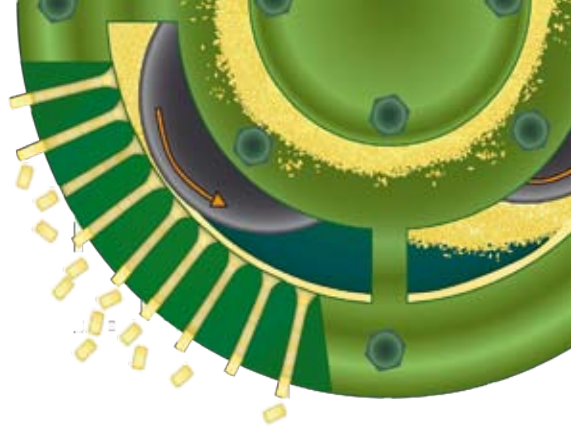




# MicrE

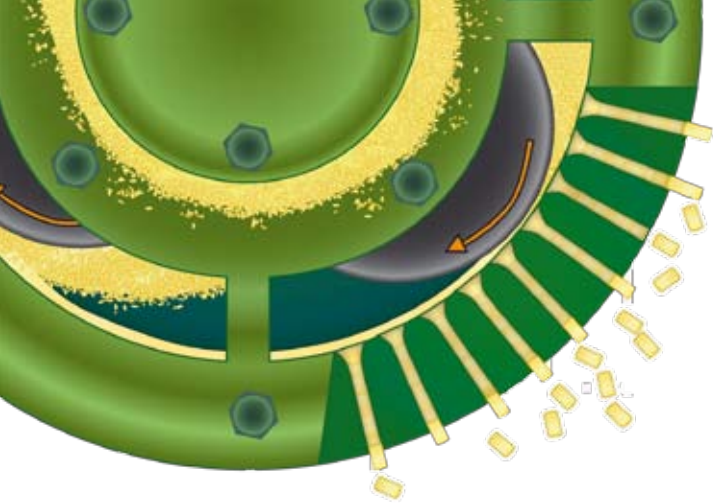
Micro Energy  
to Rural Enterprise



## Energiaa biomassasta ja jätteistä

Mädätys, kaasutus, biomassan poltto,  
pyrolyysi ja alkoholikäyminen:  
Laitosten asennus, turvallisuus ja ylläpito





Tämä raportti pohjautuu EU:n Pohjoinen periferia -ohjelmasta rahoitettuun Micro Energy to Waste (MicrE) -hankkeen kolmanteen työpakettiin (Teknologian kehittäminen ja soveltaminen)

Toimittajat:

- Eva Pongrácz, dosentti, TKT
- Niko Hänninen, FL

Tekijät:

- Lauri Mikkonen, TkK
- Anu Kauriinoja, DI

Muut tutkimukseen ja ohjaukseen osallistuneet:

- Auli Turkki, LK
- Riitta Keiski, professori, TKT
- Mika Huuhtanen, TkT
- Antonio Caló, FT, DI
- Ioannis Chamilos, BSc
- Jean-Nicolas Louis, BSc



# Sisällys

<b>3</b>	<b>JOHDANTO</b>
<b>4</b>	<b>MÄDÄTYS</b>
4	<i>Mädättämön asennus</i>
6	<i>Biokaasulaitoksen turvallisuus ja hygienia</i>
7	<i>Mädätysprosessin ylläpito</i>
<b>9</b>	<b>KAASUTUS</b>
9	<i>Kaasutuslaitoksen perustaminen</i>
10	<i>Kaasutusprosessin turvallisuus</i>
11	<i>Kaasutusprosessin optimointi ja laitoksen ylläpito</i>
<b>12</b>	<b>BIOMASSAN POLTTAMINEN</b>
12	<i>Polttolaitoksen perustaminen</i>
13	<i>Palamisen turvallisuus</i>
14	<i>Polttolaitoksen ylläpito</i>
<b>15</b>	<b>PYROLYYSI</b>
15	<i>Pyrolyysilaitoksen perustaminen</i>
16	<i>Pyrolyysiprosessin turvallisuus</i>
16	<i>Pyrolyysilaitoksen ylläpito</i>
<b>18</b>	<b>ALKOHOLIKÄYMINEN</b>
19	<i>Etanolilaitoksen perustaminen</i>
19	<i>Etanolilaitoksen turvallisuus</i>
20	<i>Käymisprosessin optimointi ja laitoksen ylläpito</i>
<b>22</b>	<b>YHTEENVETO</b>
<b>24</b>	<b>LÄHTEET</b>



## Johdanto

**B**iomassa, johon luetaan kaikki kasvipohjaiset orgaaniset materiaalit, kattaa lähes puolet Euroopan Unionin uusiutuvan energian lähteestä. Biomassaa voidaan käyttää hyvin monipuolisena energialähteenä niin liikenteen polttoaineena, sähkön tuotannossa kuin lämmityksessäkin. Euroopan Unionin tavoitteena on tukea ja edistää uusiutuvan energian käyttöä kaikilla näillä toimialoilla, sekä vähentää niin tuontien energiariippuvuutta kuin tuotettuja kasvihuonekaasuja.

Biomassaa ja biomassapohjaista jätettä voidaan jalostaa energiaksi lämpökemiallisin, biokemiallisin, mekaanisin ja sähkökemiallisin menetelmin. Lämpökemialliset menetelmät, kuten biomassan poltto, kaasutus ja pyrolyysi, ovat sopivia suhteellisen kuivalle puu- ja ruohopohjaiselle biomassalle, kun taas biokemialliset teknologiat, kuten mädätys ja alkoholikäyminen, voivat käyttää myös korkeamman kosteuden omaavia biomassoja.

Tämä raportti on koottu osana Micro Waste to Energy (MicrE) -hanketta, joka on rahoitettu Euroopan Unionin Pohjoinen periferia -ohjelmasta. Ohjelma-alueeseen luetaan Suomen, Ruotsin, Norjan ja Brittein saarien pohjoiset

alueet, sekä Islanti ja Grönlanti. Yhteistä tälle alueelle on pohjoinen, syrjäinen sijainti, pitkät välimatkat ja alhainen asutustiheys.

MicrE:n tavoitteena on tukea pienessä mittakaavassa toimivien uusiutuvaa energiaa käyttävien menetelmien käyttöönottoa maaseudun pk-yrityksissä ja muissa organisaatioissa. Projekti selvitti, mitkä ovat ne pohjoisille seuduille sopivimmat teknologiat, jotka voivat tuottaa energiaa taloudellisesti myös pienessä mittakaavassa, ovat edullisia ja helppoja asentaa ja joiden käyttökustannukset ovat edullisia. Tämä raportti on tarkoitettu sellaisille paikallisille toimijoille ja yrittäjille, jotka tarvitsevat tietoa niistä teknologioista, joilla biomassasta ja jätteistä voidaan muuttaa energiaa. Mädätys, kaasutus ja biomassan poltto soveltuvat hyvin niin pienen kuin suuremman kokoluokan sovelluksiksi pohjoisen periferian olosuhteisiin. Tämän lisäksi tässä raportissa on esitelty myös suurempia sovelluksia edellyttävät pyrolyysi ja alkoholikäyminen, jotka soveltuvat ennen kaikkea korkean myyntiarvon omaavien nestepolttoaineiden tuottamiseen.



# Mädätys

**M**ädätys on biokemiallinen prosessi, jossa tuotetaan biomassasta biokaasua mikro-organismien aineenvaihdunnan avulla happeittomissa olosuhteissa. Biokaasua voidaan tuottaa esimerkiksi biojätteestä, jätevesien lietteestä, energiakasveista sekä maatalouden ja teollisuuden orgaanisista sivutuotteista. Biokaasu koostuu pääosin metaanista ja hiilidioksidista. (EUBIA 2011)

Mädätys tapahtuu bioreaktoreissa, jotka voidaan jakaa märkiin ja kuiviin reaktoreihin. Jätehuollon keräämä orgaaninen jäte ja kasvijätteet hyödynnetään yleensä kuivareaktoreissa, kun taas vastaavasti eläinten lanta ja jätevesiliete käsitellään märkäreaktoreissa. Myös reaktorin toimintalämpötila on jaettu yleisesti kahteen osaan: mesofiiliseen (35°C) ja termofiiliseen (55°C). Termofiilisen reaktorin etuja ovat lyhyempi viipymäaika ja hieman parempi tuottavuus, mutta korkeamman lämpötilan ylläpito vaatii myös enemmän energiaa. (EUBIA 2011)

Mädätys tapahtuu pääasiassa neljässä eri vaiheessa: hydrolyysissä, asidogeneesissä, asetogeneesissä ja metanogeneesissä. Hydrolyysissä liukenemattomat orgaaniset yh-

disteet muunnetaan liukenevaan muotoon. Asidogeneesissä tuotetaan asetaattia, rasvahappoja sekä mm. hiilidioksidia ja vetyä. Asetogeneesissä rasvahapot muutetaan asetaatiksi ja vedyksi. Viimeisessä vaiheessa, metanogeneesissä, bakteerit tuottavat lopputuotetta eli metaania. (EUBIA 2011)

Lopputuote on biokaasu, mikä koostuu metaanista (60-65%), hiilidioksidista (30-35%) ja syötteestä riippuen pienistä määristä vesihöyryä, typpeä, happia vetyä, ammoniakkia ja rikkivetyä. Metaani voidaan erottaa biokaasusta ja hyödyntää liikennepolttoaineena. Biokaasu voidaan johtaa myös yhdistettyihin sähkö- ja lämmöntuotantolaitoksiin (CHP-laitokset), jonka bioreaktorissa biokaasu poltetaan lämmöksi ja sähköksi. Bioreaktorista syntyvät orgaaniset sivutuotteet (mädäte) voidaan käyttää hyödyksi lannoitteena. (MIRE 2011)

## Mädättämön asennus

Ennen varsinaisen mädättämön asentamista tulee määrittää käytettävien raaka-aineiden määrä ja laatu, jotta tälle raaka-aineelle sopiva mädätysprosessi tulee valituksi. Raaka-aineiksi voidaan lukea esimerkiksi maatalta

tuleva lanta, jätevesi ja orgaaniset sivutuotteet. Yleensä maatilalan ulkopuolelta tulevien raaka-aineiden vaatimukset ovat korkeammat. Ulkoiset raaka-aineet saattavat myös vaatia porttimaksun. (Tavitsainen 2006)

Mikäli raaka-aineiden toimittajia on kaksi tai useampia, kannattaa harkita yhteislaitoksen perustamista. Prosessijätteen käsittelystä ja sivutuotteiden hyötykäytöstä tulee myös sopia osapuolten kesken. Lisäksi lannan käyttö saattaa vaatia eläinlääkärin luvan. (Tavitsainen 2006)

Biokaasuprosessiin tuleva raaka-aine saattaa vaatia steriloinnin esikäsittelyprosessiksi. Steriloinnilla pyritään tappamaan patogeeniset ja muut haitalliset bakteerit, mikä suoritetaan yleensä lämpötilaa korottamalla erillisessä sterilointiprosessissa. Tämän lisäksi reaktorista tuleva liete tulee usein jatkokäsittelä kompostoinnin avulla. (Erjava 2009)

