



Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho

Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa

Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa

Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho



ISBN 978-951-38-7310-3 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7311-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 7001

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2009

Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho. Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa [Utilization of municipal waste in biorefinery]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2494. 64 s.

Avainsanat biorefinery, municipal waste, biowaste, mixed waste, cellulose, starch, carbohydrate, hydrolysis, fermentation, fuel ethanol

Tiivistelmä

Biojalostamossa hyödynnetään biomassaa fossiilisista raaka-aineista valmistettuja tuotteita korvaavien biopolttoaineiden, bioenergian ja kemikaalien tuotannossa. Esimerkiksi sokeri-, tärkkelys- ja selluloosapitoisista materiaaleista voidaan valmistaa entsyymaattisen hydrolyysin ja bioteknisen prosessoinnin avulla etanolia tai kemikaaleja. Biomassaa hyödynnetään laajenevassa mitassa polttoaineiden tuotannossa, mutta kemianteollisuus perustuu toistaiseksi lähes yksinomaan fossiilisten raaka-aineiden käyttöön.

Tässä hankkeessa selvitettiin yhdyskuntajätteen hyödyntämismahdollisuuksia biojalostamo-konseptissa käyttäen malliprosessina polttoaine-etanolin tuottoa. Yhdyskuntien jätevirtojen kartoituksen perusteella valittiin sokerireittiin perustuvan biojalostamon raaka-aineeksi soveltuvat, runsaasti hiilihydraatteja sisältävä fraktiot, joiden soveltuvuutta biotekniseen jatkokäsittelyyn tutkittiin laboratoriomittakaavan kokeissa. Soveltuvia jätefraktioita ovat erilliskerätty biojäte, sekajäte, kuitupakkaukset, keräyspaperi ja rakennusjätteen tietyt fraktiot. Osalle näistä jakeista on jo olemassa toimivat hyödyntämisjärjestelmät, joten ne jätettiin tämän selvityksen ulkopuolelle.

Saatujen tulosten mukaan erilliskerätty biojäte soveltuu teknisesti erittäin hyvin sokereita hyödyntävän biojalostamon raaka-aineeksi. Erilliskerätyn biojätteen volyymit ovat kuitenkin pieniä: YTV-alueen biojätteen käyttävä laitos tuottaisi 3 000 tonnia etanolia vuodessa, ja kokonaisetanolintuottopotentiali biojätteestä Suomessa on alle 20 000 tonnia vuodessa. Kaatopaikoille menevä sekajäte on volyymiltaan biojätettä huomattavasti suurempi jätefraktio. Hiilihydraattikoostumuksen perusteella arvioiden Suomen sekajättekertymästä olisi teoreettisesti mahdollista tuottaa 260 000 tonnia etanolia vuodessa. Sekajätteen heterogeenisuus vaikeuttaa hiilihydraattien hyödyntämistä, ja tässä työssä saatujen tulosten perusteella saanto fraktioimattomaan sekajätteeseen perustuvassa pro-

sessissa ilmeisesti olisi alle 50 % teoreettisesta. Sekajätteen tehokas hyödyntäminen sokerireittiin perustuvassa biojalostamoissa edellyttääkin raaka-aineen fraktiointia joko keräyksen yhteydessä tai jätteenkäsittelylaitoksessa ja prosessien edelleen kehittämistä, muun muassa esikäsittelyjen optimointia.

Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho. Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamossa [Utilization of municipal waste in biorefinery]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2494. 64 p.

Keywords biorefinery, municipal waste, biowaste, mixed waste, cellulose, starch, carbohydrate, hydrolysis, fermentation, fuel ethanol

Abstract

A biorefinery is a facility that integrates biomass conversion processes and equipment to produce fuels, power, materials and/or chemicals from biomass thus replacing fossil raw materials by renewable ones. An example of carbohydrate-based biorefinery is biotechnical production of ethanol and chemicals from biomass containing sugars, starch and/or cellulose. Biomass is utilized in increasing amounts for biofuel production but the chemical feedstock supply is for the present dominated by nonrenewable carbon.

The aim of the project was to evaluate the potential of municipal wastes as biorefinery raw material using fuel ethanol production as an example. Suitability of various municipal waste fractions as raw material for carbohydrate-based biorefinery was evaluated and carbohydrate-rich waste fractions were selected for closer study. Biotechnical processability of selected fractions was studied in laboratory scale. Source-separated biowaste, mixed waste, fibre-based packages, wastepaper and certain fractions of construction waste were identified as potential raw materials. Waste fractions having functional exploitation systems were excluded from the study.

Biowaste was shown to be technically well suited as raw-material for carbohydrate-based biorefinery. However, the volumes of source-separated biowaste in Finland are small: a plant utilising all biowaste collected in the Helsinki metropolitan area would produce 3 000 tons of ethanol annually and total annual ethanol production capacity from source-separated biowaste collected in Finland would be less than 20 000 tons. The volumes of mixed waste are considerably larger. Based on carbohydrate content, 260 000 tons of ethanol could in theory be produced from the mixed waste collected in Finland. The utilization of carbohydrates in mixed waste is, however, complicated by the heterogeneity of the material and the results of this study show that ethanol yield from unfractionated

mixed waste would be less than 50 % of theoretical. Effective utilization of the material in carbohydrate based biorefinery would require fractionation of the waste either in the collection phase or in the waste disposal plant and further development of the processing, including optimization of the pretreatments.

Alkusanat

Tässä julkaisussa esitellään ympäristöministeriön ympäristöklusterin tutkimusohjelmaan *Ekotehokas yhteiskunta* kuuluvassa projektissa *Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa* tehdyn selvitys- ja tutkimustyön tuloksia. Projektin rahoittivat ympäristöministeriö, VTT ja YTV. Tutkimus- ja selvitystyö suoritettiin VTT:llä aikavälillä 2.3.2006–31.12.2008. Tutkimusta valvoi ympäristöministeriön puolesta ylitarkastaja Ari Seppänen. Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi Matti Siika-aho (VTT) ja projektipäällikköinä Minna Vikman (VTT) ja Marjaana Rättö (VTT). Tutkimuksen toteutusta ohjasi ja valvoi ohjausryhmä, johon kuuluivat yllä mainitun ympäristöministeriön edustajan ja tutkimuksen vastuullisen johtajan lisäksi Christoph Gareis (YTV), Helena Dahlbo (SYKE), Esa Nummela (Jätelaitosyhdistys), Antti Pasanen (St1 Biofuels Oy), Pekka Pohjola (Biodeg Finland Oy), Veli-Pekka Reskola (maa- ja metsätalousministeriö) ja Liisa Viikari (Helsingin yliopisto).

Tutkimusryhmä kiittää rahoittajia, ohjausryhmän jäseniä ja tutkimusavustajia hyvin sujuneesta yhteistyöstä ja tutkimuksen toteutukseen suodusta panostuksesta.

Espoo 12.5.2009

Kirjoittajat

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat	7
1. Johdanto	10
2. Yhdyskuntien jätehuolto	12
2.1 Jätehuollon tavoitteet ja ohjaus	12
2.2 Yhdyskuntien jätehuollon järjestäminen ja vastuut	14
3. Yhdyskuntajätteet	16
3.1 Sekajäte eli kaatopaikoille päätyvä jäte	18
3.2 Erilliskerätty biojäte	19
3.3 Keräyspaperi	20
3.4 Pakkaukset	22
3.5 Rakennusjäte	25
4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena	26
4.1 Liikenteen biopolttoaineet	27
4.2 Polttoaine-etanolin tuotto	28
5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys	32
5.1 Menetelmät	32
5.1.1 Raaka-aineet	32
5.1.2 Hydrolyysi ja fermentaatio	33
5.2 Biojäte etanolin raaka-aineena	34
5.2.1 Biojätteen koostumus	34
5.2.2 Biojätteen entsymaattinen hydrolysoituvuus	35
5.2.3 Biojätteen fermentaatio	38
5.2.3.1 Etanolin tuotto	38
5.2.3.2 Fermentaatiojäännöksen koostumus	39
5.2.4 Biojäte-etanoliprosessi	40
5.2.4.1 Osaprosessit	40

5.2.4.2	Prosessin massatase	41
5.2.4.3	Prosessin sivuvirrat	42
5.3	Sekajäte etanolin raaka-aineena	43
5.3.1	Sekajätteen koostumus	43
5.3.2	Sekajätteen entsymaattinen hydrolysoituvuus	44
5.3.3	Potentiaalisia sekajäte-etanoliprosesseja	46
6.	Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja	48
6.1	Raaka-aineen saatavuus	48
6.2	Prosessin taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä	51
6.3	Ympäristövaikutusten arviointi	53
7.	Yhteenveto	55
	Lähdeluettelo	59

1. Johdanto

Yhdyskuntajätteistä hyödynnetään tällä hetkellä vain 40 %, vaikka valtakunnallisen jätesuunnitelman mukaisesti hyödyntämistä tavoitteeksi oli asetettu 70 % vuoteen 2005 mennessä. Yhdyskuntajäte koostuu kotitalouksien jätteestä sekä muusta samankaltaisesta jätteestä, jota kerätään esimerkiksi pienyrityksistä ja kaupoista. Suomessa biojäte yleensä erilliskerätään ja käsitellään kompostomalla, kun taas paperi- ja pahvituotteet kierrätetään materiaalina. Jätehuoltosektori on kuitenkin voimakkaassa murrosvaiheessa, jossa sen kehitykseen vaikuttavat erityisesti muuttuva lainsäädäntö sekä muutokset taloudellisessa toimintaympäristössä.

Jätteiden käsittelystä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi on EU:ssa sovittu biohajoavan yhdyskuntajätteen kaatopaikkasijoituksen vähentämisestä asteittain siten, että vuonna 2016 kaatopaikoille päätyisi enää 35 painoprosenttia vuonna 1994 syntyneestä biohajoavan yhdyskuntajätteen määrästä (Suomessa 2,1 miljoonaa tonnia). Biohajoavalla jätteellä tarkoitetaan jätettä, joka voi hajota mikrobitoiminnan seurauksena aerobisesti tai anaerobisesti, kuten elintarvike-, puutarha-, paperi- ja kartonkijätettä.

Suomen biohajoavan jätteen strategia esittää tavoitteet ja toimintalinjaukset kaatopaikkasijoittamisen vähentämisestä. Strategia perustuu esikäsittelyä painotavaan vaihtoehtoon. Jätteiden synnyn ehkäisyn lisäksi siinä tarkastellaan biohajoavien jätteiden kierrätystä, kompostointia ja muuta biologista käsittelyä sekä energiahyödyntämistä kaatopaikkakäsittelyn vaihtoehtoina. Strategian mukaan 65 %:n hyötykäyttötavoitetta ei voida saavuttaa, ellei osaa jätteestä hyödynnetä energian tuotannossa.

Biojalostamokonseptissa biopohjaisia raaka-aineita hyödynnetään kokonaisvaltaisesti ja mahdollisimman tehokkaasti energian tai kemikaalien tuottoon. Jalostustuotteiden arvo ja eri jakeiden lämpöarvo pyritään maksimoimaan ja siten nostamaan koko jalostusketjun arvoa. Esimerkiksi sokeri-, tärkkelys- ja

selluloosapitoisista jätteistä voidaan sokerireittiin perustuvassa biojalostamossa valmistaa entsyymaattisen hydrolyysin ja bioteknisen prosessoinnin avulla etanolia tai kemikaaleja. Biojalostamon prosesseissa hyödynnetään tarpeen mukaan eri tekniikoita: termisiä, kemiallisia tai bioteknisiä menetelmiä.

Uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen on EU:n keskeisiä tavoitteita. Suomessa biomassassa on tärkein uudistuva energiavara, jota voidaan hyödyntää niin sähkön, lämmön kuin liikenteen polttoaineidenkin tuotannossa. EU komission tavoitteena on nostaa uusiutuvien energialähteiden käyttö 5,75 %:iin liikenteen polttoaineiden kulutuksesta vuoteen 2010 mennessä. Nykyisten teollisten bioetanolin tuotantoprosessien raaka-aineet ovat maatalousperäisiä, jolloin ongelmina ovat muun muassa maankäyttöön ja polttoainetuotannon ja elintarviketuotannon väliseen kilpailuun liittyvät vaikutukset sekä raaka-aineiden viljelyn vaatima suhteellisen suuri fossiilisen energian määrä. Erilaisten sivutuotteiden ja jätteiden käyttäminen biopolttoaineiden tuotantoon onkin tässä suhteessa viljakasveja selkeästi parempi vaihtoehto.

Biomassan saatavuus ja hinta saattavat olla tulevaisuudessa rajoittavia tekijöitä esimerkiksi biopolttoaineiden laajamittaisessa käytössä. Suomessa kaatopaikoille ja kompostointiin päätyvä materiaali on identifioitu tärkeäksi potentiaaliseksi raaka-aineeksi. Tämä materiaali sisältää myös runsaasti eloperäistä ainesta, esimerkiksi hiilihydraatteja, jotka voitaisiin bioetanolin lisäksi hyödyntää myös valmistettaessa tuotteita, joiden jalostusaste on oleellisesti suoraa energiakäyttöä korkeampi. Jätepohjaiset materiaalivirrat ovat jo edullisuutensa vuoksi kiinnostava raaka-ainevaranto.

Tässä hankkeessa selvitettiin yhdyskuntajätteen hyödyntämismahdollisuuksia biojalostamo-konseptissa käyttäen malliprosessina polttoaine-etanolin tuottoa. Yhdyskuntien jätevirtojen kartoituksen perusteella valittiin runsaasti hiilihydraatteja sisältävät jätefraktiot, joiden soveltuvuutta biotekniseen jatkokäsittelyyn selvitettiin käytännön kokeissa.

2. Yhdyskuntien jätehuolto

2.1 Jätehuollon tavoitteet ja ohjaus

Suomen jätelainsäädäntö seuraa läheisesti EU:n jätelainsäädännön kehittymistä, vaikka joiltakin osin lainsäädäntömme on jopa tiukempi. Tärkeimpiä yhdyskuntajätteiden hyödyntämiseen liittyviä säädöksiä ja ohjauskeinoja ovat seuraavat:

- EU:n jätedirektiivi 2008/98/EY ja Suomen jätelaki 1072/93 ohjaavat jätteiden hyödyntämistä ja käsittelyä.
- Kaatopaikkadirektiivi 1993/31/EY pyrkii vähentämään kaatopaikalla sijoitetun biohajoavan jätteen määrää.
- Sivutuoteasetus EY 1774/2002 säätelee esimerkiksi lihaa ja kalaa sisältävien elintarvike- ja ruokajätteiden käsittelyä.
- Lannoitevalmistelaki 539/2006 ohjaa maanparannusaineiden laatuvaatimuksia.
- Valtakunnallinen jätesuunnitelma (Ympäristöministeriö, 2008) sisältää jätehuollon päämäärät ja tavoitteet sekä keskeiset toimet niiden saavuttamiseksi.
- Kansallinen strategia biohajoavan jätteen kaatopaikkakäsittelyn vähentämisestä (Ympäristöministeriö, 2004) pyrkii edistämään kaatopaikalle sijoitettavan jätteen hyödyntämistä sekä vähentämään kaatopaikkojen ympäristö- ja terveysthaittoja.

Euroopan unioni julkisti vuoden 2008 lopussa uuden jätedirektiivin (2008/98/EY), jolla pyritään yksinkertaistamaan EU:n jätelainsäädäntöä (Suo-

men ympäristökeskus, 2009). Direktiivissä vahvistetaan viisiportainen jätehierarkia, jonka mukaan jätepolitiikassa on noudatettava seuraavaa tärkeysjärjestystä: jätteen synnyn ehkäisy, valmistelu uudelleenkäyttöön, kierrätys, muu hyödyntäminen ja loppukäsittely. Lisäksi direktiivissä säädetään arviointiperusteista, joiden mukaan voidaan päättää, onko tietty materiaali sivutuotetta vai jätettä (ns. *End of Waste* -kriteerit). Näillä kriteereillä voi olla merkitystä jätteiden hyödyntämisessä esimerkiksi silloin, jos jäte arvioidaan kriteereiden perusteella REACH-asetuksen (asetus kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenetelyistä ja rajoittamisesta) piiriin kuuluvaksi.

Suomessa jätehuoltoon säännökset sisältyvät jätelakiin (1072/93), joka säätelee muun muassa erilaisten jätteiden käsittelyä, siirtoa ja hyödyntämistä. Jätealan lainsäädännön kokonaisuudistuksen valmistelu on käynnistetty vuonna 2007, ja ensimmäiset ehdotukset on tarkoitus saada valmiiksi vuonna 2010. Tavoitteena on painottaa jätteen synnyn ehkäisyä ja ohjata lajitellut jätteet tarkoituksenmukaiseen kierrätykseen tai energiantuotantoon.

Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa (Ympäristöministeriö, 2008) esitetään toimia, joilla edistetään luonnonvarojen järkevää käyttöä, kehitetään jätehuoltoa sekä ehkäistään jätteistä aiheutuvia vaaroja ja ympäristö- ja terveyshaittoja. Suunnitelma sisältää Suomen jätehuollon päämäärät ja tavoitteet vuoteen 2016 mennessä sekä keskeiset toimet niiden saavuttamiseksi. Sen tavoitteena on vakiinnuttaa yhdyskuntajätteen määrä ensin 2000-luvun alun tasolle ja kääntää jätemäärä tästä tasosta laskuun vuoteen 2016 mennessä. Suunnitelmassa tavoitteen mukainen yhdyskuntajättemäärä vuonna 2016 on alle tason 2,3–2,5 miljoonaa tonnia vuodessa. Tästä määrästä hyödynnettäisiin kompostoimalla tai mädättämällä 20 %, materiaalikierrätyksellä 30 %, energiana (poltto jätteenpolto- ja rinnakkaispolttolaitoksissa) 30 %. Kaatopaikoille sijoitettavan yhdyskuntajätteen osuus olisi enintään 20 % koko yhdyskuntajätteen määrästä.

EU:n kaatopaikkadirektiivin (1999/31/EY) tavoitteena on estää tai minimoida kaatopaikkojen mahdolliset haitat, kuten maaperän, vesistöjen ja ilman pilaantuminen sekä metaanipäästöt. Direktiivillä edistetään myös jätteiden hyödyntämistä ja kierrätystä. Direktiivissä edellytetään, että jäsenvaltiot vähentävät kaatopaikoille sijoitettavien biologisesti hajoavien jätteiden määrän 35 %:iin vuoden 1994 tasosta vuoteen 2016 mennessä. Biohajoavaan jätteeseen lasketaan biojätteen lisäksi myös muita merkittäviä jätefraktioita, kuten paperi, pahvi ja puu.

Suomessa EU:n kaatopaikkadirektiivi on pantu täytäntöön valtioneuvoston päätöksellä kaatopaikoista (861/1997). Päätöksen mukaan kaatopaikoille ei saa vuodesta 2005 alkaen sijoittaa sellaista asumisesta syntynyttä jätettä sekä omi-

2. Yhdyskuntien jätehuolto

naisuuksiltaan ja koostumukseltaan siihen rinnastettavaa teollisuus- ja palvelu- tai muussa toiminnassa syntynyttä jätettä (yhdyskuntajäte), josta suurinta osaa sen biohajoavasta osasta ei ole kerätty talteen hyödyntämistä varten. Päätöksen mukaan kaatopaikalle ei saa myöskään sijoittaa esikäsitlemätöntä jätettä. Esikäsittelyllä tarkoitetaan jätteen riittävää lajittelua sekä jätteen hyödyntämistä tai käsittelyä. Kaatopaikoille ei saa myöskään sijoittaa nestemäistä jätettä tai sellaista sairaalassa ja eläinlääkäriasemalla sekä siihen rinnastettavassa toiminnassa syntynyttä jätettä, joka on tartuntavaarallista.

