

PERUNASTA POTKUA LIETELANNAN BIOKAASUTUOTANTOON



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Hämeenlinna, Bio- ja elintarviketekniikka

Kevät, 2020

Hanna-Elena Ryyttäri

Bio- ja elintarviketekniikka
Hämeenlinna

Tekijä	Hanna-Elena Ryyttäri	Vuosi 2020
Työn nimi	Perunasta potkua lietelannan biokaasutuotantoon	
Työn ohjaajat	Maritta Kymäläinen ja Laura Kannisto	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää perunankuorisivuvirran soveltuvuutta biokaasutuotantoon lehmän lietelannan lisäsyötteenä. Työn toimeksiantaja oli InforME-hanke.

Esikäsitellyn perunan kysyntä on kasvussa ja tuotannon kasvaessa myös sivuvirtojen määrä kasvaa. Paikoitellen sivuvirtoja syntyy enemmän kuin niitä pystytään hyödyntämään esimerkiksi eläinten rehuna.

Perunankuori on hyvin hiilihydraattipitoinen ja sen C/N-suhde on optimaalisen anaerobihajoamisen kannalta liian korkea. Hiilihydraattipitoinen syöte johtaa helposti myös korkeisiin happopitoisuuksiin ja siten reaktorin liian alhaiseen pH-arvoon. Lietelanta on puolestaan typpipitoinen ja puskurikykyinen syöte, joka sopii hyvin tasapainottamaan perunankuoren biokaasuprosessia.

Opinnäytetyön kokeellisessa osiossa biokaasureaktoreihin syötettiin eri seossuhteilla perunankuorta ja lietelantaa. Koe tehtiin märkäprosessina (TS 12 %) mesofiilisella lämpötila-alueella (37 °C) jatkuvatoimisilla reaktoreilla. Kokeen kesto oli 23 viikkoa. Biokaasuprosessia seurattiin näytteenottojen kautta laboratorioanalyysin ja mittaamalla muodostuvan biokaasun tilavuutta.

Tulosten perusteella perunankuori soveltuu käytettäväksi biokaasuprosessin syötteenä lietelannan kanssa ja parantaa biokaasutuottoa merkittävästi. Tässä työssä prosessi pysyi vielä tasapainossa ja biokaasutuotto sekä metaanipitoisuus hyvänä, kun perunankuoren osuus seoksessa oli enintään 70 %.

Avainsanat Biokaasu, perunankuori, lietelanta

Sivut 28 sivua

Degree Programme in Biotechnology and Food Engineering
Hämeenlinna

Author	Hanna-Elena Ryyttäri	Year 2020
Subject	Boosting manure-based biogas production by adding potato	
Supervisors	Maritta Kymäläinen and Laura Kannisto	

ABSTRACT

The aim of this thesis was to examine the suitability of potato peel waste in manure-based biogas production as an additional infeed. The thesis was commissioned by the InforME project.

In Finland, the demand for the pretreated potato products has increased. Usually, within the increase in production also the amount of the by-products increases. Sometimes, the amount of the side stream generation is higher than can be used as animal feed.

Potato peel contains a lot of carbohydrates and its C/N-ratio is too high for optimal anaerobic digestion. High-carbohydrate infeed can cause high levels of acid and lower pH values of the reactor. Slurry manure has a low C:N-ratio and high alkalinity, and it can be used to balance the biogas process of potato peel.

In the experimental part of the thesis, the biogas reactors were fed with different mixture ratios of potato peel and slurry. The test was made by continuous mesospheric wet digestion (TS 12 %, 37 °C). The duration of the test was 23 weeks. The biogas process was observed by laboratory analyses and by measuring the volume of the biogas formed during the test.

In conclusion, potato peel waste can be used in manure-based biogas production as an infeed, and it increases the biogas yield significantly. The test process was in balance and both the biogas yield and the methane content stayed at good level when the proportion of the potato peel in the mixture was 70 % maximum.

Keywords Biogas, potato peel waste, slurry manure

Pages 28 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	PERUNANKUORIMOT JA NIISSÄ SYNTYVÄT SIVUVIRRAT	2
2.1	Multaliete	3
2.2	Kuori- ja silmumassa	4
2.3	Paloittelu- ja lajittelutähteet	4
2.4	Soluneste ja perunapulppa	4
3	HIILIHYDRAATTIPITOISET SYÖTTEET BIOKAASUTUOTANNOSSA.....	5
4	BIOKAASUPROSESSIN TOIMINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	6
4.1	Orgaaninen kuormitus, OLR	6
4.2	Viipymäaika, HRT	7
4.3	Hiili/typpi-suhde	7
4.4	Lämpötila ja pH	7
4.5	Alkaliteetti ja VFA	7
4.6	Liukoinen COD	8
4.7	Kokonais- ja ammoniumtyppi	8
4.8	Kuiva-aine ja orgaaninen aines	8
5	BIOKAASUREAKTORIKOKEET PERUNANKUORTA SISÄLTÄVILLÄ SYÖTTEILLÄ.....	8
5.1	Syötteet	8
5.2	Koejärjestely	9
5.2.1	Kooreaktorit	9
5.2.2	Reaktorien syöttökuormitus ja viipymä	10
5.3	Biokaasuprosessin prosessiseuranta.....	11
5.3.1	Biokaasutuotanto ja koostumus	11
5.3.2	pH-seuranta	12
5.3.3	Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen kuiva-aine (VS).....	12
5.3.4	Kokonais- ja ammoniumtyppi	13
5.3.5	Alkaliteetti ja VFA	13
5.3.6	Liukoinen COD	14
5.3.7	Kokonaisfosfori	14
6	TULOKSET	14
6.1	pH	15
6.2	Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen aines (VS).....	16
6.3	Ammoniumtyppi	18
6.4	Liukoinen COD	19
6.5	Alkaliteetti ja haihtuvat rasvahapot	20
6.6	Biokaasutuotto ja kaasun koostumus	23
6.7	Kokonaistyyppi ja -fosfori.....	25
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	26
	LÄHTEET	27

1 JOHDANTO

Esikäsitellyn perunan ja juuresten kysyntä on jatkuvassa kasvussa, koska tukkukauppiat ja kuluttajat haluavat ruoanvalmistusta nopeuttavia tuotteita. Tuotannon kasvaessa myös tuotannossa syntyvien sivuvirtojen määrä kasvaa. Paikoitellen sivuvirtoja syntyy enemmän kuin niitä pystytään hyödyntämään esimerkiksi eläinten rehuna ja näiden sivuvirtojen hävittämisessä on omat haasteensa. Tähän ongelmaan mahdollinen ratkaisu voisi olla sivuvirtojen käyttäminen biokaasutuotannossa.

Opinnäytetyö on jatkoa kesän ja syksyn 2017 aikana toteutetulle projektille: Perunan ja lietalannan hyödyntäminen biokaasutuotannossa (Ryyttäri, 2017). Projektissa selvitettiin yleisluontoisesti perunankuorijätteen ja karjan lietalannan hyödynnettävyyttä biokaasutuotannossa Lammi-Hauho-Tuuloksen alueella. Raaka-aineiden biokaasutuottoa tutkittiin Hämeen ammattikorkeakoulun Visamäen yksikön ympäristölaboratoriossa koereaktoreissa. Lisäksi raaka-aineiden metaanituottopotentiaalia tutkittiin panosuonitoisella pullokokeella. Projektin tuloksia on hyödynnetty tämän opinnäytetyön taustatietona.

Tässä työssä tutkittiin kokeellisesti perunankuorimoiden sivuvirtojen hyödyntämistä lietalantapohjaisen biokaasuprosessin lisäyötteenä. Opinnäytetyö tehtiin InforME-hankkeelle (Informaatiomuotoilulla maaseudun uusiutuvan energian mahdollisuudet esille), jonka toteutusaika oli 1.1.2016-31.12.2018. Hankkeen kohderyhmänä olivat uusiutuvasta energiasta ja energiankäytön tehostamisesta kiinnostuneet maatilat ja muut maaseudulla toimivat mikro- ja pienyritykset, kyläyhteisöt ja kunnat. Hankkeen päätoteuttaja oli Lahden ammattikorkeakoulu ja osatoteuttajat olivat Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Hämeen ammattikorkeakoulu, ProAgria Etelä-Suomi ja ProAgria Keskusten Liitto. Hanke oli Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelman rahoittama tiedonvälityshanke.

Opinnäytetyössä pyrittiin saamaan vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Minkälaisia perunasivuvirtoja syntyy Suomen perunankuorimoissa?
- Miten näitä sivuvirtoja hyödynnetään?
- Miten saadaan maksimoitua lietalantaa ja lisäyötteenä perunankuorijätettä hyödyntävän biokaasureaktorin metaanituotto?
- Mikä on suurin mahdollinen perunankuoren määrä, joka voidaan syöttää lietalantapohjaiseen biokaasuprosessiin, jotta se pysyy vielä tasapainossa ja kaasuntuotto hyvänä?

2 PERUNANKUORIMOT JA NIISSÄ SYNTYVÄT SIVUVIRRAT

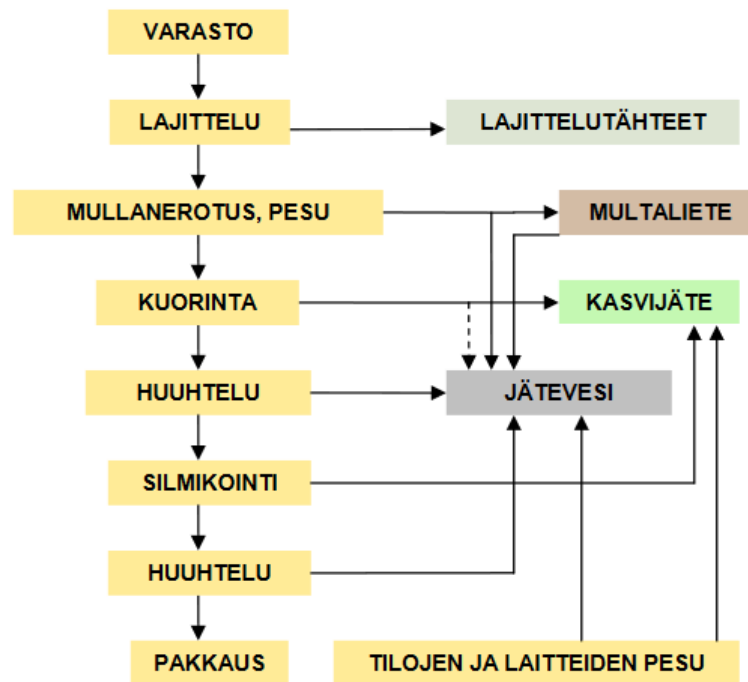
Suomessa arvioidaan olevan 150–200 juureskuorimoa, joissa kuorittavaa raaka-ainetta käsitellään merkittäviä määriä, 500–4 000 kg/kuorintapäivä. Muutamassa suurteollisuuden yksikössä prosessoidaan raaka-aineita yhteensä jopa 100 miljoonaa kiloa vuodessa. Näiden lisäksi toimii ns. tilakuorimoita, joissa kuoritaan pienempiä määriä omalla tilalla viljeltyjä perunoita ja juureksia. (Helsky ym., 2006, ss. 9–24)

Kuoritun kokonaisen perunan lisäksi perunankuorimoissa valmistetaan myös eri tavoin pilkottuja ja raastettuja perunoita (Lehto ym., 2007, s. 3). Kuvassa 1 on vakuumpakattua, kuorittua muusiperunaa ja suikaleperunaa.