Yksi tärkeä vaihe ennen mädättämön asentamista on laskennallisen biokaasun tuotantopotentiaalinen määrittäminen. Laskenta tehdään kertomalla vuotuinen käytetty kiintoainemäärä metaanintuottopotentiaalilla. (Tavitsainen 2006)

Tuotantolaitoksen lämmön- ja sähkönkulutus tulee määrittää suunnittelun alkuvaiheessa. Biokaasulla tuotettua lämpöä ja sähköä (jos kyseessä on CHP-laitos) voidaan käyttää osaksi itse prosessin pyörittämiseen. Ylimääräisen lämmön avulla voidaan esimerkiksi lämmittää kotitalouksia. Ylimääräinen sähkö voidaan myös käyttää kotitalouksissa tai myydä eteenpäin. (Tavitsainen 2006)

Kun tarpeellinen taustatieto on kerätty, voidaan ryhtyä etsimään sopivia prosessin toimittajia, järjestää näiden kesken mahdollinen kilpailutus, sekä laatia sopimukset heidän kanssa. Prosessitoimittajat voivat myös määrittää alustavat energialaskelmat prosessille. Joissain tapauksissa asennuskustannukset voivat laskea, mikäli prosessin tilaaja osallistuu prosessin asentamistoihin. (Tavitsainen 2006)

Biokaasun tuotantoa on säädelty useilla energian tuotantoon, ympäristöön ja turvallisuuteen liittyvillä lailla. Tuotantolaitoksen pystyttämistä varten tarvitaan rakennuslupa. Asemakaava ja maankäytön suunnittelu saattavat asettaa omat rajoituksensa myös bio-

kaasulaitoksen pystyttämiseksi. (Taavitsainen 2006)

Ympäristölaki (ja jätelaki) tulee ottaa myös huomioon, koska mädättäminen voi aiheuttaa useita ympäristöhaittoja. Ympäristölaki voi edellyttää myös ympäristövaikutusten arviointia. Lisäksi raaka-aineiden ja biokaasun keräys, käsittely ja kuljetus tulee tehdä vaatimusten mukaisesti. Myös pystytettävät varastot vaativat rakennusluvan. Kuljetustankeille asetetut vaatimukset voivat olla tiukat. Lannoitelainsäädäntö tulee myös huomioida, mikäli reaktorin sivutuotteita käytetään tai myydään lannoitteina. (Erjava 2009)

Sopimukset sekä sähkönmyyntiluvat koskevat biokaasulaitosta, mikäli biokaasusta tuotetaan sähköä ja sitä myydään eteenpäin. Kun sähköä tuotetaan yli oman tarpeen, sitä voidaan myydä ulkopuolelle, kun taas alhaisempina tuotantokausina sähköä voidaan joutua ostamaan. Energiayhtiöitä voidaan kilpailuttaa, jotta myynti- ja ostosähkölle saadaan sopiva hinta. (Taavitsainen 2006)

Biokaasulaitokselle tulee laatia myös riskiarviointi ja pelastussuunnitelma. Laitoksen pystytyksestä tulee myös ilmoittaa paikalliselle pelastusviranomaiselle. Myös ATEX-direktiiviä, joka koskee räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäviä laitteita, tulee noudattaa, koska esimerkiksi prosessin tuottama metaani on helposti syttyvä ja räjähtävä yhdiste normaalilämpötilassa ja -paineessa. (Taavitsainen 2006)

Putkien asentaminen ja huolto täytyy toteuttaa tätä sääntelevän lainsäädännön mukaan. Myös koko prosessia tulee huoltaa suositusten mukaisesti. Lainsäädäntö vaihtelee maa-kohtaisesti ja mittakaavan mukaan hyvinkin paljon. (Taavitsainen 2006)

Taulukossa 1 on tarkistuslista biokaasulaitoksen asentamista varten. Pakolliset kohdat on merkitty punaisella värillä, harkinnanvaraiset oranssilla värillä ja tilanteesta riippuvat vihreällä värillä.

Lämpötilan määrittely	Raaka-aineiden ominaisuuksien ja määrien määrittäminen
	Laskennallinen biokaasupotentiaali
	Laitoksen lämmön ja sähkön kulutuksen määrittäminen
	Prosessin toimittajien etsintä/kilpailutus
Luvat ja lainsäädäntö	Rakennuslupa
	Ympäristölaki ja jätelaki (YVA)
	Lannoitelaki
	Sähkön osto- ja myyntilupa
	Luvat ja lainsäädäntö liittyen prosessin huoltoon ja toiminnan ylläpitämiseen, muiden prosessilaitteiden asentamiseen (putket yms.) ja raaka-aineiden sekä lopputuotteiden kuljetukseen, käsittelyyn ja varastointiin
Muut	Pelastussuunnitelma
	ATEX-direktiivi
	Riskien arviointi
	Sterilointi ja lietteen jälkikäsittelyprosessi
	Eläinlääkärin lupa
	Sopimukset muiden raaka-aineen tuottajien kanssa (vastuut jne.)

Taulukko 1. Biokaasulaitoksen tarkistuslista.

## Biokaasulaitoksen turvallisuus ja hygienia

Prosesseissa liikkuu monesti haitallisia ja vaarallisia yhdisteitä. Biokaasulaitoksen yhteydessä nämä aineet ovat usein peräisin raaka-aineista eli syötteestä. Myös prosessiolosuhteet vaikuttavat merkittävästi siihen, siirtyvätkö haitalliset yhdisteet prosessista ulos. Vaaroja voi ennaltaehkäistä noudattamalla turvallisuusvaatimuksia, tunnistamalla riskit ja laatimalla pelastussuunnitelman. (Taavitsainen 2006)

Biokaasu koostuu pääosin metaanista ja hiilidioksidista. Näistä päätuote, metaani, on helposti syttyvä ja räjähtävä yhdiste, joka vaatii räjähtääkseen vain kipinän. Metaaniin liittyvät riskit voidaan huomioida suunnitelmalla reaktori, varastot ja putket vaatimusten mukaisesti. Tilat tulee voida tuulettaa myös kunnolla. Lisäksi korkeat metaanipitoisuudet havaitseva varoitusjärjestelmä voi olla hyödyllinen. (Tavitsainen 2006)

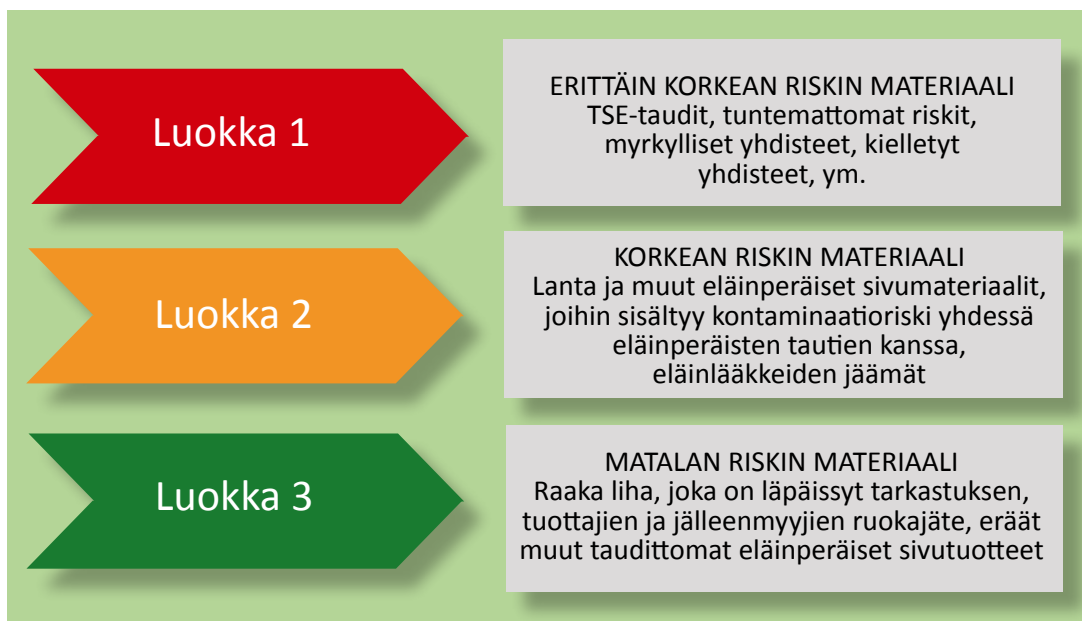
Prosessissa esiintyy myös rikkivetyä (H<sub>2</sub>S), joka on haitallinen, toksinen ja syttyvä yhdiste. Rikkivety on ilmaa raskaampi yhdiste, jolloin se tulee tuulettaa lattiatason kautta pois suljetusta tilasta. Reaktorissa H<sub>2</sub>S voi

syövyttää rakenteita. Syöpymistä voi ennaltaehkäistä hapettamalla H<sub>2</sub>S 2 – 5 % happiilmaseoksella. Jos happea johdetaan liikaa reaktoriin, se voi kuitenkin aiheuttaa räjähdyksen. (OSHA 2005, Tavitsainen 2006)

Tukokset putkistoissa voivat johtaa ylipaineeseen, ja siten rakenteiden rikkoutumisiin ja vuotoihin. Tukoksia syntyy varsinkin isompien partikkelien päädyttyä putkistoon. Myös kaasuputkistoissa voi syntyä tukoksia, mikä voi aiheuttaa vaaratekijöitä. Tällöin putkistossa tulisi olla poistoventtiili ylimääräiselle paineelle. (Tavitsainen 2006)

Syöte, jonka epäillään sisältävän patogeenisiä bakteereja, tulee steriloida kunnolla. Lisäksi lannoitteeksi suunniteltu liete tulee jatkokäsitellä oikein, jotta lannoitelainsäädännön vaatimukset lannoitteelle täyttyvät. Esimerkiksi patogeenisiä bakteereja sisältävää lannoitetta ei saa käyttää pelloilla, koska ne voivat aiheuttaa tauteja eläimille. (Tavitsainen 2006)

Seuraavalla sivulla olevaan kuvaan 1 on koottu eläinperäiset sivutuotteet eri luokittain niiden tautisisällön mukaan. Luokan 3 eläinperäiset sivutuotteet tulee steriloida ennen kuin ne voidaan siirtää mädätysreaktoriin. Tavanomaisesti sterilointi suoritetaan 70 °C



*Kuva 1. Eläinperäisten sivutuotteiden luokittelu.*

lämpötilassa noin 60 minuutin ajan. Sterilointi tulee toteuttaa esimerkiksi eläinperäiselle käyttämättömälle ruoalle ja muulle ruokajätelle. (Evira 2011)

Luokan 2 sivutuotteille sopii esimerkiksi termofiilinen prosessi, jonka lämpötila on yli 50 °C ja viipymäikä vähintään 20 päivää. Reaktorijätelle tulee tämän lisäksi järjestää kompostointi. Luokan 1 sivutuotteita ei saa mädättää ollenkaan niiden korkean tautiriskin vuoksi. (Evira 2011, Tavitsainen 2006)

