta, perunasta ja punajuuresta. Käsiteltävää materiaalia lisättiin noin 1 050 g. Tämä koe toimi ensimmäisen kokeen tavoin. Kaasua muodostui, mutta pH:ta jouduttiin säätämään jatkuvasti. Suurin osa muodostuneesta kaasusta oli hiilidioksidia, koska mädätettävää materiaalia oli paljon.

7.3 Koe 3

Kokeiden 1 ja 2 perusteella huomattiin, että mädätettävän materiaalin alkaliniteetti oli pieni. Tämä osaltaan vaikutti siihen, että pH laski liikaa haponmuodostusvaiheessa, koska materiaalilla ei ollut kykyä pitää pH:ta optimaalisella tasolla. Puskurointikykyä päätettiin parantaa lisäämällä reaktoriin natriumvetykarbonaattia (NaHCO_3). Puskurin lisäämisen tarkoituksena oli, ettei pH laske.

Koetta 3 varten rakennettiin toinen reaktoriastia, jotta voitiin verrata kahden saman biojätepanoksen mätänemistä, jos olosuhteet reaktoreissa säädettiin erilaisiksi. Mädätettävä materiaali sisälsi kaalia, lanttua ja perunaa. Reaktoreihin lisättiin 500 g käsiteltävää materiaalia. Reaktoriin A lisättiin puskuria (NaHCO_3) 20 g ja reaktori B jätettiin puskuroimatta. Puskurin määrä valittiin kirjallisuudesta löytyneen kokeen mukaan (33).

Puskurin lisäyksestä huolimatta pH laski alun neutraalista 6,4:ään. Kaasua puskuroidusta reaktorista ei muodostunut ollenkaan. Puskuria lisättiin liikaa, ja liian suuri natriumionipitoisuus mahdollisesti aiheutti myrkytystilan. Reaktorin A alkaliniteetiksi määritettiin 80,6 mmol/l, joka vaikutti suurelta.

Kokeiden 1, 2 ja 3 perusteella huomattiin, että pH laski liian paljon, jopa alle neljän, jolloin hajotusprosessi pysähtyy kokonaan. Reaktoreiden orgaaninen kuormitus oli liian suuri aiheuttaen rasvahappojen liiallisen kerääntyminen, ja siksi pH laski liikaa. Ratkaisuna tähän oli mädätettävän materiaalin määrän pienentäminen.

7.4 Koe 4

Kokeen 4 tarkoituksena oli kokeilla orgaanisen kuormituksen pienentämistä ja puskurin optimaalisen määrän lisäämistä. Puskurina toimivasta NaHCO_3 :sta tehtiin 1 mol/l liuos. Kokeen alkuvaiheessa ei säädetty pH:ta, vaan annettiin hajotusprosessin toimia itsestään, sillä haponmuodostajabakteerien optimi-pH on 5–6. Puskuria ei myöskään lisätty aloitusvaiheessa.

Mädätettävä materiaali koostui perunasta, kaalista ja porkkanasta. Materiaalin kuiva-ainepitoisuudeksi määritettiin 17,0 % kuivattamalla näytettä 110 °C:ssa kaksi tuntia. Mädätettävää materiaalia laitettiin reaktoreihin 100 g. Reaktorin A pH laski seuraavana päivänä alle neljän, reaktorin B pH oli viisi. Reaktorissa B oli muodostunut hiilidioksidipitoista kaasua, kun taas reaktori A ei ollut tuottanut kaasua ollenkaan. Reaktoriastioita ravistamalla huomattiin, että kaasua vapautui. Sekoituksen puuttuminen aiheutti sen, ettei kaasu ollut päässyt vapautumaan mädätettävästä materiaalista. Tämä saattoi osaltaan vaikuttaa pH-arvojen eroon, koska kyseessä olivat kuitenkin samanlaiset mädätysvälikappaleet.

Kokeen 5. päivänä aloitettiin pH-arvojen säätö. Reaktorin A pH oli 4,1 ja reaktorin B 4,6. pH:t säädettiin neutraaleiksi lisäämällä reaktoriin A NaHCO_3 -liuosta ja reaktoriin B NaOH:a. Kaasuntuotto ei tästä huolimatta käynnistynyt. Hajotusprosessi oli pysähtynyt eikä metaania muodostunut, koska metanogeenit eivät olleet syntyneet reaktoriin. Tämä johtui mädätettävän materiaalin hygieenisyydestä, koska biojäte oli liian tuoretta.