Kuva 1. Vakuumpakattua, kuorittua muusiperunaa ja suikaleperunaa (Hultholm 2017).

Kuorimoissa syntyy tyypillisesti sivuvirtoina multalietettä, kuorimassaa, paloittelu- ja lajittelutähteitä, yli- tai alikokoisia tai pilaantuneita perunoita, tärkkelys- ja solunestevettä sekä tärkkelyksen erotuksessa syntyvää puristenestettä. Sivuvirtoja syntyy kuorintatavasta riippuen 30–100 % kuorittavan raaka-aineen määrästä. Kuorintamenetelmä vaikuttaa myös kuorimossa syntyvän jäteveden määrään ja koostumukseen. (Lehto ym., 2007, s. 10; Välimaa, Tuunainen, Siljander-Rasi & Virtanen, 2017, s. 8; Helsky ym., 2006, ss. 24–32) Kuvassa 2 (s. 3) on esitetty kuorintaprosessin vaiheet ja niissä syntyvät sivuvirtajakeet.



Kuva 2. Perunan ja juuresten kuorintaprosessi ja prosessissa muodostuvat sivuvirrat, katkoviiva kuvaa märkäkuorinnasta tulevaa jätevettä (Lehto ym. 2007).

Sivuvirtoja voidaan hyödyntää sellaisenaan eläinten rehuna tai raaka-aineena rehuteollisuudessa, biokaasu- ja etanolintuotannossa, maanparannusaineena, tärkkelystuotannossa, biohajoavan muovin valmistuksessa ja entsyymien tuotannossa. Jos sivuvirtoja ei muutoin saada hyödynnettyä, ne voidaan toimittaa biojätteitä käsittelevälle laitokselle. (Tuomisto & Huitu, 2016, s. 2)

2.1 Multaliete

Ennen varsinaista kuorintaprosessia tehtävässä pesussa syntyy multa- vettä, josta voidaan laskeuttamalla erottaa multalietettä. Lietettä syntyy arvioiden mukaan noin 2 kg/t kuorittavaa perunaa. Multalietteen kivennäisainekoostumus ja ravinnepitoisuus vaihtelevat viljelymaiden ominaisuuksien mukaan. Tavallisesti multaliete levitetään suoraan pelloille, jolloin on huomioitava rikkakasvien siementen, kasvitautilien aiheuttajien ja tuholaisten tuomat ongelmat. Multaliete voidaan myös kompostoida aumakompostissa. Kuorimoissa syntyvän multalietteen määrät ovat yleensä niin vähäisiä, että niistä ei saada merkittäviä määriä ravinteita. (Helsky ym., 2006, ss. 30–36)

2.2 Kuori- ja silmumassa

Kuorintaprosessissa syntyy perunankuorimassaa noin 25–50 % kuorittavan raaka-aineen määrästä kuorimistavasta ja -laitteistosta riippuen. Syksyllä sadonkorjuun jälkeen syntyy vähemmän kuorimassaa kuin keväällä, jolloin pitkä varastointi on heikentänyt raaka-aineen laatua. Perunoista poistetut silmut kootaan yhteen perunankuorimassan kanssa. Perunankuorimassa hyödynnetään ensisijaisesti kotieläinten rehuna tai levitetään suoraan pelloille. Kuorimassaa toimitetaan myös hyödynnettäväksi biojätteen käsitteilylaitoksiin tai kompostoidaan tilalla. (Helsky ym., 2006, ss. 25–36)

Perunankuorimassa sisältää raakavalkuaista 58 grammaa kuiva-ainekiloa kohti ja tärkkelystä 91–226 g/kg (ka). Kuiva-ainepitoisuudessa (TS) on suuria vaihteluja, TS-pitoisuus on välillä 8,5–25,7 %. (Välimaa ym., 2017, s. 8) HAMKissa kesällä 2017 tutkitun perunankuorimassan kuiva-ainepitoisuus oli 20–21 % ja orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta 89–91 % (Ryyttäri, 2017, s. 4).

2.3 Paloittelu- ja lajittelutähteet

Perunoiden viipaloinnista, suikaloinnista, muotoilusta ja muusta paloittelusta syntyy paloittelutähteitä. Lajittelutähteitä ovat yli- ja alikokoiset, pilaantuneet ja epämuotoiset perunat. Näiden sivuvirtojen määrä vaihtelee valmistettavan tuotteen ja vuodenajan mukaan. Paloittelu- ja lajittelutähteet voidaan hyödyntää muiden tuotteiden valmistuksessa tai käyttää rehuna. Lajittelutähteiden hyödynnettävyyteen vaikuttaa se, tehdäänkö perunoiden lajittelu ennen vai jälkeen niiden pesun. Tähteiden sisältämä multa vähentää niiden rehukäyttömahdollisuuksia. Pahasti kasvitautien piilamia perunoita ei voida hyödyntää rehuna. (Helsky ym., 2006, ss. 30–32)

2.4 Soluneste ja perunapulppa

Kuorimaprozessissa, erityisesti hiontakuorinnassa, ja perunatärkkelyksen valmistuksessa syntyy solunestettä. Solunesteen kuiva-ainepitoisuus on 23,5 % ja se sisältää valtaosan perunan liukoisesta proteiinista. Tärkkelyksen valmistuksessa syntyy myös perunakuitua eli perunapulppaa. Solunestettä ja perunapulppaa voidaan hyödyntää rehuna tai maanparannusaineena. (Ahokas ym., 2012, ss. 8–9; Helsky ym., 2006, s. 33; Tuomisto & Huitu, 2016, s. 3; Välimaa ym., 2017, s. 9)

3 HIILIHYDRAATTIPITOISET SYÖTTEET BIOKAASUTUOTANNOSSA

Runsaasti hiilihydraatteja sisältäviä syötteitä, kuten perunaa, käytetään biokaasutuotannossa muiden syötteiden lisänä. Esimerkiksi Jepuan Bio-kaasu Oy:n biokaasulaitoksessa perunateollisuuden sivuvirtoja käytetään prosessin syötteenä luonnonvaraelinkeinojen sivutuotteiden, kuten sikalietteen, turkistalouden sonnan ja nahkateollisuuden karvontajätteen sekä viherbiomassojen lisäksi. (Koivisto, 2016)

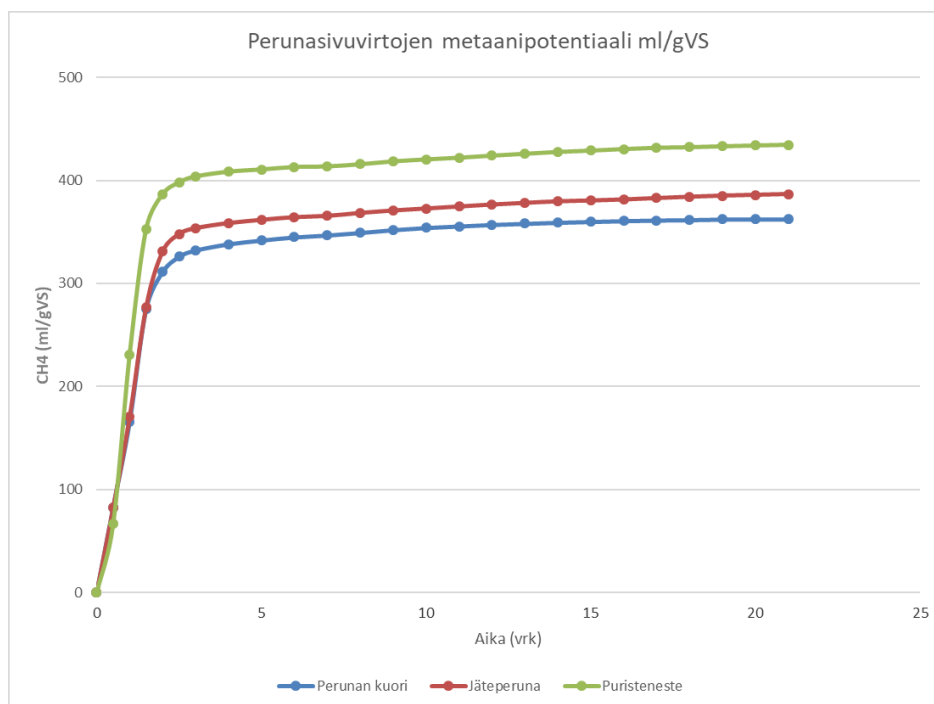
Perunankuorimoiden sivuvirroista voidaan tuottaa biokaasua anaerobisessa biokaasuprosessissa. Perunasta syntyvä biokaasu sisältää keskimäärin n. 60 % metaania ja n. 40 % hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita kaasuja. (Ahokas ym., 2012, s. 13) Perunankuoren metaanituottopotentiaali mitattiin HAMKin kokeissa n. 360 ml/gVS (Ryyttäri, 2017, s. 5). Taulukossa 1 on esitetty perunankuoren lisäksi myös jäteperunan ja tärkkelyksen erotuksessa syntyvän puristenesteen metaanituottopotentiaalit tuorepainoa, kuiva-ainetta ja orgaanista ainesta kohti laskettuna. Kokeet tehtiin osana InforME-hanketta HAMKin laboratoriossa.

Taulukko 1. Erään perunankuorimon sivuvirtojen metaanituottopotentiaaleja (Ryyttäri 2017)

Näyte	Metaanituotto ml/g näytettä	Metaanituotto ml/gTS	Metaanituotto ml/gVS
Perunankuori	60	330	360
Peruna	70	370	390
Puristeneste	90(*)	430	450

(*) Puristenesteen tuotto märkää näytettä kohti on todellista suurempi, sillä testiin käytetty näyte oli oletettavasti kuivempaa kuin normaalisti

Kuvassa 3 (s. 6) on esitetty perunankuoren, jäteperunan ja puristenesteen metaanituottopotentiaalit orgaanista ainesta kohti laskettuna. Perunasivuvirtojen hajoaminen oli nopeaa ja tapahtui jo n. 2 vrk:ssa. Perunajättestä parhaiten metaania tuotti puristeneste 450 ml/gVS. Perunankuoren ja jäteperunan tuotot olivat pienempiä, kuorella 360 ml/gVS ja perunalla 390 ml/gVS. Vastaavasti puhtaan tärkkelyksen laskennallinen metaanituotto on 415 ml/gVS (Kymäläinen, 2015a, s. 29).



Kuva 3. Perunankuoren, jäteperunan ja puristenesteen metaanituotto-potentiaalit orgaanista ainesta kohti (Ryyttäri 2017).