Erityisiä prosessivaatimuksia ei tarvita niissä tapauksissa, kun mädättäjä käyttää raaka-aineena maatilan omaa lantaa ja jätevettä. Myös siinä tapauksessa ei tarvita erityisiä prosessivaatimuksia, jos yhteismädättäjä käyttää raaka-aineena lantaa ja maatilan jättesä kahdelta tai useammalta lähitalta. (Tavitsainen 2006)

Teurastamoilta tulevan lannan käsittely ei myöskään vaadi erityisiä prosessivaatimuksia. Ainoa edellytys on, että reaktorista saatava syöte jälkikäsitellään kompostoimalla. Ilman kompostointiprosessia, reaktorin sivutuotteita ei voida käyttää lannoitteena. (Tavitsainen 2006)

Kun biokaasulaitos käsittelee yhdyskuntien jätevesistä syntynyttä lietettä, tällöin voidaan käyttää seuraavanlaisia prosesseja:

- Termofiilinen prosessi (55 °C, viipymäaika 4 h)
- Mesofiilinen prosessi ja jokin seuraavista vaihtoehdoista:
  - Terminen kuivaus (> 80 °C, 10 min)
  - Kompostointi ja jälkikypsytyk (6 kuukautta)
  - Sterilointi (70 °C, 30 min)

### Mädätysprosessin ylläpito

Sopivan lämpötilan ylläpitäminen on erittäin tärkeää, koska käymisreaktiot riippuvat merkittävästi oikeasta lämpötilasta. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpötilan laskiessa yleensä myös tuottavuus laskee. Toisaalta liian korkea lämpötila voi tappaa mikrobit. Myös sopiva viipymäaika ja kosteuspitoisuus (>50 %) vaikuttavat biokaasun tuottoon. Lisäksi sopiva pH-luku (noin 7,5) on hyvä ylläpitää mikrobin tehokkaan toiminnan varmistamiseksi. Monessa tapauksessa pH:n noustessa korkeammaksi kuin kahdeksan, reaktori joudutaan

pysäyttämään. Tällöin esimerkiksi muurahais-happoa voidaan lisätä prosessiin pH:n palauttamiseksi oikealle tasolle. (ECOFYS 2004)

Liian korkea orgaanisen aineksen pitoisuus kuutiota kohden voi olla myös haitallinen prosessille. Suositeltava orgaanisen aineksen määrä vaihtelee 0,5 – 5 kg/m<sup>3</sup> välillä. Raaka-aineen sopiva hiili-tyyppi -suhde vaihtelee ollen 20:1 ja 40:1 välillä. Myös liian suuri partikkelikoko ja hivenaineiden puute voi rajoittaa prosessia. (ECOFYS 2004)

Käytettävää biomassaa tulee sekoittaa reaktorissa paineen muodostumisen ehkäisemiseksi sekä aineen- ja lämmönsiirron parantamiseksi. Ilman sekoitusta kaasukuplat eivät välttämättä pääse helposti pintaan asti, mistä voi aiheutua ongelmia. (ECOFYS 2004)

Raaka-aineet, jotka sisältävät antibiootteja, raskasmetalleja ja joitain orgaanisia happoja, voivat vahingoittaa mädätysreaktioita tai jopa tappaa mikro-organismit. Lisäksi säh-

köviä, sekä CHP-yksikön vajaatoiminta voivat aiheuttaa prosessivikoja. (ECOFYS 2004)

Pumppuviat voivat aiheuttaa putkisto-ongelmia. Myös tukokset putkissa voivat olla mahdollisia, jolloin paine putkissa voi nousta liian korkeaksi aiheuttaen rakenteellisia ongelmia. Reaktorit ja varastot saattavat myös vuotaa, jolloin varastotilat täytyy tuulettaa huolella, ja biokaasun jakelu tulee hetkellisesti keskeyttää. (Taavitsainen 2006)

Prosessilaitteet ja ympäristö on tärkeä ylläpitää steriileinä, jotta prosessiin ei pääse vieraita mikro-organismeja, jotka voivat haitata tuotantoa. Mikrobiperäinen saastuminen voidaan ennaltaehkäistä pitämällä laitteet ja inokulaattivarastot steriilinä. (Vogel 1983)





# Kaasutus

**K**aausutus on termokemiallinen prosessi, joka muuntaa biomassan synteetikaasuksi sekä muiksi tuotteiksi. Kaasutus tiivistää kaasutuotteessa olevan energian kemialliseksi energiaksi, joka johtaa korkeaan energiatiheyteen. Kaasutusprosessissa käytettävä syöte voi koostua esimerkiksi puusta, puujäännöksistä, energiakasveista, puun kuoresta ja sahanpurusta. Myös monet maatalousjätteet sekä kasvien jäännökset sopivat kaasutusprosessin raaka-aineeksi. (MicrE 2011, Basu et al. 2010)

Tavanomainen kaasutusprosessi koostuu raaka-aineen kuivaamisesta, pyrolyysistä, kaasutuksesta sekä jäännösvaiheesta. Pyrolyysikammiossa suuremmat hiilivetymolekyylit pilkkoutuvat kevyemmiksi ja pienemmiksi yhdisteiksi hapenpuutteessa. Näin haihtuvat yhdisteet saadaan erotetuksi raaka-aineesta. Pyrolyysikammiossa lämpötila vaihtelee 400 ja 600 asteen välillä. (Basu et al. 2010, MicrE 2011)

Kaasutus tapahtuu pyrolyysia korkeammasa lämpötilassa erillisessä vaiheessa. Tällöin prosessiin syötetään hieman happea. Monien reaktioiden kautta prosessista syntyy synteetikaasua ja viimeistään jäännöskammiossa

syntyy myös muita kemiallisia komponentteja. Kaasutusreaktori voidaan karkeasti jakaa joko ylä- tai alavetoreaktoreihin. Reaktorit voidaan edelleen jakaa esimerkiksi kiinnitetyihin, liikkuviin ja pyöriin petireaktoreihin. Myös plasmaproessia on kehitelty kaasutusprosessin tehokkuuden parantamiseksi. (Basu et al. 2010, MicrE 2011)

Lopputuotteesta tulee erottaa terva ja pienihiukaset. Tavanomaisimmat erotustekniikat pienihiukasten ja tervan erottamiseksi ovat suodattimet, syklotit, elektrostaattiset saostimet sekä pesurit. Terva voidaan hajottaa myös katalyyttisesti tai korkean lämpötilan avulla. (Basu et al. 2010)

Kaasutuksessa syntyvää kaasutuotetta, synteetikaasua, voidaan käyttää ajoneuvojen polttoaineena tai CHP-laitoksessa lämmön ja sähkön tuotannossa. Prosessin sivutuotteena syntyvää tuhkaa voidaan käyttää maatalouden lannoitteena tai rakennusmaiden täyteaineena. (MicrE 2011)

## Kaasutuslaitoksen perustaminen

Kaasutuslaitoksen perustamista ja toimintaa säätelevät monet lait. Ennen laitossuunnit-

telua on tärkeää määritellä raaka-aineiden määrät ja laatu, koska ne määrittelevät pitkälti laitoksen kapasiteetin ja tarvittavat prosessivaiheet ja -olosuhteet. Myös lopputuotteen hyötykäyttöä on hyvä miettiä etukäteen. Esimerkiksi CHP-yksiköille on erikseen määrättyjä vaatimuksia. (Gasification guide 2009)

Kaasutuslaitokselle tarvitaan aina rakennuslupa. Mahdollinen säädös maankäytön suunnittelusta tulee myös ottaa huomioon. Jossain tapauksissa myös asemakaava tulee ottaa huomioon. Rakennuslupa tarvitaan myös put-



kien ja varastojen rakentamiseen ja asentamiseen. (Ympäristöministeriö 2011a)

Ympäristölupa on pakollinen kaasutuslaitosta perustettaessa, erityisesti isomman mittakaavan laitoksille. Ympäristöluvan yhteydessä laitokselle suoritetaan myös ympäristövaiikutusten arviointi, jossa otetaan huomioon esimerkiksi laitoksen päästöt ja niiden vaikutukset ilmaan sekä maaperään. Myös jätevirrat ja niiden käsittely tulee ottaa huomioon. Lisäksi IPPC-direktiivi (EU:n teollisuuden päästöjä koskeva direktiivi) voi vaikuttaa laitoksen perustamiseen ja toimintaan, mutta tämä riippuu perustettavan laitoksen koosta. (Gasification guide 2009, Ympäristöministeriö 2011a)

Laitokselle tulee myös laatia pelastussuunnitelma sekä tehdä riskien tunnistaminen ja

arviointi. Prosessissa esiintyvien räjähtävien yhdisteiden vuoksi myös ATEX-direktiiviä on noudatettava. Myös sähkö-, kone- ja painelaitteisiin liittyvät vaatimukset tulee ottaa huomioon, jotta työympäristö olisi mahdollisimman turvallinen. Vaaralliset yhdisteet tulee käsitellä, varastoida ja kuljettaa vaatimusten mukaan vaaratilanteiden estämiseksi. (Gasification guide 2009, Ympäristöministeriö 2011a)

Jos laitoksen tuottamaa sähköä on tarkoitus myydä eteenpäin, tulee laatia sähkönmyyntisopimus. Myös synteetikaasua voidaan myydä eteenpäin, jolloin tarvitaan tätä koskeva myyntisopimus. (Gasification guide 2009, Taavitsainen 2006)

Kaasutuslaitoksia koskeva lainsäädäntö eroaa eri maittain ja lainsäädännön asettamat vaatimukset kaasutuslaitokselle riippuvat merkittävästi perustettavan laitoksen koosta. Tästä syystä on tarpeen keskustella paikallisten ympäristöviranomaisten kanssa jo hyvin aikaisessa vaiheessa, kun on päätetty ryhtyä suunnittelemaan kaasutuslaitoksen perustamista. (Ympäristöministeriö 2011a)

## Kaasutusprosessin turvallisuus

Kaasutusprosessin yhteydessä tuotetaan, käsitellään, varastoidaan ja kuljetetaan vaarallisia ja räjähtäviä aineita. Hiilimonoksidi on yksi vaarallisimmista kaasutusprosessissa esiintyvistä yhdisteistä. Jo pieninä pitoisuuksina tämä yhdiste voi aiheuttaa pääkipua, huimausta ja johtaa jopa kuolemaan. Näistä syistä hiilimonoksidintunnistuslaite on syytä asentaa prosessin läheisyyteen. Mahdollisten häikävuotojen takia myös tilojen tuuletuksen tulee olla hyvin järjestetty. (Gasification guide 2009)

Yksi kaasutusprosessin vaaroista on prosessissa esiintyvien räjähtävien aineiden aiheuttama räjähdysriski. Kun yhdisteiden, kuten vedyn ja metaanin, konsentraatiot ovat sopivat, voi pelkä kipinä aiheuttaa räjähdysksen. Myös hienojakoinen pöly voi räjähtää tai syttyä kipinästä, kun pölyn konsentraatio on saavuttanut tietyn pisteen. Tuotekaasu on myös erittäin herkkä syttymään itseksensä 600–650 asteen lämpötilassa. Korjaustöiden aikana on varmistettava, että reaktori ja muut tilat ovat täysin tyhjiä kaasuista ja pölystä. Tuotekaa-

sun varastointi ja kuljetus on syytä järjestää turvallisuusvaatimuksia noudattaen. (Gasification guide 2009)

