

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Harri Hietala

Biometanointipilottilaitteiston käyttöönotto



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 32 sivua, 4 liitesivua

Harri Hietala

Biometanointipilottilaitteiston käyttöönotto

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi pilottilaitteiston käyttöönoton vaiheet ja perehdytään laitteiston toimintaperiaatteeseen. Opinnäytetyö on tehty harjoittelun yhteydessä Doranova Oy:lle.

Opinnäytetyön alkuun käydään läpi perusteita biokaasusta, ja käsitellään erityyppisiä biokaasulaitoksia. Biokaasulaitosteorian lisäksi käsitellään työssä olennaisessa osassa olevaa puukaasutustekniikkaa ja siitä saatavaa kaasua.

Pilottilaitteisto on biometanointikontti, jonka on suunnitellut ja rakennuttanut Doranova Oy. Laitteisto on osa Wood2Biogas-projektia, jossa pyritään tehostamaan biokaasun tuotantoprosessia. Työssä esitelty laitteisto on rakennettu havainnollistamaan käytännössä puukaasun ja biokaasun yhdistämisen hyötyjä. Opinnäytetyön teoriaosuuden jälkeen perehdytään pilottilaitteiston rakenteeseen ja ylösajon eri vaiheisiin. Laitteistolla pyritään tuottamaan havainnollistavia tuloksia. Tavoiteltujen testien aloitus siirtyi tulevaisuuteen minusta riippumattomista syistä ja tulokset eivät ehtineet opinnäytetyöhön.

Asiasanat:

Biokaasu, Biometanointi, Puukaasu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental technology

2023 | 32 pages, 4 page in appendices

Harri Hietala

Biomethanation pilot equipment installation

This thesis is focused on the introduction of the operation principle of pilot equipment and the stages of commissioning the pilot equipment. The thesis was commissioned by Doranova Oy and realized while working as a trainee for the company.

The first part of the thesis focuses on the basics of biogas. Then, a couple type of biogas plants are familiarized with. The second important technology addressed in the thesis was the wood gasifier and wood gas.

The pilot equipment was a biomethanation container. It was designed and built by Doranova Oy. The container was part of the Wood2Biogas project. The project develops the biogas production process. The equipment was built to illustrate the benefits of biogas and wood gas pooling. After the theoretical part, focus was placed on the pilot equipment part and the different stages of start-up. The equipment is intended to produce illustrative results. The start of test moved, and the results hence came too late to be included in this thesis.

Keywords:

Biogas, Biomethanation, Wood gas,

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	6
1 Johdanto	7
2 Doranova Oy	8
3 Biokaasu	9
3.1 Biokaasureaktorit	10
3.1.1 Kuivareaktori	11
3.1.2 Märkäreaktori	11
3.2 Prosessin vaiheet	12
3.2.1 Hydrolyysi	13
3.2.2 Asidogeneesi	13
3.2.3 Asetogeneesi	14
3.2.4 Metanogeneesi	14
3.3 Syötteen ja Mädätysjäännös	14
4 Puukaasu	16
4.1 Koostumus	16
4.2 Prosessin kuvaus	17
5 Laitteisto	18
5.1 Prosessikuvaus	19
5.2 Laitteiston kuvaus	20
5.3 Teoreettinen tuottolaskelma	23
5.4 Tavoitteet	23
6 Pilotin operointi	24
6.1 Ylösajo	24
6.2 Päivittäiset tehtävät	25
6.3 Testit	27
6.4 Pilotoinnin haasteet	27

7 Johtopäätökset	30
Lähteet	31

Liitteet

Liite 1. Teoreettinen tuottolaskelma.

Kuvat

Kuva 1. Biokaasuprosessin ravinnekierto. (Biokaasuteknologia, Kymäläinen & Pakarinen 2015, 10).	9
Kuva 2. Jepuan biokaasu Oy:n märkämädätysreaktori.	12
Kuva 3. Anaerobinen hajoaminen (Biovoima, luettu 10.01.2023)	13
Kuva 4. Pilottikontti	18
Kuva 5. Prosessikuvaus (Doranova Oy)	19
Kuva 6. Perinteinen termofiilinen reaktori "In-situ".	21
Kuva 7. Trickle bed reaktori "Ex-situ".	22
Kuva 8. Kaasun analysointi laitteisto Rapidox 7100	26

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

Sana/Lyhenne	Selite
Anaerobinen	Hapettomassa tilassa tapahtuva reaktio. (Biovoima 2019).
Asetogeneesi	Anaerobinen hapettuminen, hajoamisen kolmas vaihe. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Asidogeneesi	Hapettoman hajoamisen toinen vaihe. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Endoterminen reaktio	Lämpöä sitova reaktio.
Hydrolyysi	Hapettoman hajoamisen ensimmäinen vaihe. Entsyymit hajottavat suuria molekyyliä. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Jatkuvatoiminen reaktori	Reaktoriin lisätään ja poistetaan jatkuvasti raaka-ainetta. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Konversioaste	Muuntoaste
Mesofiilinen prosessi	Biokaasun muodostuminen +35-38 asteessa. (Biovoima 2019).
Metanogeneesi	Hajoamisen viimeinen vaihe. Lopputuote metaani ja hiilidioksidi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Nm ³	Kuutiometri kaasua normaalissa ilmanpaineessa ja 0 asteen lämpötilassa. (Biovoima 2019).
Panostoiminen reaktori	Reaktori täytetään kerran ja tyhjenetään viipymääjan jälkeen. (Kymäläinen & Pakarinen 2015).
Termofiilinen prosessi	Biokaasun muodostuminen +55 asteessa. (Biovoima 2019).

1 Johdanto

Biokaasun tuotanto on vakiintumassa vahvaksi osaksi Suomen uusiutuvan energian tuotantoa. Uusia biokaasulaitoksia rakennetaan kiihtyvällä tahdilla, johtuen tuotantokapasiteetin kasvusta, ja niihin myönnettävistä investointituista. Biokaasua saadaan tuotettua tämän hetken teknologialla huomattavasti enemmän kuin ennen. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2022.) Jos jokaista biokaasulaitosta saataisiin vielä tehostettua, olisi Suomessa mahdollista saada merkittävä parannus biometaanin tuotannossa. Tehostamiseen voidaan hyödyntää Suomessa merkittävää energiavirtaa, joka syntyy Suomen laajasta metsäpinta-alasta. (HAMK 2022.)

Biometanointi hyödyntää biokaasulaitoksia ja kaasutustekniikka yhdistämällä näiden tekniikkaa. Puukaasun syöttämällä reaktoriin saadaan reaktorin biokaasuprosessia tehostettua. Lisättävällä puukaasulla, saadaan tuotettua metaania ilman mädätysjäännöksen kasvua. (HAMK 2022.)

Opinnäytetyössä perehdytään biometanoinnin peruselementtien toimintaan eli käydään läpi biokaasun tuotannon vaiheet ja eri laitostyyppisiä. Biokaasun lisäksi biometanoinnissa tarvitaan puukaasua, jonka tuotantoon perehdytään myös osana työtä. Työssä merkittävänä osana on biometanointipilottilaitteiston toiminnan ylösajo ja laitteiston operointi.

Tehtäviini kuului harjoittelun aikana viimeistellä pilottilaitteisto, jonka jälkeen laitteisto ylösajettiin. Laitteiston ylösajossa merkittäviä vaihteita oli syötteen valmistelu ja reaktoreiden täyttö. Ylösajon jälkeen seurasi kokonaisuuden toimintaa ja säädin laitteistoa tarvittaessa. Tavoite oli saada aloitettua tuotekaasun lisääminen ja seurattua, miten prosessi reagoi. Prosessista oli tarkoitus kerätä havaintoja ja kirjata tuloksia. Harjoittelun rajallisen keston vuoksi tuotekaasun lisäämisen toteutus ja tulokset eivät ehtineet opinnäytetyöhön.

