



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin



MAASEUTU 2020

Wood2Biogas-hankkeen koetoiminnan tuloskooste

Hankkeen nimi: Wood2Biogas

Hankenumero: 180849

Toteutusaika: 1.1.2022 – 31.5.2024

Hankkeen vastuullinen toteuttaja: Hämeen ammattikorkeakoulu Oy (HAMK)

Muut toteuttajat ja tuensaajat: Doranova Oy, Xylo Gas Oy, ProAgria SLF ja Biopir Oy

Hanketoimijat:

HAMK: Maritta Kymäläinen, Milla Salmela, Päivi Vartiainen, Satu Tiainen, Päivi Vähäjärvi, Laura Kannisto

Doranova Oy: Antti Myllärinen, Oskari Haho

Xylo Gas Oy: Ott Pärtel, Pasi Virintie ja Fredrik Ek

ProAgria SLF: Fredrik Ek

Biopir Oy: Jyrki Heilä

Wood2Biogas-hanke oli Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnan 2014 - 2020 EU:n elpymisrahaston lisävaroista rahoitettu EIP-hanke





Sisällysluettelo

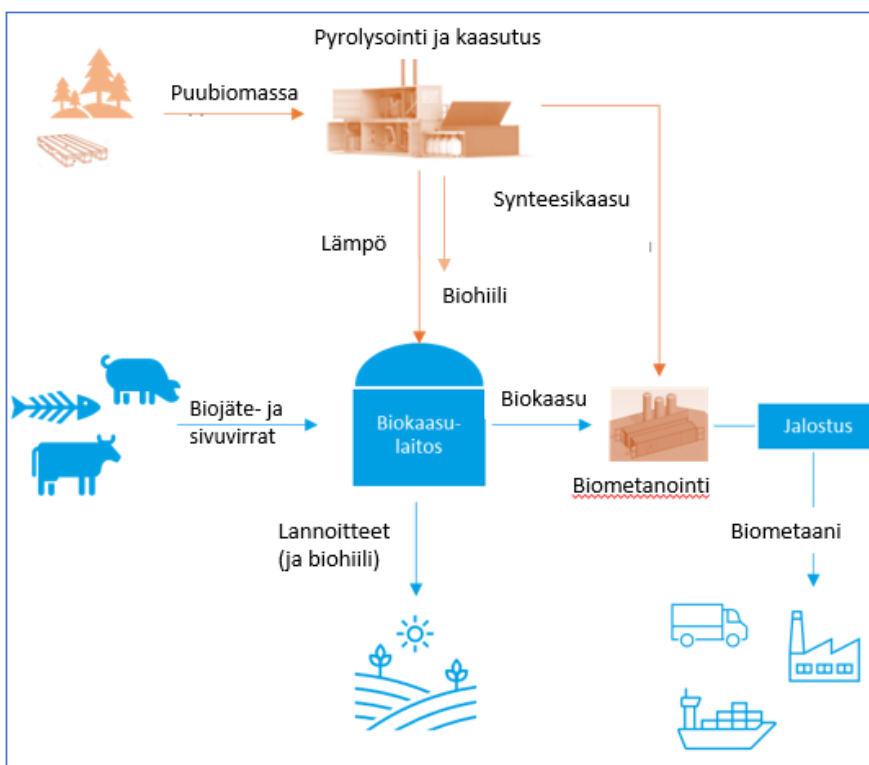
Tausta ja tavoitteet	1
Biometanointi	3
Toteutus	3
Päätulokset	4
Johtopäätökset	9
Pyrolysointi-kaasutus.....	10
Toteutus	10
Päätulokset	10
Johtopäätökset	14



Tausta ja tavoitteet

Biokaasun tuotantoprosessi on erinomainen kestävä tapa jalostaa ravinnepitoisia maatalouden jäte- ja sivuvirtoja energiaksi, biopolttoaineeksi (biometaaniksi) sekä lannoite- ja maanparannustuotteiksi. Hajautetulla tuotannolla, kuten paikallisesti toimivilla biokaasulaitoksilla, on hyvät mahdollisuudet hyödyntää maatalouden biomassavirtoja logistisesti kestäväällä tavalla ja täten edistää ravinnekierrätystä ja vähentää maatalouden ilmastopäästöjä. Suomen biokaasutuotannon lähiajan kasvupotentiaali nähdäänkin olevan suurilta osin nimenomaan maatalouden biomassoissa. Näillä maatalouden biomassoista hyödyntävillä biokaasulaitoksilla on kuitenkin iso kannattavuushaaste, johtuen raaka-aineiden alhaisesta energiapotentiaalista sekä jalostustuotteiden tuotantokustannuksista, kun tuotantokapasiteetti on pieni. Haasteena voi myös olla mädätteen ravinteiden haastava alueellinen hyödyntäminen. Näihin haasteisiin Wood2Biogas-hankkeen innovaatiolla haettiin ratkaisua, laajentamalla raaka-ainepohjaa ja parantamalla biometaanituottoa ilman että mädätysjäännöstä muodostuu lisää.

Wood2Biogas-konseptissa integroidaan puun kaasutusprosessi ja perinteinen anaerobinen mädätysprosessi niin, että kaasutuksesta saatavaa synteetikaasua käytetään biokaasun biometanointiin (Kuva 1). Näin biokaasun hiilidioksidi reagoi metaaniksi ja saadaan biokaasun metaanipitoisuutta nostettua merkittävästi. Konseptista kiinnostuneet yritykset Xylo Gas Oy ja Doranova Oy, yhteistyössä sikalietteestä biokaasua tuottavan Biopir Oy:n, Hämeen ammattikorkeakoulun ja ProAgria SLF:n kanssa suunnittelivat ja toteuttivat tämän konseptin ympärille samannimisen (Wood2Biogas) innovaatiohankkeen.



Kuva 1. Kaaviokuva Wood2Biogas-kokonaiskonseptista, sen eri osaprosesseista, raaka-aineista ja tuotteista. Tässä hankkeessa keskityttiin kokonaisprosessin pyrolysointi+kaasutus -prosessikokonaisuuteen ja ex situ -biometanointiprosessiin, niissä tehtävään koetoimintaan ja tekniikan toimivuuden testaamiseen, ja näiden pohjalta tehtävään kokonaiskonseptin arviointiin.



Puun kaasutusprosessista saatavan synteetikaasun vety ja häkä reagoivat biologisessa biometanointiprosessissa metaaniksi ja hiilidioksidiksi, mikä voidaan toteuttaa joko biokaasureaktorissa (in situ -metanointi) tai erillisessä biokaasun metanointiyksikössä (ex situ -metanointi). Wood2Biogas-hankkeessa tavoiteltiin ensivaiheessa in situ -ratkaisua, mutta pienen mittakaavan testiajojen perusteella tämä todettiin liian isoksi riskiksi lähteä testaamaan ison mittakaavan Biopirin laitosprosessin yhteydessä, joten kehitystyötä jatkettiin ex situ -ratkaisuna. Puusta tuotettavan termisen synteetikaasun ja biokaasun metanointiprosessin integroinnin lisäksi Wood2Biogas-hankkeen innovaatiokokonaisuuteen kuului biohiilituotannon integrointi synteetikaasun tuotantoon.

Hankkeen tavoitteena oli konkreettisesti pilotoitavien laitteistojen avulla osoittaa teknologioiden toimivuus ja prosessien saannot, haasteet ja hyödyt, joiden pohjalta voidaan arvioida sekä Wood2Biogas -kokonaiskonseptin että yhdistetyn biohiilen ja synteetikaasun tuotannon toteutettavuutta ja kaupallista potentiaalia.

Käytännössä testattiin, miten puun termisen pyrolyysi- ja kaasutusprosessin yhdistävällä teknologialla voidaan tuottaa biokaasun metanointiin tarvittavaa vety- ja häkäpitoista tuotekaasua, ja samalla myös biohiiltä. Toisaalla testattiin, miten toiminnassa olevan biokaasulaitoksen metaanisaantoa voidaan kasvattaa biologisella ex situ -metanoinnilla, käyttämällä termisen kaasutusprosessin tuotekaasua simuloivaa vetykaasua.

Laajemmassa kontekstissa hankkeen tavoitteena oli rakentaa verkostoa ja toimintamallia (agrisymbioosi) maatalousyrittäjien (biosivuvirtojen tuottajat ja hyödyntäjät, biokaasutuottajat), teknologiayritysten ja muiden verkostoon tarvittavien toimijoiden välille.