Bakteerikanta päätettiin tuottaa reaktoreihin lisäämällä erillistä ymppeä. Ymppeiksi valittiin Mätäojan pohjalta kairattua liejua ja niin sanottua harmaata vettä, joka kerättiin erään kesämökin tiski- ja pesuvesikaivon pohjalta. Ymppeä koostui veden ja kiintoaineksen sekoituksesta. Mätäojan pH oli 7,6 ja harmaan veden 7,2. Kuviossa 17 on ymppeinä käytettyä harmaata vettä. Mätäojan ymppeä oli samannäköistä.



Kuvio 17. Ympinä käytettyä harmaata vettä.

Reaktoriin A lisättiin litra Mätäojan ympiä ja reaktoriin B sama määrä harmaata vettä. pH:t säädettiin neutraaleiksi lisäämällä reaktoriin A puskuriliuosta ja reaktoriin B NaOH:a. Reaktorin B kaasuntuotto käynnistyi ympin lisäyksen jälkeen seuraavana päivänä. Reaktorissa A ei havaittu kaasuntuottoa. pH-arvoissa huomattiin edelleen pientä laskua.

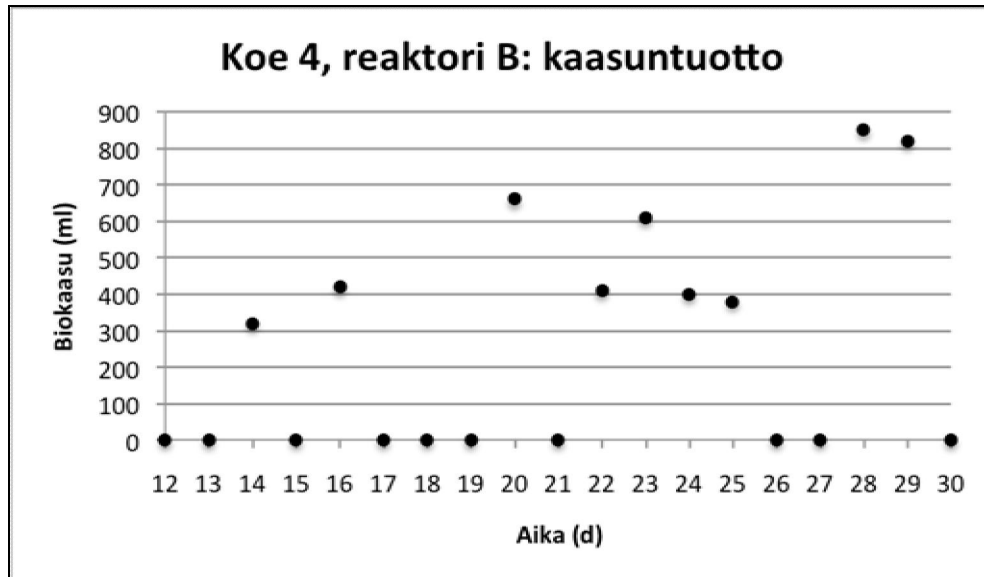
Reaktoria B päätettiin niin sanotusti ruokkia lisäämällä noin 50 ml hydrolysoitunutta biomassaa. Hydrolysoitunut biomassa oli samaa biomassaa, jota kokeessa 3 oli käytetty, mutta sitä oli pidetty erillisessä pullossa huoneenlämmössä kokeen 3 aloituksesta asti. Kuviossa 18 on kokeessa käytettyä hydrolysoitunutta biomassaa.



Kuvio 18. Hydrolysoitunutta biomassaa.

Ruokkimisen jälkeen kaasua alkoi taas muodostua. Biomassan pH:ta säädettiin tarvittaessa, koska tässä vaiheessa pH:n oli tärkeää pysyä optimaalisena, koska metanogeenit ovat herkkiä pH:n muutoksille. Reaktoria ruokittiin aina muutaman päivän välein ja kaasuntuotto saatiin jatkumaan. pH alkoi pysyä itsestään optimaalisella alueella.