2 Doranova Oy

Doranova Oy on vuonna 1995 perustettu ympäristöalan yritys. Yrityksen toimisto sijaitsee Vesilahden kunnassa lähellä Lempäälää. Yrityksen palveluihin kuuluu biokaasulaitosten suunnittelu, rakennuttaminen sekä kehitys. Biokaasun ohessa yritys toimii pilaantuneen maaperän kunnostuksen parissa. Tällä hetkellä yrityksellä on alle kaksikymmentä työntekijää.

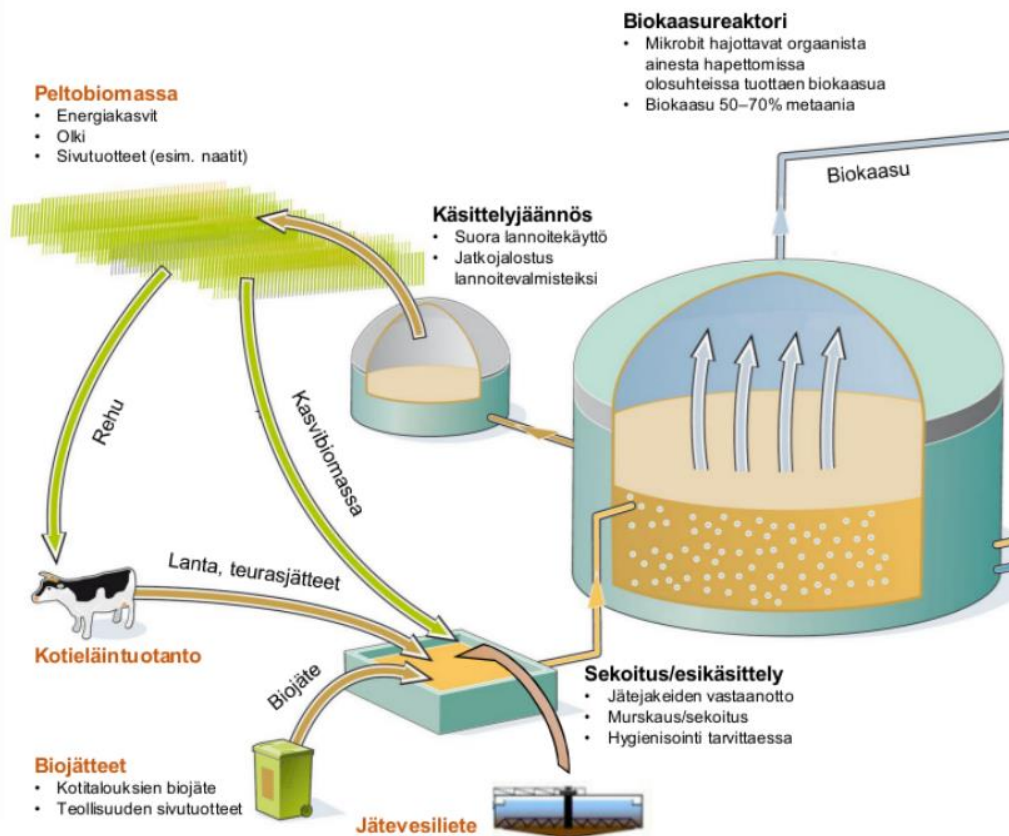
Yrityksen rakennuttamia biokaasulaitoksia on useita ympäri Suomen. Ensimmäinen biokaasulaitos valmistui vuonna 2010 Kiteelle, ja tuorein laitos sijaitsee Puolangalla. Puolangan laitoksen avajaisia vietettiin marraskuussa 2022. Doranovalla on rakenteilla olevia laitoksia Jokioisilla ja Juuassa. Doranovan laitosvalikoimassa on neljä erilaista vaihtoehtoa, jotka ovat Miniferm, Wetferm, Solidferm ja Hardferm. Osa laitoksista toteutetaan yhteistyössä saksalaisen Weltec Biopower GmbH:n kanssa. Laitoksien kokoluokat vaihtelevat laitos tyyppin mukaan.

Doranova kehittää teknologiaa biologisesti tuotettuun synteettiseen metaaniin. Teknologia perustuu biokaasun ja puukaasun yhdistämiseen. Kehitystä tehdään yhteistyössä puukaasuteknologiayritys Xylogas Oy:n ja Hämeen ammattikorkeakoulun kanssa. Hankkeen tarkoitus on lisätä biokaasun kannattavuutta ja maatalouden sivuvirtojen hyödynnettävyyttä. (HAMK 2022.)

3 Biokaasu

Biokaasu on luonnossa esiintyvä kaasu. Luonnollisesti sitä voidaan tavata esimerkiksi soilla. Kaasua muodostuu, kun orgaaninen aine hajoaa hapettomassa tilassa. Biokaasusta saatavia hyötyjä ovat monipuolisen kaasun lisäksi mädätysjäännöksen hyvät ominaisuudet lannoitteena.

Biokaasuprosessissa ravinteet kiertävät laitoksesta takaisin peltoon ja erilaisten väylien kautta takaisin laitokseen. Ravinnekiertoa havainnollistaa kuva 1. (Kymäläinen & Pakarinen 2015.)



Kuva 1. Biokaasuprosessin ravinnekierto. (Biokaasuteknologia, Kymäläinen & Pakarinen 2015, 10).

Biokaasu on kaasuseos, joka koostuu pääasiallisesti hiilidioksidista (CO_2) ja metaanista (CH_4). Niiden lisäksi seoksessa esiintyy vaihteleva määrä tyypeä (N_2), vetyä (H_2), happea (O_2), rikkivetyä (H_2S) ja ammoniakkia (NH_3). (Motiva,

2020). Biokaasu muodostuu anaerobisissa olosuhteissa, jossa orgaanisen aineksen mätänemisprosessi tapahtuu. Prosessissa mikrobit hajottavat syötteenä olevan orgaanisen massan. Hajoaminen tapahtuu useassa samanaikaisessa vaiheessa, jolloin mikrobit kuluttavat toisten mikrobien tuotteita. Lopulta prosessissa metaanibakteerit tuottavat metaanin. Prosessin mikrobit ovat toisistaan riippuvaisia, jolloin hajoamisprosessi on herkkä muutoksille. (Kymäläinen & Pakarinen 2015.)

3.1 Biokaasureaktorit

Biokaasulaitoksien reaktorit voidaan luokitella kuiva- ja märkäreaktoreihin. Reaktorin tyyppi määritellään syötteen kuiva-ainepitoisuuden mukaan. Laitokset voidaan myös luokitella kuiva- ja märkäreaktoreiden lisäksi toimintalämpötilan mukaan. Näin luokittelu tehdään meso- ja termofiilisiin laitoksiin. Tämän lisäksi kuivareaktorit voidaan jakaa vielä jatkuva- ja panostoimisiin laitoksiin. (Motiva 2013)

Mesofiilisen ja termofiilisen laitoksen erot ovat selkeitä. Mesofiilisen prosessin toimintalämpötila on 35–37 astetta. Kun taas termofiilinen prosessin toiminta lämpötila on 50–55 astetta. Näistä yleisempi on mesofiilinen, koska prosessin hallinta on helpompaa kuin termofiilisessä. Termofiilisen prosessin merkittävä etu on viipymäaika, joka on lyhyempi kuin mesofiilisessä prosessissa. Näin saadaan prosessiin helposti tehoa tai pienennettyä reaktorin kokoa. Termofiilisessä prosessissa korkeamman lämmön ylläpitämiseksi tarvitaan enemmän eristystä, jolloin rakennuskustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin mesofiilisessä prosessissa. (Kangas 2011, 18.)

3.1.1 Kuivareaktori

Kuivämädätyslaitoksia on kaksi päätyyppistä ryhmää, jatkuvatoiminta- ja panostoimintaperiaatteella toimivia prosesseja. Näiden lisäksi laitoksia on useita erityyppisiä. Kuivämädätyksen merkittävin ero märkämädätykseen on laitoksen reaktorin koko, joka on pienempi. Merkittävä ero reaktorin tilavuudessa johtuu suuremmasta kuiva-ainepitoisuudesta, jolloin prosessissa ei ole merkittävää määrää vettä. Kuivämädätyksessä prosessin kuiva-ainepitoisuus on 35-40%. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 86.)