Hiilimonoksidin lisäksi kaasutusprosessissa on myös muita terveydelle haitallisia yhdisteitä. Esimerkiksi vety ja metaani ovat myös räjähtäviä ja helposti syttyviä yhdisteitä. Myös PAH-yhdisteet ovat haitallisia toksisia ja karsinogeenisia yhdisteitä. Prosessiviat tai liian korkea paine voivat johtaa edellä mainittujen yhdisteiden vuotoihin. Myös automaatiojärjestelmässä voi tapahtua virheitä. (Gasification guide 2009)

Vaihteleva ja liian suuri paine voivat vaurioittaa prosessilaitteita ja aiheuttaa myös vuotoja. Liian korkea lämpötila saattaa myös vaurioittaa prosessimateriaaleja sekä sytyttää yhdisteitä. Kaasutusprosessiin liittyy myös monia työperäisiä riskejä ja vaaroja, kuten kovat äänet, kuumat pinnat, sähköshokit ja niin edelleen. Sähköviat voivat aiheuttaa kipinöitä, jotka voivat aikaansaada tulipaloja tai räjähdyksiä. (Gasification guide 2009)

Riskeiltä vältytään parhaiten noudattamalla turvallisuusohjeita ja -vaatimuksia, ja myös ATEX-direktiivin noudattaminen ennaltaehkäisee tapaturmia. Kemikaalien tunnistuslaitteiden käyttö estää tapaturmien syntymistä, mutta myöskään asianmukaisen henkilökunnan turvallisuuskoulutuksen merkitystä ei voi korostaa liikaa. Tämän ansiosta henkilöstö tietää paremmin mahdollisista riskeistä ja tietää miten toimia niiden ennaltaehkäisemiseksi. (Gasification guide 2009)

## Kaasutusprosessin optimointi ja laitoksen ylläpito

Monet fysikaaliset ja kemialliset tekijät vaikuttavat kaasutusprosessin tuottavuuteen. Yksi näistä on kosteus, mistä syystä raaka-ainetta tulee kuivata ylimääräisen kosteuden poistamiseksi. Mikäli käytettävän raaka-aineen kosteuspitoisuus on yli 30 %, lisääntyy lämmitysenergian tarve merkittävästi tuotantoprosessissa. Syntyvien tuotteiden laatuun ja määrään vaikuttaa lisäksi sopiva partikkelikoko. Myös raaka-aineen muut ominaisuudet, kuten vety-hiili -suhde ja tuhkapitoisuus, vaikuttavat kaasutuksen tehokkuuteen. (Basu 2010)

Terva voi aiheuttaa prosessivikoja varsinkin jäähtyessään ja kerääntyessään viileämmille pinnoille. Terva voi esimerkiksi aiheuttaa tukoksia tai haitata suodattimien toimintaa. Tervaa voidaan poistaa tehokkaasti kaasusta pitämällä lämpötila tervan kiehumispistettä korkeampana ja erottamalla se ennen lämpötilan jäähtymistä. Tervaa voidaan hajottaa myös katalyyttien avulla. (Basu 2010)

Raskasmetallit, kuten lyijy, kupari ja sinkki, haittaavat prosessia erityisesti yhdistyneinä muihin kemiallisiin komponentteihin. Monet näistä metalleista hidastavat kaasutusreaktioita ja johtavat pidempään viipymäaikaan. Myös alkalimetallit voivat olla haitallisia prosessille, koska ne kerääntyvät lämmönvaihdivien pinnoille ja likaavat niitä. Alkalimetallit voivat myös aiheuttaa korroosiota. (Chartier et al. 1996)

Jos kaasutusprosessiin johdetaan liian paljon happea, tuotanto laskee välittömästi, koska ylimääräinen happi johtaa palamisreaktioihin. Ylimääräinen happi voi olla peräisin myös vuodosta. Tämän vuoksi lämpötila ja paine täytyy pitää oikealla tasolla onnistuneen tuoton takaamiseksi. Myös viipymäaika vaikuttaa niin tuotteen määrään kuin laatuunkin. (Basu 2010)

Prosessin huono tuottavuus voi johtua myös katalyytin heikosta toiminnasta mm. likaantumisen tai regeneroinnin puutteen takia. Tämän lisäksi sähkö- ja koneviat ovat mahdollisia, jotka voivat puolestaan aiheuttaa ennalta arvaamattomia prosessivikoja. Näihin korjaustöihin tarvitaan yleensä ammattiapua. (Basu 2010)



# Biomassan polttaminen

**B**iomassan polttaminen on yksi vanhimmista tekniikoista, joita on käytetty energian tuottamiseksi. Biomassan polttaminen on prosessi, jossa happi reagoi hiiltä sisältävän polttoaineen kanssa kemiallisesti synnyttäen pääosin hiilidioksidia, vettä ja lämpöä. Käytännössä palamisessa syntyy myös typen oksideja, häkää sekä aromaattisia yhdisteitä. Kaasumaisten tuotteiden lisäksi syntyy myös kiinteää tuotetta, kuten puuhiiltä ja partikkeleita. (Loo & Koppejan 2008)

Polttoprosessiin sopivat raaka-aineet vaihtelevat yleensä puusta puuperäisiin jätteisiin, pelletteihin ja kuivaan biojätteeseen. Palaminen tapahtuu uunissa tai erillisessä reaktorissa noin 800 °C lämpötilassa. Yleensä raaka-aine kuivataan ensin, minkä jälkeen palamista edeltää pyrolyysi ja kaasutus. Lopuksi, kun raaka-aine palaa, palamisen tehokkuus on riippuvainen lämpötilasta, hapen määrästä ja raaka-aineen ominaisuuksista. Polttoprosessi voi käyttää hyväksi joko luonnollista tai pakotettua vetoa. (Loo & Koppejan 2008, MicrE 2011)

Palamisprosessit voidaan jakaa karkeasti panos- tai jatkuvatoimisiin reaktoreihin.

Panosreaktorit ovat yleisiä kotitalouksissa, kun taas jatkuvatoimisia reaktoreita käytetään yleisemmin teollisuudessa ja laajamittaisemmassa energiantuotannossa. Nämä reaktorit voidaan jakaa edelleen esimerkiksi kiinteä peti-, leijupeti- ja kiertopetireaktoreihin. Myös uuneista on olemassa jo erilaisia kaupallisia ratkaisuja. (Loo & Koppejan 2008)

Palamista voidaan hyödyntää kotitalouksien ja prosessien lämmittämiseen. Lisäksi kuumista tuotekaasuista voi tuottaa sähköä katilan ja turbiinin avulla. Joissain tapauksissa myös kaasu- ja nestemäisten polttoaineiden valmistus voi olla mahdollista. Sivutuotteena syntyvää tuhkaa voi käyttää lannoitteena. (Loo & Koppejan 2008)

## Polttolaitoksen perustaminen

Luvat polttolaitoksen perustamista varten riippuvat laitoksen suuruudesta. Pienimittaiset prosessit, lähinnä uunit, eivät tarvitse merkittäviä lupia rakennusluvan lisäksi. Uunin valmistuttua pelastusviranomaisen tulee tarkistaa prosessin asianmukainen paloturvallisuus. (FINLEX 2011)

Suuremman mittakaavan polttolaitokseen tulevat raaka-aineet on syytä määritellä ensin, jotta oikeanlainen prosessi ja tehokkaat prosessiolosuhteet saadaan optimoitua. Samalla on syytä harkita, onko tavoitteena tuottaa niin lämpöä kuin sähköäkin. Raaka-aineiden määrät ja toimittajat on myös syytä kartoittaa suunnittelun alkuvaiheessa. Myös raaka-aineen esikäsittely voi olla oleellinen osa kokonaisprosessia ja hyvien prosessiolosuhteiden saavuttamista. Hyvät prosessiolosuhteet vaikuttavat suoraan päästöarvoihin ja pohjatuhkan määrään, joiden määriä ja pitoisuuksia on säädelty monin osin. (FINLEX 2011)

Isomman mittaluokan polttolaitokset tarvitsevat rakennusluvan, minkä lisäksi alueen maankäyttö tulee suunnitella huolellisesti. Asemakaavoitus joudutaan ottamaan huomioon joissain tapauksissa. Lisäksi putket, varastot ja muut prosessit vaativat rakennusluvan. Rakennusvaiheessa ja -suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon myös rakennusten vaatimat palo- ja stabiilisuusvaatimukset. (Ympäristöministerö 2011a)

Ympäristölupa on pakollinen suuremman mittaluokan polttolaitoksille. Erityisesti päästöt ilmaan, kuten tuhka- ja CO<sub>2</sub>-päästöt, ovat merkittäviä. Myös jätevirrat tulee huomioida. Prosessin kokonaisvaikutus ympäristöön arvioidaan laatimalla ympäristövaikutusten arviointi eli YVA. Lisäksi polttolaitoksen tulee toimia IPPC- direktiivin mukaisesti käyttäen parasta saatavilla olevaa tekniikkaa, jotta negatiiviset ympäristövaikutukset voidaan minimoida. (Ympäristöministerö 2011a, FINLEX 2011)

Polttoprosessissa syntyy pääosin lämpöä, mutta lämmöntuotannon rinnalla voidaan tuottaa myös sähköä. Tällöin ylimääräinen sähkö voidaan myydä sähköyhtiöille, jolloin tulee laatia sähkönmyyntisopimus. Kattilat, turbiinit ja CHP-laitokset tulee rakentaa ja niitä tulee käyttää vaatimusten ja asianmukaisten standardien mukaisesti. (FINLEX 2011)

Isommissa polttolaitoksissa ovat pelastussuunnitelmat, riskien tunnistus ja riskien arviointi keskeisessä asemassa, koska prosessiin liittyy merkittäviä vaarallisia yhdisteitä, korkea lämpötila sekä muita riskejä. Noudattamalla turvallisuusvaatimuksia varmistetaan myös turvallinen toimintaympäristö. (Ympäristöministerö 2011a)

Päästökauppadirektiivi voi koskea myös polttolaitosta, mikäli laitoksen lämmöntuotanto ylittää 20 MW:n rajan. Lainsäädäntö ja polttolaitoksien rakentamiselle ja ylläpidolle asetetut vaatimukset vaihtelevat hyvin suuresti laitoksen koon mukaan. Yhteispoltto voi asettaa tarkempia vaatimuksia prosessiolosuhteille ja päästöille. Kannattaa myös huomioida se, että lainsäädäntö ja polttoprosesseille asetetut vaatimukset vaihtelevat eri valtioiden välillä. (Ympäristöministerö 2011a)

## Palamisen turvallisuus

Pienemmän kokoluokan polttoprosesseissa, kuten uuneissa, suurin ja yleisin vaara aiheutuu siitä, että kaikki polttotuotteet eivät poistu vedon myötä uunista ulos vaan osa siirtyy talon sisälle. Hiilimonoksidi eli häkä on yksi vaarallisimmista palamisessa syntyvistä kaasuisista, jota syntyy epätäydellisen palamisen yhteydessä. Värittömänä ja hajuttomana kaasuna se tunkeutuu huomaamattomasti ympäristöön aiheuttaen pääkipua huimausta tai jopa kuoleman suhteellisen alhaisina pitoisuuksina. Hiilimonoksidin tunnistin, oikeanlainen tuuletus ja hyvät prosessiolosuhteet ennaltaehkäisevät häkämyrkytyksen riskiä merkittävästi. (EREC 2008) (DeKieffer 1995)