Jäteraaka-aineita hyödynnettäessä on huomioitava myös muita lainsäädännöllisiä tekijöitä. Sivutuoteasetus (EY 1774/2002) koskee muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden käsittelyä. Asetuksen soveltamisalaan kuuluvat kokoruhojen ja ruhonosien ohella muun muassa lihaa tai kalaa sisältävät elintarvike- ja ruokajätteet sekä lanta. Eläinperäiset jätteet on jaoteltu eläintauti- ja eläinlääkejäämämäriskin perusteella kolmeen luokkaan. Vähiten haitalliseen luokkaan 3 kuuluvaa jätettä (muun muassa ruokajäte, ihmisravinnoksi hyväksytyistä eläimistä saatavat sivutuotteet, entiset eläinperäiset elintarvikkeet) ja lantaa voidaan käsitellä laitoksissa, joissa on pastörinti-/hygienisointiyksikkö, jossa käsittelylämpötila on vähintään 70 °C ja käsittelyaika vähintään 60 minuuttia. Mikäli prosessin sivuvirta, esimerkiksi fermentaatiojäännös, käytetään lannoitteena, sen käyttöä säätelee lannoitevalmistelaki (539/2006). Orgaanisia lannoitevalmisteita tai niiden raaka-aineita valmistavan, teknisesti käsittelevän tai varastoivan toiminnanharjoittajan on oltava Elintarviketurvallisuusviraston hyväksymä.

2.2 Yhdyskuntien jätehuollon järjestäminen ja vastuut

Perusvastuu jätehuollosta yhdyskuntajätteen osalta on nykysäädösten mukaan kunnalla. Kunnan on huolehdittava jätteen kuljetuspalveluista, hyödyntämisen ja käsittelyn järjestämisestä sekä jätehuollon edellyttämästä tiedotuksesta ja neuvonnasta. Useimmat kunnat ovat antaneet suurimman osan operatiivisista jätehuoltotehtävistään suoraan määräysvallassaan oleville jätehuoltoyhtiöille, jotka ovat puolestaan hankkineet tarvitsemiaan palveluja kilpailuttamalla yksityisiä palveluyrittäjiä. Jätehuoltoyhtiöissä on osakkaina mukana 299 kuntaa, joissa on asukkaita yhteensä noin 3,4 miljoonaa. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV:n toiminnassa on mukana viisi kuntaa, joissa on yhteensä noin miljoona asukasta. Lisäksi kuntayhtymissä on jäseninä mukana 25 kuntaa ja liikelaitoksissa 29 kuntaa (Kuntaliitto 2009).

Kunnan järjestämisvelvollisuuden piiriin eivät kuulu sellaiset jätteet, joiden jätehuollon järjestämisvastuu on erityisellä säädöksellä siirretty osittain tai kokonaan tuotteen valmistajan, maahantuojan tai muun vastaavan tahon taikka näiden muodostaman tuottajayhteisön vastuulle. Jätteen haltijan on vastaavasti liityttävä tällä tavoin järjestettyyn jätehuoltoon. Näin on Suomessa menetelty tähän mennessä keräyspaperin, autonrenkaiden, sähkö- ja elektroniikkalaiteromun, romuajoneuvojen ja pääosin myös pakkausten jätehuollossa.

1.6.2007 voimaan tullut jätelain osittaisuudistus vähensi kunnan vastuuta yhdyskuntajätehuollosta (Suomen ympäristökeskus, 2009). Elinkeinotoiminnan jätteet rajautuvat uudistuksessa pääsääntöisesti pois kunnan vastuun piiristä. Kunnan vastuulle jää asumisesta syntynyt ja ominaisuuksiltaan, koostumukseltaan ja määrältään siihen rinnastettava valtion, kunnan ja seurakunnan sekä julkisoikeudellisen yhteisön tai yhdistyksen julkisessa hallinto- tai palvelutoiminnassa syntynyt jäte. Elinkeinotoiminnan jätehuoltopalveluiden hankkiminen on toiminnanharjoittajan vastuulla. Huolimatta jätelain uudistuksesta on yksityisten jätehuoltoyhtiöiden rooli asumisjätteiden hyödyntämisessä aiheuttanut keskustelua ja epäselviä tilanteita (Saarinen, 2009, Uusiouutiset, 2008).

3. Yhdyskuntajätteet

Suomen lainsäädännön mukaan jätteellä tarkoitetaan ainetta tai esinettä, jonka haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä (Merilehto et al., 2004). Yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan asumisessa syntyvää jätettä (kotitalousjätettä) sekä ominaisuudeltaan, koostumukseltaan ja määrältään siihen rinnastettavaa jätettä, joka syntyy esimerkiksi teollisuudessa tai palvelutoiminnassa.

Yhdyskuntajätteen määrä vuonna 2006 oli EU-alueella keskimäärin 517 kg/asukas, kun vastaava määrä Suomessa oli 488 kg/asukas (Eurostat, 2009; Euroopan ympäristökeskus, 2009). Jätteiden määrä asukasta kohden sekä jätteiden käsittelymenetelmät vaihtelevat maittain merkittävästi. Kokonaistilanteen tarkastelua vaikeuttavat erityisesti tilastointiin ja jätteiden määrittelyihin ja luokituksiin liittyvät hankaluudet (Merilehto et al., 2004). Euroopan ympäristökeskuksen (2009) mukaan vuonna 2004 47 % yhdyskuntajätteestä päätyi kaatopaikalle ja 36 % hyötykäytettiin tai kierrätettiin. Yhdyskuntajätteen määrän EU:n alueella odotetaan kasvavan 25 % vuodesta 2005 vuoteen 2020, jolloin jätettä syntyisi 340 miljoonaa tonnia. Toisaalta kuitenkin ennustetaan, että kaatopaikoille päätyy yhä vähemmän yhdyskuntajätettä kierrätyksen ja hyötykäytön lisääntyessä.

Kiinteitä yhdyskuntajätteitä syntyi Suomessa vuonna 2007 lähes 2,7 miljoonaa tonnia (Tilastokeskus, 2008; taulukko 1). Noin kaksi kolmasosaa yhdyskuntajätteestä kertyi kotitalouksissa. Palvelualojen suurimmat yhdyskuntajätteen tuottajat olivat kauppa sekä terveydenhuolto. Yhdyskuntajätteen määrä lisääntyi 4,1 % edellisestä vuodesta. Kaatopaikoille sijoitettiin yhdyskuntajätteestä lähes 53 %, kun viisi vuotta aikaisemmin vastaava luku oli 62 %. Yhdyskuntajätteestä poltettiin jätteenpolttolaitoksissa 3 %, hyödynnettiin energiana 9 % ja kierrätettiin 36 %. Tärkeimpiä kierrätettäviä materiaaleja olivat biojätteet, paperi ja kartonki, pakkaukset, lasi ja metalli.

EU-maihin verrattuna yhdyskuntajätteiden käsittely polttamalla on ollut Suomessa vähäistä, mutta lukuisia uusia polttolaitoksia on suunnitteilla ja jätteiden polton ennustetaan kasvavan. Jätelaitosyhdistyksen (2009) mukaan yhdyskuntajätehuollon tarpeita vastaava energiahyödyntämisen kapasiteetti voidaan saavuttaa Suomessa noin 5–10 jätettä energiaksi hyödyntävällä jätevoimalaitoksella. Varsinaiset yhdyskuntajätteiden polttoon suunnitellut jätevoimalaitokset sijaitsevat Turussa, Riihimäellä ja Kotkassa. Lisäksi esimerkiksi Vantaan Energia suunnittelee jätteiden polttolaitoksen rakentamista pääkaupunkiseudulle (YTV, 2009; Vantaan energia, 2008). Laitos on tarkoitus ottaa käyttöön vuonna 2014. Laitoksessa suunnitellaan käytettävän YTV:n ja Rosk`n Roll Oy:n sinne toimittamaa syntypaikkalajiteltua sekajätettä, ja sen suunniteltu käsittelykapasiteetti on 320 000 tonnia vuodessa. Varsinaisten jätteenpolttolaitosten lisäksi parempilaa-tuisista jätteistä valmistettuja kierrätyspolttoaineita poltetaan rinnakkaispoltona eräissä tavanomaisissa voimalaitoksissa.

Jätevirtojen hyödyntäminen biojalostamotyyppisten käymisprosessien kautta Suomessa on tällä hetkellä vähäistä. St1 Biofuels tuottaa polttoaine-etanolia jäteraaka-aineista konseptilla, joka perustuu elintarviketeollisuuden sokeri- ja tärkkelyspitoisten sivuvirtojen hyödyntämiseen pienissä paikallisissa laitoksissa ja tuotetun etanolin väkevöimiseen keskitetysti (St1, 2007, St1, 2008). Lisäksi jäteraaka-aineeseen perustuvaa etanolin tuotantoa suunnittelevat UPM ja Lassila & Tikanoja, jotka ovat ilmoittaneet kehittäneensä uuden, kaupan ja teollisuuden jätteitä hyödyntävän etanolin ja energiantuotantokonseptin (L&T, 2008).

3. Yhdyskuntajätteet

Taulukko 1. Yhdyskuntajätteet Suomessa vuonna 2007 (Tilastokeskus 2008).

	Jättemäärä	Käsittely			
		Kierrätys	Energia- käyttö	Poltto jäte- voimalassa	Sijoitus kaa- topaikalle
	tonnia				
Sekajäte yhteensä	1 599 034	65 991	73 602	72 149	1 387 292
Erilliskerätyt yhteensä, josta	1 075 884	887 283	162 299	2 300	24 002
Paperi- ja kartonkijäte	389 736	389 500	72	108	56
Biojäte	277 426	261 873	7 339	13	8 201
Lasijäte	136 396	135 322	0	0	1 074
Metallijäte	28 454	28 441	0	8	5
Puujäte	48 811	8 905	38 574	30	1 302
Muovijäte	31 585	9 698	21 426	11	450
Sähkö- ja elektroniikka- romu	50 528	50 381	0	26	121
Muut ja erittelemättömät	112 948	3 163	94 888	2 104	12 793
Kaikki yhteensä	2 674 918	953 274	235 901	74 449	1 411 294

3.1 Sekajäte eli kaatopaikoille päätyvä jäte

Vuonna 2007 kaatopaikoille sijoitettiin 1,4 miljoonaa tonnia sekajätettä. Yhdyskuntajätteen koostumusta Suomessa on selvitetty muun muassa YTV-alueella (Jokinen, 2000; YTV, 2004; Jokinen, 2005; YTV, 2008), Turussa (Roström ja Uggeldahl, 2003), Savonlinnan seudulla (Karvonen ja Voutilainen, 2007) ja Päijät-Hämeessä (Päijät-Hämeen jätehuolto, 2006) tehdyissä lajittelututkimuksissa.

Taulukossa 2 on vertailtu kotitalouksien sekajätteen ja taulukossa 3 päivittäistavarakauppojen sekajätteen koostumusta eri tutkimuksissa. Tulosten vertailua hankaloittaa jätejakeiden erilainen jaottelu. Tutkimusten laajuus ja suoritusajankohta (vuosi, vuodenaika) poikkeavat myös toisistaan. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että vaikka kierrätys onkin tehostunut, yli puolet kaatopaikoille päätyvästä sekajätteestä on edelleen biohajoavaa jätettä, kuten biojätettä, paperia tai pahvia. Kotitalouksien sekajätteessä biojätteen osuus on 20–40 %, kun taas kauppojen sekajätteessä elintarvikejätteiden osuus on yli 50 %.

Pääkaupunkiseudulla vuonna 2003 kaatopaikalle päätyvästä sekajätteestä noin puolet oli peräisin kotitalouksista (YTV, 2004). Alueen palvelujen ja teollisuuden jätteestä 26 % oli peräisin tukkukaupasta, 12 % päivittäistavarakaupasta, 12 % hotelli- ja ravintolatoiminnasta ja 11 % sosiaali- ja terveydenhuoltopalveluista (Jokinen, 2005).

Taulukko 2. Kotitalouksien sekajätteen koostumus (YTV, 2004; YTV, 2008; Roström ja Uggehdahl, 2003; Karvonen ja Voutilainen, 2007; Päijät-Hämeen Jätehuolto, 2006).

Jätejae	YTV (v. 2003)	YTV (v. 2007)	Turku (v. 2002)	Savonlinna (v. 2007)	Päijät-Häme (v. 2006)
Keittiöbiojäte	28 %	29 %	34–41 %	20–26 %	22 %
Puutarha- ja muu biojäte	10 %	12 %	ei eroteltu	1 %	2 %
Keräyspaperi ja -pahvi	22 %	18 %	14–18 %	21 %	12 %
Muu palava (muovi, puu, tekstiili, paperi, vaipat jne.)	31 % (muovi 13 %)	32 % (muovi 16 %)	31–32 %	23 % (muovi 12 %)	31 % (muovi 10 %)
Lasi	4 %	4 %	2–4 %	2 %	3 %
Metalli	4 %	3 %	2–4 %	4 %	5 %

Taulukko 3. Päivittäistavarakaupan sekajätteen koostumus pääkaupunkiseudulla ja Turussa (Jokinen, 2005; Roström ja Uggehdahl, 2003).

Jätejae	Pääkaupunkiseutu	Turku
Biojäte	52 % (eläinperäistä 25 %, muuta 28 %)	55 %
Paperi ja pahvi	19 %	10 %
Muu palava jäte (muovi)	13 %	32 %

3.2 Erilliskerätty biojäte

Erilliskerätty biojäte koostuu Suomessa pääosin keittiöbiojätteestä ja puutarhajätteestä, joten se sisältää huomattavia määriä tärkkelystä ja selluloosaa. Tässä hankkeessa tutkittiin tarkemmin erilliskerätyn biojätteen koostumusta YTV-alueella, ja tulokset on esitetty kohdassa 5.2.1.

3. Yhdyskuntajätteet

Biojätettä erilliskerättiin Tilastokeskuksen mukaan (2008) vuonna 2007 Suomessa lähes 280 000 tonnia. Kerätystä biojätteestä hyödynnetään materiaalina jopa 94 % ja energiana 2,6 %. Kaatopaikalle biojätteestä päätyi vain 3 %. Suurin osa biojätteestä kierrätetään kompostoimalla pääasiassa tunneli- tai rumpukompostointilaitoksissa tai aumakompostoinnilla. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnan YTV:n Ämmässuolla sijaitseva ensimmäinen kompostointilaitos otettiin käyttöön 1998, ja keväällä 2007 alueelle on valmistunut uusi tunnelikompostointilaitos (YTV, 2009). Laitoksen kapasiteetti on 49 000 tonnia biojätettä. Vuonna 2007 YTV-alueella erilliskerättiin 36 000 tonnia biojätettä kotitalouksista ja 15 000 tonnia kaupoista ja teollisuudesta (YTV, 2009). Kompostoidun biojätteen tavanomaisin hyödyntämistapa on sen käyttö kasvualustana pihossa ja julkisissa kohteissa.

Biojätteen energiahyödyntäminen mädättämällä on myös lisääntymässä Suomessa. Mädätysprosessissa muodostuu biokaasua erilaisten mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa (Suomen biokaasuyhdistys, 2009). Biokaasu on kaasuseos, joka sisältää tavallisesti 40–70 % metaania, 30–60 % hiilidioksidia ja hyvin pieninä pitoisuuksina muun muassa rikkiyhdisteitä. Biokaasua voidaan hyödyntää sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä orgaanista jäännöstä lannoitteena. Suomessa oli vuonna 2007 toiminnassa neljä yhteismädätyslaitosta, jotka käsittelivät erilaisia biojätteitä yhdessä lantojen ja puhdistamolietteiden kanssa (Kuittinen et al., 2008). Uusia biokaasulaitoksia on suunnitteilla esimerkiksi Kiteelle, jossa Biovakka Oy:n tavoitteena on käynnistää biokaasuntuotanto erilliskerätystä biojätteestä, karjanlannasta ja puhdistamolietteisistä vuoden 2009 aikana (Karjalainen, 2009).

3.3 Keräyspaperi

Puussa on keskimäärin 45 % selluloosaa, 30 % hemiselluloosaa ja 25 % ligniiniä (Metso, 2009; Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009). Paperi- ja kartonkituotteet voivat koostua joko kemiallisesta tai mekaanisesta massasta, kiertokuidusta tai näiden erilaisista yhdistelmistä. Kemiallinen massa eli sellu valmistetaan keittämällä kemikaalien avulla ja mekaaninen massa hiertämällä, jolloin puun kuidut irrotetaan pääosin mekaanisesti toisistaan. Lisäksi paperituotteet voivat sisältää erilaisia täyte- ja lisäaineita.

Painopaperi ja paperituotteet kuuluvat tuottajavastuun piiriin (Suomen ympäristökeskus, 2009). Suomessa hyväksytyjä keräyspaperin tuottajayhteisöjä ovat Paperinkeräys Oy ja Suomen Keräystuote Oy. Tuottajayhteisöillä on valtakun-

nallinen keräysverkosto, ja ne vastaavat jäsentensä puolesta keräyspaperin 75 %:n hyödyntämistavoitteen saavuttamisesta. Kiinteistökohtaisessa keräyksessä kiinteistö kustantaa keräysastian ja paikan ja tuottajayhteisö jätehuollon siitä eteenpäin.

Kotikeräyspaperi sisältää Suomessa keskimäärin 60 % sanomalehtiä, 30 % aikakauslehtiä, 3–4 % toimistopaperia sekä 4–5 % muita papereita ja aaltopahvia. Lisäksi se sisältää 2 % epäpuhtauksia, jotka ovat jotakin muuta kuin paperia ja pahvia. Koostumus vaihtelee hieman eri vuodenaikoina, mikä näkyy selvimmin kesäisin, jolloin sanomalehtien osuus nousee. Sanomalehtien keski-ikä on kotikeräyspaperissa 1,5 kk ja aikakauslehtien 3,8 kk (Paperinkeräys Oy, 2009).

Aluekeräysverkosto on vuosien mittaan laajentunut jo sangen kattavaksi, ja jopa 70 % Suomessa kulutetusta paperista ja kartongista kerätään talteen (Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009). Keräyspaperia kerätään kotitalouksien lisäksi kaupoista, teollisuudesta ja toimistoista. Suomessa keräyspaperin ja -pahvin osuus paperin ja kartongin tuotannossa käytetyistä raaka-aineista on noin 5 %. Paperinkeräys Oy:n keräyspaperiostot kotimaasta vuonna 2007 olivat 581 200 tonnia, josta tuottajavastuun alaista kotikeräyspaperia hankittiin 274 000 tonnia. Paperi- ja kartonkiteollisuus käytti määrästä 97 %, ja loput hyödynsi lämmöneristeitä valmistava teollisuus. Kierrätetyt pahvi- ja kartonkipakkaukset on käytetty Suomessa hylsykartongin raaka-aineena ja lehdet uuden luettelo- ja sanomalehtipaperin valmistuksessa. Vaalean toimistokeräyspaperin hyödyntää kaksi pehmopaperitehdasta, jotka valmistavat siitä wc-paperia, talouspyyhkeitä ja nenäliinoja.