Jatkuvatoimisissa laitoksissa reaktoriin lisätään syötettä ja poistetaan mädätysjäännöstä säännöllisesti. Jatkuvatoimisissa laitoksissa on haasteena prosessoitavan massan ja mikrobien riittävä keskinäinen kohtaaminen, jonka takia toimintaan tarvitaan tyypillisesti vahvat sekoittimet. Jatkuvatoiminen reaktori tarvitsee säännöllistä syöteenlisäystä ja mädätysjäännöksen poistoa, joka tapahtuu siirtoruuveilla tai kuljettimilla. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 86.)

Panostoiminen laitos perustuu kerralla ladattavaan reaktoriin. Siihen lisätään panos noin 45 vrk ajaksi. Mädätyksen aikana reaktorissa kiertää suotonesteet, joiden tarkoitus on edistää mikrobien ajautuminen koko massan läpi. Panostoimisissa laitoksissa on yleensä useampi reaktori rinnakkain kaasun saannon jatkuvuuden mahdollistamiseksi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 86.)

3.1.2 Märkäreaktori

Merkittävin piirre märkämädätyksessä on kuiva-ainepitoisuus, joka on enimmillään 15%. Matalasta kuiva-ainepitoisuudesta johtuen syöte on juoksevaa. Syöteen ominaisuuksien ansiosta laitoksien rakennusvaiheessa voidaan käyttää kevyempiä rakennusratkaisuja. Merkittävin etu kuivämädätyslaitokseen on syöteen ja mädätysjäännöksen siirtäminen, sillä siirtäminen voidaan suorittaa erilaisilla pumpuilla. Märkämädätyksessä prosessinaikaiseen sekoitukseen voidaan käyttää kevyitä sekoittimia tasaisen metaanin tuotannon takaamiseksi. Kevyempien ratkaisujen ansiosta myös

rakennuskustannukset ovat pienemmät. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 82-83.) Kuvassa 2 on tyypillinen pyöreänmallinen reaktori, ja sen edessä portaista vasemmalle on kevytrakenteinen sekoitin.

Märkämädätysreaktorin tyypilliset syötteet ovat eläintilojen lietteet, mutta reaktoriin voidaan syöttää myös kiinteitä syötteitä, kuten heinää ja olkea. Kuiva-ainepitoisuuden pitää tällöin myös pysyä samana, joka onnistuu sekoittamalla syöte veteen tai esimerkiksi lisättävään lietteeseen. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 82-83.)

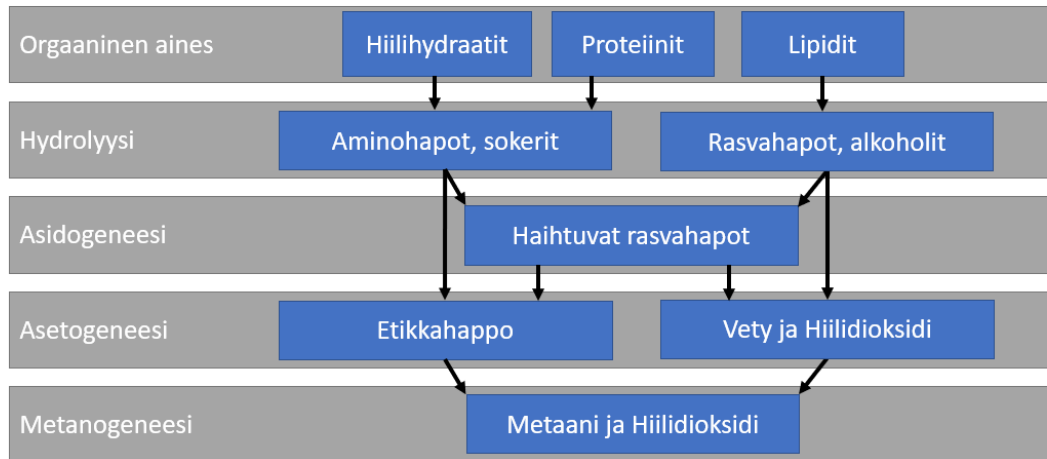


Kuva 2. Jepuan biokaasu Oy:n märkämädätysreaktori.

3.2 Prosessin vaiheet

Biokaasureaktorissa tapahtuu toisistaan riippuvia reaktioita yhteensä neljä. Reaktiot ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi. Reaktiot tapahtuvat reaktorissa samanaikaisesti. Joidenkin reaktioiden korostuessa prosessissa olevat mikrobit voivat vahingoittua, ja näin metaanin

tuotanto laskee. (Motiva 2013,3.) Reaktorissa tapahtuvia reaktioita havainnollistetaan yleisesti järjestyksessä hydrolyysistä metanogeneesiin (kuva 3).



Kuva 3. Anaerobinen hajoaminen (Biovoima, luettu 10.01.2023)

3.2.1 Hydrolyysi

Ensimmäinen vaihe on hydrolyysi. Syöte sisältää yleensä paljon isoja molekyyliä, kuten proteiinit ja hiilihydraatit. Tässä vaiheessa mikrobit tuottavat entsyymeitä, jotka hajottavat isot molekyylit pienemmiksi. Reaktiossa syntyviä lopputuotteita ovat esimerkiksi sokerit ja rasvahapot. Entsyymejä tuottavilla mikrobeilla ja bakteereilla on yhteisnimitys hydrolyyttiset bakteerit. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 61.)

3.2.2 Asidogeneesi

Asidogeneesi on hajoamisen toinen vaihe. Siinä hydrolyysissä muodostuneet sokerit ja rasvahapot muodostuvat orgaanisiksi hapoiksi fermentoivien mikrobien ansiosta. Asidogeneesissä muodostuvia yksinkertaisia happoja ovat esimerkiksi etikkahappo ja voihappo. Vaiheessa muodostuu, happojen lisäksi ammoniakkia, vetyä ja hiilidioksidia. Erilaisten muodostuvien tuotteiden määrän

säätölee syötteen laatu, sekä erilaiset olosuhteet. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 63.)

3.2.3 Asetogeneesi

Kolmas vaihe on asetogeneesi, joka tarkoittaa anaerobista hapettumista. Asetogeenisissä edellisen vaiheen hapot hapettuvat käyttäen hapettuneita yhdisteitä. Asetogeenien toimintaa uhkaa korkeat vetypitoisuudet, joten toiminnalle tärkeää on seuraavan vaiheen metanogeenien hyvä vedyn kulutus. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 63.)

3.2.4 Metanogeneesi

Metanogeneesi on vaiheista viimeinen. Metanogeenisissä metanogeeniset bakteerit kuluttavat reaktoriin syntyvää vetyä, asetaattia ja hiilidioksidia. Reaktiossa syntyy metaania sekä hiilidioksidia eli biokaasua. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 63-64.)

3.3 Syötteet ja Mädätysjäännös

Syötteeksi kutsutaan biokaasulaitoksen raaka-aineena toimivaa orgaanista materiaalia. Syöte vaikuttaa reaktorin valinnasta aina mädätysjäännöksen hyödyntämiseen asti. Yleisiä syötteitä ovat eläintilojen lannat. Niiden koostumus riippuu eläimistä ja lannan keräysratkaisuista. Erityisesti hyvin hyödynnettävissä oleva lanta on lietelanta. Se on helposti siirrettävissä biokaasulaitokseen, koska siinä on jo valmiiksi alhainen kuiva-ainepitoisuus. Siitä johtuen lietteessä on heikosti energiaa, koska orgaanisen materiaalin osuus on pieni. Energian tuotannon kannalta peltobiomassasta saataisiin enemmän energiaa kuin lietelannasta. Pelloilta syötteeksi kelpaavat ylimääräiset ja huonolaatuiset heinät, sekä olki. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 32-44.) Sivuvirtojen lisäksi

energiantuotantoon voidaan viljellä erilaisia energiakasveja esimerkiksi ruokohelvi. (Maa- ja metsätalousministeriö 2023). Peltobiomassan tuotanto suoraan energian raaka-aineeksi koetaan kestävämmäksi, koska ajatellaan peltopinta-alan olevan pois ruuantuotannosta. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 32-44).