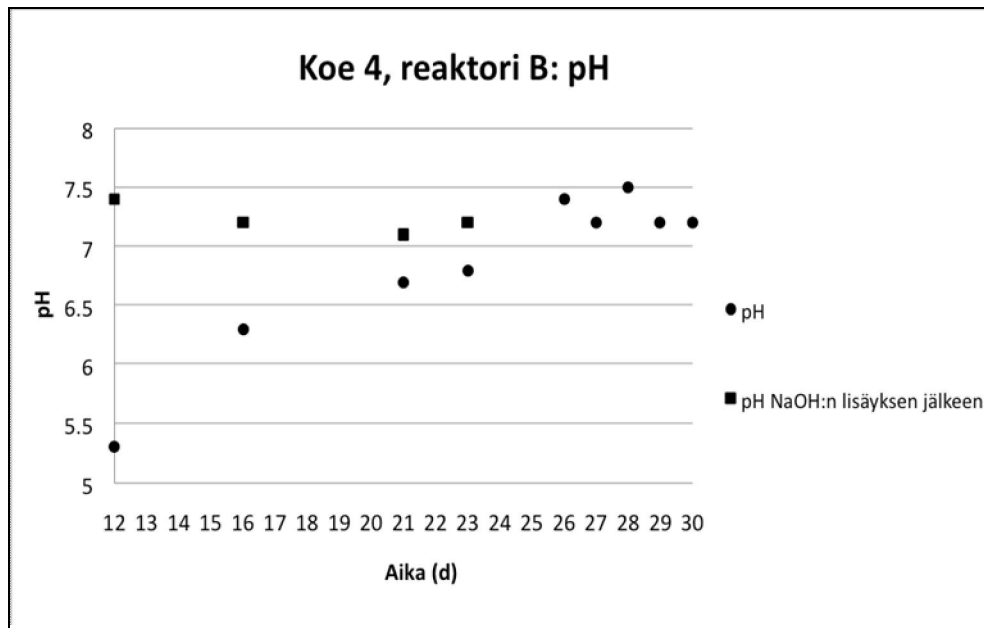
Kuviossa 19 on esitetty reaktorin B kaasuntuotto eri päivinä. Reaktoriin lisättiin hydrolysoitunutta biomassaa 16, 21, 26 ja 28 päivän kuluttua kokeen aloituksesta. Kokeen 26. päivänä reaktorin letkut olivat näytteenoton yhteydessä menneet väärin päin, jolloin kaasu oli päässyt vapautumaan esteettömästi reaktorista. Havaitun virheen korjaamisen jälkeen kaasua muodostui vielä kaksi päivää. Tämän jälkeen prosessi keskeytyi. Keskeytymisen syy oli mahdollisesti, että reaktoriin näytteenoton yhteydessä päässyt happi oli haitannut metaania muodostavien mikrobien toimintaa ja todennäköisesti mikrobit olivat kuolleet.



Kuvio 19. Kokeen 4 reaktorin B kaasuntuotto eri päivinä.

Reaktorista B muodostui biokaasua yhteensä 4 870 ml eli 4,870 dm³. Yhdestä kilogrammasta biojätettä voidaan saada 100–150 dm³ metaania, eli 100 grammaa biomassaa tuottaisi 10–15 litraa kaasua (taulukko 1). Tähän verrattuna kokeen 4 kaasuntuotto jäi noin puoleen. Huomioitavaa kuitenkin on, ettei olosuhteita saatu optimiksi sekoituksen, reaktorin tiivyyden sekä yleisesti ravinteiden suhteen, ja näistä jokainen osaltaan vaikutti kaasuntuottoon.

Kuviossa 20 on esitetty reaktorin B pH eri päivinä ja pH:n muutos NaOH:n lisäyksen jälkeen. Kuvasta voidaan huomata, että kokeen loppupuolella pH alkoi pysyä itsestään optimaalisena, joten optimiolosuhteet reaktorin sisällä saavutettiin.



Kuvio 20. Kokeen 4 reaktorin B pH ennen NaOH:n lisäystä ja sen jälkeen.

Reaktorista A ei tapahtunut kaasuntuottoa alun pienen hiilidioksidin muodostumisen jälkeen. Mikrobidiversiteetin tarkemmassa määrittämisessä selvisi, ettei Mätäojan ympäristö juuri sisältänyt oikeaa mikrobistoa (34).