Yleisesti, hankkeen ensisijainen tavoite oli edistää sellaista maatalouden sivuvirtoja hyödyntävää biokaasutuotantoa, jolla on edellytyksiä olla taloudellisesti kannattavaa. Tunnetusti biokaasulaitoksen pitää olla tehon puolesta riittävän iso, jotta biometaanin tuotantoon tarvittava tekniikkainvestointi on mahdollinen. Biohiilen ja biometaanin tuotantomahdollisuuksien avulla Wood2Biogas-ratkaisun tavoitteena oli edistää myös pienehköjen biokaasulaitosten taloudellista elinvoimaisuutta.

Hankkeessa kehitettiin ja testattiin Wood2Biogas-konseptiin liittyviä teknologioita. Puun kaasutusprosessiin yhdistettiin biohiilen tuotanto eli kehityskohteena oli puun integroitu pyrolyysi-kaasutusprosessi. Tästä kehitystyöstä vastasi Xylo Gas Oy. Toinen kehityskohde oli biometanointiprosessi, mistä vastasi Doranova Oy. HAMK Bion tutkimusyksikkö osallistui teknologioiden pilotointivaiheen tutkimustyöhön, näytteiden analysointiin ja tulosten tarkasteluun.

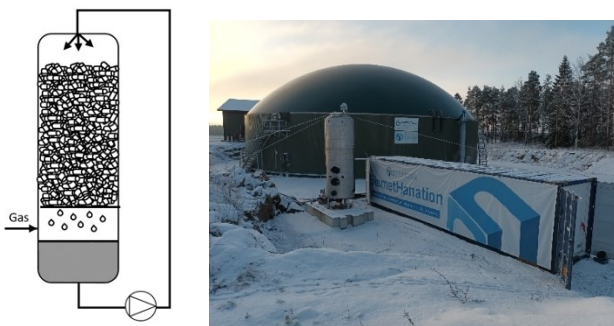
Tässä raportissa keskitytään kokeellisen työn toteutukseen ja päätuloksiin johtopäätöksineen.



Biometanointi

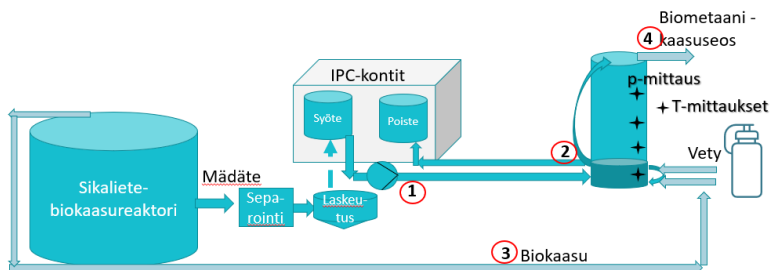
Toteutus

Biokaasun biometanointitutkimus toteutettiin Doranova Oy:n kehittämällä ja rakentamalla pilotilla Biopir Oy:n sikalietettä käyttävän biokaasulaitoksen yhteyteen sijoitetussa TB (Trickle-Bed) reaktorissa (5 m³), *Kuva 2*. Prosessiseurantaa tehtiin kahdella koejaksolla, kestoaltaan 73 vrk ja 61 vrk, syksyn 2023 ja kevään 2024 aikana.



Kuva 2. Trickle-bed reaktorin perusrakenne ja Doranovan reaktori Biopirin biokaasulaitoksella Vehmaalla.

Biometanointireaktoriin syötettiin paitsi biometanointiin tarkoitettua biokaasua ja vetyä, niin myös biokaasureaktorista saatavaa separoitua mädäte-rejektivettä mikrobien ravinnoksi (*Kuva 3*).



Kuva 3. Biometanointi-pilotointi kokonaisuus ja numeroidut näytteenottopisteet.

Koejakson aikana seurattiin syötetyn biokaasun ja reaktorista poistuvan tuotekaasun laatua ja määrää, sekä rejektiveden laatua ennen ja jälkeen. Kaasun määrä- ja laatusuranta (CO₂, CH₄, H₂, CO, O₂) oli jatkuvaa koko koejaksojen ajan. Liuosnäytteitä otettiin TB-reaktorin poisteesta keskimäärin kerran viikossa ja syötetystä rejektivedestä yhteensä neljä kertaa molempien koejaksojen aikana. Liuosnäytteistä analysoitiin HAMK Bion laboratoriossa kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuudet, pH, typpipitoisuudet (liukoinen, kokonais-, ammonium- ja nitraattityppi), haihtuvien rasvahappojen (VFA) määrä ja koostumus (asetaatti, propionaatti, butyraatti, isobutyraatti ja isovaleriaanihappo) ja alkaliteetti (puskurointikyky). Alkuaineanalyysit (Al, Al_{sol}, P, P_{sol}, K, Mg, Na, Fe) teetettiin ulkopuolisessa laboratoriossa yhdestä rejektivesisyöttestä ja kahdesta poisteesta molempien koejaksojen aikana.

Reaktorin lämpötilaa tarkkailtiin kolmesta kohdasta kerrosämpötilamittarilla. Lämpötilatietoja kerättiin reaktorin lietetilasta, täytekappaletilan keskiosasta sekä reaktorin yläosasta. Reaktoriin syötetyn vetymäärän asetusarvoa ja hetkellistä syöttönopeutta tallennettiin datana 10 minuutin välein. Ulkolämpötilaa tarkkailtiin



ja tallennettiin 10 minuutin välein. Biokaasun syöttö säädettiin manuaalisesti säätöventtiilillä arvoon 1,0 m³/h, jossa se pidettiin testien ajan. Tämä lukema perustuu aiempien tulosten pohjalta määritettyyn tavoiteviipymään (1,5 h) sekä biokaasun syöttövirtaukseen ja sen hiilidioksidipitoisuuteen, joiden pohjalta saatiin laskennallinen vetymääratarve.

Päätulokset

Biometanoinnin 1. koejakso käynnistyi 17.10.2023 ja kesti noin 3 kk, päättyen 11.1.2024. Koko koejakson ajan biometanointiprosessin toimintaa häiritsivät tietyt ulkoiset tekijät, kuten sähkökatkot, biokaasusyötön epätasaisuus ja katkot mm. biokaasulinjan jäätyminen vuoksi, tai muut poikkeuksellisen kylmästä säästä aiheutuvat ongelmat. Kylmä vuodenaika ja ulko-olosuhteet olivat haasteelliset koetoiminnan kannalta. Tällä 1. koejaksolla yhtenäiset ajojaksot jäivät lyhyeksi tekniikkaongelmien ja kylmien olosuhteiden vuoksi. Laitoksessa oli syksyllä useita toimintaan vaikuttavia teknisiä tekijöitä, joista osa johtui kovista pakkasista. 6.11. laitoksesta katkesi sähköt lyhyeksi aikaa, minkä seurauksena ylimäärin vetyä virtasi systeemiin sisään, kun taas biokaasun puhallin ei toiminut samaan aikaan. Samanlaisia tilanteita oli myös 10.11., 12.11., 23.11., 26.11. ja 2.12. Sähkökatkojen seurauksena kaasupuhallin ei käynnistynyt automaattisesti, mikä johti ylimääräiseen vetysyöttöön. Testauksessa ja täten mittausdatan saannissa oli useita taukoja eri syistä johtuen: 15.–20.11. biokaasun syötössä oli ongelmia; 27.–30.11. biokaasulinja oli jäässä; 6.–12.12. mittauslinjat olivat jäätyneet. 14.–19.12. havaittiin ilmapuoto reaktoriin, mikä paikattiin 19.12. Tammikuussa 2024 (4.1.) testit keskeytettiin erittäin kylmistä olosuhteista aiheutuneiden jäätymisten takia. Mm. lietteenkierrätyslinja jäättyi biokaasulinjojen lisäksi.

Keväällä 2024, 2. koejaksolla, saatiin toteutettua yhtenäisempiä ajojaksoja ja saavutettiin dataa pidempikestoisesta yhtenäisestä ajosta verrattuna syksyn testeihin. Ainoastaan 21.–26.3. testeissä oli tauko kovien pakkasten takia. Tällöin oli ongelmia itse biokaasulaitoksessa ja sen biokaasun tuotannon riittävydessä. Myöhemmin kaasulinjasta löytyi tukos. 15.4., 16.4. ja 18.4. reaktorissa havaittiin erillisiä ilmapuotoja, jotka saatiin korjattua nopeasti. 20.4. biokaasun mittauspaikan sijaintiin tehtiin muutos, mikä paransi mittausten tekoa.

Häiriötilanteiden tunnistaminen ja hyvä dokumentointi antoi arvokasta tietoa prosessidatan ja analyysitulosten tulkintaa varten.

