

Mikko Ruohomäki

Biokaasun tuotannon ja jalostuksen energiavirrat sekä niiden hyödyntäminen

Biokaasun tuotannon ja jalostuksen energiavirrat sekä niiden hyödyntäminen

Mikko Ruohomäki
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä(t): Mikko Ruohomäki

Opinnäytetyön nimi: Biokaasun tuotannon ja jalostuksen energiavirrat sekä niiden hyödyntäminen

Työn ohjaaja(t): Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 38

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia biokaasuprosessia kokonaisuutena ja tutkia biokaasun jalostuksen lämpöenergian sivuvirtojen hyödyntämistä lämpöpumpputeknologian avulla. Työssä tarkasteltiin biokaasulaitoksen energiavirtoja ja rajattiin tarkempi tarkastelu biokaasun jalostukseen. Tarkastelu pohjautui kuvitteelliseen reaktoriin, joka mitoitettiin määrättyillä lähtöarvoilla. Mitoitetun reaktorin arvoja käytettiin tarkastelun apuna.

Biokaasun tuotantoprosessi on biologinen prosessi, joka etenee tasapainossa. Prosessi voidaan jakaa neljään osaan, joista jokainen vaihe toimii seuraavan vaiheen mikrobin ravintona tuottaen biokaasua, joka sisältää pääasiassa metaania ja hiilidioksidia. Reaktio on herkkä ympäristön muutoksille, joten biokaasureaktion varmistamiseksi tulee kiinnittää erityistä huomiota syötteen laatuun, reaktiolämpötilaan ja muihin reaktioon vaikuttaviin tekijöihin. Biokaasun jalostuksessa pyritään poistamaan inertit kaasut biokaasusta täten parantaen kaasun energiatiheyttä. Jalostusjärjestelmiä on kehitetty useita, mutta tässä työssä otettiin tarkempaan tarkasteluun membraanitekniikalla toimiva biokaasun jalostus. Biokaasulaitoksen merkittävimmät hyödynnettävät energiavirrat ovat mädätysjätteen lämpöenergia, mädätysjätteen kemiallinen potentiaali, laitoksen kattilahäviöt ja jalostuksen lämpöhäviöt. Työn tavoitteena oli tutkia, onko biokaasun jalostuksen lämpöenergia hyödynnettävissä lämpöpumpputeknologian avulla.

Työn tuloksena todettiin biokaasun jalostuksen lämpöenergiavirran olevan merkittävä biokaasulaitoksen energiataseen kannalta ja lämpöpumpun avulla pystyttiin teoriassa kattamaan jopa 40 % biokaasureaktorin lämmityksen tarpeesta. Lämpöpumpputeknologian soveltamisen haasteina ovat kuitenkin vuodenaikojen aiheuttamat muutokset systeemin energian tarpeeseen ja siitä aiheutuvat ylimääräiset kustannukset. Biokaasun jalostuksen lämpövirtojen hyödyntäminen prosessissa vaatiikin vielä tarkempaa tarkastelua ja kustannusanalyysiä todellisissa kohteissa.

Asiasanat: Biokaasu, energiatase, reaktori, syöte, jalostus, lämpöpumppu

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Energy Technology

Author(s): Mikko Ruohomäki

Title of thesis: Energy Flows of Biogas Production and Upgrading and Their Utilization

Supervisor(s): Veli-Matti Mäkelä

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 38

The aim of this thesis was to study biogas production, energy flows of the process and how to utilize them with heat pump technology. The more precise analysis was confined to energy flows of biogas upgrading. The analysis was based on an imaginary biogas plant, which was designed with set parameters. The values of the imaginary plant were used to study the energy flows more precisely.

As a result of the thesis, it was found that the thermal energy flow of biogas upgrading is significant in terms of the biogas plant's energy balance, and with the help of the heating pump, it was theoretically possible to cover up to 40 % of the biogas reactor's heating needs. However, the challenges of applying heat pump technology are the changes in the system's energy demand caused by the seasons and the resulting increase in costs of the biogas plant. Utilizing the heat flows of biogas upgrading in the process requires an even more detailed examination and cost analysis in real sites.

Keywords: Biogas, energy balance, reactor, substrate, upgrading, heat pump

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	ANAEROBINEN BIOKAASUPROSESSI	8
2.1	Hydrolyysi.....	9
2.2	Asidogeneesi.....	9
2.3	Asetogeneesi.....	9
2.4	Metanogeneesi.....	9
2.5	Biokaasun tuotannon toimintaedellytykset.....	10
2.5.1	Lämpötila	10
2.5.2	Biokaasuprosessin pH	11
2.5.3	Ravinteet.....	11
2.6	Reaktion inhibiittorit.....	11
2.6.1	Rasvahapot.....	12
2.6.2	Rikkivety H ₂ S.....	12
2.6.3	Suolat.....	12
2.6.4	Ammoniakki	13
3	BIOKAASUN TUOTANTO	14
3.1	Syöte ja syötteen esikäsitely	14
3.1.1	Syötteen laadun ja potentiaalin määrittäminen kokeellisesti	14
3.1.2	Syötteen metaanintuottopotentiaalin tarkastelu teoreettisesti	16
3.2	Jatkuvatoiminen biokaasureaktori	16
3.3	Organic load rate OLR	17
3.4	Hydraulinen viipymä HRT (hydraulic retention time).....	18
4	BIOKAASUN PUHDISTUS JA JALOSTUS.....	19
4.1	Reaktorin raakakaasun puhdistus	20
4.2	Biokaasun jalostus	21
4.2.1	Membraanitekniikka	21
4.2.2	Vesipesu	22
4.2.3	Adsorptio eli PSA (pressure swing adsorption).....	23
4.2.4	Kryojalostustekniikka	24
5	BIOKAASULAITOKSEN ENERGIATASE JA -VIRRAT	26
5.1	Biokaasureaktorin energiatase ja -virrat	27

5.2	Biokaasun jalostuksen energiavirrat ja -tase	29
6	BIOKAASUN JALOSTUKSEN ENERGIAVIRTOJEN HYÖDYNTÄMINEN	30
6.1	Jalostuksen energiavirtojen tarkastelu	30
6.1.1	Biokaasun energiavirta.....	30
6.2	Reaktorin lämmityksen tarve	31
6.3	Jalostuksesta vapautuvan lämpöenergian hyödyntäminen	33
6.4	Jalostuksesta vapautuvan energian hyödyntämisen haasteet.....	33
7	LÄMPÖPUMPPU BIOKAASUN JALOSTUKSESSA.....	34
7.1	Lämpöpumpun liittäminen biokaasulaitokseen	34
7.1.1	Lämpöpumppusysteemin toimintaperiaate.....	35
7.2	Lämpöpumppusysteemin tarkastelu	35
8	YHTEENVETO	38
	LÄHTEET.....	39

1 JOHDANTO

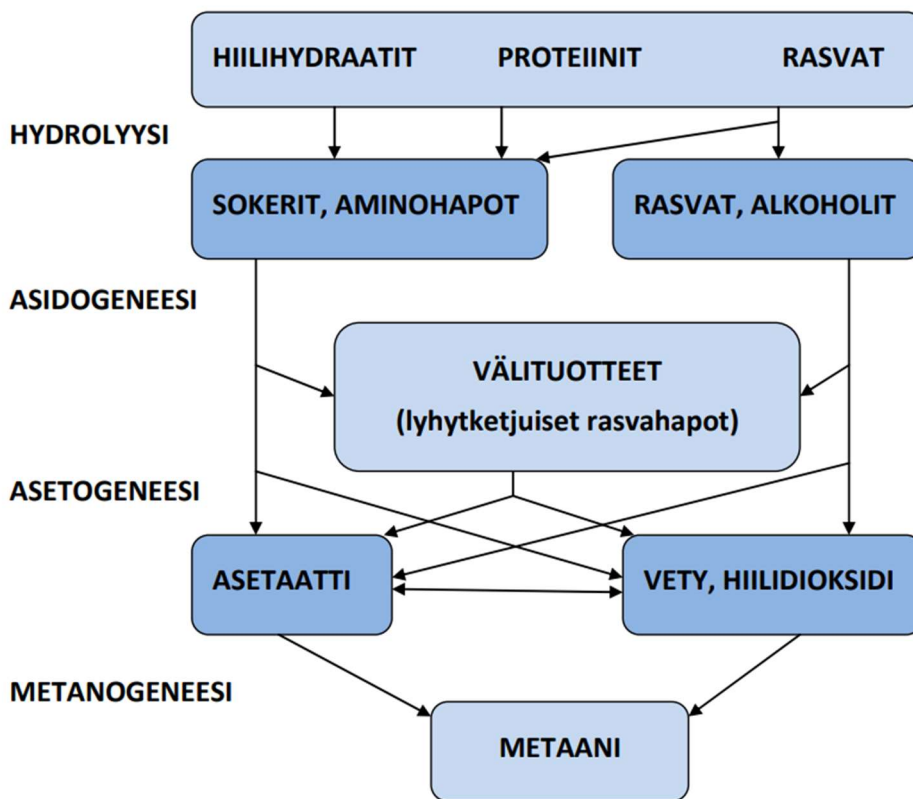
Työn tehtävänä on tutkia biokaasuprosessia kokonaisuutena sekä tutkia jatkuvatoimisen biokaasulaitoksen energiatasetta ja -virtoja. Anaerobisella biokaasuprosessilla pystytään hyödyntämään teollisuuden ja maatalouden sivuvirtoja, jotka ilman tätä menetelmää saattaisi mennä hukkaan. Biokaasuteknologiat ovatkin erinomainen tapa parantaa systeemien energiatehokkuutta ja ottaa talteen mahdollisesti hukkaan meneviä energiavirtoja sekä hyödyntää tuotannosta jäävät ravinteet kiertotalouden mukaisesti.

Jatkuvatoiminen biokaasulaitos ja sen prosessit vaativat jatkuvan energiasyötön sähkö- ja lämpöenergiana. Näitä energiavirtoja tarkastelemalla, tutkimalla ja tehostamalla on mahdollista kehittää biokaasuteknologiaa entistä kannattavammaksi. Näin saadaan kehitettyä biokaasun tuotantoa houkuttelevammaksi mahdollisuudeksi eri toimialoille.

Vuonna 2021 Suomen biokaasun kokonaistuotanto oli noin 1 TWh, vaikka teknillinen tuotantopotentiaali on yli 10 TWh. (*Suomen Biokierto ja Biokaasu Ry*). Biokaasun tuotantopotentiaalia ei hyödynnetä tarpeeksi tehokkaasti tällä hetkellä, vaikka se toimisi erinomaisena työkaluna Suomen pyrkinessä nykyisiin päästötavoitteisiin. Biokaasun tuotanto tukee myös Suomen energiaomavaraisuutta sekä tarjoaa haja-asutusalueille potentiaalisesti uusia energialähteitä. Parantamalla biokaasulaitosten energiatehokkuutta saadaan biokaasun tuotannosta entistä houkuttelevampi vaihtoehto eri toimialoille.

2 ANAEROBINEN BIOKAASUPROSESSI

Biokaasun tuotantoprosessi on biologinen prosessi, jossa mikro-organismit käyttävät raaka-ainetta orgaanisesta aineesta anaerobisissa olosuhteissa tuottaen metaania, hiilidioksidia sekä mädätysjätettä. Mädätysjäte on prosessista jäljelle jäänyttä ainesta, jota mikro-organismit eivät pysty hyödyntämään. Orgaanisista aineista parhaiten biokaasuprosessiin soveltuvat hiilihydraatit rasvat ja proteiinit. Mikro-organismit hajottavat orgaanisen aineksen eri vaiheissa tuottaen välituotteita ja lopulta lopputuotetta eli metaania. Tämä prosessi toimiessaan etenee tasapainossa, jossa jokainen mikro-organismien tuottama välituote toimii ravintona seuraavan vaiheen mikro-organismeille. Tämä reaktiosarja voidaan jakaa neljään osaan, jotka ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi.