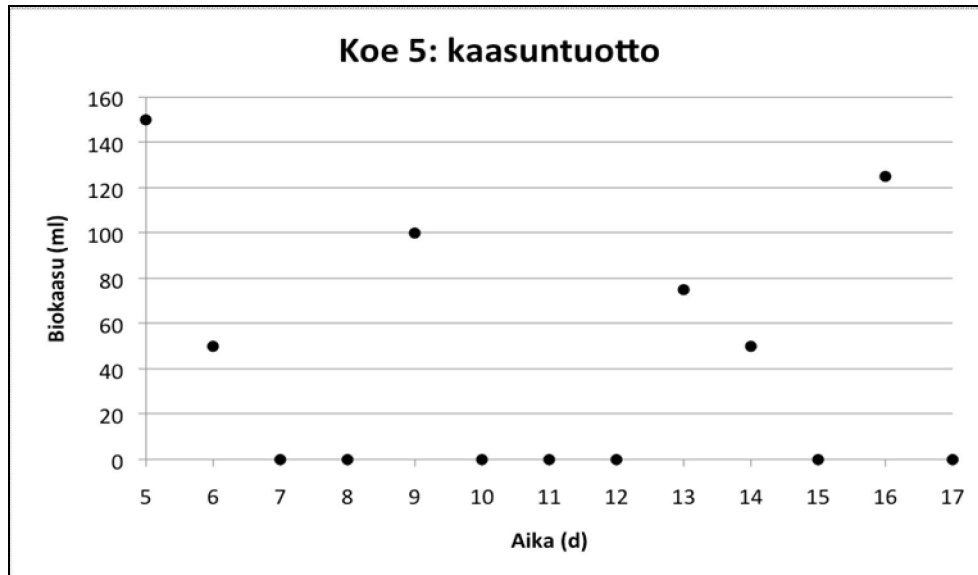
Kokeen 4 perusteella huomattiin, että mädätysprosessi saatiin toimimaan paremmin, mikäli prosessin annettiin toimia kaksivaiheisesti. Ruokkimisen avulla kaasuntuotto saatiin pysymään vakaampana, kun biomassaa syötettiin pieni määrä kerrallaan, jolloin prosessin olosuhteita ei häiritty merkittävästi.

7.5 Koe 5

Tässä kokeessa kokeiltiin pelkästään hydrolysoituneen biomassan mädätystä eli tarkoituksena oli tutkia kaksivaiheisen prosessin toimivuutta. Reaktoriin lisättiin valmiiksi hydrolysoitunutta biomassaa, samaa, jota käytettiin kokeessa 3. Reaktoriin laitettiin noin 200 ml biomassaa, 0,5 litraa vettä ja 800 ml harmaata vettä. pH säädettiin neutraaliksi.

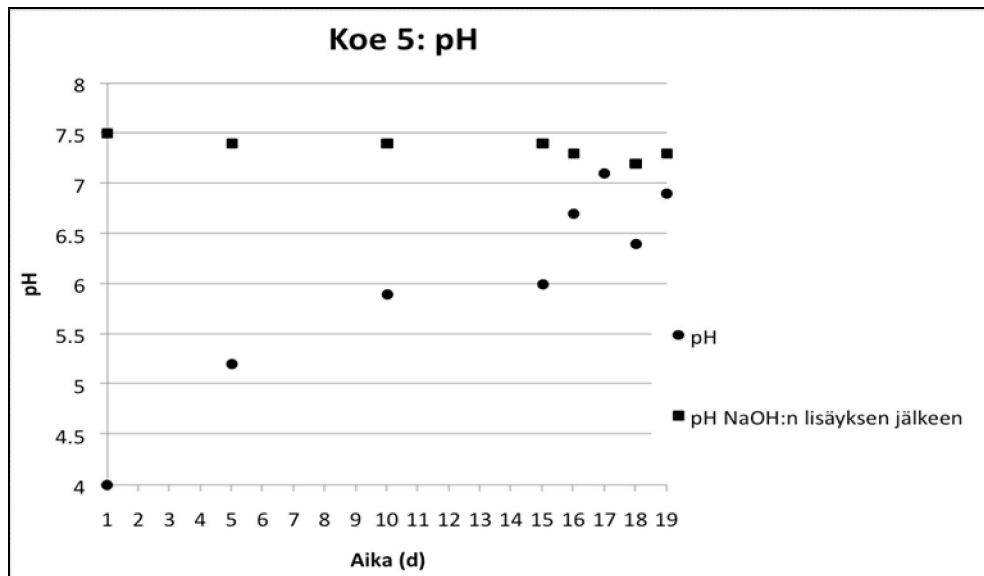
Kuviossa 21 on esitetty reaktorin kaasuntuotto eri päivinä. Kaasua alkoi muodostua viidentenä päivänä. pH:ta jouduttiin edelleen korjaamaan, eli happoja muodostui. Reaktorin pH ei kuitenkaan laskenut niin paljon kuin aiemmissa kokeissa. Reaktoriin lisättiin noin 50 ml hydrolysoitunutta biomassaa 15, 17 ja 19 päivän kuluttua kokeen aloi-