Biokaasuprosessissa syntyvä ravinnepitoinen mädätysjäännös voidaan jalostaa lannoitevalmisteeksi, mikäli se hygienisoidaan. Hygienisointi estää kasvitautoja aiheuttavien mikrobien sekä rikkakasvien siementen leviämistä pelloille. (Luostarinen, 2015, s. 90)

4 BIOKAASUPROSESSIN TOIMINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Biokaasuprosessin tehokkuuteen ja stabiiliuteen vaikuttavat useat eri tekijät, mm. orgaaninen kuormitus (OLR), viipymäaika (HRT), hiili/typpi-suhde, lämpötila, pH, alkaliteetti ja VFA, liukoinen COD, kokonais- ja ammoniumtyppi, kuiva-aine ja orgaaninen aines.

4.1 Orgaaninen kuormitus, OLR

Orgaaninen kuormitus (OLR, Organic Loading Rate) tarkoittaa prosessiin syötettyä orgaanisen aineen määrää reaktorin nestetilavuutta kohti vuorokaudessa ($\text{kgVS}/\text{m}^3\text{d}$). Sopiva kuormitustaso suunnitellaan tapauskohtaisesti mm. käytettävien syötteiden koostumuksen ja olosuhteiden mukaan. OLR on suomalaisissa lantaa käyttävissä reaktoreissa tyyppillisesti välillä 2–3 $\text{kgVS}/\text{m}^3\text{d}$ ja isommissa yhteiskäsittelylaitoksissa välillä 4–5 $\text{kgVS}/\text{m}^3\text{d}$. (Kymäläinen, 2015b, s. 73)

4.2 Viipymäaika, HRT

Prosessin viipymäaika (HRT, Hydraulic Retention Time) tarkoittaa aikaa, jonka syötemateriaali viettää prosessissa. Optimaaliseen viipymäaikaan vaikuttavat prosessin olosuhteet, mm. kuiva-aineen ja orgaanisen aineksen määrä, prosessin lämpötila ja reaktorin tilavuus. Suomessa biokaasulaitoksilla viipymäaika on tyypillisesti 12–30 vuorokautta. Mesofiilisen prosessin suositeltu viipymä on 21 vuorokautta. Viipymäaika vaikuttaa myös haitallisten mikrobien tuhoutumiseen. (Virta, 2011, s. 17)

4.3 Hiili/typpi-suhde

Biokaasureaktorin syötteen on sisällettävä oikeassa suhteessa ravinteita, kuten hiiltä, typpeä, fosforia ja rikkiä. Optimaalinen hiilen ja typen suhde (C/N ratio) on välillä 15–25:1. Runsaasti hiilihydraattia eli hiiltä sisältävät syötteen muodostavat happokäymisen aikana enemmän välituotteita kuin niitä ehtii prosessin edetessä kulua. Tämä lisää prosessin haponmuodostusta, joka voi laskea reaktorin pH-arvoa ja inhiboida koko prosessia. (Lucas, 2014, s. 13; Kymäläinen, 2015a, s. 26) Kts. myös luku 4.7. (s. 8).

4.4 Lämpötila ja pH

Mesofiilisessa biokaasuprosessissa reaktorin lämpötila on välillä 35–43 °C, joten sopiva lämpötila-alue on melko laaja. Tärkeintä on pitää reaktorin lämpötila tasaisena, koska metaania tuottavat metanogeenit ovat herkkiä lämpötilan vaihtelulle. Sopiva vaihteluväli on +/- 0,5 ja maksimissaan lämpötilan vaihtelu voi olla +/- 2 °C. (Kymäläinen, 2015b, s. 64) Suurin osa biokaasuprosessin mikrobeista toimii parhaiten pH:n ollessa lähellä neutraalia, välillä 7–8. Liian alhainen pH-arvo vaikeuttaa metanogeenien toimintaa ja siten heikentää prosessin metaanituottoa. Prosessin pH:n lasku johtuu haihtuvien rasvahappojen eli VFA:n (Volatile Fatty Acids) pitoisuuden kasvamisesta. (Virta, 2011, s. 12)

4.5 Alkaliteetti ja VFA

Prosessin alkaliteettiarvo kertoo reaktorin puskurikapasiteetista eli kyvystä vastustaa pH:n muutoksia. Tyypillisesti biokaasulaitoksissa arvo on välillä 2 000–13 000 mgCaCO₃/l. Hajoamisprosessissa muodostuu haihtuvia rasvahappoja (VFA, Volatile Fatty Acids), joiden pitoisuus on normaaliolosuhteissa 8–300 mmol/l. Jos happoja kertyy liikaa, eikä reaktorisäällön puskurikyky riitä neutraloimaan niitä, pH laskee. VFA:n liiallinen muodostuminen johtuu usein liian suuresta orgaanisesta kuormituksesta. Prosessin toimivuutta kuvaa parhaiten VFA- ja alkaliteettiarvojen suhde, toimivassa prosessissa suhde on alle 0,3. Suhdeluvusta voidaan päätellä prosessin epätasapaino jo ennen kuin reaktorin pH-arvossa tai kaasuntuotossa on tapahtunut muutoksia. (Kymäläinen, 2015b, s. 66; Virta, 2011, s. 14)

4.6 Liukoinen COD

Liukoinen kemiallinen hapenkulutus eli COD (Chemical Oxygen Demand) kuvaa kaikkea liuenneessa muodossa olevaa orgaanista ainesta. Mukaan lasketaan mm. kaikki VFA-yhdisteet, joten COD- ja VFA-arvot ovat riippuvaisia toisistaan. (Kymäläinen, 2015b, s. 76)

4.7 Kokonais- ja ammoniumtyppi

Biokaasuprosessissa suurin osa syötteiden tyypestä muuttuu liukoiseen muotoon eli ammoniumtyypeksi (NH_4^+). Jos syötteen sisältävät runsaasti typpiä, ammoniakkin (NH_3) pitoisuus voi nousta prosessia inhihoivalle tasolle. Ammoniakin pitoisuuteen vaikuttavat prosessin lämpötila ja pH, mitä korkeammat ne ovat, sitä suurempi osuus ammoniumtyypestä on ammoniakkia. (Rönkkö & Hyvönen, 2011, s. 15)

4.8 Kuiva-aine ja orgaaninen aines

Kuiva-aine (TS, total solids) koostuu orgaanisesta (VS, volatile solids) ja epäorgaanisesta aineksestä eli tuhkasta. Biokaasu muodostuu syötteen orgaanisen aineksen hajotessa mikrobitoiminnan seurauksena. Biokaasutuoannon järkevyyteen vaikuttaa syötteen VS/TS-suhde, mitä suurempi suhdeluku on ja mitä helpommin hajoavaa orgaaninen aines on, sitä sopivampi syöte on biokaasuprosessiin. Poisteseen jää biokaasuprosessissa hajoamatonta orgaanista ainesta ja tuhkaa. (Kymäläinen, 2015a, ss. 23–24)

5 BIKAASUREAKTORIKOKEET PERUNANKUORTA SISÄLTÄVILLÄ SYÖTTEILLÄ

Opinnäytetyön kokeellinen osio suoritettiin koereaktoreissa HAMKin Viisamäen yksikön ympäristötekniikan laboratoriossa lokakuusta 2017 huhtikuuhun 2018.

5.1 Syötteen

Koereaktorien syötteenä käytettiin seosta, jossa oli perunankuorimon sivuvirtana syntyvää perunankuorta ja lihakarjatilalla syntyvää lietelantaa. Perunankuori ja lietelanta säilytettiin pakastettuina ja niitä sulatettiin kylmiössä muutaman päivän syöttötarvetta vastaava määrä kerralla. Syöteseoksia laimennettiin vesijohtovedellä 12 %:n kuiva-ainepitoisuuden saavuttamiseksi.

Perunankuorimassa oli koostumukseltaan hyvin nestemäistä ja herkästi vaahtoutuvaa. Lietelannan joukossa oli vähäisiä määriä kuivikkeita, sulamattomia kasvin osia ja siemeniä. Taulukossa 2 (s. 9) on esitetty syötteistä

analysoidut TS ja VS, kokonaishiili, -typpi ja -fosfori kuiva-ainetta kohti sekä hiili/typpi-suhde. Analyysit on tehty ulkopuolisessa laboratoriossa, lukuunottamatta perunankuoren TS-pitoisuutta (*), joka on analysoitu HAMKissa.

Taulukko 2. Syötteistä analysoidut kuiva-aine, VS/TS-suhde, kokonaishiili, -typpi ja -fosfori sekä hiili/typpi-suhde

Syöte	TS %	VS/TS %	C-tot kuiva-aineessa %	N-tot kuiva-aineessa g/kg	P-tot kuiva-aineessa g/kg	C/N ratio
Perunan-kuori	21,0 (*)	87,7	44	8,0	1,3	55
Lietelanta	14,5	80,0	40	32,0	6,2	13

(*) Analysoitu HAMKin laboratoriossa

5.2 Koejärjestely

Koe tehtiin jatkuvatoimisena märkäprosessina, jossa syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %. Jatkuvatoimisessa prosessissa biokaasureaktoriin syötetään säännöllisesti uutta käsiteltävää materiaalia ja jokaisen syötön yhteydessä reaktorista poistetaan vastaava määrä käsiteltyä materiaalia.

5.2.1 Kooreaktorit

Kooreaktoreina käytettiin kolmea nestetilavuudeltaan 3,5 litran vesivaipallista lasireaktoria, jotka nimettiin kirjaintunnuksin F, G ja H (kuva 4 s. 10). Reaktorien sisälämpötila pidettiin vesivaippakierrolla n. 37 °C:ssa. Prosessissa syntynyt biokaasu johdettiin kaasulinjaa pitkin kaasukennostoon, joka mittasi biokaasun määrää. Reaktoreihin kytkettiin ajastimella toimivat sekoittajat, jotka olivat käynnissä viiden minuutin ajan kerran kahdessa tunnissa. Reaktorit varustettiin paineentasauspusseilla, joihin kaasun kulku ohjattiin syöttöjen yhteydessä estämään reaktorien sisällön kulkeutumisen pääkaasulinjaan.



Kuva 4. Biokaasureaktorit F, G ja H kokeen aloitushetkellä.

5.2.2 Reaktorien syöttökuormitus ja viipymä

Reaktorit ympättiin toimivan biokaasureaktorin poisteella, jonka jälkeen niihin syötettiin kolme viikkoa pelkkää lietelantaa eli ns. lähtökuormaa. Tarkoituksena oli varmistaa reaktorien yhtenäinen toiminta ja tiiviys. Laskennallinen lähtökuormitus oli kaikissa reaktoreissa $2,5 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ ja viipymäaika 53 vuorokautta. Koska reaktoreja syötettiin vain arkipäivisin, todellinen kuormitus laskettiin jakamalla viikoittainen kokonaiskuorma seitsemälle päivälle, jolloin todellinen kuormitus oli pienempi. Todellinen lähtökuormitus oli $1,79 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$. Jäljempänä tekstissä todellinen kuormitus ilmoitetaan sulkeiden sisällä. Taulukossa 3 (s. 11) esitetään reaktorien syöteseosten ja kuormitusten vaihtelut viikkokohtaisesti.