Kuva 1 Eloveräisen materiaalin hajoaminen biokaasuprosessissa. (Luostari, S, 10)

Reaktioon vaikuttaa syötteen laatu ja reaktiolämpötila. Lämpötila määrää minkä tyyppiset mikrobit osallistuvat prosessiin sekä reaktionopeuden. Tärkeitä suureita ovat myös reaktiotilan pH sekä syötteen sisältämät ravinteet. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 59–61)

2.1 Hydrolyysi

Hydrolyysi on biokaasuprosessin ensimmäinen välivaihe. Hydrolyysissä mikrobit hajottavat tuottamiensa entsyymien avulla suuret orgaaniset molekyylit, kuten rasvat, hiilihydraatit ja proteiinit. Molekyylien hajotessa syntyy sokereita, aminohappoja, rasvahappoja ja glyserolia. Hiilihydraatteja sisältäviä aineita on syötteessä usein runsaasti. Niihin lukeutuvat yksinkertaiset sokerit, joita mikrobit voivat käyttää ravintonaan sellaisenaan sekä suuria molekyylejä, jotka vaativat pilkkomista, kuten erilaiset polysakkaridit, selluloosa ja hemiselluloosa. Proteiinien pilkkoutuessa syntyy aminoryhmiä, jotka vaikuttavat reaktion tyyppitoisuuteen. Moni hydrolyysiin osallistuva mikro-organismi osallistuu myös seuraavaan vaiheeseen eli asidogeneesiin. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 61)

2.2 Asidogeneesi

Asidogeneesissä mikrobit muuttavat hydrolyysissä syntyneet välituotteet erilaisiksi hapoiksi. Mikrobin synnyttämiä happoja kutsutaan nimellä VFA (Volatile fatty acids). Asidogeneesissä syntyy myös hiiltä, vetyä, ammoniakkia ja alkoholeja. Asidogeneesissä syntyvät välituotteet riippuvat vahvasti syötteen ominaisuuksista. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 62)

2.3 Asetogeneesi

Asetogeneesissä tapahtuu anaerobista hapettumista, jossa mikrobit käyttävät hapettuneita yhdisteitä vastaanottamaan elektroneja, jolloin ne pelkistyvät. Reaktiossa syntyy metaanin raaka-aineita eli vetyä, hiilidioksidia ja asetaattia. Asetogeneesin mikrobit toimivat symbioosissa seuraavan vaiheen eli metanogeneesin mikrobin kanssa. Metanogeeniset vetyä kuluttavat mikrobit kuluttavat vetyä saman verran kuin asetogeeniset mikrobit tuottavat sitä eli reaktio näiden kahden mikrobikannan välillä on tasapainossa. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 62)

2.4 Metanogeneesi

Metanogeneesissä eli biokaasun tuotannon viimeisessä vaiheessa mikrobit tuottavat metaania ja hiilidioksidia vedystä, asetaatista ja hiilidioksidista. Jopa 70 % metaanista syntyy asetaatista ja loput vedystä. kummankin tuotannon hoitaa erillinen mikrobikanta. Asetotrofiset metanogeenit muodostavat metaania asetoonista. Näiden mikrobin kahdentumisaika on 2–12 vuorokautta, joten

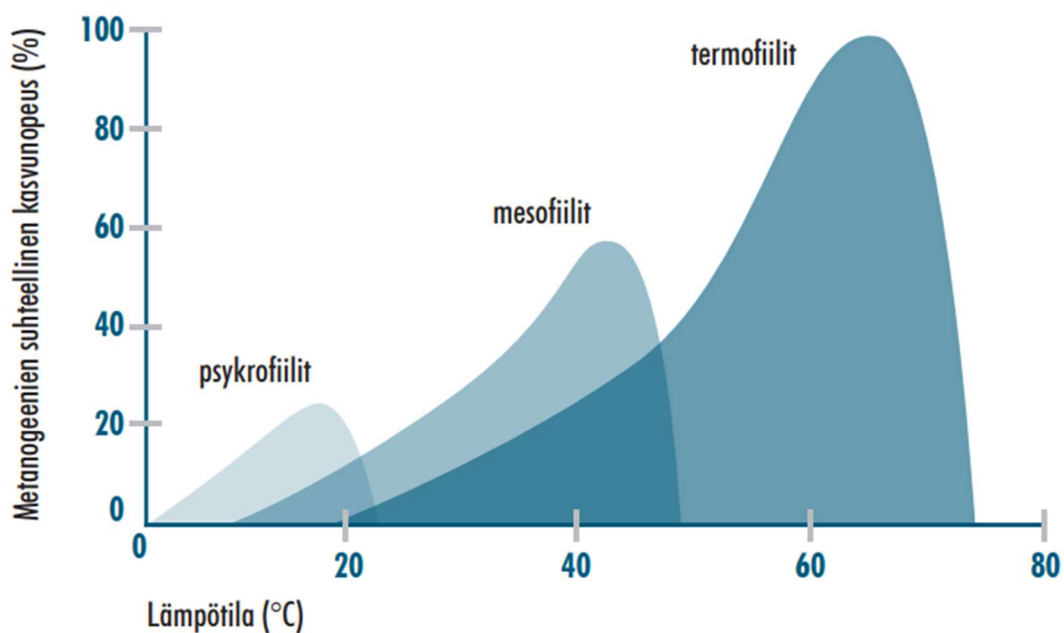
tämä on otettava huomioon suunniteltaessa biokaasureaktorin viipymäaika. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 62–63)

2.5 Biokaasun tuotannon toimintaedellytykset

Biokaasun tuotantoprosessi vaatii hapettoman reaktiotilan, sopivan lämpötilan sekä pH:n. Äärimmäisen tärkeää prosessille on myös laadukas syöte, jossa on sopiva koostumus ja ravinteet. Syöte ei myöskään saa sisältää liikaa prosessia inhiboivia aineita. (Luostarinen, 11)

2.5.1 Lämpötila

Lämpötila on yksi merkittävimmistä muuttujista biokaasuprosessissa. Metanogeenit ovat erittäin herkkiä lämpötilavaihtelulle ja se tuleeikin minimoida reaktorissa prosessin ylläpitämiseksi. Lämpötila määrää myös minkä tyylinen metanogeeninen prosessi reaktorissa tapahtuu. Perinteisissä biokaasureaktoreissa käytetään käytännössä aina joko mesofiilistä tai termofiilistä reaktiota. Mesofiilinen prosessi tapahtuu 35–43 °C lämpötilassa, kun taas termofiilinen prosessi 50–55 °C lämpötilassa. Termofiilisessä prosessissa mikrobien suhteellinen kasvunopeus on suurempi kuin mesofiilisessä prosessissa, mutta toisaalta termofiilit ovat herkempiä lämpötilavaihtelulle. (Luostarinen, 12)



Kuva 2 Metanogeenien suhteelliset kasvunopeudet lämpötilan suhteen (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 64)

Suurin osa reaktiossa syntyvästä energiasta on metaania toisin kuin esimerkiksi aerobisessa hajomisessa, jossa syntyy paljon lämpöenergiaa. Reaktorissa tulee olla tämän takia ulkoinen lämmönlähde, jolla lämmitetään reaktiotilaa ja pidetään lämpötila vakaana. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 63–64)

2.5.2 Biokaasuprosessin pH

Perinteinen biokaasureaktori toimii yleensä 7–8 pH-alueella, mutta syötteen laatu vaikuttaa siihen paljon. Hiilihydraateista syntyvät hapot laskevat pH:ta, kun taas proteiineista syntyvä ammoniakki nostaa sitä. Jokaisella biokaasuprosessin vaiheella on tietyt pH-optimit, mutta reaktori asettuu aina tietylle pH-tasolle, joka on kompromissi eri vaiheiden välillä.

Hiilidioksidin määrä reaktorissa määrää reaktorin puskurikyvyn. Hiilidioksidi liukenee veteen tuottaen hiilihappoa. Hiilihapo muuttuu bikarbonaatiksi ja karbonaatiksi, jotka reagoivat reaktorissa olevan ammoniakin kanssa alentaen pH:ta. Hiilihapon liukenevuus veteen laskee lämpötilan noustessa, joten termofiilisessä prosessissa pH on mesofiilistä prosessia korkeampi. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 65)

2.5.3 Ravinteet

Biokaasureaktio vaatii ravinteita ja hivenaineita anaerobisten mikro-organismien lisääntymisen ja ylläpitämisen varmistamiseksi. Näistä tärkeimpiä ovat hiili, typpi, fosfori ja rikki. On myös laaja skaala eri metalleja ja muita hivenaineita, joita mikrobit tarvitsevat selviytyäkseen. Ravinteilla on positiivinen vaikutus reaktorin toimintaan ja niillä pystytään parantamaan reaktorin toimintaa. (*Deublein, Dieter. Steinhäuser, Angelika*, 116-117)

2.6 Reaktion inhibiittorit

Reaktioon vaikuttavat inhibiittorit syntyvät joko reaktion sivutuotteena tai tulevat syötteen mukana. Inhibiittoreille on vaikea löytää yleisiä raja-arvoja, koska niiden vaikutus ja määrä vaihtelevat reaktorin lämpötilan ja syötteen laadun mukaan. Mikro-organismeilla on myös vaihteleva kyky sopeutua muuttuviin olosuhteisiin, jotka vaikuttavat inhibiittorien raja-arvoihin. Näistä tärkeimpiä ovat ammo-

niakki, rasvahapot sekä rikkivety. Syötteiden sisältämällä mahdollisilla antibiooteilla ja raskasmetalleilla on myös negatiivinen vaikutus prosessiin. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 111–112)

2.6.1 Rasvahapot

Prosessia inhiboivat pitkät rasvahapot (LCFA Long chain fatty acids) syntyvät rasvaisten komponenttien hajotessa anaerobisessa käymisessä. Pitkäketjuisissa rasvahapoissa on vähintään 14–16 hiiliatomin ketju. Näitä ovat esimerkiksi steariinihappo ja linoleenihappo. Pitkäketjuiset rasvahapot saattavat akkumuloitua prosessiin, jos syötteet ovat erittäin rasvaisia. Pitkäketjuiset rasvahapot inhiboivat metanogeeniä varsinkin termofiilisellä toimintalämpötilalla. Mesofiilisessä toimintalämpötilassa mikrobit eivät ole yhtä herkkiä pitkäketjuisille rasvahapoille. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 69)

2.6.2 Rikkivety H₂S

Proteiinien hajotessa anaerobisessa käymisessä syntyy rikkivetyä H₂S. Rikkivetyä syntyy myös sulfaattia pelkistävien bakteerien toimesta. Sulfidi-ioneilla (S²⁻) on taipumus saostua syötteessä olevien metallien kanssa sitoen tärkeitä ravinteita. Rikkivedyllä on myös korrodisoiva vaikutus reaktorin rakenteisiin korkeissa pitoisuuksissa. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 68)

2.6.3 Suolat

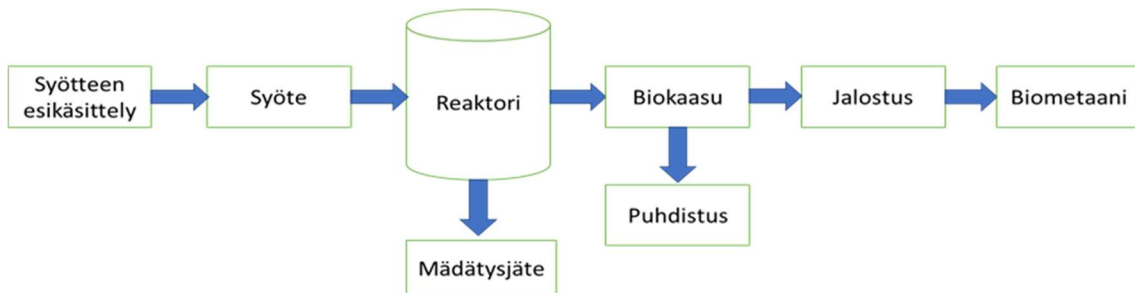
Suoloilla saattaa olla negatiivinen vaikutus biokaasuprosessiin korkeissa pitoisuuksissa. Näistä yleisimpiä ovat Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺. Syötteet saattavat sisältää suuria määriä suoloja, jos syötteiden pH-säätöön on käytetty NaOH-liuosta tai syötteiden ollessa elintarviketeollisuudesta. Mikrobit sopeutuvat suhteellisen hyvin erilaisiin suolapitoisuuksiin, mutta korkeiden suolapitoisuuksien tiedetään inhiboivan biokaasuprosessia. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 70)

2.6.4 Ammoniakki

Ammoniakki toimii typpiravinteena mikrobeille, mutta korkeina pitoisuuksina sillä on myös inhiboiva vaikutus prosessiin. Ammoniakkia esiintyy liuenneena syötteeseen joko vapaana ammoniakkina NH_3 tai ammoniumionina NH_4^+ . Näiden suhteellinen määrä riippuu syötteen lämpötilasta ja pH:sta. Lämpötilan ja pH:n noustessa vapaan ammoniakin NH_3 määrä kasvaa. Vapaa ammoniakki on ammoniumionia huomattavasti haitallisempi biokaasuprosessille, koska se pystyy lävistämään metanogeenien soluseinän haitaten niiden toimintaa. Mikrobeille erityisen haitallista on ammoniakin määrän nopea kasvu, jolloin mikrobit eivät kerkeä sopeutua muutokseen. Vapaan ammoniakin NH_3 pitoisuuksien raja-arvona voidaan pitää $80 \text{ mgNH}_3/\text{l}$, kun taas ammoniumionin haitalliset pitoisuudet ovat huomattavasti korkeampia $1,5\text{-}10 \text{ gNH}_4^+/\text{l}$. (*BIOKAASUTEKNOLOGIA*, 68–69)

3 BIOKAASUN TUOTANTO

Biokaasun tuotannossa käytetään panossyötteistä tai jatkuvatoimista reaktoria. Reaktorissa luodaan olosuhteet anaerobisille mikrobeille pitämällä niiden toiminnalle tärkeät parametrit oikeissa arvoissa ja tasaisina. Tyypillinen prosessikaavio on molemmille reaktorityypeille sama, missä ensin syötetään syöte reaktorille. Reaktorissa syötteestä tuotetaan biometaaniamia ja mädätysjätettä, mitkä siirretään reaktorista jatkojalostettavaksi.