tuksesta. Kaasuntuotto saatiin jatkumaan noin 12 päivää. Tässäkin kokeessa hapen pääsy reaktoriin todennäköisesti keskeytti kaasuntuotannon. Kokeesta 5 kaasua saatiin yhteensä 550 ml eli $0,550 \text{ dm}^3$.



Kuvio 21. Kokeen 5 kaasuntuotto eri päivinä.

Kuviossa 22 on esitetty biomassan pH kokeiden eri päivinä ja pH:n muutos NaOH:n lisäyksen jälkeen. Kokeen loppupuolella pH:n lasku oli kohtalaisen pientä, ja mikäli happi ei olisi häirinnyt prosessia, myös tässä kokeessa olisi mahdollisesti voitu saavuttaa optimiolosuhteet ja pH olisi pysynyt itsestään optimaalisena.



Kuvio 22. Kokeen 5 pH ennen NaOH:n lisäystä ja sen jälkeen.

8 Mikrobidiversiteetin analyysitulokset

Mädättämönäytteistä profiloitiin mikrobidiversiteetti bakteerien osalta. Arkkien osalta profilointia ei suoritettu. Profiloinnin perusteella todettiin, että mädätysprosessin alku- ja loppuvaiheiden bakteerilajisto erosi toisistaan. Saatujen tulosten perusteella pystyttiin siis todentamaan, että bakteeristo hoiti mädätysprosessia ja prosessin eri vaiheisiin osallistui eri bakteeristo. (34.)

9 Huomioitavia asioita

Biomassan lämpötilaksi mitattiin kokeiden aikana noin 33 °C, joka oli vesihautteen lämpötilaa alempi. Tämä johtui sekoituksen puuttumisesta. Reaktoreita jouduttiin avaamaan jatkuvasti, joten syntynyt kaasumäärä on todellisuudessa ollut suurempi. Avaaminen aiheutti paineen laskun, ja tällöin kaasua piti taas muodostua niin paljon, että paine sai veden syrjäytymään. Lisäksi avaaminen häiritsi anaerobisia olosuhteita, koska happea pääsi reaktoriin. Kokeiden 4 ja 5 äkillinen keskeytyminen johtui todennäköisesti hapen pääsystä reaktoreihin, jolloin olosuhteet muuttuivat metanogeenisille arkeille epäedullisiksi.

10 Johtopäätelmät

Kokeellisessa osiossa huomattiin teorian pitävyys käytännössä. Siinä nähtiin mädätysprosessin nelivaiheinen eteneminen ja ymmärrettiin eri vaiheiden merkitys kaasuntuoton kannalta. Kaasuntuotto saatiin käynnistymään ja reaktorin sisälle saatiin vakaat olosuhteet. Mädätysprosessiin liittyvät ongelmakohdat löydettiin. Tärkeimpänä huomiona oli pH:n vaikutus mädätysprosessin toimivuuteen.

Mädätysprosessin käynnistäminen osoittautui hankalaksi, koska kokeissa ei käytetty eläinperäisiä jätteitä. Biomassan hygieenisuus ja mahdollisesti ravinteiden epätasapaino biomassassa juuri eläinperäisten jätteiden puuttumisen takia aiheutti hankaluuksia mädätysprosessin käynnistämisessä. Ympin lisääminen osoittautui kannattavaksi, koska sillä saatiin oikeanlaista mikrobikantaa prosessiin.

Kokeellisen osion perusteella voitiin päätellä, että mädätysprosessi saadaan toimimaan paremmin kaksivaiheisena. Tällöin metaaninmuodostumisvaiheen annetaan toimia erillään muista vaiheista. Käytännössä tämä onnistuisi niin, ettei pH:ta säädettäisi heti alussa, vaan annettaisiin hajoamisen edetä omalla painollaan. Yksivaiheinen prosessi voi kuitenkin onnistua myös, mikäli ympäristöä lisätään heti alussa ja biomassan määrä on tarpeeksi pieni.