Ylösajon jälkeen F-reaktorin syöttöä jatkettiin pelkällä lietelannalla, G-reaktoriin alettiin syöttää lietelanta-perunankuori-seosta ja H-reaktoriin perunankuorta kuormituksella $2 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ ($1,43 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$). F- ja G-reaktoreissa seossuhteita muutettiin 10–20 prosenttiyksikön muutoksilla n. 3–4 viikon välein reaktorien arvojen tasaannuttua. H-reaktorissa syötteenä oli ylösajon jälkeen koko koejakson ajan pelkkä perunankuori. Viikolla 4 F:n ja H:n kuormitus nostettiin tasolle $2,5 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ ($1,79 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$) ja G:n kuormitus nostettiin tasolle $3,5 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$ ($2,5 \text{ kgVS/m}^3\text{d}$). G-reaktorin syöttö aloitettiin perunavoittoisella seoksella, jossa perunan osuus oli 80 % ja lietelannan 20 %, mutta seossuhteet muutettiin viikolla 4 päinvastaisiksi prosessin epävakauden takia.

Taulukon 3 (s. 11) lukemissa ensimmäisenä on merkitty lietelannan ja jälkimmäisenä perunankuoren suhteellinen määrä painoprosentteina syöteseoksissa; esim. viikoilla 4–6 F-reaktorin syöteseoksessa oli 80 %

lietelantaa ja 20 % perunankuorta. Viikko 0 on hetki, jolloin reaktorit eriytettiin yhtenäisen lähtökuorman jälkeen ja syöteseosten syöttäminen aloitettiin.

Taulukko 3. Reaktorien viikkokohtaiset kuormitukset ja syöteseosten seossuhteet painoprosentteina

F	100/0	80/20	80/20	70/30	50/50	30/70	10/90	30/70															
	2 kgVS			2,5 kgVS																			
G	20/80	80/20	70/30	50/50	30/70	10/90																	
	2 kgVS			3,5 kgVS																			
H	0/100	0/100																					
	2 kgVS			2,5 kgVS																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Viikot																							

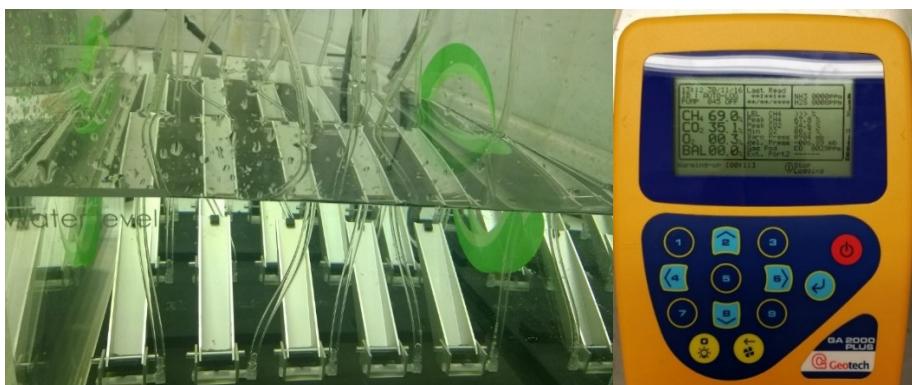
5.3 Biokaasuprosessin prosessiseuranta

Reaktorien poisteista analysoitiin kerran viikossa TS- ja VS-pitoisuudet, pH, alkaliteetti, haihtuvat rasvahapot (VFA), liukoinen COD ja ammoniumtyppi. Lisäksi poisteista analysoitiin kokonaistyyppi, -fosfori ja -hiili ulkopuolisessa laboratoriossa.

5.3.1 Biokaasutuotanto ja koostumus

Koereaktorien tuottaman biokaasun määrää mitattiin kuvassa 5 (s. 12) esitetyn kaasukennoston avulla. Biokaasu kerääntyy kennon alle ja nostaa kennon, kennon nousut rekisteröityvät automaattisesti tietokoneelle. Koereaktorien kaasuntuottolukemat kirjattiin ylös ennen jokaista syöttöä.

Biokaasun koostumusta analysoitiin kokeen aikana kaasupusseihin vuorokauden ajan kerätystä kaasusta kaasuanalysointorilla Geotech GA 2000 PLUS (kuva 5 s. 12). Koostumusmittaukset tehtiin F- ja G-reaktorien kaasusta viikolla 11 ja H-reaktorin kaasusta viikoilla 6 ja 11.



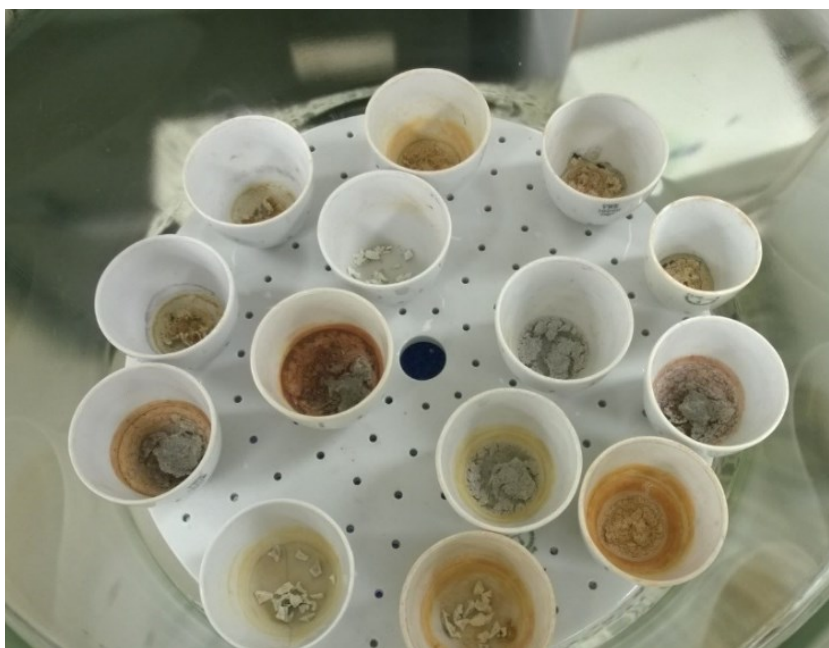
Kuva 5. Bioprocess Control AMPTS I -kaasunmittauskennosto ja kaasuanalysaattori Geotech GA 2000 PLUS.

5.3.2 pH-seuranta

Reaktoripoisteiden pH-arvoja mitattiin noin kerran viikossa pH-mittarilla HANNA instruments HI 3512, mittauksissa lämpötila vakioitiin huoneenlämpöön.

5.3.3 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen kuiva-aine (VS)

TS- ja VS-pitoisuudet määritettiin haihdutus/hehkutus-menetelmällä standardin SFS-3008 mukaisesti. Kuvassa 6 on hehkutettuja näytteitä upokkaissa.



Kuva 6. TS- ja VS-pitoisuuden määrittäminen haihdutus/hehkutus-menetelmällä.

5.3.4 Kokonais- ja ammoniumtyppi

Poisteiden ammoniumtyppipitoisuudet määritettiin Kjeltec-analysaattorilla Kjedahl-menetelmällä (kuva 7) ja kokonaistyyppi ulkopuolisessa laboratoriossa.



Kuva 7. Poisteiden ammoniumtyppipitoisuuden mittaus Kjeltec-analysaattorilla.

5.3.5 Alkaliteetti ja VFA

Alkaliteetti ja haihtuvien rasvahappojen määrä (VFA) määritettiin titraamalla TitraLab 840 -laitteistolla (kuva 8).



Kuva 8. TitraLab 840 -titrauslaitteisto.

5.3.6 Liukoinen COD

Poisteiden liukoinen COD määritettiin sentrifugoidusta ja 0,2 µm suodatetusta näytteestä Hach Lange -pikamenetelmällä (kuva 9).



Kuva 9. COD-analyysin näyteputket.

5.3.7 Kokonaisfosfori

Poisteista määritettiin ulkopuolisessa laboratoriossa kokonaisfosfori standardin SFS-EN 13650 mukaisesti.

6 TULOKSET

Tuloksissa vertaillaan eri syöteseoksilla syötettyjen kooreaktorien biokaasutuottoa ja kaasun koostumusta sekä prosessin tilaa poisteanalyysitulosten avulla.

Kokeen aikana pelkällä perunankuorella syötetyn H-reaktorin tulosten tulkitsemisessa on huomioitava ennen syöteseosten aloittamista lisätyn ympin ja lähtökuorman vaikutus reaktorin sisällön koostumukseen sekä analyysien tuloksiin. Kuvassa 10 (s. 15) on esitetty ympin ja lähtökuorman vaikutuksen väheneminen kokeen aikana. Pelkällä perunankuorella syötetyn H-reaktorin ympin ja lähtökuorman osuus reaktorin sisällöstä oli 65 % viikolla 5, 35 % viikolla 10, 19 % viikolla 15 ja 10 % viikolla 20.

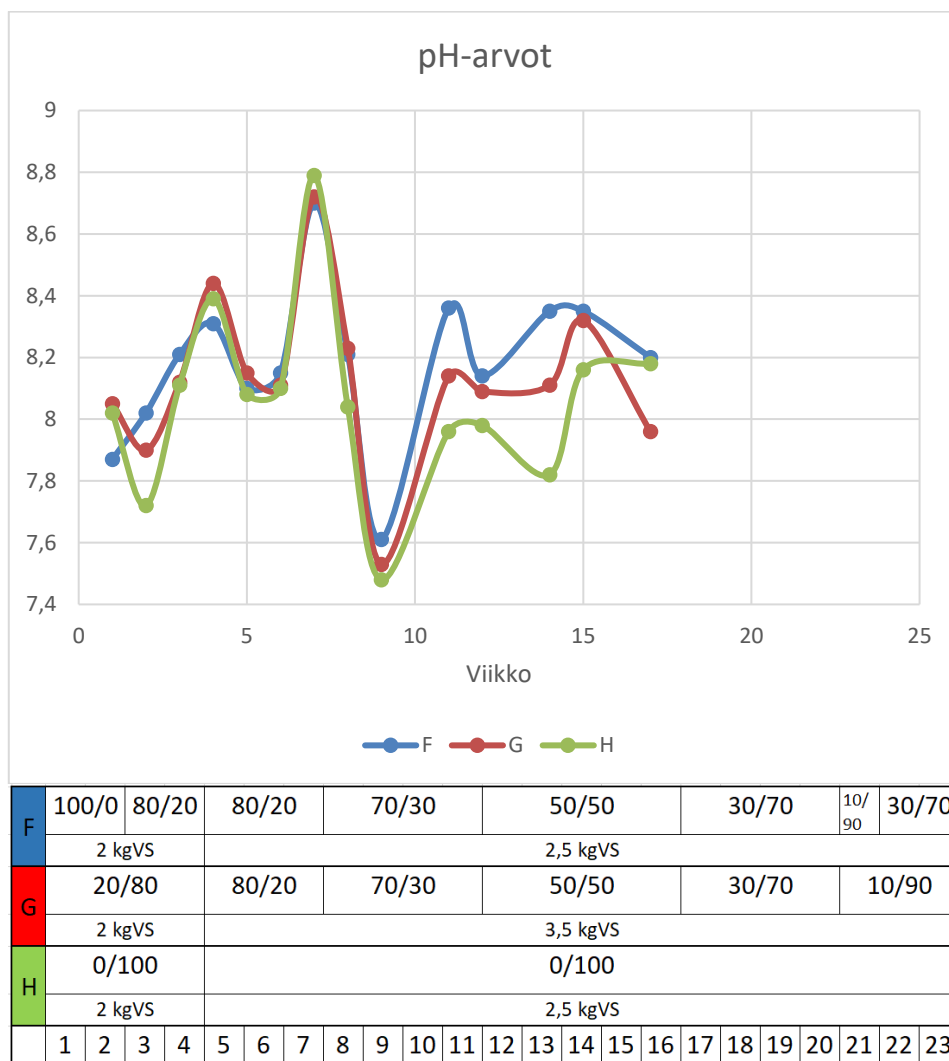


Kuva 10. H-reaktorin ympin ja lähtökuorman vaikutuksen väheneminen kokeen aikana.