Kuva 3. Biokaasureaktorin prosessikaavio (mukaillen, Luostarinen, 15)

3.1 Syöte ja syötteen esikäsittely

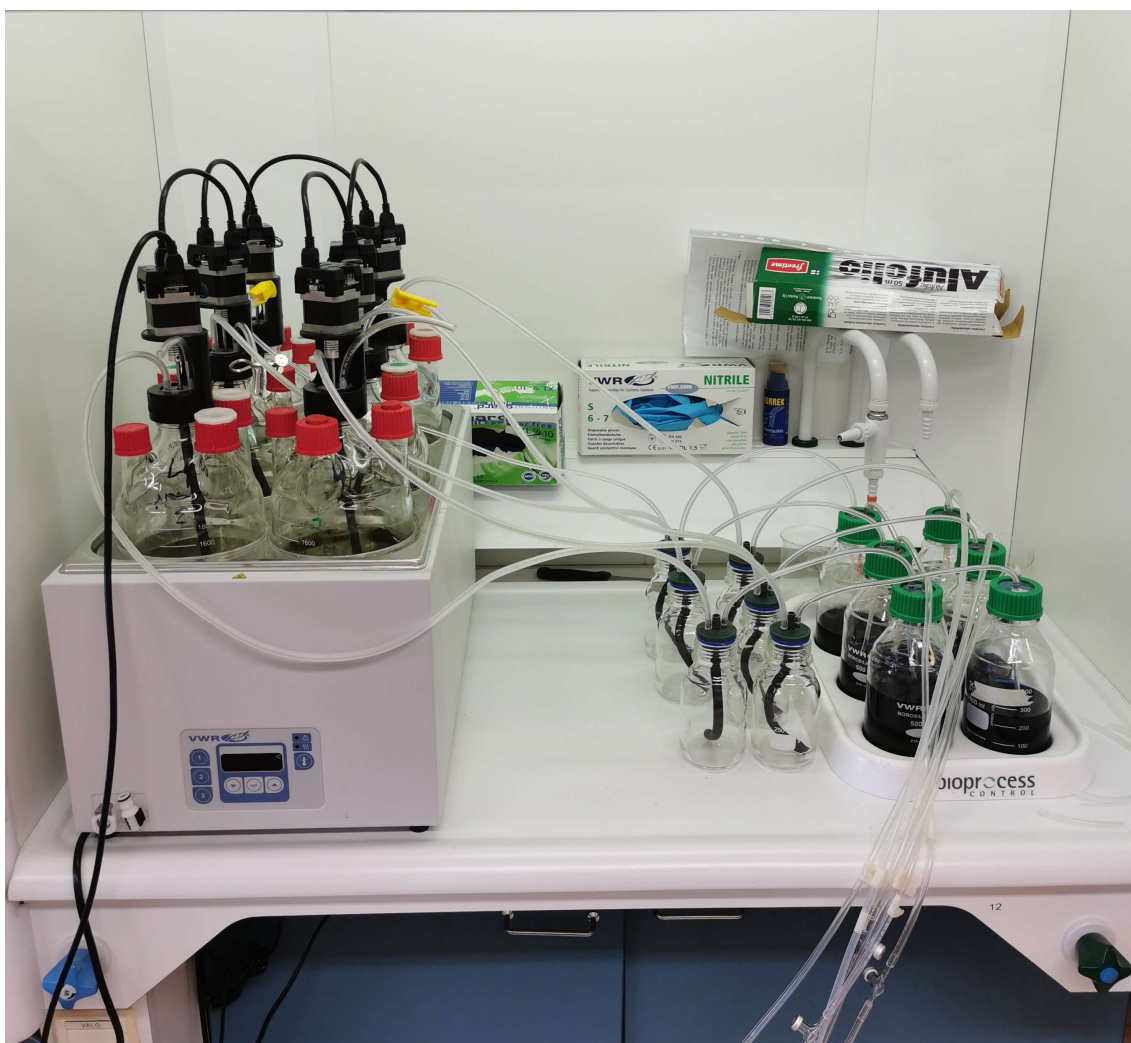
Anaerobiseen prosessiin soveltuvia syötteitä syntyy teollisuudessa ja maataloudessa huomattavia määriä. Näihin lukeutuu muun muassa teollisuuden jätteet, ruokateollisuuden jätteet, maatalousjätteet, sekä yhdyskuntajätteet. Syötteen soveltuvuus biokaasuprosessille tulee aina analysoida ja sen tulee sisältää sopivasti helposti hajoavia orgaanisia tuotteita, kuten hiilihydraatteja, proteiineja, ja rasvoja. Syötteen laatu ja homogeenisuus on tärkeää reaktorin toiminnalle. Syötteen esikäsittelyllä pyritään takaamaan reaktoriin syötettävän syötteen laatu, joka takaa reaktorin vakaan toiminnan. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 53–55)

3.1.1 Syötteen laadun ja potentiaalin määrittäminen kokeellisesti

Syötteen laatua ja potentiaalia pystytään tarkastelemaan lukuisilla eri tavoilla. Yksinkertaisimmillaan voidaan tarkastella syötteelle tärkeitä arvoja, kuten pH:ta (standardi EN 12176), VS (Volatile solids) /ODM (organic dry matter, standardi EN 12879) tai tarkkailemalla syötteen tyyppipitoisuuksia (standardi ISO 2556; ISO 11261) sekä kemiallista hapentarvetta COD (Chemical oxygen demand,

standardi DIN 38 414). Tutkimusmenetelmille luotujen standardien avulla pystytään määrittämään kyseiset arvot. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 59–63)

Syötteen potentiaalia voidaan tarkastella myös biokemiallisella metaanintuottopotentiaalikokeella. Koe suoritetaan metaanintuottopotentiaalin tarkasteluun soveltuvalla laboratoriolaitteistolla. Laitteistolla luodaan anaerobiselle hajoamiselle soveltuvat olosuhteet sekä tutkitaan prosessissa syntyvän kaasun koostumusta ja tilavuutta. Näin saadaan selville syötteen metaanintuottopotentiaali sekä näytteen anaerobisen hajoamisen reaktionopeus. Koe voidaan suorittaa joko panostyyppisesti tai jatkuvatoimisella laitteistolla.



Kuva 4. Koejärjestely panostyyppisessä metaanintuottopotentiaali kokeessa. (Mikko Ruohomäki)

Panostyyppisessä metaanintuottopotentiaalikokeessa laitetaan testattava syöte ilmatiiviisiin astioihin, joissa on sekoittimet. Astioihin syötetään typpeä, joka syrjäyttää hapen. Näin saadaan luotua anaerobiset olosuhteet kokeelle. Astioissa syntynyt biometaanii johdetaan natriumhydroksidi

(NaOH)-liuosta sisältävien astioiden läpi. Tällä prosessilla poistetaan tuotetusta kaasusta anaerobisessa hajoamisessa syntynyt hiilidioksidi (CO₂). Hiilidioksidin poiston jälkeen kaasu siirtyy mitauslaitteistolle, joka määrittää tuotetun kaasun tilavuuden. Kaasusta voi kokeen aikana myös analysoida kaasun koostumusta. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 64)

3.1.2 Syötteen metaanintuottopotentiaalin tarkastelu teoreettisesti

Syötettä tarkasteltaessa teoreettisesti täytyy tietää syötteen kemiallinen koostumus. Bushwellin yhtälöllä, jonka kehittivät Bushwell ja Hatfield (1936), pystytään määrittämään maksimaalinen metaanin tuotto orgaanisesta aineksesta (C_nH_aO_b) stokiometrisellä yhtälöllä:

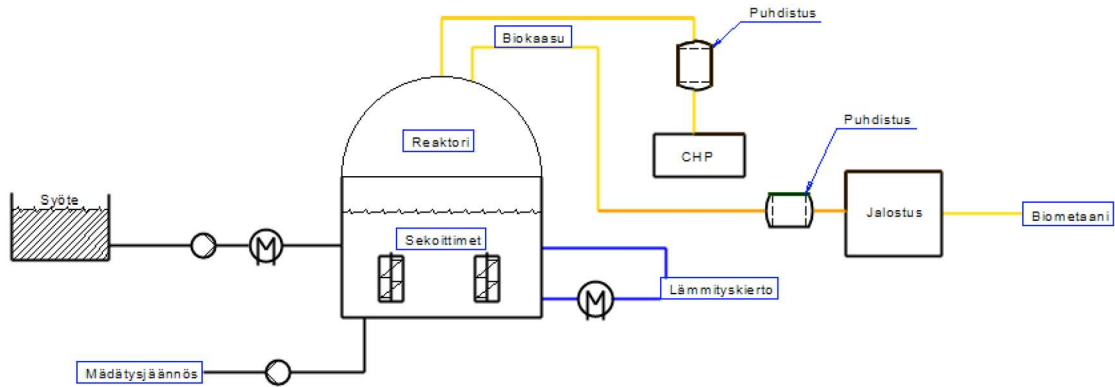
$$C_nH_aO_b + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2}\right) H_2O \rightarrow \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}\right) CH_4 + \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4}\right) CO_2$$

Kaava 1 (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 113).

Teoreettisesti maksimaalista tuotantoa tarkastelemalla saadaan usein liian positiivisia arvioita, mitkä eivät usein vastaa todellisuutta kovin hyvin. Tämä tuleekin ottaa huomioon teoreettisesti tarkasteltaessa metaanintuottopotentiaalia. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 113)

3.2 Jatkuvatoiminen biokaasureaktori

Jatkuvatoiminen ja jatkuvasekoitteinen biokaasureaktori eli CSTR (continuously stirred tank reactor) on yleisin reaktorityyppi syötteen ollessa märkää TS (total solids) < 15 %. Tämä tekniikka soveltuu parhaiten maatalouden, teollisuuden ja jätevesien sivuvirtojen hyödyntämiseen. Jatkuvatoimisessa reaktorissa on säännöllinen syöttö ja poisto, jolla saadaan aikaan jatkuva biokaasun tuotto. Reaktori on perinteisesti lieriön muotoinen, jossa on lapasekoittimet sekä lämmönsiirtimet, joilla säädetään reaktorin lämpöä. Sekoittimien tarkoitus on pitää reaktorin aines homogeenisenä sekä taata tasainen lämpö reaktorin sisällä. Sekoittimella saadaan myös aikaan tasainen mikrobien kontakti saatavilla olevien ravinteiden kanssa. Sekoitus edesauttaa myös kaasun siirtymistä nesteestä kaasuun reaktorin yläosassa. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 83)



Kuva 5. Biokaasulaitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio. Mukailtu (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 10)

Reaktorin lämpötilaa pidetään yllä yleensä reaktorin itse tuottamalla lämmöllä. Kierrättämällä lämmintä vettä reaktorin sisällä olevissa lämmityselementeissä tai reaktorin vaipassa. Reaktorin mädätysjäännöksen energiavirta voidaan myös ottaa talteen erillisillä lämmönsiirtimillä, joissa mädätysjäännöksen lämpö siirretään reaktoriin menevään syötteeseen. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 84; Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 117)