Suomessa käytetään lähes kaikki täältä saatavissa oleva kierrätyskuitu (Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009). Suomen metsäteollisuus käyttää vuosittain noin 750 000 tonnia keräyspaperia raaka-aineenaan. Kierrätyskuidun osuus Suomessa paperi- ja kartonkiteollisuuden kuituraaka-aineesta on kuitenkin vain noin 5 %. Tähän syynä on se, että Suomessa tuotetusta paperista yli 90 % menee vientiin, jolloin paperi otetaan talteen lähinnä Keski-Euroopassa.

Keräyspaperin kysyntä ja hinta laskivat loppuvuodesta 2008 maailmanlaajuisesti (Paperinkeräys Oy, 2009). Keräyspaperin käyttö väheni myös Suomessa tehtaiden seisokkien ja koneiden sulkemisten takia. Poikkeuksellisen vaikeaa ylläpitämisaluetta helpotettiin ensisijaisesti keräyspaperin viennillä.

3.4 Pakkaukset

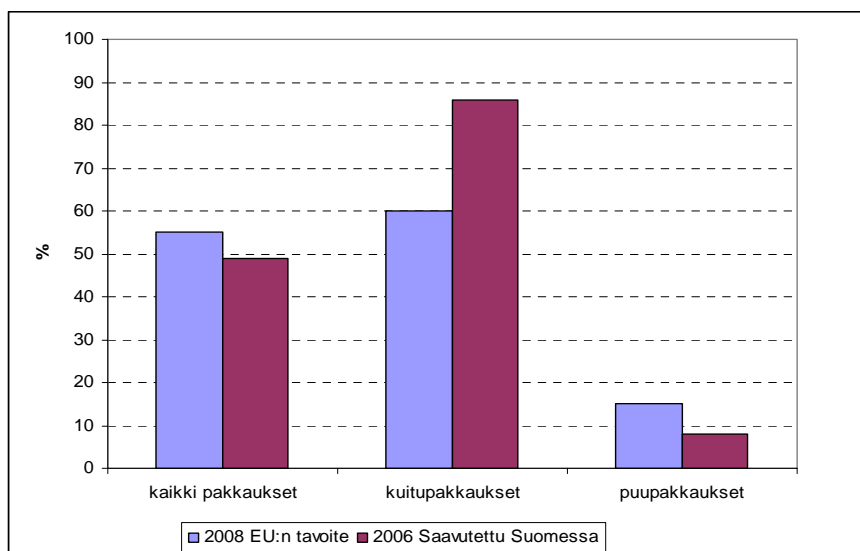
EU:n pakkausdirektiivi (94/62/EY) velvoittaa pakkaajia ja maahantuojia huolehtimaan markkinoille toimittamiensa pakkausten kierrättämisestä ja hyötykäytöstä. Pakkauksia ovat mistä tahansa materiaaleista koostuvat tuotteet, joiden tarkoituksena on säilyttää ja suojata tavaroita sekä mahdollistaa niiden käsittely ja kuljetus tuottajalta kuluttajalle tai käyttäjälle. Pakkausjätettä syntyy sekä teollisuudessa että kotitalouksissa, joten vain osa pakkausjätteestä on määritelmän mukaisesti yhdyskuntajätettä. Esimerkiksi aaltopahvista 70 % kerätään kaupasta, 20 % teollisuudesta ja 10 % kotitalouksista (Jokela, 2008).

Pakkausten tuottajavastuusta huolehtii Suomessa Pakkausalan ympäristörekisteri PYR Oy, joka koostuu yhdeksästä materiaaliakohtaisesta tuottajayhteisöstä. Materiaaliryhmät ovat aaltopahvi, teollisuuskuitu, kuluttajakuitu, nestepakkaukskartonki, muovi, lasi, metalli, pantilliset juomapullot ja puu (PYR, 2009). Telemällä sopimuksen PYR:n kanssa yritys siirtää markkinoille toimittamiensa pakkausten tuottajavastuuvollisuudet tuottajayhteisöille. Pakkausalan tuottajayhteisöt vastaavat kierrätettävän ja hyödynnettävän pakkausjätteen vastaanotosta, keräyksestä kuljetuksesta, kierrätyksestä, hyödyntämisestä ja muusta jätehuollosta sekä niistä aiheutuvista kustannuksista. Tuottajayhteisöt sopivat keräämisestä pakkauksia hyödyntävien yritysten kanssa eivätkä itse kerää pakkauksia. Kotitalouksien pakkausjätteet ovat yleensä normaalia kotitalousjätettä, jonka jätehuollosta kunnalliset jätehuoltolaitokset vastaavat.

Puu- ja kuitupakkaukset muodostavat kaksi kolmasosaa Suomessa markkinoille tulevista pakkauksista (Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009). Kuitupakkauksia ovat aaltopahvipakkaukset, teollisuuskuitupakkaukset, nestepakkaukset (esimerkiksi maito- ja mehutölkit) sekä kartonkipakkaukset (esimerkiksi keksi- ja muropaketit). Kuitupohjaiset pakkaukset sekä puupakkaukset voisivat soveltaa raaka-aineeksi esimerkiksi bioetanolia valmistavalle biojalostamolle. Näiden pakkausmateriaalien kierrätyksestä huolehtivia tuottajayhteisöjä sekä kierrätystä on käsitelty taulukossa 4.

Suomessa tuottajayhteisöt ovat pääasiassa saavuttaneet asetetut tavoitteet keräämällä pakkausjätteen teollisuudesta ja kaupasta. Yli 90 % pakkauksista käytetään uudelleen tai hyödynnetään uusien tuotteiden raaka-aineena tai energiana (PYR, 2009). Vuosittain käytetään yli kaksi miljoonaa tonnia pakkauksia, joista syntyy pakkausjätettä runsaat 670 000 tonnia. Tästä hyödynnetään yli 520 000 tonnia. Kokonaiskäytöstä vain alle 160 000 tonnia eli 9 % päätyi kaatopaikalle vuonna 2006. EU on pakkausdirektiivissään asettanut kuitupakkauksille kierrä-

tyksen vähimmäistavoitteeksi 60 % ja puupakkauksille 15 %, jotka oli saavutettava vuoden 2008 loppuun mennessä. Kuitupakkausten osalta Suomen 86 %:n kierrätystoteutus ylittää tämän jo selvästi, ja puupakkausista vain 8 % päätyi kierrätykseen (kuva 1). Lisäksi noin 80 % puupakkausjätteestä poltettiin energiaksi (Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009).



Kuva 1. Pakkausjätteiden kierrätys Suomessa ja EU:n tavoitteet (PYR, 2009).

Kuitupakkauksille on Suomessa olemassa toimivat kierrätysjärjestelmät ja käyttökohteet. Monissa pakkausmateriaaleissa on jo suunnittelussa otettu huomioon niiden toimivuus olemassa olevissa kierrätysjärjestelmissä, ja kartongin raaka-aineeksi huonommin kelpaavat materiaalit ovat käytännössä poistuneet käytöstä. Kuitupakkauksia on hyödynnetty Suomessa pääasiassa hylsykartongin raaka-aineena. Kuitupakkauksien sisältämät laminointikerrokset (alumiini, polymeeri) eivät haittaa niiden kierrättämistä. Hylsykartongista valmistetaan hylsyjä, joita käytetään tuoterullien sisustoina paperi- ja kartonkiteollisuudessa sekä tekstiililankojen, muovikalvojen, joustopakkausten ja metallifolioiden tuotannossa. Hylsykartonkia on tuotettu Suomessa yhteensä noin 300 000 tonnia vuodessa, josta Stora Enson Corenson tehtailla Porissa 130 000 t/v, Varkaudessa 100 000 t/v ja Sonoco-Alcoren tehtailla Karhulassa 67 000 t/v (Myllymaa et al., 2008).

3. Yhdyskuntajätteet

Taulukko 4. Kuitupakkausten tuottajayhteisöt ja kierrätys (PYR, 2009).

Tuottajayhteisö	Kerättävä materiaali	Kierrätys	Määrät
Suomen NP-kierrätys Oy	Kartonkiset nestepakkaukset, joiden pääraaka-aineena on puu. Sisältävät usein polyeteeniä tai muuta polymeeriä sekä alumiinia.	Kartonkikuitu pestään irti muovista ja pakkauskuidusta valmistetaan hylsykartonkia.	Yht. n. 30 000 t/v Kauppojen yhteydessä n. 900 aluekeräyspistettä
Suomen Aaltopahvi-yhdistys ry	Aaltopahvi, joka sisältää pääasiassa puukuitua, tärkkelysliimaa ja pieniä määriä painovärejä.	Kierrätysprosessissa irrotettu muovi ja mahdollinen alumiinifolio kuumennetaan, jolloin muovi kaasuntuu ja alumiini erottuu pieninä palloina. Alumiini kierrätetään ja muovikaasu poltetaan energiaksi.	Yht. n. 170 000 t/v
Suomen Kuluttajakuitu ry	Kuitupohjaiset kuluttajapakkaukset, esim. murokoteloita, sokeri- ja jauhopusseja, munakennoja, kertakäyttöastioita, paperietikettejä ja erilaisia ryhmäpakkauksia.		Taajamissa n. 1300 aluekeräyspistettä Yht. n. 50 000 t/v
Suomen Teollisuus-kuitu Oy	Kuitupohjaiset teollisuuspakkaukset ja kääreet, paperisäkit ja rullien kartonki. Usein muovilaminoituja tai -päällystettyjä tuotteita.		Yht. n. 32 000 t/v
Puupakkausten Kierrätys Oy	Kuormalavat, muut puu- ja vaneripakkaukset sekä puiset lavarakenteet kuten väliseinät ja tuet.	Lastulevyteollisuuden raaka-aine, uusien puupakkausten raaka-aine, viher- ja maise-marakentaminen, kompostointi.	Poistuu käytöstä 164 000 t/v

Vuoden 2009 alussa markkinatilanne on sekä keräyskartongin että aaltopahvin osalta oli kuitenkin vaikea (Jokela, 2008). Tähän on vaikuttanut heikentynyt taloustilanne sekä osaltaan myös Stora Enson ilmoitus Corenson Varkauden hylsykartonkikoneen sulkemisesta vuoden 2008 lopussa (Stora Enso, 2008). Varkauden hylsykartonkitehtaaseen kuuluvat uusiokuitulaitos ja EcoGas-voimalaitos jatkoivat kuitenkin toimintaansa, vaikka kartonkikone suljettiin. Uusiokuitulaitoksessa keräyskuiduista prosessoidaan kierrätykseen soveltuvaa kuitumassaa ja pakkausten sisältämä muovi ja alumiini voidaan jatkossakin hyödyntää energiana EcoGas-voimalaitoksessa. Jatkossa kuitumassa tullaan hyödyntämään myös Stora Enson muilla Suomen-tehtailla. Suomessa on edelleen hyötykäyttäjiiä, mutta uusia käyttökohteita sekä energiahyödyntämisen mahdollisuutta kartoitetaan parhaillaan (Jokela, 2008).

3.5 Rakennusjäte

Rakennusjätteitä syntyi Suomessa noin 1,3 miljoonaa tonnia vuonna 2006, kun maamassoja ei oteta tarkastelussa huomioon (Tilastokeskus, 2009). Rakennusjätettä ei luokitella yhdyskuntajätteeksi silloin, kun se on muodostunut ammattimaisesta toiminnasta. Sitä tarkastellaan tässä kuitenkin lyhyesti, koska suhteellisen suuri osa siitä on puuperäistä materiaalia. YTV:n selvityksen (Perälä ja Vainio, 2004) mukaan pääkaupunkiseudulla syntyi vuonna 2003 rakennusjätettä noin 280 000 tonnia. Rakennusjätteen koostumus vaihteli sen mukaan, oliko kysymyksessä uudis-, korjaus vai purkutyömaa. Keskimäärin syntyneestä rakennusjätteestä 29 % oli puuperäistä jätettä, 46 % kiviainespohjaista, 11 % metalleja ja loput muita sekalaisia jätteitä.

Green Net Finland ry:n (2005) selvityksen mukaan kaatopaikoille sijoitetaan vuosittain 0,4 miljoonaa tonnia rakennusjätettä, josta valtaosa on polttokelpoista. Rakennusjätteestä noin 15 % muodostuu rakentamisvaiheessa ja 85 % rakennusten korjaus- ja purkuvaiheissa. Rakennus- ja purkujätteestä hyödynnetään noin 1 miljoonaa tonnia, siitä kaksi kolmasosaa materiaalina ja yksi kolmasosaa polttoaineena. Oulun seudulla rakennusjätteiden lajittelu ja hyötykäyttöön ohjautuminen toteutuvat hyvin ylijäämämaan, asfaltin, betonin, metallin ja puun osalta; sen sijaan pahvin, lasin, muovin ja styroxin kierrätys on vähäistä (Oulun seudun ympäristövirasto, 4/2008).

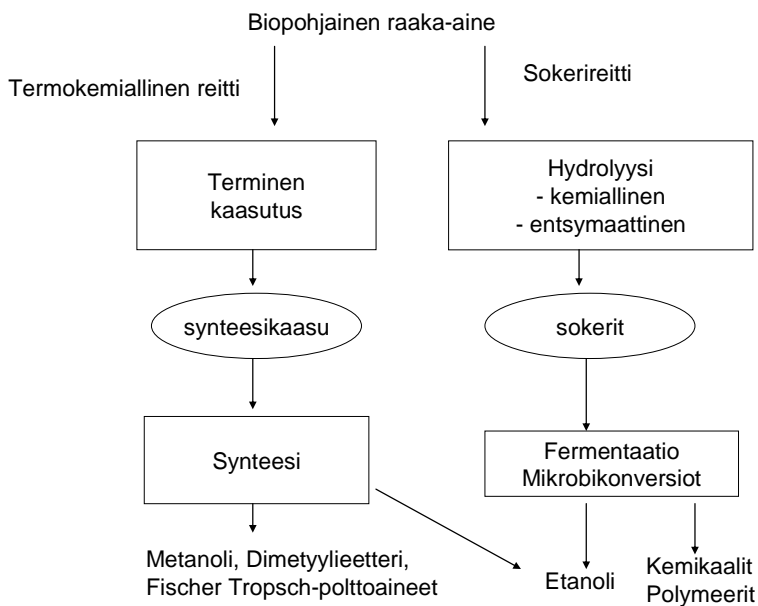
Päästökauppa ja öljyn hinnan nousu vaikuttivat 2000-luvulla rakennusjätteen houkuttelevuuteen, ja niistä jopa kilpailtiin (Laukkanen, 2006). Myös rakennusjätteiden osalta huono taloudellinen tilanne vuoden 2008 syksyllä heikensi kysyntää ja hyödyntämistä. Puuperäinen rakennusjäte on myös potentiaalinen raaka-aine biojalostamokäyttöön.

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena

Biojalostamossa biopohjaista raaka-ainetta hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti biopolttoaineiden, kemikaalien ja bioenergian tuotannossa. Biojalostamo tuottaa fossiilisista raaka-aineista tehtyjä tuotteita korvaavia tuotteita käyttäen termisiä, kemiallisia tai bioteknisiä menetelmiä tai niiden yhdistelmiä (Kamm ja Kamm, 2007). Biomassan hiilihydraatteja voidaan prosessoidaan erilaisiksi tuotteiksi sokerireittiä tai termokemiallista reittiä hyödyntäen (kuva 2). Sokerireitillä hiilihydraatit hajotetaan sokereiksi entsyymaattisesti tai kemiallisesti ja sokerit konvertoidaan edelleen erilaisiksi kemikaaleiksi. Reitin tuotteita voivat olla etanoli tai erilaiset sokereista saatavat välituotteet, kuten meripihkahappo, fumaarihappo, 3-hydroksi propionihappo tai 3-hydroksi butyrolaktoni (Werpy ja Petersen, 2004), jotka voidaan edelleen prosessoida kemikaaleiksi tai polymeereiksi. Esimerkkeinä potentiaalisista uusista biopolymeereistä ovat meripihkahaposta ja sen johdannaisista tuotetut polyamidit ja polyesterit (Bechthold et al., 2008). Termokemiallinen reitti tuottaa biomassasta välituotteina esimerkiksi pyrolyysiöljyä tai synteetiskasua, jotka voidaan käyttää suoraan polttoaineena tai jatkojalostaa edelleen (Crocker ja Crofcheck, 2006).

Kemian teollisuus perustuu toistaiseksi lähes yksinomaan fossiilisten raaka-aineiden käyttöön. Biomassaa hyödynnetään laajenevassa mitassa polttoaineiden tuotannossa. Biomassapohjaisten prosessien talouden kannalta tulee olemaan oleellista kehittää teknologioita, joilla polttoainetuotantoon voidaan yhdistää biopohjaisten kemikaalien tuotantoa (Bozell, 2008). Yhdyskuntajäte sisältää runsaasti hiilihydraattipitoista ainesta, jota voitaisiin hyödyntää bioetanolin lisäksi myös sellaisten tuotteiden valmistuksessa, joiden jalostusaste on oleellisesti suoraa energiakäyttöä korkeampi.

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena



Kuva 2. Biopohjaisen raaka-aineet prosessointi sokerireittiä tai termokemiallista reittiä hyödyntäen.

4.1 Liikenteen biopolttoaineet

EU:ssa uusiutuvien energialähteiden käytön edistämistä pidetään tärkeänä hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ja polttoaineen omavaraisuuden parantamiseksi. Direktiivillä 2003/30/EY pyritään edistämään biomassasta valmistettujen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käyttöä liikennepolttoaineena. Direktiivin mukaan biopolttoaineiden energiasisällön perusteella lasketun osuuden olisi vuonna 2010 oltava 5,75 % kaikesta liikennepolttoaineiden myynnistä. Suomessa astui voimaan 1.1.2008 em. direktiivin ohjaamana laki biopolttoaineiden käytön edistämisestä (446/2007). Komission tammikuussa 2008 julkaisemassa direktiiviehdotuksessa uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä esitetään sitovaa 10 % biopolttoainevelvoitetta vuodelle 2020. Ehdotuksessa kiinnitetään huomiota biopolttoaineiden tuotannon sosiaaliin ja ympäristövaikutuksiin ja esitetään tuotannolle ympäristökestävyyskriteereitä.

Biopolttoaineiden käyttö on maailmanlaajuisesti arvioiden toistaiseksi vähäistä. Etanolin osuus liikennepolttoaineista vuonna 2005 oli 1,1 % ja biodieselin 0,3

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena

% . Polttoaine-etanolin kokonaistuotanto vuonna 2005 oli 18 miljoonaa öljykevi-valenttitonnia (Mtoe) ja vuonna 2006 noin 21 Mtoe (Nylund ja Aakko-Saksa, 2007). EU-maissa tuotettiin vuonna 2005 biopolttoaineita 3 Mtoe, pääosin biodieseliä. Vuonna 2007 tuotanto on noussut noin 8 Mtoe:iin, joka on noin 3 % liikennepolttoaineiden kokonaiskulutuksesta (EU Biofuels Barometer, 2007).