Jos palamisessa syntyviä kaasuja ei saada poistettua kunnolla, voi muodostuvan häkän lisäksi myös kosteus aiheuttaa ongelmia. Kosteus voi tiivistyä ikkunoihin ja rakennuksen rakenteisiin ja aiheuttaa kosteusvaurioita. Lisääntynyt kosteus voi myös edesauttaa homesienien syntyä rakennuksissa. Myös palamisessa syntyvät typen oksidit voivat olla haitallisia. (EREC 2008)

Korkea lämpötila palamisprosessissa voi olla turvallisuusriski. Kuumat pinnat voivat muodostaa paloriskin ja myös tuli itsessään voi levitä prosessista ympäristöön aiheuttaen vakavan ja varteenotettavan riskin. Myös kuumat kaasut voivat olla vaarallisia. Lisäksi kaasumaiset tuotteet voivat olla syttymis- tai räjähdysriskiä saavuttaessaan tietyn pitoisuuden. (DeKieffer 1995)

Turvallisia työolosuhteita mietittäessä, erityisesti suuremmissa polttolaitoksissa, tulee huomioida myös tuuletus, toiminnan katkaiset venttiilit ja automaatio sekä tarvittava myrkyllisten kaasujen tunnistuslaitteisto. Näitä laitteita tulee myös valvoa ja tarkistaa

tietyin väliajoin. Lisäksi henkilökunnan ja vieraiden koulutuksella ja valistamisella voidaan ennaltaehkäistä vaaraa aiheuttavia tekijöitä. Myös prosessin rakenne ja toimivuus on hyvä tarkistaa sopivin ajanjaksoin. (EREC 2008)

Korroosio voi aiheuttaa rakenteiden haurastumista ja johtaa vaarallisiin vuotoihin. Kuumat vuodot esimerkiksi lämmönvaihtimesta ovat erittäin vaarallisia. Myös erilaiset ennalta arvaamattomat kone- ja sähköviat voivat olla terveysriskejä. (Loo & Koppejan 2008)

## Polttolaitoksen ylläpito

Raaka-aineiden ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi polttoprosessin tehokkuuteen. Raaka-aineen liian korkea kosteuspitoisuus haittaa palamista, koska se laskee palamislämpötilaa ja voi pitkittää myös viipymäaikaa reaktorissa. Korkea kosteuspitoisuus johtaa kuitenkin epätäydellisempään palamiseen ja suurempiin päästöihin. Raaka-aineen kuivaus on näistä syistä erittäin tärkeää, ja se tulee toteuttaa ennen kuin materiaali johdetaan poltettavaksi. (Loo & Koppejan 2008)

Sopivan polttolämpötilan (> 800 °C) ylläpitäminen on tärkeää, koska se vaikuttaa olennaisesti palamisen reaktionopeuteen. Lämpötilan sopivalla optimoinnilla voidaan vaikuttaa merkittävästi myös syntyvien päästöjen määrään. (Loo & Koppejan 2008)

Saatavilla olevan hapen puute rajoittaa voimakkaasti palamisreaktiota. Tämän takia prosessiin on syötettävä ylimääräistä happea, jos tämä on suinkin mahdollista Toisaalta liian korkea hapen määrä voi laskea taas palamislämpötilaa, minkä takia hapen määrä on hyvä optimoida. Tehokkaan sekoituksen merkitys on myös tärkeä suuremman kokoluokan prosesseissa. Jos prosessi toimii luonnollista vetoa käyttäen, voi prosessin tehoton toiminta johtua siitä, että veto on estynyt tai järjestetty puutteellisesti. (Loo & Koppejan 2008)

Polttoaineen tyyppi ja ominaisuudet, etenkin huokoisuus, tiheys, koko ja pinta-ala vaikuttavat suuresti polttoprosessiin. Suuremmat partikkelit vaativat pidemmän viipymäajan kuin pienemmät ja huokoisemmat partikkelit. Syötteen sisältämä lanta tai märkä orgaaninen yhdyskuntajäte voi olla syy polttoprosessin puutteelliseen toimintaan. Maalatut ja kyllästetyt puut voivat haitata prosessia ja myös lii-

an suuri raaka-aineen määrä voi tukahduttaa prosessin. (Loo & Koppejan 2008)

Pienemmän mittakaavan sovelluksissa liian suuri lasipinta-ala uunissa voi siirtää lämpöä liikaa ympäristöön, jolloin palamisprosessin lämpötila ei ole niin tehokas. Myös sopiva viipymäaika on tärkeä tiedostaa panosprosesseissa. Jos suuremman kokoluokan prosesseissa on ongelmia lämpötilan kanssa, voi prosessiin syötettävää ilmaa myös esilämmitellä. (Loo & Koppejan 2008)

Biomassan polttamisessa syntyvä tuhka saattaa sisältää korkeita alkali- ja raskasmetallipitoisuuksia, jolloin vaarana on syövyttävien yhdisteiden muodostuminen. Prosessissa syntyvä tuhka ja kuona saattaa myös liata pintoja, ja niiden kasaantuminen voi johtaa esimerkiksi tehottomaan lämmönsiirtoon. Korkeat tuhkapitoisuudet voivat vahingoittaa myös muita prosessilaitteita sekä aiheuttaa ongelmia kaasujen jälkikäsitteilylle. Näiden syiden takia polttoprosessi voi muuttua tehottomammaksi. Prosessi vaatii puhdistamista ja huoltoa väliajoin. (Loo & Koppejan 2008)

Kone- ja sähköviat voivat aiheuttaa odottamattomia vikoja suuren kokoluokan laitoksissa. Näillä vioilla voi olla myös arvaamattomia seuraamuksia. CHP-yksiköt ja kattilat voivat myös syöpyä käytössä, sekä niissäkin voi esiintyä erilaisia vikoja. (Loo & Koppejan 2008)



# Pyrolyysi

**P**yrolyysissä isot hiilivetymolekyylit (selluloosa, hemiselluloosa ja osa ligniinistä) pilkkoutuvat pienemmiksi ja kevyemmiksi molekyyleiksi. Toisin kuin palaminen ja kaasutus, pyrolyysi tapahtuu hapenpuutteessa. Hapetta voidaan lisätä prosessiin vain silloin, kun palamisreaktion halutaan tuottavan prosessille lämpöä. (Basu 2010)

Pyrolyysin ensimmäiset yksikköprosessit ovat yleensä kuivaus ja raaka-aineen raekoon pienentäminen. Näiden prosessien jälkeen raaka-aine johdetaan korkealämpötilaiseen pyrolyysireaktoriin. Normaaliolosuhteissa tiivistyvät kaasut, kuten raskaat hiilivedyt, kerätään talteen ja tiivistetään prosessin myöhemmässä vaiheessa. Terva ja puuhiili kerätään talteen myöhempää hyötykäyttöä varten. (Basu 2010)

Pyrolyysi voidaan jakaa hitaaseen ja nopeaan pyrolyysiin. Hitaassa pyrolyysissä raaka-aine lämmitetään hitaasti kohdelämpötilaan (400–800°C), jolloin viipymäaika on pitkä. Tällöin syntyy enemmän puuhiiltä ja tervaa, ja vastaavasti vähemmän kaasuja. Nopeassa pyrolyysissä syntyy enemmän kaasua ja tervaa. Nopeassa pyrolyysissä raaka-aine lämmitetään nopeasti kohdelämpötilaan (> 650°C).

Nopean pyrolyysin viipymäaika on lyhyt, ja raaka-ainetta pidetään kohdelämpötilassa vain sekunteja tai sekunnin murto-osia. Myös muita, erittäin nopeita pyrolyysimenetelmiä on tutkittu. Reaktorit voidaan edelleen jakaa kiinnitettyihin ja liikkuviin petireaktoreihin sekä kupliviin ja leijupetireaktoreihin. (Basu 2010, EUBIA 2011)

Pyrolyysissä syntyvät tiivistyneet kaasutuotteet voidaan nesteyttää bioöljyksi, jota voidaan käyttää CHP-laitoksissa tai liikennepolttoaineena. Sivutuotteina syntyvät muut kaasut voidaan osaksi polttaa lämmön tuottamiseksi. Prosessissa syntyvä terva voidaan myös jälkikäsitellä bioöljyn tuoton maksimoimiseksi. Syntyvää puuhiiltä voidaan käyttää lämmöntuotannossa tai sitä voi käyttää esimerkiksi grillihiilenä. (Basu 2010)

## Pyrolyysilaitoksen perustaminen

Pyrolyysilaitoksen perustaminen alkaa raaka-aineiden määrien ja ominaisuuksien kartoittamisella, jotta prosessiolosuhteet, katalyytit, reaktorikoot jne. voidaan suunnitella. Myös haluttu lopputuote on tärkeä määrittellä, koska siihen vaikuttavat tekijät, kuten viipymä-

aika, prosessilämpötila, ja lämmitysnopeus, voidaan määritellä. Lisäksi raaka-aineiden toimittajien kartoitus on hyvä suorittaa suunnittelun alkuvaiheessa ja laatia sopimukset heidän kanssa. (Basu 2010)

Raaka-aineiden määrittelyn jälkeen tulee prosessille hakea rakennuslupa. Suuremman kokoluokan laitoksia suunniteltaessa on otettava huomioon myös maankäytön suunnittelu ja asemakaava. Varastojen ja putkien asentaminen ja rakentaminen ovat myös säänneltyjä ja ne vaativat myös omat lupansa. (Ympäristöministeriö 2011a)

Ympäristölupa on yksi tärkeimmistä haettavaista luvista pyrolyysilaitosta perustettaessa, koska laitos voi olla monella tapaa ympäristölle haitallinen niin rakennus- kuin toimintavaiheessakin. Ympäristövaikutusten arviointi -menetelmää sovelletaan lähes poikkeuksetta suuremman kokoluokan laitoksiin. Lisäksi laitosta saattaa koskea myös IPPC-direktiivi. Myös jätettä itsessään, sen käsittelyä, keräämistä ja kuljetusta koskevat eri säädökset ja lait. (Ympäristöministeriö 2011a)

Turvallisuusasiat on yksi pyrolyysilaitoksen tärkeimmistä huomioonotettavista tekijöistä, koska prosessissa käsitellään useita vaarallisia, syttyviä ja räjähtäviä yhdisteitä. Riskien arviointi ja -tunnistus sekä mahdollinen pelastussuunnitelma on hyvä tehdä laitostehdä. Pienemmän kokoluokan laitoksista on tehtävä ainakin ilmoitus paikalliselle pelastusviranomaiselle. Sähkö- ja painelaitteisiin liittyvien normien ja vaatimusten noudattaminen on myös erittäin tärkeää. Vaarallisten aineiden oikeanlainen käsittely, kuljetus ja varastointi ovat pyrolyysilaitoksen turvallisuuden kulmakiviä. (Ympäristöministeriö 2011a, Basu 2010)

Bioöljyn, puuhiilen tai sähkön myyminen laitoksen ulkopuolelle edellyttää yleensä erillistä lupaa. Mahdolliset markkinat on hyvä kartoittaa jo suunnittelun alkuvaiheessa. (Ympäristöministeriö 2011a) Myös pyrolyysiprosessin rakentamista ja käyttöä koskevat lainsäädäntö ja vaatimukset vaihtelevat eri maiden välillä, mikä on syytä ottaa huomioon.