Syötteeksi käytetään myös yhteiskunnan tuottamia jätteitä. Helposti hyödynnettävissä on biojäte. Sitä syntyy suurissa keittiöissä esimerkiksi koulujen ja sairaaloiden ruokaloissa. Biojätettä syntyy myös teollisuuden sivuvirtoina, joita voidaan hyödyntää tehokkaasti biokaasulaitoksissa. Biojätettä sivuvirtana tuottavan laitoksen yhteyteen rakennetulla lämmön- ja sähköntuotantolaitteistolla saadaan tuotettua energiaa takaisin teollisuuden käyttöön. Biojätteiden lisäksi yhteiskunnassa syntyy myös suuri määrä puhdistamolietettä. Puhdistamolietettä voidaan hyödyntää biokaasulaitoksissa, mutta se täytyy rikastaa ennen reaktoriin syöttämistä. Rikastamalla saadaan kuiva-ainepitoisuus tavoiteltuun 15%. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, 32-44.)

Mädätysjäännös jää prosessista jäljelle. Sen koostumus on muun muassa prosessista jäljelle jäänyttä typpeä (*N*), fosforia (*P*) ja kaliumia (*K*). Prosessin jälkeen ravinteet ovat kasveille helpommin hyödynnettävässä liukoisessa muodossa. Mädätysjäännöstä käytetään maatalouden lannoitteena ja maanparannukseen. Syötteistä ainoastaan puhdistamolietteet tuottavat rajoitteita siihen, mihin jäännöstä voi käyttää. Puhdistamolietteistä syntyvässä mädätysjäännökselle on tiukat vaatimukset erilaisille ainejäämille. Vaatimukset tiukkenevat kehityksen ja tutkimusten perusteella. (Kymäläinen & Pakarinen 2015,18,43.)

4 Puukaasu

Puukaasu on kaasuseos hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Seoksen yksi nimitys on tuotekaasu, joka on biomassosta tuotettua. Tässä työssä käytetään nimitystä puukaasu, koska biometanoinnissa tuotekaasun raaka-aineena käytetään puuta. Raaka-aineena toimii puusta saatava hake tai esimerkiksi pelletti. (Basu 2010, 270.)

Puukaasua käytetään ympäri maailmaa eri käyttötarkoituksiin. Käyttötarkoituksia ovat muun muassa energiantuotanto, erilaiset kemikaalit sekä polttoaineen valmistus. (Higman 2008, 257-287.) Kaasutinlaitteistot pystytään luokittelemaan kolmeen pääryhmää kiinteäpeti-, leijupeti- ja pölykaasuttimiin. Kiinteäpetikaasutin on pieneen mittakaavaan sopiva kaasutinlaitteisto, joka toimii lämpöteholtaan 10kW-10MW, kun taas leijupetikaasuttimet toimivat lämpöteholtaan 5-100MW kokoluokassa. Pölykaasutin toimii, kun lämpötehoa tarvitaan yli 50MW. (Basu 2010, 168.)

4.1 Koostumus

Puukaasu koostuu hiilimonoksidista (CO), vedystä, metaanista, hiilidioksidista ja typestä (Pieniniemi 2011,42). Kaasuseoksessa on eniten hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Metaania on vain muutama prosentti. Typeä kaasuseokseen muodostuu, jos valmistuksessa käytetään ilmaa. Typpi poistetaan käyttämällä kaasutuksessa ilman sijasta vesihöyryä (H_2O) ja happea. (Xylogas 2022.) Kaasun koostumus ja laatu vaihtelee raaka-aineen laadun sekä pyrolyysin nopeuden ja lämpötilan mukaan. Kaasun epäpuhtauksia ovat terva, noki ja tuhka. Terva syntyy kaasutuksessa matalan lämpötilan alueilla. Sen tuotantoa pyritään välttämään, koska tahmea hiilivety-yhdiste tukkii helposti kaasutinlaitteiston. Kaasuttimen tyypillä ja käyttöolosuhteilla, etenkin lämpötilalla, pyritään vaikuttamaan tervan syntyyn. Epäpuhtauksista noki ja tuhka suodatetaan kaasusta erilaisilla suodattimilla ennen kaasun jatkokäyttöä. (Basu 2010, 97-99.)

4.2 Prosessin kuvaus

Puukaasun tuotannossa on neljä vaihetta. Ensimmäinen vaihe on kuivuminen. Se tapahtuu prosessin alkuvaiheessa, kun puuta lisätään prosessiin. Ennen kaasutiinlaitteistoon lisäämistä raaka-aineena toimiva puu kuivataan, koska tuoreen puun kosteus on yleisesti 30-60 prosentin välillä. Raaka-aineena käytettävän hakkeen tavoitekosteus on 20 prosenttia. Liian kostean raaka-aineen syöttäminen kaasuttimeen kuluttaa prosessista saatavaa energiaa. (Basu 2010, 120.)

Puun kuivumisen jälkeen kaasuttimessa tapahtuu pyrolyysi. Siinä biomassana toimiva puu lämpenee pyrolyysilämpötilaan, joka tapahtuu vähäisellä hapella tai ilman hapen vaikutusta. Korkeassa lämpötilassa erottuvat kiinteä hiiltojäännös, neste ja kaasuseos. Kaasua tavoiteltaessa pyrolyysi tapahtuu 600-1000 asteen lämpötilassa. Kaasuuntumisessa muodostuu kahdenlaista kaasua. Vesihöyryyn sitoutunutta kaasua sekä valmista kaasua. Höyryyn sitoutunut kaasu erottuu seoksen jäähtyessä. (Basu 2010, 71-73.) Jäähtyessään kaasut lisäävät prosessissa syntynyttä nestesaantoa. Erottavia nesteitä ovat terva, raskaat hiilivedyt ja vesi. Näiden vaiheiden jälkeen prosessista jää jäljelle hiiltojäännös. Sen koostumus on pääsääntöisesti yli 85% hiiltä. (Basu 2010, 69.) Pyrolyysin jälkeen tapahtuu reaktiossa jäännöshiilen kaasuuntuminen. Jäännöshiili sisältää vielä pyrolyysin jälkeen hiilivetyjä, jotka muodostuvat vedystä ja hapesta. Jäännöshiilen kaasutuksessa näistä muodostuu oikeassa lämpötilassa hiilimonoksidi, jota puukaasussa on puolet. Kaasuuntumisprosessissa on useita lämpöä tarvitsevia reaktioita eli endotermisiä reaktioita. Lämpöä prosessiin tuottaa muun muassa hiilen palamisreaktiot. (Basu 2010, 126.)