4.2 Polttoaine-etanolin tuotto

Etanolin uskotaan säilyvän tärkeimpänä globaalina tieliikenteen biopolttoaineena ainakin vuoteen 2015 asti (von Weymarn, 2007). Etanolia valmistetaan pääasiassa fermentoimalla sokereita *Saccharomyces cerevisiae* -hiivan avulla. Kaikista tuotetusta etanolista noin 60 % valmistetaan sakkaroosipitoisista viljelykasveista, kuten sokeriruo'osta ja sokerijuurikkaasta, ja noin 40 % tärkkelyspitoisesta materiaalista, lähinnä maissista ja vehnästä (Balat et al., 2008). Tärkkelyspitoisten raaka-aineiden tärkkelys on ennen fermentointia hydrolysoitava sokereiksi. Sakkaroosi- ja tärkkelyspitoisiin viljelykasveihin perustuva prosessi on tunnettua tekniikkaa ja käytössä polttoaine-etanolin tuotannossa laajassa mittakaavassa Brasiliassa ja Yhdysvalloissa, jotka tuottavat yhteensä 70 % maailman polttoaine-etanolista (Balat et al., 2008). Ruokakasveihin perustuvan biopolttoainetuotannon ongelmia ovat muun muassa raaka-aineen viljelyn vaatima suhteellisen suuri fossiilisen energian määrä ja maankäyttöön sekä polttoainetuotannon ja elintarviketuotannon väliseen kilpailuun liittyvät vaikutukset (Farrell & Gopal, 2008). Suomen olosuhteissa on laskettu ohrapohjaisen bioetanolin tuottamisen ja käytön aiheuttavan fossiilisia polttoaineita enemmän kasvihuonekaasupäästöjä johtuen erityisesti maanviljelyn typpilannoitteiden aiheuttamista päästöistä (Soimakallio et al., 2009).

Sakkaroosista ja tärkkelyksestä alkavien tuotantoprosessien ohella bioetanolia voidaan tuottaa myös selluloosasta. Luonnossa selluloosa ei yleensä esiinny puhtaana vaan ligniiniin ja hemiselluloosaan liittyneenä ns. lignoselluloosana. Lignoselluloosa koostuu suuresta joukosta rakenteeltaan ja koostumukseltaan hyvin erityyppisiä kasviperäisiä materiaaleja, joiden selluloosapitoisuus vaihtelee välillä 30–50 %, hemiselluloosapitoisuus välillä 10–35 % ja ligniinipitoisuus välillä 10–40 % (Balat et al., 2008). Tuotannon koko elinkaaren aikaiset sosiaaliset ja ympäristövaikutukset huomioon ottaen erilaiset selluloosapitoiset maa- ja metsätalouden sivutuotteet ja jätteet ovat ruokakasveja edullisempi etanolin raaka-ainevaihtoehto (Farrell & Gopal, 2008). Maa- ja metsätalouden jätteiden ohella myös yhdyskuntajätteet on identifioitu potentiaalisiksi polttoaine-etanolin

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena

raaka-aineiksi (Tyson et al., 1996). Sekajätteen selluloosanpitoisuus on samaa tasoa (noin 45 %) kuin tyypillisissä maa- ja metsätalouden jätteissä, ja hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuudet ovat suhteellisen alhaiset (van Wyk, 2001). Kalo-go et al. (2007) ovat laskeneet sekajäte-etanoliprosessin elinkaaren aikaisen fossiilisen energian kulutuksen olevan alhaisempi kuin vilja- tai selluloosa-etanoliprosesseissa.

Etanolin tuottoa varten lignoselluloosan selluloosa ja hemiselluloosa hydrolysoidaan ensin sokereiksi käyttäen laimeahappo-, väkevähappo- tai entsyymihydrolyysiä. Glukoosisaanto laimeahappohydrolyysissä on 50–70 % teoreettisesta maksimista; väkevähappo- ja entsyymaattisessa hydrolyysissä saanto voi olla huomattavasti korkeampi (Hamelinck et al., 2005). Selluloosan rakenteesta johtuen sen hydrolysointi on vaikeampaa kuin tärkkelyksen. Lignoselluloosapitoi-sen materiaalin tehokas entsyymaattinen hydrolyysi edellyttää yleensä materiaalin esikäsittelyä rakenteen avaamiseksi ja hydrolysoituvuuden parantamiseksi. Ylei-simmin käytetty esikäsittelymenetelmä on höyryräjäytys, jossa materiaalia kuu-mennetaan paineistetulla höyryllä usean minuutin ajan, minkä jälkeen paine nopeasti lasketaan (”räjäytys”). Höyryräjäytystä voidaan tehostaa happokatalyy-tillä. Muita käytettyjä esikäsittelymenetelmiä ovat muun muassa erilaiset partik-kelikokoa pienentävät menetelmät sekä happo-, alkali- ja liuotinkäsittelyt (Hayes, 2008). Erilaiset sellumassan keittomenetelmät toimivat myös selluloos-an hydrolysoitavuutta parantavina esikäsittelyinä, vaikka toisaalta kuidun kier-rätyksen on todettu huonontavan selluloosan hydrolysoituvuutta (Nazhad et al., 1995).

1900-luvulla on ollut käytössä useita lignoselluloosan laimea- tai väkevähap-pohydrolyysiin perustuvia etanoliprosesseja. Ne eivät kuitenkaan ole olleet kil-pailukykyisiä silloin, kun fossiilisia polttoainetta on saatavilla, eikä yhtään näistä prosesseista ole enää käytössä kaupallisessa etanolin tuotannossa (Hayes, 2008). Lignoselluloosapitoisiin raaka-aineisiin perustuvien prosessien ongelmana ovat usein korkeat pääomakustannukset, jotka johtuvat muun muassa monivaiheisista prosesseista.

Tällä hetkellä lignoselluloosapohjaiset etanolintuotto prosessit ovat voimak-kaan tutkimus- ja kehitystyön kohteena. Erilaisiin raaka-aineisiin ja erityyppisiin konversioteknologioihin perustuvia prosesseja kehitellään etenkin Yhdysvallois-sa ja useat yhtiöt ilmoittavat rakentavansa kaupalliseen tuotantoon tähtääviä laitoksia. Joukossa on myös yhdyskuntajätettä raaka-aineena käyttäviä prosesseja, joissa suunnitellaan käytettäväksi useita toisistaan poikkeavia teknologioita,

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena

kuten väkevähappohydrolyysiä ja hiivafermentaatiota tai kaasutusta ja bakteeri-fermentaatiota (taulukko 5).

Taulukko 5. Lignoselluloosa-etanoli prosesseja kehittäviä yhtiöitä (Waltz, 2008; Decker, 2008; Fulcrum bioenergy, 2008; Cleantech, 2008).

Yhtiö (sijainti)	Raaka-aineet	Teknologia
Abengoa (Espanja)	Maissin korjuujäte, korsi-biomassat	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio, termokemiallinen
ALICO (Florida)	Puu, sitrusjäte, puutarhajäte	Termokemiallinen: kaasutus; fermentaatio
Bioengineering Resources /INEOS Bio (Arkansas)	Yhdyskuntajäte, maatalousjäte	Termokemiallinen: kaasutus; fermentaatio
BioEthanol Japan (Japani)	Puuperäinen rakennusjäte	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Biogasol (Lyngby, Tanska)	Maatalousjätteet, puutarhajätteet, paperi	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
BlueFire Ethanol, (Kalifornia)	Yhdyskuntajäte, olki, jätteenpuu	Väkevähappohydrolyysi; fermentaatio
China Resources Alcohol Corporation (Kiina)	Maissin korjuujäte	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Clearfuels Technology (Havaiji)	Sokeriruokojäte	Termokemiallinen
Colusa Biomass Energy (Kalifornia)	Riisinolki, riisin kuoret	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Flambeau River Biorifinery (Wisconsin)	Mustalipeä	Fermentaatio
Fulcrum Bioenergy (Kalifornia)	Yhdyskuntajäte	Kaasutus; katalyyttinen konversio etanoliksi
Greenfield Ethanol / Enerkem (Kanada)	Yhdyskuntajäte	Kaasutus; katalyyttinen konversio etanoliksi
logen (Kanada)	Korsibiomassat	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Lignol Innovations (Kanada)	Puuhake, maissin korjuujäte, lännenhirssi	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Mascoma (Massachusetts)	Lännenhirssi, puu	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Novus Energy (Minnesota) / Oxford Catalysts (UK)	Elintarvike-, maatalous-, kaatopaikkajätteet, jätevesilietteet	Mädätys; metaanin katalyyttinen konversio etanoliksi
Poet (South Dakota) / DuPont (Delaware)	Maissikuitu, maissin lapakot	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Range Fuels (Colorado)	Puujätteet	Termokemiallinen: kaasutus
Verenium (Massachusetts)	Sokeriruokojäte, puu	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio
Western Biomass Energy (Wyoming) / KL Process Design Group (Etelä-Dakota)	Puuhake, puujäte	Entsyyntinen hydrolyysi; fermentaatio

4. Yhdyskuntajätteet biojalostamon raaka-aineena

Maatalouden korsibiomassojen soveltuvuutta bioetanolin tuottoon Suomen olosuhteissa on selvitetty VTT:n ja MTT:n yhteisprojektissa. Projektissa arvioitiin korsibiomassasta 31 000 tonnia etanolia vuodessa tuottavan laitoksen investointi- ja tuotantokulujen olevan noin kaksinkertaiset verrattuna vastaavankokoiseen, viljan jyviä raaka-aineena käyttävään tuotantolaitokseen. Tuotannon kannattavuuden parantamiseksi esitettiin jatkokehityksenä muun muassa halvempien raaka-aineiden käyttöä, entsyymikulujen alentamista ja arvokkaiden sivutuotteiden identifiointia (von Weymarn, 2007).

Suomessa St1 aloitti jättepohjaisen etanolin tuotannon Lappeenrannassa syksyllä 2007 (St1, 2007), ja yhtiöllä on lisäksi tuotantolaitokset Närpiössä ja Haminassa sekä väkevöintilaitos Haminassa (St1, 2008). Konsepti perustuu sokeri- ja tärkkelyspitoisten sivu- ja jätevirtojen hyödyntämiseen pienissä paikallisissa laitoksissa ja tuotetun etanolin väkevöimiseen keskitetysti. Tyypillisesti laitoksen kapasiteetti on noin 1 000–2 000 m³ (800–1 600 tonnia) absoluuttista etanolia vuodessa. Laitoksen koon määrää raaka-aineen saatavuus tehtaan lähialueelta. Tavoitteena on vuoteen 2011 mennessä rakentaa noin kaksikymmentä tehdasta, joissa pystytään valmistamaan etanolia jopa 70 000 m³ (Pasanen, 2008). Etanolin tuotannon raaka-ainepohja on laajenemassa myös kotitalouksien, kaupan ja teollisuuden erilliskerättyyn biojätteeseen. St1 ja Kiertokapula ovat solmineet maaliskuussa 2009 yhteistyösopimuksen ja ensimmäinen, 15 000 tonnia biojätettä vuodessa käsittelevä laitos, rakennetaan vuoden 2009 kuluessa Karanojan jätteenkäsittelykeskukseen Hämeenlinnaan (Uusiouutiset, 2009).

Jättepohjaista etanolin tuotantoa Suomessa suunnittelevien UPM:n ja Lassila & Tikanojan prosessin raaka-aineita ovat paperi, kartonki, puu ja muovi. Konseptissa materiaalikierrätyksen jälkeen jäävän kuivajakeen kuidut hyödynnetään etanolin raaka-aineena, ja osa kuitujakeesta voidaan käyttää biokaasuntuottoon. Muovit hyödynnetään sähkön- ja lämmöntuotannossa (Hietanen, 2008).

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Hankkeen kokeellisessa osassa tutkittiin yhdyskuntajätteen hyödynnettävyyttä biojalostamo-konseptissa käyttäen malliprosessina polttoaine-etanolin tuottoa käymisprosessin avulla. Yhdyskuntien jätevirtojen kartoituksen perusteella valittiin runsaasti eloperäistä ainesta sisältävät jätefraktiot ja analysoitiin niiden koostumus. Jättemateriaalien sisältämien hiilihydraattien entsyymaattinen hydrolysoituvuus ja saatujen sokeripitoisten hydrolysaattien soveltuvuus etanoliprosessin raaka-aineeksi selvitettiin laboratoriotekoin.

Tutkittaviksi jätejakeiksi valittiin kaatopaikoille sijoitettava sekajäte ja erilliskerätty biojäte. Potentiaalisia raaka-aineita bioetanolin tuottoon olisivat myös muut kuitupitoiset jätejakeet, kuten kuitupakkaukset ja keräyspaperi. Niitä ei sisällytetty kokeelliseen tutkimukseen, koska niiden kierrätys- ja uudelleenkäyttöaste Suomessa on jo korkea.

5.1 Menetelmät

5.1.1 Raaka-aineet

Erilliskerätty biojäte kerättiin Ämmäsuon kompostointilaitoksen prosessilinjalta esimurskaimen jälkeen. Materiaalia kerättiin tammikuussa ja toukokuussa 2007. Jätteestä poistettiin suuret, vaikeasti homogenoitavat kappaleet (puu, luu, ei-biohajoavat muovipussit), yhteensä 5,7 % kuiva-aineesta, ja jättemateriaali hienonnettiin.

Sekajätteenä käytännön kokeissa käytettiin simuloitua sekajätettä, joka oli valmistettu YTV-alueen kotitalouksien sekajätteen koostumusta vastaavaksi

(YTV, 2004). Simuloitu sekajäte sisälsi (painoprosentteina tuorepainosta) biojätettä (Ämmässuo) 34 %, kukkamultaa 4,8 %, talouspaperia 3,2 %, sanoma-lehtipaperia 9 %, ruskeaa pahvia 3,2 %, kartonkipakkauksia 9,7 %, kirjoituspaperia 1,5 %, mustaa muovia 7,3 %, kovamuovia 7,3 %, alumiinifoliota 4,2 %, sahanpurua 3,1 %, puuvillakangasta 4,9 % ja vaippoja 7,8 %. Simuloidussa sekajätteessä oli mukana 91,8 % YTV-tutkimuksessa identifioituista jätejakeista. Simuloidusta sekajätteestä jätettiin pois lasi, elektroniikkaromu ja ongelmajätteet, yhteensä 8,2 % sekajätteestä.

Raaka-aineiden proteiiniipitoisuus määritettiin Kjeldahl-menetelmällä, rasvapitoisuus heksaaniuutolla, kokonaisligniiniipitoisuus gravimetrisesti Klason-ligniininä ja tärkkelyspitoisuus entsyymaattisesti käyttäen Total Starch -määrityskittiä (Megazyme). Raaka-aineiden monosakkaridikoostumus määritettiin hydrolysoimalla hiilihydraatit sokereiksi väkevällä rikkihapolla ja määrittämällä vapautuneet sokerit HPLC:llä. Biojätteen fruktoosipitoisuus määritettiin näytteestä ennen happohydrolyysiä. Näytteiden hiilihydraattipitoisuus laskettiin monosakkaridien summasta huomioimalla hydrolyysissä liitetyn veden osuus.

5.1.2 Hydrolyysi ja fermentaatio

Biojätteen mikrobipitoisuuden alentamiseen ennen entsyymaattista hydrolyysiä käytettiin höyrysterilointia autoklaavissa (120 °C / 20 min.) tai pastörinti/hygienisointikäsittelyjä, joissa raaka-ainetta kuumenettiin vesihauteessa 70–95 °C:n lämpötilassa 60–90 minuutin ajan.

Sekajätteen entsyymaattisen hydrolysoituvuuden parantamiseksi jätettä esikäsiteltiin käyttäen happokatalysoitua höyryräjäytystä tai happokäsittelyä 120 °C:n lämpötilassa. Höyryräjäytyskokeet tehtiin KCL:n kymmenen litran reaktorissa. Jätteeseen lisättiin rikkihappoa 0,5–5 % kuiva-aineesta, hapotettua jätettä inkuboitiin yön yli +4 °C:ssa ja tehtiin höyryräjäytyskäsittelyt 190–200 °C:n lämpötilassa viipymäajan ollessa 5–10 minuuttia. Termisessä happokäsittelyssä sekajätettä käsiteltiin 2 %:n rikkihappoliuoksessa autoklaavissa 120 °C:n lämpötilassa 20 minuutin ajan. Jätteen kuiva-ainepitoisuus käsittelyssä oli 15 %.

Jätteiden hydrolyysiin käytettiin selluloosaa ja tärkkelystä hydrolysoivia entsyymiseoksia. Käytetty sellulaasivalmiste oli Celluclast 1,5 L (Novozymes), jota täydennettiin kaupallisella β -glukosidaasivalmisteella Novozym 188 (Novozymes) tai erittäin alhaisen amylolyyttisen aktiivisuuden omaavalla β -glukosidaasivalmisteella (β -gluk 2). Käytetty α -amylaasivalmiste oli Spezyme Fred-L (Genencor International) ja amyloglukosidaasivalmiste Fermentzyme L-400

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

(Genencor International). Lisäksi käytettiin pektinaasivalmistetta Pectinex Ultra (Novozymes).

Raaka-aineiden hydrolysoituvuutta selvitettiin 1 %:n kuiva-ainepitoisuudessa tehdyissä hydrolyysikokeissa, joissa pH oli 5 ja lämpötila 45 °C. Amylaasia käytettäessä lisättiin tärkkelyksen nesteytysvaihe (95 °C / 90 min.) ennen varsinaista hydrolyysiä tai yhdistettiin tärkkelyksen nesteytys käytettyyn pastörinti-/hygienisointivaiheeseen. Sekajätehydrolyyseissä lisättiin hydrolyysiseokseen 0,02 % natriumatsidia mikrobitoiminnan estämiseksi. Hydrolyysituotteet määritettiin pelkistävinä sokereina käyttäen standardina glukoosia, ja osasta näytteitä analysoitiin muodostuneet sokerit kromatografisesti (HPLC, Dionex).

Etanolin tuottoa biojätteestä tutkittiin glyserolilukolla suljetuissa fermentaatiopulloissa ja bioreaktorissa käyttäen samanaikaista hydrolyysiä ja fermentaatiota (SSF). Biojäte steriloiitiin autoklaavissa (120 °C / 20 min.) tai hygienisoitiin/pastöroitiin (70–95 °C, 60–90 min.) ja jätteeseen lisättiin selluloosaa ja/tai tärkkelystä hydrolysoivat entsyymit ja leivinihiiva *Saccharomyces cerevisiae* (1 g/l). Hydrolyysi ja fermentaatio tehtiin 32 °C:n lämpötilassa pH:ssa 5. Amylaasia käytettäessä se lisättiin biojätteeseen hygienisointi-/pastörintikäsitteilyn yhteydessä tai tehtiin erillinen tärkkelyksen nesteytysvaihe (95 °C / 90 min.) ennen muiden entsyymien ja hiivan lisäystä. Etanolipitoisuus ja jäännössokeripitoisuudet määritettiin HPLC:llä. Fermentaatiojäännöksen lämpöarvo määritettiin menetelmällä CEN/TS 14918, ISO 1928 ja ravinneanalyysit tilattiin alihankintana Viljavuuspalvelu Oy:stä.

