

Katja Kentala,
Asko Puhakka & Sini Makkonen

BIOENERGIAN JALOSTUSTERMINAALI



Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisu B:23

BIOENERGIAN JALOSTUSTERMINAALI

Katja Kentala,
Asko Puhakka & Sini Makkonen

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu
Joensuu 2011

Julkaisusarja	Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisu B:23
Vastaava toimittaja	Dos. YTT Liisa Westman
Toimittajat	HTM Asko Puhakka, MMM Sini Makkonen
Kirjoittaja	Insinööri (amk) Katja Kentala
Taitto ja kansi	MMM Sini Makkonen

ISBN

978-951-604-130-1

ISSN

1797-383X

Esipuhe

Bioenergia - mahdollisuuksia ja haasteita

Uusiutuva energia ja metsäbiomassan käyttö energian tuotannon raaka-aineena edistävät kestävästä kehitystä ja luonnonvarojen monipuolista käyttöä vähentäen samalla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Puuhakkeesta voidaan valmistaa sähköä, lämpöä, biopolttoaineita ja uusia kemian teollisuuden raaka-aineita. Biomassan mahdollisimman tehokas hyödyntäminen edellyttää uudenlaista ajattelumallia, ns. bioenergiaterminaalia, missä biomassaa voidaan jalostaa mahdollisimman teknis-taloudellisesti energiaksi, mutta mahdollisesti myös uusiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Biomassan jalostukseen soveltuvissa pienimuotoisissa CHP-yksiköissä voidaan tuottaa samanaikaisesti sähköä ja lämpöä kaasuttamalla puuta ja polttamalla muodostuva tuotekaasu. Kaasutuksella voidaan tuottaa hiukkasvapaata, energiaintensiivistä kaasua, joten se on samalla vastaus EU:n yhä tiukentuville ympäristövaatimuksille. Puukaasutuksen ja häikäpönttöjen historia ylittää toisen maailmansodan aikoihin, mutta viime vuosina häikäpönttöjen uuden tuleminen myötä puukaasutusteknologian pioneerityötä ovat tehneet mm. useat Pohjois-Suomen alueella toimivat pk-yritykset. Bioenergian ja metsäbiomassan käytön lisääminen energiantuotannossa antaa mahdollisuuden yrittäjyydelle ja maaseudun elinvoimaisuudelle.

Bioenergian jalostusterminaali

Julkaisun taustana olevan tutkimuksen tarkoituksena on selvittää puuta raaka-aineena käyttävän bioenergian tuotanto- ja jatkojalostukseen soveltuvan biovahan tuotantomahdollisuutta osana hajautetun energiantuotannon rakennetta. Selvityshankkeen ovat rahoittaneet OSKE-ohjelma, Josek Oy ja ELY-keskus. Asiantuntijaorganisaationa jalostustoiminnan analysoinnissa toimi Kokkolan yliopistokeskus Chydenius ja Oulun yliopisto. Selvitystyön tuloksena oli, että biovahan hajautetun tuotannon jatkokehitystä kannattaa jatkaa ja bioenergiaterminaali muodostaa siihen konkreettisen mahdollisuuden. Toiminta-ajatuksena on, että matalammalla jalostusasteella puusta muodostettu biovaha toimitetaan jatkojalostukseen suurteollisuustasoiseseen tuotantoyksikköön tai vahan käyttöä paikallisena, uusiutuvana energialähteenä kehitetään esim. uudenlaisten lämpölaitteistojen polttoaineena.

Hankkeen toteuttajana toimi Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu yhdessä Oulun yliopiston ja Kokkolan yliopistokeskus Chydeniuksen kanssa. Oulun yliopisto ja yliopistokeskus Chydenius tekevät laboratoriotason tuotantokokeita ja laativat selvityksen pienimuotoisen vahan tuotannon edellyttämästä teknologiasta ja tuotantomenetelmistä.

Hanke parantaa valmiuksia kehittää ja ottaa käyttöön paikallisiin uusiutuviin raaka-aineisiin perustuvaa energian ja energiantuotannon väli tuotteiden valmistusteknologiaa. Tavoitteena on edistää uusiutuvien luonnonvarojen osuuden lisäämistä energiantuotannossa ja siten alentaa päästöjä. Maakunnallisesti merkittävä hyöty on tuotannon ja työpaikkojen säilyminen ja lisääntyminen alueella. Hankkeen tulokset ovat julkisia.

Asko Puhakka,

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu

Ulla Lassi,

Oulun yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Sisällys

1 Johdanto	6
2 Selvitystyön taustat ja tavoitteet	7
3 Biomassan terminen käsittely	9
3.1 Poltto	9
3.2 Pyrolyysi	11
3.2.1 Hiilestys	12
3.2.2 Kaasutus	12
3.2.3 Suora nesteytys	13
3.3 Seospoltt	13
3.4 Lämpökusten polttotekniikat	14
3.4.1 Arinapoltto	14
3.4.2 Leijupoltt	15
3.4.3 Stokeripolttimet	15
3.4.4 Kaasupoltt	16
4 Biomassan biokemiallinen käsittely	17
4.1 Anaerobinen hajoaminen	17
4.2 Alkoholifermentointi	18
4.3 Aerobinen hajoaminen	19
5 CHP-teknologiat	20
5.1 Kaasumoottorit	22
5.2 Höyrykattila	22
5.3 Höyrymoottori eli höyrykone	23
5.4 Höyryturbiini	23
5.5 ORC-prosessi	24
5.6 Mikroturbiini	25
5.7 Stirling-moottori	25
5.8 Polttokennot	26
6 Ympäristönäkökohdat	27
6.1 Happamoituminen	28
6.2 Pienhiukkaset	29
6.3 Toksisuus	29
6.4 Otsoni	30
6.5 Luonnon rehevöityminen ja monimuotoisuus	30
7 Potentiaaliset biojalostamoteknologiat	32
8 Metsäbiomassan kaasutus	33
8.1 Tuotekaasu eli puukaasu	33
8.2 Biosynteesikaasu	34
9 Synteesikaasun fermentointi	35
10 Fischer-Tropsch-synteesi	36
11 Yhteenveto	38
Lähteet	39

1 Johdanto

Tässä selvityksessä tarkastellaan pieniä ja keskisuuria yhdistetyn sähkön- ja lämmön tuotantotekniikoita (CHP), jotka hyödyntävät metsäbiomassaa. Tutkimusselvitys on osa biojalostamohanketta, jonka tarkoituksena on kartoittaa keskeiset esteet ja edellytykset biopolttoaineiden tuotantotoiminnan käynnistämiseen pk-sektorilla. Tutkimusselvityksen teoria osa koostuu kolmesta pääotsikosta; biomassan terminen käsittely, biokemiallinen käsittely ja CHP-teknologiat. Nämä otsikot muodostavat kokonaisuuden, jonka perusteella saadaan käsitys mitä ja miten puupohjaisista biopolttoaineista voidaan tuottaa ja jatkojalostaa.

Selvityksessä termiseen käsittelyyn lasketaan kuuluvaksi poltto, pyrolyysi ja seospoltto. Pyrolyysi sisältää biomassan hiilestyksen, kaasutuksen ja suoran nesteytyksen. Lisäksi selvitetään tyypilliset polttotekniikat puupohjaisille biopolttoaineille. Myös biomassan biokemiallinen käsittely huomioidaan. Biokemiallisessa käsittelyssä otetaan huomioon anaerobinen hajoaminen, alkoholifermentointi ja aerobinen hajoaminen. Lisäksi jokaisen otsikon yhteydessä käsitellään hieman lämmön ja syntyneiden tuotteiden jatkojalostusta energiaksi, kemiallisiksi tuotteiksi ja liikenteen polttoaineiksi.

Selvityksessä tarkastellaan myös pienien alle 1 MW:n CHP-laitosten teknologioita, joita ovat mäntämoottorit eli diesel- ja kaasumoottorit, höyrykattila, höyryturbiini, ORC-prosessi, mikroturbiini, strilingmoottori ja polttokennot. Näiden teknologioiden yhteydessä mainitaan niiden tämän hetkinen kaupallistamisvaihe ja käyttö Suomessa sekä niille soveltuvat biomassapolttotaineet. Lisäksi selvityksessä perehdytään hieman ympäristönäkökohtiin.

Selvityksen loppuun on koottu potentiaalisimmat modernit biojalostamoteknologiat, jotka perustuvat kaasutukseen. Kaasutuksesta saatua tuotekaasua ja biosynteesikaasua hyödynnetään fermentoinnin ja Fischer-Tropsch-synteesin kautta uudelleen polttoaineeksi ja biokemikaaleiksi.

2 Selvitystyön taustat ja tavoitteet

Suomi pyrkii saavuttamaan johtavan biotalousmaan aseman biopohjaisten tuotteiden osalta globaalisti ja sitä asemaa tavoitellaan metsäteollisuuden avulla, josta on tarkoitus kasvattaa tulevaisuuden biotalouden tiennäyttäjää. Metsäteollisuutta kannustetaan investoimaan omiin biojalostamoihin ja oman bioenergian tuotantoon, jolloin myös yhteiskunta hyötyy siitä. Tarkoituksena on saada aikaan pienillä hiilidioksidipäästöillä seuraavat tuotantovolyymit:

- valmistaa kierrätettäviä, uusiutuvia, biohajoavia tuotteita, jotka sitovat ilmaston hiiltä
- kehittää biomassapohjaisia uusia teknologioita
- tuottaa seuraavan sukupolven biokemikaaleja ja –polttoaineita¹.

Suomen kannalta kolme tärkeintä kategoriala biojalostamoiden kehityksessä ovat seuraavat:

- sovellukset, jotka korvaavat fossiilisten luonnonvarojen käyttöä
- biomassavirtojen fraktiot ja uudet tuotesovellukset
- synergiaetujen hyödyntäminen olemassa olevalle teollisuudelle ja infrastruktuurien tarjoaminen².

Tällä hetkellä biomassan jalostamisen kehityksen esteenä eivät ole sijoittajat vaan pienten yritysten ja toimijoiden puute, joilla olisi mahdollisuus viedä kehityshanke lävitse. Vaikka Suomessa on erilaisia yrityshautomaita, niin oppilaitosten kuin yksityisen sektorin puolella, syntyy todella vähän ideoita, jotka ovat todella uusia ja niitä kannattaa kehittää loppuun asti. Uuden teknologian kehityskaari kulkee ideasta, laboratoriomittakaavan kokeisiin, pilot –mittakaavaan ja demonstraatiolaitokseen ennen kuin siitä todella syntyy tehdasmittakaavan laitos. Vaiheesta seuraavaan siirtymisen seurauksena kustannukset nousevat noin 10-kertaisiksi².

Fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna biopolttoaineiden energiasisältö on alhainen ja siksi niitä ei yleensä kannata kuljettaa pitkiä matkoja. Järkevintä olisikin kehittää biopolttoainekäyttöisiä hyvän hyötysuhteen omaavia pienvoimaloita, joissa polttoainetta voidaan jalostaa mahdollisimman pitkälle lähellä niiden talteenottoa. Tämä olisi etenkin pienvoimaloille järkevää sillä sivutuotteena tai jätteenä syntyvät biopolttoainemäärät eivät riitä ison mittakaavan energiantuotantoon³.

Pohjois-Karjala, Kainuu sekä Pohjois- ja Keski-Pohjanmaa omaavat runsaasti puuraaka-ainevaroja, mutta puumassan hyödyntämistä alueella on vielä vähän. Yhteistyökonsortion tavoitteena on kehittää metsäraaka-aineen jalostamiseen perustuvaa tuotantotoimintaa, jolla elvytetään etenkin Pohjois-Karjalan metsä- ja puualaa. Tuotantotoimintaa on tarkoitus toteuttaa pienissä tai keskisuurissa perus- ja jatkojalostusyksiköissä. Jalostusyksiköissä voidaan tarpeen mukaan käyttää ja jalostaa metsäbiomassaa biopolttoaineeksi. Metsäbiomassaa voidaan jalostaa muun muassa lämmöksi, sähköksi, liikenteen polttoaineeksi sekä petrokemian korvikkeeksi. Ideana on, että biojalosteesta tuotetaan sähköä ja

lämpöä lähialueiden tarpeisiin. Tuotantomallin hajautuksella puuraaka-aineen kuljetuskustannukset ja -rasite säilyvät kohtuullisina tukien samalla aluetaloutta positiivisesti⁴.

Hankkeessa selvitetään kuinka metsäbiomassasta jalostetaan erilaisilla tuotantoteknologioilla puupohjaisia biopolttoaineita pk-yritysten käyttöön. Alueellisessa ympäristöajattelussa on tärkeää, että tulevaisuudessa pyritään keskittämään ja kehittämään tuotantotoimintaa lähelle raaka-aineita. Selvityshanke pyrkii konkreettisesti kartoittamaan keskeiset edellytykset ja esteet, jotka vaikuttavat käytännössä biopolttoaineiden tuotantotoiminnan käynnistämiseen pk-yrityksissä Väli-Suomen maakunnissa. Tässä tutkimus selvityksessä keskitytään biojalostamon eri tuotantotapoihin ja -teknologioihin¹. Bioenergiaa käytetään Suomessa määrällisesti jo suhteellisen paljon ja muihin maihin verrattuna lisäyspotentiaalia on suhteellisen vähän. Eniten lisäyspotentiaalia on seuraavalla neljällä bioenergialähteellä:

- metsähakkeen käyttö
- puun pienkäyttö
- kierrätyspolttoaineiden ja biokaasun käyttö
- peltobiomassojen käyttö⁵.

Biomassan ominaispiirteet ja energiavarat ovat erittäin merkittäviä maailmanlaajuisesti. Biomassavarastot ovat mahdollisesti maailman suurin ja pisimpään kestävä energianlähde. Perinteinen biomassan poltto on ollut tehotonta energian tuhlaamista ja sillä on saatu aikaan huomattavia negatiivisia ympäristövaikutuksia. Nykyaikaiset mahdollisuudet ovat nopeasti korvanneet perinteisen käytön, lähinnä teollisuusmaissa. Muutosta on tapahtunut myös monissa kehitysmaissa, kuitenkin hyvin epätasaisesti. Jo pienet tutkimukset ovat osoittaneet, että kehittämällä hyötysuhdetta biomassan energiantuotannossa, sekä pitämällä yllä biomassaplantaasien tuotantokykyä, voidaan saavuttaa ympäristöystävällisesti tai terveydellisesti vakaa pohja biomassan tuotannossa ja käytössä⁶.

3 Biomassan terminen käsittely

Biomassan terminen käsittely hyödyllisiksi tuotteiksi, kuten sähköksi ja lämmöksi, sisältää sekä ensisijaisen että toissijaisen jalostusteknologian. Ensisijaisessa jalostusteknologiassa metsäbiomassa muutetaan suoraan lämmöksi, paremmin sopivaksi polttoaineeksi tai energian kuljettajaksi kaasuille, polttonesteille ja puuhiilelle. Ensisijaiseen jalostusteknologiaan lasketaan myös poltto ja hydrolyysi eli hajotus⁷.

Toissijainen jalostusteknologia muuntaa energian kuljettajat halutuksi energiatuotteeksi kuten sähkövaloksi. Toissijaiseen teknologiaan lasketaan seuraavat:

- Höyrykattila, joka ottaa lämpöä poltosta ja käyttää ottamansa lämmön nostamaan tehtaan prosessin lämpötilaa tai muuttaa lämmön höyryturbiinin kautta sähköksi.
- Kaasuturbiini tai –moottori hyödyntää ensisijaisen jalostusteknologian generaattorikaasua matalasta keskisuureen lämpöarvoon. Generaattorikaasua voidaan polttaa suoraan kaasuturbiinissa, sisäisesti polttomoottorilla tai kytkeä suoraan molempiin, jolloin siitä tuotetaan sähköä tai hoitamaan vaihdelaatikkoon mekaanisen voiman ajossa. Viime vuosina on alettu korostamaan suorituskyvyn paranemista sähkölämmön tuotannossa ja sen takia kehitys panostaa niiden yhdistelmälaitoksiin.
- Sisäisiä polttomoottoreita käytetään alkoholipolttoaineen, biodieselin, generaattorikaasun tai pyrolyysiöljyn polttoainekuljetukseen⁷.

Ensisijainen ja toissijainen teknologia voivat olla siis erottamattomia tietyissä menetelmissä. Termisen käsittelyn pääperiaate on energian tuottamista lämmöllä, jolloin saadaan aikaan kemiallinen prosessi, jolla voidaan tuottaa esimerkiksi höyryä. Prosesseista saatu tuote voi olla joko kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta, esimerkiksi puuhiiltä, etanolia tai tuotekaasua⁸.

3.1 Poltto

Poltto tarvitsee poltettavaa ainetta eli biopolttoainetta ja sen lisäksi ilmaa, jotta voi tuottaa lämpöä³. Itse poltto jakautuu polttopartikkeleiden suhteen eri vaiheisiin, jotka ovat lämpeneminen, kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen tai kaasutus. Nämä voivat myös tapahtua tietyissä olosuhteissa samanaikaisesti¹⁰. Biomassan polttoprosessi sisältää biomassan haihdutushöyryä, joka palaa liekissä, samaan aikaan kun jäljelle jäänyt hiili hiiltyy ja palaa ilma lisäyksen johdosta. Kuivaa biomassaa poltettaessa usean eri perusfaasin läpi, esiintyy seuraavaa:

- kuumenemista ja kuivumista
- haihtuvien kaasujen tislausta

- haihtuvien kaasujen polttoa
- jäljelle jäävän haihtumattoman hiilen polttoa.