5 Laitteisto

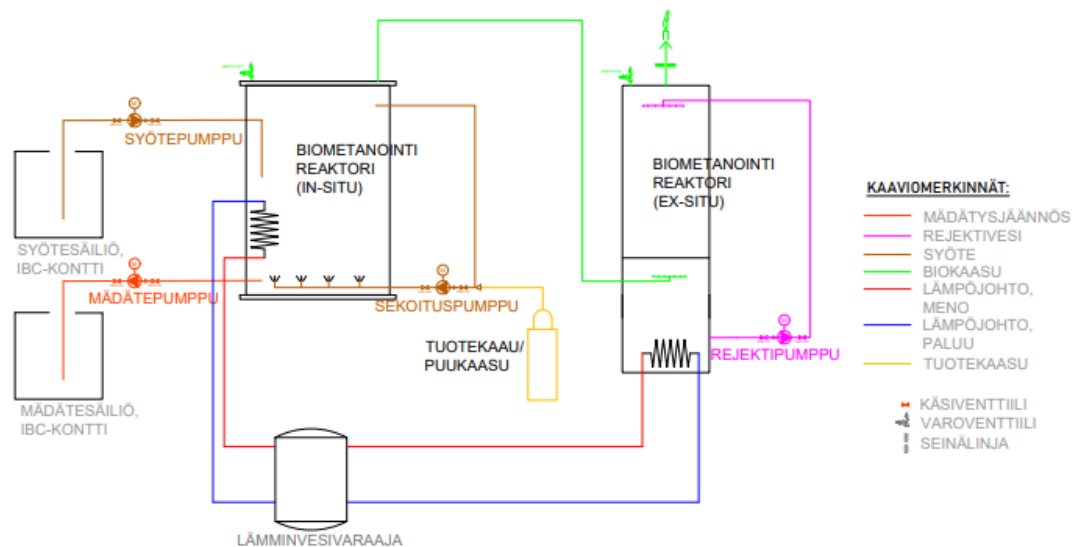
Laitteiston suunnitteluun on käytetty Doranova Oy:n aikaisempia tutkimuksia ja aiheesta löytyviä ulkopuolisia tutkimuksia. Laitteisto on jatkumoa teoriassa todennetuille tuloksille. Tavoitteena on saada todennettua teoria käytännössä. Pilottilaitteisto on rakennettu 40 jalan merikonttiin (kuvassa 4). Merikontti on lämpöeristetty ja rakennettu prosessin käyttöä varten. Pilottilaitteistoa rakentaessa on käytetty mahdollisuuksien mukaan valmiita osia, joita on muokattu prosessin tarpeisiin. Esimerkkinä kierrätyksestä toisen reaktorin pohjana on käytetty säiliötä vanhasta meijeristä.



Kuva 4. Pilottikontti

5.1 Prosessikuvaus

Prosessissa syöte pumpataan varastosta ensimmäiseen In-situ reaktoriin, jossa mikrobit kuluttavat ravinteet syötteestä. Reaktorin sekoituksen putkilinjaan lisätään tuotekaasu, joka näin jakautuu tasaisesti reaktoriin. Biokaasu ja lisätty tuotekaasu kulkeutuvat In-situn kaasutilasta Ex-situ reaktoriin. Ex-situ reaktoriin lisätään In-situ reaktorin läpikäynyttä rejektiä, joka kiertää Ex-situ reaktorissa. Ex-situ reaktorissa kaasu ja rejekti kohtaavat sekoittuen. Prosessin lämpöä ylläpitää lämminvesivaraaja, joka pitää molemmat reaktorit lähellä tavoiteltua lämpötilaa. Lämmitys perustuu reaktoreita ympäröiviin vesivaippoihin, joissa lämmitysvesi kiertää. Prosessin kierron lopuksi mädätysjäännös pumpataan molemmista reaktoreista säännöllisesti varastoon, kun uutta syötettä lisätään. Kuvassa 5 pelkistetty kaavio prosessin toiminnasta.



Kuva 5. Prosessikuvaus (Doranova Oy)

5.2 Laitteiston kuvaus

Ensimmäinen reaktori on toimintaperiaatteeltaan perinteistä termofiilistä reaktoria mukaileva säiliö. Säiliön on nestetilavuus noin 1200 litraa ja kaasutilavuus noin 300 litraa. Kaasutilassa eli säiliön yläreunassa on kaasun keräykseen venttiilit, ja yhteys toiseen reaktoriin. Reaktorin sekoituksen hoitaa letkupumppu. Syötteen lisäykseen on oma letkupumppu, jonka putkisto päättyy reaktoriin nestepinna alapuolelle. Näin muodostuva biokaasu ei kulkeudu putkistoon. Reaktorin tyhjennys hoidetaan pohjalta imevällä letkupumpulla. Kuvassa 6 ensimmäinen reaktori ja oikealla näkyy letkupumput.

Reaktoreihin syötetään tuotekaasua, joka vastaa puukaasua ominaisuuksiltaan. Tuotekaasua syötetään 50 litran kaasupullosta reaktoreihin. Pullo näkyy kuvassa 6 kiinnitettynä seinään. Kaasulinjaan kuuluu myös testeille olennainen annostelija.



Kuva 6. Perinteinen termofiilinen reaktori "In-situ".

Kuvassa 7 on esitelty Trickle bed reaktori. Sen toiminta perustuu rejektin kierrätykseen. Rejektin kierrätys tapahtuu letkupumpulla reaktorissa ylhäältä alaspäin. In-situ muodostunut kaasu ja siihen lisätty tuotekaasu kierrätetään päinvastaiseen suuntaan.



Kuva 7. Trickle bed reaktori "Ex-situ".

5.3 Teoreettinen tuottolaskelma

Teoreettisessa tuottolaskelmassa lasketaan pilottikontin mahdollinen kaasuntuotto teoriassa. Laskelma on esitetty liitteessä 1. Tuottolaskelmassa arvot ovat testijakson alusta, jolloin määrät ovat vielä pieniä. Laskelmassa käytetyt konversioasteet ovat normaalissa reaktorissa 70 % ja trickle bed reaktorissa 95% (Grimalt-Alemanym ym. 2020).

Laskelman lähtötilanteena on käytetty pilottilaitteiston ensimmäisiä testejä. Siinä reaktoriin syötetään 5 litraa tuotekaasua tunnissa. Reaktoreista saadaan laskettua tuotekaasun konversion tavoitearvot. Laskelmista voidaan huomata, kuinka reaktorista tulevan kaasun koostumus pitäisi olla merkittävästi erilainen kuin tuotekaasun lähtötilanteessa. Konversion perusteella hiilimonoksidia pitäisi tulla In-situ reaktorista ulos noin 17% kaasuntuotannosta, kun taas vastaava luku ex-situ reaktorissa on yhden prosentin luokkaa.

5.4 Tavoitteet

Biometanoinnin pilottilaitteiston tavoitteena on saada konttilaitteisto toimintakuntoon ja tuottamaan kaasua. Kaasuntuotannon käynnistyessä ajetaan reaktori mahdollisimman lähelle jälkimädätysolosuhteita. Kaasuntuotanto on tässä vaiheessa niukkaa, ja mikrobit pysyvät juuri ja juuri hengissä. Mikrobikanta on testeille olennainen, koska mikrobit käyttävät tuotekaasua ravintona seuraavassa vaiheessa. Jälkimädätyksen tarkoitus on, että reaktorissa ei syntyisi ravinnosta kilpailua, vaan pidetään reaktori toimintakuntoisena niukalla ravinnolla. Mikrobien tuotekaasun kulutus nähdään, kun muodostuvassa kaasussa on mahdollisimman vähän hiilimonoksidia. Hiilimonoksidin kulutus lisää samassa suhteessa metaanintuotantoa, joka on teoriassa laskettu. Tuotekaasutestien edetessä pystytään tarkastelemaan konttilaitteiston toimintaa ja kirjaamaan kehitysideoita. Pilotin tulosten perusteella voidaan skaalata seuraavan projektin kokoluokkaa.

6 Pilotin operointi

Tehtävinäni oli pilotin operointi ja ylösajo. Operointi koostui laitteiston päivittäisen toiminnan seuraamisesta ja seuraavien vaiheiden valmistelusta. Laitteiston viimeistelyn ja ylösajon vaiheet suoritin pääosin itsenäisesti ja tarvittaessa sain neuvoa muilta projektissa mukana olleilta asiantuntijoilta. Alussa, ennen laitteiston käynnistystä, oli useita pienempiä viimeistelyitä. Projektin edetessä operointi koostui vain päivittäisestä seurannasta.

6.1 Ylösajo

Pilottikontin valmistelu prosessin käynnistystä varten aloitettiin kontin viimeistelyllä. Konttiin lisättiin ilmanvaihto sekä kaasuvaihtin. Prosessilaitteistolle suoritettiin virtaus- ja painetestejä. Veden avulla mahdolliset vuodot huomattiin letkuliitoksissa sekä pumppujenliitoksissa. Vuotavat liitokset tiivistettiin ja prosessilaitteistossa nostettiin painetta. Mahdolliset kaasutilan ja putkiston riskikohdat tarkistettiin vuotojen varalta. Prosessit toimivat termofiilisissä olosuhteissa, jotka tarvitsevat tasaisenlämmön. Lämpötila on edellytys mikrobien toiminnalle. Lämmitysjärjestelmä täytettiin ja ilmattiin. Reaktoreiden lämpötila pyrittiin pitämään noin 55 asteen pinnassa, joka tavoitettiin helposti Ouman-automatiikan avulla. Ouman valikoitui lämpötilansäätöön, sillä tarvikkeet olivat varastossa.