5.2 Biojäte etanolin raaka-aineena

5.2.1 Biojätteen koostumus

Biojäte on määritelmän mukaisesti eloperäistä, biohajoavaa jätettä. Biojätteen kokonaishiilihydraattipitoisuus oli lähes 50 % kuiva-aineesta, ja lisäksi se sisälsi rasvaa ja proteiineja yhteensä noin puolet hiilihydraattien määrästä. Biojätteessä lähes 40 % hiilihydraateista oli tärkkelystä (taulukko 6). Glukoosi on hiilihydraattifraktion pääkomponentti ja lähes 95 % biojätteen sokereista on kuusihiilisiä heksooseja (taulukko 7).

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Taulukko 6. Biojätteen koostumus.

Kuiva-ainepitoisuus	31,1 %
Kuiva-aineesta:	
Proteiini	14,0 %
Kokonaishiilihydraatit	47,5 %
Tärkkelys (sisältyy kokonaishiilihydraatteihin)	18,4 %
Ligniini	12,6 %
Rasvat	9,9 %
Tuhka	9,6 %
Sekalainen materiaali (esim. hajoamaton muovi)	5,7 %

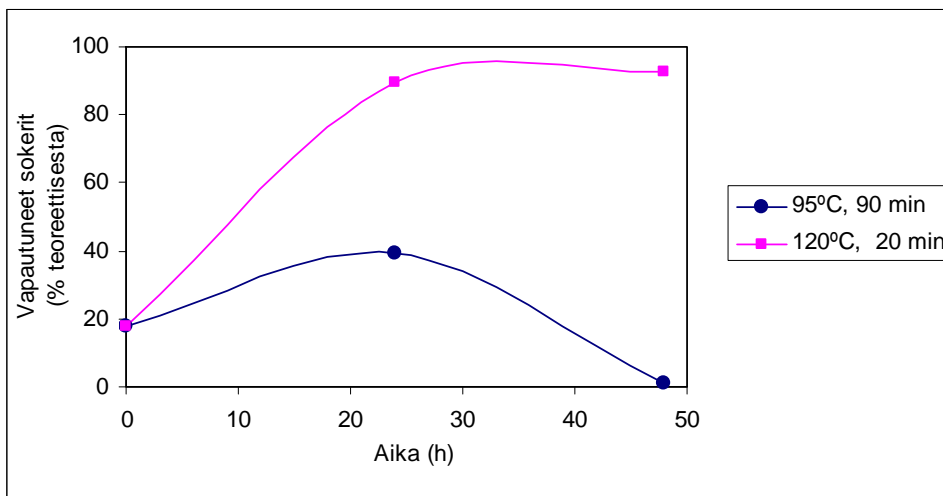
Taulukko 7. Biojätteen hiilihydraattien koostumus määritettynä happohydrolyysissä vapautuneina sokereina.

Monosakkaridit	% kuiva-aineesta
Ramnoosi	0,2
Arabinoosi	0,9
Galaktoosi	1,7
Glukoosi	39,4
Ksyloosi	2,1
Mannoosi	3,1
Fruktoosi	4,7
Yhteensä	52,3

5.2.2 Biojätteen entsyymattinen hydrolysoituvuus

Biojätteen entsyymattista hydrolysoituvuutta selvitettiin alhaisessa kuiva-ainepitoisuudessa tehdyissä hydrolyysikokeissa. Ennen entsyymattista hydrolyysiä biojäte steriloidtiin autoklavoimalla, jolloin sekä vegetatiiviset mikrobisolut että itiöt tuhoutuvat, tai lämpökäsiteltiin alle sadan asteen lämpötilassa, jolloin suurin osa vegetatiivisoluista tuhoutuu. Hydrolyysikokeet osoittivat että kuumennuskäsittely 95 °C:n lämpötilassa ei ollut riittävä hydrolysaattien mikrobiologisen stabiilisuuden varmistamiseen, vaan entsyymikäsittelyssä vapautuneet sokerit kuluivat hydrolyysin edessä ilmeisesti jätteeseen jääneiden itiöllisten bakteerien aineenvaihdunnan seurauksena. Höyrysteriloidun biojätteen hydrolysaateissa ei sokerien kulumista tapahtunut (kuva 3).

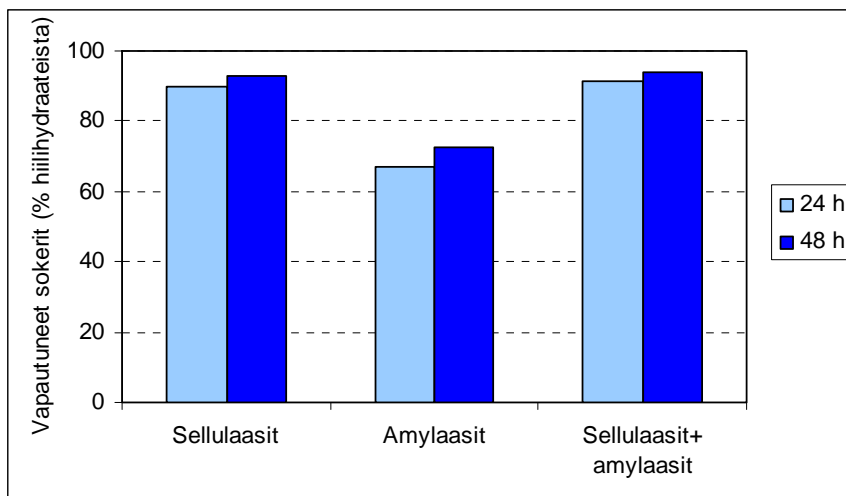
5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys



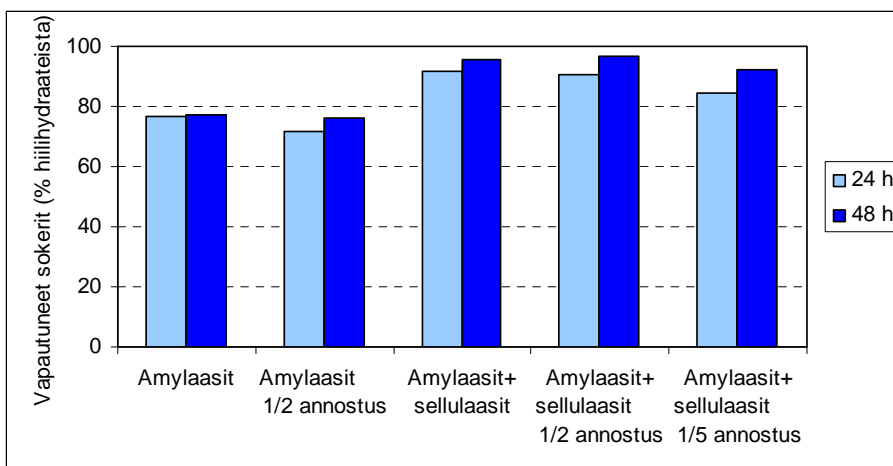
Kuva 3. Höyrysteriloinnin (120 °C / 20 min.) ja kuumennuskäsittelyn (95 °C / 90 min.) vaikutus hydrolysaattien mikrobiologiseen stabiilisuuteen biojätten entsymattisessa hydrolyysissä.

Biojätteen hiilihydraatit koostuvat pääasiassa selluloosasta ja tärkkelyksestä, ja lisäksi jätteessä on jonkin verran vapaita sokereita. Amylolyttisen entsyymikäsittelyn jälkeen yli 70 % ja sellulaasikäsittelyn jälkeen yli 90 % jätteen hiilihydraateista oli vapaina sokereina (kuva 4). Korkea hydrolyysiaste sellulaasiseosta käytettäessä selittyy käytetyssä β -glukosidaasivalmisteesta (Novozym 188) sivuaktiivisuutena olevalla korkealla amylolyttisellä aktiivisuudella. Käytetty sellulaasiannostus on normaalia lignoselluloosan hydrolyysissä käytettyä tasoa ja amylolyttisten entsyymien annostuksessa noudatettiin entsyymivalmistajan viljatärkkelykselle suosittamaa annostasoa. Hydrolyysikokeet osoittivat, että biojätteellä näitä annostuksia voidaan alentaa oleellisesti (kuva 5). Amylolyttisten entsyymien annoksen puolittaminen alensi hieman hydrolyysinopeutta mutta ei vaikuttanut lopputulokseen 48 tunnin hydrolyysissä. Amylolyttinen entsyymiseos pienellä sellulaasilisäyksellä tehostettuna vapautti yli 90 % biojätteen sokereista.

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys



Kuva 4. Steriloidun (120 °C, 20 min.) biojätteen entsymaattinen hydrolyysi sellulaaseja ja amylaaseja käyttäen (sellulaasit Celluclast 1,5 L ja Novozym 188, amylaasit Spezyme Fred L ja Fermentzyme L-400). Vapautuneet sokerit mitattu pelkistävinä sokereina.



Kuva 5. Amylaasi- ja sellulaasiannostuksen vaikutus steriloidun biojätteen entsymaattiseen hydrolyysiin (sellulaasit Celluclast 1,5 L ja β -gluk 2, amylaasit Spezyme Fred L ja Fermentzyme L-400). Vapautuneet sokerit mitattu pelkistävinä sokereina.

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

5.2.3 Biojätteen fermentaatio

5.2.3.1 Etanolin tuotto

Biojätteen soveltuvuutta etanoliprosessin raaka-aineeksi selvitettiin alustavasti fermentaatiopullokokeissa käyttäen samanaikaista hydrolyysiä ja fermentaatiota. Tällöin jätteen täydellinen sterilointi ei ollut tarpeen, vaan hiiva pystyi kilpailemaan pastörintilämpötilassa esikäsitellyn jätteen mikrobiflooran kanssa ja tuottamaan etanolia hyvällä saannolla. Sen sijaan kokonaan lämpökäsittlemättömässä jätteessä etanolisaanto jäi alhaisemmaksi kuin steriloidussa tai pastöroidussa jätteessä (taulukko 8).

Taulukko 8. Raaka-aineen steriloinnin ja pastöroinnin vaikutus etanolin tuottoon biojätteestä samanaikaista hydrolyysiä ja fermentaatiota käyttäen. Biojätteen kuiva-ainepitoisuus 10 % (entsyymit Celluclast 1,5 L ja Novozym 188).

Lämpökäsittely	EtOH	
	g/l	% teoreettisesta maksimimäärästä
Ei lämpökäsittelyä	15,9	63
Pastörointi 80 °C, 60 min	22,2	87
Sterilointi 121 °C, 20 min	20,3	80

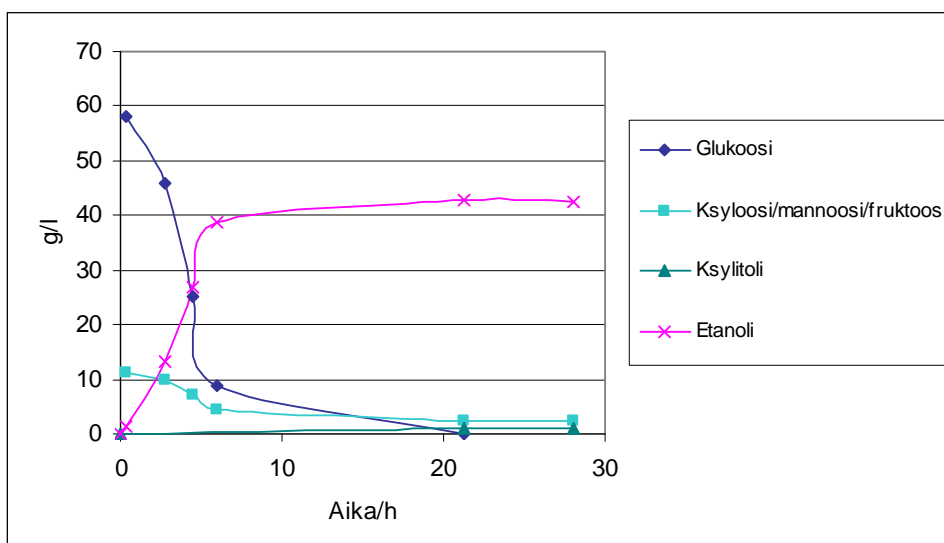
Biojätteen hydrolyysi ja fermentaatio voitiin suorittaa korkeassa kuiva-ainepitoisuudessa. 20 %:n kuiva-ainepitoisuudessa biojätteestä saatiin etanolia noin 40 g/l, kun hydrolyysiin käytettiin sellulaaseja ja amylaaseja. Amylaaseja käytettäessä etanolia saatiin noin 30 g/l. Biojäte sisälsi myös vapaita sokereita, jotka hiiva pystyy käyttämään etanoliksi ilman entsyymilisäystä (taulukko 9).

Taulukko 9. Etanolin tuotto pastöroidusta biojätteestä 10 %:n ja 20 %:n kuiva-ainepitoisuudessa (sellulaasit Celluclast 1,5 L ja Novozym 188; amylaasit Spezyme Fred L ja Fermentzyme L-400).

Entsyymit	EtOH (g/l)	
	kuiva-aine 10 %	kuiva-aine 20 %
Sellulaasit	19,4	42,9
Amylaasit	14,5	31,9
Sellulaasit ja amylaasit	19,1	39,0
Ei entsyymiä	7,4	15,5

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Etanolin tuottoa biojätteestä selvitettiin tarkemmin kontrolloiduissa olosuhteissa tehokkaalla sekoituksella varustetussa bioreaktorissa 20 %:n kuiva-ainepitoisuudessa. Biojäte steriloidtiin ennen fermentaatiota. Entsyyminä käytettiin sellulolyyttistä entsyymiseosta, jossa oli sivuaktiivisuutena jätteen tärkkelyksen hydrolyysiin vaadittavat entsyymiaktiivisuudet. Entsyymien vaikutuksesta biojätteen konsistenssi muuttui nopeasti juoksevaksi. Raaka-aineessa ei ollut entsyymejä tai hiivaa inhiboivia yhdisteitä, joten sokerien vapautuminen ja konversio etanoliksi oli nopeaa ja etanolipitoisuus 40 g/l saavutettiin alle kymmenessä tunnissa (kuva 6). Prosessin etanolisaanto laskettuna biojätteen kuusihiilistä sokereista oli yli 80 % teoreettisesta maksimiarvosta. Fermentaatioissa käytetty tavallinen leivinihiiva ei pysty käyttämään viisihiilistä ksyloosia etanoliksi mutta tuottaa siitä hitaasti ksylitolia.



Kuva 6. Biojätteen konversio etanoliksi bioreaktorissa samanaikaista hydrolyysiä ja fermentaatiota käyttäen. Jätteen kuiva-ainepitoisuus 20 % (entsyymit Celluclast 1,5 L ja Novozym 188).

5.2.3.2 Fermentaatiojäännöksen koostumus

Biojätteen fermentaatioissa jäännökseen päätyi 66 % raaka-aineen kuiva-aineesta. Jäännös sisälsi orgaanista ainetta 82,7 ja tuhkaa 17,3 % kuiva-aineesta

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Sentifugoimalla jäännös erotettiin kiintoaine-fraktioon, jonka osuus koko jäännöksestä oli 40 %, ja liuosfraktioon, jonka osuus koko jäännöksestä oli 60 %. Alkuperäisen fermentaatiojäännöksen ja kiintoaine- ja liuosfraktioiden koostumus sekä kiintoainefraktion lämpöarvo on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Fermentaatiojäännöksen koostumus ja lämpöarvo.

	Fermentaatio- jäännös	Kiintoaine- fraktio	Liuos- fraktio
Kuiva-ainepitoisuus (%)	17,3	27,6	10,5
Orgaaninen aines (% ka)	82,7	82,9	82,5
Tuhka (% ka)	17,3	17,1	17,5
Typpi (N), kokonais (% ka)	4,6	4,5	4,5
Fosfori (P), kokonais (% ka)	0,46	0,31	0,73
Kalium (K), kokonais (% ka)	0,03	0,02	0,04
Kalorimetrinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg		3,48	
Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg ka		12,6	

5.2.4 Biojäte-etanoliprosessi

5.2.4.1 Osaprosessit

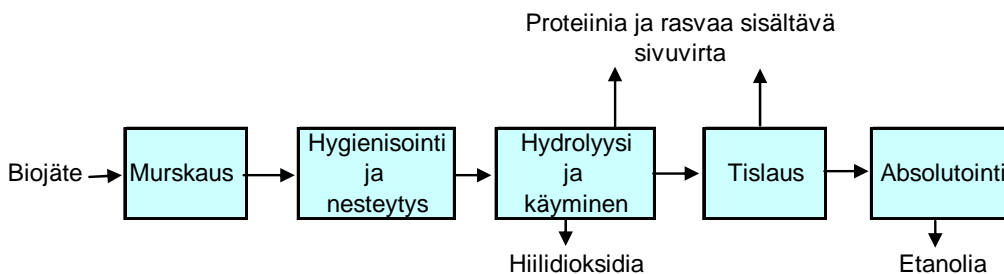
Edellä esitettyjen esikäsittely-, hydrolyysi- ja fermentaatiokokeiden perusteella etanolin tuotto biojätteestä voidaan toteuttaa 20–30 %:n kuiva-ainepitoisuudessa prosessilla, jonka päävaiheet ovat

- raaka-aineen murskaus
- tarvittaessa pH:n säätö arvoon 5 (biojätteen luontainen pH yleensä lähellä tätä arvoa)
- hygienisointi ja tärkkelyksen nesteytys
- selluloosan ja tärkkelyksen hydrolyysi muuntaminen sokereiksi ja sokeiden konvertointi etanoliksi
- etanolin erotus muusta materiaalista, tislauk ja absoluointi.

Valitut osaprosessit ja päämassavirrat on esitetty kuvassa 7. Prosessissa merkittävä osa raaka-aineesta päätyy sivuvirtaan. Sivuvirtoja syntyy fermentoinnin

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

jälkeisessä kiintoaineen erotuksessa sekä tislaukseen pohjatuotteena eli alitteena. Ne sisältävät biojätteen rasvojen ja proteiinien lisäksi muun muassa hiivasoluja ja hydrolysoitumattomia hiilihyaatteja.



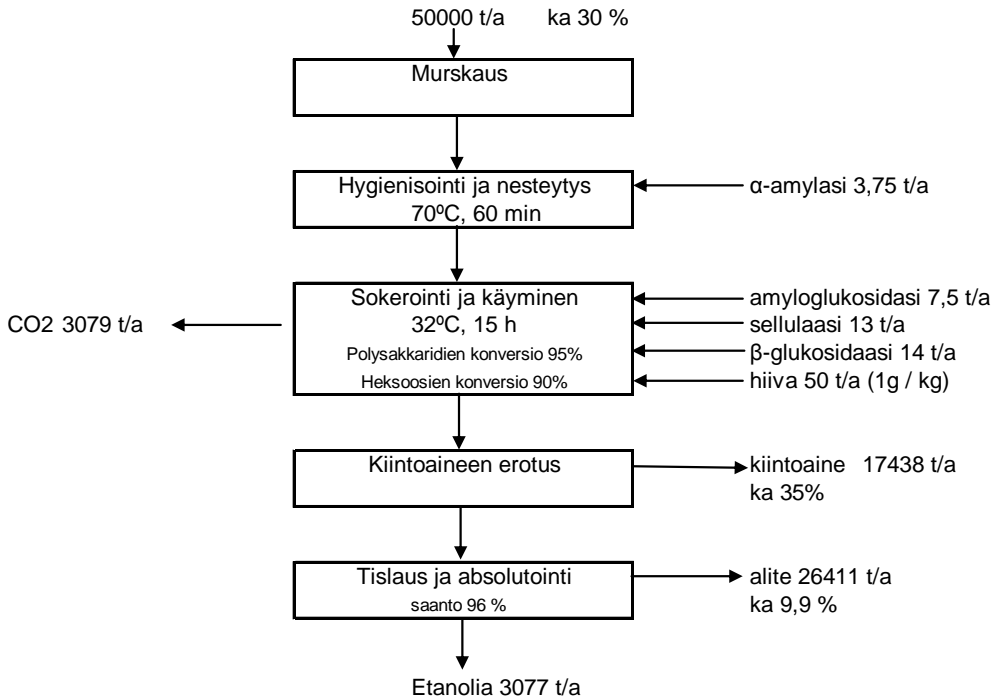
Kuva 7. Pelkistetty kaavakuva biojäte-etanoliprosessista.