Tätä samaa prosessia käytetään niin ison kuin pienen mittakaavan laitoksissa⁷.

Polttoteknologia tuottaa noin 90 % energiasta, joka on lähtöisin biomassasta, jalostamalla biomassapolttoainetta useiksi erilaisiksi käyttöenergioiksi kuten kuumaksi ilmaksi ja vedeksi, höyryksi sekä sähköksi. Kaupalliset ja teolliset tehtaot voivat polttaa monen tyyppistä biomassaa valtavista puista yhdyskuntajätteisiin⁶. Suorapoltto onkin yleisin ja helpoin tapa tuottaa suoraan energiaa biomassasta⁸. Yksinkertaisin polttoteknologia on sulatusuuni, joka polttaa biomassaa polttokammiossa. Biomassan polttokalusto, joka tuottaa sähköä höyrykäyttöisestä turbiinigeneraattorista, saavuttaa jalostushyötysuhteen 17 - 25 %. Vastapainelaitos voi nostaa hyötysuhteen melkein 85 %:iin polttamalla biopolttoaineen lisäksi myös haihtuvia kaasuja. Ison skaalan polttosysteemi käyttää suurimmaksi osaksi matalalaatuista polttoainetta, kun taas korkealaatuiset polttoaineet ovat useimmiten käytössä pienillä sovelluksilla⁶.

Peruseriaate on, että lämpö murtaa kasvisoluja ja karkottaa haihtuvan aineen, kuten myös vapaan ilman. Sen sijaan, että kaasut vapautuisivat ilmakehään, suodatetaan ne korkealämpöisen alueen läpi, jossa kaasut poltetaan ja niistä vapautuu lisää lämpöä. Tehokkuuden lisäksi tämä teknologia vapauttaa myös ilmakehään vähemmän saastuttavia kemikaaleja. Hiilipoltto on samankaltainen prosessi kuin mitä puun polttaminen, mutta hiilellä on korkeampi haihtumattoman hiilen aste ja paljon matalampi haihtuvien aineiden pitoisuus. Tyypillinen haihtumattomien aineiden suhde on seuraavanlainen: pehmeä puuaine 76,6 %, kova puuaine 80,2 % ja bitumipitoinen musta hiili 37,4 %. Tämä on tärkeä ero, joka on vaikuttanut kaupallisen suuren mittakaavan puun polttolaitosten suunnitteluun siitä asti, kun biomassan polttoon liitettiin haihtuvien aineiden poltto. Verrattaessa puuta ja hiiltä voidaan todeta, että pienemmällä määrällä hiiltä saavutetaan yhtä paljon lämpöä kuin mitä puuta käytettäessä. Kuitenkin hiilen poltosta vapautuu enemmän ilmakehää saastuttavia yhdisteitä kuin puun poltosta. Märkää ja kuivaa puuta verrattaessa voidaan todeta kuivan puun toimivan odotetusti paremmin. Poltto-ominaisuuksien vertailu on esitetty Taulukossa 1⁷.

Taulukko 1. Kuivan puun, märän puun ja bitumipitoisen hiilen poltto-ominaisuuksien vertailua 3 MW_{th} höyrykattilalle, 220°C⁷.

Poltto-ominaisuudet	Kuiva puu	Märkä puu	Hiili
Absoluuttinen kosteus (%)	25	50	10
Tehtaan suorituskky (%)	75	65	84
Lämpöarvo (poltettuna; MJ/kg)	14,7	9,7	28,6
Lämmön syöttö (GJ/h)	14,4	16,6	12,8
Polttoaineen syöttö (kg/h)	962	1709	449
Polttoaineen teho (m ³ /h)	1,3	1,5	0,56
Tuhka määrä (kg/h)	9,6	11,4	44,9
Epävakaat päästöt (kg/h)	572	677	138
Ilman tarve (teoreettinen; kg/h)	4570	5410	4210
Hukkakaasu (teoreettinen; Nm ³ /h)	4006	4720	3430
SO ₂ päästöt	1,9	2,3	13,5

Uudet kehittyneemmät polttoteknologiat mahdollistavat todella märänkin polttoaineen, kuten saha-jauhon ja kuorijätteen polton¹⁰. Kuivien ja märkien biopolttoaineiden lämpöarvoilla on eroa, Taulukko 2¹¹. Raakapolttolaitteistojen yksinkertainen rakenne tarjoaa kilpailukykyisen vaihtoehdon pienen mit-takaavan tehtaalle¹⁰.

Taulukko 2. Biopolttoaineiden lämpöarvoja¹¹.

Metsäbiomassa	Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]
Metsätähdehake	18,5 - 20	6 - 9
Kokopuuhake	18,5 - 20	7 -10
Rankahake	18,5 - 20	7 -11
Kantohake	18,5 - 20	8 -13
Havupuun kuori	18,5 - 20	5 - 9
Koivun kuori	21 - 23	8 -11
Pilke	18,5 - 19	13,4 - 14,5
Puutähdehake	18,5 - 20	6 - 15
Sahahake	18,5 - 20	6 -10
Sahanpuru	19 -19,2	6 -10
Kutterinlastu ja hiontapöly	19 - 19,2	16 -18
Puupelletti	19 -19,2	16,8
Kierrätyspolttoaine	17 - 37	13 - 35
Ruokohelpi	17,1 - 17,5	13,2 - 14,2
	Tehollinen lämpöarvo [MJ/m³]	
Biokaasu	35,6	-

3.2 Pyrolyysi

Pyrolyysissa puu, jonka kosteus on vähemmän kuin 10 %, lämmitetään erittäin nopeasti lähes ha-pettomassa tilassa 500 - 600 asteen lämpötilaan. Puuaineksesta pääosa muuttuu kaasuiksi nopean pyrolyysireaktion johdosta ja nopean kaasujen jäädytyksen ansiosta se muuttuu nestemäiseksi puu-polttolaitteeksi. Hiilijäännös ja lauhtumattomat kaasut käytetään yleensä prosessin energiaksi¹². Kiinte-än aineen kuten biopolttoaineen muuttumista lämmöntuotannon avulla kaasuksi ja tervaksi kutsutaan pyrolyysiksi. Palamisolosuhteissa pienillä hiukkasilla pyrolyysinopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka, suurilla puolestaan joko tuotteiden siirto pois partikkelista tai lämmönsiirto ympäristöstä partikkeliin. Pyrolysoituvaa osaa kiinteästä aineesta kutsutaan siis haihtuviksi aineiksi, pyrolyysin jäljelle jäävää kiinteää ainetta jäännöshiileksi ja puusta syntyvää jäännöshiiltä puuhiileksi⁹.

Pyrolyysin tarkoituksena on tuottaa biomassasta nestemäistä polttoainetta tai bioöljyä, joita voidaan sekoitteena käyttää korvaamaan raakaöljy, suoraan lämmityksen ja sähkön tuotantoon tai jalostuk-seen kemikaalien ja polttoaineiden tuotannossa. Pyrolyysireaktiot ja -prosessit ovat epävakaita ja vaikeasti ennustettavissa, mutta hallittaessa ne tuottavat pyrolyysiöljyä, happoja, vettä, kiinteää hiiltä, ja kaasuseoksia. Ne ovat riippuvaisia lämpötilasta, lämmitysajasta, ympäristöolosuhteista, happimää-rästä, vedestä ja muista kaasuista sekä muodostuneesta tuhkapitoisuudesta⁷.

Karkeasti esitettyinä pyrolyysin alueet ja tuotteet:

- hiilestys, silloin tuotetaan puuhiiltä
- kaasutus, silloin tuotetaan puukaasua
- suora nesteytyksen, silloin tuotetaan pyrolyysiöljyä¹⁴.

3.2.1 Hiilestys

Kuivatuslauksessa eli hiiltämisessä pyrolyysireaktion seurauksena syntyy korkeassa lämpötilassa puuhiiltä, joka ei poistu kosteuden ja puun haittuvien aineiden mukana. Prosessin loppulämpötilan kosteus ja hiiltämisen kesto ja prosessi, puulaji sekä puuraaka-aineen laatu vaikuttavat hiilijäännöksen laatuun¹².

Lämpötilan kohotessa 150-170 asteeseen alkaa hiillettävästä puuaineksesta vapautua vettä. Puu alkaa hajota kemiallisesti ja sitoa itseensä samalla lämpöä lämpötilan kohotessa yli 170 asteen. Puu-aines hajoo kaasumaisiksi ja nestemäisiksi tuotteiksi käynnistämällä samalla eksotermisen reaktion, kun kuumennuksen seurauksena lämpötila kohoaa noin 270 asteeseen. Hiiltämisen aikana syntyykin monia käyttökelpoisia sivutuotteita, kuten tärpähtiä, tervaa, etikkahappoa, metanolia, asetonia ja hiilivetyjä. Nämä sivutuotteet voidaan ottaa talteen nykyaikaisten hiiltouunien avulla. Hiiltämällä saadaan jopa 90 prosentin hiilipitoista sysiä, jota saadaan 30 - 40 prosenttia kuivan puun painosta. Puuhiiltä käytetään kimröökien ja aktiivihiihen valmistukseen ja metallurgiassa sekä pelleistimenä että polttoaineena¹⁵.

3.2.2 Kaasutus

Kaasutus tapahtuu korkeassa lämpötilassa, jossa polttoaine kaasutetaan syöttämällä ilmaa enemmän kuin mikä on stökiometrisen eli polttoaineen täydellisen palamisen tarvitsema ilmamäärä. Kaasutus tapahtumaan kuuluu polttoaineen kuivuminen, hajoaminen pyrolyysissä sekä jäännöshiilen palamisreaktiot ja kaasuuntuminen. Kaasutuksessa tarvittava lämpöenergia saadaan tuotettua jäännöshiilen polttamisella¹⁶. Raaka-aineena on lähinnä puu kuten metsätähde ja kuori, sekä ruokohelpi ja jättepohjaiset raaka-aineet sekä turve⁵. Periaatteessa kaasutus ei ole uusi teknologia, mutta sen käyttöä biomassan jalostukseen käyttökelpoiseksi polttoaineeksi ei ole tutkittu vielä kauaa. Kaasutusprosessilla voidaan tuottaa puukaasua eli synteesikaasua kahdella eri tavalla; katalyytin avulla ja ilman katalyyttiä. Katalyytiton prosessi vaatii korkean lämpötilan (1300 °C) toimiakseen, kun taas katalyytin avulla toteutettu prosessi toteutuu pienemmällä lämpötilalla (900 °C)¹⁷. Orgaanista hiiltä voidaan jalostaa yli 95 % kaasutuksen avulla biomassasta¹⁸.

Biomassan jalostus myyntikelpoisiksi polttoaineiksi ja tuotteiksi on kemian näkökannalta katsottuna monimutkainen ja -vaiheinen prosessi:

- lämpöhajoaminen kaasuksi, tiivistettävissä oleva vesihöyry ja hiili (pyrolyysi),
- vesihöyryn myöhempi lämpöpilkkoutuminen kaasuksi ja hiileksi,
- hiilen kaasutus höyryksi ja hiilidioksidiksi
- polttokaasun osittainen hapettuminen, vesihöyryä ja hiiltä¹⁹.

Lopullinen tuotekaasu on kaasuseosta, jossa on häkää, vetyä ja metaania pääkomponentteina. Pääkomponenttien lisäksi kaasuseoksessa on muun muassa vesihöyryä, hiilidioksidia ja typpeä¹⁹. Ennen synteisiä kaasutuksen tuotekaasu tulee puhdistaa epäpuhtauksista ja edelleen konvertoida vaatimusten mukaiseksi synteetikaasuksi⁵.

Tuotekaasu on ensisijaisesti heti käytettävissä polttoaineeksi paikallisessa tehon kehityksessä kun taas synteetikaasua puolestaan käytetään polttoaineiden ja kemikaalien väli tuotteiden valmistukseen. Bio synteetikaasusta saadaan kuljetuspolttoainetta pääasiassa johdannaisreittiä pitkin, jossa vety on saatu polttoaineeseen vesikaasun siirtoreaktiossa (WGS), hiilivedyt Fischer-Tropsch synteetillä (F-T) tai metanolisynteetillä. Näistä synteeseistä tulee reaktioiden kautta tuotteeksi hiilivetyjä ja hapetettua polttonestettä¹⁷. Valmistetusta kaasusta voidaan jalostaa metanolia, etanolia, metaania ja parafiinivahaa. Parafiinivaha soveltuu hyvin korkealaatuisen liikennepolttoaineen jalostukseen¹.

WGS-reaktio käyttää hiilimonoksidia eli häkää ja vettä tuottaakseen vetyä ja hiilidioksidia. Sitä voidaan käyttää tuottamaan kaasusta synteetikaasua rikastamalla vetysisältöä tai tuottamaan vetyä loppuprosessin omiin tarpeisiin. F-T synteetissä tuotetaan hiilivety polttoaineita synteetikaasusta. Metanolin tuotanto synteetikaasusta on ollut tunnettua vuodesta 1920 lähtien¹⁷.

3.2.3 Suora nesteytys

Vanhin tapa tuottaa puusta nestemäistä puupolttoainetta on kuivatus eli pyrolyysi. Nestemäisiä puupolttoaineita voidaan käyttää joko suoraan tai jatkojalostamalla energian tuotannossa, kemiantollisuuden raaka-aineena ja liikennepolttoaineina. Suoranesteytys ei ole halvin eikä teknisesti helpoin tapa puun nesteytykselle energiakäyttöä ajatellen, mutta alkoholien tuotantoon ja siitä jatkojalostettuna se on hyvinkin potentiaalinen menetelmä liikenteen polttoaineeksi¹². Tämän hetkisen näkemyksen perusteella biomassan suoran nesteytyksen tuotantoa kohdistetaan siis entistä enemmän nestemäisiin hiilivetyihin ja sitä kautta se ottaa paikkansa enemmän tai vähemmän liikenteenkuljetusvälineenä²⁰.

Nesteytys tuottaa yleensä veteen liukenemattomia öljyjä, joilla on korkea viskositeetti, pelkistäviä kaasuja kuten CO ja H₂, jota tarvitaan biomassan lisäyksessä. Termisen käsittelyn alueella biomassan jalostus lignoselluloosapohjaisista materiaaleista suoraan nestemäiseksi on hyvin samanlainen, kuin mitä raskaiden polttoaineiden reaktio synteetikaasun kanssa sopivan katalyytin ollessa läsnä. Bioöljyä saadaan ilmakeivästä puusta korkeassa paineistetussa nesteytyksessä, jolloin tuote on moninainen seos haihtuvia orgaanisia happoja, alkoholeja, aldehydejä, estereitä, eettereitä, ketoneita ja haihtumattomia komponentteja. Nämä öljyt voidaan jalostaa katalyyttisesti ja tuottaa niistä orgaanisia tislauustuotteita, jotka ovat hiilivetyrikkaita ja hyödyllisiä kemikaaleja¹⁷.

3.3 Seospoltto

Ilmastonmuutoksen hillinnässä ja öljyriippuvuuden vähentämisessä ovat uusiutuvan energian tukipolitiikat hyvin tärkeässä roolissa. Uusiutuvan energian käyttöä lisää tehokkaasti seospoltto, jossa poltetaan samanaikaisesti biomassaa ja fossiilisia polttoaineita²¹. Fossiilisena polttoaineena käytetään yleensä kivihiiltä, joka yhdessä biomassan kanssa mahdollistaa sähkön ja lämmön tuotannon hiilikäyttöisissä kattiloissa. Poltossa voidaan hyödyntää fossiilille polttoaineille suunniteltua laitteistoa,

joten siksi biomassan lisääminen polttoaineeksi ei nosta investointikustannuksia. Suurimmissa osissa maista yhteispoltto on kaikista teknologioita taloudellisin vaihtoehto, koska se alentaa huomattavasti CO₂ päästöjä²².

Seospoltossa käytetyt puupelletit eivät siis lisää CO₂ päästöjä, koska vapautuva hiilidioksidi on sitoutunut puuhun sen kasvun aikana ilmakehästä. Pellettien käyttö vähentää myös rikkipäästöjä, koska niissä ei ole lainkaan rikkiä. Parhailtaan tarkkaillaan kuinka paljon typen oksidien määrä vähenee kyseissä savukaasuissa, kun poltetaan kivihiilen kanssa myös pellettejä²³.

Biomassan seospoltosta valtaosa toteutetaan suurissa hiilipölyvoimalaitoskattiloissa. Seospolttovaltohdot ovat seuraavat:

- suora seospoltto, joka edellyttää suoran biomassan syötön hiilipolttosysteemiin
- välillinen seospoltto, joka vaatii biomassan kaasutuksen ja tuotetun polttokaasun polton
- rinnakkainen seospoltto, jossa on erillään biomassan polttokammio ja kattila, joiden tuottamaa höyryä käytetään hiilikäyttöisen voimalaitoksen höyrykierrossa²².