Biokaasureaktoriin kaasuntuottoa, reaktorilämpötilaa ja pinnankorkeutta seurattiin päivittäin. Tarkempaa prosessiseurantaa tehtiin näytteenottojen ja näytteistä tehtyjen laboratorioanalyysien avulla. Tässä luvussa esitetään kokeen aikana tehtyjen mittausten ja analyysien tulokset.

6.1 pH

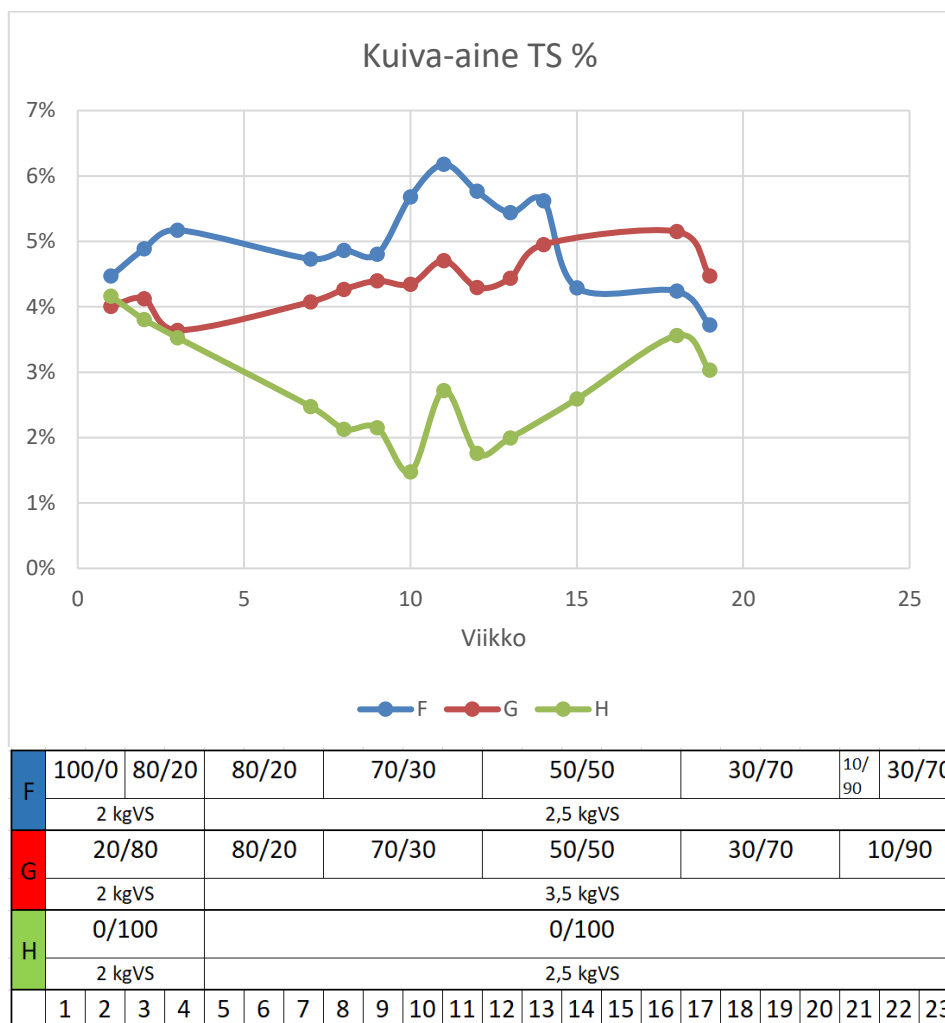
Reaktoriin pH-arvot pysyivät tasaisina koko kokeen ajan. F-reaktorin poisteen pH-arvo oli välillä 7,9–8,4, G-reaktorin poisteen pH-arvo 7,5–8,7 ja H-reaktorin poisteen pH-arvo 7,5–8,8. pH-mittaustulokset on esitetty kuvassa 11 (s. 16).



Kuva 11. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden pH-mittaustulokset sekä syöteseosten seossuh-
teiden muutokset koejakson aikana.

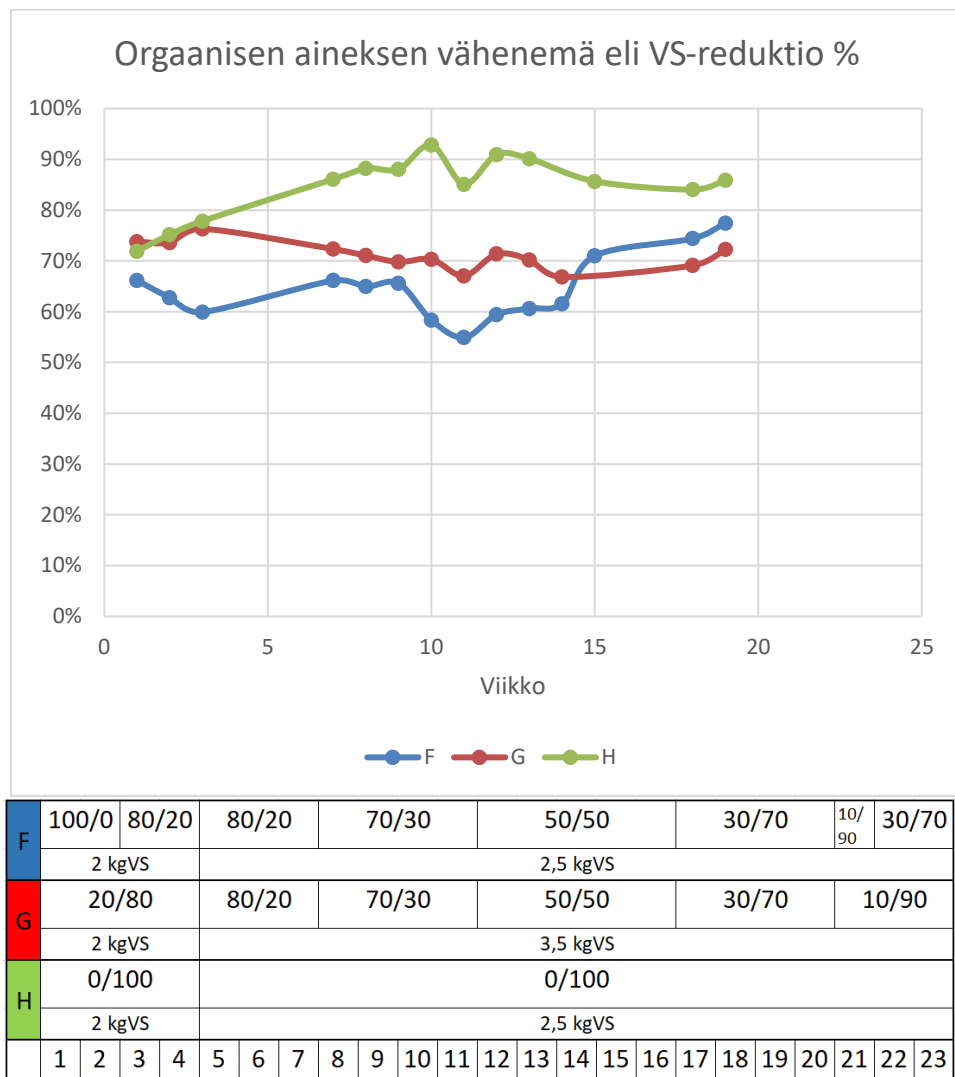
6.2 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen aines (VS)

Kuvassa 12 (s. 17) on esitetty reaktoripoisteiden kuiva-ainepitoisuudet. Ko-
keen aloitushetkellä TS-pitoisuus oli kaikissa reaktoreissa keskimäärin 4,2
%. F-reaktorin TS-pitoisuus oli kokeen ajan välillä 4,2–6,2 %. G-reaktorissa
TS-pitoisuus oli 4,0–5,2 %. H-reaktorin poisteen TS-pitoisuus pieneni ko-
keen aikana verrattuna aloitushetkeen, koska pelkkää perunankuorta si-
sältävä syöte hajosi paremmin, kuin muihin reaktoreihin syötetyt liete-
lanta-perunankuoriseokset. H-reaktorin TS oli kokeen aikana välillä 1,8–3,8
%.



Kuva 12. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden kuiva-ainepitoisuudet sekä syöteseosten seos-
suhteiden muutokset koejakson aikana.

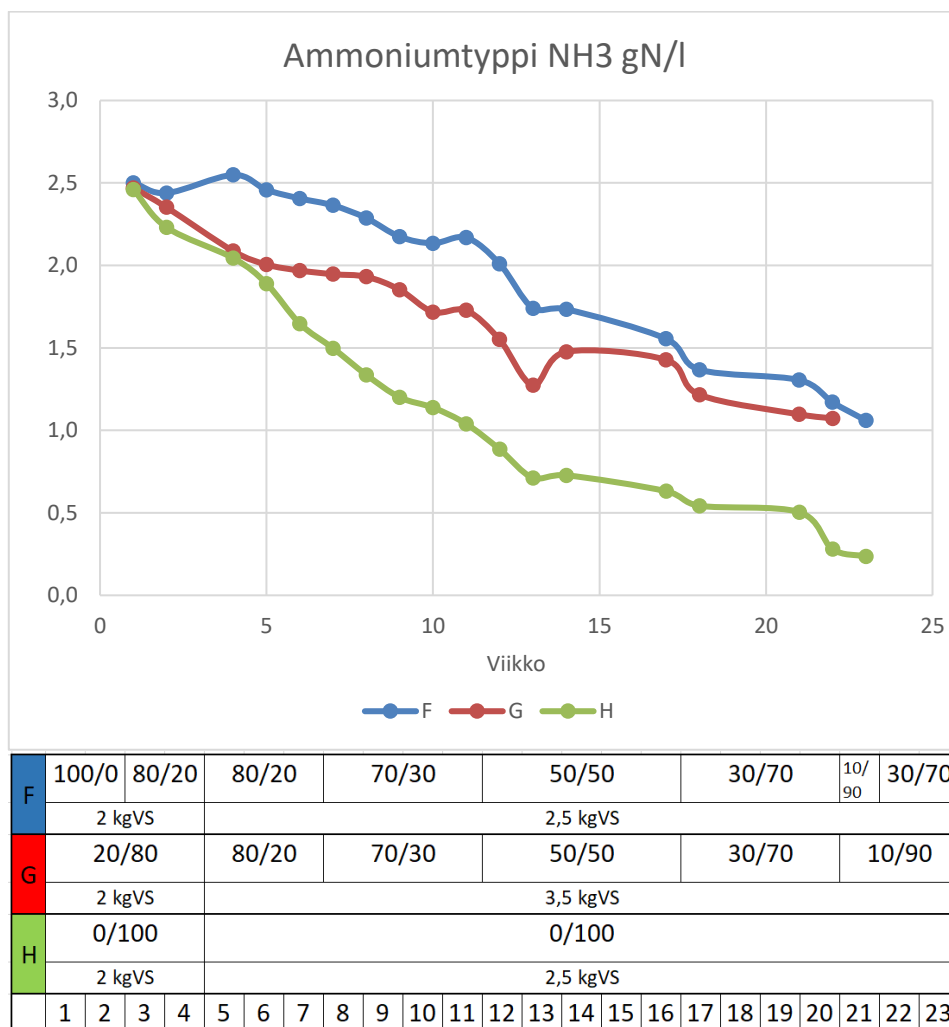
Perunankuorisyyötteen helpomman hajoamisen voi todeta myös reaktori-
rien VS-reduktioista kuvassa 13 (s. 18). VS-reduktio eli orgaanisen aineen
vähenemä oli lietelanta-perunankuoriseoksilla noin 58–78 % (reaktorit F ja
G) ja perunankuorireaktorissa H selvästi korkeampi, jopa n. 93 %.