Reaktorin syöttö- ja poistovirrat määräytyvät reaktorin syötteen vaatiman viipymäajan HRT (hydraulic retention time) ja orgaanisen kuormituksen OLR (organic load rate) mukaan. Prosessilämpötilalla pystytään myös vaikuttamaan viipymäaikaan. CSTR-laitoksen toimiessa mesofiilisella alueella 35–40 °C:een lämpötilassa on viipymäaika perinteisesti noin 20–30 vuorokautta riippuen syöttestä. Syötteen perusteellinen tutkimus on ensiarvoisen tärkeää, kun suunnitellaan reaktorin oikeaa viipymäaikaa ja orgaanista kuormitusta. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 71–77)

3.3 Organic load rate OLR

Reaktorin orgaaninen kuormitus OLR (organic load rate) ilmaisee, kuinka paljon orgaanista ainetta reaktoriin syötetään sen toimintatilavuutta kohden vuorokaudessa.

$$OLR = \frac{q_m VS}{V_{reaktori}} = \frac{kgVS}{m^3 vrk} \quad \text{Kaava 2}$$

q_m = massavirta reaktoriin (m^3/vrk)

VS = orgaaninen kuiva-aine

V_{reaktori} =reaktorin tilavuus (m³)

Sopiva OLR-arvo riippuu pitkälti syötteestä ja sen mukana tulevista ravinteista sekä inhibiittoreista. OLR-arvon noustessa reaktorin tilavuus käytetään tehokkaammin, mutta samalla ravinteiden ja mahdollisten inhibiittorien konsentraatio kasvaa. Tämä voi johtaa siihen, että anaerobinen prosessi reaktorissa pysähtyy. Reaktorin orgaaninen kuormitus saattaa vaihdella hyvinkin paljon riippuen siinä käytettävästä syötteestä. Helposti hajoavat syötteet mahdollistavat korkeamman OLR-arvon reaktorille, kun taas vaikeasti hajoavat syötteet pakottavat pitämään OLR-arvon alhaisena. Sopiva orgaaninen kuormitus tuleekin testata kokeellisesti reaktorissa käytettävälle syötteelle, jotta reaktorin toiminta olisi vakaata. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 72–73)

3.4 Hydraulinen viipymä HRT (hydraulic retention time)

Reaktorin hydraulinen viipymä on laskennallinen arvo, jolla ilmaistaan kauanko kestää syrjäyttää koko reaktoritilavuus uudella syötteellä.

$$HRT = \frac{V_{\text{reaktori}}}{q_v} = vrk \quad \text{Kaava 3}$$

V_{reaktori} = reaktorin tilavuus [m³]

q_v = tilavuusvirta reaktoriin [m³/vrk]

Reaktorin hydraulinen viipymä määräytyy millä lämpötila-alueella reaktori toimii, syötteestä ja prosessin tavoitteista. Hydraulinen viipymä vaihtelee myös riippuen siitä, kuinka pitkälle anaerobinen hajoamisprosessi halutaan viedä. CSTR-reaktoreissa on tärkeä sopivan pitkä hydraulinen viipymä. Viipymän ollessa liian pieni, ei metaania tuottava mikrobikanta kerkeä uusiutumaan tarpeeksi nopeasti verrattuna siihen, kuinka nopeasti niitä poistuu reaktorista. Mikrobeista metanogeenit ovat kaikista hitaimmin uusiutuvia ja vaativatkin vähintään 12–14 vuorokauden viipymäajan, jotta anaerobinen prosessi ei häiriintyisi. (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 74–75)

4 BIOKAASUN PUHDISTUS JA JALOSTUS

Biokaasun puhdistuksessa ja jalostuksessa pyritään poistamaan reaktorista tulleesta kaasusta epäpuhtaudet ja inertit kaasut. Näin pysytään nostamaan kaasun energiatiheyttä ja poistamaan siitä mahdollisesti käyttölaitteistolle haitalliset komponentit. Puhdistuksessa poistetaan ainoastaan kaasun sisältämät haitalliset aineet kuten vesihöyry, rikin yhdisteet, siloksaanit ja ammoniakki.

Epäpuhtaus	Laittehaittoja	Päästöhaittoja	Puhdistusmenetelmä	
Vesihöyry	Syöpyminen, Tukkiutuminen		Adsorptio (silikageeli ym.), absorptio (glykoli ym.), jäähdytys, paineistus	
Rikkiyhdisteet	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys, haju	Biologinen absorptio (vesi), adsorptio (rauta, aktiivihili), kemiallinen	
Halogenoidut hiilivedyt	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys	Absorptio, adsorptio, jäähdytys	
Ammoniakki		Myrkyllisyys, rehevöityminen	Absorptio (vesi), adsorptio	
Siloksaanit	Karstoittuminen		Fysikaalinen adsorptio (aktiivihili, silikageeli ym. kemiallinen absorptio (vesi, orgaaniset nesteet)	

Hiukkaset	Karstoittuminen		Absorptio, suodatus, sykloni	
Happi	Räjähdys		Adsorptio, kemiallinen	

Taulukko 1 (BIOKAASUTEKNOLOGIA, 131)

Jalostuksessa pyritään poistamaan inertit kaasut puhdistetusta biokaasusta ja näin parannetaan sen energiatiheyttä. Reaktorikaasun sisältämät inertit kaasut ovat pääasiassa typpeä ja hiilidioksidia. Jalostuksen yhteydessä voidaan poistaa myös vielä kaasuun jääneitä epäpuhtauksia tarvittaessa. Reaktorikaasun koostumus määrääkin siihen käytettävät puhdistus- ja jalostusmenetelmät. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 329–330)

4.1 Reaktorin raakakaasun puhdistus

Raakakaasun puhdistuksessa pyritään siitä poistamaan epäpuhtaudet, jotka ovat haitallisia laitteistolle ja kaasun jatkokäsittelylle. Puhdistuksella pystytään myös vaikuttamaan kaasun tuottamiin haitallisiin päästöihin. Yleisimpiä epäpuhtauksia ovat rikkivety H_2S , vesihöyry ja ammoniakki.

Yhdiste	yksikkö	Raakakaasu
Metaani	mol-%	50–80
Hiilidioksidi	mol-%	15–50
Typpi	mol-%	0–5
Happi	mol-%	0–1
Rikkivety	mg/m ³	100–10000
Ammoniakki	mg/m ³	0–100
Kloori	mg/m ³	0–100
Fluori	mg/m ³	0–100
Siloksaanit	mg/m ³	0–100

Taulukko 2 (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 330)

Biokaasun käyttötarkoituksesta ja koostumuksesta riippuen vaatii se tietyn puhtaustason. Biokaasusta tuotetaan yleisimmin lämpö- ja sähköenergiaa lämmityskattilan avulla tai kineettistä energiaa liikennekäytössä. Liikennekäyttöön tuotetulla kaasulla on korkea puhdistus- ja jalostusaste. Läm-

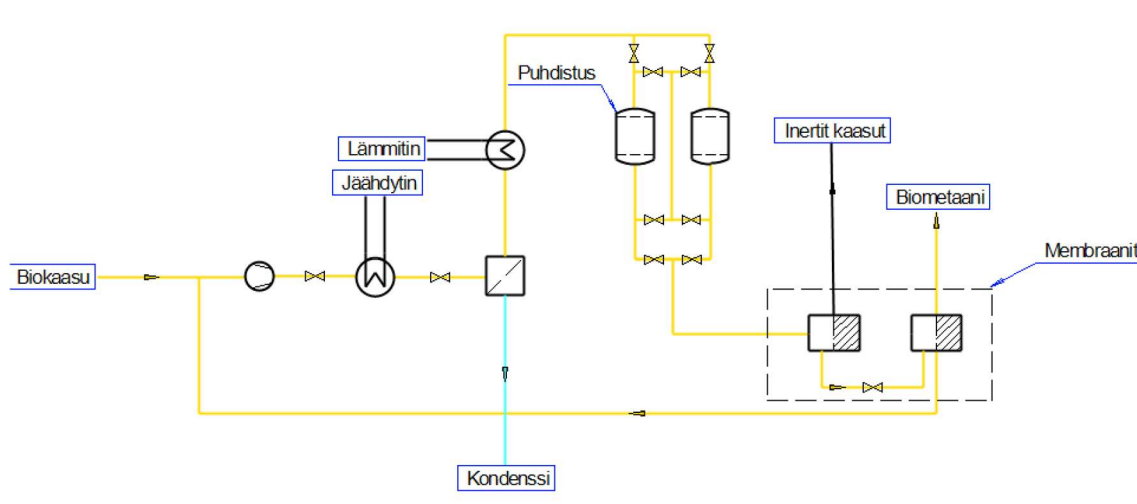
mityskattilalle syötetty kaasu voi olla alhaisemman puhdistusasteen omaavaa kaasua, mutta siitäkin on poistettava lämmityskattilalle mahdollisesti mekaanisia vaurioita aiheuttavat yhdisteet, kuten rikkivety H_2S ja vesihöyry. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 331–332; BIOKAA-SUTEKNOLOGIA, 131–132)

4.2 Biokaasun jalostus

Jalostuksessa pyritään poistamaan biokaasusta inertit kaasut, kuten hiilidioksidi CO_2 ja mahdollisesti typpi N_2 . Yleisimpiä jalostustekniikoita ovat vesipesu-, absorptio-, adsorptio- sekä membraanitekniikka. Kryojalostustekniikkaa käytetään myös, mutta menetelmä on kallis ja teknisesti vaativa toteuttaa pienemmässä mittakaavassa, mikä soveltuu biokaasun jalostukseen. Jalostusmenetelmillä syntyy lähes aina metaanihävikkiä, joka pyritään minimoimaan tekniikan mukaan esimerkiksi kierrättämällä kaasu jalostussysteemin läpi useamman kerran tai asentamalla useita jalostuselementtejä peräkkäin. Jalostussysteemien kehittyessä on pystytty minimoimaan hävikki ja nykyään suurin osa jalostustekniikoista ovatkin tehokkaita. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 346–349; BIOKAA-SUTEKNOLOGIA, 134–135)

4.2.1 Membraanitekniikka

Membraaniteknologiassa käytetään hyödyksi hiukkasten eri kokoja. Jalostettava kaasu johdetaan pienten tuubien läpi, jotka erottelevat hiilidioksidin ja mahdolliset rikkivetyjäämät metaanista. Prosessin alussa kaasun painetta korotetaan kompressorilla 7–20 bar paineeseen ja jäädytetään, mikä aiheuttaa faasimuutoksen kaasun sisältämälle vesihöyrylle. Vesikondenssi johdetaan prosessista pois. Tämän jälkeen kaasu jälleen lämmitetään ja johdetaan membraaneille. Membraaneissa erotellaan hiilidioksidi CO_2 ja metaani CH_4 . Membraanijalostuksessa käytetään useaa membraanisyksikköä, jotta jalosteen laatu olisi mahdollisimman hyvä. Membraanitekniikalla on mahdollista ottaa talteen myös hiilidioksidi mahdollista jatkokäyttöä varten.