## Pyrolyysiprosessin turvallisuus

Pyrolyysissä käsitellään ja tuotetaan monia vaarallisia yhdisteitä, kuten hiilimonoksidi, vety ja hiilivetyjä. Hiilimonoksidi on erittäin myrkyllinen yhdiste, joka aiheuttaa pääkipua, huimausta ja jopa kuoleman erittäin alhaisina pitoisuuksina. Mahdollisten häkävuotojen takia prosessia ympäröivät tilat tulee voida tuulettaa huolellisesti. Myös erillinen vaarallisista häkäpitoisuuksista ilmoitettava laite voi olla erittäin tarpeellinen. Lisäksi leijuvat pienet partikkelit voivat olla syttyä tai räjähtää helposti kipinästä. (Gasification guide 2009)

Myös vety voi muodostaa pyrolyysiprosessissa turvallisuusriskin. Vetyä ei voi erottaa ilmasta ihmisaisteilla, joten korkeille vetypitoisuuksille on syytä olla erillinen tunnistuslaitte. Vety, varsinkin korkeina pitoisuuksina, syttyy helposti ja voi aiheuttaa räjähdysten. Myös hiilivedyt voivat syttyä tai räjähtää kipinästä. Näiden yhdisteiden varastointi, käsittely ja kuljetus tulee tehdä turvallisuusohjeiden mukaan ja ATEX-direktiiviä noudattaen. (DOE 2006, Basu 2010)

Liian korkea paine ja paineiskut voivat vahingoittaa prosessilaitteita ja johtaa vuotoihin tai toimintahäiriöihin. Myös työturvallisuusasiat tulee ottaa huomioon riskien arvioinnissa. Työperäisiä riskejä ovat mm. kuumat pinnat, kovat äänet ja sähköiskut. Sähköviat voivat myös johtaa kipinöiden syntymiseen ja aiheuttaa näin tulipaloja tai räjähdyksiä. (Basu 2010, Gasification guide 2009)

Sähkö- ja koneviat sekä muut viat voivat aiheuttaa ennalta arvaamattomia seurauksia. Sähköviat voivat haitata myös automaatiojärjestelmän toimintaa. Myös mahdollisesti tuotettu bioöljy tulee kuljettaa, käsitellä ja varastoida määräysten mukaan, koska bioöljy on myös haitallinen ja syttyvä yhdiste. (Basu 2010)

## Pyrolyysilaitoksen ylläpito

Pyrolyysissä lämpötila, lämmitysnopeus ja viipymäaika yhdessä vaikuttavat voimakkaasti prosessin tehokkuuteen ja tuotetun tuotteen määrään. Karkeasti ottaen näiden tekijöiden yhteys voidaan nähdä seuraavasti:

- Hidas lämmitysnopeus ( $< 0,01- 2,0^{\circ}\text{C/s}$ ), alhainen lämpötila ja pitkä viipymäaika maksimoivat puuhiilen tuotannon
- Nopea lämmitysnopeus, keskiasteinen lämpötila ( $450-600^{\circ}\text{C}$ ) ja lyhyt viipymäaika maksimoivat nestemäisten tuotteiden tuoton
- Alhainen lämmitysnopeus, korkea loppulämpötila ( $700-900^{\circ}\text{C}$ ) ja pitkä viipymäaika maksimoivat kaasumaisten tuotteiden määrän

Kaasujen tuotantoa voidaan kontrolloida hyvin myös lämpötilan avulla. Esimerkiksi hiilidioksidin tuotanto on korkea matalissa lämpötiloissa, ja sen tuotanto laskee lämpötilan noustessa. Vastaavasti vedyn tuotanto kasvaa lämpötila noustessa. (Basu 2010)

Partikkelikoko vaikuttaa merkittävästi syntyvien tuotteiden määrään ja laatuun. Yleisesti ottaen pieni partikkelikoko johtaa suurempaan kaasujen ja nestemäisten tuotteiden tuottoon, kun taas vastaavasti suurempi partikkelikoko tuottaa enemmän kiinteää tuotetta. Partikkelikoko voi vaikuttaa myös raaka-aineen viipymäaikaan prosessissa. Mahdollisimman homogeeninen partikkelikoko helpottaa myös automaatiosteemien toimintaa. (Basu 2010)

Tervan muodostuminen on haitallista prosessille, koska se kerääntyy ja tiivistyy kylmemmille pinnoille aiheuttaen muun muassa tukoksia. Terva haittaa myös muiden prosessilaitteiden toimintaa, kuten suodattimia. Terva tulee erottaa tuotteista, varsinkin jos suunniteltu päätuote on kaasu. (Basu 2010)

Raaka-aineet, jotka sisältävät suuria pitoisuuksia kaliumia, muita alkalimetalleja ja klooria, saattavat johtaa prosessin rakennetta vaurioittaviin syövyttäviin reaktioihin. Nämä yhdisteet voivat syövyttää esimerkiksi reaktorin seinämiä, kattiloita ja muita laitteita johtaen vuotoihin ja toimintahäiriöihin. Korkea kosteuspitoisuus voi myös haitata prosessia, koska se nostaa prosessin termisen energian kulutusta huomattavasti. Raaka-aineen ominaisuuksista H/C -suhde vaikuttaa raaka-aineen energiantuotantoon. (Basu 2010)

Pyrolyysissä reaktorin tulee toimia hapettomassa tilassa. Tämän takia vuodot reaktorissa tai muissa prosessilaitteissa haittaavat prosessin toimintaa. Joissain tapauksissa hallittu ja tiedostettu hapen syöttö on sallittua, jos lämpöä halutaan tuottaa reaktorille sallimalla tietty määrä palamisreaktioita. Lisäksi huono katalyyttin toiminta voi vaikuttaa merkittävästi tuotantomääriin. (Basu 2010)

Ennalta arvaamattomat sähkö- ja koneviat ovat mahdollisia. Tällaiset toimintaviat saattavat aiheuttaa arvaamattomia seurauksia, joita on vaikea ottaa huomioon etukäteen. Korjaustyöt yleensä edellyttävät ammatti-apua.



# Alkoholikäyminen

**A**lkoholikäyminen on prosessi, jossa sokeripitoinen biomassa muunnetaan alkoholiaksi, kuten etanoliksi, mikrobien aineenvaihdunnan avulla. Käyminen tapahtuu yleensä anaerobisesti, mutta myös aerobinen käyminen on mahdollista. Käymisprosessit voidaan jakaa panos-, puolipanos- ja jatkuvatoimisiin reaktoreihin. (Nag 2007)

Korkean sokeripitoisuuden omaavat raaka-aineet, kuten sokeriruoko ja maissi, ovat hyviä raaka-aineita käymisprosessille. Lisäksi lignoselluloosaa sisältäviä raaka-aineita, kuten puuta ja olkea, voidaan käyttää etanolin tuotannossa. Nämä raaka-aineet tarvitsevat kuitenkin happo- tai entsyymiesikäsittelyn, jotta raaka-aineen sisältämä selluloosa ja hemiselluloosa saadaan muutettua mikrobeille sopiviksi sokereiksi. Lignoselluloosapohjaiset raaka-aineet mielletään kestävämmiksi kuin muut raaka-aineet, koska näitä raaka-aineita saadaan muista kuin ruoaksi tarkoitetuista lähteistä. (Nag 2007)

Tavanomainen käymisprosessi koostuu raaka-aineen hydrolyysistä, käymisestä, erotuksesta ja puhdistuksesta. Jos prosessi käyttää

lignoselluloosapohjaisia raaka-aineita, prosessissa on yleensä tällöin mukana myös jauhatusprosessi, sekä entsyymi- tai happokäsittely. Esikäsittelyn jälkeen sokerit johdetaan käymisreaktoriin. Yleensä alkoholi poistetaan prosessista noin 6 prosentin pitoisuuksina, koska vahvempina pitoisuuksina se haittaa bakteerien toimintaa voimakkaasti. Kuitenkin vahvempaakin alkoholia voidaan prosessista poistaa tietyissä tapauksissa (> 15 %). Lopuksi etanoli rikastetaan yli 99 prosentin vahvuuksiin. (Nag 2007, MicrE 2011)

Nykyään yleisin erotusprosessi etanolin erottamiseksi vedestä on tislauk. Tislauk on kuitenkin melko kallis ja energiaintensiivinen prosessi. Tämän takia tutkitaan muita energiasäästävämpiä prosesseja, kuten kalvoprosesseja ja erityisesti pervaporaatiota. (Nag 2007)

Tuotettu etanoli voidaan hyödyntää liikenteen polttoaineena. Lisäksi etanoli voidaan hyödyntää CHP-yksiköissä lämmön ja sähkön tuottamisessa. Prosessissa syntyvät orgaaniset jätteet voidaan hyödyntää lannoitteena tai niitä voidaan käyttää hyväksi eläinten ruokinnassa. (Scragg 2006)

## Etanolilaitoksen perustaminen

Bioetanolilaitosta perustettaessa on tärkeää määritellä aluksi se, mitä materiaaleja käytetään. Prosessiin virtaavat raaka-aineet määrittävät esimerkiksi esikäsittelyprosessien tarpeen, sekä mahdollisesti myös käytettäviä prosessilaitteita ja mikrobeja. (Nag 2007)

Kun raaka-aineet on määritelty, etsitään sopivat laitetoimittajat prosessille. Myös mahdollisten raaka-aineiden toimittajien kanssa on hyvä sopia raaka-aineiden määristä ja laaduista. Rakennusluvan hankinta on myös erottamaton osa bioetanolilaitoksen perustamista, ja myös asemakaava ja maankäytön suunnittelu kannattaa ottaa huomioon varsinkin isompaa laitosta perustettaessa. Myös putkien asennus ja varastojen rakentaminen tarvitsevat rakennusluvan. (Tavitsainen 2006, Ympäristöministeriö 2011b)

Ympäristölupa ja ympäristövaikutusten arviointi tulee myös tehdä varsinkin isompaa laitosta suunniteltaessa. Vedenkäyttöön ja -jakeluun liittyvä lainsäädäntö tulee myös ottaa huomioon, jos esimerkiksi prosessiin otetaan vettä läheisestä vesistöstä. Myös jätteiden käsittelyä, keräystä ja kuljetuksia, sekä ilmapäästöjä ja äänisaasteita koskeva lainsäädäntö tulee ottaa huomioon. (PÖRY 2006)

Etanolilaitos tarvitsee myös luvan vahvan etanolin tuottamiseen ja käsittelyyn. Etanoli on vaarallinen ja syttyvä yhdiste, joten sen käsittelyssä, kuljetuksessa ja varastoinnissa tulee noudattaa turvallisuusvaatimuksia. Myös riskien arviointi ja tunnistaminen on syytä tehdä, kuten myös pelastussuunnitelma. (PÖRY 2006)