Ensimmäisen biometanointikoejakson aikana kerättiin näytteitä keskimäärin kerran viikossa TB-reaktorin poisteesta ja neljä kertaa syötetystä rejektivedestä (n. 20 päivän välein). Oletuksena oli, että rejektivesi on tasalaatuista Biopirin biokaasureaktorin vakaan tilan vuoksi. Toisessa koejaksossa poistetta analysoitiin viikoittain, ja syötteen laatu tarkastettiin ajon alku- ja loppupuolella. Kummankin koejakson aikana syötetyn rejektiveden laatu pysyi oletuksen mukaisesti tasalaatuisena ja soveltuvana biometanointiprosessiin (*Taulukko 1*). Biometanointireaktorin toimivuuden kannalta syötteen tulee sisältää ravinteita, muttei liikaa orgaanista ainesta, omata hyvän puskurikyvyn ja toisaalta sisältää mahdollisimman vähän kiintoainesta. Tämän pohjalta Biopirin biokaasulaitoksen laskeutettu rejektivesi on lähtökohtaisesti soveltuvaa biometanointiin.



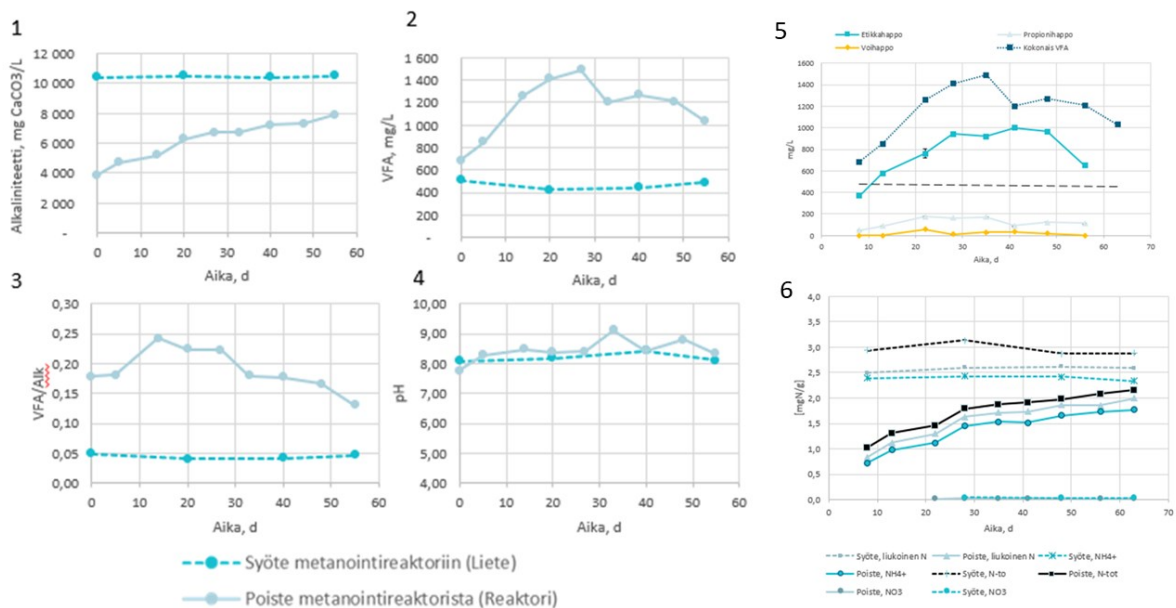
Taulukko 1: Biometanointiprosessiin syötetyn nestejakeen koostumustietoja. Syötettävä nestejake kerättiin Biopirin biokaasulaitoksen separoidusta rejektivedestä konttiin ja syötettiin panostyyppisesti TB- reaktoriin. Oikealla: Alkuaineanalyysitulokset, joissa mukana myös biometanointiprosessista poistetun nestejakeen tulokset.

	Kevät Keskiarvo, n =2		Syksy Keskiarvo, n =4	
	pH	8,5	±0,02	8,2
Alkaliniteetti, mg CaCO ₃ /L	11650	±70,7	10 450	±58
Haihtuvat hapot, mg/L	365	±63,6	465	±42
VFA/ALK	0,03	±0,01	0,04	±0,004
NH ₄ -N, mgN/g	2,76	±0,03	2,39	±0,043
NO ₃ -N, mgN/g	0,04	±0,007	0,04	±0,008
liukoinen N, mgN/g	2,99	±0,06	2,58	±0,058
N-tot, mgN/g	3,38	±0,08	2,96	±0,121
CODtot, g/L	10,99	±3,48	9,92	±1,468
TS, %	1,17	±0,11	1,15	±0,158
VS, %	0,60	±0,10	0,62	±0,101
VS/TS	0,51	±0,04	0,54	±0,032

	Syksy			
	Syöte, mg/L	Poiste (20d), mg/L	Poiste (55 d), mg/L	
Kokonaispitoisuus	Alumiini	9,90	1	1,3
	Fosfori	150	38	43
	Kalium	1300	830	990
	Magnesium	77	37	32
	Natrium	660	490	530
Rauta	58	11	13	
Liukoinen pitoisuus	Alumiini	0,09	0,18	0,076
	Fosfori	23	11	10

	Kevät			
	Syöte, mg/L	Poiste (0 d), mg/L	Poiste (55 d), mg/L	
Kokonaispitoisuus	Alumiini	6,50	3	0,97
	Fosfori	140	100	45
	Kalium	1500	1200	1100
	Magnesium	62	54	19
	Natrium	760	590	540
Rauta	50000	27000	13000	
Liukoinen pitoisuus	Alumiini	58	62	22
	Fosfori	0,056	0,065	0,071

Poiste analysoitiin kerran viikossa ennen syötteen lisäystä. Ensimmäisen koejakson aikana prosessiajossa esiintyi yllä mainittuja ulkoisia häiriöitä sääolosuhteiden vuoksi. Lisäksi ensimmäisessä ajossa näkyy vielä alkuympin vaikutus, joten ensimmäisessä koeajossa ei ehditty saavuttamaan stabiilia koeajoa. Ulkoisista häiriötekijöistä huolimatta, poisteen analyysitulokset eivät kuitenkaan viitanneet selkeisiin sisäisiin prosessihäiriöihin (Kuva 4).



Kuva 4. Ensimmäisen koejakson prosessiseurannan tulokset. Katkoviivalla esitetty syötteen lähtötiedot.

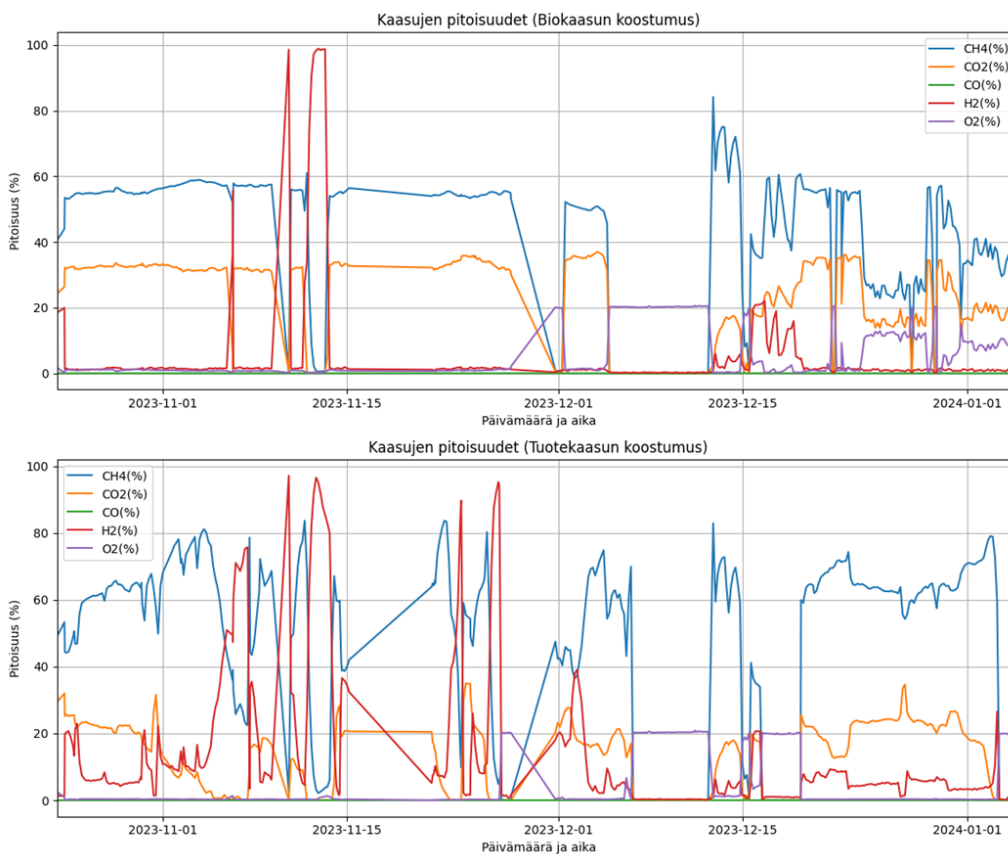
1 = Puskurointikyky esitettyä alkaliteettina [mgCaCO₃/L]. Arvot lähestyvät syötteen CaCO₃/L-pitoisuuksia viitaten, että reaktorin alkuympin ei ole vielä korvautunut kokonaan. 2= Haihtuvat rasvahapot (VFA), kokonaispitoisuus. Korkeat ja vaihtelevat VFA-pitoisuudet indikoivat prosessin epätasapainoa. VFA:t nousevat tasaisesti 35 vrk:n ajan arvoon 1500 mg/L asti, jonka jälkeen havaitaan laskua. Huomioitava prosessissa tapahtuneet ulkoiset häiriöt, jotka vaikuttavat tuloksiin. 3 = VFA/alkaliteetti- suhde kertoo prosessin toimivuudesta, riskistä pH alenemaan. Alle 0,3 suhdeluku on prosessille suotuisa. 4 = pH pysytellyt välillä pH 8–9 koko koejakson ajan. 5 = VFA-yhdisteistä hallitsevin oli etikkahappo. 6 = Tyypipitoisuus lähestyi syötteen pitoisuuksia viitaten, että ympin ei ole vielä korvautunut kokonaan. Tyypestä suurin osa esiintyi liukoisessa ammoniumtyypimuodossa, joka on tyyppillistä biokaasuprosessin läpikäyneelle rejektivedelle.