Kuva 13. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden orgaanisen aineksen vähenemä sekä syöteseos-
ten seossuhteiden muutokset koejakson aikana.

6.3 Ammoniumtyppi

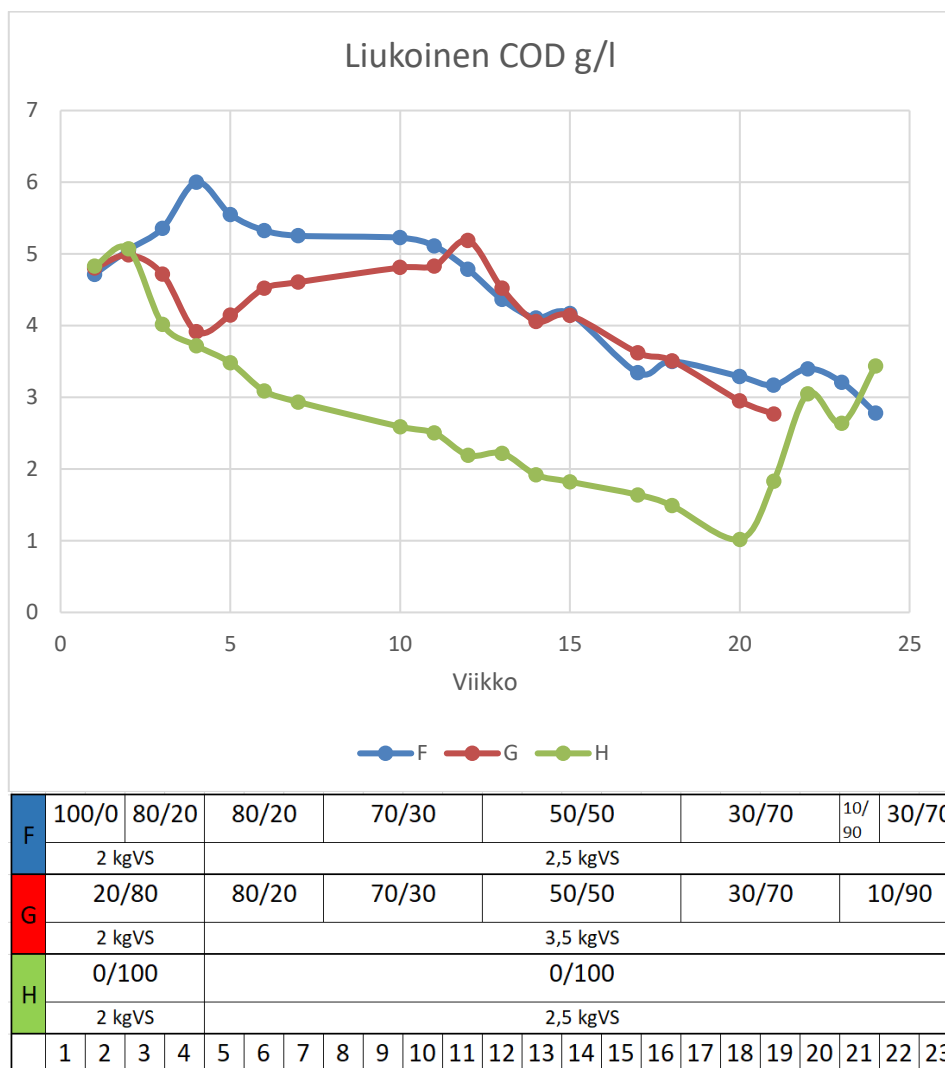
Ammoniumtyypen määrä pieneni kaikissa reaktoreissa käynnistyksessä lisä-
tyn ympin ja lähtökuormassa syötetyn lannan häviämisen myötä, sekä syö-
teseosten lietelannan suhteellisen määrän vähentyessä. Aloitushetkellä
reaktorien ammoniumtyppipitoisuus oli 2,5 mgN/g ja laski F- ja G-reakto-
reissa tasolle 1,1 mgN/g ja H-reaktorissa tasolle 0,3 mgN/g (kuva 14, s. 19).



Kuva 14. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden ammoniumtyppipitoisuudet sekä syötesesten
seossuhteiden muutokset koejakson aikana.

6.4 Liukoinen COD

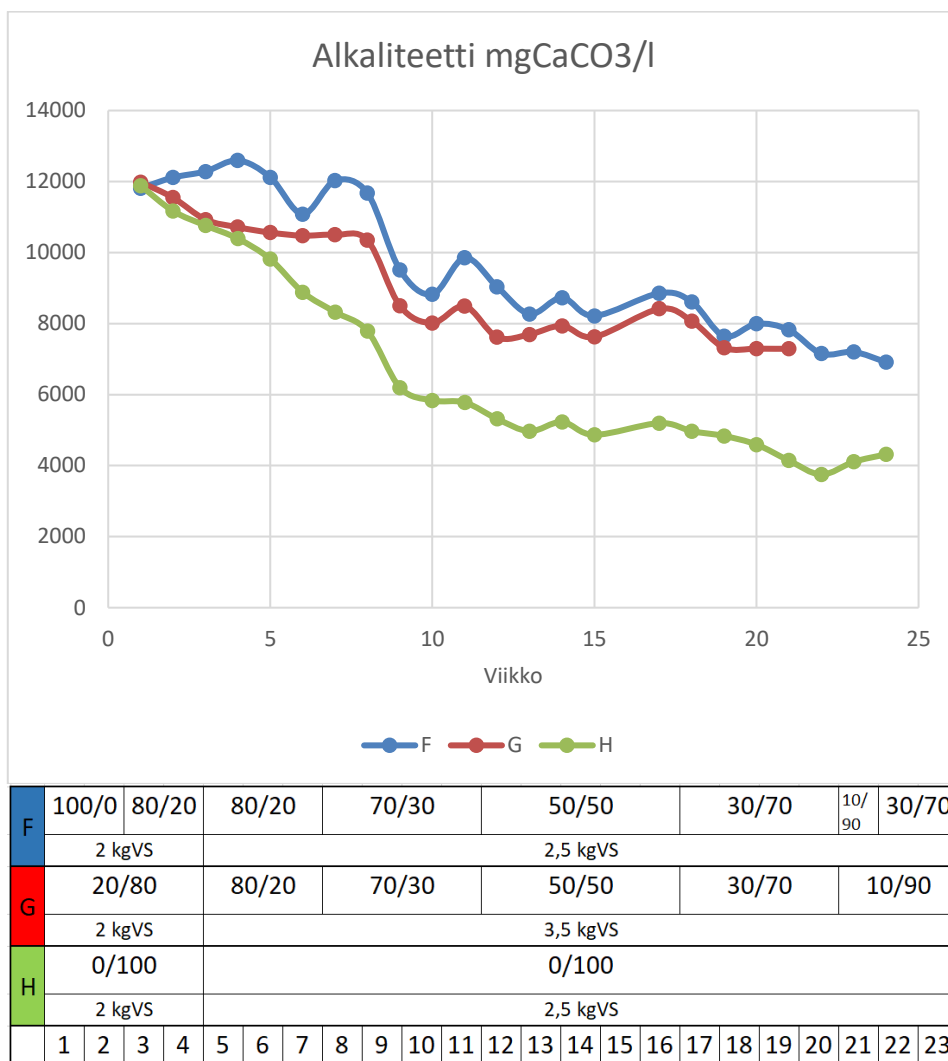
Kaikissa reaktoreissa COD_{liuk} oli aloitushetkellä 4,7–4,8 g/l. F- ja G-reakto-
reissa arvo pieneni perunankuoren osuuden lisääntyessä, F-reaktorissa
COD_{liuk} oli välillä 2,8–6,0 g/l ja G-reaktorissa 2,8–5,2 g/l. H-reaktorissa
COD_{liuk} pieneni viikolle 20 asti arvoon 1,0 g/l, jolloin ympin ja lähtökuorman
osuus reaktorin sisällöstä oli vähentynyt alle 10 %:iin. Tämän jälkeen arvo
lähti jyrkkään nousuun, kokeen päättyessä COD_{liuk} oli 3,4 g/l. Tulokset on
esitetty kuvassa 15 (s. 20).



Kuva 15. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden COD_{liuk.}-arvot sekä syöteseo-
sten seossuhteiden muutokset koejakson aikana.