5.2.4.2 Prosessin massatase

Kuvassa 8 on esitetty massatase etanoliprosessille, joka käyttäisi raaka-aineena YTV alueella kerättyä biojätettä, jota on 50 000 tonnia märkää biojätettä vuodessa. Biojätteen kuiva-ainepitoisuus on 30 %, ja jäte voidaan ohjata prosessiin tässä kuiva-ainepitoisuudessa. Prosessissa biojäte hienonnetaan mekaanisesti ja jätettä kuumennetaan 70 °C:n lämpötilassa tunnin ajan (hygienisointi). Tärkkelyksen nesteytys α -amylaasilla yhdistetään hygienisointivaiheeseen. Massa jäädytetään 32 °C:een, minkä jälkeen lisätään välittömästi muut entsyymit ja hiiva. Käymisen jälkeen laimea etanoliliuos erotetaan kiintoainefraktiosta.

50 000 tonnista biojätettä saadaan noin 3 077 tonnia puhdasta etanolia. Saanto on tällöin 20,5 % biojätteen kuiva-aineesta. Massatase perustuu prosessiin, jossa hydrolyysiin käytetään amylolyyttisiä entsyymejä sellulaasi-lisäyksellä tehostetuna. Jos hydrolyysiin käytetään vain amylolyyttisiä entsyymejä, prosessin etanolisaanto laskee laboratoriotulosten mukaan noin 15–25 %.

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys



Kuva 8. Hypoteettisen biojäte-etanolitehtaan massatase.

5.2.4.3 Prosessin sivuvirrat

Prosessissa merkittävä osa raaka-aineesta päätyy sivuvirtoihin, jotka muodostuvat fermentoinnin jälkeen erotetusta kiintoaineesta ja tislauksen alitteesta. Sivuvirtoihin päätyy biojätteen rasvojen ja proteiinien lisäksi muun muassa hydrolysoitumattomia hiilihydraatteja ja hiivasoluja. Prosessijäännöksessä on 59 % alkuperäisen raaka-aineen kuiva-aineesta. Jäännöksen kuiva-ainepitoisuus on noin 20 %, josta on proteiinia 24 %, rasvaa 17 % ja tuhkaa 1 %. Epäorgaanista ainesta on 17 %.

Jäännöksen rasvat ja proteiinit voitaisiin edelleen hyödyntää biokaasuksi mädättämällä. Erityisesti runsasrasvaiset jätteet soveltuvat hyvin mädätyksen raaka-aineksi, ja biokaasun saanto prosessissa on korkea (Hänninen, 2008). Mädätyksessä prosessijäännöstä ei tarvitse kuivata, ja se vaatisikin suuresta kosteuspitoisuudesta johtuen erittäin paljon energiaa. Biokaasun energiasisältö on tyypillisesti 6 kWh/m^3 (eli $21,6 \text{ MJ/m}^3$), ja biojätteen biokaasun tuottopotentialin on

arvioitu olevan 80–120 m³/t (Uotila, 2008). Liikennepolttoaineeksi biokaasu ei ilman puhdistusta sovellu, mutta kaasua voidaan sellaisenaan polttaa kaasumootorissa tai kattilassa. Kun fermentaatiojäännöksessä etanoliprosessin jälkeen on jäljellä noin 50 % alkuperäisestä biokaasun tuottoon kelpaavasta orgaanisesta aineksesta, voidaan fermentaatiojäännöksen energiapotentiaaliksi mädätyksessä arvioida 42 600 000–63 900 000 MJ/a eli noin 4,8–7,2 MJ/kg ka. Mädätyksen jälkeen materiaali voidaan hyödyntää kierrätysravinteina (Biovakka, 2009).

Jäännös voidaan myös polttaa sähkön ja lämmön tuottamiseksi. Fermentaatiojäännöksen lämpöarvo 12,6 MJ/kg ka on jonkin verran puun lämpöarvoa alhaisempi mutta vastaa suuruusluokaltaan esimerkiksi aikakauslehtipaperia (Alakangas 2000). Käytännössä jäännöksen lämpöarvo nousee jonkin verran, jos huomioidaan biojätteestä ennen fermentointia poistetun materiaalin (muovi, puu) osuus. Jäännöksen vesipitoisuus on kuitenkin korkea (65 % kiintoaine-fraktiossa ja 90 % alitteessa), joten jäännöksen kuivaus ennen polttoa voi oleellisesti vähentää siitä saatavan nettoenergian määrää.

5.3 Sekajäte etanolin raaka-aineena

5.3.1 Sekajätteen koostumus

Kaatopaikoille päätyvä sekajäte sisältää runsaasti biohajoavaa materiaalia, kuten biojätettä, paperia tai pahvia. Sekajätteen kokonaishiilihydraattipitoisuus on lähes 50 % kuiva-aineesta. Tärkkelyksen, rasvan ja proteiinin määrä sekajätteessä on alhainen (taulukko 11). Glukoosi on hiilihydraattifraktion pääkomponentti, ja noin 90 % sekajätteen hiilihydraateista koostuu kuusihiilisisistä sokereista (taulukko 12).

Taulukko 11. Sekajätteen koostumus.

Kuiva-ainepitoisuus	90,6 %
Kuiva-aineesta:	
Proteiini	3,3 %
Kokonaishiilihydraatit	49,0 %
Tärkkelys (sisältyy kokonaishiilihydraatteihin)	4,2 %
Ligniini	11,7 %
Rasvat	3,0 %
Tuhka	15,1 %
Lasi, elektroniikkaromu, ongelmajätteet*	8,1 %

* ei mukana simuloidussa sekajätteessä

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Taulukko 12. Sekajätteen hiilihydraattien koostumus määritettynä happohydrolyysissä vapautuneina sokereina.

Monosakkaridit	% kuiva-aineesta
Ramnoosi	<0,1
Arabinoosi	0,5
Galaktoosi	0,9
Glukoosi	44,7
Ksyloosi	4,6
Mannoosi	3,0
Fruktoosi	0,1
Yhteensä	53,8

5.3.2 Sekajätteen entsyymattinen hydrolysoituvuus

Lignoselluloosapitoisen materiaalin entsyymattinen hydrolyysi vaatii yleensä esikäsittelyä, jolla helpotetaan entsyymien tunkeutumista kuituun. Esikäsittelyllä pyritään avaamaan materiaalin rakennetta poistamalla osa hemiselluloosasta ja/tai ligniinistä tai käsittelemällä materiaalia mekaanisesti. Sekajätteen esikäsittelyä tutkittiin käyttäen termistä happokäsittelyä sekä happokatalysoitua höyryräjäytystä. Esikäsittelyjen jälkeen materiaalista erotettiin suodattamalla kiinteä jae ja suodos. Kiinteään jakeeseen jäi 30–90 % jätteen sokereista esikäsittelyn lämpötilasta ja happopitoisuudesta riippuen (taulukko 13). Käsitteilyn jälkeen erotetussa suodoksessa sokeripitoisuudet olivat kuitenkin alhaiset. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että esikäsittelyssä liuokseen vapautuneet sokerit hajosivat käsittelyn aikana korkean lämpötilan ja happamien olosuhteiden takia eivätkä siis olleet käytettävissä esimerkiksi etanolin tuottoon.

Esikäsittelyjen sekajätenäytteiden entsyymattista hydrolysoituvuutta selvitettiin alhaisessa kuiva-ainepitoisuudessa tehdyissä hydrolyysikokeissa. Selluloosyyttinen entsyymiseos vapautti 35 % esikäsittelemättömän sekajätteen sokereista. Esikäsittelyt paransivat hydrolysoituvuutta, mutta kun huomioidaan esikäsittelyn aikana tapahtunut sokerien hävikki, kokonaissaanto prosessissa ei noussut (taulukko 14). Hydrolyysiä pyrittiin tehostamaan suurentamalla sellulaasiannostusta hydrolyysin alussa tai lisäämällä hydrolyysiseokseen hydrolyysin aikana tuoretta sellulaasia, mutta oleellista parannusta ei saavutettu. Parannusta ei saavutettu myöskään lisäämällä hydrolyysiin tehokasta pektinaasivalmistetta.

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Sekajäte on koostumukseltaan hyvin heterogeenista. Pääosa hiilihydraateista on peräisin erilaisista paperi- ja pahvituotteista. Muita hiilihydraattipitoisia materiaaleja ovat muun muassa keittiö- ja puutarhajäte sekä osa tekstiileistä. Hiilihydraateissa on useita reaktiivisuudeltaan hyvin erilaisia jakeita, kuten ruokajätteen vapaita sokereita ja tärkkelystä sekä kemiallisesta ja mekaanisesta massata peräisin olevia kuituja. Jätepaperin entsyymattista hydrolyysiä tutkittaessa on todettu optimaalisen esikäsittelymenetelmän olevan erilainen eri paperilaaduilla (Filos et al., 2006). Ilmeisesti myös sekajätteen kaltaisen heterogeenisen materiaalin tehokas hyödyntäminen edellyttäisi jätteen fraktiointia ja fraktioiden erillistä esikäsittelyä ennen hydrolyysiä.

Taulukko 13. Sekajätteen esikäsittelyt. Sokerisaannot (% lähtöaineen sokereista) esikäsittelyn jälkeen kiinteässä jakeessa ja liuoksessa.

Sokerit % alkuperäisestä	Terminen happokäsittely 120 °C, 20 min		Höyryräjäytys I 2,5 % H ₂ SO ₄ , 190 °C, 5 min		Höyryräjäytys II 2,5 % H ₂ SO ₄ , 200 °C, 10 min		Höyryräjäytys III 5 % H ₂ SO ₄ , 190 °C, 10 min	
	Kiinteä jake	Liuos	Kiinteä jake	Liuos	Kiinteä jake	Liuos	Kiinteä jake	Liuos
Arabinoosi	19,9	77,8	23	4,6	<10	1,0	<10	0,7
Galaktoosi	51,2	11,5	42,1	3,8	25,8	1,6	<10	2,4
Glukoosi	90,8	1,7	73,4	0,7	47,2	0,4	30,6	1,1
Ksyloosi	>80	5,4	50,5	2,6	34,9	0,5	8,7	0,6
Mannoosi	86,8	1,3	70,4	1,4	48,8	1,4	12,1	1,8
Monosakkaridit yhteensä	91,6	3,6	70,1	1,2	46,4	0,5	27,1	1,1

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

Taulukko 14. Esikäsitelyn vaikutus sekajätteen entsyymaattiseen hydrolysoitavuuteen (sellulaasit Celluclast 1,5 L ja Novozym 188, pektinaasi Pektinex Ultra).

Esikäsitely	Sellulaasi-annostus	Hydrolyysi-aika	Vapautuneet sokerit	
			% kiinteän jakeen sokereista	% lähtöaineen sokereista
Ei esikäsitelyä	normaali	48 h	35	35
Terminen happokäsittely	normaali	48 h	38	35
Höyryräjäytys I	normaali	48 h	41	29
	suuri	48 h	44	31
	4 x normaali	4 x 24 h	50	35
	normaali + pektinaasi	48 h	41	29
Höyryräjäytys II	normaali	48 h	51	24
Höyryräjäytys II	normaali	48 h	68	18

5.3.3 Potentiaalisia sekajäte-etanoliprosesseja

Sekajäte on volyymiltaan biojätettä huomattavasti suurempi jätefraktio. Sen hiilihydraattipitoisuus on korkea, ja se on yleisesti tunnistettu tärkeäksi potentiaaliseksi polttoaine-etanolin raaka-aineeksi. Hiilihydraattikoostumuksen perusteella arvioiden Suomen vuotuisesta sekajättekertymästä olisi teoreettisesti mahdollista tuottaa 260 000 tonnia etanolia. Sekajätteen heterogeenisuus kuitenkin vaikeuttaa hiilihydraattien hyödyntämistä. Tässä työssä saatujen laboratoriotulosten perusteella fraktioimattoman sekajätteen hiilihydraateista alle 50 % voidaan hyödyntää entsyymaattiseen hydrolyysiin perustuvalla menetelmällä.

Suomessa UPM ja Lassila & Tikanoja kehittävät etanolin- ja energiantuotokonseptia, jossa raaka-aineena on kaupan ja teollisuuden paperi-, kartonki-, puu- ja muovijäte (Hietanen 2008). Lignoselluloosapohjaiset etanolintuottoprosessit ovat maailmanlaajuisesti voimakkaan kehitystyön kohteena, ja erityisesti USA:ssa on kehitteillä monia kaupalliseen tuotantoon tähtääviä prosesseja, joissa hyödynnetään useita erilaisia teknologioita tai teknologioiden yhdistelmiä. Joukossa on myös useita sekajätettä raaka-aineena käyttäviä prosesseja. Näitä on esitelty lyhyesti tämän katsauksen luvussa 4. Lähitulevaisuus tulee näyttämään, mitkä näistä konsepteista ovat taloudellisesti kilpailukykyisiä ja mahdollistavat etanolin kustannustehokkaan tuotannon.

Tehokas sekajätteen hyödyntäminen vaatii raaka-aineen tarkoituksenmukaista fraktiointia ennen prosessointia. Tämä voidaan tehdä joko jätteen keräyk-

5. Valittujen jätefraktioiden biotekninen hyödynnettävyys

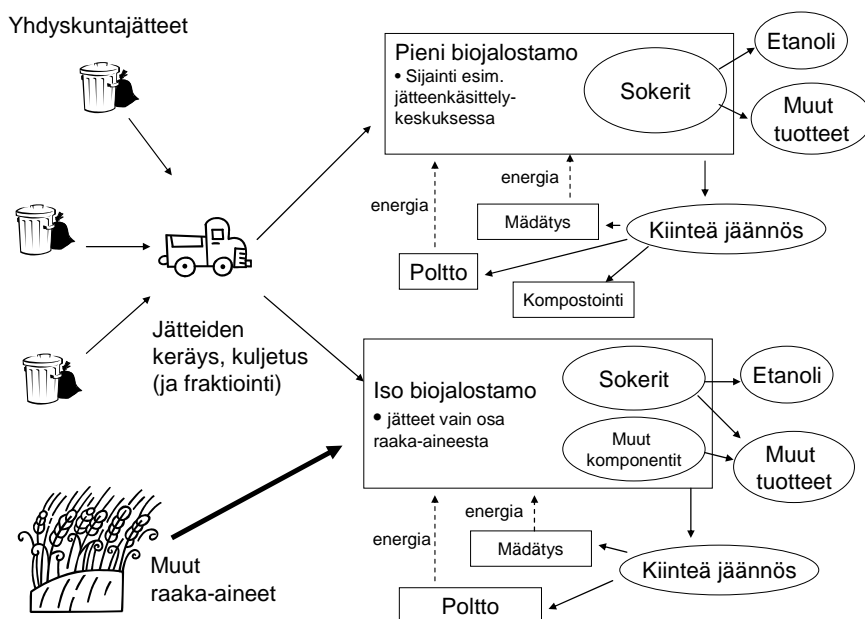
sen yhteydessä tai jätteen käsittelylaitoksessa. Erilaisille sekajätteen fraktioille sopivat erilaiset prosessit ja hyödyntämistavat. Sokerireitin lisäksi tulee mahdollisesti kysymykseen myös suora energiakäyttö. Biojalostamokäyttöön sopisivat hyvin esimerkiksi biojäte sekä paperi-, pahvi- ja puujätteet, joskin vaadittavat esikäsittelyvaiheet ennen hydrolyysiä voivat olla osin materiaalikohtaisia. Sekajätteestä peräisin olevien fraktioiden hyödyntämiseksi tarvitaan lisää tutkimusta, mutta esimerkiksi biojäte ja pahvi tai paperi soveltunevat hyvin raaka-aineiksi jo tunnettuihin prosessikonsepteihin.

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja

6.1 Raaka-aineen saatavuus

Raaka-aineena käytettyjen jätefraktioiden keräys ja kuljetus ovat keskeisiä biojalostamoprosessin kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Biojalostamon luonteva sijoituspaikka olisi tässä tapauksessa jätteenkäsittelykeskuksissa. Toinen vaihtoehto olisi jätteen kuljettaminen johonkin suurempaan etanolin tuottolaitokseen, jossa jäte olisi vain osa tehtaan hyödyntämästä raaka-aineesta (kuva 9). Sekajätteen tehokas hyödyntäminen helpottuu, jos sen sisältämät fraktiot (esimerkiksi kuitu, puu, muovit) voidaan ainakin osittain erottaa, joko keräyksen yhteydessä tai jätteen käsittelykeskuksessa.

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja



Kuva 9. Yhdyskuntajätteiden (biojäte, sekajäte) hyödyntäminen biojalostamossa.

Taulukossa 15 on esitetty jätehuollon eri toimijoiden vuonna 2007 vastaanottamia biojäte- ja sekajättemääriä. Biojättekertymä on selvästi suurin YTV-alueella. Lisäksi ainakin Pirkanmaan Jätehuolto, Päijät-Hämeen Jätehuolto ja Kiertokapula Oy keräävät biojätettä noin 10 000 t/a, josta voitaisiin pienen mittakaavan laitoksessa tuottaa etanolia 600 t/a. Biojäte olisi siis käytettävissä pienten biojalostamojen pääasiallisena tai osittaisena raaka-aineena. Se voisi myös täydentää suuren mitan biojalostamon raaka-ainetarjontaa, jolloin kyse olisi biojätteen hyödyntämisestä teollisena raaka-aineena. Sen merkitys koko ison biojalostamokokonaisuuden kannalta olisi kuitenkin suhteellisen vähäinen.

Sekajätteen hyödyntäminen vaatii enemmän jätteen esikäsittelyä kuin biojätepohjainen prosessi, eikä sekajäte näin ollen ilmeisesti suoraan sovellu edellä biojätteelle esitetyn konseptin mukaisen laitoksen raaka-aineeksi. Sekajätteen fraktiointi voi muuttaa tilannetta oleellisesti, sillä useat sen jakeet (etenkin paperi, pahvi ja puu) voivat sopia varsin hyvin myös sokerireittiin perustuvan biojalostamon raaka-aineiksi.