3.4 Lämpökeskusten polttotekniikat

Lämpökeskuksissa tuotetaan puupolttoaineilla eli metsäbiomassalla lämmintä tai kuumaa vettä, jota käytetään esimerkiksi kuumun veden tuottamiseen aluelämpökeskuksissa tai prosessihöyryn tuottamiseen teollisuuslaitoksissa. Erityyppisiä stokeripolttimia käytetään pienemmissä laitoksissa. Arinalla varustettuja kattiloita käytetään yleensä muutaman megawatin tuotantolaitoksissa. Suuremmissa laitoksissa käytetään leijukerros-polttoa, koska se laajentaa polttoainevalikoimaa ja kilpailuttaa raaka-aineen toimittajia¹². Biomassan polttaminen on siis pääasiallisin teknologiareitti tuottaa bioenergiaa. Biomassan polttolaitteiston suunnittelussa on otettava ensisijaisesti huomioon tietyt parametrit²⁴.

3.4.1 Arinapoltto

Arinapoltto soveltuu hyvin kiinteille polttoaineille kuten metsäbiomassalle. Sitä käytetään lähinnä pienten ja keskisuurten yksiköiden polttomenetelmänä, kuten omakotitalo-, kiinteistö-, alue- ja kaukolämmitys-, teollisuus- ja yhdyskuntajäte-kattiloissa. Kattilat soveltuvat 15 kW – 30 MW alueelle. Nykyään arinapolttoon perustuvia kattiloita käytetään kuitenkin vain hieman yli 5 MW tehon yksiköissä tai sitä alemmissa, koska sen ovat syrjäyttäneet uudet polttotekniikat, kuten leijupetipoltto⁹.

Arinapolton suurin etu on sen pieni omakäyttöteho. Lisäksi arinapoltto on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi edullinen ja helppokäyttöinen. Polttoaineen palakoon ei tarvitse olla tasalaatuista, sillä arinapoltossa voidaan käyttää suurempia palakokoja kuin muilla polttotekniikoilla. Pääasia on, että polttoaine syötetään tasaisena kerroksena ympäri arinaa. Suurin osa tuhkasta poistuu tuhka-arinan kautta, joten savukaasun puhdistimena voidaan käyttää multisyklonia²⁵. Arinapolton suurin ongelma onkin siis saada polttoaine jakautumaan tasaisesti arinalle. Lisäksi palamisilman hallitseminen, tehon säätö ja hiukkaspäästöt tuottavat ongelmia arinapoltossa, koska arinat ovat yleensä täysin manuaalisia laitteistoja²⁶.

Arinat jaetaan seuraavasti; kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina, ketjuarinat ja erikoisarinat, kuten jätteenpolttoarina. Arinan rakenteet suunnitellaan polttoainetyypin ja kattilan koon perusteella, mutta usein ne ovat em. päätyyppien yhdistelmiä⁹.

3.4.2 Leijupoltto

Kiinteiden polttoaineiden, kuten metsäbiomassan, poltossa leijupolttoa pidetään yhtenä ympäristöystävällisimmistä menetelmistä. Sen rikin poisto on halpaa ja se tuottaa vähän typenoksideja ja palamattomia päästöjä. Lisäksi leijupoltossa voidaan käyttää erilaisia polttoaineita. Leijupolttotekniikassa ei tarvita juuri polttoaineen esikäsitteilyä, ja siksi se soveltuu erityisesti hyvin huonolaatuisille polttoaineille⁹. Leijupoltto voidaan toteuttaa joko kiertoleijuna tai kerrosleijuna eli kiertoleiju- tai leijukerroksesta. Poltot eroavat toisistaan petimateriaalin käytöksen perusteella. Kiertoleijussa leijutuskaasun mukana pois leijutustilasta siirtyvät myös kiintoainehiukkaset, kun taas kerrosleijussa kiintoainehiukkaset pysyvät leijutustilassa²⁵.

Kerrosleijutekniikkaa kutsutaan myös kuplivaksi leijukerrokseksi. Leijutettavana materiaalina käytetään yleensä hiekkaa tai kalkkikiveä, jonka harkaisija on noin 1 mm. Aineensiirtoa ja käyttäytymistä kuvataan yleensä kaksifaasimallilla, jossa leijutuskerroksen läpäisevä leijutuskaasu jakautuu kahden osavirtaukseen emulsiofaasiin eli hiukkasfaasiin ja kupliin⁹. Biopolttoaineilla voidaan saavuttaa enintään 3 MW/m² polttoaineteho reaktorin poikkipinta-alaa kohti. Tällä tekniikalla voidaan samassa tulipesässä polttaa useita eri polttoaineita²⁵.

Leijupetikattiloihin verrattaessa kiertoleijussa käytetään hienojakoisempaa petimateriaalia ja suurempia leijutusnopeuksia²⁵. Kaasun nopeuden kasvaessa leijukerroksesta kiertoleijuvirtauksen alueelle, kasvaa kiintoainetiheys reaktorin yläosissa. Palamisen ja kokonaiskäyttämisen oleellisin vaikuttava tekijä on kiintoainemateriaalin hiukkaskoko eri osissa kiertojärjestelmää. Poltossa käytettävän biopolttoaineen hiukkaskoko saattaa olla pituussuunnassa 1 - 10 mm. Polttoaine on yleensä tässä tapauksessa hyvin reaktiivista ja pesään jouduttuaan se pilkkoutuu pienempiin osiin ja palaa nopeasti⁹.

3.4.3 Stokeripolttimet

Stokeripolttimia käytetään suhteellisen paljon maatilateho- ja omakotitaloluokassa. Yhden stokeriryksikön suurin teho on 500 kW luokkaa, vaikka teholtaan yli 100 kW:n stokeripolttimien rakenne ei ole vielä vakiintunut. On mahdollista toteuttaa stokeripoltin-tekniikalla megawatinluokkaa oleva lämpökeskus, mutta silloin tarvitaan useampia yksiköitä²⁶.

Stokeripolttimella poltetaan yleensä haketta ja pellettejä ja se sijoitetaan joko erityiseen stokerikattilaan, jossa on huomioitu kattilan tuhkanpoisto ja huolto tai jo olemassa olevaan kattilaan. Stokeripolttimia valmistetaan niin yksityis- kuin pienteollisuuskäyttöön tehoalueella 20 kW – 1 MW¹². Ne ovat pitkälle automatisoituja eli palaminen jatkuu niin kauan, kunnes saavutetaan asetusarvo. Kattilan lämpötilan laskiessa palaminen käynnistyy ja liekin säilymisestä palopäässä huolehtii tulen ylläpitoautomaattika¹⁶.

3.4.4 Kaasupolttto

Liekit, jotka syntyvät kaasun palamisessa voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin; diffuusio- ja seosliekkeihin. Diffuusioliekissä kaasuuntunut tai kaasumainen polttoaine kulkeutuu liekkirintamaan eli reaktiovyöhykkeeseen, johon rintaman toiselta puolelta kulkeutuu palamisilmaa. Seosliekin palamistahtumassa palamisilma ja polttoaine sekoittuvat ennen kuin joutuvat palamisrintamaan. Polttoaine on tällöin joko höyrystynyttä muuta polttoainetta tai kaasua. Palamistyyppin lisäksi myös liekit voidaan jakaa laminaariin ja turbulentiin liekkiin⁹.

Kaasunpolttotekniikka riippuu kaasutuksen kokoluokasta. Suuren luokan kaasutuspoltto tapahtuu lähinnä leijukerrostekniikkaan perustuen. Kiertopetikaasutinta käytetään yli 60 MWth tuotannossa ja kuplapetikaasutinta kokoluokassa 20-60MWth. Pienemmän kokoluokan kaasutuspoltto (15 MWth) perustuu kiinteäkerroskaasutukseen²⁵.

Kaasun palamis- ja polttopsovellukset voidaan jakaa moottoreihin, kuten polttomoottorit, turbiinit raketit jne. sekä tulipesä- ja kattilasovelluksiin⁹.

4 Biomassan biokemiallinen käsittely

Biojalostamokonseptin peruseriaate perustuu siihen, että biomassasta jalostetaan monia eri biopohjaisia tuotteita. Peruskonsepti on tuottaa biopolttoainetta ja kemikaaleja biomassasta¹⁷. Biomassan biokemiallisella käsittelyllä valmistetaan pääosin liikenteen biopolttoaineita, jotka jaetaan ensimmäisen ja toisen sukupolven polttoaineisiin⁵. Kaupallisen asteen kolme päätyyppiä, joita kutsutaan ensimmäisen sukupolven polttoaineiksi ovat biodiesel, etanoli ja biokaasu. Biodieseliä voidaan käyttää seoskomponenttina yhdessä dieselin kanssa ja sitä tuotetaan vaihtoesteröinnillä kasviöljyistä, jäännösöljyistä ja rasvasta. Bioetanolilla voidaan korvata osa bensiinistä ja sitä tuotetaan sokerista fermentoimalla. Bioetanoli voi olla myös lähtöaineena etyyli-tertääributyylieetterille (ETBE), joka sekoittuu helpommin bensiiniin. Biokaasu eli biometaanin on polttoaine, jota voidaan käyttää osittain bensiinijoneuvoissa. Sitä tuotetaan anaerobisella hajotuksella¹⁷. Biomassasta tuotettavat toisen sukupolven biopolttoaineet ovat hyvälaatuisia hiilivetypolttoaineita, joiden käyttöön ei liity merkittäviä rajoitteita⁵.

Raaka-aineeksi kelpaavat puun ja sen osien lisäksi myös lanta ja elintarvikejätteen orgaaninen aines. Biomassan biokemiallinen käsittely on sen mädättämistä joko hapettomissa tai hapellisissa olosuhteissa. Esimerkiksi biokaasua syntyy hapettomissa olosuhteissa¹¹.

4.1 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasuteknologia perustuu orgaanisen aineen hajoamiseen anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa. Kyseessä on biologinen prosessi, johon osallistuu erilaisia mikrobeja hajotusketjun eri vaiheissa. Hydrolyysi on ensimmäinen vaihe ja siinä hajotetaan käsiteltävän materiaalin sisältämät yhdisteet (proteiinit, rasvat ja hiilihydraatit) haponmuodostajabakteerien erittämien entsyymien avulla yksinkertaisiksi liukoiksi yhdisteiksi eli niin kutsutuiksi hydrolyysituotteiksi (pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi, ammoniakiksi ja yksinkertaiseksi sokeriksi). Edellä mainitut tuotteet hajoavat happokäymisessä haihtuviksi rasvahapoiksi ja bakteerit, jotka tuottavat vetyä hajottavat ne asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Lopuksi metanogeenit eli metaaninmuodostajabakteerit tuottavat asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista metaania²⁷. Hapen puuttuessa anaerobinen bakteeri pystyy siis rikkomaan biomassan orgaanista materiaalia metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Kaasujen tyypillinen suhde on 60 - 70 til-% metaania ja 30 % hiilidioksidia¹⁷.

Optimaalisena pH-alueena anaerobiselle hajoamiselle pidetään 6,5 - 7,5. Erityisesti hajotusketjun viimeinen vaihe eli metaanin muodostuminen on herkkä pH:n muutoksille. Itsepuskuroituvana ja optimaalisella pH-alueella pysyvä biokaasuprosessin happokäyminen pyrkii yleensä laskemaan pH:ta erityisesti varastointivaiheessa. Jätteen pH:ta voidaan kuitenkin tarvittaessa käsitellä siten, että toiminta varmistuu. Biokaasureaktorit on usein lämmitettävä, koska anaerobiset bakteerit eivät tuota tarpeeksi lämpöä aineenvaihdunnassaan. Energianlähteenä käytetään yleensä prosessin tuottamaa

metaania ja lämpöä voidaan ottaa talteen myös käsiteltävästä materiaalista. Optimilämpötila-alue on mesofiilisessä prosessissa 35 - 38 astetta ja termofiilisessä 55 astetta²⁷.

On paljon kalliimpaa käsitellä, liikuttaa ja säilyttää kaasumaisia tuotteita kuin nestemäisiä. Biomassan anaerobisessa hajotuksessa muodostuneen metaanin puhdistaminen ja säilöminen on kallista, siksi keskitytään kehittämään enemmän nestemäisen metanolin tuotantoa. Anaerobisen hajotuksen biojalostamokonsepti on esitetty¹⁷. Bioreaktoreissa käytetään yleensä muitakin orgaanisia materiaaleja kuin vain metsäbiomassaan, esimerkiksi eläinten lanta soveltuu hyvin biokaasuprosessin perusraaka-aineeksi. Yhteiskäsittelyn etuna on, että inhiboivat aineet laimenevat haittaamattomiin pitoisuuksiin ja orgaaninen aines hajoaa nopeammin eli toisin sanoen käytettävän materiaalin kosteus- ja ravinnepitoisuus tasapainottuvat. Yhteiskäsittelyn materiaalien määrä, laatu ja sekoitussuhde täytyy optimoida, jotta voidaan tuottaa mahdollisimman paljon puhdasta metaania. Yhdyskuntien ja teollisuuden potentiaalisimmat lisämateriaalit yhteiskäsittelyyn ovat puhdistamo- ja sakokaivolietteet, teollisuuden biojätteet, kasvintuotannon jätteet ja sivutuotteet sekä peltobiomassat²⁸.

4.2 Alkoholifermentointi

Fermentointi eli käyminen on kemiallisten reaktioiden sarja, jossa valmistetaan sokerista esim. alkoholeja, kuten etanolia ja butanolia. Fermentointi reaktion aiheuttaa sokerilla toimiva bakteeri. Sokerin kulutuksesta muodostuu etanolia ja hiilidioksidia²⁹. Kaupallisessa fermentointiprosessissa käytetään suuria lämpötilasäädettyjä tankkeja. Sokerit ja vesi sekoitetaan fermentoitiliemeen siten, että niiden konsentraatio on juuri sitä mitä mikro-organismit ja muut tarvitsevat. Liemi lämmitetään optimilämpötilaan. Fermentointi alkaa kun mikro-organismit alkavat tuottamaan entsyymejä, jotka rikkovat kaksimolekyyliset sokerit yksimolekyylisiksi ja yksimolekyyliset käytettäviksi kemikaaleiksi ja sivutuotteiksi³⁰.

Fermentointi on anaerobinen prosessi, joka voidaan jakaa märkäfermentointiin ja kuivafermentointiin. Suurin ero näissä kahdessa systeemissä on käsiteltävän orgaanisen materiaalin koostumus³¹. Puuta fermentoitaessa on otettava huomioon puun sisältämät hiilihydraatit ja selluloosat, jotka monimutkaistavat prosessia. Lopputuotteena on alkoholi, joka on yleisimmin etanolia. Etanoli on neste, joka sisältää hyvin paljon polttoaine-energiaa, ja sitä voidaan käyttää autojen polttoaineen korvikkeena tislauksen jälkeen⁸.

Märkäfermentointi vaatii, että orgaaninen materiaali on nestemäistä, jotta sitä voidaan pumpata paikasta toiseen ja että se reagoi anaerobisiin mikro-organismeihin. Kuivafermentointi voi hyödyntää paremmin syötön, jossa on suurempi kuiva-ainepitoisuus kuin märkäfermentointi. Lisäksi kuivafermentointilaitokset on suunniteltu siten, että mikro-organismeja voidaan liikuttaa entistä helpommin ja kuivafermentointilaitteisto on suunniteltu siten, että fermentointiyksikössä ei ole liikkuvia osia. Neste syötetään orgaanisen materiaalin päälle, jolloin se niin sanotusti tihkuu eli vuotaa lävitse ja se kierätetään. Keiton jälkeen jäljelle jäänyt materiaali voidaan käyttää maanparannukseen tai aerobiseen kompostointiin⁸.

4.3 Aerobinen hajoaminen

Orgaanisen aineen eli biomassan aerobinen hajoaminen vaatii mikro-organismien ja runsaasti happea. Hapetus-pelkistysreaktioiden avulla mikro-organismit tuottavat tarvitsemansa energian³². Uuden soluaineksen rakentamiseen mikro-organismit tarvitsevat hiiltä sekä proteiinien, nukleiinihappojen ja muiden rakenneosien valmistamisen tyyppiä. Fosfori, kalium, rikki, kalsium, magnesium, rauta ja natrium ovat tarvittavia makroravinteita. Mikroravintoaineet, jotka ovat välttämättömiä solujen entsyymitoiminnan kannalta, ovat koboltti, kromi, magnaani, kupari, nikkeli, molybdenum, seleeni, vanadium, sinkki ja volframi¹³.

Aerobisessa hajoamisessa pyritään tuottamaan etenkin kaatopaikkajätteistä kaatopaikkakaasua³². Aerobinen hajoaminen on toisin sanoen kompostointia pieneliöiden avulla. Metsäbiomassa on biologisesti hajoavaa jätettä ja sitä voidaan kompostoida, kuten ruokaa ja puutarhajätettä. Lopputuotteena saadaan erittäin ravinnerikasta multaa³³. Hajoaminen on sitä nopeampaa mitä pienempää biomassan partikkelikoko on. Partikkelikoko on suhteellinen materiaalin jäykkyyteen. Kasviaineksen partikkelikoko on 5 - 15 cm ja jäykän aineksen 15 - 75 mm¹³.