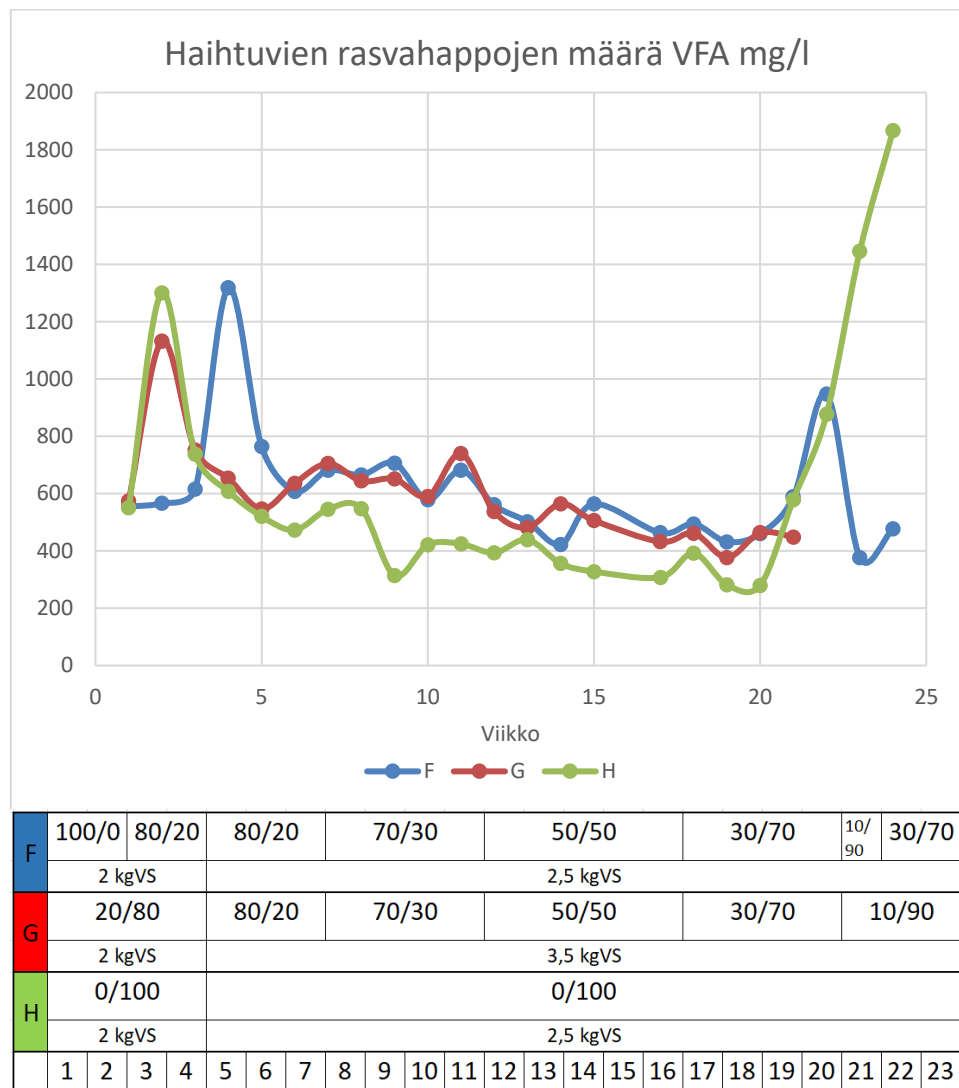
6.5 Alkaliteetti ja haihtuvat rasvahapot

Aloitushetkellä kaikissa reaktoreissa alkaliteetti oli 11 800–12 000 mg CaCO₃/l (kuva 16 s. 21) ja arvo pieneni käynnistyksessä lisätyn ympin ja lähtökuormassa syötetyn lietelannan häviämisen myötä sekä syöteseo-
sten lietelannan suhteellisen määrän vähentyessä. F-reaktorin alkaliteetti oli 6 900–12 600 mg CaCO₃/l, G-reaktorin 7 300–12 000 mg CaCO₃/l ja H-reaktorin 3 800–11 900 mg CaCO₃/l.



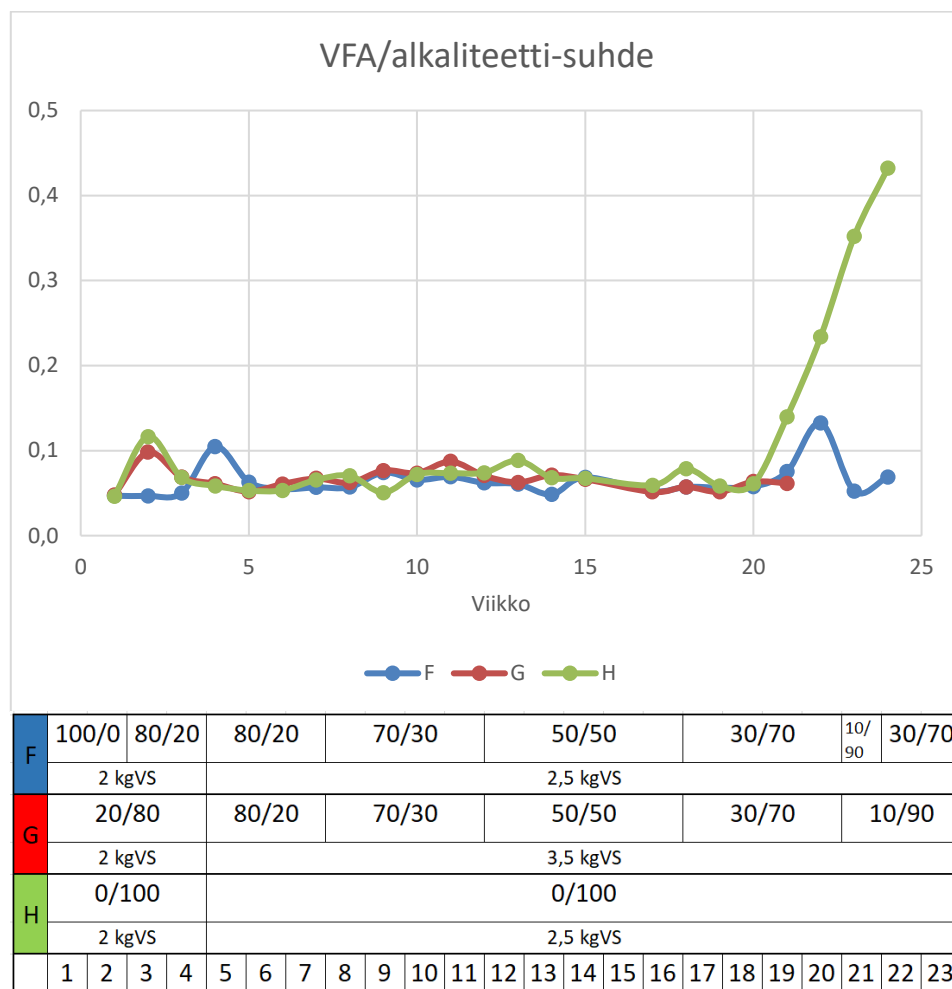
Kuva 16. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktorien poisteiden alkaliteetti sekä syöteseosten seossuhteiden muutokset koejakson aikana.

Aloitushetkellä reaktorien VFA-arvot olivat 550–570 mg/l, pitoisuudet nousivat hetkellisesti tasolle 1 130–1 320 mg/l, kun perunankuoripitoisten syöteseosten syöttäminen aloitettiin. Arvot tasaantuivat F-reaktorissa välille 420–760 mg/l, viikolla 21 tehty syöteseoksen perunankuoren osuuden lisääminen 90 %:iin nosti VFA-pitoisuuden 950 mg/l ja pitoisuus laski takaisin alemmalle tasolle 380–480 mg/l, kun perunankuoren osuutta vähennettiin 70 %:iin. G-reaktorissa VFA-pitoisuus tasoittui välille 380–750 mg/l. H-reaktorin VFA-arvo oli viikkojen 3–20 aikana välillä 280–740 mg. Viikon 20 jälkeen, kun ympin ja lähtökuorman osuus reaktorin sisällöstä oli vähentynyt alle 10 %:iin H-reaktorin VFA-arvo lähti jyrkkään nousuun, kokeen päättyessä VFA oli 1 870 mg/l. Tulokset on esitetty kuvassa 17 (s. 22).



Kuva 17. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktori-
rien poisteiden haihtuvien rasvahappojen (VFA) määrä sekä syö-
teseosten seossuhteiden muutokset koejakson aikana.

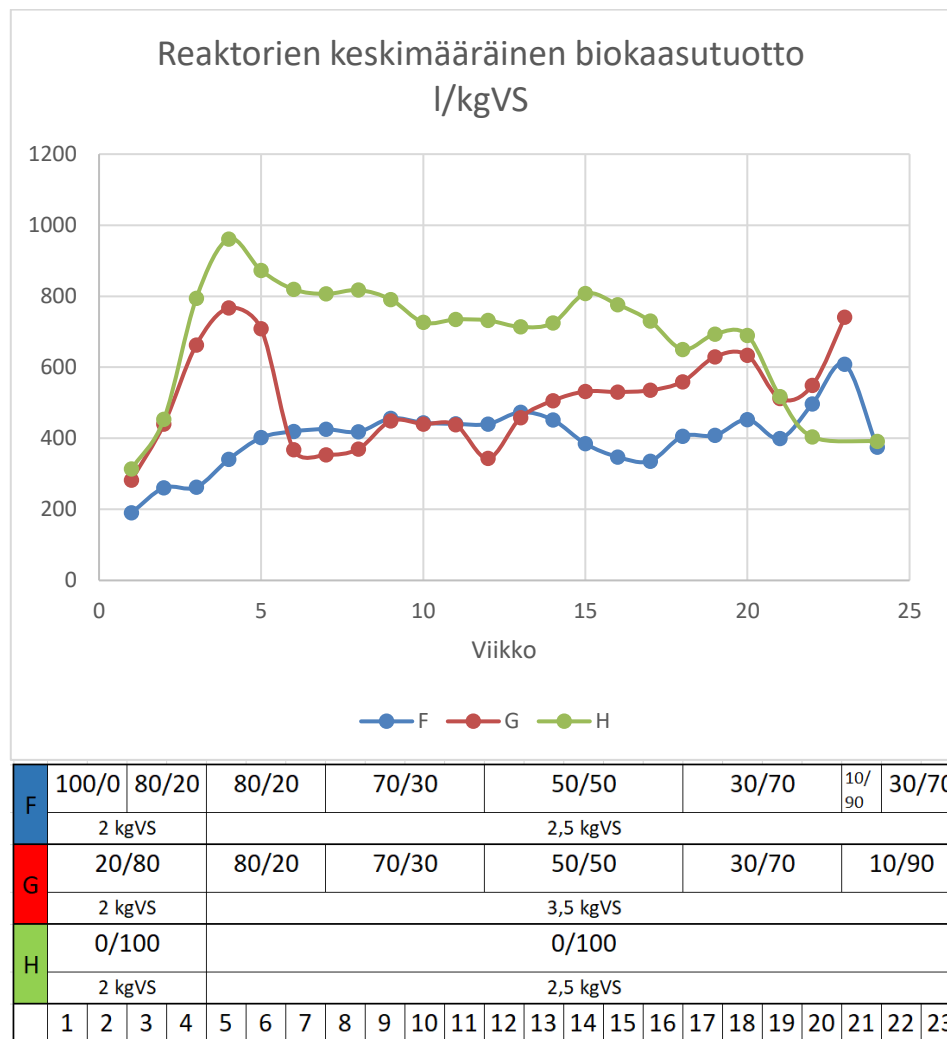
VFA/alkaliteetti-suhde pysyi F-reaktorissa välillä 0,05–0,13, G-reaktorissa välillä 0,05–0,1 ja H-reaktorissa viikkoon 20 asti välillä 0,05–0,12, jonka jäl-
keen suhde lähti jyrkkään nousuun ja oli kokeen päättyessä 0,43 (kuva 18
s. 23).



Kuva 18. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktorien poisteiden VFA/alkaliteetti-suhde koejakson aikana.