Lopputuote, bioetanoli, voidaan myydä eteenpäin esimerkiksi polttoaineyhtiöille. Myös myyntisopimukset on syytä laatia. Lisäksi sivutuotteiden käyttö lannoitteena voi olla säädeltyä, jolloin lannoitteen laatu tulee olla oikeanlaista ennen kuin sitä voidaan käyttää lannoitteena. (PÖRY 2006) (EPA 2007)

## Etanolilaitoksen turvallisuus

Etanoli on haitallinen ja syttyvä orgaaninen yhdiste, joka esiintyy nesteinä normaalissa lämpötilassa ja paineessa. Etanoli on toksinen yhdiste ihmisille ja eläimille varsinkin korkeina pitoisuuksina. Näiden ominaisuuksien takia

etanolia tulee käsitellä, varastoida ja kuljettaa huolella. Riskejä voidaan minimoida noudattamalla turvallisuusvaatimuksia ja pitämällä syttymislähteet mahdollisimman kaukana laitoksesta. Laitos on hyvä tarkistuttaa turvallisuusviranomaisella. (Safety data 2011)

Jos käymisprosessia edeltää jauhatusprosessi, hengityssuojainten käyttö on tällöin suositeltavaa. Hengityssuojaimia voi tarvita myös käymisreaktorin lähellä mahdollisten hiilidioksidiesiintymien takia. Lisäksi mahdolliset jäähdytysnesteet (ammoniakki, propaa-



ni jne.) saattavat olla terveydelle haitallisia. (Liao & Saffron 2008)

Liian korkea paine ja lämpötila tislaukskolonnissa voi tuottaa ongelmia. Erittäin korkea paine voi rikkoa rakenteita ja johtaa näin vuotoihin. Eryteisesti korkeapitoiset etanolivuodot voivat olla vaarallisia. Myös jäähdytysjärjestelmän tulee toimia kunnolla, muuten tislaukskolonnien lämpötila voi nousta liian korkeaksi, aiheuttaen räjähdysvaaran. (Tham 2011)

Raaka-aineiden happo- tai entsyymikäsittely voi aiheuttaa myös terveys- ja turvallisuusriskejä. Esimerkiksi joissain esikäsittelymenetel-

missä käytetty rikkihappo muodostaa riskin, koska se on myrkyllinen ja syövyttävä yhdiste. Myös jotkut entsyymit voivat muodostaa turvallisuusriskejä etanolitehtaalla. (Nag 2007)

CO<sub>2</sub>-tankkeihin ja käymisreaktoriin liittyvä turvallisuus on varmistettava venttiileiden ja tarvittavien mittalaitteistojen avulla. Vuodot tankeista, reaktoreista ja putkista voivat muodostavat varteenotettavan turvallisuusriskin. (Liao & Saffron 2008)



Käyminen on melko turvallinen prosessi, jonka turvallisuus riippuu paljon myös käytettävästä prosessimallista. Myös käytettävä bakteerikanta vaikuttaa etanolilaitoksen turvallisuuteen. Käytettäessä tavanomaista hiivaa (*saccharomyces cerevisiae*) voidaan olla varmoja niiden turvallisesta toiminnasta (kokemus). Geneettisesti muunneltujen organismien kohdalla tilanne voi olla toinen, koska niiden pääseminen ympäristöön voi aiheuttaa ennalta arvaamattomia vaikutuksia ollen haitaksi ihmiselle ja ympäristölle. (Nag 2007)

## Käymisprosessin optimointi ja laitoksen ylläpito

On tärkeää tietää, mitä mikro-organismeja prosessissa käytetään, koska ne määräävät osin myös sen, mitä raaka-aineita prosessiin voidaan laittaa. Esimerkiksi jokin tietty bakteeri ei välttämättä pysty käyttämään tietynlaisia sokereita hyväksi aineenvaihdunnassaan, jolloin prosessin tuotanto rajoittuu. Käymisreaktorin viiveaika vaikuttaa myös merkittävästi etanolituottoon. (Nag 2007)

Tuhka, monet hapot sekä useat aromaattiset sekä epäorgaaniset yhdisteet haittaavat usein mikrobien toimintaa prosessissa, ja näiden aineiden läsnäolo voi olla osasyynä huonoon etanolituottavuuteen. Lisäksi mikrobien toiminta voi heiketä tai ne voivat jopa kuolla kokonaan, jos raaka-aineen mukana prosessiin pääsee antibiootteja. Antibiootit voivat päästä prosessiin esimerkiksi lehmän lannan mukana, jos lehmille on syötetty antibiootteja. (MicrE 2011)

Käymisprosessissa reaktoriolosuhteiden tulee olla optimaaliset, jotta mikrobien kasvu ja toiminta pysyisi hallinnassa. Lämpötilan, kuten myös kasvatusliemen vesipitoisuuden, tulee olla sopiva mikrobien toiminnalle ja kasvulle. Liian korkea lämpötila voi johtua myös mahdollisten jäähdytysaineiden puutteesta. (Scragg 2005)

Tehoton etanolin tuotto voi johtua myös saatavien ravinteiden puutteesta. Mikrobit vaativat toimiakseen useita ravinnehiukkasia ja hivenaineita, kuten hiiltä, vetyä, fosforia, rikkiä, vitamiineja, kaliumia ja kalsiumia. Sopiva pH-luku reaktorissa on myös elintärkeä mikrobien toiminnalle. Sopivaa pH-lukua voidaan säätää esimerkiksi ammoniakkin avulla. (Scragg 2005)

Yleensä käymisreaktorin tulee olla vapaa hapesta, mikä tarkoittaa sitä, että mahdolliset happivuodot reaktoriin haittaavat anaerobisten mikrobien toimintaa. Toisaalta joissain tapauksissa käymiseen voidaan käyttää myös aerobisia mikrobeja. Lisäksi monessa jatkuva-toimisessa reaktorissa kannattaa varmistaa sekoituksen toimivuus, koska se yleensä parantaa aineen- ja lämmönsiirtoa mikrobien ja sen ympäristön välillä johtaan parempaan tuottavuuteen. (Scragg 2005)

Prosessivika voi löytyä myös tislauskolonnista. Kolonniin tulevan syötteen ominaisuudet voivat vaihdella suunnitelluista ominaisuuksista, mikä voi välittömästi vaikuttaa esimerkiksi syöttöpohjan sijaintiin ja tarvittavien erotuspohjien lukumäärään. Lisäksi pohjat tai täytekapaleet voivat likaantua, jolloin niiden toiminta heikkenee. (Tham 2011)

Myös höyryvirran ominaisuudet, varsinkin sen nopeus ja paine, vaikuttavat kolonnien toimintaan. Esimerkiksi liian suuri höyryn nopeus voi johtaa kolonnien tulvimiseen tai vaahtoamiseen. Tulvimiseen voi vaikuttaa myös liian pieni kolonnien halkaisija. Tislaus-

kolonnien palautussuhde voi myös olla väärä. Jos palautussuhde on liian pieni, tarvitsevat tislauskolonnit lukemattoman määrän erotuspohjia suunnitellun erotuksen toteutukseen. (Tham 2011)

Käymisprosessin toiminnan kannalta tärkeää pitää prosessiolosuhteet sekä ympäristö steriileinä. Prosessi voi häiriintyä, jos ulkopuoliset bakteerit tai virukset pääsevät prosessiin sisään. Lisäksi putkien tukokset, sekä kone- ja sähköviat voivat aiheuttaa prosessin vajaatoimintaa. (Vogel 1983, Micre 2011)





## Yhteenveto

**P**ienen mittakaavan kaupalliset jalostusteknologiat sopivat parhaiten pohjoisille harvaanasutuille alueille niiden edullisuuden ja yksinkertaisen rakenteen takia. Toisinaan myös jopa muutaman megawatin laitokset luetaan pienikokoisiksi, mutta nämä ovat kuitenkin jo teollisuuskokoisia laitoksia, jotka eivät sovellu maaseudulle, koska ne voivat herättää vastustusta paikallisten keskuudessa.

Biomassojen energiahyötykäyttökäytöntehtäviöiden perustiedot on koottu taulukkoon 2.

Kaasutus ja mädätys ovat yleensä kaikkein sopivimmat teknologiat pohjoisen oloihin. Mädätys on erinomainen tapa tuottaa energiaa jätteistä jopa pienessä mittakaavassa, kun taas kaasutus on hieman vaativampaa samassa koluokassa käytettävien materiaaleihin liittyvien vaatimusten vuoksi. Tuotettu kaasu voidaan käyttää liikennepolttoaineena tai polttaa lämmöksi ja sähköksi.

Kaasutuksella on pitkä historia takanaan, mutta käytössä olevien kaasutuslaitosten määrä on tällä hetkellä varsin pieni. Markkinoilla toimii kuitenkin useita toimijoita, jotka tarjoavat kuluttajille pienikokoisia kaasutusyksiköi-

tä. Tuotettu kaasu voidaan käyttää lämmön ja sähkön tuotantoon CHP-laitoksissa, liikennepolttoaineena kaasuautoissa tai sitä voidaan jatkojalostaa nestemäiseksi liikennepolttoaineeksi.

Biomassan poltto on vanha ja hyvin yleinen teknologia lämmöntuotannossa, mutta pienessä mittakaavassa biomassan poltolla ei voida tuottaa tehokkaasti sähköä. Biomassasta ei myöskään voida tuottaa suoraan polttoaineita polttamalla.

Pyrolyysistä odotetaan tulevan kaupallisesti toimiva suuren mittakaavan teknologia, mutta tämän tiellä on vielä haasteita. Tuotetun pyrolyysiöljyn jatkojalostaminen liikennepolttoaineeksi on erittäin vaativaa. Öljyä voidaan käyttää myös CHP-laitoksissa, mutta pyrolyysin tehokkuusaste on tällöin varsin alhainen.

Alkoholikäyminen on kaupallinen teknologia, mutta se kilpailee ruuantuotannon kanssa ensiluokkaisesta käyttömateriaalista. Heikompileatuisen puu- ja ruohopohjaisen materiaalin käyminen alkaa olla kaupallinen teknologia suuressa mittakaavassa. Tuotettua alkoholia voidaan käyttää lämpö- ja energiantuotantoon CHP-laitoksissa ja liikennepolttoaineena.