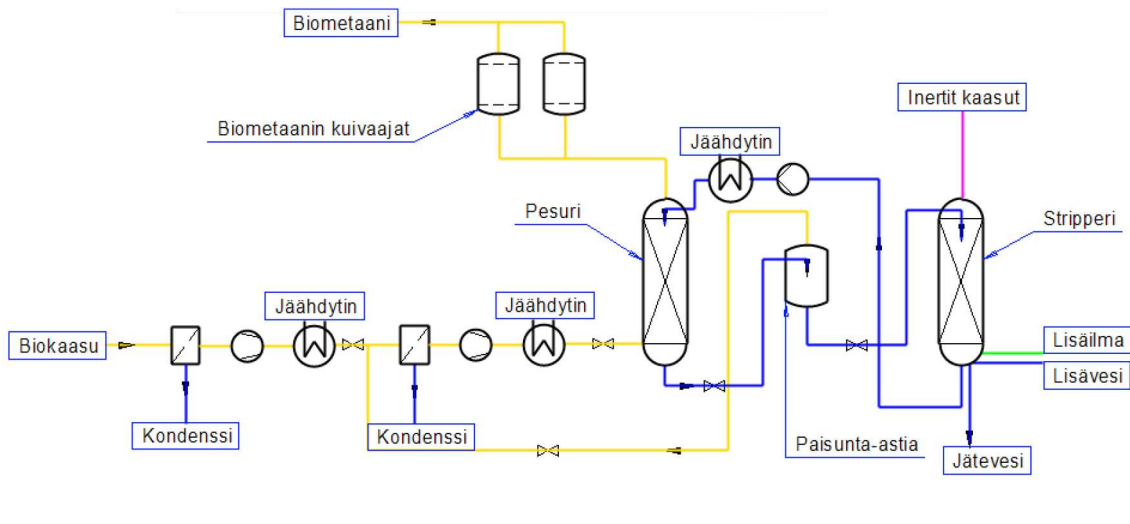


Kuva 6. Yksinkertaistettu prosessikaavio membraanijalostuslaitoksesta. Mukailtu (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 363)

Membraanijalostustekniikalla pystytään tuottamaan hyvälaatuista biometaania, jonka metaanipitoisuus on 85–99 %, metaanihävikin ollessa vain 1–15 %. Membraanijalostuksen sähkönkulutus on perinteisesti $0,18\text{--}0,35 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}_n^3$ raakaa biokaasua. Modernit membraanilaitokset pääsevät jopa $0,2 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}_n^3$ sähkönkulukseen. Membraanitekniikka ei ole herkkä kaasun virtausvaihtelulle, jolloin se sopii mainiosti kohteisiin, joissa tapahtuu mahdollisesti kaasuntuotannon vaihteluita. Membraanitekniikka sopii myös mainiosti hyvin pieniin jalostamoihin. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 362–364)

4.2.2 Vesipesu

Vesipesujalostuksessa käytetään hyödyksi hiilidioksidin suurempaa liukoisuutta veteen metaaniin verrattuna. Vesipesua voi käyttää myös raakakaasun puhdistukseen, koska rikki- ja ammoniakkiyhdisteiden vesiliukoisuus on huomattavasti korkeampi kuin hiilidioksidin tai metaanin. Vesipesu on yksinkertainen menetelmä poistaa epäpuhtaudet sekä hiilidioksidi biokaasusta. Menetelmä soveltuu niin pieniin kuin suuriinkin laitoksiin. Vesipesulla päästäänkin yli 96 % metaanipitoisuuksiin jalostetussa biometaanissa. Yleisesti ottaen se on edullinen jalostusmenetelmä, mutta suuret lämpötilan vaihtelut systeemin ulkopuolella saattavat nostaa käyttökustannuksia, koska systeemissä kiertävää vettä joudutaan sen takia joko lämmittämään tai jäähdyttämään. Vesipesun sähkönkulutus on perinteisesti $0,20\text{--}0,30 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}_n^3$ raakakaasua kohden. Sähkönkulutus vaihtelee kuitenkin laitoksen koon mukaan. Suurilla laitoksilla päästään pienempään sähkönkulutukseen, kun taas pienet laitokset kuluttavat huomattavasti enemmän sähköä suhteutettuna tuotettuun biometaaniin.



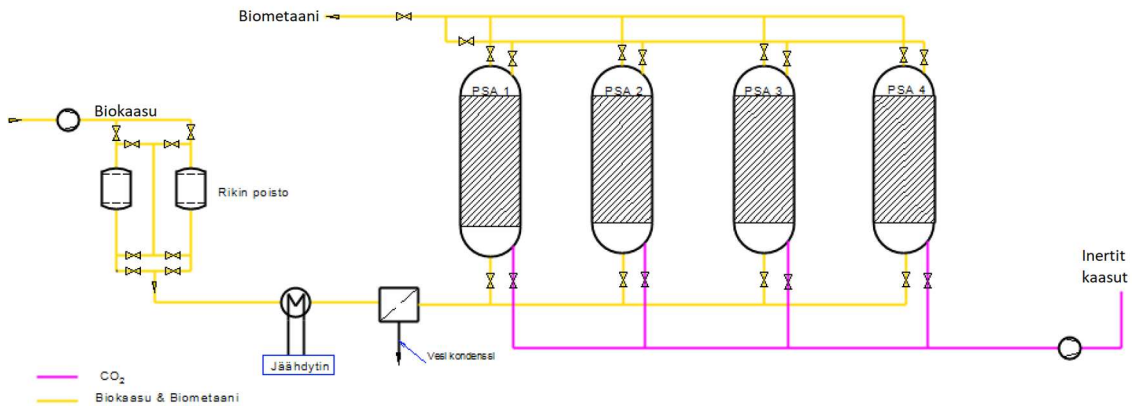
Kuva 7. Yksinkertaistettu prosessikaavio vesipesujalostusjärjestelmästä. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 354)

Vesipesussa on absorptio- ja desorptiotorni, joissa on suljettu vesikierto. Aluksi biokaasu paineistetaan noin 4–8 bar paineeseen, jonka jälkeen se jäähdytetään 5–10 °C lämpötilaan ja syötetään absorptiotorniin pohjan kautta. Suuremmilla paineistuksilla pystytään vaikuttamaan merkittävästi tornien kokoon. Vesi syötetään absorptiotornin yläpäästä ja virtaa vastavirtaan kaasun kanssa. Kaasun tullessa kosketuksiin veden kanssa liukenevat kaasussa olevat epäpuhtaudet ja hiilidioksidi veteen, ja jalostettu biokaasu otetaan talteen tornin yläpäästä. Veteen liukenee aina kuitenkin metaania, joka voidaan ottaa talteen paisunta-astialla. Vesi johdetaan absorptiotornista paisunta-astiaan, jossa äkillisellä paineen laskulla saadaan veteen liuennut metaani talteen. Paisunta-astian vesi johdetaan desorptiotorniin. Desorptiotornin pohjalta syötetään paineilmaa ja vesi valuu vastavirtaan ilman kanssa tornin pohjalle. Hiilidioksidi ja osa muista epäpuhtauksista poistuu ilman mukana prosessista. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 353–356; BIOKAASUTEKNOLOGIA, 140–143)

4.2.3 Adsorptio eli PSA (pressure swing adsorption)

Adsorptiota hyödyntävässä jalostuksessa käytetään biokaasun jalostukseen PSA (pressure swing adsorption) -teknologiaa. Adsorptiossa kaasu johdetaan huokoisen materiaalin läpi, joista yleisin on aktiivihiili. Lisäksi on myös muita käytettävissä olevia adsorbentteja, kuten silikonigeelit, zeoliitit ja molekyyliseulat. Kaasumolekyylit tarttuvat adsorbentin pintaan vapauttaen lämpöä, mutta ei ke-

miallisesti reagoi niiden kanssa. Adsorptiolla pystytään poistamaan haitalliset yhdisteet kuten rikki-
vety H_2S , ammoniakki NH_3 sekä vesihöyry. Adsorptiolla pystytään poistamaan tarvittaessa myös
biokaasussa oleva typpi N_2 . Käytännössä kuitenkin yleensä biokaasu puhdistetaan aina ennen
PSA (pressure swing adsorption) -systeemiin syöttämistä. Puhdistettu biokaasu paineistetaan noin
4–7 bar paineeseen, jonka jälkeen se syötetään adsorptioyksiköihin, joissa hiilidioksidi CO_2 adsor-
boituu ja metaani CH_4 läpäisee sen. Desorptioyksiköissä tapahtuu laskemalla painetta. Metaanihä-
vikkiä vähennetään kierrättämällä desorption regenerointikaasu yksiköissä.



Kuva 8. Yksinkertaistettu prosessikaavio PSA-jalostusjärjestelmästä. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 351)

PSA (pressure swing adsorption) -metodilla pystytään tuottamaan modernilla laitteistolla laadukasta biometaania, joka sisältää noin 97,5–98,5 % metaania CH_4 , hävikin ollessa vain 1,5–2 %. Hävikin kustannuksella pystytään nostamaan metaanipitoisuutta jopa yli 99 prosentin. PSA-jalostuslaitoksen sähkön kulutus on 0,18–0,35 kWh_{el}/m_n^3 raakakaasua, mutta teknologian kehittyessä on joillakin laitoksilla päästy jopa 0,17 kWh_{el}/m_n^3 raakakaasua, kun systeemiin syötetty kaasu on ollut laadukasta. (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 349–353)

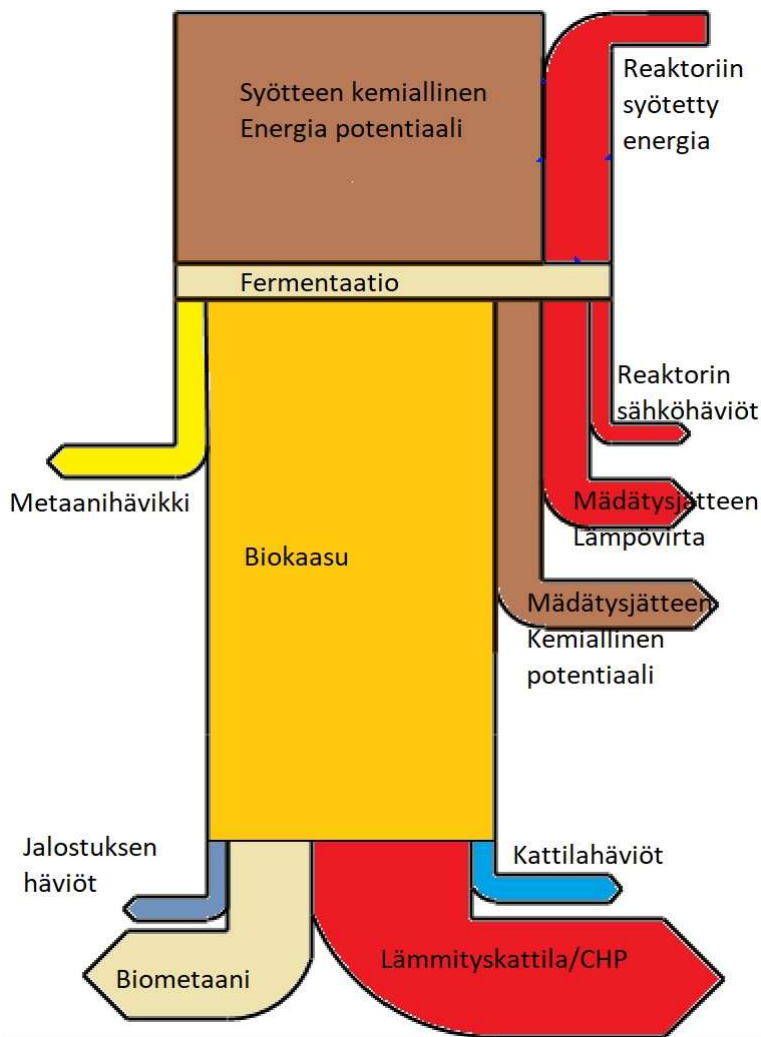
4.2.4 Kryojalostustekniikka

Kryotekniikkaan perustuva jalostus on vanha maakaasun jalostusmenetelmä. Kryojalostusta on ruvettu käyttämään biokaasun jalostukseen kuitenkin vasta 2000-luvulla. Kryojalostuksessa käytetään hyödyksi aineiden eri höyrystymislämpötiloja ja sillä pystytään erottelemaan inertit kaasut biokaasusta erittäin tarkasti. Kryojalostuksessa kaasun esipuhdistus tulee tehdä hyvin tarkasti tukkeutumisvaaran vuoksi. Kryojalostuksella päästäänkin yleensä erittäin puhtaisiin lopputuotteisiin ja metaanihävikki on hyvin pientä. Menetelmällä voidaan poistaa myös biokaasun sisältämä typpi.