6.6 Biokaasutuotto ja kaasun koostumus

Reaktorien biokaasutuotot (kuva 19, s. 24) on ilmoitettu litroina kiloa syötettyä orgaanista ainesta kohti. Eniten biokaasua tuotti pelkällä perunankuorella syötetty H-reaktori viikkoon 20 saakka, jolloin reaktori ajautui häiriötilaan ja biokaasutuotto lähti laskuun. H-reaktorin tuotto oli välillä 310–960 l/kgVS, G-reaktorin 280–770 l/kgVS ja F-reaktorin 190–610 l/kgVS.



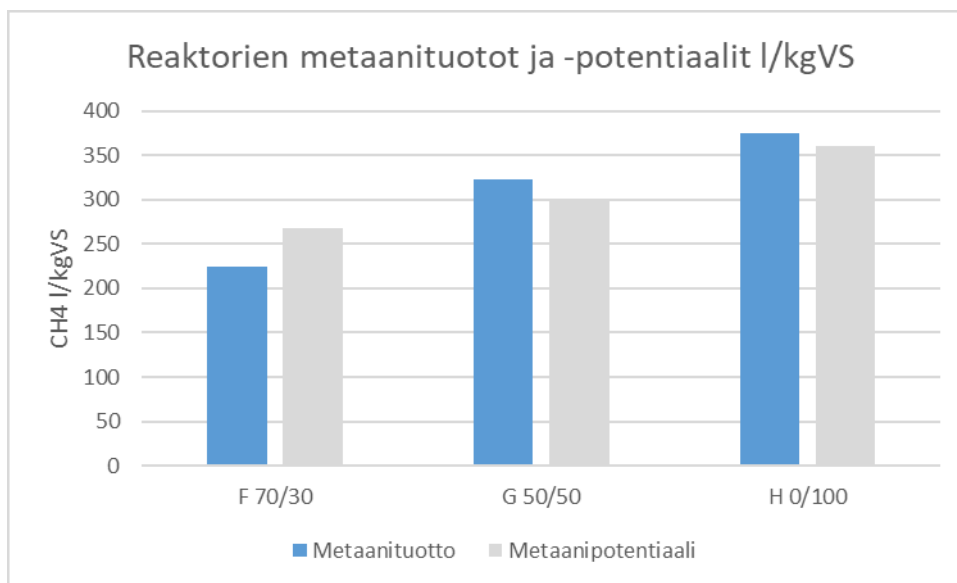
Kuva 19. Eri seossuhteilla (lietelanta/perunankuori) syötettyjen reaktorien biokaasutuotto syötettyä orgaanista ainesta kohti.

G- ja H-reaktorien kaasun koostumusmittaukset on esitetty taulukossa 4. Viikolla 15 H-reaktorin kaasun metaanipitoisuus oli 50,3 %, viikolla 20 tehdysssä analyysissa metaanipitoisuus oli laskenut arvoon 46,3 % ja kaasusta valtaosa oli hiilidioksidia. Viikon 20 mittauksessa G-reaktorin metaanipitoisuus oli 50,0 % ja hiilidioksidin määrä 40,8 %, seossuhde L30/P70. F-reaktorin kaasunkoostumusmittaus epäonnistui.

Taulukko 4. G- ja H-reaktorien kaasun koostumusmittausten tulokset viikoilta 15 ja 20

	Vko	Seos- suhde	Metaani CH ₄ %	Hiilidioksidi CO ₂ %	Happi O ₂ %	Muut %	H ₂ S ppm	NH ₃ ppm	CO POD ppm	CH ₄ / CO ₂
G	20	L30/P70	50	40,8	0	9,2	293	-	57	1,23
H	15	L0/P100	50,3	45,2	0	4,5	130	-	37	1,11
	20	L0/P100	46,3	49	0	4,7	110	-	76	0,94

Metaanituotot olivat F-reaktorissa 224 l/kgVS (seossuhde L70/P30), G-reaktorissa 322 l/kgVS (L50/P50) ja H-reaktorissa 375 l/kgVS (L0/P100), tuloksissa arvioitiin biokaasun metaanipitoisuudeksi 50 %. Tulokset vastasivat melko hyvin panoskokeilla saatuja metaanipotentialeja, joiden perusteella metaanituotot olisivat F-reaktorissa 268 l/kgVS, G-reaktorissa 301 l/kgVS ja H-reaktorissa 360 l/kgVS. Metaanituottojen ja -potentialien vertailu on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Reaktorien metaanituotot ja panoskokeilla saadut metaanipotentialit.

6.7 Kokonaistyyppi ja -fosfori

Reaktoripoisteista analysoitiin myös kokonaistypen ja -fosforin määrä. Taulukossa 5 (s. 26) on esitetty mittaushetken seossuhteet, poisteiden kuiva-aine, kokonaistyyppi (N-tot) ja kokonaisfosfori (P-tot) kiloa tuoretta näytettä kohti sekä N-tot ja P-tot kuiva-ainetta kohti. F-reaktorin seossuhteen ollessa L80/P20 kokonaistypen määrä oli 61 g/kg kuiva-ainetta, G-reaktorin (L20/P80) 66 g/kg ka ja pelkällä perunankuorella syötetyn H-reaktorin kokonaistyyppipitoisuus oli 85 g/kg ka. Reaktorien kokonaisfosfori oli välillä 8,9–9,8 g/kg ka.

Tulokset osoittavat, että typpi- ja fosforipitoisuudet olivat pelkällä perunankuorella syötetyssä reaktorissa selvästi alhaisemmat, kuin lantaa sisältävissä reaktoreissa.

Taulukko 5. Reaktoripoisteiden kuiva-aine sekä kokonaistypen ja -fosforin määrä viikolla 4

	Viikko	Seossuhde	TS	N-tot g/kg	N-tot g/kg ka	P-tot g/kg	P-tot g/kg ka
F	4	L80/P20	4,62	2,8	61	0,44	9,5
G	4	L20/P80	3,52	2,3	66	0,31	8,9
H	4	L0/P100	1,43	1,2	85	0,14	9,8

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Biokaasureaktorin syötteen on sisällettävä oikeassa suhteessa ravinteita, kuten hiiltä, typpeä, fosforia ja rikkiä. Runsaasti hiilihydraattia eli hiiltä sisältävä perunankuori muodostaa happokäymisen eli asidogeneesin aikana runsaasti välituotteina muodostuvia happoja. Tämä voi laskea reaktorin pH-arvoa ja inhiboida koko prosessia. Perunankuorta käytettäessä syöteseoksessa on oltava mukana jokin korkeamman puskurikyvyn omaava raaka-aine, kuten lietelanta.

Perunankuori soveltuu hyvin biokaasuprosessin lisäsyötteenä lietalantaan seostettuna. Tässä työssä toteutetun koejakson perusteella sopivana seossuhteena voidaan pitää suhdetta 30 p-% lietalantaa ja 70 p-% perunankuorta, jolloin prosessi pysyi vielä tasapainossa ja biokaasutuotto sekä metaanipitoisuus hyvänä. Tulokset kuitenkin osoittavat, että reaktoreissa oli vielä koejakson lopulla havaittavissa mm. ammoniumpitoisuuden laskua, mikä voi vaikuttaa alkaliteettiin, heikentäen puskurikykyä ja lopulta alentaen pH:ta.

Biokaasutuotannon ns. märkäprosessointia (TS-pitoisuus < 15 %) varten syöteseosta oli laimennettava vedellä. Isossa mittakaavassa laimentaminen ei ole järkevä toimintatapa, mikäli TS-pitoisuus on mahdollista säätää lietalannalla. Näin ollen alhaisempi perunankuoren osuus olisi perusteltua, ja hyvä laskea tapauskohtaisesti.

LÄHTEET

Ahokas, M., Välimaa, A-L., Kankaala, A., Lötjönen, T. & Virtanen, E. (2012). *Perunan ja vihannesten sivuvirtojen arvokomponenttien hyötykäyttö*. Joensuu: MTT. Haettu 6.11.2017 osoitteesta www.mtt.fi/mttra-portti/pdf/mttraportti67.pdf

Helsky, T., Anttalainen, M., Palviainen, S., Kemppainen, P., Lehto, M., Salo, T., Mäkelä, M., Tuominen, A. & Piilo, T. (2006). *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) perunan ja juuresten koneellisessa kuorinnassa ja käsittelyssä*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Haettu 14.11.2017 osoitteesta <http://hdl.handle.net/10138/38798>

Hultholm Oy. (2017). Haettu 15.11.2017 osoitteesta <http://hultholms.fi/?lang=fi>

Koivisto, H. (2016). Jepuan Biokaasu tarjoaa lähialueelle ilmaista lannoitetta. *Maaseutumedia.fi*. Haettu 3.2.2019 osoitteesta <http://www.maaseutumedia.fi/jepuan-biokaasu-tarjoaa-lahialueelle-ilmaista-lannoitetta/>

Kymäläinen, M. (2015a). Biokaasutuotannon raaka-aineet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, ss. 23–29.

Kymäläinen, M. (2015b). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, ss. 64–76.

Lehto, M., Salo, T., Sorvala, S., Kemppainen, R., Vanhala, P., Sipilä, I. & Puumala, M. (2007). *Peruna- ja juureskuorimon jätteet ja jätevedet*. Vihti: MTT. Haettu 6.11.2017 osoitteesta www.mtt.fi/met/pdf/met94.pdf

Lucas, C. (2014). Biogas Production from Potato Peel Waste. Universidade Nova de Lisboa. Haettu 5.2.2019 osoitteesta https://run.unl.pt/bitstream/10362/12337/1/Lucas_2014.pdf

Luostarinen, S. (2015). Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Teoksessa M. Kymäläinen & O. Pakarinen (toim.) *BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, s. 90.

Ryyttäri, H-E. (2017). *Perunan ja lietelannan hyödyntäminen biokaasutuotannossa*. Haettu 5.2.2019 osoitteesta <https://www.lamk.fi/sites/default/files/2018-06/Perunan%20ja%20lietelannan%20hy%C3%B6dynt%C3%A4minen%20biokaasutuotannossa.pdf>

Rönkkö, T. & Hyvönen, T. (2011). *Pienimuotoisen biokaasureaktorin valmistaminen ja sen hyödyntäminen*. Opinnäytetyö. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Savonia-ammattikorkeakoulu. Haettu 5.2.2019 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201104124175>

Tuomisto, J. & Huitu, H. (2016). *Perunan sivuvirtojen taloudelliset hyödyntämismahdollisuudet*. Suomen maataloustieteellinen seura. Haettu 15.11.2017 osoitteesta http://www.smts.fi/sites/smts.fi/files/MTP2016/Tuomisto_Huitu_2016.pdf

Virta, A. (2011). *Biokaasutuotannon prosessit ja biokaasun tuotanto*. Opinnäytetyö. Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma. Turun ammattikorkeakoulu. Haettu 5.2.2018 osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34331/Virta_Alexi.pdf?sequence=1

Välimaa, A-L., Tuunainen, P., Siljander-Rasi, H. & Virtanen, E. (2017). *Rehua perunan käsittelyssä ja juustonvalmistuksessa syntyvistä sivujakeista*. Helsinki: Luonnonvarakeskus (Luke). Haettu 6.11.2017 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-405-2>