Kompostoinnissa biojätteen sisältämä orgaaninen aines hajotetaan mikrobien avulla orgaanisiksi yhdisteiksi, hiilidioksidiksi, vedeksi, ammoniakiksi ja sulfaatiksi, jolloin vapautuu lämpöenergiaa¹³. Mäddättämällä orgaanista materiaalia kuten, lantaa, jätevesilietettä, biojätettä tai kasvibiomassaa valmistetaan biokaasua. Biokaasun koostumus on seuraava: 60-70% metaania, 30-40% hiilidioksidia ja alle 1 % pieniä määriä muita kaasuja ja rikkivetyä. Kun biokaasu puhdistetaan ja paineistetaan, voidaan sitä käyttää liikenteenpolttoaineena, koska se vastaa laadultaan maakaasua. Yleisemmin sitä käytetään kuitenkin lämmön- ja sähköntuotannossa⁵. Hajotusprosessi tapahtuu kosteissa, hapellisissa ja lämpimissä olosuhteissa. Kompostoitavaan ainekseen ei yleensä tarvitse lisätä mikrobipopulaatiota, koska biojäte sisältää niitä runsaasti. Kompostointiprosessissa on viisi eri vaihetta:

- latenssivaihe, jossa lämpötila nousee hieman ja mikrobit sopeutuvat olosuhteisiin
- mesofiillinen vaihe, jossa lämpötila nousee noin 40 asteeseen ja hajoaminen alkaa
- termofiillinen vaihe, jossa lämpötila nousee 40 - 60 asteeseen ja orgaaninen aines hajoaa nopeasti bakteerien, sädesienien ja sienien johdosta
- viilentymisvaiheessa termofiiliset mikro-organismit korvautuvat mesofiilillä aiheuttaen lämpötilan laskun
- kypsytysvaiheessa kuoriaiset, alkueläimet, punkit ja madot ilmestyvät kompostiin ja sen lämpötila tasautuu¹³.

5 CHP-teknologiat

Combined Heat and Power (CHP) tai vastapainevoimalaitos on energian jalostusprosessi, jossa sähkö ja hyötylämpö tuotetaan prosessista samanaikaisesti³⁴. On olemassa monia eri biomassan jalostusteknologioita, jotka ovat kaupallisesti mahdollisia ja kilpailukyisiä lämpövoimalaitoksia, kun puhutaan yli 1 MWe kapasiteettista. Pienemmän mittaluokan teknologiat biomassan polttamiselle, kuten pientalojen (<10 kWe), rivi- ja kerrostalojen (10 - 30 kWe) ja muiden (20 - 100 kWe) lämmitys ja sähkömenetelmät ovat kehitteillä. Tavoitteena on vähentää investointikuluja ja kehittää ohjausparametrejä³⁵. Pienten CHP-laitosten tuotekehitys perustuu lähinnä seuraaviin teknologioihin; polttomoottorit, diesel- ja kaasumoottorit, stirlingmoottorit, höyrymoottorit, mikroturbiinit ja polttokennot¹⁸.

Pienet CHP-laitokset, joiden sähkön hyötysuhde on matala, ovat operoitavissa lämmönsäädöllä, kun taas suuret CHP-laitokset toimivat sähkönsäädöllä²⁴. Suurien laitosten polttoaineen käsittelyn ja polton toimivuuden ratkaisut ovat tekniikan osalta jo yleisesti tiedossa ja käytössä. Pienille lämpölaitoksille tyypillisin ongelma liittyy polttoaineen syöttöön. Pienemmät laitokset kuten aluelämpölaitokset sietävät polttoaineen kosteuden ja laadun vaihtelua huomattavasti enemmän kuin suuret laitokset. Tämä nostaa investointikuluja pienissä tuotantolaitoksissa, koska alkukäsittelytekniikka ja -laitteisto ovat kalliita²⁶.

Suomalainen puunkorjuuorganisaatio tarjoaa modernilla teknologialla ja tehokkaalla logistiikalla taloudellisesti kannattavan mahdollisuuden tuoreen materiaalin käyttöön metsäteollisuudessa³⁵. Puupolttoainetta eli metsäbiomassaa voidaan korjata monin eri tavoin, mutta eniten sitä saadaan talteen päätehakuulla, jolloin syntyy suuria määriä hakkuutähteitä. Päätehakuutähteet haketetaan suoraan paikan päällä tai ne paalataan ja kuivataan. Menetelmästä riippuen saadaan ruskeaa tai vihreää haketta. Massa- ja energiapuuta saadaan myös taimikon hoidolla ja harvennuksilla, kantoja unohtamatta. Kaikki laitokset eivät voi polttaa hakkuutähteitä sellaisenaan, joten yleensä ne haketetaan. Harvennuksen ja korjuun yhteydessä saadaan sekä huono- että korkealaatuista haketta. Korkealaatuinen hake ei sisällä vihreitä puuosia ja siten siitä voidaan valmistaa pellettejä. Ennen pelletointiä raaka-aine tulee kuivattaa, haketta tasaisesti ja jälkikuivata sekä jauhaa³⁶.

Metsäbiomassa tuodaan poltettavaksi lämpölaitoksen, joko hake-, jauhe- tai pellettimuodossa. Lämmön sekä sähkön tuottamiseen pienissä CHP-laitoksissa suoran polton kautta voidaan hyödyntää kolmea eri pääteknologiaa; höyryturbiini, ORC (turbiini, jossa käytetään orgaanista öljyä vesihöyryn sijasta) ja stirling (kuumailmamoottori). Näistä teknologioista höyryturbiinit yltyvät 1-100 MWe, kehittyneet pienet höyryturbiinit 100 kWe ylöspäin. ORC:llä päästään 200 kWe – 2 MWe ja stirling moottorilla 10 – 200 kWe tasolle. CHP-laitokset muodostavat kierteen, jossa lämpölaitoksesta lämpö johdetaan sähköntuotantoon ja sähkö lämmönsiirtoon ja sieltä takaisin lämpölaitokseen. Sähkölaitoksesta sähköä (kWe) toimitetaan asiakkaille ja lämmönsiirtolaitoksista lämpöä (kWth)⁷. Pienet tulisijat ja panospolttolaitokset, jotka tuottavat vain lämpöä, kytketään yleensä arinapolttoon, stokeripolttimeen tai muuhun polttolaitteeseen²⁶.

Suomessa suurimpaan osaan pienvoimalaitoksia kuuluu leijukerrostekniikkaan perustuva höyrykattila ja höyryturbiini. Laitoksien kattilavalinnat mahdollistavat puubiomassan polton lisäksi myös turpeen sekä muiden biomassojen käytön polttoaineena. Alle 1 MWe tuotantolaitoksissa höyry yleensä tuotetaan arinakattilassa ja sähkö höyrykoneella⁸. Teknologisesta ja taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltuna eri polttoaineiden soveltuvuus pienimuotoisille CHP-tekniikoille on esitetty Taulukossa 3²⁴.

Taulukko 3. Eri polttoaineiden soveltuvuus pienimuotoisille CHP-tekniikoille²⁴

	Kaasu- ja dieselmoottorit	Mikroturbiinit	Stirling-moottorit	Polttokennot	Höyryturbiinit ja -koneet
Hiili			*		***
Turve			*		***
Kierrätyspolttoaineet	**	**	*	*	***
Kiinteä biomassa	**	**	**	*	***
Dieselöljy	***	***	**		*
Bensiini	*	**	**	**	*
Raskas polttoöljy	***	*	*		*
Orimulsion	**	*	*		*
Metanoli	*	**	**	**	*
Etanoli	*	**	**	**	*
Bioöljyt	**	**	**		*
LPG	**	***	**	**	*
Vety	**	**	**	***	*
Maakaasu	***	***	***	***	*
Biokaasu	***	**	**	**	*

*** = nyt kaupallisesti merkittävä polttoaine CHP-laitteissa

** = tulevaisuudessa mahdollisesti kaupallisesti merkittävä polttoaine

* = teknisesti mahdollinen, mutta ei todennäköisesti kaupallisesti merkittävä polttoaine

Päävaihtoehdot pienen koko luokan tuotantolaitoksille, joissa yhdistyy sähkön- ja lämmöntuotanto biopolttoaineita käyttäen, Taulukko 4:

- kaasutuksesta saatavan tuotekaasun hyödyntäminen diesel- tai kaasumoottorissa ja kaasuturbiineissa
- höyryn käyttö höyrykoneessa tai –turbiinissa ja höyrykattila
- kaasutuksen höyryn käyttö höyryturbiineissa ja tuotekaasun poltto kaasukattilassa
- pyrolyysiöljyn käyttö kaasuturbiinissa ja dieselmoottorissa
- ORC-prosessi
- stirling-moottori
- biokaasureaktorin kaasun käyttö kaasumoottorissa²⁵.

Taulukko 4. CHP-teknologioiden vertailu²⁸

Laitteisto	Kapasiteetti [kW/yksikkö]	Sähköhyötysuhde [%]	Lämpöhyötysuhde [%]	Kokonaishyötysuhde [%]
Diesel- ja kaasumootorit	15 - 10 000	30 - 38	45 - 50	75 - 85
Stirling-moottori	10 - 150	15 - 35	60 - 80	80 - 90
ORC-prosessi	200 - 1500	10 - 20	70 - 85	85-95
Mikroturbiinit	25 - 250	15 - 35	50 - 60	75 - 85
Höyrymootorit	20 - 1000	10 - 20	40 - 70	75 - 85
Polttokennot	0,5 - 2000	38 - 55	40 - 70	70 - 95

Suurin osa pienen skaalan teknologioista perustuu Rankine-kiertoon. Uudet teknologiat kuten biomassan kaasutus, stirlingmoottorit ja ORC-prosessi ovat kehittyneet huomattavasti, mutta eivät ole vielä saavuttaneet täyttä kypsyyttä teknilliseltä ja kaupalliselta kannalta ajateltuna¹⁰.

5.1 Kaasumootorit

Kaasu- ja dieselmootorisysteemissä muutetaan sähköksi moottorin mekaaninen työ. Lämmitystaroitukseen hyödynnetään 70 % pakokaasujen lämmöstä. Biokaasu, biomassan kaasutuskaasu ja bioöljy soveltuvat biopolttoaineista diesel- ja kaasumootoreihin parhaiten. Tehokkain energiantuottaja yhdistelmä on kaasumootori ja biomassan kaasutuksessa saatu kaasu²⁸.

Biomassan pyrolyysiteknologia mahdollistaa kiinteän biomassan jalostamisen nestemäiseksi tuotteeksi. Nestemäistä tuotetta voidaan kuljettaa, säilöä ja siitä voidaan tuottaa dieselmootoreilla ja kaasuturbiineilla sähköä³⁴. Biomassapohjaisia polttoaineita, jotka soveltuvat moottoreihin ovat biokaasu, johon mukaan luetaan jätevesi- ja kaatopaikkakaasu, biomassan kaasutuksesta saatava kaasu ja bioöljy kuten pyrolyysiöljy. On periaatteessa kolme eri teknologiaa, joita voidaan käyttää yhdessä kaasu- ja dieselmootoreiden kanssa: kiintopeti kaasutus, pyrolyysiöljyn poltto ja anaerobinen hajotus¹⁸.

Biomassan kaasutuksesta saatavan kaasun käyttö kaasumootorissa on kaikista tehokkain keino tuottaa biomassasta sähköä¹⁷. Nämä moottorit soveltuvat erittäin hyvin kohteisiin, joissa edellytetään hyvää sähköntuotannon hyötysuhdetta, ja joissa on tasainen lämmön ja sähkön tarve. Yleisimmät sovelluskohteet ovat seuraavat: kylpylät ja hotellit, sairaalat, koulurakennukset, kasvihuoneet, pk-teollisuus, kuten sahat ja konepajat sekä alue- ja kaukolämpöjärjestelmät²⁴.

5.2 Höyrykattila

Tyypillisessä tehdasprosessissa muutetaan biomassapolttoaine lämmöksi ja lämmöllä muutetaan vesi höyrykattilassa höyryksi. Paineistettua höyryä voidaan käyttää suoraan eri lämmityksen muunnelmiin, kuten uuni- eli keinokuivaukseen, tislaukolonnin erotukseen, epäsuoraan lämmitykseen lämmönsiirrossa ja veden lämmitykseen. Höyryä käyttää myös höyryturbiinin ajossa⁷.

Höyrykattilatyypppejä on olemassa monta erilaista riippuen siitä, mitä polttoainetta (biomassa, hiili, öljy, kaasu) käytetään ja miten suuri tuotantokapasiteetti sekä höyrynpaine halutaan. Todella korkea paine (10 - 14 MPa) on käytössä ainoastaan tehogeneraattoreissa höyryturbiinin ajoon. Korkea paine (4 - 5 MPa) on normaali höyryjakauma koko tehtaassa, mutta sitä voidaan myös käyttää turbiineissa. Keskisuuri paine (1-4 MPa) on tavanomainen jakelupaine. Matalaa painetta (0,1-1 MPa) sovelletaan veden lämmitykseen ja usein myös hukkalämmön kierrätykseen tehtaassa⁷.

Tuliputki- tai tulitorvikattila on yksi tyypillisimmistä kattilamalleista. Suuri lieriömäinen kuori pitää veden erillään lämmöstä, joka tulee sulatusuunista putken läpi. Lämpö imeytyy kuoren lävitse veteen ja kehittää siitä höyryä. Lieriömäisen kuoren rakenne asettaa rajoitukset maksimikapasiteetille turbiinin muotoilussa ja ohjauspaineelle, joka on normaalisti yli 20 bar. Tämän takia sillä on suhteellisen pieni höyrytuotto. Vesiputkikattila malleissa syöttövesi ohittaa sisällä putkiverkoston, joka on lämmitetyn kammion sisällä. Vesi kiehuu putkien sisällä ja kehittyy höyryksi, joka saavuttaa korkeamman paineen ja tuoton kuin mitä tuliputki malli. Leijukerroskattila soveltuu pääasiassa sellaisille biomassapolttoaineille, joilla on suhteellisen korkea kosteus ja tuhkapitoisuus. Jähmeä polttoainepartikkeli kuten sahanpuru syötetään polttokammioon yläpuolelta. Polttoaine kohtaa nousevan kuuman ilman ja palaa suhteellisen matalassa lämpötilassa jolloin palamisesta syntyvä lämpö kuumentaa kammion putkia⁷.

5.3 Höyrymoottori eli höyrykone

Höyrymoottoreilla eli höyrykoneella käytetty höyry kehitetään höyrykattilan avulla³⁷. Höyrykone on ollut käytössä höyryvetureissa, -laivoissa ja -tehtaissa³⁸. Höyry tekee työtä moottorissa, jonka pyörimisnopeutta säädetään koneventtiilillä, joka yleensä on koneen kyljessä. Höyrymoottori toimii männämoottorin tapaan eli höyry päästetään männän avulla sylinteriin. Höyry tiivistyy takaisin vedeksi, kun se johdetaan höyry lauhduttajaan korkeapaine- ja matalapainesylinterissä tapahtuneen paineen alenemisen jälkeen³⁷.

Höyrymoottorin suurin etu on se, että sen käyttämän höyryn raaka-aineella ei ole väliä. Höyrymoottori pystyy jalostamaan raakan lämmön mekaaniseksi työksi. Höyrymoottori polttaa polttoaineen puhtaasti ja taloudelliseksi muodostaen suhteellisen vähän epäpuhtauksia³⁹.

5.4 Höyryturbiini

On olemassa periaatteessa kaksi höyryturbiinimallia (tasapaine- ja reaktioturbiini), joiden molempien varren ympärillä on monia lapa-ja. Mallit eroavat toisistaan höyryn kulkeutumisen suhteen. Tasapaineturbiinissa höyry iskeytyy suoraan lapaan, joka niin sanotusti työntää sen takaisin. Reaktioturbiinissa höyry ohjautuu lavan ulkopuolelle, jolloin lapa niin sanotusti työntää höyryä eteenpäin. Ensimmäisen mallin turbiinit saavuttavat 75 % hyötysuhteen ja toisen jopa 85 %. Tasapaineturbiinimallia käytetään pienitehoisissa vastapaineturbiineissa ja korkeapaineosissa isoissa turbiineissa. Reaktioturbiinimallit ovat kestävyysiltään parempia ja siksi myös niiden valmistaminen on kalliimpaa. Niitä käytetään lähinnä pienille ja keskisuurille paineportaille suurilla turbiineilla. Höyryturbiinissa höyryn energia muutetaan siis suoraan turbiinia pyörittäväksi liike-energiaksi⁷.

Höyryturbiinit ovat olleet perinteisesti käytössä suuren kokoluokan tehon kehityksessä ja vastapainevoimalaitoksissa, joiden normaali kapasiteetti nousee noin 10 MWth. Tavallinen höyrykierto perustuu suljettuun Rankine-kiertoon, jossa vesi kuumennetaan, haihdutetaan ja tulistetaan kattilaan⁷. Höyryturbiinien parhaita käyttökohteita ovat kauko- ja aluelämpö sekä pk-teollisuus kuten konepajat ja sahat²⁴.