Kaasuanalyyseihin mukaan koeajanjaksolla saavutettiin hetkellisesti yli 80 %:n metaanipitoisuuksia kosteassa ja ylimääräistä vetyä sisältävässä kaasussa. Jos kaasusta poistetaan vety ja kuivataan vesi, saavutetaan yli 90 %:n metaanipitoisuudet. Ensimmäinen koeajo antoi siis hyviä suuntaa antavia tuloksia systeemin toimivuudesta, ja tulokset tuottivat arvokasta lähtötietoa uudelle koeajojaksolle, jossa hyödynnettiin ensimmäisellä koeajanjaksolla kehitettyä ylösajostrategiaa suotuisimmissa sääolosuhteissa.

Kaasujen pitoisuutta mitattiin Cambridge Sensontec Rapidox 7100 Multigas Analyserilla. Mittari ei tunnista kaikkia kaasuseoksessa mahdollisesti olevia kaasuja, kuten typpeä tai vesihöyryä. Mittarin ominaisuutena on, että se mittaa kokonaisvirtauksen ja ilmoittaa tunnistettujen kaasujen osuuden kokonaisvirtauksessa. Tämän seurauksena tunnistettujen kaasujen prosenttisyököjen summa on yleensä 90–95 %, eli jäljelle jäänyt osuus on oletettavasti vettä ja typpeä. Kaasujen pitoisuudet ovat esitetty mittarista saatavana käsittelemättömänä datana, ellei toisin ole sanottu.

Mittarin datassa näkyy testien epäyhtenäisyys. Kuvaajassa on esitetty Biokaasun koostumus ja reaktorista ulostulevan tuotekaasun koostumus. Näin mitattuna saavutettiin metaanin maksimipitoisuudeksi hieman yli 80 %.

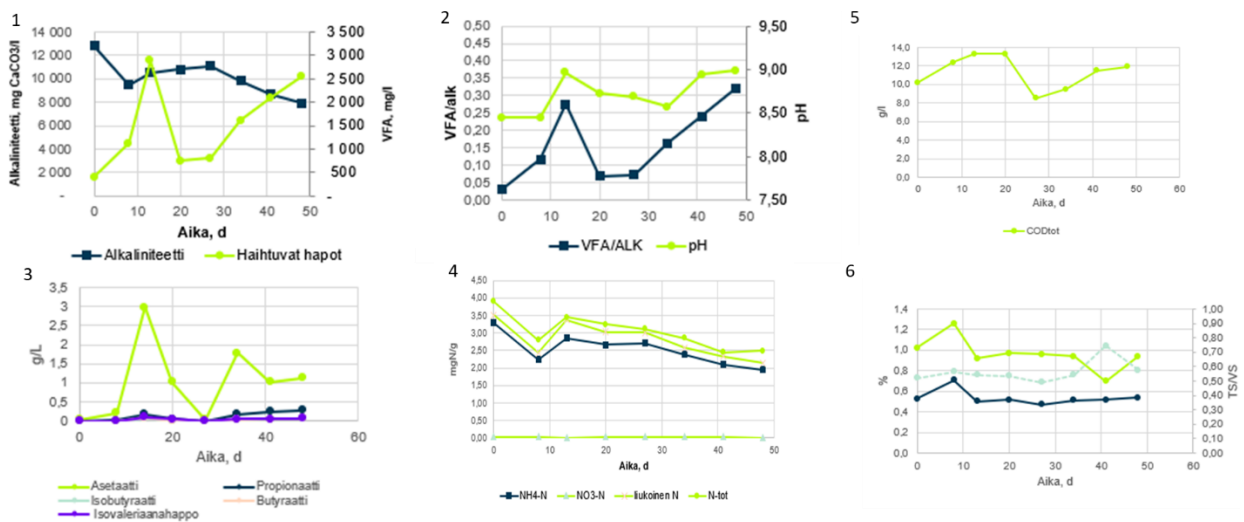


Kuva 5. Biokaasun ja tuotekaasun pitoisuudet (kaikki mitatut komponentit) ensimmäisen koeajon ajalta.

Toisen biometanointikoeajon kemialliset analyysitulokset on koottu kuvaan 6. Koeajon alkuun mennessä ympäri oli kokonaan korvattu TB-reaktorissa ja sen vaikutus tuloksiin oli poistunut. Biometanointiprosessi pysyi suhteellisen stabiilina koeajanjakson aikana. Suurimmat häiriöt johtuivat kahdesta ilmavuodosta reaktoriin, mutta tilanne normalisoitui reaktorissa nopeasti näiden jälkeen kuvastaen hyvää palautumiskykyä reaktorissa. Haihtuvissa rasvahapoissa havaittiin kuitenkin nousua.



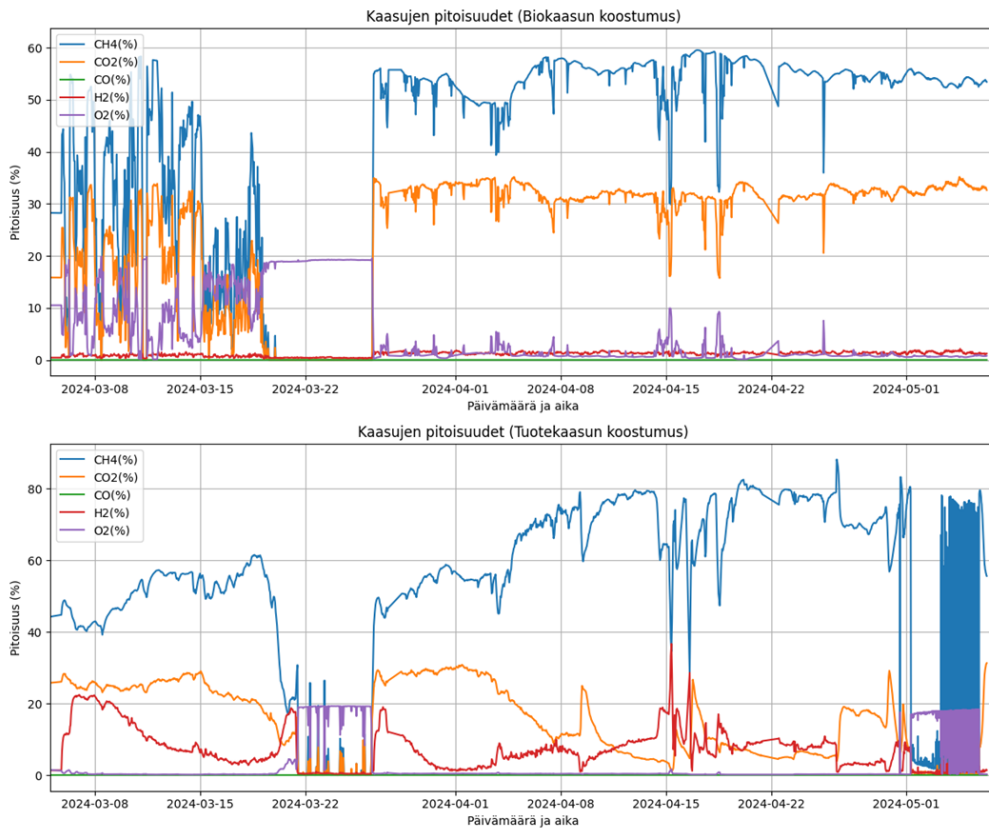
Pääosa haihtuvista rasvahapoista oli asetaattia. Reaktorin puskurointikyky oli koko koeajan jakson ajan laskusuuntainen, mutta edelleen korkealla ja pH asettunut välille pH 8–9. Aiemmissä tutkimuksissa hieman korkeamman pH:n on todettu soveltuvan termofiliseen biometanointiprosessiin ja alkaliset olosuhteet ovat itseasiassa olleet suotuisia hydrogenotrofisille metanogeenille, jotka tuottavat metaania vedystä ja hiilidioksidista (Chen et al., 2021). Asetoklastiset metanogeenit puolestaan hyödyntävät etikkahappoa metaanin tuotossa ja pärjäävät heikommin korkeassa pH:ssa (Chen et al., 2021; Wagner et al., 2014), joka osaltaan selittäisi reaktorissa havaittua nousua etikkahapon osalta (kuva 9). Molempia mikrobeja löytyy niin tyypillisesti perinteisestä biokaasuprosessista kuin biometanointiprosesseistakin. Alkuaineanalyysien pohjalta prosessi kuluttaa syötteen ravinteita ja hivenaineita (Taulukko 1). Optimoituun ravinne- ja hivenainekoostumukseen tarvitaan jatkotutkimusta.