Sekajätteen fraktiot voivat täydentää mahdollisten biojalostamojen raaka-ainepohjaa, joka Suomen oloissa voi olla laitosten kannattavuuden rajoitteena. Maatalouden korsibiomassoihin perustuvan hypoteettisen Suomen oloihin sovel-

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja

tuvan etanolintuotantolaitoksen vuosikapasiteetiksi suunniteltiin 31 000 tonnia etanolia (von Weymarn 2007). Suurimmat alueelliset sekajättekertymät Suomessa ovat suuruusluokkaa 100 000–280 000 tonnia vuodessa (taulukko 15), mikä vastaisi vuosikapasiteettia 8 000–23 500 tonnia etanolia, jos etanolisaannon sekajättepohjaisessa prosessissa oletetaan olevan 50 % teoreettisesta. Yli 200 000 tonnia sekajätettä kerää vain YTV. Logistiselta kannalta pelkkään sekajätteeseen perustuva laitos soveltuisi Suomea paremmin Euroopan tiheään asutuille alueille, ja Suomessa sekajätettä tai sen fraktioita voitaisiin ensi sijassa käyttää suurissa laitoksissa muun raaka-aineen ohella. Vain pääkaupunkiseudulla on yhdyskuntajätteestä syntyvää materiaalia käytettävissä sellaisessa määrin, että pääosin sen käyttöön perustuva suuren mittakaavan laitos voisi tulla kyseeseen.

Taulukko 15. Jätehuollon eri toimijoiden vastaanottamia biojäte ja sekajättemääriä vuonna 2007 (JLY Tilasto, 2008; Kiertokapula, 2007).

Jätelaitos	Sekajäte		Biojäte	
	t	kg/as	t	kg/as
Eko-Kymppi (Kainuun jätehuollon kuntayhtymä)	15 085	179	4 569	54
Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy	23 899	178	7 894	59
Itä-Uudenmaan Jätehuolto Oy	34 245	374	1 998	22
Joensuun Seudun Jätehuolto Oy	32 991	304	2 380	22
Jätekukko Oy	54 752	259	5 720	27
Kymenlaakson Jäte Oy	54 077	289	4 972	27
Lakeuden Etappi Oy	43 613	324	4 832	36
Loimi-Hämeen Jätehuolto Oy	34 620	301	2 599	23
Metsäsairila Oy	13 333	233	2 883	50
Mustankorkea Oy	29 935	136	8 800	40
Nurmijärven kunta	11 566	299	954	25
Pirkanmaan Jätehuolto Oy	118 142	293	11 989	30
Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy	43 119	215	12 913	64
Rauman seudun jätehuoltolaitos	13 409	292	890	19
Rosk'n Roll Oy Ab	48 180	370	2 915	22
Savonlinnan Seudun Jätehuolto Oy	9 951	213	1 968	42
Turun Seudun Jätehuolto Oy	100 818	318	6 884	22
Vestia Oy	28 472	286	0	0
YTV Jätehuolto	284 417	282	49 817	50
Kiertokapula Oy	111 957	350	11 800	37

6.2 Prosessin taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Biojalostamoprosessin taloudellinen kannattavuus riippuu useista tekijöistä, joita ovat muun muassa

- raaka-aineen hinta ja kuljetuskustannukset
- laitosinvestointien suuruus
- laitoksen käyttökustannukset
 - sähkö
 - entsyymit ja kemikaalit
 - jäteveden käsittely
 - prosessissa käytettävä vesi
 - työvoima
- tuotteesta maksettava hinta
- tuotteen saanto prosessissa
- prosessin sivuvirtojen käsittelykustannukset
- sivutuotteista maksettava hinta.

Biojalostamoprosessin taloudellisuutta on arvioitu muun muassa tapauksissa, joissa biomassasta tuotetaan etanolia sokerireitin kautta. Esitetyissä arvioissa kautta linjan suurimmat kustannukset muodostuvat raaka-aine- ja pääomakustannuksista. Maatalouden selluloosapitoisia sivuvirtoja hyödyntävässä Suomen oloihin soveltuvassa ja nykyistä teollista tekniikkaa käyttävässä selluloosa-etanolitehtaassa (von Weymarn, 2007) merkittävimmät tekijät tehtaan tuotantokustannuksissa muodostivat entsyymit sekä raaka-aine. Tuotantokustannuksista entsyymien osuus oli 39 % ja raaka-aineen 36 %. Raaka-aineen esikäsittelyyn käytetty höyryräjäytys oli energiaintensiivisin prosessivaihe. Ruotsin olosuhteissa havupuuraaka-aineeseen pohjautuvassa etanolia päätuotteena valmistavassa biojalostamossa suurimmat tuotannon kustannukset muodostuivat pääomakuluista (noin 40 %) ja raaka-aineista (noin 35 %) (Sassner ja Zacchi, 2008). Entsyymikustannusten osuuden arvioitiin tässä tapauksessa olevan noin 11 %. Pitkälti samanlaiseen kustannusjakaumaan päädyttiin myös maissin korjuujätettä ja lehtipuuta raaka-aineena käytettäessä (Sassner et al., 2008).

Yhdyskuntajätteitä hyödyntävän prosessin kustannuksia alentaa raaka-aineen alhainen tai jopa negatiivinen hinta. Biojätteen ja sekajätteen keräyksestä huolehtivat pääasiassa kunnalliset jätehuoltoyritykset, jotka kuljettavat nämä jätefraktiot jätteenkäsittelykeskuksiin. Myllymaa et al. (2008) ovat arvioineet, että laitospompostoidun biojätteen hyödyntämisketjun kustannukset ovat pääkaupunkiseu-

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja

dulla 145 €, josta kuljetuksen osuus on 59 €. Noin 55 % kustannuksista syntyy siis biojätteen laitostuotannosta sekä prosessissa syntyvän kompostijäännöksen hyödyntämistä/loppusijoituksesta. Vuonna 2009 Ämmässuon jätteidenkäsittelykeskuksessa peritään sekajätteen vastaanottamisesta 119 € ja biojätteestä 78 € (YTV, 2009). Lisäksi on arvioitu, että jätteiden tuottajilta perittävät kustannukset jätteidenkäsittelystä nousevat tulevaisuudessa voimakkaasti (Suomen ympäristökeskus, 2009).

Biojätteen hiilihydraatit ovat suhteellisen helposti hydrolysoituvia, mikä alentaa biojäte-etanoliprosessin esikäsittely- ja entsyymikustannuksia maa- ja metsätalouden lignoselluloosapitoisia raaka-aineita käyttävään prosessiin verrattuna. Kannattavuuden kannalta haasteeksi nousee rajoitetusta raaka-aineen määrästä johtuva pieni laitostuotanto, jonka takia pääomakustannukset tuotemäärää kohden voivat muodostua hyvin korkeiksi. Tuotannon integrointi muuhun teolliseen toimintaan ja prosessissa syntyvien sivuvirtojen ja jäännösten toimivat sijoitusratkaisut ovat oleellisen tärkeitä kannattavuutta parantavia tekijöitä.

Sekajätteen hyödyntäminen biojalostamossa vaatii esikäsittelymenetelmien kehittämistä, jolloin prosessikustannukset olisivat tältä osin kalliimpia kuin biojätteellä. Jätteen integroitu hyötykäyttö isomman mitan biojalostamon yhteydessä vaatinee myös sen fraktiointia. Sekajätteen hyötykäyttöön liittyviä mahdollisia fraktiointitekniikoita ei ole tässä yhteydessä selvitetty. Biomassaa isossa mitassa hyödyntävät biojalostamot ovat pisimmillään vasta pilotointivaiheessa, eikä kannattavuuden arviointiin julkisesti saatavissa olevaa luotettavaa lähtötietoa ole käytettävissä. Näin ollen sekajätteen prosessoinnin tarkempi kannattavuuden arviointi tässä yhteydessä on ennen aikaista.

Prosessin sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen on erittäin oleellinen tekijä myös jätettä jalostavan laitoksen taloudellisen kannattavuuden takia. Esimerkiksi edellä biojätteelle kaavailussa etanolin tuottoprosessissa yli 50% alkuperäisen raaka-aineen kuiva-aineesta päätyi prosessijäännökseen. Sivuvirtojen energiasisältö voidaan hyödyntää esim. mädättämällä materiaali biokaasuksi tai polttamalla se energiaksi. Näin tuotettu energia voidaan myös käyttää biojalostamon tarpeisiin. Koska prosessijäännöksen vesipitoisuus on korkea, kuivausprosessin optimointi ennen polttoa on hyvin keskeistä energiatalouden ja siten myös prosessin taloudellisen kannattavuuden kannalta. Mädätystä varten prosessijäännöstä ei tarvitse kuivata. Mädätyksen etuna polttoon verrattuna on myös mädätysjäännöksen ravinteiden hyödynnettävyys kierrätyslannoitteena.

Tuotteena biomassasta valmistetulla etanolilla on nähtävissä kysyntää lähivuosikymmeninä, mutta sen hintaan vaikuttavat lukuisat verotukselliset ja poliit-

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja

tisen tekijät. Lisäksi polttoaineena käytettävän etanolin kysyntään vaikuttaa myös raaka-öljyn hinta. Etanolin lisäksi hiilihydraateista voidaan sokerireitin kautta valmistaa tulevaisuudessa sitä arvokkaampia kemikaaleja ja polymeerejä, mikä antaa uusia mahdollisuuksia parantaa biojalostamoprosessien kannattavuutta.

6.3 Ympäristövaikutusten arviointi

Eräs keino kasvihuonekaasujen vähentämiseen ja ilmastonmuutoksen torjumiseen on korvata fossiilisia polttoaineita biopolttoaineilla kuten etanolilla. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon se, että myös biopolttoaineiden tuottaminen kuluttaa energiaa ja tuottoprosessissa muodostuu kasvihuonekaasuja. Kirjallisuudessa esitetään vaihtelevia lukuja biopolttoaineiden tuotannon energiataseista ja vaikutuksista kasvihuonekaasupäästöihin. Menichettin ja Otton (2009) mukaan uusimmissa LCA-tarkasteluissa esitetyt fossiilisen energian käytön alenemat öljypohjaisen polttoaineen tuottoon verrattuna vaihtelevat viljapohjaisella etanolilla välillä 16–85 % ja sokeriruoko-etanolilla välillä 78–100 %. Vastaavasti kasvihuonekaasupäästöjen alenemat ovat viljapohjaisella etanolilla välillä –4–90 % ja sokeriruokoetanolilla välillä 70–100 %. Energiataseeseen vaikuttavat merkittävästi muun muassa prosessiin käytetty energialähde (hiili/biomassa) sekä tuotannon sivuvirtojen energiasisällön hyödyntäminen. Tuotannon kasvihuonekaasupäästöistä huomattava osa on peräisin raaka-aineen viljelyvaiheesta ja liittyy typpilannoitteiden valmistukseen ja käyttöön.

Selluloosapitoiseen raaka-aineeseen pohjautuvien etanoliprosessien elinkaari-analyysejä on toistaiseksi tehty melko vähän. Menichettin ja Otton (2009) mukaan julkaistuissa analyyseissä puu- ja olkipohjaisille etanoliprosesseille saadut fossiilisen energian käytön alenemat öljypohjaisen polttoaineen tuottoon verrattuna vaihtelevat välillä 73–102 % ja kasvihuonekaasupäästöjen alenemat välillä 84–98 %. Tuotantoprosessin päästöjen lisäksi eräissä raporteissa (Fargione et al., 2008; Searchinger et al., 2008) kiinnitetään huomiota päästöihin, jotka aiheutuvat luonnontilaisen maan raivaamisesta etanolin raaka-aineen viljelyä varten, ja korostetaan jätebiomassan edullisuutta viljelykasveihin verrattuna.

Biojätteen osalta esitetty mahdollinen etanoliprosessi on todennäköisesti energiankulutukseltaan vähäisempi kuin selluloosaetanolin valmistusprosessi, ja sekajätteen prosessointia voidaan yksityiskohtaisen lähtötiedon puuttuessa karkeasti verrata selluloosapohjaista raaka-ainetta käyttävään prosessiin. Prosessiteknisillä ratkaisuilla sekä biojalostamon integroinnilla muihin tuotantolaitoksiin

6. Jätteitä hyödyntävän biojalostamon toteutettavuuteen liittyviä tarkasteluja

voidaan myös merkittävästi vaikuttaa energiankulutukseen ja päästöihin. Jättemateriaalia käyttävän prosessin ympäristövaikutukset voidaan kuitenkin luotettavasti arvioida vasta, kun muun muassa käytettävät keskeiset prosessiratkaisut, laitoksen koko ja sivuvirtojen hyödyntäminen tunnetaan.

7. Yhteenveto

Yhdyskuntien jätefraktioita voidaan Suomen olosuhteissa hyödyntää joko paikallisissa pienen mittakaavan biojalostamoissa tai suurissa, useita eri raaka-ainetta hyödyntävissä biojalostamoissa, jotka nähdään tulevaisuuden vaihtoehtoina uusiutuvien luonnonvarojen hyödyntämiseksi. Pienet biojalostamot voisivat sijaita esimerkiksi jätteenkäsittelykeskuksien yhteydessä, jolloin prosessin integrointi esimerkiksi mädätys- tai kompostointilaitoksiin parantaisi niiden tehokkuutta.

Yhdyskuntajätteistä sokerireittiin perustuvan biojalostamon raaka-aineeksi soveltuvat runsaasti hiilihydraatteja sisältävä fraktiot. Tällaisia jätefraktioita ovat erilliskerätty biojäte, sekajäte, kuitupakkaukset, keräyspaperi ja rakennusjätteen tietyt fraktiot. Useimmille näistä jakeista on kuitenkin jo olemassa toimivat hyödyntämisyjärjestelmät, joten ne jätettiin tämän selvityksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa arvioitiin erilliskerätyn biojätteen ja sekajätteen bioteknistä hyödynnettävyyttä biojalostamossa käyttäen esimerkkiprosessina etanolin tuottoa.

Erilliskerätty biojäte soveltuu teknisesti erittäin hyvin sokereita hyödyntävän biojalostamon raaka-aineeksi. Biojätteen hiilihydraatit ovat suhteellisen helposti hydrolysoituvia, jolloin prosessin etuina moniin muihin jättemateriaaleihin verrattuna ovat vähäisempi esikäsittelyn tarve ja selluloosaraaka-ainetta käyttävään prosessiin nähden pienemmät entsyymikustannukset. Biojätteen prosessoinnissa ei myöskään muodostu hiivaa inhiboivia yhdisteitä ja siten saanto etanoliprosessissa on korkea.

Biojäte soveltuu erityisesti käytettäväksi pienen mittakaavan paikallisissa laitoksissa. Erilliskerätyn biojätteen volyymit ovat kuitenkin pieniä: YTV-alueen erilliskerätyn biojätteen käyttävä laitos tuottaisi 3 000 tonnia etanolia vuodessa, ja kokonaisetanolintuottopotentiaali biojätteestä Suomessa on alle 20 000 tonnia vuodessa.

7. Yhteenveto

Kaatopaikoille menevä sekajäte on volyymiltaan biojätettä huomattavasti suurempi jätefraktio. Hiilihydraattikoostumuksen perusteella arvioiden Suomen sekajättekertymästä olisi teoreettisesti mahdollista tuottaa 260 000 tonnia etanolia vuodessa eli 166 000 öljykvivalenttonnia. Kun bensiinin kulutus Suomessa vuonna 2005 oli noin 1,9 miljoonaa tonnia (Sipilä ja Mäkinen, 2006), tämä etanolimäärä vastaisi yli 8 %:a vuotuisesta bensiinin kulutuksesta.

Sekajätteen heterogeenisuus vaikeuttaa hiilihydraattien hyödyntämistä, ja tässä työssä saatujen tulosten perusteella saanto fraktioimattomaan sekajätteeseen perustuvassa prosessissa ilmeisesti olisi alle 50 % teoreettisesta saannosta. Sekajätteen hyödyntäminen sokerireittiin perustuvassa biojalostamoissa edellyttääkin raaka-aineen fraktiointia ja prosessien edelleen kehittämistä, muun muassa esikäsittelyjen optimointia.

Biojalostamon sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen ja laitoksen integrointi muuhun teollisuuteen ja käsittelylaitoksiin vaikuttavat merkittävästi taloudelliseen kannattavuuteen ja ympäristövaikutuksiin.

Jätteitä hyödyntävän biojalostamon keskeisiä kysymyksiä:

- Jätteen kysyntä ja ”arvo” raaka-aineena ovat koko ajan kasvamassa, mikä saattaa vaikeuttaa biojalostamon jäteraaka-aineen saatavuutta. Toisaalta jätteiden käsittelykustannusten on arvioitu tulevaisuudessa kasvavan.
- Tulevaisuudessa sokeriraaka-aineesta voidaan mahdollisesti valmistaa etanolia arvokkaampia tuotteita, jolloin prosessin kannattavuutta voidaan edelleen kasvattaa.
- Biojalostamokonseptit ja niihin liittyvä teknologia ovat maailmanlaajuisesti voimakkaan kehitystyön kohteena, ja on mahdollista, että kehittyvät teknologiat tulevat merkittävästi parantamaan sekajätettä hyödyntävän prosessin tehokkuutta ja kannattavuutta.
- Jättemateriaaleja hyödyntävien biojalostamoiden ympäristövaikutusten arvioiminen on haasteellista ja vaatii lisäselvityksiä.

Johtopäätöksiä:

- Biojäte soveltuu sokeripohjaisen biojalostamon raaka-aineeksi, mutta sen määrät ovat suhteellisen pieniä, mikä asettaa haasteita tuotannon kannattavuudelle.

- Sekajätteen tehokas biojalostamokäyttö edellyttää jätteen fraktiointia joko keräyksen yhteydessä tai jätteenkäsittelylaitoksessa. Erotetut fraktiot ovat potentiaalisia biojalostamon raaka-aineita.
- Selluloosapohjaisen biomassan hyödyntämiseen liittyvä tutkimus tuottaa uusia teknologioita, jotka voivat tarjota mahdollisuuksia käyttää sekajätettä tai sen fraktioita biojalostamon raaka-aineena.
- Jätteiden jalostuksen integroiminen muuhun teolliseen tuotantoon helpottaa jätteiden tehokasta ja taloudellista hyödyntämistä raaka-aineena.

Lähdeluettelo

Painetut lähteet

- Alakangas, E., 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045.
- Balat, M., Balat H. & Öz, C., 2008. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science* 34: 551–573.
- Bechthold, I., Bretz, K., Kabasci, S., Kopitsky, R. & Springer, A., 2008. Succinic acid: a new platform chemical for biobased polymers from renewable resources. *Chem. Eng. Technol.* 31: 647–654.
- Bozell, J., 2008. Feedstocks for the future-biorefinery production of chemicals from renewable carbon. *Clean* 36: 641–647.
- Crocker, M. & Crofcheck, C., 2006. Biomass conversion to liquid fuels and chemicals. *Energieia* 17: 1–3.
- Decker, J. F., 2008. Going against the grain: ethanol from lignocellulosics. *Renewable Energy World Magazine*, 11(6).
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. & Hawthorne, P., 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319: 1235–1238.
- Farrell, A. & Gopal, A., 2008. Bioenergy research needs for heat, electricity and liquid fuels. *MRS Bulletin* 33: 373–380.
- Filos, G., Tziala, T., Lagios, G. & Vynios, D., 2006. Preparation of cross-linked cellulases and their application for the enzymatic production of glucose from municipal paper wastes. *Preparative Biochemistry and Biotechnology* 36: 111–125.