5.5 ORC-prosessi

Organic Rankine Cycle-prosessi (ORC) perustuu Rankine-prosessiin, mutta siinä käytetään veden sijasta orgaanista ainesta, esimerkiksi isopentaania, isobuteenia tai tolueenia²⁸. Orgaanisen aineksen käyttö mahdollistaa matalamman kiehumispisteen hyödyntämisen. ORC:ssä lämmönlähteenä toimii useasti terminen öljy, joka höyrystää orgaanisen nesteen haihduttajalle ja höyrystynyt neste kehittää turbovaihtovirtageneraattorin turbiinin suurnopeuteen¹⁸. Samalla lämpömäärällä saadaan siis höyrystettyä enemmän orgaanista ainesta kuin vettä, koska höyrystymislämpö on pienempi²⁸.

Prosessin höyrystin sijoitetaan joko tulipesän jälkeiseen savukaasukonvektioon tai vesikonvektion rinnalle. Jälkimmäisessä tavassa prosessi ei ole riippuvainen kaukolämmön tuotannosta. ORC-prosessi ei myöskään ole sidottu mihinkään tiettyyn polttotekniikkaan, joten siinä voidaan hyödyntää dieselmoottorivoimalaa, kaasulaitosta tai leiju- ja arinakattilaa²⁵.

Lämpökeskuksen ulkopuolelle voidaan sijoittaa erillinen ORC-kontti tuottamaan sähköä. Se sisältää lauhduttimen, suurnopeusgeneraattorit ja tehoelektroniikan, jota tarvitaan sähkön muuntoon normaalitaajuuksiksi. Kun orgaanisen aineksen kierron lauhdelämpö siirretään kaukolämpövedeen, toimii ORC-energiamuunnin vastapaineekytettynä. Suomessa kehitetyissä konsepteissa suurnopeusturbo-generaattori on optimoitu 175 kW teholle, koska silloin saavutetaan sarjavalmistuksessa ominaiskustannustenminimi. Optimikokoisia generaattoreita voidaan kytkeä rinnan useita, että saadaan halutun kokoinen energiamuunnin²⁴. ORC-prosessi soveltuu sähköntuotantoon kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita sekä hukkalämpöä raaka-aineena käyttäen³⁴. Sen käyttökustannukset ovat myös suhteelliset pienet, koska prosessi on täysin suljettu ja kustannukset syntyvät pääasiassa ylläpidosta ja voiteluaineista²⁸.

Prosessi on suhteellisen tuore keksintö sähköntuotannossa, mutta se on jo tehnyt läpimurron markkinoilla etenkin Saksassa, Itävallassa, Sveitsissä ja Pohjois-Italiassa. Kevästä 2003 lähtien käytössä on ollut jo yhdeksän biomassapolttoista ORC-laitosta. Laitoksia ja niiden teknologioita rakennetaan sekä kehitetään koko ajan lisää¹⁸. Kehitystyö keskittyy pääasiassa toimintalämpötilan nostamiseen ja prosessissa käytettävien uusien nesteiden hyötykäyttöön. Näillä kehityslinjoilla pyritään nostamaan sähköntuotannon hyötysuhdetta, toteuttamaan mahdollisesti pienimuotoista sarjatuotantoa ja samalla laskea tuotantokustannuksia²⁸.

5.6 Mikroturbiini

Mikroturbiinit ovat sähköntuotantokyvyltään 25 - 250 kW luokkaa ja ne ovat kaasuturbiineja. Kompressorista syötetään paineistettua ilmaa polttokammioon, jossa kaasu poltetaan. Polttokammiossa syntyvä savukaasu johdetaan turbiiniin, jossa energia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi. Mekaaninen energia pyörittää vaihtovirtageneraattoria. Savukaasuihin jäävää lämpöä voidaan hyödyntää lämmityksessä. Usein polttoilman lämmitykseen käytetään rekuperatiivista lämmönvaihdingta, jonka ansiosta saavutetaan korkea sähköteho¹⁸.

Mikroturbiinin etuna ovat sen aiheuttamat alhaiset päästöt, mutta hyötysuhteeltaan se ei vielä voita moottoreilla saavutettavaa voimaa¹⁸. Mikroturbiinit ovat siis suhteellisen tuore keksintö ja siksi moni niistä esitetty ominaisuus on vielä arviointia, joka perustuu projekteihin ja laboratoriokokeisiin. Mikroturbiinien etuna on niiden kompakti ja kevyt muotoilu, hyvä raesuuruus alue ja matala melutaso³. Biomassasta tuotettua biokaasua mikroturbiineissa tutkitaan ja sen tuotteistusta kehitetään parhailaan. Tällä hetkellä mikroturbiineissa voidaan käyttää sekä nestemäisiä että kaasumaisia polttoaineita, yleisin on kuitenkin maakaasu¹⁸.

Kaasuturbiinit eli mikroturbiinit soveltuvat kohteisiin, joissa tarvitaan korkeata höyryä tai lämpötilaa, siksi niitä sovelletaan eniten juuri teollisuuskohteissa. Ne ovat liian tehokkaita pientaloihin ja pieniin rivi- ja kerrostaloihin, eikä mikroturbiinin käyttö osateholla ole taloudellista. Myöskään vaihteleva kuormitusprofiili asuinrakennuksissa ei suosi kaasuturbiineja. Parhaiten mikroturbiinin soveltuvat seuraaviin käyttökohteisiin: hotellit ja kylpylät, kasvihuoneet, kauko- ja aluelämpöjärjestelmät sekä prosessiteollisuus, kuten panimot²⁴.

5.7 Stirling-moottori

Stirling-moottori on kuumailmamoottori, joka toimii kaasun lämpötilaeron avulla. Palaminen tapahtuu muualla ja kuuma ilma vain johdetaan moottorille, jossa on suljettu kaasukierto⁴⁰. Moottori on siis turvallinen operoida ja sillä on matala ylläpitokustannus⁷. Muita etuja ovat äänettömyys ja huoltovälien pituus²⁶. Sen hyötysuhde ei ole kovinkaan hyvä, mutta periaatteessa, kun teknologia ja prosessi kehittyvät voidaan sillä saavuttaa suurempi hyötysuhde kuin millään muulla lämpömoottorilla. Hyötysuhde ja mekaaninen työ ovat sitä suurempia mitä suuremmaksi lämpötilaero saadaan⁴⁰.

Systeemi perustuu siis suljettuun kiertoon, jossa työtä tekevä kaasu vuorotellen laajennetaan kuumen sylinterin tilavuuteen ja puristetaan kylmän sylinterin tilavuuteen. Helium, vety ja typpi ovat yleisimmin käytettyjä kaasuja stirling-moottoreilla²¹. Stirling-moottorin hyötysuhdetta lisää regeneraattori, jonka ansiosta kaasu voidaan lämmittää suurempaan lämpötilaan pienemmällä lämmöllä. Sähkögeneraattoria pyörittää kampiakseliin yhdistetty vauhtipyörä²³. Sähköntuotanto on alle 150 kW, joten tämä teknologia soveltuu ainoastaan pienen mittakaavan lämmön ja sähkön tuotantoon¹⁸.

Stirling-moottoreiden kehitystyö on vielä pilottivaiheessa ja esimerkiksi Lappeenrannassa kehitetty Bio-Stirling laitteistoa, jonka tarkoituksena on tyydyttää pienten ja keskisuurten kiinteistöjen sähkön- ja lämmöntarvetta biopolttoaineita käyttäen. Maatilat, pienteollisuus, kasvihuoneet ja muut kiinteistöt, jotka eivät ole kaukolämmön piirissä ovat Bio-Stirling laitteiston pääkohteita⁴⁰.

5.8 Polttokennot

Sähkökemiallista energian muuntolaitetta, joka käyttää vetyä tai muita polttoaineita tuottamaan vettä, lämpöä ja sähköä, kutsutaan polttokennoksi⁴¹. Polttokennolla voidaan jalostaa polttoainetta energiaksi ilman polttoprosessia. Tämän takia polttokennoproessi on hiljainen, puhdas ja hyvin tehokas. Kun käytetään polttoaineena vetyä, tuotetaan pelkästään vettä ja lämpöä, eikä juurikaan myrkyllisiä päästöjä. Polttokenno on periaatteeltaan samantapainen kuin patteri, mutta se ei lopu eikä sitä tarvitse ladata uudestaan, koska se toimii niin kauan kun siinä on polttoainetta⁴².

Polttokennolla on paljon hyödyllisiä ominaisuuksia, sillä se ei ole pelkästään tehokas vaan se on myös puhdas ja ympäristöä säästävä. Polttokennot tuottavat vain vähän päästöjä riippuen käytettävästä polttoaineesta ja pystyvät muuntamaan polttoaineen sähköiseksi energiaksi. Polttokennot soveltuvat myös usealle eri energianlähteelle niin uusiutuvista fossiilisiin polttoaineisiin. Koska polttokennojärjestelmä sisältää vähän liikkuvia osia ja itse polttokenno ei sisällä lainkaan liikkuvia osia, on sen huollon tarve vähäinen⁴⁷. Biopolttoaineita kuten biokaasua käytettäessä polttokennojen ongelmaksi muodostuu kaasun sisältämät haitta-aineet; rikkivety, siloksaanit, merkaptani ja halogenoidut hiilivedyt. Haitta-aineiden vuoksi biokaasu täytyy puhdistaa ennen kuin se voidaan johtaa polttokennoon²⁸.

Polttokenno soveltuu myös hyvin asuin- ja työympäristöön, koska on kooltaan suhteellisen pieni ja hiljainen laitteisto⁴¹. Pienrivitalo ja kerrostalot, toimistorakennukset, hotellit ja kylpylät, kasvihuoneet, kauko- ja aluelämpö sekä prosessiteollisuuden kohteet voivat hyödyntää CHP-käyttökohteita, joihin on yhdistetty polttokenno²⁴. Polttokennoteknologioita on monia ja ne eroavat toisistaan eri käyttökohteiden ja polttoaineiden perusteella. Vaikka kennot noudattavatkin rakenteeltaan samaa periaatetta on niissä paljon toiminta- ja materiaalieroja. Polttokennon toimintalämpötilan määrää siis kokonaisuus, joka luonnollisesti vaikuttaa myös siihen, että missä sovelluksessa sitä voidaan järkevästi käyttää. Kennot ovat eri kokoluokkaa teknologiasta riippuen, toiset soveltuvat hyvin pieniin kannettaviin laitteisiin ja toiset suurten koneiden voimalähteiksi⁴³. Pieniä laitteistoja ovat esimerkiksi valvonta- ja mittaustajärjestelmien tai veneiden ja kesäasuntojen akut ja suurempitehoisia ovat esimerkiksi sähköautot ja työkonet⁴⁴.

Polttokennotyypit nimetään elektrolyytin eli varauksen kuljettajan mukaisesti⁴⁴. Yleisin polttokennotyyppi on polymeeri-elektrolyyttimembraanipolttokenno (PEMFC), jonka teknologiaa käytetään yli 70 %. PEMFC tarvitsee toimiakseen ainoastaan vetyä, vettä ja ilman happea. Sen elektrolyytinä toimii kiinteä polymeeri ja elektrodina huokoinen hiilielektrodi. Se on kooltaan pienempi ja kevyempi, mutta tuottaa korkean energiatihedden verrattaessa muihin kennotyyppeihin. PEMFC:n kanssa samaan perheeseen kuuluu suorametanolipolttokenno (DMFC), joka toimii höyryn ja puhtaan metanolin sekoituksella. Sillä ei ole ongelmia polttoaineen varastoinnin suhteen, koska metanolin energiatiheys on vedyn tiheyttä korkeampi. Alkalipolttokenno (AFC) käyttää puolestaan vedessä olevaa kaliumhydroksidia elektrolyytinään. Sulakarbonaattipolttokennolle (MCFC) riittää nikkeli ja nikkelioksidi elektrolyytiksi, koska se toimii 600 – 700 asteen lämpötilassa. Kiinteäoksidipolttokenno (SPFC) käyttää kiinteää metallioksidia elektrolyytinään ja toimii 800 – 1000 asteen lämpötilassa. Mikrobiologinen polttokenno (MFC) on vasta kehitysasteella, mutta tutkimukset ovat osoittaneet, että siitä voi tulla tärkeä bioenergian tuotantomuoto. Sillä hapetetaan orgaanisia ja epäorgaanisia aineita bakteerien avulla²⁸.

6 Ympäristönäkökohdat

Uudet EU-säädökset ajavat ja suosivat biomassan käyttöä ja sen hyödyntämistä liikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Elinkaarinäkökulmasta tarkasteltuna biopolttoaineet sisältävät raaka-aineen tuotannon, korjuun, käsittelyn, kuljetukset, polttoaineen tuotantoprosessin ja lopputuotteen käytön sekä sivutuotteiden jatkojalostuksen ja hyödyntämisen. Elinkaaren kaikissa vaiheissa kuluu energiaa ja raaka-aineita sekä syntyy jätteitä ja ilmaan, veteen ja maaperään päästöjä. Arvioitaessa energiatehokkuuden-, ilmastomuutos-, ja muiden ympäristönäkökohtien lisäksi bioenergian elinkaari- ketjuja on otettava huomioon myös muut kestävyiden tekijät⁵.

Ympäristön tila on Suomessa parantunut suhteellisen paljon verrattaessa tilanteeseen 10-20 vuotta sitten. Muutos on saatu aikaan ympäristönsuojelulla, jonka toteutus aloitettiin kun havaittiin, että ilmasto muuttuu. Ympäristönmuutoksen tilanteesta on tehty lukuisia tutkimuksissa ja raportteja, jotka kertovat ilmastoennusteista ja arvioivat lämpenemisen seurauksia ja voimakkuutta⁴⁵. Kasvihuonepäästöt vähenevät, jos puuenergian lisäämisellä vähennetään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Lisäksi puusta pitää pyrkiä tuottamaan energiaa ilman, että puun kasvatus-, korjuu- ja tuotantoketjun yhteydessä syntyy suuria hiilidioksidipäästöjä⁴⁶. Eri tuotantotapojen keskinäinen vertailu mahdollistuu, kun käytetään elinkaariarviointia. Bioenergian tuotantojärjestelmän vertailukohteena ympäristömyötäisyyden arvioinnissa käytetään tavallisesti vastaavan energian tuottavaa fossiilisen polttoaineen tuotantojärjestelmää. Lopputuloksiin on huomioitava itse päätuotteen lisäksi myös sivutuotteet. Sivutuotteiden valmistus ja käyttö aiheuttavat ympäristöhyötyä, koska niitä varten ei tarvitse kehittää omaa prosessia vaan ne syntyvät pääprosessin yhteydessä. Pääasiassa keskitytään kasvihuonekaasupäästöihin ja energiataseisiin, kun tutkitaan bioenergian elinkaarta. Ilmapäästöjä on tutkittu laajasti, mutta eroosio, vesistöjen rehevöityminen, monimuotoisuuden väheneminen ja maanlaadun heikkeneminen on jätetty tarkasteluissa pois.⁵

Ihmisen toiminta synnyttää kasvihuonekaasuja, joita ovat hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi, treonkaasut, rikkiheksafluoridi ja halogenoidut hiilivedyt, joiden seurauksena on syntynyt kasvihuoneilmiotä ja ilmastonmuutosta. Haihtuvat hiilivedyt, hiilimonoksidi ja typen oksidit ovat välillisiä kasvihuonekaasuja ja ne muodostavat otsonia alailmakehässä. Suurin hiilidioksidin aiheuttaja on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Fossiilisia polttoaineita pyritään korvaamaan bioenergialla, koska sen käyttö ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, jos uutta biomassaa kasvaa yhtä paljon kuin mitä sitä käytetään⁵.

Epätäydellisen palamisen seurauksena syntyy hiilivety- ja hiilimonoksidipäästöjä. Eniten päästöjen syntymiseen vaikuttavat lämpötila, viipymäaika ja kaasujen sekoittuminen polton yhteydessä. Päästön määrä esimerkiksi rikkidioksidipäästöjen suhteen on suoraan verrannollinen polttoaineen sisältämään rikkiin. Ilman tpestä ja polttoaineen sisältämästä tpestä muodostuu myös typenoksidien päästöt²⁹. Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa bioenergian käyttö antaa parhaan kasvihuonekaasuvähennämisen, koska suorasta poltosta muodostuneet päästöt ovat huomattavan matalia polttoaineen (hakkuutähde, olki, pienpuu) energiasisältöön verrattaessa. Karkeasti arvioituna turpeen N₂O-päästöt

ovat kaksinkertaiset sekä fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöt ovat monikymmenkertaiset ja CH₄-päästöt yli satakertaiset verrattuna puun tuotantoon ja polttoon. Öljylämmitykseen verrattaessa puun poltosta syntyvät kasviuonekaasujen elinkaariset päästöt ovat myös huomattavasti pienemmät⁵.