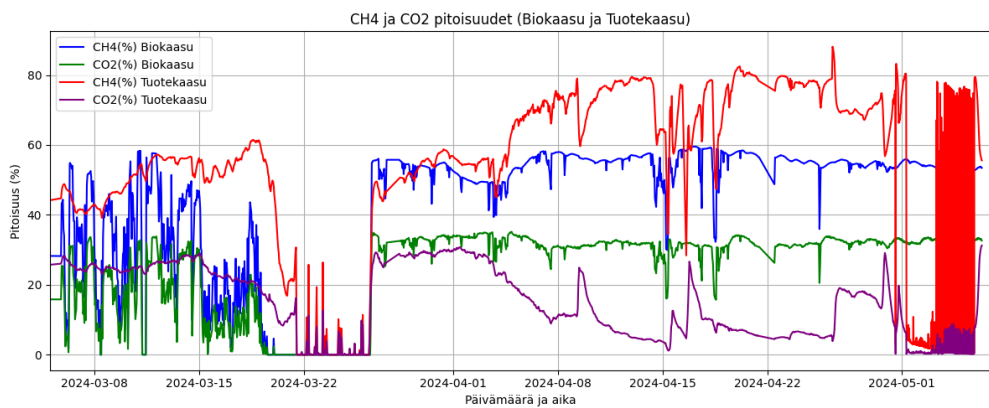
Kuva 6: Biometanoinnin toisen koejakson prosessiseurannan tulokset. 1 = Puskurointikyky esitetynä alkaliteettina CaCO₃/L ja rasvahapot kokonais VFA:na. Puskurointikykyyn lähtötilanne lähellä syötteen pitoisuuksia, n. 12 000 mg CaCO₃ /L, mutta koejakson edetessä nähtävissä alkaliteetin laskua. VFA:t nousevat koejaksolla hieman yli 2500 mg/L. 2 = VFA:n suhde puskurointikykyyn ja pH. VFA/alkaliteetti suhteessa havaittavissa nousua. Suhdeluku kertoo prosessin toimivuudesta, riskistä pH alenemaan. Alle 0,3 suhdeluku on prosessille suotuisa. pH pysytellyt välillä pH 8-9 koko koejakson ajan. 3 = VFA-yhdisteistä hallitsevin oli etikkahappo. 4 = Typeistä suurin osa esiintyi liukoisessa ammoniumtyypimuodossa, joka on tyypillistä biokaasuprosessin läpikäyneelle rejektivedelle Kokonaistypestä n. 90% liukoista. Liukoisesta tyyppistä n. 90% ammoniumtyyppiä. Ammoniumtyyppi tällä koeajaksonjaksonalla tasaantunut tasolle n. 2 mgN/g. 5 = Syötteen kemiallinen hapenkulutus (COD). COD-pitoisuudessa alun nousun jälkeen alenemaa ja tasoittuminen tasolle n. 12 g/L. 6 = Kuiva-aine (TS) ja haihtuvat/orgaaninen aines (VS). Syötteen ja poisteesta alhaiset kuiva-ainepitoisuudet (< 1,3% ja <1%). Noin puolet kuiva-aineesta haihtuvia eli orgaanista, näissä ei suuria muutoksia koejakson aikana.

Toisella koejaksolla mitatut kaasupitoisuustulokset on esitetty kuvissa 7 ja 8. Tämän testijakson tulokset olivat yhtenäisempiä kuin 1. jaksolla. Testeissä oli tauko 21.–26.3. kovien pakkasten aiheuttamien jäätymisongelmien takia. Tauon jälkeen biokaasun koostumuksen mittauspaikkaa vaihdettiin, jonka seurauksena mittausdatasta tuli tasaisempaa. Testien lopussa olleille mittaushäiriölle ja tauolle ei löytynyt selkeää selitystä.

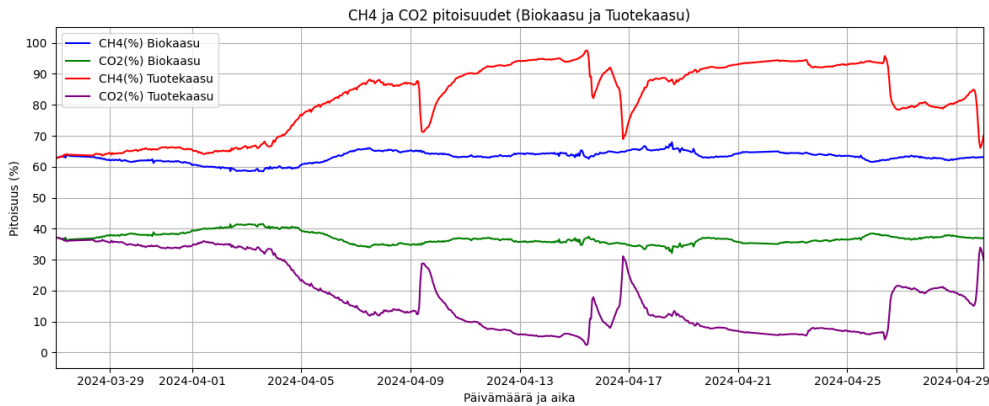
Toisella koejaksolla todettiin CH₄-pitoisuuden nousu ja CO₂-pitoisuuden lasku biokaasulaitoksessa. Kuvaajissa on esitetty kaasupitoisuuksien muutokset biokaasussa ja biometanoinnin jälkeisessä kaasussa. Kuvaajissa olevasta datasta ei ole poistettu vetytuloisuuden vaikutusta, vaan pitoisuudet perustuvat alkuperäiseen mittausdataan, jossa ulostuleva kaasu sisältää reagoimatonta vetyä. Kuvassa 9 on esitetty biokaasun ja tuotekaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet siten, että kaasuseoksista on laskennallisesti poistettu vety, happi ja kosteus. Tällöin metaanipitoisuus on yli 90 %.



Kuva 7. Biokaasun ja tuotekaasun pitoisuudet (kaikki mitatut komponentit) toisen koejakson ajalta.



Kuva 8. Biokaasun ja tuotekaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet toisen koejakson ajalta.



Kuva 9. Biokaasun ja tuotekaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet siten, että kaasuseoksista on laskennallisesti poistettu vety, happi ja kosteus. Tällöin metaanipitoisuus on yli 90 %.

Kaasujen koostumusta tarkasteltiin välillä käsimittarilla. Kuva 10 on esimerkki käsimittarin arvoista. Käsimittarin toimintaperiaate eroaa jatkuvatoimisesta mittarista, sillä se suhteuttaa prosenttiyksiköt vain tunnistettujen kaasujen mukaan. Kuvassa näkyvä metaanipitoisuus on käsimittarin mukaan 90 %, kun taas jatkuvatoimisen mittarin arvot kyseisellä hetkellä ovat CH₄ 76.5 %, CO₂ 4.6 % ja O₂ 0.3 % Käsimittari käytännössä antaa kuivatun, tyyppi ja vety vapaan reaktorista ulostulevan kaasun pitoisuudet.