Uudessa reaktorissa kannattaa kiinnittää huomiota pH:n reaaliaikaiseen mittaukseen, biomassan lämpötilaan, reaktorin paineeseen ja biomassan sekoitukseen. Näytteenotto tulisi suorittaa niin, ettei happea pääse reaktoriin missään vaiheessa. Uuteen reaktoriin kannattaa harkita automaattista pH:n säätöä, eli aina kun pH laskee, reaktoriin syötetään automaattisesti sopiva määrä emästä. Lisäksi puskurin käyttöä heti prosessin käynnistämisessä olisi hyvä kokeilla, jolloin pH ei välttämättä laskisi. Mädätettävän biomassan määrä kannattaa optimoida, jotta pH ei vaihtelisi suuresti. Biomassaan voisi lisätä myös ravinteita, joilla kaasuntuottoa saataisiin mahdollisesti parannettua. Syntynyt biokaasu voitaisiin analysoida tarkemmin esimerkiksi kaasukromatografilla. Tällöin biokaasun koostumus saadaan tarkemmin selville muun muassa tärkeimpien kaasujen eli metaanin ja hiilidioksidin suhteen. Saatujen tuloksien avulla voidaan tehdä johtopäätelmiä mädätysprosessin toimivuudesta.

Lähteet

1. Korteniemi, Juho. 2008. Verkkodokumentti. EU:n ja Suomen bioenergialinjaukset. Bionova Engineering.
<http://www.lappia.fi/AO/tiedostot/luontoala/bioenergiahanke/bioenergiaseminaari/bionova_lapin_bionenergiaseminaari.pdf>. Luettu 26.12.2010.
2. Hyötyjä ja haasteita. 2010. Verkkodokumentti. Bioteknologia Info. Tekesin NeoBio-ohjelma.
<http://www.bioteknologia.info/etusivu/ymparisto/Biomassa/fi_FI/Hyotyja_ja_haasteita/>. 2010. Luettu 26.12.2010.
3. Lehtomäki, A., Lampinen, A. & Rintala, J. 2003. Peltobiomassoista puhdasta kotimaista kaasua. *Kemia–Kemi* 30 (8), s. 35–36.
4. Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. *Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja* 85.
5. Biokaasu. 2010. Verkkodokumentti. Suomen Biokaasuyhdistys ry.
<http://www.biokaasuyhdistys.net/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=6&Itemid=53>. 2010. Luettu 20.11.2010.
6. Tietoa biokaasusta. 2010. Verkkodokumentti. Biokaasufoorumi.
<<http://www.biokaasufoorumi.fi/>>. 2010. Luettu 19.9.2010.
7. Metaani. 2010. Verkkodokumentti. Ilmasto.org. Kaikki ilmastonmuutoksesta.
<<http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/metaani.html>>. Päivitetty 15.11.2010. Luettu 20.11.2010.
8. Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S. 2010. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 13. Tiedot vuodelta 2009. Joensuu: Joensuun Yliopistopaino.
9. Lehtomäki, Annimari. 2006. Biokaasuteknologia maataloudessa – raaka-aineet ja mahdollisuudet tuotantoon. *BioEnergia*. 18.8.2006, s. 26–27.
10. Cheng, Jay. 2009. *Biomass to Renewable Energy Processes*. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