Bioenergian kasviuonekaasupäästöt voivat olla suuremmat kuin mitä fossiilisten polttoaineiden päästöt, kun lasketaan elinkaaren aikaiset kasviuonepäästöt. Näin etenkin kun kyseessä on ensimmäisen sukupolven eli peltopohjaiset polttoaineet. Toisen sukupolven kuten Fischer-Tropsch –dieselin kasviuonekaasupäästöt ovat puolestaan jopa kolmasosan pienempiä fossiilisten vertailupolttoaineiden tuotannosta⁵.

6.1 Happamoituminen

Vesistöjen ja maaperän heikentyntä kykyä puskuroida happamoittavaa laskeumaa kutsutaan happamoitumiseksi. Se on hyvin haitallista monille kasveille ja vesieläimille, kuten kaloille⁵. Maan pinnalle happamoittavia yhdisteitä laskeutuu kuiva- ja märkälasseumana. Märkälasseumaksi kutsutaan sateen mukana tulleita happamoittavia yhdisteitä ja kuivalasseumana hiukkasissa ja kaasuissa laskeutuneita yhdisteitä⁴⁵.

Happamoituminen lisää esimerkiksi raskasmetallien liukoisuutta ja se aiheuttaa korroosio- ja muita materiaalivaikutuksia rakennetuille pinnoille. Rikkioksidi, ammoniakki ja typen oksidit ovat tärkeimmät happamoittavat yhdisteet. Rikkipäästöjen merkitys on bioenergian elinkaarietjussa vähäinen, mutta fossiilisilla polttoaineilla se on huomattava. Typen oksideja muodostuu bioenergian elinkaarietjussa lähinnä työkoneiden ja kuljetuksen päästöinä sekä käyttövaiheessa bioenergian polton seurauksena ilmasta. Suurin osa typen oksideista on siis peräisin työkoneista ja liikenteestä, koska niitä syntyy kaikessa poltossa. Maatalous tuottaa suurimmat ammoniakkipäästöt⁵. Pintavedet toipuvat happamoitumisesta nopeammin kuin pohjavesi, koska rikkijhdisteet ja muut epäpuhtaudet sitoutuvat maapartikkelien pinnoille ja vapautuvat maaperästä pohjaveteen⁴⁵.

Biopolttoaineiden rikkipitoisuus sähkön ja lämmön tuotannossa on pääsääntöisesti alhaisemmat verrattuna fossiiliisiin polttoaineisiin. Polttoaineiden rikkipitoisuus:

- puu 0,02 %
- kivihiili n. 1 %
- polttoöljy 0,9 – 2,5 %

Teollisuuden ja voimalaitosten NO_x-päästöt eivät merkittävästi eroa biopolttoaineiden ja fossiilisten polttoaineiden aiheuttamista päästöistä. Tyypillisesti kuitenkin leijupetikattila, jonka polttoaineena käytetään puuta, tuottaa vähemmän päästöjä kuin esimerkiksi kivihiilen pölypoltto. Öljylämmitykseen verrattaessa päästöt ovat samaa suuruusluokkaa⁵.

Diesel ja bensiini ovat Suomen liikenteessä rikkittömiä ja tulevaisuudessa myös työkonepolttoaineet muuttuvat rikkittömiksi. Tämän takia fossiiliset liikennepolttoaineet ja liikenteen biopolttoaineet eivät eroa toisistaan juurikaan rikkipäästöjen perusteella. Rikkiä syntyy kuitenkin enemmän fossiilisten polttoaineiden jalostuksen yhteydessä kuin mitä biopolttoaineiden⁵.

6.2 Pienhiukkaset

Primäärisiä pienhiukkasia syntyy useista eri lähteistä kuten polttoprosessista. Sekundäärisiä pienhiukkasia muodostuu rikin ja typen oksideista, VOC-yhdisteistä ja ammoniakista. Pienhiukkaset ovat pienissäkin määrissä vaarallisia ihmisille ja ne luokitellaan aerodynaamisen halkaisijansa perusteella, esim. alle 10 µm on PM10 (particulate matter) ja alle 2,5 µm on PM2,5⁵. Toistaiseksi ei ole olemassa pienhiukkaspäästöille lainsäädäntöä, mutta silti niitä mitataan laajasti kaupungeissa ja tausta-alueilla Euroopassa. Suomessa on kuitenkin pantu EU:n suurten polttolaitosten direktiivit ja jätteenpolttodirektiivit täytäntöön lainsäädännöstä vastaavina asetuksina⁴⁷. Lisäksi EU:ssa on valmisteilla puunpolttoon liittyvä hiukkasdirektiivi, joka on sisällöltään vielä avoin ja tulee voimaan lähivuosien aikana.

Sähkön ja lämmön tuotannossa ei voimalaitoskokoluokassa ole merkittäviä eroja hiukkasäästöjen osalta kun verrataan biopolttoaineita ja fossiilisia polttoaineita keskenään. Sen sijaan isojen ja pienien laitosten ja laitteiden välillä on eroja. Isojen laitosten hiukkasäästöt ovat pieniä, koska ne on varustettu tehokkailla hiukkassuodattimilla. Pienemmissä laitoksissa ei sen sijaan ole erotinlaitteita savukaasun puhdistuksessa ja tämän takia hiukkasäästöt ovat suurempia. Erityisesti kotitalouksien pienpoltto tuottaa merkittäviä hiukkasäästöjä⁵. Paikallinen ilmanlaatu kärsii matalan päästökorkeuden vuoksi paikoissa, jossa esimerkiksi takkakokoluokan puun pienpoltto on merkittävää⁴⁷. Puuta poltettaessa tulisi käyttää korkealaatuisia tulisijoja ja polttoaineita, koska niin kutsuttu kitupoltto aiheuttaa huomattavasti hiukkasäästöjä.

Pienhiukkasäästöjen määriä on tutkittu hyvin vähän liikenteen biopolttoaineille. Fossiilisiin liikenteenpolttoaineisiin verrattuna etanoli vaikuttaisi aiheuttavan vähemmän pienhiukkasäästöjä, mutta biodieselin tutkimukset ovat epävarmempia. Kirjallisuudesta löytyy tuloksia niin ympäristöystävällisyyden puolesta kuin vastaa verrattaessa fossiiliseen dieseliin. Tuloksiin vaikuttavat muun muassa rasisus. Pienellä rasisuksella biodiesel aiheuttaa enemmän päästöjä, mutta suurella vähemmän. NO_x- ja VOC-päästöjen kriteerit pätevät tulevaisuudessa myös hiukkasäästöihin⁵.

6.3 Toksisuus

Toksisuutta eli myrkyllisyyttä on vaikea arvioida elinkaariarvioinnin alueella. Toksisuusvaikutuksia syntyy bioenergian suhteen lähinnä energiaraaka-aineen tuotannossa, esimerkiksi torjunta-aineiden levitys peltoenergian viljelyssä. Bioenergian valmistuksen yhteydessä toksiset vaikutukset ovat yleensä alhaisempia kuin fossiilisten polttoaineiden. Maan muokkaustoimenpiteet metsätaloudessa saattavat aiheuttaa esimerkiksi elohopean huuhtoutumista metsämaasta vesistöihin. Toksisuutta voidaan vähentää esimerkiksi luomutuotannolla⁵.

Sähkön ja lämmön tuotannossa polyaromaattiset hiilivety-dioksiinipäästöt tai raskasmetallipäästöt eivät ole suurissa voimalaitoksissa merkittäviä. Itse asiassa puun polton oletetaan vähentävän elohopeapäästöjä, kun sillä korvataan kivihiilen käyttöä. Toksisuus on yleisempää puun panospolttoisissa tulisijoissa ja klapi-kattiloissa, koska palaminen on epätäydellistä. Lisäksi karsinogeenisten aineiden päästöt ovat jopa suurempia kuin mitä bensiinin, jos etanoli tuotetaan peltoraaka-aineista. Toksisuusmäärää nostaa torjunta-aineiden käyttö. Sen sijaan verrattaessa bensiiniä ja jätemateriaalista tuotettua bioetanolia, tuottaa bioetanoli vähemmän raskasmetallien päästöjä. Tutkimuksia ei ole tehty vielä paljoa, mutta PAH-yhdisteiden, bentseenien ja butadieenista koottujen tietojen perusteella ovat

päästöt alhaisempia biopolttoaineilla kuin fossiilisilla liikennepolttoaineilla. Lisäksi mutageenisuus on biodieselillä alhaisempi kuin fossiilisilla polttoaineilla⁵.

6.4 Otsoni

Otsonin (O^3) tehtävä on suodattaa auringonvalosta ultraviolettisäteilyä pois. Se on myrkyllinen niin ihmisille kuin myös useimmille eliöille, mutta sitä on lähinnä 15-25 km korkeudella stratosfäärissä. Otsoni on pistävänhajuinen kaasu ja väriltään sinertävä⁵¹. Stratosfäärissä olevaa otsonikerrosta kutsutaan yläilmakehän otsonikerrokseksi ja sen ohenemisen aiheuttavat halonit, hiilitetrakloridi, CFC-aineet, metyylibromidi ja 1,1,1-trikloorietaani. Päästöjä syntyy lähinnä fossiilisten liikennepolttoaineiden jalostuksessa⁵.

Yksi pahimmista ilmansaasteista on alailmakehän otsoni, josta on pelkästään haittaa⁴⁵. Se muodostuu typen oksidien, hiilimonoksidin, hiilivedyn ja auringonvalon kemiallisissa reaktioissa. Otsoni ei ole pelkästään vaarallista terveydelle, se myös heikentää viljelykasvien ja puiden kasvua. Alailmakehän otsonia muodostuu vähemmän puun tuotannon ja polton yhteydessä kuin maakaasun ja kivihiilen tuotannon ja polton yhteydessä⁵.

6.5 Luonnon rehevöityminen ja monimuotoisuus

Luonnon perustuotannon lisääntymää ravinnekuormituksen johdosta kutsutaan rehevöitymiseksi. Maaympäristö rehevöityy ilmaperäisen typpilaskeuman johdosta, jolloin ilmaan tulee typen oksidien ja ammoniakkin päästöjä⁵. Ilmasta tulevien laskeutumien, pelloilta valuvien lannoitteiden ja jätevesien mukana leviää ravinteita luontoon⁴⁵. Perustuotannon kasvua esiintyy maaympäristön lisäksi myös vesistöissä. Perustuotantoa rajoittaa sisävesialueilla fosfori ja Itämeren alueella typpi. Suomessa vesistöjen rehevöityminen on suurempi ongelma kuin mitä maaperän rehevöityminen. Suurin osa rehevöittävästä päästöistä aiheutuu tuotannosta. Lisäksi kuljetukset, jalostus ja työkoneiden käyttö aiheuttavat typenoksidipäästöjä ja sitä kautta rehevöitymistä⁵.

Rehevöitymisen torjunta ja hallinta on vaikeaa, sillä ravinteet ovat kertyneet vuosien saatossa maaperään ja vesistöön. Kertyneet ravinteet eivät poistu samanaikaisesti maaperästä kun kuormitus lopetetaan vaan ne kuluvat ja liukenevat veteen kasvien käyttöön aikojen kuluessa. Rehevöitynyttä vesistöä voidaan auttaa palautumaan nopeammin poistamalla siitä ravinteita esimerkiksi ruoppaamalla⁴⁵.

Biodiversiteetillä eli luonnon monimuotoisuudella tarkoitetaan lajien runsautta, lajien sisäistä perinnöllistä muuntelua ja niiden elinympäristöjen monimuotoisuutta. Osaksi luonnon monimuotoisuutta lasketaan myös ekosysteemin toimivuus, geologinen monimuotoisuus ja maisematason monimuotoisuus⁴⁵. Bioenergian elinkaaritutkimuksissa ei ole juurikaan tarkasteltu monimuotoisuutta, mutta yleisesti voidaan todeta, että peltoviljelyllä ei aiheuteta vaaraa uhanalaisille ja tuotannon hyönteisille ja kasveille. Luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen bioenergian vaikutuksesta tapahtuu yleensä tuotteen jalostuksen alkupäässä. Muissa vaiheissa esimerkiksi energiantuotanto- ja jalostuslaitokset varaavat maaperää kasvien viljelyltä. Lisäksi välillisesti itse tuotteen eli polttoaineen käyttö voi vaikuttaa monimuotoisuuden heikkenemiseen happamoittavien ja rehevöittävien päästöjen kautta⁵.

Suomessa tärkein maatalouden biodiversiteettiä köyhdyttänyt muutos on monivuotisten nurmien väheneminen. Nurmiin puute vaikuttaa lintujen ja hyönteisten olemassaoloon ja myös kasvilajeja on vähemmän viljellyillä pelloilla kuin nurmipelloilla. Kylvöpelloilla, kuten sokerijuurikaspelloilla voidaan käyttää voimakkaita lannoitteita ja ruiskutteita sekä torjunta-aineita, mitkä vaikuttavat kasvilajiston kasvuun. Parhaiten pärjäävät ne lajit, jotka kestävät torjunta-aineita⁵.

Metsien ravinnepoistuma voi kasvaa moninkertaiseksi kun päätehakkuiden ainespuun korjuuseen yhdistetään kantojen ja latvusmassan talteenotto⁴⁶. Suomen luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseksi metsätalous on avainasemassa. Yllättävää on, että energiapuun korjuu voi vaikuttaa negatiivisesti monimuotoisuuteen, sillä esimerkiksi lahopuiden määrä vähenee⁵. Puunkorjuun yhteydessä aiheutetaan maastovaurioita ja maanpinnan rikkoontumista⁴⁶.

Maan rakenne, maa-aines ja sen ravinteikkaus ovat tekijöitä, joista riippuu maaperän tuotantokyky. Maan laatu heikentyy, jos sinne kertyy haitallisia aineita ja maaperä pääsee pilaantumaan. Lähinnä metsätalouden ja maatalouden raaka-ainetuotanto aiheuttavat bioenergian tuotannossa maaperän heikkenemistä. Maan yksipuolinen viljely aiheuttaa eroosio ja orgaanisen aineksen väheneminen. Tästä on haittaa myös vesistöille, sillä eroosion johdosta virtaavan veden ja sateiden mukana liikkuu kiintoainetta maaperältä vesistöihin lisäten kiintoaine- ja ravinnekuormitusta. Ravinteiden hyväksikäyttö heikkenee, jos maa on huonorakenteista ja tämän takia sadot jäävät alhaisiksi.

7 Potentiaaliset biojalostamoteknologiat

Biojalostamohankkeen runkona on tuottaa lämpöä ja sähköä metsäbiomassasta pk-sektorin kokoluokassa. Tarkoituksena on kehittää ja hyödyntää modernia teknologiaa, jotta lämmöntuotanto saataisiin pysymään lähellä raaka-ainetta ja samalla alueelle kehittyisi uusia työpaikkoja. Tämä on erittäin oleellinen näkökohta etenkin Pohjois-Karjalan alueella, jossa on runsaasti metsäbiomassaa. Selvityshankkeen alkuosan kappaleisiin on kerätty tietoa tuotantotavoista ja –teknologioista. Perinteiseen metsäbiomassan polttamiseen ei tässä tutkimusselvityksessä keskitytä juurikaan, koska sen mukautamista pienempään mittakaavaan tutkitaan, kehitetään ja sovelletaan jo muualla. Tässä hankkeessa perinteistä polttoa käytetään lähinnä vertailukohteena.

Biojalostamohankkeen moderneihin teknologioihin päätettiin valita metsäbiomassan kaasutus ja siitä saadun synteetikaasun jatkoteknologiaksi neljä eri reittiä.

- Polttoyksikkö, jolla tuotetaan lämpöä ja sähköä CHP-laitoksen tapaan tuotekaasusta
- Kaasunpuhdistuksen kautta Fischer-Tropsch-synteesi
- Kaasunpuhdistuksen kautta synteetikaasun fermentointi

Ideana on kehittää konsepti, jossa hyödynnetään jotain edellä mainittua tuotantotapaa siten, että paikallisessa terminaalissa pystytään hoitamaan metsäbiomassan varastointi, alkukäsittely, kaasutus, jalostus ja tuotteen syöttö tai kuljetus esimerkiksi rivitalon päätyyn rakennetulle polttimelle, jolla voidaan hoitaa taloyhtiön lämmöntuotanto. On myös mahdollista, että tuote muutetaan jo valmistuspaikassa lämmöksi ja taloyhtiöt saavat sen käyttöönsä kaukolämpönä. Teknologioita pyritään parhaillaan kehittämään ja tutkimaan kokeellisesti laboratoriomittakaavassa. Tällä hetkellä keskitytään lähinnä valmistamaan liikenteen polttoainetta. On myös mahdollista, että prosessi niin sanotusti ylimitoitetaan, jolloin voidaan valmistaa lämmön ja sähkön lisäksi myös muita kemikaaleja.

8 Metsäbiomassan kaasutus

Metsäbiomassa esikäsitellään eli se kuivataan ja sen partikkelikoko pienennetään kaasuttimelle sopivaksi⁴⁸. Kaasutuksen raaka-aineena käytetään Suomessa lähinnä puuraaka-aineita, kuten kuorta ja metsätähdettä. Raaka-aineeksi kelpaavat myös ruokohelmi, turve sekä jättepohjaiset raaka-aineet⁵. Kaasutuksessa syntyneen kaasun koostumus muodostuu kaasufaasireaktiosta hiilimonoksidin ja vesihöyryn välillä, vesikaasun konvertioreaktiosta ja kaasufaasireaktiosta hiilidioksidin ja vedyn välillä¹⁹.