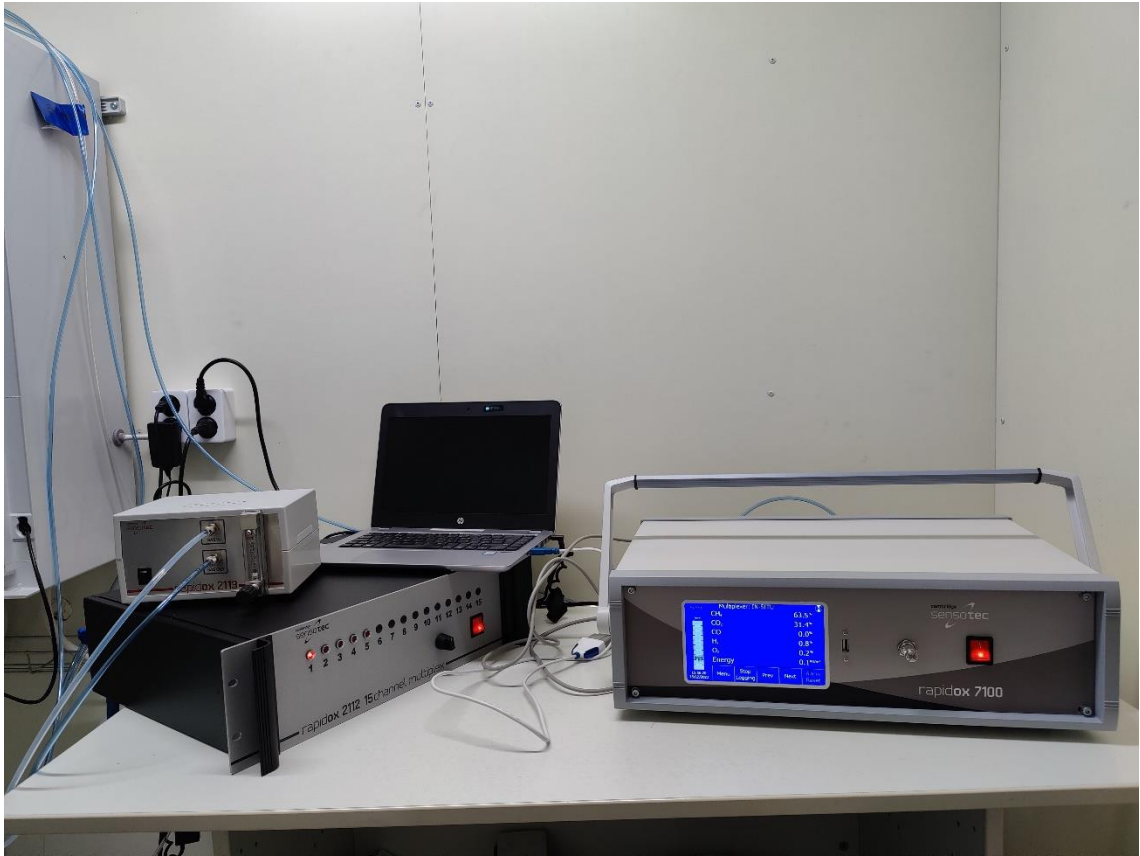
Prosessin biokaasureaktorin syötteenä käytetään paikallisen nautatilan lietelantaa. Lietelanta koostuu kaikesta, mitä navetasta muodostuu. Lietteen mukaan kulkeutuu kuivikkeeksi tarkoitettua materiaalia esimerkiksi turvetta tai olkea. Kuivikkeiden lisäksi lietteessä on mahdollisesti ruokinnassa käytettyä heinää, jota nauta tyypillisesti heittelee syömisen lisäksi. Lietteen koostumuksen takia se täytyi suodattaa ennen reaktoriin syöttämistä, jotta pilottilaitteiston ohuet putkistot eivät tukkeudu. Suodattaminen tapahtui klapisäkin avulla. Liete kuljetettiin paikalle IBC-kontissa. Kontista liete valutettiin klapisäkin läpi toiseen avonaiseen IBC-konttiin. Lietelannan ollessa jäykkää ja heikosti suodattuvaa

lisättiin seokseen vettä suodatusprosessin nopeuttamiseksi. Suodatus ilmeni useista yrityksistä huolimatta liian epäkäytännölliseksi, jolloin syöte päätettiin vaihtaa. Uutena syöteenä toimii jo valmiiksi separoitu liete. Separointi on erotellut lietelannasta kuiva-aineen eroon, jolloin projektiin tarvitsemamme neste saadaan pysymään mahdollisimman tasalaatuisena.

Kaasun tuotanto alkoi nopeasti reaktorin täytyessä tavoitepintaan. Kaasun koostumus oli aluksi vaihtelevaa ja sisälsi jonkin verran rikkivetyä. Viikkojen kuluessa kaasuntuotanto saatiin vakiintumaan, ja laatu pysyi hyvänä. Ex-situ reaktoriin syöteen lisääminen eteni hyvin, koska ensimmäisessä reaktorissa koostumus oli muodostunut tasaiseksi.

6.2 Päivittäiset tehtävät

Päivittäisiä tehtäviä kontissa on sekoitusta hoitavien pumppujen seuraaminen. Varsinkin alussa In-situn sekoituspumppu tukkeutui muutamia kertoja johtuen liian suuresta kiintoaine pitoisuudesta syötteessä. Pumppujen toiminnan lisäksi tehtävänä on seurata syöteen riittävyttä ja mädätysjäännöksen kertymistä. Koska reaktorit toimivat automaattisesti, on tärkeää seurata reaktoreiden pinnankorkeutta ja niissä olevaa painetta. Reaktoreiden kaasuntuotantoa seurataan paljetoimisilla virtausmittareilla. Mittareiden lukemat kirjataan ylös päivittäin. Päivittäin mitataan myös kaasunlaatu. Kaasuntuotto ja laatu kirjataan Excel-taulukkoon. Kaasun laadun seuranta hoitaa automaattisesti mittaava Rapidox-analysaattori (kuvassa 8). Analysaattorilla saadaan seurattua molempien reaktoreiden kaasun laatua. Kaasusta mitataan metaani-, hiilimonoksidi-, happi-, hiilidioksidi- ja vetypitoisuudet.



Kuva 8. Kaasun analysointilaitteisto Rapidox 7100

Reaktorin kaasuntuotanto pidetään päivittäin yllä lisäämällä reaktoriin syötettä tasaisesti. Reaktoriin lisättiin aluksi noin viisi litraa lietettä päivässä, mutta syötteen määrää lisättiin noin kymmeneen litraan päivittäisen kaasuntuotannon lisäämiseksi. Kaasuntuotanto oli arvioitua pienempi, koska lietteen suodatuksessa jouduttiin käyttämään vettä ja kuiva-ainepitoisuus laski. Syötteen lisäyksen yhteydessä reaktorista poistetaan saman verran mädätysjäännöstä, jotta pinnankorkeus pysyy tasaisena. Kerran viikossa kerätään mädätysjäännöksestä litran suuruinen näyte. Näytteet lähetetään tutkittavaksi Finlabin laboratorioon. Näytteistä tutkitaan muun muassa kuiva-ainepitoisuudet ja pH-arvo. Laboratoriotuloksilla pystytään ohjaamaan pilotin toimintaa haluttuun suuntaan.