- Green Net Finland ry, 2005. Rakennusmateriaalin hyötykäytön lisääminen. Selvitys pien-
talarakentamiseen liittyvän rakennusmateriaalijätteen muodostumisesta, määräis-
tä, käsittelytavoista, kuljetuslogistiikasta sekä hyötykäytön kehittämismahdolli-
suuksista Uudellamaalla ja EKES-kuntayhtymän alueella. Raportti 12.12.2005.
- Hamelinck, C., Hooijdonk & G., Faaij, A., 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass:
techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and
Bioenergy* 28: 384–410.
- JLY Tilasto, 2008. Sekajäte ja erilliskerätty biojäte, toimialueelta, 2007, saatu Esa Num-
melalta 21.11.2008.
- Jokela, E., 2008. Aaltopahvin kierrätys haasteiden edessä. *Uusiouutiset* 8/2008.
- Jokinen, V., 2000. Pääkaupunkiseudun yhdyskuntajätetilasto sekä kotitalouksien sekajät-
teen määrän ja laadun seurantamenetelmä. YTV:n julkaisusarja C:14, YTV:n
monistamo, Helsinki 2000.
- Jokinen, V., 2005. Pääkaupunkiseudun palvelualojen sekajätteen laatu. YTV:n julkaisu-
sarja C 2005:1, YTV:n monistamo, Helsinki 2005.
- Kalogo, Y., Habibi, S., MacLean, H. L. & Joshi, S. W., 2007. Environmental implications
of municipal solid waste-derived ethanol. *Environmental Science & Technology*,
41: 35–41.
- Kamm, B. & Kamm, M. 2007. Biorefineries – Multi Product Processes. *Adv Biochem.
Engin. / Biotechnol.* 105: 175–204.
- Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S., 2008. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o
11. Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja n:o 4.
- Laukkanen, J., 2006. Kilpailu rakennusjätteistä kiihtyy. *Uusiouutiset* 17: 6–7.
- Menichetti E. & Otto, M., 2009. Energy balance and greenhouse gas emissions of biofu-
els from a life-cycle perspective. Pages 81–109 in R. W. Howarth and S.
Bringezu (eds.): *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with
Changing Land Use*.
- Merilehto, K., Rytönen, T. & Tyni, A., 2004. Kiinteän yhdyskuntajätteen virrat. Suomen
ympäristö 728, Helsinki 2004, 226 s.
- Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A. Isoaho, S., Zevenhoven, M., Ollikainen, M. & Dahlbo,
H., 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset
– jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Suomen ym-
päristö 39/2008, Ympäristönsuojelu, 192 s.

- Nazhad, M., Ramos, L., Paszner, L. & Saddler, J., 1995. Structural constraints affecting the initial enzymatic hydrolysis of recycled paper. *Enzyme and Microbial Technology* 17: 68–74.
- Nylund, N.-O. & Aakko-Saksa, P., 2007. Liikenteen polttoainevaihtoehdot. Kehitystilanne-raportti. Laaja versio. TEC TransEnergy Consulting Oy, 124 s.
- Oulun seudun ympäristövirasto, 2008. Rakennusjätteen Oulun seudun ympäristöviraston alueella. Raportti 4/2008.
- Pasanen A., 2008. Puhtaampia polttoaineita uusilla valmistustekniikoilla. *Ympäristö ja Terveys* 39: 7–8 (54–56).
- Perälä, A.-L. & Vainio, T., 2004. Pääkaupunkiseudun rakennustyömailla syntyvä rakennusjäte, Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 2004: 13, 19 s.
- Roström, H. & Uggeldahl, P., 2003. Kotitalouksien ja vähittäiskaupan jätteiden koostumuksen muutos Turussa 1987–2002, Lounais-Suomen ympäristökeskuksen moniste 9/2003, Turku 2003, Karhukopio Oy, 48 s.
- Saarinen E., 2009. Riita asumisjätteistä leimahti valtakunnalliseksi. *Uusiuutiset* 20: 4–7.
- Sassner, P. & Zacchi, G., 2008. Integration options for high energy efficiency and improved economics in a wood-to-ethanol process. *Biotechnology for Biofuels* 2008, 1: 4: 1–11.
- Sassner, P., Galbe, M. & Zacchi, G., 2008. Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass and Bioenergy* 32: 422–430.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D. & Yu, T.-H., 2008. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* 319: 1238–1240.
- Sipilä, K. & Mäkinen, T., 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistämisen Suomessa. Työryhmän mietintö. KTM Julkaisuja 11/2006. 132 s.
- Soimakallio, S., Mäkinen, T., Ekholm, T., Pahkala, K., Mikkola, H. & Paappanen, T., 2009. Greenhouse gas balances of transportation biofuels, electricity, and heat generation in Finland – Dealing with the uncertainties. *Energy Policy* 37: 80–90.
- Tekniikka & Talous, 2008. Biopolttoaineiden tuotannossa muhii miljardibisnes. Artikkelit 10.04.2008.

- Tyson, K. S., Rymes, M. & Hammond E., 1996. Future potential for MSW energy development. *Biomass and Bioenergy* 10: 111–124.
- Uusiouutiset, 2008. L&T aloittaa pakkausten kiinteistökeräyksen. *Uusiouutiset verkkoviesti* 13/2008.
- Waltz, E., 2008. Cellulosic ethanol booms despite unproved business models. *Nature biotechnology* 26: 8–9.
- Werpy, T. & Petersen, G. (eds.), 2004. Top Value Added Chemicals from Biomass, vol. I, Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas, US Department of Energy, Oak Ridge, TN.
- Von Weymar, N., 2007. Bioetanolია maatalouden sivuvirroista. *VTT Tiedotteita* 2412.
- Van Wyk, J., 2001. Biotechnology and the utilization of biowaste as a resource for bio-product development. *Trends in Biotechnology* 19: 172–177.
- YTV, 2004. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2004: 13, 77 s.
- YTV, 2008. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2007. *YTV:n julkaisuja* 15/2008.

Sähköiset lähteet

- Biovakka, 2009. Biovakan tuotteet ja palvelut. <http://www.biovakka.fi/index.php?pageid=18>. Luettu 5.3.2009.
- Cleantech, 2008. <http://cleantech.com/news/2265/novus-energy-oxford-catalysts-building-pilot-plant>. Luettu 30.1.2009.
- EU Biofuels Barometer, 2007. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/story?id=49461>. Luettu 23.1.2009.
- Euroopan ympäristökeskus, European Environment Agency, 2009. <http://www.eea.europa.eu>. Luettu 9.1.2009.
- Eurostat, 2009. Energy, transport and environment indicators, 2007 edition, Eurostat pocketbooks. <http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu>. Luettu 9.1.2009.
- Fulcrum bioenergy, 2008. Fulcrum bioenergy announces plans to build one of the first commercial scale ethanol plants using municipal solid waste as feedstock. <http://www.fulcrum-bioenergy.com>. Luettu 9.1.2009.

- Hayes, D. J., 2008. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges. Käsikirjoitus. <http://www.carbolea.ul.ie>. Luettu 9.12.2008.
- Hietanen, L., 2008. Kierrätysraaka-aineen kuidusta etanolia. BioRefine seminaariestys. <http://www.akseli.tekes.fi>. Luettu 15.11.2008.
- Hänninen, K., 2008. Biokaasutuksen peruseriaatteet. <http://www.kolumbus.fi/suomen.biokaasukeskus/docs/biokaasutuksenperuseriaatteet.ppt>. Luettu 20.4.2009.
- Jätelaitosyhdistys, 2009. <http://www.jly.fi>. Luettu 9.1.2009.
- Karjalainen, 2009. 20.2.2009. http://www.karjalainen.fi/Karjalainen/Uutiset_maakunta/kiteen_biokaasulaitos_sai_ymparistoluvan_4052042.html.
- Karvonen, T. ja Voutilainen, M., 2007. Yhdyskuntajätteen lajittelututkimus Nousialan jäteasemalla. Savonlinnan Seudun Jätehuolto Oy. http://www.savonlinna.fi/teknisetpalvelut/lajittelukokeen_raportti.pdf.
- Kiertokapula, 2007 Vuosi- ja ympäristökatsaus 2007. <http://www.kiertokapula.fi/portal/suomi>.
- Kuntaliitto, 2009. <http://www.kunnat.net>. Luettu 9.1.2009.
- L & T, 2008. UPM ja L & T kehittävät etanolin valmistusta kaupan ja teollisuuden jätteistä liikenteen biopoltoaineeksi. <http://www.lassila-tikanoja.fi>. Luettu 19.1.2008.
- Metso, 2009. <http://www.metsopaper.com>. Luettu 19.1.2009.
- Metsäteollisuuden tietopalvelu, 2009. <http://www.metsateollisuus.fi>. Luettu 9.1.2009.
- Paperinkeräys Oy, 2009. <http://www.paperinkerays.fi>. Luettu 9.1.2009.
- PYR, Pakkausalan ympäristörekisteri PYR Oy, 2009. <http://www.pyr.fi>. Luettu 8.1.2009.
- Päijät-Hämeen Jätehuolto, 2006. Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy:n kaatopaikkajätetutkimus 24.10.2006, <http://www.phj.fi>.
- St1, 2007. Lehdistöiedote tiedotusvälineille 18.9.2007. <http://www.st1.fi>. Luettu 19.1.2009.
- St1, 2008. Tiedotusvälineille 4.6.2008. <http://www.st1.fi>. Luettu 19.1.2009.
- Stora Enso, 2008. Pörssitiedote 26.11.2008. <http://www.storaenso.com/media-centre/press-releases/2008/11/Pages/stora-enso-tehostaa-ja-investoi.aspx>.
- Suomen biokaasuyhdistys, 2009. <http://www.biokaasuyhdistys.net>. Luettu 13.1.2009.
- Suomen ympäristökeskus, 2009. <http://www.ymparisto.fi>. Luettu 8.1.2009.

Tilastokeskus, 2008. Jätetilasto, yhdyskuntajätteet 2007. <http://www.stat.fi>. Julkaistu 26.11.2008.

Tilastokeskus, 2009. <http://www.stat.fi>. Luettu 13.1.2009.

Uotila, L., 2008. Biokaasun mahdollisuudet maataloudessa. http://www.sentre.fi/mp/db/file_library/x/IMG/27401/file/Lassi_Uotila_BioEnergiaseminaari_30102008.pdf.

Uusiouutiset, 2009. Ensimmäinen Bioetanoli-laitos Hämeenlinnaan. Uutiskirje 5/2009. <http://www.uusiouutiset.fi>.

Vantaan Energia Oy, 2008. Vantaan Energia rakentaa Vantaan Långmossebergeniin jätevoimalan. <http://www.vantaanenergia.fi>. Julkaistu 19.12.2008.

Ympäristöministeriö, 2004. Kansallinen strategia biohajoavan jätteen kaatopaikkakäsittelyn vähentämisestä. 2.12.2004. <http://www.ymparisto.fi>.

Ympäristöministeriö, 2008. Valtakunnallinen jätesuunnitelma. Päivitetty 10.4.2008. <http://www.ymparisto.fi>.

YTV, 2009. <http://www.ytv.fi>. Luettu 14.1.2009.

Tekijä(t) Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho		
Nimeke Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa		
Tiivistelmä Biojalostamossa hyödynnetään biomassaa fossiilisista raaka-aineista valmistettuja tuotteita korvaavien biopolttoaineiden, bioenergian ja kemikaalien tuotannossa. Esimerkiksi sokeri-, tärkkelys- ja selluloosapitoisista materiaaleista voidaan valmistaa entsyymaattisen hydrolyysin ja bioteknisen prosessoinnin avulla etanolia tai kemikaaleja. Biomassaa hyödynnetään laajenevassa mitassa polttoaineiden tuotannossa, mutta kemianteollisuus perustuu toistaiseksi lähes yksinomaan fossiilisten raaka-aineiden käyttöön. Tässä hankkeessa selvitettiin yhdyskuntajätteen hyödyntämismahdollisuuksia biojalostamokonseptissa käyttäen malliprosessina polttoaine-etanolin tuottoa. Yhdyskuntien jätevirtojen kartoituksen perusteella valittiin sokerireittiin perustuvan biojalostamon raaka-aineeksi soveltuvat, runsaasti hiilihydraatteja sisältävä fraktiot, joiden soveltuvuutta biotekniseen jatkokäsittelyyn tutkittiin laboratoriomittakaavan kokeissa. Soveltuvia jätefraktioita ovat erilliskerätty biojäte, sekajäte, kuitupakkaukset, keräyspaperi ja rakennusjätteen tietyt fraktiot. Osalle näistä jakeista on jo olemassa toimivat hyödyntämisyjärjestelmät, joten ne jätettiin tämän selvityksen ulkopuolelle. Saatujen tulosten mukaan erilliskerätty biojäte soveltuu teknisesti erittäin hyvin sokereita hyödyntävän biojalostamon raaka-aineeksi. Erilliskerätyn biojätteen volyymit ovat kuitenkin pieniä: YTV-alueen biojätteen käyttävä laitos tuottaisi 3 000 tonnia etanolia vuodessa, ja kokonaisetanolin-tuottopotentiali biojätteestä Suomessa on alle 20 000 tonnia vuodessa. Kaatopaikoille menevä sekajäte on volyymiltaan biojätettä huomattavasti suurempi jätefraktio. Hiilihydraattikoostumuksen perusteella arvioiden Suomen sekajättekertymästä olisi teoreettisesti mahdollista tuottaa 260 000 tonnia etanolia vuodessa. Sekajätteen heterogeenisuus vaikeuttaa hiilihydraattien hyödyntämistä, ja tässä työssä saatujen tulosten perusteella saanto fraktioimattomaan sekajätteeseen perustuvassa prosessissa ilmeisesti olisi alle 50 % teoreettisesta. Sekajätteen tehokas hyödyntäminen sokerireittiin perustuvassa biojalostamoissa edellyttääkin raaka-aineen fraktiointia joko keräyksen yhteydessä tai jätteenkäsittelylaitoksessa ja prosessien edelleen kehittämistä, muun muassa esikäsittelyjen optimointia.		
ISBN ISBN 978-951-38-7310-3 (nid.) ISBN 978-951-38-7311-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 7055
Julkaisu-aika Elokuu 2009	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 64 s.
Projektin nimi Biojalostamo		Toimeksiantaja(t) Ympäristöministeriö
Avainsanat biorefinery, municipal waste, biowaste, mixed waste, cellulose, starch, carbohydrate, hydrolysis, fermentation, fuel ethanol		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374

Author(s) Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho		
Title Utilization of municipal waste in biorefinery		
Abstract A biorefinery is a facility that integrates biomass conversion processes and equipment to produce fuels, power, materials and/or chemicals from biomass thus replacing fossil raw materials by renewable ones. An example of carbohydrate-based biorefinery is biotechnical production of ethanol and chemicals from biomass containing sugars, starch and/or cellulose. Biomass is utilized in increasing amounts for biofuel production but the chemical feedstock supply is for the present dominated by nonrenewable carbon. The aim of the project was to evaluate the potential of municipal wastes as biorefinery raw material using fuel ethanol production as an example. Suitability of various municipal waste fractions as raw material for carbohydrate-based biorefinery was evaluated and carbohydrate-rich waste fractions were selected for closer study. Biotechnical processability of selected fractions was studied in laboratory scale. Source-separated biowaste, mixed waste, fibre-based packages, wastepaper and certain fractions of construction waste were identified as potential raw materials. Waste fractions having functional exploitation systems were excluded from the study. Biowaste was shown to be technically well suited as raw-material for carbohydrate-based biorefinery. However, the volumes of source-separated biowaste in Finland are small: a plant utilising all biowaste collected in the Helsinki metropolitan area would produce 3 000 tons of ethanol annually and total annual ethanol production capacity from source-separated biowaste collected in Finland would be less than 20 000 tons. The volumes of mixed waste are considerably larger. Based on carbohydrate content, 260 000 tons of ethanol could in theory be produced from the mixed waste collected in Finland. The utilization of carbohydrates in mixed waste is, however, complicated by the heterogeneity of the material and the results of this study show that ethanol yield from unfractionated mixed waste would be less than 50 % of theoretical. Effective utilization of the material in carbohydrate based biorefinery would require fractionation of the waste either in the collection phase or in the waste disposal plant and further development of the processing, including optimization of the pretreatments.		
ISBN ISBN 978-951-38-7310-3 (soft back ed.) ISBN 978-951-38-7311-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 7055
Date August 2009	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 64 p.
Name of project Biojalostamo		Commissioned by Ympäristöministeriö
Keywords biorefinery, municipal waste, biowaste, mixed waste, cellulose, starch, carbohydrate, hydrolysis, fermentation, fuel ethanol		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

VTT TIEDOTTEITA - RESEARCH NOTES

- 2476 Kari Sipilä, Miika Rämä, Antero Aittomäki, Ali Mäkinen & Jarmo Söderman. Urheilu- paikkojen integroidut lämmitys- ja jäähdytystekniset ratkaisut. 2009. 78 s.
- 2477 Matti Roine & Juha Luoma. Liikenneturvallisuuustoiminnan lähestymistavat. 2009. 59 s.
- 2479 Kati Tillander, Tuuli Oksanen & Esa Kokki. Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. 2009. 106 s. + liitt. 5 s.
- 2480 Sami Nousiainen, Jorma Kilpi, Paula Silvonen & Mikko Hiirsalmi. Anomaly detection from server log data. A case study. 2009. 39 p. + app. 1 p.
- 2482 Sampo Soimakallio, Riina Antikainen & Rabbe Thun (Eds.). Assessing the sustainability of liquid biofuels from evolving technologies. A Finnish approach. 2009. 220 p. + app. 41 p.
- 2483 Satu Paiho, Ismo Heimonen, Ilpo Kouhia, Esa Nykänen, Veijo Nykänen, Markku Riihimäki & Terttu Vainio. Putkiremonttien uudet palvelu- ja hankintamallit. 2009. 155 s. + liitt. 2 s.
- 2484 Torsti Loikkanen, Jari Konttinen, Jukka Hyvönen, Laura Ruotsalainen, Kirsi Tuominen, Mika Waris, Veli-Pekka Hyttinen & Olli Ilmarinen. Acquisition, Utilisation and the Impact of Patent and Market Information on Innovation Activities. 2009. 68 s.
- 2485 Marita Hietikko, Timo Malm & Jarmo Alanen. Koneiden ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus. Ohjeita ja työkaluja standardien mukaisen turvallisuusprosessin luomiseen. 2009. 75 s. + liitt. 14 s.
- 2486 Helena Järnström, Sirje Vares & Miimu Airaksinen. Semi volatile organic compounds and flame retardants. Occurrence in indoor environments and risk assessment for indoor exposure. 2009. 58 p. + app. 8 p.
- 2487 Tiina Koljonen, Juha Forsström, Veikko Kekkonen, Göran Koreneff, Maija Ruska, Lassi Similä, Katri Pahkala, Laura Solanko & Iikka Korhonen. Suomalaisen energia- teollisuuden kilpailukyky ilmastopoliittikan muuttuessa. 2008. 88 s.
- 2490 Tiina Apilo, Henri Hytönen & Katri Valkokari. Arvonluonnin uudet muodot ja verkostot 2009. 94 s.
- 2491 Kirsi Aaltonen, Mervi Murtonen & Sampo Tukiainen. Three perspectives to global projects. Managing risks in multicultural project networks. 2009. 47 p. + app. 4 p.
- 2493 Hannele Holttinen, Peter Meibom, Antje Orths et al. Design and operation of power systems with large amounts of wind power. Final report, IEA WIND Task 25, Phase one 2006–2008. 2009. 200 p. + app. 29 p.
- 2494 Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho. Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamossa. 2009. 64 s.