Biomassaa kaasuttamalla saadaan tuotekaasua, jonka kaasutus tapahtuu 800-1000 asteessa. Jatkokäsittelyn avulla tuotekaasu puhdistetaan eli siitä poistetaan rikki, typpi sekä orgaaniset yhdisteet ja siitä tuotetaan biosynteetikaasua, joka on vetyä ja hiilimonoksidia. Biosynteetikaasua voidaan valmistaa myös suoraan korkeassa 1200-1400 asteen lämpötilassa tai katalyytin avulla. Metsäbiomassa hajotetaan termisesti pyrolyysin avulla eli kaasutetaan kaasuksi, tiivistettäväksi hiileksi ja höyryiksi. Pyrolyysi on endoterminen reaktio. Reaktoriin syötetään happea raaka-aineen, kaasujen, höyryjen ja hiiltyneen materiaalin polttamiseksi ja samalla pidetään yllä reaktorin korkeaa lämpötilaa. Poltettavasta massasta 75-90 %:a muodostuu yli 500 asteen lämpötilassa haihtuviksi aineiksi kuten kaasumaisiksi ja tiivistettävissä oleviksi hiilivedyiksi ja vesihöyryiksi¹⁹.

Ei ole olemassa kaasutinta, joka pystyy suoraan tuottamaan tarpeeksi puhdasta biosynteetikaasua, jota voitaisiin käyttää ilman puhdistusta biopolttoaineiden jalostukseen⁴⁹. Kaasutuksen suurin ongelma on sillä tuotetun kaasun puhdistus. Kaasutuslaitoksen ja itse kaasuttimen koon kasvaessa kasvaa myös lämpötilagradientit ja sen myötä kaasun tervapitoisuus. Terva on erittäin ongelmallista kaasussa, koska se tukkii suodattimet ja likaa putket. Likaista, erittäin tervaista kaasua ei voida syöttää moottoreille, koska moottorit eivät kestä tervan aiheuttamaa räsytystä⁴⁸.

Tervan poistoon ei kuitenkaan vielä ole onnistuttu kehittämään ratkaisua. On kuitenkin havaittu, että pienillä kaasuttimilla saadaan puhtaampaa kaasua ja vastaavanlaista erillistä tervanpoisto yksikköä ei tarvita kuin mitä isoilla kaasuttimilla. Onkin siis ehkä järkevämpää rakentaa rinnakkain useampia pieniä kaasuttimia kuin yksi iso⁴⁸.

8.1 Tuotekaasu eli puukaasu

Biomassaa kaasuttamalla saadaan tuotekaasua eli puukaasua, jota voidaan soveltaa CHP-laitoksen lämmön ja sähkön tuotantoon sekä biosynteetikaasun tuotantoon¹⁹. Etenkin pienille CHP-laitoksille tuotekaasu on erittäin varteenotettava vaihtoehto. Tuotekaasua hyödynnetään varmasti tulevaisuudessa entistä enemmän sivutuotteiden kaasutuksessa ja näin ollen kemian raaka-aineiden ja kemikaalien tuotannossa⁵⁰. Tuotekaasu sisältää vetyä, hiilimonoksidia, typpeä, hiilidioksidia ja vettä. Näiden lisäksi tuotekaasussa on erilaisia epäorgaanisia ja orgaanisia komponentteja ja joitain kiinteitä hiukkasia⁴⁹. Orgaanisista komponenteista tervat aiheuttavat eniten ongelmia. Tervat täytyy puhdistaa

kaasusta ennen kuin siitä voidaan valmistaa biosynteetikaasua. Puhdistus tapahtuu jatkokäsittelyllä katalyyttisesti tai termisesti, jolloin saadaan hiilimonoksidia ja vetyä sisältävää kaasua¹⁹. Tätä kaasua kutsutaan biosynteetikaasuksi⁴⁸.

Raaka-aineen kosteuspitoisuuden tulisi olla suhteellisen pieni, jotta saataisiin tuotettua korkealaatuista kaasua korkeammalla tehokkuudella ja lämmitysarvolla sekä matalammalla tervapitoisuudella. Ongelmana on saada tarpeeksi puhdasta tuotekaasua siten, että tuotannossa syntyy mahdollisimman vähän päästöjä¹⁹.

8.2 Biosynteetikaasu

Synteetikaasua tuotetaan fossiilisista polttoaineista ja siitä jalostetaan pääasiassa ammoniakkia, metanolia, Fischer-Tropsch tuotteita ja sähköä sekä öljynjalostukseen vetyä. Fossiilisten polttoaineiden määrän vähenemisen takia on kiinnostuttu mahdollisuudesta valmistaa synteetikaasua uusiutuvasta biomassasta¹⁹. Biomassasta, esimerkiksi metsäbiomassasta, valmistettua kaasua kutsutaan siis biosynteetikaasuksi⁴⁸. Biosynteetikaasu on kovertoitua tuotekaasua, josta on poistettu epäpuhtaudet eri kaasunpuhdistusmenetelmillä⁵. Puhdas biosynteetikaasu sisältää ainoastaan hiilimonoksidia ja vetyä¹⁹.

Biosynteetikaasua voidaan käyttää sähkön ja lämmön tuotantoon sekä kemikaalien ja polttoaineiden valmistukseen. Pääosin biosynteetikaasua käytetään ammoniakkisynteetissä, mutta sen käyttö tulee koko ajan merkittävämmäksi liikennepolttoaineiden jalostuksessa¹⁹. Biosynteetikaasun jalostaminen nestemäiseksi polttoaineeksi helpottaisi sen liikuteltavuutta ja näin ollen sen polttoainekäyttötarkoitus tulisi laajenemaan entisestään. Tämä on mahdollista, esimerkiksi Fischer-Tropsch-synteetin avulla⁵¹.

On olemassa todella tarkat laatuvaatimukset biosynteetikaasulle, jos sitä käytetään katalyyttisessä prosessissa, josta muodostuu biopolttoainetta. Kaasun on oltava puhdasta, jotta se ei myrkytä katalyyttiä. Likaisen biosynteetikaasun mukana saattaa olla epäorgaanisia komponentteja kuten rikki- ja klooriyhdisteitä. Suurin ongelma on kuitenkin terva ja orgaaniset komponentit, jotka tukkivat putket tai tekevät katalyyttistä toimintakyvyttömän⁴⁹.

Synteetikaasun eri käyttötarkoitukset:

- voidaan polttaa ja siten käyttää suoraan energiantuotantoon
- katalyyttisen Fischer-Tropsch-synteetin avulla valmistetaan orgaanisia yhdisteitä (vahat, diesel/kerosiini, bensiini, nafta)
- voidaan valmistaa metanolia ja sitä kautta dimetyylieetteripohjaista polttoainetta ja eri metanolipohjaisia kemikaaleja (eteeni, etikkahappo, formaldehydi jne)⁵².

9 Synteesikaasun fermentointi

Metsäbiomassaan perustuvan polttoaineen fermentointi on edelleen kehityksen alla, koska siinä on vielä joitain olennaisia ongelmia. Suurin ongelma on raaka-aineen muuttaminen sokeriksi hydrolyysin avulla. Siihen on olemassa kaksi tapaa, happokäsittely tai entsyymaattinen hydrolyysi. Ensimmäinen tapa on hyvin kallis sekä tehoton ja toisesta tavasta ei ole vielä riittävästi kokemusta⁵³.

Voidaan kuitenkin olettaa, että synteesikaasun fermentointi toimisi seuraavalla tavalla:

- Puhdistettu biosynteesikaasu johdetaan bioreaktoriin, jossa on tarkoin valittuja bakteereja.
 - o Bakteerien ja biosynteesikaasun välillä tapahtuu aineenvaihduntaa korkeassa lämpötilassa ja hapettomissa olosuhteissa.
 - o Reaktioaikana konsentraation nousu saattaa aiheuttaa bakteereille myrkyllisen tilan ja ne kuolevat, jolloin reaktio loppuu.
- Aineenvaihdunnan tuotteena syntyy etanolia, butanolia ja asetaattia.
 - o Butanoli on toivotuin tuote synteesikaasun fermentointiprosessissa, koska sitä pystytään hyödyntämään etanolia paremmin polttoaineena⁴⁸.

Fermentointilaitteiston kuten biologisen prosessinkin keskipiste on itse bioreaktori. Fermentointi reaktoria käytetään mikroobiseen soveltamiseen. Fermentori suunnitellaan siten, että se on helposti puhdistettavissa ja se sisältää happisiirron sekä kontrolloii lämpötilaa sekä pH:ta. Lisäksi reaktori pystytään tekemään bakteerittomaksi paikallaan ja se on suunniteltu kaiken kaikkiaan pieneliöitä sisältämättömäksi. Fermentori voidaan integroida ympärillä oleviin reaktoreihin ja laitteistoihin tai se voi toimia itsenäisenä⁵⁴.

10 Fischer-Tropsch-synteesi

Fischer-Tropsch-synteesin tavoitteena on muuttaa vedyn ja hiilimonoksidin seos eli biosynteesikaasu nestemäiseksi hiilivedyksi (biodiesel) tai esimerkiksi muovin raaka-aineiksi. Puhdistettu biosynteesikaasu johdetaan FT-reaktoriin, joka paineistetaan noin 5-20 bar paineeseen. Yleensä käytetään noin 20 bar painetta⁵³. Synteesikaasu sisältää vetyä ja hiilimonoksidia suhteessa 2:1⁴⁹. Koostumus vaihtelee raaka-aineen mukaan⁵². Reaktio toteutetaan korkeassa 240-450 lämpötilassa⁴⁹. Reaktorin lämpötila nostetaan uunin avulla noin 200-300 asteeseen ja kun itse FT-reaktorin lämpötila ylittää uunin lämpötilan noin 10-20 asteella alkaa prosessi tuottamaan hiilivetyjä. Reaktiota nopeutetaan yleensä katalyytillä, joissa on joskus pieniä määriä jalometalleja. Katalyytti on heterogeeninen ja se on sidottu yleensä alumiinioksidi tai silika-alumiini tukiaineelle⁵¹. Käytetyn katalyytin ominaisuudet vaikuttavat eniten lopputulokseen⁵².

Lähtöaineiden eli vety-häkä-suhde on 2:1 ja sekaan sekoitetaan typpeä, jotta reaktio laimenee. FT-synteesi on eksoterminen ja se voi aiheuttaa liian voimakkaan reaktion ja siten vaikeuttaa sen hallittavuutta. Typpeä käytetään myös reaktion konversion laskemiseen eli typen ja hiilimonoksidin suhteen laskemiseen reaktion alussa ja lopussa. Typpi ei kulu reaktiossa. Toinen vaihtoehto reaktivoimakkuiden pienentämiseen on katalyytin laimentaminen. Jauhemaiseen katalyytiin sekoitetaan piikarbidia tai kantoainetta, jolloin lähtöaine ei reagoi niin voimakkaasti ja reaktio ei ole voimakkaan eksoterminen. Laimennussuhde vaihtelee välillä 1:1-1:3⁵¹.

Katalyyttien kehittämisvaiheet:

- huokoisen kantajan pinnalle kyllästetään (metalli liuotetaan veteen ja yhdistetään tukiaineeseen) katalyytti
- kuivaus
- veden ja epäpuhtauksien poisto korkean lämmön avulla (300-600 °C)
- vetykaasuvirrassa olevan metallin pelkistys
- katalyytin testaus reaktorissa
- analysointi (reaktiotuotteet)⁵⁵.

Synteesikaasu reagoi katalyytin pinnalla reaktorissa ja muodostuneet raskaat ja jopa vahamaiset hiilivedyt kulkeutuvat kuumaloukkuun. Kuumaloukon lämpötila on 160-200 astetta, jotta raskaat hiilivedyt pysyisivät nestemäisinä ja kevyet kulkeutuisivat kylmaloukkoon. Kylmaloukon lämpötila pidetään alhaisena jäähdyttämällä sitä ulkopuolisesti vedellä ja jäällä. Kylmaloukossa kevyet hiilivedyt tiivistyvät nestemäisiksi. Reagoimattomat lähtöaineet ja tiivistymättömät kaasut paineistetaan säätimen kautta⁵¹.

FT-synteesin kaksi tärkeintä reaktiota ovat seuraavat:

- $(2n+1)H_2 + nCO \rightarrow C_n(H(2n+2)) + nH_2O$, jossa reagoivat vetykaasu ja hiilimonoksidi muodostaen hiilivetyä ja vettä. Tämä on varsinainen FT-reaktio.
- $H_2O + CO \rightarrow H_2 + CO_2$, jossa reagoivat vesi ja hiilimonoksidi muodostaen vetyä ja hiilidioksidia. Tätä reaktiota käytetään etenkin kun raaka-aineena on puu⁵³. Reaktiota kutsutaan vesikaasun siirtoreaktioksi. Voidaan käyttää syötön H_2/CO -suhteen säätämiseen⁵¹.

FT-synteesin kolme päävaatimusta ovat:

1. Vakio kaasuvirtaus
 - Säädetään automaattisella massavirtasäätimellä
2. Vakio paine
 - Pieni konversiotaso pitää tasapainoa yllä
 - Liian aktiivinen katalyytti laskee paineen reaktorissa, jolloin kaasu muuttuu nesteeksi.
 - Paineen aleneminen aiheuttaa neulaventtiilin sulkeutumisen, jolloin lähtöaine jää katalyytin pinnan päälle. Tämä aiheuttaa katalyytin myrkyttymisen ja reaktio pysähtyy.
3. Vakio lämpötila
 - Pieni konversiotaso pitää tasapainon yllä⁵¹.

Fischer-Tropsch –menetelmässä voidaan hyödyntää niin fossiilisia kuin biopohjaisia raaka-aineita. Menetelmän raaka-aineeksi käyvät siis monenlaiset orgaaniset ainekset. Synteesin muodostama polttoaine on korkealaatuista ja muistuttaa ominaisuuksiltaan fossiilista polttoainetta⁵⁶.

FT-synteesireaktoreita on kaupallisesti tarjolla neljää eri tyyppiä:

- putkireaktori (multi-tubular reactor)
- kiertoleijupeti (circulating fluidized bed)
- kiinteäleijupeti (fixed fluidized bed)
- kiinteä liejupeti (fixed slurry bed)⁵².

11 Yhteenveto

Metsäbiomassan jalostusominaisuudet on kerätty Taulukkoon 5. Potentiaalisimmat teknologiat ovat kaasutus ja CHP-laitos. Kaasutus mahdollistaa lämmön ja sähkön lisäksi synteesikaasun jatkojalostukseen.

Taulukko 5. Tiivistelmä metsäbiomassan jalostusominaisuuksista⁶.