6.3 Testit

Laitteistolla suoritettavat testit liittyvät mikrobien sietokykyyn tuotekaasulle. Testeillä pyritään selvittämään, miten reaktiot pysyvät käynnissä, jos tuotekaasussa olevien kaasujen määrää lisätään reaktorissa. Testeissä seurataan muodostuvan biokaasun koostumusta ja laatua. Testit aloitetaan syöttämällä tuotekaasua pullosta noin 5 litraa tunnissa. Kaasuanalysaattori seuraa kaasun hiilimonoksidipitoisuutta, joka kertoo konversioasteen. Teoriassa konversio on noin 70% ja 95% reaktorityypin mukaan. Kaasun virtausta nostetaan kahden viikon välein aina 60 litraan tunnissa. Laitteistolla tehtävien testien aloitus siirtyi, koska laitteiston viimeistely venyi. Testaamisen siirtymisen takia tuloksia ei vielä harjoittelun aikana saatu kerättyä.

6.4 Pilotoinnin haasteet

Pilotoinnin haasteita oli monenlaisia. Ongelmat sijoituivat sekä mekaaniseen toimitaan että automaatioon. Ongelmat ja haasteet ratkaistiin sitä mukaan, kun niitä ilmeni. Suurimpia kohtaamiemme haasteita on nostettu esiin seuraavilla kappaleilla.

Suodatus oli ensimmäinen kohtaamamme isompi haaste. Syötteenä toimi lietelanta, joka saatiin lähellä sijainneelta nautatilalta. Naudanlietelannan joukossa oli paljon kuivikkeena käytettävää turvetta. Turve tukki useammat suodatusyritykset ja lopulta käytettiin vain helposti suodattuva liete. Helposti suodattuva liete muodostui, kun IBC-konteissa ollut liete kerrostui. Nestemäisin osa lietteestä saatiin näin laskettua toiseen konttiin helposti. Syötettä saatiin noin 300 litraa jokaisesta lietelantakuutiosta. Operoinnin edetessä syötteenä valittu liete vaihtui separoituun lietteeseen.

Suodatuksen jälkeen haasteeksi muodostui reaktorin täyttö syötteellä. Syötteen siirtoon oli suunniteltu letkupumppu, joka oli mitoitettu jo ylösajetulle laitteistolle. Ylösajetussa laitteistossa pumpun tarvitsi siirtää päivittäin yhteensä noin 40-50 litraa. Päivittäinen lisättävä syöte olisi jaettu useaan eri kertaan, ja näin pumpun

tilavuusvirta riittäisi. Kontissa on yhteensä neljä letkupumppua, joista kolme on identtisiä syötepumpun kanssa. Letkupumppujen letkujen halkaisija oli vain 25 mm, jolloin syötteessä piti olla matala kuiva-ainepitoisuus. Alkuun syötteessä oli liikaa turvetta, joka tukki pumput. Suodatuksen parantuessa syötteen siirto onnistui. Reaktorin täytössä kului aikaa, sillä pumput tuottivat noin 2,5l/min ja reaktorin tavoite pinta oli 1200l. Reaktorin tason ylläpito toimi kyseisillä pumpuilla hyvin, kunhan ei tarvinnut siirtää suuria määriä lietettä.

Sekoitus In-situ reaktorissa oli toteutettu vastaavalla letkupumpulla kuin reaktorin syötteen lisäys. Sekoituksessa pumppu tukkeutui muutaman kerran, jonka jälkeen vaihdettiin sekoituksen pyörimissuuntaa. Reaktorissa sekoitus toimi vaihtelevasti muutaman viikon, jonka jälkeen pumppu vikaantui. Sekoituksessa havaittiin lietteen epätäydellinen sekoittuminen reaktorissa, sillä reaktorinesteen väri haaleni huomattavasti verrattuna päivittäin poistettuun mädätysjäännökseen.

In-situ reaktorissa, pinnanmittaus oli suunniteltu automaattiseksi. Pinnanmittaus päätettiin alun perin toteuttaa UÄ-pinnanmittausanturilla. Anturin asennuksessa kävi asennusvirhe, jonka lisäksi epäiltiin anturin soveltuvuutta reaktoriin. Pinnanmittaus muutettiin toimimaan mekaanisesti lisäämällä läpinäkyvä letku reaktorinalaosasta yläosaan. Ex-situ reaktorissa pinnanmittaukseen oli suunniteltu käytettäväksi paineanturi, mutta edellisen mekaanisen pinnanmittauksen toimiessa paineanturi korvattiin myös läpinäkyvällä letkulla.

Kaasuanalysointilaitteisto on suorassa yhteydessä reaktoreihin, ja laitteistossa on sisäänrakennettu pumppu. Analysaattori oli suunniteltu mittaamaan jatkuvatoimisesti, mutta varsinkin alkuvaiheissa reaktoreiden kaasun tuotto ei riittänyt jatkuvaan mittaamiseen. Ongelma ratkaistiin ajoittamalla mittaus muutaman tunnin välein tapahtuvalla intervallimitauksella.

Suurimmat kohtaamamme haasteet liittyivät syötteeseen ja syötteen siirtoon. Ajatus suunnitteluvaiheessa oli, että syötettä lisättäisiin muutamia litroja kerralla. Näin pumput olisivat soveltuneet käyttöön hyvin. Syötteen suodatuksen takia syötteessä oli jäljellä tukkeumia aiheuttavaa turvetta. Syötepumpun lisäksi

pumpun vajavainen kapasiteetti oli myös sekoituksessa ongelmana. Sekoitus olisi vaatinut, tilavuusvirraltaan tehokkaamman pumpun tai mekaanisen sekoittimen. Suurimman haasteen pilotissa loi lietteen tehokas siirto.

7 Johtopäätökset

Tehtävänäni oli pilottilaitteiston ylösajo ja sen päivittäinen operointi. Laitteiston saapuessa käyttöpaikalle, oli se vielä osittain keskeneräinen. Kyseisen laitteiston viimeistelyyn kului ennakoitua enemmän aikaa. Myös käyttöönotto tuotti erinäisiä haasteita ennen kuin reaktori saatiin tuottamaan kaasua.

Laitteistoa rakentaessa varastointialue käytössä oleville konteille oli pienentynyt, jolloin muun muassa lietteen käsittelykerrat lisääntyivät. Tämän toteutusvirheen takia operoinnista tuli osittain työlästä. Merkittävin hidaste projektissa oli reaktorin täyttö, sillä lietteen prosessointiin kului ennakoitua enemmän aikaa.

Pilottilaitteiston tarkoituksena oli tehdä testejä tuotekaasulla reaktorissa, mutta aikataulujen venyessä testien aloitusajankohta siirtyi harjoittelun jälkeiseen aikaan. Näin testien kulkua ei pystytty seuraamaan opinnäytetyössä varsinkin, kun alunperin odotettiin tuloksia useammalta kuukaudelta.

Biometanoinnista jäi vielä paljon tutkittavaa varsinkin, kun testit eivät tähän opinnäytetyöhön ehtineet. Pelkästään tuotekaasun lisäämisestä ja reagoinnista reaktoreissa ja niiden tuloksista olisi vielä mahdollista tehdä laajuudeltaan lisäksi erillinen opinnäytetyö.

Pilottikontin käyttöönotto oli kannattava, sillä harjoittelun aikana sain laitteiston pienet ongelmat ratkaistua, minkä jälkeen haluttujen testien toteuttaminen on mahdollista. Pilottilaitteiston käytössä ja operoinnissa merkittävin hidaste oli projektissa olevien työntekijöiden vähyyks. Tuloksien saantiin vaikutti harjoittelun kesto, joka oli vain 12 viikkoa. Aikaa kului paljon jo pelkästään pilotin toiminnan ymmärtämiseen ja käynnistykseen. Tehokkuutta olisi lisännyt, jos mukana olisi ollut jo asiaan perehtyneitä asiantuntijoita aktiivisesti.