Kuva 10 Käsimittarin arvot 16.4.2024

Johtopäätökset

Koetoiminnan tulokset osoittivat biokaasulaitokseen integroidun pilottitason biometanointiprosessin teknisen toimivuuden ja soveltuvuuden biokaasun laadun parantamiseen kasvattamalla saatavan biometaanin määrää. Teknologian avulla biometaanin määrää kasvatettiin hyödyntämällä Biopirin biokaasulaitoksen biokaasun hiilidioksidia (CO₂), jonka pitoisuus biokaasussa oli noin 50–55 %. Näin saatiin biokaasun metaanipitoisuus nostettua parhaimmillaan yli 90 %:iin. Tämä edellyttää, että ylimäärävety saadaan poistettua tuotetusta biometaanirikkaasta kaasusta.

Tässä toteutetuilla testijaksoilla saavutettiin biometanoinnissa prosessianalyysitulosten perusteella hyvä biologinen aktiivisuus ja prosessin stabiilius, sekä hallittu prosessin ylösajo. Jatkokehitysvaiheessa suositellaan kuitenkin tarkkailemaan haihtuvien rasvahappojen määrää sekä tutkimaan syötteen ravinne- ja hivenainepitoisuuksien vaikutusta pidemmällä aikavälillä. Prosessiin tarvitaan vetyä, joka tulee tässä käytetyn puhtaan pullovedyn sijasta jatkossa johtaa uusiutuvista lähteistä, kuten puukaasutuksessa saadusta synteesikaasusta, mikä on Wood2Biogas-konseptin perusajatus.



Näiden tulosten pohjalta tarvitaan vielä pidempikestoista prosessiajota ja -tutkimusta jatkuvatoimisen, puun synteesikaasua käyttävän ja tasalaatuista, korkean metaanipitoisuuden omaavaa kaasua tuottavan biometanointiprosessin ja täten Wood2Biogas-prosessikokonaisuuden varmistamiseksi.

Pyrolysointi-kaasutus

Toteutus

Puun pyrolysointi-kaasutustutkimus toteutettiin Xylo Gas Oy:n kehittämällä ja rakentamalla pilotilla Västankvarnin tilalla Inkoossa keväällä 2024. Laitteisto oli polttoaineteholtaan 1 MW, mutta näissä koeajoissa laitteistoa käytettiin syötepuolen rajoituksista johtuen noin puolella teholla, eli polttoaineteholla 0,5 MW. Ensimmäisissä koeajoissa testattiin biohiilen tuottamista erilleen synteesikaasun tuottamisesta, ja seuraavissa koeajoissa toteutettiin integroitu biohiilen ja synteesikaasun tuotanto. Syötteenä käytettiin kuivattua puuhaketta (*kuva 11*).

Synteesikaasusta otettiin kaasupussinäytteitä ja kaasun koostumus määritettiin pääkomponenttien osalta (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , O_2). Biohiilen analysoinnissa keskityttiin ominaisuuksiin, jotka määrittävät hiillelle sopivat sovelluskohteet. Näitä ovat mm. biohiilen stabiilisuus (H/C ja O/C -suhteet) ja PAH-pitoisuudet. Kaasu- ja biohiilinäytteenottojen ja niistä tehtyjen analysointien lisäksi prosessiajosta kerättiin lämpötiladataa ja määritettiin syötetyn puuhakkeen laatua (CHNS/O-analyysi, lämpöarvo) ja määrää, josta voitiin arvioida laitteiston syöttötehoa ja tehdä koko prosessin energiatarkeastelua.



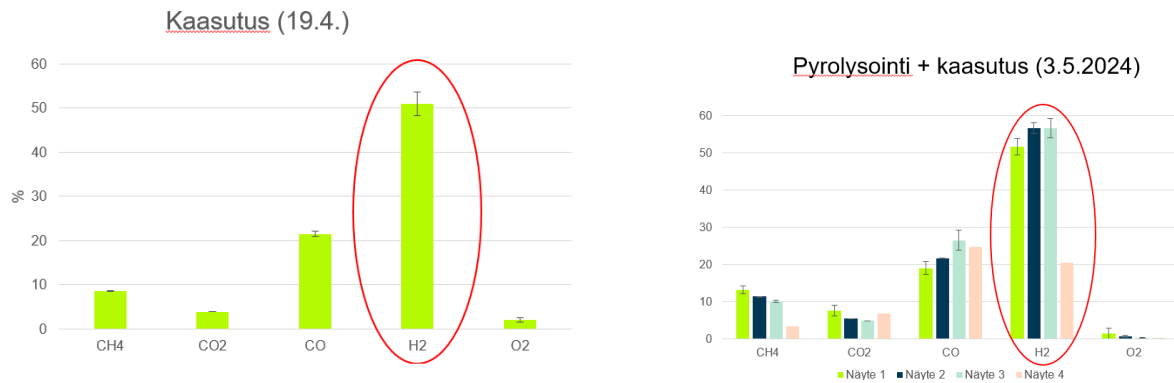
Kuva 11. Pyrolysointi-kaasutusyksikössä käytetty puuhake, muodostunut biohiili, näytteiden keräystä sekä laitteistokontti ajon aikana.

Päätulokset

Ensimmäisessä mitatussa koeajossa (19.4.2024) testattiin kaasutus- ja pyrolysointitekniikkaa erillisinä yksiköinä. Tässä koeajossa syntynyt kaasu koostui 51 % vedystä (H_2) ja 22 % hiilimonoksidista (CO) (*kuva 12*). Lisäksi kaasussa esiintyi pieniä määriä metaania (CH_4), hiilidioksidia (CO_2) ja happea (O_2), joka lienee päässyt mukaan näytteenottovaiheessa. Mittaus tehtiin keräämällä kaasua näytenpusseihin ja analysoimalla näytteet eri paikassa joitakin päiviä myöhemmin. Muodostunut kaasu oli erittäin puhdasta tytetöntä synteesikaasua. Seuraavaan koeajoon teknologiaa oli päivitetty integroimalla pyrolysointiyksikkö kaasutinyksikköön. Tästä

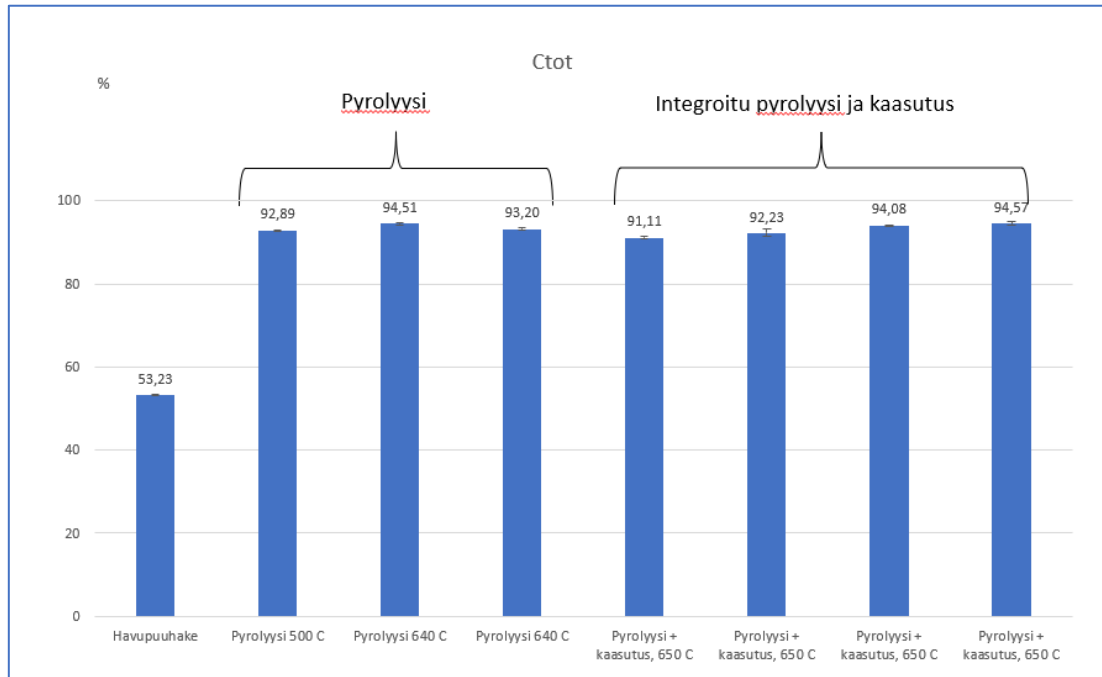


koesarjasta saadun synteetikaasun koostumus mukaili ensimmäistä koesarjaa, mutta vedyn pitoisuus oli hieman korkeampi (51–56 %, *kuva 12*). 3.5 suoritetussa koesarjassa kolme ensimmäistä näytettä kerättiin ajoista ilman ilmasyöttöä. Neljäs näyte kerättiin integroidusta ajosta, jossa kaasuttimeen oli kytketty osailmasyöttö. Ilmasyöttö vaikutti alentavasti vetypitoisuuksien tiputtaen sen osuuden 20 %:iin.