Jalostusteknologia	Biomassatyyppi	Esimerkki käytetystä polttoaineesta	Päätuote	Käyttötarkoitus	Teknologian asema	Huomautukset
Poltto		Puutavara, hake, pelletit, muu kiinteä biomassa, tähteet	Lämpö	Lämpö ja sähkö (höyryturbiini)	Kaupallinen	Hyötysuhdevaihtelu esim. > 15- 40 % sähkö; >80 % lämpö
Kaasutus	Kuiva biomassa	Puuhake, pelletit ja kiinteä jäte	Lämpö / Sähkö	Lämpö (höyrykattila), sähkö (moottori, kaasuturbiini, poltto-kenno, yhdistetty kierto), kuljetuspolttoaine (metanoli, vety); biobensa, diesel	Kokeiluvaihe ensimmäisellä kaupallisella asteella	Kehittyneet kaasutusteknologia tarjoaa hyvän mahdollisuuden käyttää monipuolisesti biomassalähteitä (erilaisiin käyttötarkoituksiin)
Pyrolyysi			Pyrolyysiöljy ja sivutuotteet	Lämpö (höyrykattila) ja sähkö (moottori)		Laadun kustannusvaatimukset pyrolyysiöljylle ja sopiva käyttötarkoitus
Yhteispoltto	Kuiva biomassa (puu ja ruoho)	Lyhytkiertoviljelyn jäännökset (olki, jäte)	Lämpö / Sähkö	Sähkö ja lämpö (höyryturbiini)	Kaupallinen (suora poltto). Kokeiluvaihe (kehitys kaasutuksessa ja pyrolyysissa)	Paljon potentiaalia käyttää eri biomassatyppejä: vähän saastuttava, alhainen investointikynnys. Joitain teknisiä hankinta ja laatuongelmia
CHP	Kuiva biomassa, bio-kaasu	Olki, metsä jäännökset, jäte, biokaasu		Lämmön ja sähkövoiman yhdistäminen (poltto- ja kaasutusprosessi)	Kaupallinen (keskisuurella ja suurella mittakaavalla). Kaupallinen kokeilu (pienellä mittakaavalla)	Korkea suorituskyky, esim. 90 %; potentiaalinen polttokennomenetelmä (pienet tehtaat)

Lähteet

- 1 Metsäteollisuus. Biojalostamot monipuolistavat metsäteollisuutta ja tekevät Suomesta johtavan biotalousmaan. Kalvosarja biojalostamoista, biopolttoaineista ja muista biomateriaaleista. [Verkkojulkaisu]. Metsäteollisuus. 2009. [Viitattu 1.12.2009]. Saatavissa: [http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/tutkimus3/Documents/Biojalostamot%20monipuolistavat%20metsateollisuutta%20ja%20tekevät%20Suomesta%20johtavan%20biotalousmaan.ppt#272,19,Dia 19](http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/tutkimus3/Documents/Biojalostamot%20monipuolistavat%20metsateollisuutta%20ja%20tekevät%20Suomesta%20johtavan%20biotalousmaan.ppt#272,19,Dia%2019)
- 2 Rintekno Oy.; Aittomäki, E.; Kotanen, I. et al. Biomassatuotteisiin liittyvien markkinoiden ja liiketoimintamahdollisuuksien selvitys. BioRefine selvitys. Loppuraportti. [Verkkojulkaisu] Tekes. 2009. [Viitattu 27.11.2009]. Saatavissa: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/BioRefine/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Julkaisut/BioRefine_loppuraportti_julkinenx1x.pdf.PDF
- 3 Pellinen, M. Mekaanisen metsäteollisuuden energianhankinnan vaihtoehdot. [Verkkojulkaisu]. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 1996. [Viitattu 12.11.2009]. Saatavissa: <http://www.sll.fi/mpe/di/di.pdf>
- 4 Puhakka, A., Biojalostamo-hanke -suunnitelma, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, 5/2009.
- 5 Antikainen, R. et al. Bioenergian tuotannon uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat; Nykytilakatsaus. [Verkkojulkaisu]. Suomen ympäristökeskus, Raporttije 11/ 2007. [Viitattu 17.11.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=70772&lan=fi>
- 6 Rosillo-Calle, F.; De Groot, P.;Helmstock, S.L.; Woods, J. The biomass assessment handbook; Bioenergy for a suitable environment, Earthscan, London, 2007, 1-18.
- 7 Sims, R, E, H. The brilliance of bioenergy in business and in practice, James & James, London, 2002, 105-263.
- 8 INFORSE. Biomass energy; biofuels – technologies – electricity production- guideline. [Verkkojulkaisu]. International Network for Sustainable Energy. [Viitattu 17.11.2009]. Saatavissa: <http://www.inforse.org/europe/dieret/Biomass/biomass.html>
- 9 Raiko, R.; Kurki-Suonio, I.; Saastamoinen, J.; Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1995. 139-
- 10 Kirjavainen, M. et al. Small-scale biomassa CHP technologies Situation in Finland, Denmark and Sweden. [Verkkojulkaisu]. VTT Processes. 2004. [Viitattu 11.11.2009]. Saatavissa: http://www.opet-chp.net/download/wp2/small_scale_biomass_chp_technologies.pdf

- 11 Aaltonen, J.; Ukkonen, J. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto mahdollisuudet. [Verkkojulkaisu]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2008. [Viitattu 20.11.2008]. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/39675/Pienet%20chp%20laitokset.pdf?sequence=1>
- 12 Knuutila, K. Puuenergia. Jyväskylän Teknologikeskus Oy. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä.2003. 92-115.
- 13 Isoaho, S., Vinnari, E. Pirkanmaan biojätehuollon järjestelmä- ja kustannustarkastelu. [Verkkojulkaisu]. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Ympäristötekniikan osasto, Bio- ja ympäristötekniikan laitos. 2003. [Viitattu 16.11.2009]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/units/ymp/bio/reports/PirkanmaanBiojatehuollonTarkastelu.pdf>
- 14 Granö, U-P. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008-2011; Projekti info 27; Lämmön avulla jalostamine - Pyrolyysi. [Verkkojulkaisu] 2009. [Viitattu 9.11.2009]. Saatavissa: https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F27.pdf
- 15 Tieteen kuvalehti. Puuhiilen valmistus vaatii ilmatonta tilaa. [Verkkojulkaisu]. From TK nr. 12/2000 pages 10. 2000. [Viitattu 9.11.2009]. Saatavissa: <http://tieku.fi/kysy-meilta/puuhiilen-valmistus-vaatii-ilmatonta-tilaa-0>
- 16 DI Puhakka, M. Polttoteknologiat. [Verkkojulkaisu] Giga Power Oy. [Viitattu 10.11.2009]. Saatavissa: http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/bioenergiamateriaali04/pdf_materiaali/Polttoteknologiat.htm
- 17 Naik, S.N. et al., Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. (2009).
- 18 OPET Network. 2004a. Technology paper 2: Micro and small-scale CHP from biomass (<300 kWe). [Verkkojulkaisu]. 2004. [Viitattu 11.11.2009]. Saatavuus: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/DENSY/en/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Julkaisut/OPET-RES/TechnologyPaper2_chp_70404.pdf
- 19 Knoef, H.A.M. Handbook biomass gasification, Drukkerij Giethoorn ten Brink, Meppel; Alankomaat. 2005.13-
- 20 Behrendt, F. et al., Direct Liquefaction of Biomass, Chemical Engineering & Technology, Vol 31, Issue 5, 2008. 667-677.
- 21 Metsämiesten Säätiö. Yhteispolttolaitoksen polttoainevalinta ja politiikan ohjauskeinot. [Verkkojulkaisu]. Helsinki. Metsämiesten Säätiö. [Viitattu 25.11.2009]. Saatavissa: http://www.mmsaatio.fi/www/fi/rahoituksen_tuloksia/index.php?we_objectID=31
- 22 van Loo, S.; Koppejan, J. The handbook of biomass combustion and Co-firing. Eartscan. Lontoo. 2008. 4. 197-207.

23 Opet Finland. Pellettien ja kivihiilen seospoltto sujuu hyvin. [Verkkajulkaisu]. Turku Energia voimalaitos. 2009. [Viitattu 25.11.2009]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/files/265/PELLETTI-turku-energia.pdf>

24 Vartiainen, E. et al. Hajautettu energiantuotanto: teknologiat, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt. [Verkkajulkaisu]. Helsinki: Gaia Group Oy. 2002. [Viitattu 24.11.2009]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/ymp%c3%a4rist%c3%b6pooli/liitekirjasto/hajautettuenergiantuotanto%20cloppuraportti.pdf?SectionUri=%2ffi%2fjulkaisut%2fymparistopooli%2ftutkimusaineisto>

25 Helynen, S.; Flyktman, M.; Mäkinen, T.; Sipilä, K.; Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasujen vähentämisessä. VTT tiedotteita 2145. [Verkkajulkaisu]. Edita Prima Oy, Helsinki 2002. [Viitattu 5.11.2009]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2145.pdf>

26 Helynen, S.; Oravainen, H. Polttopuun pientuotannon ja –käytön kehitystarpeet. Tekes, 124/2002

27 Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S., Rintala, J. Biokaasusta energiamaatalouteen - raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. [Verkkajulkaisu]. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Jyväskylän Yliopisto. 2007 [Viitattu 13.11.2009]. Saatavissa: <http://www.biokaasufoorumi.fi/GetItem.asp?item=digistorefile;127950;670>

28 Sinko, T. Pienen mittakaavan CHP-laitokset osana hiilineutraalia maaseutuyhteiskuntaa. [Verkkajulkaisu] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2009. [Viitattu 11.11.2009]. Saatavuus: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200903061225>

29 US. Department of energy. Information Resources; ABC's of Biofuels. [Verkkajulkaisu]. Us. Department of Energy. Biomass Program. 2009. [Viitattu 16.11.2009]. Saatavuus: http://www1.eere.energy.gov/biomass/abcs_biofuels.html

30 Biorefining prosess. Fermentation of Lignocellulosic Biomass. [Verkkajulkaisu]. Wisconsin Biorefining Development Initiative. 2004. [Viitattu 16.11.2009]. Saatavissa: <http://www.wisbiorefine.org/proc/fermlig.pdf>

31 North American Clean energy. Dry fermentation in municipal solid waste management. [Verkkajulkaisu] BIOFerm Energy Systems. 2008. [Viitattu 17.11.2009]. Saatavissa: http://www.nacleanenergy.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2230:dry-fermentation-in-municipal-solid-waste-management-&catid=54:biomass-feature-articles&Itemid=121

32 Väisänen, P., Salmenoja, J. Biokaasun muodostuminen ja sen hallittu käsittely kaatopaikoilla. [Verkkajulkaisu]. Suomen Biokaasuyhdistys. [Viitattu 16.11.2009]. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/docs/kaatgas.pdf>

33 Pohjanmaan jätelautakunta. Kompostointi & kompostointiopas. [Verkkajulkaisu]. Pietarsaari. [Viitattu 16.11.2009]. Saatavissa: <http://www.ekoso.fi/fi/kompostointi.html>

- 34 Alakangas, E; Flyktman, M. Biomass CHP Technologies. [Verkkojulkaisu]. Jyväskylä. VTT Energia. 7/2001. [Viitattu 11.11.2009]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2001/ENE_Alakangas.pdf
- 35 Growing Power; Bioenergy solution from Finland. Tekes, 26.11.2008
- 36 Granö, U-P. Bioenergiaa metsästä 2003-2007; Projekti info 133; Energiaraaka-aineita metsästä. 2007
- 37 Suomen Höyrypursiseura ry. Höyrytekniikka. Kuinka Coumpound höyrykone toimii?. [Verkkojulkaisu] 2010. [Viitattu 8.2.2010]. Saatavissa: <http://www.steamship.fi/?cat=16>
- 38 Brain. M. How Steam Engines Work. [Verkkojulkaisu] Howstuttworks. 2008. [Viitattu 8.2.2010.] Saatavissa: <http://science.howstuffworks.com/steam1.htm>
- 39 About.com: Inventors. The history of engines. Part 1: How Steam Engines Work. [Viitattu 8.2.2010]. Saatavissa: <http://inventors.about.com/library/inventors/blenginehistory.htm>
- 40 Paavola, M. Biopolttoaineilla toimiva Stirling-voimalaitos. [Verkkojulkaisu] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2008. [Viitattu 11.11.2009]. Saatavuus: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200811052050>
- 41 Polttokennot. Teknologia teollisuus. [Verkkojulkaisu]. Teknologiateollisuus ry. 2009. [Viitattu 12.11.2009]. Saatavissa: <http://new.teknologiateollisuus.fi/fi/ryhmat-ja-yhdistykset/polttokennot.html>
- 42 Fuel Cell Europe. About Fuel Cells; How do they work? [Verkkojulkaisu]. Fuel Cell Europe 2009. [Viitattu 12.11.2009]. Saatavissa: <http://www.fuelcelleurope.org/index.php?m=7&sm=44>
- 43 Kallio, T. Polttokennot. Mirko 400. [Verkkojulkaisu]. Helsinki. Helsingin yliopisto. 2004. [Viitattu 12.11.2009]. Saatavissa: <http://www.mm.helsinki.fi/~tjkallio/polttokennot.pdf>
- 44 Polttokenno. Hydrocell. [Verkkojulkaisu]. Oy Hydrocell Ltd. 2007. [Viitattu 12.11.2009]. Saatavissa: <http://www.hydrocell.fi/fi/polttokennot/>
- 45 Valtion ympäristöhallinto. Ympäristön tila. [Verkkojulkaisu]. Valtion ympäristöhallinto. 25.9.2009. [Viitattu 17.12.2009]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=87&lan=fi>
- 46 Kuusinen, M.; Ilvesniemi, H. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. [Verkkojulkaisu]. Tapion ja Metrlan julkaisuja, 2008. [Viitattu 30.12.2009]. Saatavissa: http://www.bioenergia.fi/default/?__EVIA_WYSIWYG_FILE=2396&name=file
- 47 Ohlström, E.; Tsupari, E.; Lehtilä, A. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset. [Verkkojulkaisu]. VTT tiedotteita. Kuopion yliopisto. 2005 [Viitattu 4.1.2010]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf>
- 48 Romar, H. Tutkija. Henkilökohtainen tiedonanto. Kokkolan Yliopistokeskus Chydenius. 21.1.2010

49 Romar, H. Tutkija. Some aspects on the quality of the biomass used for Fischer-Tropsch synthesis. 2009

50 Granö, U-P et al. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008-2011; Puuperäisten biomasssojen kaasutus- Esimerkkinä Sievin kaasutin. Uudet energiaratkaisut Pohjanmaalla –seminaari 12.9.2008.

51 Tynjala, P. Tutkija. Henkilökohtainen tiedonanto. Kokkolan Yliopistokeskus Chydenius. 22.1.2010

52 Romar, H. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008-2011; Projekti info 17; Biopolttoaineita synteetikaa- suista. 2008.

53 Faaij, A. Bio-energy in Europe: changing technology choices. Energy Policy, 34, 2006, 322-342

54 Thurne Teknik Finland. Tech group bioprocess. Bioreactors & Fermentors. [Verkkajulkaisu]. Viitattu 4.2.2010. Saatavissa: http://www.thurne.fi/Tech_group_bioprocess.pab

55 Romar, H. et al. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008-2011; Projekti info 46; Fischer-Tropsch-synteesin kehitys. 2010.

56 Bioste Oy. Bioenergian ammattilainen. Fischer-Tropsch –menetelmä. [Verkkajulkaisu] 2010. [Viitattu 8.2.2010]. Saatavissa: http://www.bioste.fi/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=13

POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULUN B-SARJASSA ILMESTYNEITÄ JULKAISUJA

B:22

Lähilämpöratkaisut matalaenergiarakentamisessa. Asko Puhakka & Sini Makkonen (toim.). 2011.

B:21

Oivallusopas innovaatiomatkalle. Ulla Rätty & Kim Wrange (toim.). 2011.

B:20

Yhteyksiä Pohjois-Karjalasta. Riitta Makkonen ja Pilvi Purmonen (toim.). 2010.

B:19

Opiskelijat yritysten kansainvälistymisen edistäjinä. Tenho Kohonen (toim.). 2010.

B:18

Löytöretki aikuisohjauksen maailmaan. Mervi Lätti, Päivi Putkuri (toim.). 2009.

B:17

Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta. Ari Lampinen. 2009.

B:16

Työkaluja kielten oppimiseen. Johanna Hartikainen, Jaana Tolkki.
Verkkojulkaisu 2009.

B:15

Sydämen puhetta sydämelle : kirja laulamisesta. Leena Kotila. 2. p. 2008.

B:14

Kuinka voitte? Kak Vaše zdorov'e? Suomi-venäjä-suomi – sanasto terveysalalle.
Riitta Hyttinen, Svetlana Kozinskaja, Raija Latvala, Leena Lauronen.
3. korj. p 2008.

JULKAISUMYYNTI

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu / Julkaisumyynti

Tikkariinne 9 A, 80200 Joensuu

julkaisut@pkamk.fi

<http://www.tahtijulkaisut.net>



Bioenergia - mahdollisuuksia ja haasteita

Uusiutuva energia ja metsäbiomassan käyttö energian tuotannon raaka-aineena edistävät kestävästä kehitystä ja luonnonvarojen monipuolista käyttöä vähentäen samalla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Biomassan mahdollisimman tehokas hyödyntäminen edellyttää uudenlaista ajattelumallia, ns. bioenergiaterminaalia, missä biomassaa voidaan jalostaa mahdollisimman teknis-taloudellisesti energiaksi, mutta mahdollisesti myös uusiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Bioenergian ja metsäbiomassan käytön lisääminen energiantuotannossa antaa uudenlaisen mahdollisuuden yrittäjyydelle ja maaseudun elinvoimaisuudelle.

Bioenergian jalostusterminaali-toimintamallin tarkoituksena on edistää puuta raaka-aineena käyttävän bioenergian tuotanto- ja jatkojalostukseen soveltuvan biovahan tuotantomahdollisuutta osana hajautetun energiatuotannon rakennetta. Biovahan tuotantomahdollisuutta selvitettiin Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun toimesta pienimuotoisella selvityshankkeella, jonka ovat rahoittaneet OSKE-ohjelma, Josek Oy ja ELY-keskus. Asiantuntijaorganisaationa jalostustoiminnan analysoinnissa toimi Kokkolan yliopistokeskus Chydenius ja Oulun yliopisto. Selvitystyön tuloksena oli, että biovahan hajautetun tuotannon jatkokehitystä kannattaa jatkaa ja bioenergiaterminaali muodostaa siihen konkreettisen mahdollisuuden. Toiminta-ajatuksena jalostushankkeessa on, että matalammalla jalostusasteella puusta muodostettu biovaha toimitetaan jatkojalostukseen suurteollisuustasoiseen tuotantoyksiköön tai vahan käyttöä paikallisena, uusiutuvana energialähteenä kehitetään esim. uudenlaisten lämpölaitteistojen polttoaineena.

Teollisen toiminnan sektorilla tavoitteena on parantaa valmiuksia kehittää ja ottaa käyttöön paikallisiin uusiutuviin raaka-aineisiin perustuvaa energian ja energiantuotannon välituotteiden valmistusteknologiaa. Hankkeen tulokset ovat julkisia.