Lähteet

- Basu, P. 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis. E-kirja ProQuest Ebook Central-kirjapalvelussa. Oxford: Elsevier Inc. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 10.01.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=648812>
- Biovoima. 2019. Biokaasu. Viitattu 10.01.2023. <https://biovoima.com/biokaasu>
- Biovoima. 2019. Sanasto biokaasusta. Viitattu 08.03.2023. https://biovoima.com/wp-content/uploads/2020/07/Suomen-Biovoima_Biokaasu_sanasto_072020.pdf
- Ek, F. 2017. Puunkaasuttaminen käytännössä. Viitattu 26.10. 2022. http://biobisnesta.fi/wp-content/uploads/2018/01/Kaasutusesitys_Fredrik_Ek_Mets%C3%A4keskus_Tampere_12_05_2017.pdf
- Grimalt-Aleman, A.; Asimakopoulou, K.; Skiadas, L. & Gavala, H. 2020. Modeling of syngas biomethanation and catabolic route control in mesophilic and thermophilic mixed microbial consortia. Elsevier: Science Direct. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 10.01.2023. <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.turkuamk.fi/science/article/pii/S0306261920300143>
- Hamk. 2022. Wood2biogas. Viitattu 8.12.2022. <https://www.hamk.fi/projektit/wood2biogas/>
- Heikura, P. 2007. Puukaasu pelasti Suomen Viitattu 26.10.2022. https://www.kemiamedia.fi/wp-content/uploads/2013/03/kemia707_hakapontot.pdf
- Higman, C. & Van der Burgt, M. 2008. Gasification. E-kirja ProQuest Ebook Central-kirjapalvelussa. Toinen painos. Oxford: Elsevier Inc Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 10.01.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=331996&query=Gasification>
- Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu

Kangas, A.; Lund, C.; Liuksia, S.; Arnold, M.; Merta, E.; Kajolinna, T.; Carpén, L.; Koskinen, P. & Ryhänen, T. 2011. Energiatehokas lietteenkäsittely. Viitattu 12.10.2022.

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37060/SY_17_2011.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Lassi, U. & Wikman, B. 2011. Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi. Viitattu 26.10.2022.

<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/27058/1/978-951-39-4313-4.pdf>

Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Viitattu 26.10.2022.

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1

Maa- ja metsätalousministeriö. 2023. Maatalous uusiutuvan energian tuottajana ja käyttäjänä. Viitattu 18.04.2023 <https://mmm.fi/ruoka-ja-maatalous/biokaasu>

Motiva. 2020. Biokaasu. Viitattu 11.10.2022.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/biokaasu

Motiva. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. Viitattu 11.10.2022.

https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Pieniniemi, K. & Muilu, Y. 2011. Kaasutus ja tuotekaasun analysointi. Viitattu 26.10.2022. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/27058/1/978-951-39-4313-4.pdf>

Scildhauer, T. & Biollaz, S. 2016. Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and power-to-gas applications. E-kirja ProQuest Ebook Central-kirjapalvelussa. New Jersey: John Wiley & Sons, inc. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 10.01.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=4558343&query=2016.+Synthetic+natural+gas+from+coal%2C+dry+biomass%2C+and+power-to-gas+applications.+>

Suomen biokierto ja biokaasu ry. 2022. Tiedote: Biometaanin ja biokaasun tuotanto kovassa kasvussa. Viitattu 18.4.2023 <https://biokierto.fi/tiedote-biometaanin-ja-biokaasun-tuotanto-kovassa-kasvussa/>

Xylogas. 2022. Puusta tuotekaasum biohiiltä ja metaania. Viitattu 11.01.2023. <https://xylogas.net/>

Teoreettinen tuottolaskelma.

Tuotekaasu

	%	nm ³	Mol
H ₂	30	0,0015	0,06692627
CO ₂	20	0,001	0,04461752
CO	50	0,0025	0,11154379
Olosuhteet			
Tilavuus pullossa	7,5	nm ³	
Ilmanpaine	101325	pa	
Lämpötila	0	C	
Kaasuvakio	8,314	J/K* ^{mol}	
Tuotekaasua lisätään reaktoriin tunnissa	0,005	m ³ /h	

Reaktioiden tarvitsema vesi jo reaktorissa

	Mol
H ₂ O	0,15

Mooli tarkastus

H	0,433852548
C	0,156161306
O	0,350778822
Yhteensä	0,940792675

In-situ

Reaktorin tavoite kaasun tuotto päivässä	0,239	m ³ /d
Lietelannan metaanin tuotto teoriassa	23,9	m ³ /t
Syöttö päivässä	0,01000	m ³ /d
Litraa	10,00	l/d
Reaktorin Halkasija	1,2	m
Säde	0,6	m
Korkeus	1,5	m
Tilavuus	1,70	m ³
Nestetilavuus	1,40	m ³
kaasua vuodessa	87,235	m ³ /a
Lietteen viipymäaika	139,6460033	d
Konversioaste	70	%
Päivässä lietelantaa	0,01000	m ³ /d
Lietelannan tarve vuodessa	3,65	m ³ /a

CO + H₂O -> CO₂ +H₂

Alussa	
H ₂	0,066926274 mol/h
CO ₂	0,044617516 mol/h
CO	0,11154379 mol/h
H ₂ O	0,15 mol/h
Konversio	
H ₂	0,078080653 mol/h
CO ₂	0,078080653 mol/h
CO	0,078080653 mol/h
H ₂ O	-0,078080653 mol/h
Jäljellä	
H ₂	0,020078 mol/h
CO ₂	0,013385 mol/h
CO	0,033463 mol/h
H ₂ O	0,000000

4H₂ + CO₂ -> CH₄ + 2 H₂O

CH ₄ :CO = 1:4	
Konversio	70 %
H ₂ Reaktorista	0,078081 mol/h
H ₂ Tuotekaasu	0,066926274 mol/h
H ₂ Yhteensä	0,145007 mol/h
CH ₄ biometaani	0,025376212 mol/h
H ₂ O muodostuu	0,050752424 mol/h
CO ₂ kuluu	0,025376212 mol/h
CO ₂ Ylimääräinen	0,097321957 mol/h
H ₂ jäljellä	0,043502078 mol/h

Kaasut	Kaasujen määrä,		
	mol	nm ³	%
H ₂	0,043502078	0,00098	21,79 %
CO	0,033463	0,00075	16,76 %
CO ₂	0,097321957	0,00218	48,74 %
CH ₄	0,025376212	0,00057	12,71 %
H ₂ O	0,122671771	0,00275	
Yhteensä	0,322335155	0,00722	
Yhteensä ilman veden osuutta	0,199663384	0,00448	

Mooli tarkastus

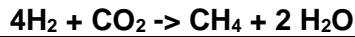
H	0,433852548 mol
C	0,156161 mol
O	0,350778822 mol
Yhteensä	0,940792675 mol
Erotus	0

Ex-situ

Kaasuvirta	0,0045 nm ³ /h
Kaasun viipym reaktorissa	2 h
Tilavuus	0,00895 m ³
Lietetilavuus	0,35 m ³
Lietteen viipymäaika	90 d
Lietettä päivässä	0,0039 m ³ /d
Lietettä viikossa	0,027 m ³ /w
Lietettä vuodessa	1,419444444 m ³ /a
Osuus kaikesta syötteestä	39 %
Konversioaste	95 %

CO + H₂O -> CO₂ + H₂

Konversio	
H ₂	0,03178998 mol/h
CO ₂	0,03178998 mol/h
CO	0,001673157 mol/h
H ₂ O	-0,03178998 mol/h



CH ₄ :CO = 1:4	
Konversio	98 %
H ₂ Ex-Situ	0,03178998 mol/h
H ₂ In-situ	0,043502078 mol/h
H ₂ yhteensä	0,075292058 mol/h
Biometaani	0,018446554 mol/h
H ₂ O muodostuminen	0,036893108 mol/h
CO ₂ Kulutus	0,018446554 mol/h
CO ₂ Ylijäämä	0,110665382 mol/h
H ₂ Yli	0,001505841 mol/h

Kaasut	Kaasujen määrä,		
	mol	nm ³	%-osuus
H ₂	0,001505841	0,00003	0,96 %
CO	0,001673	0,00004	1,06 %
CO ₂	0,110665382	0,00248	70,19 %
CH ₄	0,043822766	0,00098	27,79 %
H ₂ O	0,1277749	0,00286	
Yhteensä	0,285442047	0,00640	
Yhteensä ilman veden osuutta	0,157667147	0,00353	

Mooli tarkastus

H	0,433852548
C	0,156161
O	0,350778822
Yhteensä	0,940792675
Erotus	0