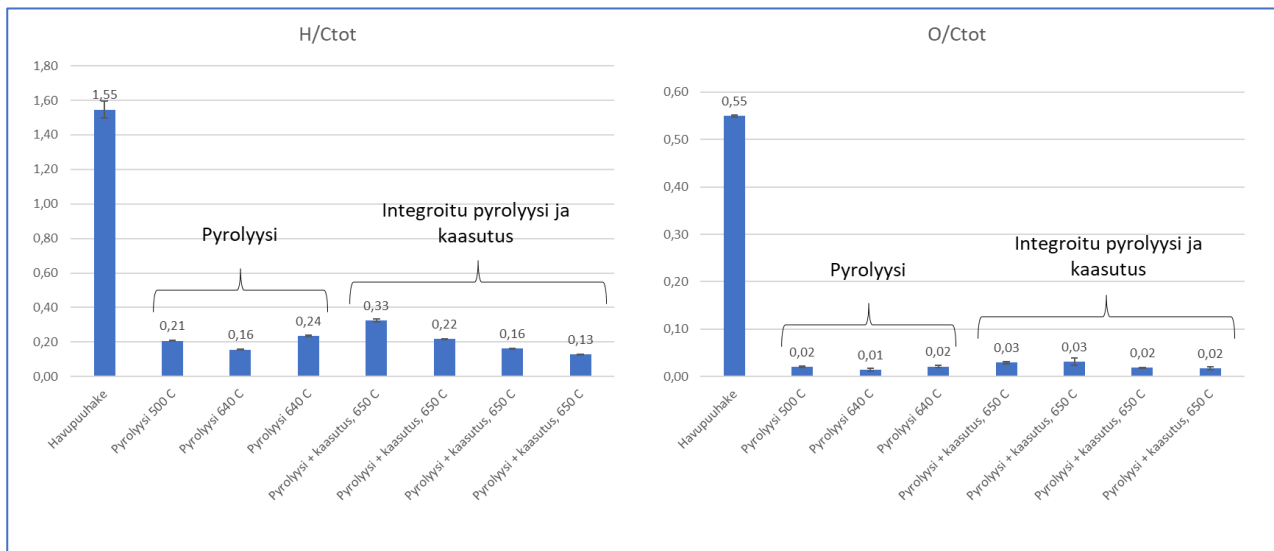


Kuva 12. Vasemmalla puukaasutuksen kaasunkoostumus. Oikealla integroidun puukaasutuksen ja pyrolyysin kaasunkoostumus.

Analysitulosten perusteella tuotettujen biohiilten saanto ja pääkoostumus vastaavat tyypillistä puupohjaista biohiiltä. Syötteenä käytetyn puuhakkeen hiilipitoisuus (C_{tot}) oli noin 50 % (*kuva 13*) ja kuiva-ainepitoisuus 91 %, joka on tyypillinen puuhakkeelle. Pyrolysoinnin jälkeen biohiilen C_{tot} -pitoisuus nousi näytteillä välille 91–95% ja kuiva-ainepitoisuudet 98–100%. Biohiilen O/C_{org} ja H/C_{org} suhteet täyttävät EU lannoitevalmisteasetuksen asettamat raja-arvot tuotteille EBC-FeedPlus (O/C 0.4 ja H/C 0.7) ja EBC-Feed (O/C 0.4 ja H/C 0.4) (*kuva 14*). Myös alkuaineanalyysin pohjalta biohiili täyttää EBC-sertifikaateille määritetyt raja-arvot. EU lainsäädännössä biohiilelle on määritetty polysyklisen aromaattisten hiilivetyjen enimmäismääräksi (Kokonais-PAH) 6 mg/kg. Raja-arvot on määritetty samoiksi kuin muissakin lannoitekäyttöön tarkoitetuissa materiaaleissa, kuten mädätteissä. Pyrolyysissä tuotettu biohiili sisälsi 4 mg/kg kokonais-PAH alittaen raja-arvon. Integroidussa pyrolyysi-kaasutuksessa kokonais-PAH arvot nousivat pitoisuuteen 14 mg/kg. Integroidulla pyrolyysi-kaasutusyksiköllä PAH-pitoisuudet ylittävät määritellyn 6 mg/kg rajan, joten biohiilen käsittely vaatii näiltä osin vielä jatkokehittämistä. Ratkaisuna tähän muutetaan pyrolyysikaasujen kulkua pyrolyysireaktorissa tavalla, joka pienentää valmistuvan hiilen kontaktia pyrolyysikaasujen kanssa. Hankkeen päättymisen jälkeen tätä on myös käytännössä kokeiltu ja todettu toimivaksi. Bonuksena tehty muutos myös antaa lisämahdollisuuksia vaikuttaa prosessin tuottaman synteetikaasun vetysisältöön. Kaasutuksessa testatulla ilmasyötöllä ei ollut merkitystä biohiilen laatuun.



Kuva 13. Havupuuuhakkeen ja siitä tuotetun biohiilen hiilipitoisuus (C_{tot}, % kuiva-aineessa) sekä pyrolyysiprosessin että integroidun pyrolyysi-kaasutusprosessin tapauksessa.



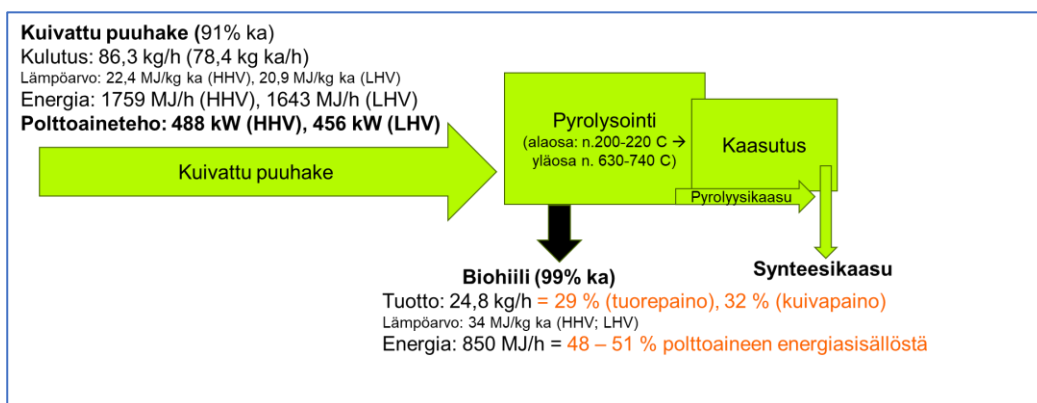
Kuva 14. Havupuuuhakkeen ja siitä tuotetun biohiilen H/C- ja O/C-suhteet sekä pyrolyysiprosessin että integroidun pyrolyysi-kaasutusprosessin tapauksessa.



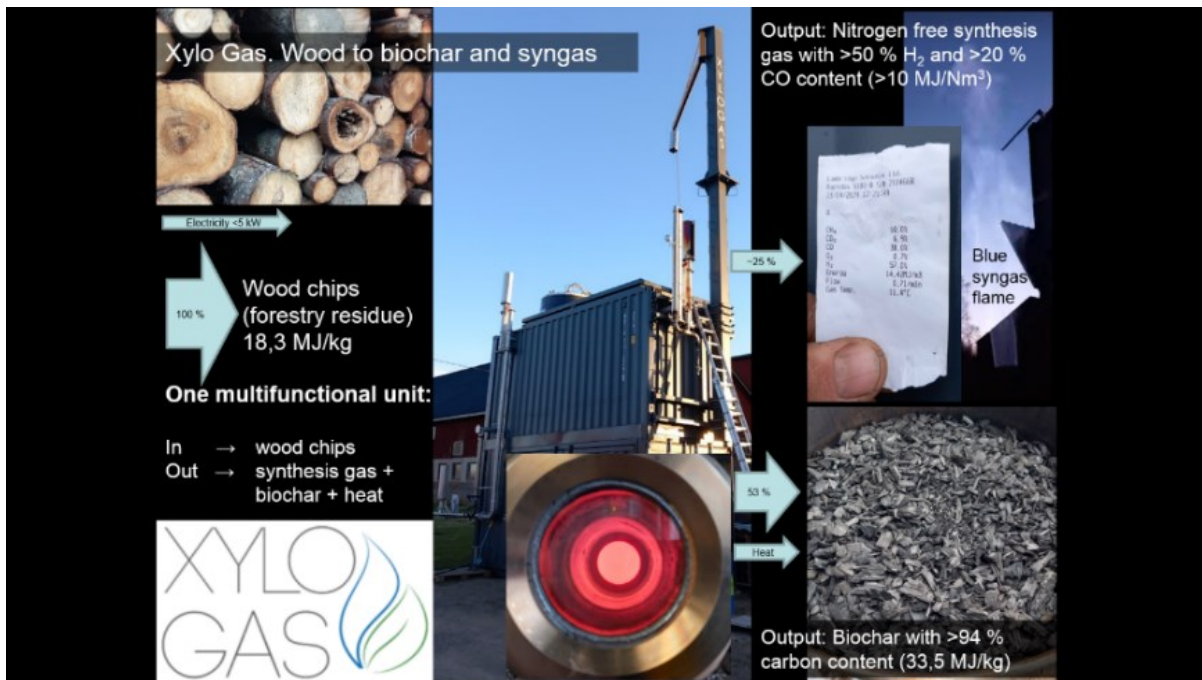
Taulukko 2 Biohiilen PAH-pitoisuudet. Vasemalla pyrolyysillä tuotettu biohiili, oikealla integroitu pyrolyysi-kaasutus biohiili.