11. Biokaasu energiamuotona Euroopassa. 2010. Verkkodokumentti. Biovakka Suomi Oy. <<http://www.biovakka.fi/Biokaasu+energiamuotona+Euroopassa>> 2010. Luettu 26.12.2010.
12. Institute of Science in Society. ISIS Report 2.10.2006. Biogas China. Verkkodokumentti. <<http://www.i-sis.org.uk/BiogasChina.php>>. Luettu 10.3.2011.
13. Biokaasun tuotanto. 2009. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biokaasu/biokaasun_tuotanto>. Päivitetty 19.2.2009. Luettu 10.10.2010.
14. Paavola, Teija. Biokaasuprosessi – raaka-aineet, tuottokyky, käsittely, prosessi. Maakunnallinen biokaasuseminaari. Seinäjoki, 27.3.2007.
15. Biokaasussa runsaasti hiilidioksidia ennen jalostusta. Verkkodokumentti. Gasum Oy. <<http://www.gasum.fi/tuotteet/biokaasu/Sivut/Koostumus.aspx>>. Luettu 27.12.2010.
16. The Official Information Portal on Anaerobic Digestion. What is Biogas? Verkkodokumentti. <<http://www.biogas-info.co.uk/index.php/biogas-qa.html>>. Luettu 3.1.2011.
17. Biokaasu. 2009. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biokaasu>. Päivitetty 19.2.2009. Luettu 10.10.2010.
18. Biotechnological methods to increase landfill gas production and degradation of organic waste. 2009. Verkkodokumentti. <<http://www.lwi.tu-bs.de/hpm/docs/paper/13%20paper%20lre.pdf>>. Third International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" Braunschweig, Germany; 10–13 March 2009. Luettu 30.10.2010.
19. Vertès, A. A., Qureshi, N., Blaschek, H. P. & Yukawa, H. 2010. Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
20. Mata-Alvarez, J. 2003. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. UK: IWA Publishing.
21. A system approach to biogas technology. 1997. Verkkodokumentti. SD: Environment: Energy and environmental technology. <<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/sustdev/Egdirect/Egre0022.htm>>. 1997. Luettu 25.12.2010.

22. Hobson, Peter N. & Wheatley, Andrew D. 1993. Anaerobic digestion: Modern Theory and Practice. Elsevier science publishers Ltd.
23. Latvala, Markus. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT). Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Helsinki: Edita Prima Oy.
24. Koulutuspäivä biokaasulaitosten toiminnasta ja lannoitevalmistelainsäädännöstä. 2009. Verkkodokumentti. Evira.
<http://www.evira.fi/attachments/kasvintuotanto_ja_rehut/lannoitteet/biokaasu_koulutus/esitykset_4.pdf>. 2009. Luettu 25.12.2010.
25. Verma, Shefali. 2002. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics In Municipal Solid Wastes. Department of Earth & Environmental Engineering (Henry Krumb School of Mines) Fu Foundation School of Engineering & Applied Science Columbia University. Verkkodokumentti.
<<http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>>. Luettu 20.2.2011.
26. The AD Community: An independent Web Site. 2007–2011. Verkkodokumentti.
<http://www.anaerobic-digestion.com/html/covered_anaerobic_lagoon_proce.php>. Luettu 2.1.2011.
27. Biokaasu. Verkkodokumentti. Bioste Oy.
<http://www.bioste.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=2&Itemid=10>. Luettu 25.12.2010.
28. Schäfer W., Lehto M. & Teye F. 2006. Dry anaerobic digestion of organic residues on-farm – a feasibility study. MTT Agrifood Research Reports 77.
29. Rautanen, Juha. Biokaasua kuivamädätysmenetelmällä. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=100394&lan=fi>>. Biokaasu–BAT-seminaari, 26.3.2009. Luettu 3.1.2011.
30. BEKON Brochure: Bioenergy via Dry Fermentation. 2010. Verkkodokumentti.
<<http://www.bekon.eu/productdownloads.html>>. BEKON Energy Technologies GmbH & CO. Updated 9 June 2010. Luettu 25.12.2010.
31. Gerardi, Michael H. 2003. The Microbiology of Anaerobic Digesters. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
32. The AD Community: An independent Web Site. 2007–2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.anaerobic-digestion.com/html/anaerobic-digestion-process.php>>. Luettu 29.1.2011.

33. International Journal of ChemTech Research. Effect of Buffer (NaHCO_3) and Waste Type in High Solid Thermophilic Anaerobic Digestion. Verkkodokumentti. <[http://sphinxesai.com/s_v2_n2/CT_V.2No.2/ChemTech_Vol_2No.2_pdf/C%20T=36%20\(980-984\).pdf](http://sphinxesai.com/s_v2_n2/CT_V.2No.2/ChemTech_Vol_2No.2_pdf/C%20T=36%20(980-984).pdf)>. April–June 2010. Luettu 20.12.2010.

34. Metaanikaasua tuottavan mädättämön mikrobiodiversiteetin profilointi. 17.9.2010–4.3.2011. Metropolia Ammattikorkeakoulun INNO-projektin loppuraportti.