Kryojalostuksessa biokaasusta poistetaan ensin rikkivety ja mahdolliset siloksaanit. Esipuhdistuksen jälkeen kaasu paineistetaan noin 18–25 bar paineeseen, jonka jälkeen se kuivataan ja jäädytetään -50 – -59 °C lämpötilaan, jolloin hiilidioksidi muuttuu nestemäiseksi ja se voidaan poistaa jalostusyksiköstä. (*Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 364–365*)

5 BIOKAASULAITOKSEN ENERGIATASE JA -VIRRAT

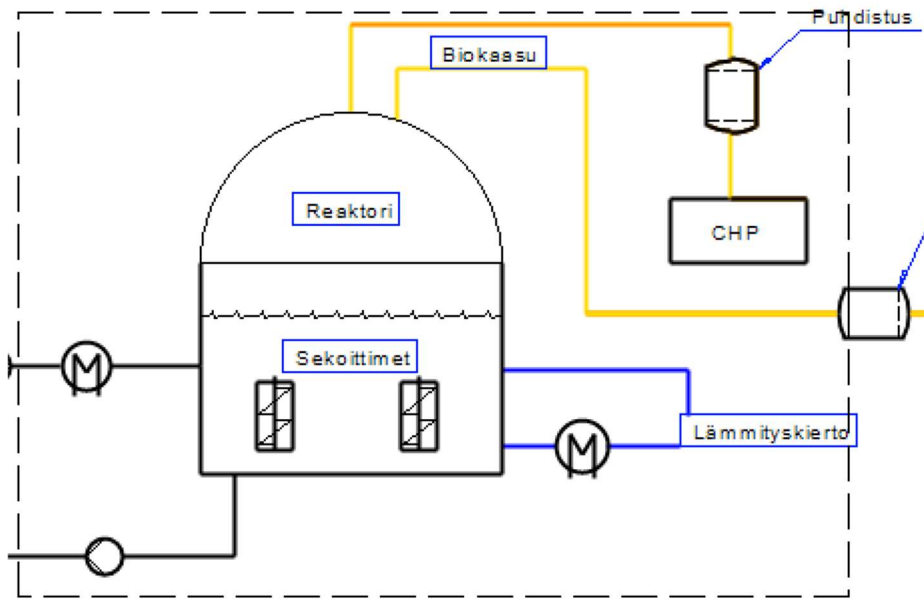
Biokaasulaitoksen energiatase määrittää suurilta osin onko biokaasulaitos kannattava. Suomen olosuhteissa vaihteleva energiantarve vuodenajan mukaan vaikuttaa energiataseeseen. Talvella lämmitystarve on huomattavasti korkeampi kuin kesäisin. Biokaasulaitos voi olla omavarainen energian suhteen, mutta laitoksen ollessa sähköverkon piirissä avaa se mahdollisuuksia biokaasun jalostuksen suhteen. Biokaasulaitoksiin liittyvien teknologioiden kehittyessä laitoksista on tullut yhä energiatehokkaampia ja kannattavampia rakentaa.



Kuva 9. Biokaasulaitoksen energiavirrat. Mukailtu (Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David, 224)

5.1 Biokaasureaktorin energiatase ja -virrat

Jatkuvatoimisen ja jatkuvasekoitteen biokaasureaktorin energiavirtoja tarkasteltaessa huomataan, että biokaasulaitoksella on hyödynnettävissä olevia energiavirtoja. Mädätysjätteessä on myös hyödynnettävissä olevia energiavirtoja. Energiatasetta tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon kaikki energiavirrat laitokseen ja laitoksesta pois sekä rajata tarkasteltava alue. Tarkastelussa oletetaan, että biokaasureaktori tuottaa itse käyttämänsä sähkön ja lämmön, eikä oteta huomioon putkistoissa tapahtuvaa lämpöhäviötä.



Kuva 10. Reaktorin energiatase tarkastelun rajat.

Laitokseen syötetyt energiavirrat ovat:

$$Q_{tot} = Q_{bio} + Q_{läm} + Q_e - (Q_{läm_r} + Q_{e_{sek}} + Q_{häv})$$

Kaava 4

Q_{tot} = Syötteestä tuotettu energia [kWh/t]

Q_{bio} = syötteestä tuotettu biokaasu jalostukseen [kWh/t]

$Q_{läm}$ = Tuotettu lämpöenergia [kWh/t]

Q_e = Tuotettu sähköenergia [kWh/t]

$Q_{läm_r}$ = Reaktoriin lämmitykseen kulunut energia [kWh/t]

$Q_{e_{sek}}$ = Sekoittajien käyttämä sähköenergia [kWh/t]

$Q_{häv}$ = Reaktorin lämpöhäviöt [kWh/t]

Reaktorin häviöihin kuuluvat reaktorin lämpöhäviöt, kattilan hyötysuhde, reaktorin metaanihäviöt sekä mädätysjätteen mukana siirtyvä lämpö- ja metaanipotentialihäviö. Reaktorin lämpöhäviöitä tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon reaktorin seinämärakenne ja tietää kyseisen materiaalin lämmönläpäisykerroin tai lämmönjohtavuus.

$$Q_{sei_{häv}} = U * A * \Delta T \text{ kaava 5}$$

$Q_{sei_{häv}}$ = Seinämästä johtunut lämpöenergia. (J/s)

U= lämmönsiirtymiskerroin (W/m²K)

A = Reaktorin seinämän pinta-ala (m²)

ΔT = Seinämän sisä- ja ulkopinnan lämpötilaerotus (K)

Reaktorin metaanihäviöt syntyvät reaktorin mahdollisista vuotoista sekä biokaasun puhdistuksessa tapahtuvasta mahdollisesta häviöstä. Metaanipotentialihäviöllä tarkoitetaan mädätysjätteen mukana reaktorista ulos siirtynyttä kemiallista potentiaalia. CSTR-reaktorissa ei päästä syöteen täydelliseen hajoamiseen tasaisen hydraulisen siirtymän takia. Mädätysjätteen mukana poistuva lämpöenergia voidaan selvittää.

$$Q_{mäd} = q_m * c * T \quad \text{Kaava 6}$$

$Q_{mäd}$ = Mädätysjätteen energiovirta (kW)

q_m = Mädätysjätteen massavirta (kg/s)

c = Mädätysjätteen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

T = Mädätysjätteen lämpötila (°C)

Mainittuihin energiovirtoihin vaikuttamalla ja optimoimalla pysytään vaikuttamaan reaktorin hyötysuhteeseen myönteisesti.

5.2 Biokaasun jalostuksen energiavirrat ja -tase

Biokaasun jalostuksessa huomioitavia energiavirtoja ovat pääasiassa kompressorin tekemä työ sekä kaasun lämpövirta ja sen jäähtydyksestä vapautuva lämpöenergia. Kaasu paineistetaan ja jäähdytetään lähestulkoon aina jalostustekniikasta riippumatta. Biokaasun energiavirtaan vaikuttaa kaasun massavirta sekä lämpötila. Biokaasulaitoksen tuotantokapasiteetti ilmoitetaan normaalisti yksikössä [nm³/h], jolloin kaasun massavirta on selvitettävissä. Massavirran selvitettyä voidaan laskea kaasun aiheuttama energiavirta. Lisäksi kaasunjaloituksen kompressorin nostaa kaasun energiavirtaa nostamalla sen painetta sekä lämpötilaa. Paine nostetaan esimerkiksi membraanitekniikalla 7–20 bar paineeseen. Kaasu tulee reaktorista noin 37 °C lämpötilassa ja normaali ilmanpaineessa.

Kaasun massavirta voidaan selvittää kaavalla

$$q_m = q_v * \rho \quad \text{Kaava 7}$$

q_m = kaasun massavirta (kg/h)

q_v = kaasun tilavuusvirta (nm³/h)

ρ = tiheys (kg/m³)

Kaasun tarvitseman jäähtytystehon määrittämisessä tulee tietää kaasun ominaislämpökapasiteetti, massavirta ja kaasun jäähtydyksen lämpötilan muutos.

$$\phi = q_m * c_p * \Delta T \quad \text{Kaava 8}$$

Φ = Teho (kW)

q_m = Kaasun massavirta (kg/s)

c_p = Kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (kJ/kgK)

ΔT = Kaasun lämpötilan muutos (°C)

6 BIOKAASUN JALOSTUKSEN ENERGIAVIRTOJEN HYÖDYNTÄMINEN

Jalostuksessa tapahtuva kaasun paineenkorotus ja jäähditys vaikuttaa lähes poikkeuksetta jalostusmenetelmästä riippumatta kaasunjalostuksen energiavirtoihin. Prosessista syntyy mahdollisesti hyödynnettäviä energiavirtoja, joita voidaan syöttää takaisin tuotantoprosessiin. Jalostuksessa hyödynnettävät energiavirrat voidaan hyödyntää lämpövirroiksi, joita voidaan käyttää esimerkiksi reaktorin lämmitykseen tai syötteen esilämmitykseen. Energiavirtoja hyödyntämällä voidaan vaikuttaa biokaasulaitoksen kannattavuuteen.

6.1 Jalostuksen energiavirtojen tarkastelu

Laskennassa käytettiin kuvitteellista keskikokoista CSTR-reaktoria, joka toimi mesofiilisella lämpötilalla 37 °C. Reaktorin kaasuntuotto on 100 nm³/h, josta 75 % on metaania ja 25 % hiilidioksidia. Biokaasureaktorin vuosituotanto on 876000 nm³/v. Jalostusjärjestelmä toimii membraanitekiikalla, jossa kaasun paine korotetaan kompressorilla 15 bar paineeseen adiabaattisessa prosessissa. Tarkasteltavassa järjestelmässä ei oletettu olevan lämpöhäviöitä ja lämmönsiirtimen hyötysuhde on $\eta_s=1$.

6.1.1 Biokaasun energiavirta

Biokaasun energiavirtoihin jalostuksessa vaikuttavat siihen kohdistuvat termodynaamiset prosessit, kuten paineistus, jäähditys ja lämmitys. Systeemissä oletettiin olevan tasainen massavirta, vaikka se saattaa poiketa hiukan todellisuudesta. Kompressorin aiheuttaa kaasulle lämpötilan nousun, joka voidaan selvittää adiabaattisessa prosessissa.

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \quad \text{Kaava 9}$$

T_2 = lämpötila kompressorin jälkeen [°C]

T_1 = lämpötila ennen kompressorin [°C]

p_2 = paine kompressorin jälkeen [bar]

p_1 = paine ennen kompressorin [bar]

k = ominaislämpökapasiteettien suhde C_p/C_v

$$37^\circ\text{C} * \left(\frac{15\text{bar}}{1\text{bar}}\right)^{\frac{1,306-1}{1,306}} = 69,82^\circ\text{C}$$

Biokaasun ominaislämpökapasiteetti selvitettiin kertomalla kunkin kaasun ominaislämpökapasiteetti niiden konsentraatiokertoimella kaavalla:

$$c_{p/v} = \sum(x_i * c_{p/vi}) \quad \text{Kaava 10}$$

$c_{p/v}$ = ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa tai vakiotilavuudessa [kJ/kgK]

$c_{p/vi}$ = kyseisen kaasun ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa tai vakiotilavuudessa [kJ/kgK]

x_i = kyseisen kaasun konsentraatio [%]

$$c_p = 0,75 * 2,22 \frac{kJ}{kgK} + 0,25 * 0,84 \frac{kJ}{kgK} = 1,875 \frac{kJ}{kgK} \quad (10)$$

$$c_v = 0,75 * 1,695 \frac{kJ}{kgK} + 0,25 * 0,656 \frac{kJ}{kgK} = 1,435 \frac{kJ}{kgK} \quad (10)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1,875 \frac{kJ}{kgK}}{1,435 \frac{kJ}{kgK}} = 1,306$$

Tarkastelussa oletettiin, että kaasu jäähdytettiin 10 °C lämpötilaan jäähdyttimellä. Tarvittava jäähdytysteho selvitettiin käyttämällä *kaava 7* ja *kaava 8* määrittämällä ensin kaasun massavirta, jonka jälkeen määritettiin tarvittava teho.

$$q_m = 100 \frac{nm^3}{h} * \left(0,75 * 7,168 \frac{kg}{m^3} + 0,25 * 1,98 \frac{kg}{m^3}\right) = \frac{587,1 \frac{kg}{h}}{3600} = 0,163 \frac{kg}{s} \quad \text{Kaava 11}$$

$$Q_{jäähd} = 0,163 \frac{kg}{s} * 1,875 \frac{kJ}{kgK} * (69,82^\circ C - 10^\circ C) = 18,294 kW \quad (8)$$

Tarkastelussa huomattiin, että jalostuksesta hyödynnettävä energiavirta on merkittävä biokaasulaitoksen energiataseen kannalta. Jalostuksesta vapautuvan energian jalostaminen hyödynnettäväksi vaatii kuitenkin lisäinvestointeja ja uusia järjestelmiä biokaasulaitokseen.