	Mädätys	Kaasutus	Biomassan poltto	Pyrolyysi	Alkoholi- käyminen
Kokoluokka	Reaktorin koko 50-10.000 m <sup>3</sup>	1 kWe – 150 MWe riippuen käytettävästä teknologiasta	Pienestä suureen mittakaavaan	Pilottilaitos 200kg/h, joka tuottaa 66% energiaa	Etanolin tuotantomäärä 102-106 m <sup>3</sup> vuosittain
Käyttö- materiaali (sopivin)	Biojäte ja jätevesi, sivutuotteet, energiakasvit	Puu, energiakasvit, biojäte	Pelletit, biomassa, puujäte	Puut, energiakasvit, sahanpuru, maatalouden ja kotitalouksien organiset jätteet	Ruokakasvit ja sivutuotteet, metsähake, energiakasvit, biojäte
Rajatekijä	Kiintoaineiden osuus 4–40%	Kosteus <45% Tuhka <15%	Kosteus <50%	Kosteus <45% Tuhka <25%	Homogeeninen syöttö, ravinteet, pH, kosteus
Toiminta- lämpötilat	Optimi 35°C tai 55°C	650–1200°C	>800°C	400–800°C	15–60°C
Hapen tarve	Hapettomuus	Osittainen hapetus	Ylimäärähappi	Hapettomuus	Riippuu mikrobeista
Tuote	Biokaasu	Synteettinen kaasu	Lämpö	Pyrolyysiöljyt	Alkoholi
Sivutuotteet	Mädäte, vesi	Hiili	Tuhka	Kaasut, hiili	Käymisjäte, kaasut, vesi
Jälkikäsittely	Kosteuden poisto	Pienhiukkasten ja tervan poisto	Ei	Hapenpoisto	Vedenpoisto
Käyttötavat	Liikennepoltto- aine, lämpöener- gia (CHP); sivutuote lannoitteeksi tai maanparannus aineeksi	Lämpöenergia (CHP), synteettinen polttoaine	Sähkön- ja lämmöntuotanto, nestemäiset ja kaasumaiset polttoaineet	Lämpöenergia (CHP) ja moottori- polttoaine	Liikennepoltto- aine, lämpöener- gia (CHP); sivutuote lannoitteeksi tai eläinrehuksi

*Taulukko 2. Biomassan energiahyötykäyttö -teknologioiden ominaisuudet (Perustuu seuraaviin lähteisiin: Austerman et al. 2007, Austerman & Whiting 2007, Kauriinoja 2010, Kelleher et al. 2002, McKendry 2002, Soltes 1987, Uslu et al. 2008, Ward et al. 2008 & Wisbiorefine 2004)*



## Lähteet

Austerman S, Archer E & Whiting KJ. 2007. Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects. Commercial Assessment. Report produced by Juniper Consultancy Services Ltd for Renewables East. Saatavissa: [http://www.renewableseast.org.uk/uploads/Renewables-East---Anaerobic-Digestion-\(Full-Report\).pdf](http://www.renewableseast.org.uk/uploads/Renewables-East---Anaerobic-Digestion-(Full-Report).pdf)

Austerman S & Whiting KJ. 2007. Advanced Conversion Technology (Gasification) For Biomass Projects. Commercial Assessment. Report produced by Juniper Consultancy Services Ltd for Renewables East. Saatavissa: [http://www.renewableseast.org.uk/uploads/Renewables-East---Gasification-\(Full-Report\).pdf](http://www.renewableseast.org.uk/uploads/Renewables-East---Gasification-(Full-Report).pdf)

Basu Prabir (2010) Biomass Gasification and Pyrolysis. Elsevier Science Publishing Co Inc. 376 p. ISBN: 978-0-12-374988-8

Chartier P, Ferrero G.L, Henius U.M, Hultberg S, Sachau J, Wiinblad M (1996) Biomass for energy and environment. Volume 2. Copenhagen, Denmark. 1473 p. ISBN: 008-0428495

ECOFYS (2004). Planning and Installing Bioenergy Systems: A Guide for Installers, Ar-

chitects and Engineers. Earthscan Canada, Toronto. 274 pages. ISBN: 9781849772167. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/lib/oulu/docDetail.action?docID=10128902&p00=anaerobic%20digestion>

DeKieffer Rob (1995) Combustion Safety Checks: How Not to Kill Your Clients. Home Energy Magazine. [Internet sivut]. [Cited 6 July 2011]. Saatavissa: <http://www.proctoreng.com/articles/rob.html>

DOE Hydrogen Program (2006). U.S. Department of Energy. [Internet sivut]. [Cited 8 July 2011]. Saatavissa: [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/doe\\_h2\\_safety.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/doe_h2_safety.pdf)

Elintarviketurvallisuusvirasto Evira (2011). [Internet sivut]. [Cited 15 June 2011]. Saatavissa: [http://www.evira.fi/portal/fi/evira/asiakokonaisuudet/elaimista\\_saatavat\\_sivutuotteet/biokaasutus\\_ja\\_kompostointi/](http://www.evira.fi/portal/fi/evira/asiakokonaisuudet/elaimista_saatavat_sivutuotteet/biokaasutus_ja_kompostointi/)

Energy Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse (EREC) (2008) Combustion Equipment Safety. Saatavissa: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building\\_america/26464.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/26464.pdf)

EPA (U.S. Environmental Protection Agency Region 7) 2007. Environmental Laws Applicable to Construction and Operate of Ethanol Plants. USA. Saatavissa: [http://www.epa.gov/region7/priorities/agriculture/pdf/ethanol\\_plants\\_manual.pdf](http://www.epa.gov/region7/priorities/agriculture/pdf/ethanol_plants_manual.pdf)

Erjava Asmo (2006). Biokaasulaitoksen perustaminen kasvihuonetilalla. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja Nro 46. 83 s. Saatavissa: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20547/ASMO\\_biokaasu.pdf?sequence=3](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20547/ASMO_biokaasu.pdf?sequence=3)

European Biomass Industry Association (EUBIA) 2011. [Internet sivut]. [Cited 13 June 2011]. Saatavissa: <http://www.eubia.org/108.0.html>

Gasification guide 2009. Guideline for Safe and Eco-friendly Biomass Gasification. European Commission 2009. Saatavissa: [http://www.gasification-guide.eu/gsg\\_uploads/documenten/D10\\_Final-Guideline.pdf](http://www.gasification-guide.eu/gsg_uploads/documenten/D10_Final-Guideline.pdf)

Kauriinoja Anu (2010) Small-scale biomass-to-energy solutions for Northern Periphery areas. Diplomityö. Oulun yliopisto, Prosessi ja ympäristötekniikan osasto.

Kelleher BP, Leahy JJ, Henihan AM, O'Dwyer TF, Sutton D & Leahy MJ. 2002. Advances in poultry disposal technology – a review. *Biore-source Technology* 83:27–36

Liao, Wei and Saffron Chris 2008. Ethanol Production and Safety. *Biosystems & Agricultural Engineering*. Michigan, USA. [Cited 23 June 2011]. Saatavissa: [http://bioenergy.msu.edu/fuels/on\\_farm/on\\_farm\\_ethanol\\_production.pdf](http://bioenergy.msu.edu/fuels/on_farm/on_farm_ethanol_production.pdf)

Loo Sjaak van & Koppejan Jaap (2008) *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. London, United Kingdom. Earthscan. 465 p. ISBN: 978-1-84407-249-1.

McKendry P. 2002c. Energy production from biomass (part3): gasification technologies. *Biore-source Technology* 83:55–63

Micre 2011. [Internet sivut]. [Cited 15 June 2011]. Saatavissa: <http://nortech.oulu.fi/eng/W2E.html>

MSDS Safety data for ethyl alcohol. 2011. [Internet sivut]. [Cited 23 June 2011]. Saatavissa: [http://msds.chem.ox.ac.uk/ET/ethyl\\_alcohol.html](http://msds.chem.ox.ac.uk/ET/ethyl_alcohol.html)

OSHA (Occupational Safety and Health Organization) (2005). U.S. Department of Labor. Saatavissa: [http://www.osha.gov/OshDoc/data\\_Hurricane\\_Facts/hydrogen\\_sulfide\\_fact.pdf](http://www.osha.gov/OshDoc/data_Hurricane_Facts/hydrogen_sulfide_fact.pdf)

Nag, Ahindra 2007. *Biofuels Refining and Performance*. McGraw-Hill Professional Publishing. Ohio, USA. ISBN: 9780071594783. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/lib/oulu/docDetail.action?docID=10210173&p00=handbook%20fermentation>

Pöyry Environment 2006. Punkaharjun bioetanolitehdas, ympäristövaikutusten arviointiselostus. Suomen Bioetanol Oy. Suomi. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=61456&lan=fi>

Scragg Alan 2006. *Environmental Biotechnology, second edition*. Oxford University Press, New York. 447 p. ISBN: 0-19-926867-3.

Soltes EJ. 1988. (Chapter 1). Of Biomass, Pyrolysis, and Liquids Therefrom. In: Soltes EJ & Milne TA. (Ed.) 1988. *Pyrolysis Oils from Biomass: Producing, Analyzing, and Upgrading*. Washington DC. American Chemical Society. 353 p. ISBN 0–8412–1536–7.

Taavitsainen Toni 2006. Maatalouden biokaasulaitoksen perustaminen ja turvallisuustarkastelu. Savonia ammattikorkeakoulu (Malla2). ISBN: 952-203-041-4. Saatavissa: [http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia\\_ja\\_ymparisto/ymparistotekniikka/Malla2Loppuraportti%281%29.pdf](http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia_ja_ymparisto/ymparistotekniikka/Malla2Loppuraportti%281%29.pdf)

Tham M.T. 2011. Distillation. [Internet sivut]. [Cited 21 June 2011]. Saatavissa: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/distil/distilop.htm> Vogel, Henry C., 1983. *Fermentation and Biochemical Engineering*. Engineering handbook. Noyes Publications, New Jersey, United States. 440 p. ISBN: 0-8155-0950-2

Uslu A, Faaij APC & Bergman PCA. 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. *Techno-economic evaluation of torrefac-*

tion, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy* 33:1206–1223

Vogel HC. 1983. *Fermentation and Biochemical Engineering*. Engineering handbook. Noyes Publications, New Jersey, United States. 440 s.

Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ & Jones DL. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Review. *Biore-source Technology* 99:7928–7940

Wisbiorefine. 2004b. Wisconsin Biorefining Development Initiative™. Fermentation of 6-carbon sugars and starches. [Accessed 17 November 2009]. Saatavissa: <http://www.wisbiorefine.org/proc/fermentss.pdf>

Ympäristöministeriö 2011a. Ympäristöluvat [Internet sivut]. [Cited 26 June 2011]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=96&lan=fi>

Ympäristöministeriö 2011b. Bioetanolitehdas. [Internet sivut]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=211826&lan=FI>



# MicrE

www.micre.eu

## YHTEYSTIEDOT

### SUOMI

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu  
Ville Kuittinen  
050 532 6131  
ville.kuittinen@pkamk.fi

### Oulun yliopisto

Eva Pongrácz  
040 506 1623  
eva.pongracz@oulu.fi

### Josek Oy

Jouko Parviainen  
050 431 2297  
jouko.parviainen@josek.fi

### SKOTLANTI

International Resources and Recycling Institute (IRRI)  
Nick Lyth  
+44 780 215 0053  
nick.lyth@recycling-institute.org

### IRLANTI

WESTBIC Business and Innovation Centre  
Seamus McCormack  
+44 94 925 6745  
smccormack@westbic.ie

### Mayo County Council

Neil Sheridan  
+353 87 7992 941  
nseridan@mayococo.ie

### West Regional Authority

Jim McGovern  
+353 91 563 842  
westregionau@galwaycoco.ie

### POHJOIS-IRLANTI

University of Ulster  
Derek Bond  
+44 28 7032 4350  
d.bond@ulster.ac.uk



FINNISH CENTRE FOR ENVIRONMENTAL EDUCATION



UNIVERSITY of OULU  
OULUN YLIOPISTO



Northern  
Periphery  
Programme  
2007-2013

Interventions financing  
in Europe's Northern  
Periphery for a sustainable  
and prosperous future



European Union  
European Regional Development