PAH			PAH		
Asenafteeni	mg/kg ka	<0,10	Asenafteeni	mg/kg ka	0,12
Asenaftyleeni	mg/kg ka	0,30	Asenaftyleeni	mg/kg ka	0,44
Antraseeni	mg/kg ka	0,33	Antraseeni	mg/kg ka	0,61
Bentso(a)antraseeni	mg/kg ka	0,092	Bentso(a)antraseeni	mg/kg ka	1,3
Bentso(b/j)fluoranteeni	mg/kg ka	0,072	Bentso(b/j)fluoranteeni	mg/kg ka	0,95
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg ka	0,021	Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg ka	0,24
Bentso(a)pyreeni	mg/kg ka	0,074	Bentso(a)pyreeni	mg/kg ka	1,0
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg ka	0,032	Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg ka	0,19
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg ka	<0,01	Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg ka	0,046
Fenantreeni	mg/kg ka	1,2	Fenantreeni	mg/kg ka	1,7
Fluoreeni	mg/kg ka	0,32	Fluoreeni	mg/kg ka	0,26
Fluoranteeni	mg/kg ka	0,47	Fluoranteeni	mg/kg ka	2,8
Kryseeni	mg/kg ka	0,093	Kryseeni	mg/kg ka	1,1
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg ka	0,027	Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg ka	0,21
Naftaleeni	mg/kg ka	0,19	Naftaleeni	mg/kg ka	0,71
Pyreeni	mg/kg ka	0,72	Pyreeni	mg/kg ka	2,8
Summa 16 EPA-PAH (sis. LOQ)	mg/kg ka	4,0	Summa 16 EPA-PAH (sis. LOQ)	mg/kg ka	14

Hakkeen ja biohiilien CHNS/O-tuloksista laskettiin materiaalien lämpöarvoja ja tehtiin prosessin alustavaa energiatarkestelua (kuva 15). Tulosten pohjalta laadittiin koostekuva (kuva 16). Polttoaineen lisäksi prosessi kuluttaa sähköä, mutta vain hyvin vähän. 99 % prosessiin syötettävästä energiasta tulee polttoaineesta, sähkön osuus on alle prosentti. Karkeasti puolet sisään syötettävästä energiasta päätyy biohiileen ja noin neljäsosa synteetikaasuun. Prosessi tuottaa lisäksi jonkin verran hyödynnettävissä olevaa lämpöä. Polttoaineen pitää olla kuivaa, kosteussisältö maksimissaan noin 10 %. Käyttämällä kuivaa polttoainetta tällä ratkaisulla voidaan välttää pyrolyysinesteiden syntyminen. Hakkeen kuivaukseen voidaan hyödyntää prosessin tuottamaa hukkalämpöä. Helpoiten tämä onnistuu järjestelemällä konehuoneen ilmanvaihto kulkemaan prosessiin syötettävän hakkeen kautta.



Kuva 15. Puuhakkeen integroidun pyrolyysi-kaasutusprosessin energiatarkestelua. Laitteistoa ajettiin mittausten aikaan osateholla.



Kuva 16. Koetoinnin tulosten pohjalta laadittu koostokuva Xylo Gas Oy:n pyrolyysi-kaasutusratkaisusta

Johtopäätökset

XyloGas Oy kehitti uudenlaisen ratkaisun puuperäisen massan kaasutukseen. Kaasuanalyysitulosten perusteella yhdistetty pyrolysointi- ja kaasutusyksikkö tuottaa korkealaatuista tytetöntä synteetikaasua, mikä on erittäin lupaava syöte biokaasun biometanointiin. Mitä vähemmän hiiltä ja mitä enemmän vetyä synteetikaasussa on, sen parempi, ajatellen kaasun syöttämistä biokaasun metanointiprosessille. Näissä kokeissa saavutettiin kaksinkertainen määrä vetyä synteetikaasussa suhteessa hiilimonoksidiin. Puun termisessä kaasutuksessa syntyvän synteetikaasun pääkomponentit hiilimonoksidi (CO) ja vety (H₂) ovat yhdisteitä, joita hiilidioksidin (CO₂) kanssa voidaan jalostaa biometaaniksi, mikä on Wood2Biogas -konseptin perusajatus. Näin ollen kaasutuksessa muodostunut synteetikaasu, jonka vetypitoisuus ylitti 50 % on lupaava syöte biometanointiin. Toistaiseksi biometanointia ja pyrolyysi-kaasutinteknologiaa testattiin tässä hankkeessa erillisinä yksiköinä, mutta tulokset synteetikaasun laadusta ja biometanointiprosessin vakaudesta viittaavat siihen, että näissä on potentiaalia liitettäväksi yhdeksi kokonaisprosessiksi.

Lisäarvoa kaasutusyksikköön tuo siihen yhdistetty uudenlainen pyrolyysitekniikka, mikä mahdollistaa biohiilen valmistuksen synteetikaasun tuoton yhteydessä. Integroitu biohiilen valmistus paransi synteetikaasun laatua. Biohiillelle puolestaan on useita eri käyttökohteita riippuen sen laadusta, mm. maanparannusaineena ja kasvualustana, ja ennen kaikkea hiilensidonnan mahdollistajana. Lisäksi puukaasutuksessa syntyvää lämpöenergiaa voidaan hyödyntää kokonaiskonseptin energiatarpeen vähentämiseen esimerkiksi hyödyntämällä sitä biokaasuprosessin lämmitykseen. Puukaasutuksessa syntyvän lämpöenergian määrää pystytään myös säätämään. Biohiiltä tuottava prosessi tuottaa aina jonkin verran lämpöä. Lämmöntuotanto on kuitenkin mahdollista pienentää kasvattamalla synteetikaasun tuotantoa.

Tässä hankkeessa todennettu tervattoman ja hyvin vetyrikkaan synteetikaasun tuottaminen integroituna osana biohiilen tuotantoa on maailmanlaajuisestikin uusi asia.



Xylo Gasin teknologia mahdollistaa energiapuun jalostamisen tavanomaista arvokkaimmiksi tuotteiksi. Yleensä hakkeesta tuotetaan vain lämpöä, joskus lämpöä ja sähköä ja joissakin tapauksissa biohiiltä ja lämpöä. Xylo Gasin integroidulla teknologialla on mahdollista tuottaa puhdasta synteetikaasua lämmöntuotannon kustannuksella. Lämpö on energiaa fysikaalisessa muodossa, ”lämpö karkaa”. Synteetikaasu on energiaa kemiallisessa muodossa. Kaasu voidaan varastoida kaasuvälikameroon tai siirtää putkistoja pitkin ilman häviöitä. Biohiili säilyy myös hyvin. Biohiili ei lahoa, ja sijoitettuna peltoon se lisää peltomaan viljavuutta varastoimalla ravinteita ja vettä viljelykasvien käyttöön. Biohiili on myös oiva aine ravinteiden poistamiseksi vedestä ja se toimii maaperään sijoitettuna hyödyllisenä ja hyvin pitkäkestoisena hiilivarastona. Tuottamalla hakkeesta biohiiltä, synteetikaasua ja lämpöä, päästään tavanomaista merkittävästi korkeampaan jalostusasteeseen. Samasta raaka-aineesta saadaan tuotettua arvokkaampia ja monipuolisemmin hyödynnettäviä tuotteita.