6.2 Reaktorin lämmityksen tarve

Reaktorin lämmityksen tarve riippuu syötteen lämpötilasta ja reaktorin rakenteesta. Reaktoria lämmitetään perinteisesti reaktorissa tuotetulla biokaasulla. Lämmityksen tarkastelussa kuvitteellisen reaktoriin syötettiin lietelantaa, jonka TS pitoisuus oli 14 %, VS/TS oli 85 %, metaanintuottopotentiaali (BMP) 300 nm³/tVS, joka vastaa naudun lietelannan arvoja (*Luostarinen, S 13*) ja reaktorin OLR arvo oli 4,5 kgVS/m³d. Reaktorin seinämien lämmönläpäisykerroin (U) oletettiin olevan 0,52 W/m² sekä reaktorin oletettiin olevan lieriön muotoinen. Näistä lähtöarvoista pystyttiin arvioimaan reaktorin koko ja syötön massavirrat. Reaktori sijaitsee Suomessa, jossa vallitsee 3,8 °C vuosittainen keskilämpötila. (*Ilmatieteenlaitos*)

$$V_{reaktori} = \frac{q_m VS}{OLR} = \frac{\left[\left(\frac{75 \frac{nm^3}{h}}{300 \frac{nm^3}{tVS}} \right) * 1000 * 24 \right]}{4,5 \frac{kgVS}{m^3d}} = 1333,3m^3 \rightarrow 1,33 * 1333,3m^3 = 1773,3m^3$$

(2)

Reaktorin vaatima lietetilavuus on noin 1333,3 m³. Reaktorissa on myös kaasutila, joka on 33 % lietetilavuudesta, joten reaktorin kokonaistilavuus oli 1773,3 m³. Kuvitteellisen reaktorin korkeus on 5 metriä ja säde 10,6 metriä. Katon ja lattian ala on 355 m² ja vaipan ala on 334 m².

$$Q_{shäv} = 0,52 \frac{W}{m^2} * (266m^2 * 2 + 457m^2) * (37°C - 3,8°C) = 13,19kW \quad (5)$$

Syötteen massavirta reaktoriin laskettiin OLR-arvon avulla.

$$q_m = \frac{OLR * m^3}{TS * \frac{VS}{TS}} = \frac{4,5 \frac{kgVS}{m^3d}}{0,14TS * 0,85 \frac{VS}{TS}} = 50420,17 \frac{kg}{d} = \frac{50420,17 \frac{kg}{d}}{24 * 60 * 60} = 0,583 \frac{kg}{s} \quad \text{Kaava 12}$$

Syötteen lämmitystehontarve määritettiin käyttämällä veden c_p-arvoa. Reaktorissa syöte esilämmitettiin mädätysjätteen avulla 20 °C lämpötilaan.

$$Q_{läm} = 0,583 \frac{kg}{s} * 4,186 \frac{kJ}{kgK} * (37°C - 20°C) = 41,52kW \quad (8)$$

Kokonaislämmityksen tarve:

$$Q_{tot} = Q_{läm} + Q_{shäv} = 41,52kW + 13,19kW = 54,72kW \quad \text{Kaava 13}$$

Vuodessa tarvittava energia lämmitykseen on

$$E = Q_{läm} * 8760h = 54,72kW * 8760h = 479366kWh = 479,37MWh$$

Biokaasun lämpöarvo on 6–6,5 kWh/nm³ (Deublein, Dieter. Steinhauser, Angelika, 50), joten vuodessa lämmitykseen kuluva kaasumäärä häviöttömässä lämmityksessä on

$$V_{biokaasu} = \frac{E}{Q_{biokaasu}} = \frac{479366kWh}{6,5 \frac{kWh}{nm^3}} = 73748,7nm^3, \quad \text{Kaava 14}$$

joka vastaa noin 8,3 % biokaasulaitoksen vuosituotannosta.

Kuvitteellisen reaktorin kokonaislämmityksen tarve oli 54,72 kW. Todellisen reaktorin lämmityksen tarve poikkeaa todennäköisesti kuvitteellisesta reaktiosta. Kuvitteellinen reaktori antaa kuitenkin arvion kyseisen kokoluokan reaktorin lämmityksen tarpeesta, jota voidaan käyttää apuna verrattaessa jalostuksen energiavirtoja reaktorin energiavirtoihin. Tarkastelussa ei olla myöskään huomioitu mikrobien tuottamaa lämpöä eikä reaktorin sekoittajien vaikutusta systeemiin.

6.3 Jalostuksesta vapautuvan lämpöenergian hyödyntäminen

Tarkastelu osoittaa, että biokaasun jalostuksessa oli hyödynnettäviä energiavirtoja, joilla saattaa olla merkittävä vaikutus biokaasulaitoksen energiataseeseen. Jalostuksen lämpövirta oli noin kolmasosa lämmityksen tarpeesta. Jalostuksesta vapautuva lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi lämpöpumppuja hyödyksi käyttäen ja syöttää reaktorille tai muille systeemin osille. Hyödynnettäessä jalostuksen lämpöenergiaa tulisi systeemin kuitenkin olla mahdollisimman stabiili, jotta kaasun jalostuksen tarvitsema jäähdytys ei vaarannu. Jalostuksen lämpöenergian hyödyntäminen tuo elastisuutta prosessiin ja niitä hyödyntävällä järjestelmällä voidaan parantaa tuottavuutta. Biokaasulaitoksen lämmityskattilan lämmityksen tarve pienenee, jolloin voidaan lisätä biokaasun määrää jalostamolle. Vapautuva lämpöenergia mahdollistaa myös esimerkiksi jälkimädättämön lämmittämisen, jolla voidaan parantaa biokaasulaitoksen metaanintuottopotentiaalia. Lämpöenergia avaa myös mahdollisuuden muuttaa biologista prosessia reaktorissa. Prosessin tuottama ylimääräinen lämpöenergia mahdollistaa termofiilisen prosessin pienemmillä lämmityskustannuksilla, joka saattaa vaikuttaa positiivisesti metaanintuottoon ja orgaanisen kuormituksen kasvaessa voidaan käsitellä suurempia määriä syötettä tarvittaessa.

6.4 Jalostuksesta vapautuvan energian hyödyntämisen haasteet

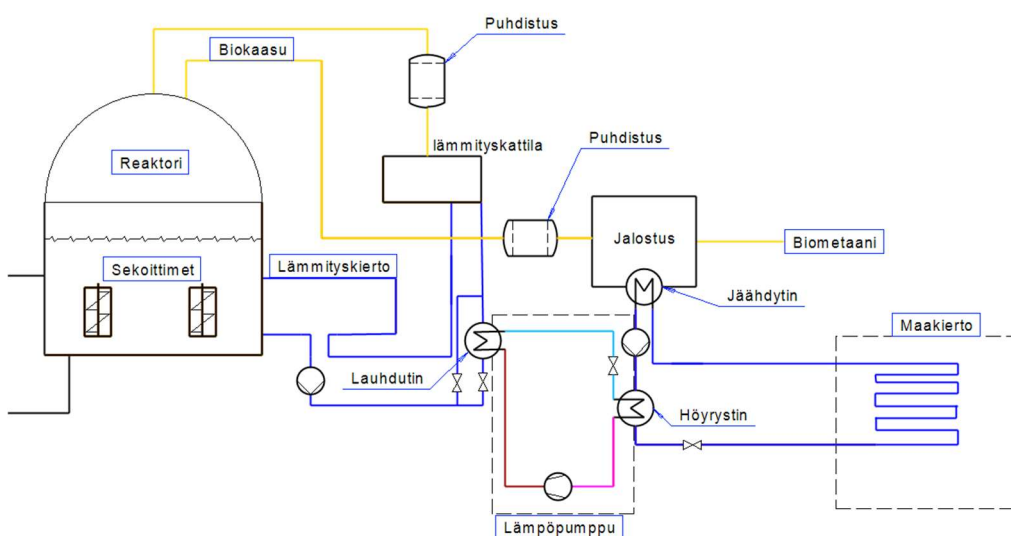
Jalostuksen lämpöenergian hyödyntämisessä on haasteensa. Biokaasulaitoksen kaasunjalostuksen jäähdytyksen tarve on kriittinen osa jalostusprosessia ja se tulee turvata poikkeuksetta. Jalostuksen jäähdytyksen tarve on korkein kesäisin ja pienin talvisin. Toisaalta reaktorin lämmityksen tarve on korkein talvisin ja matalin kesäisin. Järjestelmä tulisi suunnitella niin, että lämmönsyöttökohde pystyisi ottamaan vastaan energiaa tilanteesta riippumatta, jotta kaasun jäähdytys ei vaarantuisi. Jalostuksen lämpöenergiaa hyödyntävä systeemi nostaisi myös biokaasulaitoksen kustannuksia merkittävästi ja näin vaikuttaisi suoraan laitoksen kannattavuuteen. Tilanne tulisikin tarkastella laitoskohtaisesti onko jalostuksen energiavirtojen hyödyntäminen taloudellisesti kannattavaa.

7 LÄMPÖPUMPPU BIOKAASUN JALOSTUKSESSA

Lämpöpumppuja on käytetty teollisuudessa lämpövirtojen talteenottoon ja hyödyntämiseen. Bio-kaasureaktorissa lämpöpumpun käyttökohteet ovat moninaisia, mutta tässä työssä tarkasteltiin lämpöpumpputeknologian hyödyntämistä jalostuksen kaasunjäähdytyksessä. Lämpöpumpulla pystytään siirtämään lämpöenergiaa käyttäen hyödyksi laitteen sisällä kiertävän kylmäaineen faasimuutoksia. Mekaanisella kompressorilla toimivassa lämpöpumpussa saadaan luotua paine-ero systeemiin. Kompressorin imupuolella alipaineessa oleva kylmäaine höyrystyy lämmönsiirtimellä, josta se siirtyy kompressorille höyrystyneenä. Kompressorilla höyry paineistetaan ja se siirtyy lauhduttimelle, jossa kylmäaine lauhtuu siirtäen lämpöä väliaineeseen. Lauhtunut kylmäaine johdetaan takaisin höyrystimelle paineenalennusventtiilin kautta. (Kylmätekniikka, 336–340.)

7.1 Lämpöpumpun liittäminen biokaasulaitokseen

Lämpöpumppu tulee liittää systeemiin niin, että jalostuksen kaasun jäähdytys voidaan taata joka tilanteessa ja toisaalta pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman suuri osa jalostuksesta vapautuvasta lämpövirrasta. Kuvitteellisessa reaktorissa nykyinen kaasun jäähdytys tapahtuu vesikierrolla, jota jäähdytetään maan alle asennetulla putkistolla. Tämä avaa mahdollisuuksia lämpöpumpun suhteen ja lämpöpumppu voidaan asentaa kyseiseen vesikiertoon hyödyntäen siitä saatavilla olevaa lämpöenergiaa.



Kuva 11. Lämpöpumpun liittäminen biokaasulaitokseen.

7.1.1 Lämpöpumpusysteemin toimintaperiaate

Lämpöpumpusysteemi pyrkii hyödyntämään jalostuksesta saatavan lämpövirran reaktorin lämmityskierron esilämmittämiseen ennen lämmityskattilaa. Lämmityksen määrää voidaan säätää vesikierrossa olevilla säätöventtiileillä. Näin saadaan pienennettyä kattilan lämmityksen tarvetta ja samalla pystytään takaamaan jalostuksen jäähdytys. Jalostuksen jäähdytys suoritetaan jäähdyttämällä vesikiertoa jalostuksen jäähdyttimen jälkeen. Kierto palaa lämpöpumpulta maakiertoon ja sieltä takaisin jalostuksen jäähdyttimelle. Tällä periaatteella voidaan taata kaasun jäähdytys myös ongelmatilanteissa.

7.2 Lämpöpumpusysteemin tarkastelu

Kuvitteellisen reaktorin kaasunjalostuksen jäähdytys ja reaktorin lämmitys toimi vesikierrolla. Reaktorin lämmityksestä palaavan veden lämpötila oli 40 °C. Jalostuksen lämmönsiirtimeltä poistuvan veden lämpötila oli 15 °C ja vesi jäähdytettiin lämpöpumpulla 1,5 °C lämpötilaan. Molemmissa vesikiertoissa vallitsi 2 bar paine ja lämmönsiirtimien hyötysuhde oli $\eta_{is}=1$. Lämpöpumpun mitoitusjäähdytystehoksi valittiin 20 kW, joka on hieman yli vaaditun jäähdytystehon. Näin varmistettiin jalostuksen riittävä jäähdytys.

Tietämällä lämmitettävän systeemin ja jäähdytettävän systeemin lämpötilat voidaan määrittää lämpöpumpun teoreettinen maksimi lämpökertoimelle.

$$\varphi_c \leq \frac{T}{T-T_0} \quad (\text{Muukkonen, 5}) \quad \text{Kaava 15}$$

φ_c = lämpökerroin

T= lauhduttimen absoluuttinen lämpötila [K]

T₀= höyrystimen absoluuttinen lämpötila [K]

Toisaalta voidaan esittää lämpökerroin muodossa

$$\varphi_c = \frac{Q}{W} \quad (\text{Muukkonen, 5}) \quad \text{Kaava 16}$$

φ_c = lämpökerroin

Q=Systemistä luovutettu energia [W]

W= kompressorin tekemä työ [W]

Lämpöpumpun teoreettinen maksimi kylmäkertoimelle on

$$\varepsilon_c \leq \frac{T_0}{T-T_0} \quad (\text{Muukkonen, 5}) \quad \text{Kaava 17}$$

ε_c = kylmäkerroin

T= lauhduttimen absoluuttinen lämpötila [K]

T₀= höyrytimen absoluuttinen lämpötila [K]

Toisaalta voidaan esittää kylmäkerroin muodossa

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} \quad (\text{Muukkonen, 5}) \quad \text{Kaava 18}$$

Teoreettinen lämpö- ja kylmäkerroin on tarkastellussa systeemissä

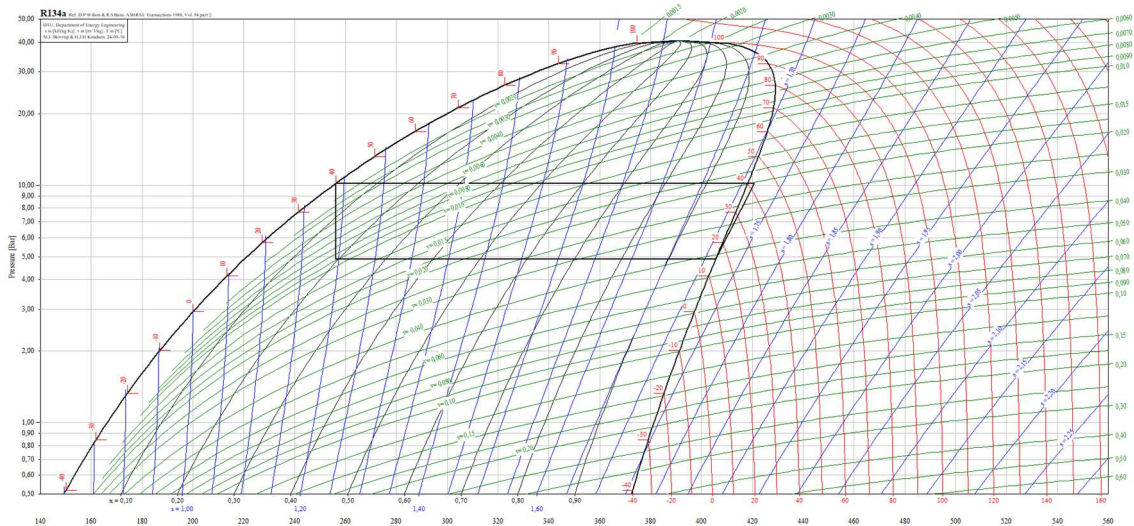
$$\varphi_c \leq \frac{(40K+273K)}{(40K+273K)-(15K+273K)} = 12,52 \quad (13)$$

$$\varepsilon_c \leq \frac{(15K+273K)}{(15K+273K)-(40K+273K)} = 11,52 \quad (15)$$

Kompressorin teho teoreettisella lämpökertoimella oli

$$W = \frac{Q_0}{\varepsilon} = \frac{54,72kW}{9,22} = 4,37kW. \quad (17)$$

Tilannetta tarkasteltiin myös simulaatiolla CoolPack-sovelluksella, jossa isentrooppinen hyötysuhde oli 1, lauhduttimen lämpötila oli 40 °C ja höyrytimen lämpötila 15 °C. Simulaatiossa käytettiin kylmäainetta R134a. Simulaation avulla pystyttiin tarkastelemaan lämpöpumpun prosessia tarkemmin.



Kuva 12. CoolPack-simulaatio R134a kylmäaineella log p, h -tilapiirroksessa.

Simulaatio antoi lämpöpumpulle COP (coefficient of performance) -arvon 9,93, jolla tarkoitetaan samaa asiaa kuin lämpökertoimella. Simulaatioon syötettiin höyrytimen tehoksi 20 kW, jonka

avulla saatiin simuloidun lämpöpumpun lämmitystehoksi 22 kW ja kompressorin tehoksi 2 kW. Lämpöpumpusysteemin aiheuttamat säästöt biometaanissa on

$$\frac{(22 \cdot 8760) \frac{kWh}{a}}{6,5 \frac{nm^3}{a}} = 29649 \frac{nm^3}{a},$$

joka vastaa noin 3,4 % vuosituotannosta. Riippuen lämpöpumpun mitoituksesta säästettyä biometaanimäärää on helppo nostaa.

Jäähdytysvesipiirin massavirta selvitettiin laskemalla jalostuksen jäähdytyksen vaatima massavirta, kun maakerrosta tulevan veden lämpötilan oletettiin olleen 4 °C.

$$q_m = \frac{Q_{jalostus}}{\Delta T \cdot c_p} = \frac{49,69 \frac{kW}{a}}{(15^\circ C - 4^\circ C) \cdot 4,1884 \frac{kJ}{kgK}} = 0,396 \frac{kg}{s} \quad (6)$$

Seuraavaksi selvitettiin lämpöpumpun aiheuttama lämpötilan muutos,

$$\Delta T = \frac{Q_e}{q_m \cdot c_p} = \frac{20 \frac{kW}{a}}{0,396 \frac{kg}{s} \cdot 4,1884 \frac{kJ}{kgK}} = 12,02^\circ C \rightarrow 15^\circ C - 12,02^\circ C = 2,98^\circ C \quad (6)$$

joten maakerrosta vaadittu teho on

$$Q_{mk} = Q_e - Q_{jalostus} = 20 \frac{kW}{a} - 18,29 \frac{kW}{a} = 1,71 \frac{kW}{a}. \quad \text{Kaava 19}$$

Maalämpöputkiston lämmönottoputkien energianottokapasiteetti on hyvässä savimaassa 25–60 kWh/ma riippuen maantieteellisestä sijainnista (*Kylmätekniikka*, 351). Tästä voidaan määrittää maakiertoputkiston pituus

$$\frac{E_{maa}}{E_{maa.pot}} = \frac{(1,71 \cdot 8760) \frac{kWh}{a}}{42,5 \frac{kWh}{ma}} = 352,5 \text{ m} \quad \text{Kaava 20}$$

Lämpöpumpun mitoituksen mukaan saadaan merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa ja samalla pystytään vaikuttamaan jalostukseen siirtyvän kaasun määrään, vaikka laskelmat saattavat antaa liian positiivisen kuvan. Mitoitusta voidaan myös sovittaa kunkin kohteen tarpeisiin. Tällä saattaa olla suuriakin vaikutuksia riippuen biometaanin hinnasta ja käyttökohteista. Lämpöpumpun avulla voidaan myös tarvittaessa käyttää enemmän kaasua biokaasulaitoksen CHP-yksikössä, jolloin voidaan maksimoida sähköntuotanto ja pyrkiä laitoksen energiaomavaraisuuteen. Lämpöpumpujärjestelmä monipuolistaa biokaasuprosessin operointimahdollisuuksia. Lämpöpumpusysteemi tulee kuitenkin toteuttaa siten, että kaasun jäähdytys varmistetaan jokaisessa tilanteessa. Lämpöpumpun kunnossapitokustannusten kannalta olisi myös hyvä, että prosessissa ei olisi suuria lämpötilamuutoksia. Lämpöpumpun asentaminen vaatii myös merkittäviä investointeja laitteiston ja komponenttien osalta sekä monimutkaistaa systeemiä. Tilannetta tuleekin tarkastella laitoskohtaisesti.

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tarkastella biokaasuprosessia kokonaisuutena sekä jatkuvatoimisen ja jatkuvasekoitteisen biokaasureaktorin energiavirtoja ja niiden hyödyntämistä. Työssä tarkasteltiin kuvitteellista reaktoria ja siinä syntyviä lämpövirtoja biokaasun jalostuksesta sekä pohdittiin mahdollisia hyödyntämiskohteita ja haasteita siihen liittyen.

Biokaasun tuotantoprosessi on mikrobiologinen prosessi, jossa on neljä vaihetta ja joilla jokaisella on oma osansa kokonaisprosessissa. Kyseisellä prosessilla voidaan hyödyntää prosessien orgaanisia sivuvirtoja tuottaen energiaa ja ravinnepitoista mädätysjätettä. Prosessiin vaikuttavat syötteen laatu sekä sen sisältämät ravinteet ja inhibiittorit. Biokaasun tuotantopotentiaalia voidaan tarkastella teoreettisesti tai kokeellisesti. Biokaasulaitoksen kaasun jalostusteknologiat ovat kehittyneet vuosien saatossa ja valintavaihtoehtoja on useita. Kullakin jalostusjärjestelmällä on omat vahvuutensa, joita voi hyödyntää.

Työssä tarkasteltiin kuvitteellisen jatkuvatoimisen ja sekoitteisen reaktorin energiatasetta ja mahdollisesti hyödynnettäviä energiavirtoja. Tarkastelusta havaittiin, että mahdollisesti hyödynnettäviä energian sivuvirtoja oli useita, kuten mädätysjäännöksestä ja jalostuksesta systeemistä poistuvat energiavirrat. Jalostusjärjestelmän tarkemman tarkastelun havaintona oli se, että jalostuksesta vapautuva energia on merkittävä reaktorin lämmitystarpeeseen nähden ja sillä pystyttiin kattamaan tarvittaessa reaktorin lämmityksen tarve lähes kokonaan. Jalostuksen lämmön sivuvirtoja hyödyntämällä lämpöpumpputeknologian avulla päästiin lähes 3,4 % säästöihin biokaasun tuotantokapasiteetissa lämmityskattilan lämmitystarpeen pienentyessä. Parantamalla biokaasulaitoksen energiatehokkuutta voidaan siitä saada entistä houkuttelevampi vaihtoehto maatalouden ja teollisuuden orgaanisen aineen sivuvirtojen hyödyntämiseen. Järjestelmän haasteina ovat kuitenkin sen taloudellinen kannattavuus ja käyttövarmuus vuodenajasta riippumatta. Kyseiset seikat tulisi punnita laitoskohtaisesti ja suorittaa tarkempaa tutkimusta todellisilla laitoksilla, jotta saisimme tarkemman kuvan kokonaisuudesta ja kyseisen teknologian hyödyistä.

LÄHTEET

Aittomäki, Antero. 2012. Kylmäteknikka. Helsinki. Suomen kylmäyhdistys ry.

Arola, Johanna. 2012. Keskitetyn biokaasulaitoksen energiatase. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012091413654>

BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1>

Deublein, Dieter. Steinhauser, Angelika. 2008. Biogas from waste and renewable sources. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Gasum Oy, 2023. Biokaasu osana kiertotaloutta. Espoo: Gasum Oy. <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/>

Huovari, Niina, Rautanen, Juha, Wihersaari, Magareta. 2008. Biokaasulaitosten energiatase maatilojen biomassoja hyödyntävissä laitoksissa. Helsinki: Motiva Oy. https://www.motiva.fi/files/4005/Biokaasulaitosten_energiatase_maatilojen_biomassoja_hyodyntavissa_laitoksissa.pdf

Hytönen, Jaana. 2013. Biokaasu liikennepolttoaineena. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201312302872>

Ilmatieteenlaitos. 2024. Vuositilastot. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>

Liljeblad, Nina. 2017. Biokaasun jalostus ja käyttö. Oulu: Oulun Yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201702251286>

Luostarinen, Juha. 2007. Energiakasveista tuotetun biokaasun energiatase suomalaisessa maatalokoluokan biokaasulaitoksessa. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-2007691>

Luostarinen, Sari 2013. Biokaasuteknologiaa mautiloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi – käytännön kokemuksia MTT:n mautilakohtaiselta laitokselta. MTT raportti 113.

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-481-6>

Motiva Oy 2013. Biokaasun tuotanto mautilalla. Motiva Oy, Helsinki https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_mautilalla.pdf

Muukkonen, Juha-Petteri. 2019. Lämpöpumppulaitoksen lämpökerroinmittaus ja levylämmönsiirtimen uusiminen. Vantaa: Metropolia Ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019060113947>

Pulsa, Mikko. 2008. Biokaasun syöttö maakaasuverkostoon. Valkeala: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201105171575>

Suomen Biokierto ja Biokaasu Ry. Biokaasun ja biometaanin tuotantotilastot. Helsinki: Suomen Biokierto ja Biokaasu Ry. <https://biokierto.fi/tilastot/>

Violainen-Hynnä, Anna 2020. Biokaasun tuotanto ja käyttö Suomessa 2030. Suomen biokaasu ja biokierto Ry. https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/06/Biokaasu2030_raportti_17062020.pdf

Wellinger, Arthur & Murphy, Jerry & Baxter, David 2013. The Biogas handbook. Science, Production, and applications. Cambridge. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52