



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SUVI SUOJANEN  
YHDYSKUNTAJÄTE ENERGIALÄHTEENÄ CHP-LAITOKSESSA  
Kandidaatintyö

Tarkastajat: Professori Jukka Rintala  
ja Maarit Särkilahti  
12. joulukuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**SUOJANEN, SUVI:** Yhdyskuntajäte energialähteenä CHP-laitoksessa

Kandidaatintyö, 27 sivua

Joulukuu 2014

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastajat: Professori Jukka Rintala ja Maarit Särkilahti

Avainsanat: yhdyskuntajäte, poltto, kaasutus, pyrolyysi, CHP, lämpövoimakone

Yhdyskuntajätettä voidaan käyttää energialähteenä yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, missä konversioprosessin avulla yhdyskuntajätteen energia muutetaan sähköksi, lämmöksi tai polttoaineeksi. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on esitellä yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön nykytilaa, siihen liittyvää tekniikkaa ja sen tulevaisuutta osana jätehuolto- ja energiatuotantojärjestelmiä. Työ on kirjallisuusselvitys, jossa on hyödynnetty alan oppikirjoja, tieteellistä aineistoa, kuten artikkeleita, ja lakeja.

Nykytilaa tarkisteltaessa huomioidaan jätehuoltojärjestelmälle kohdistuvat vaatimukset esimerkiksi jätehierarkian ja energiahyötykäytön tavoitteiden osalta. Yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttö on osa jätehuoltojärjestelmää, jonka täytyy käsitellä yhä enemmän yhdyskuntajätettä sen määrän kasvaessa. Sitä ohjaavat esimerkiksi jätehierarkia, kaatopaikkasijoittamisen väheneminen, ympäristölle vaarallisen jätteen käsitteleminen, ympäristön suojeleminen ja luonnonvarojen säästäminen.

Tekniikan osalta perehdytään yhdyskuntajätteen esikäsittelyyn, termokemiallisiin konversioprosesseihin sekä sähkön- ja lämmöntuotantoon. Yleisimmin yhdyskuntajätettä poltetaan esikäsittelemättömänä massapolttona arinakattilassa, mutta esikäsittely laajentaa sen käyttömahdollisuudet esimerkiksi rinnakkaispolton ja uusien konversioprosessien sovellutuksiin. Uudet konversioprosessit eli kaasutus ja pyrolyysi muuttavat yhdyskuntajätteen esimerkiksi tuotekaasuksi, jota voidaan käyttää energialähteenä tai biopolttoaineiden ja kemikaalien raaka-aineena. Yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannolla voidaan maksimoida yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttö.

Tulevaisuuden kannalta esitellään eri konversioprosessien ja lämpövoimakoneiden mahdollisuuksia tulevaisuuden energiatuotantomallissa. Orgaaninen jätejäte suositellaan mädätettäväksi lannan kanssa ja tuotettu biokaasu käytetään joko energialähteenä tai siitä jalostetaan biopolttoaineita. Esikäsiteltyä yhdyskuntajätettä suositellaan kaasutettavaksi, jonka jälkeen siitä jalostetaan biokaasua. Yleisimmät käytössä olevat lämpövoimakoneet ovat höyry- ja kaasuturbiini sekä polttomoottori. Muiden lämpövoimakoneiden käytön yleistymisen vaatii lisää tutkimus- ja kehitystyötä, jotta esimerkiksi investointikustannuksia saadaan alemmiksi ja materiaaleja korroosiota kestäviksi.

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön nykytila.....	2
2.1	Energiahyötykäyttö osana jätehuoltojärjestelmää.....	3
2.2	WtE-laitoksien tavoitteet ja ohjaavat tekijät .....	3
3	Yhdyskuntajäte energialähteenä.....	5
3.1	Yhdyskuntajätteen konversio-ominaisuudet .....	5
3.2	Yhdyskuntajätteen esikäsittely ennen konversioprosessia.....	6
3.3	Yhdyskuntajätteen termokemialliset konversioprosessit .....	7
3.3.1	Poltto.....	9
3.3.2	Uudet konversioprosessit.....	10
3.3.2.1	Kaasutus .....	10
3.3.2.2	Pyrolyysi.....	11
4	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto .....	12
4.1	Polttoon perustuvat lämpövoimakoneet.....	14
4.1.1	Höyryturbiini .....	14
4.1.2	Mäntähöyrykone .....	15
4.1.3	ORC-kiertoprosessi.....	15
4.1.4	Stirling-moottori .....	15
4.2	Kaasutukseen perustuvat lämpövoimakoneet .....	16
4.2.1	Tuotekaasun puhdistus.....	16
4.2.2	Kaasu- ja mikrokaasuturbiini.....	16
4.2.3	Polttomoottorit.....	17
4.2.4	Polttokennot.....	17
4.3	Yhteenveto lämpövoimakoneista .....	18
5	Yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön tulevaisuus .....	20
5.1	Bioenergian rooli.....	20
5.2	Yhdyskuntajäte energialähteenä.....	21
5.3	Lämpövoimakoneet.....	22
6	Johtopäätökset.....	23
	Lähteet.....	25

## LYHENTEET, TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

### Kemialliset yhdisteet

CH <sub>4</sub>	metaani
CO	hiilimonoksidi
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
COS	karbonyylisulfidi
H <sub>2</sub>	vety
H <sub>2</sub> O	vesi
HCl	vetykloridi
HCN	vetysyanidi
H <sub>2</sub> S	rikkivety
NH <sub>3</sub>	ammoniakki
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
PCDD/F	dioksiinit ja furaanit
SO <sub>2</sub>	rikkidioksidi

### Lyhenteet

ABC	engl. air bottoming cycle, ilmakombivoimalaitos
BAT	engl. best available technique, paras käyttökelpoinen tekniikka
BioIGCC	biokaasukombivoimalaitos, kts. IGCC
BREF	engl. best available reference document, BAT-tekniikan vertailuasiakirja, kts. BAT
CHP	engl. combined heat and power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
EFGT	engl. externally fired gas turbine suom.kuumailmaturbiini
EU	Euroopan Unioni
HAT	engl. humid air turbine suom:kosteailmaturbiini
IGCC	engl. integrated gasification combined cycle, kaasukombivoimalaitos
MCFC	engl. molten carbonate fuel cell, sulakarbonaattipolttockenno
ORC	engl. organic Rankine cycle, orgaaninen Rankine kierto
PAFC	engl. phosphorus adid fuel cell, fosforihappokenno
PEFC	engl. polymer electrolyte fuel cell, polymeerielektrolyttipolttockenno
RDF	engl. refuse derived fuel, jätteestä johdettu polttoaine
REF	engl. recovered fuel, talteenotettu polttoaine.
SOFC	engl. solid oxide fuel cell, kiinteäoksidipolttockenno
SRF	engl. solid recovered fuel, syntypaikkalajiteltu ja esikäsitelty polttoaine
WtE	engl. waste to energy, jäte energiaksi

**Termit**

absorbtiio	atomien, molekyylien ja ionien imeytyminen nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen.
bioenergia	biopolttoaineesta saatava energia kts. biopolttoaine
biokaasu	kaasuseos, joka syntyy biomassaa anaerobisesti mädättämällä
biomassa	eloperäinen, biohajoava aines
biopolttoaine	biomassasta valmistettu polttoaine kts. biomassa
Carnot	Lämpövoimakoneen kiertoprosessi, jossa suurin mahdollinen hyötysuhde
Cleantech	tuotteet, palvelut, prosessit ja teknologiat, jotka ehkäisevät tai vähentävät liiketoiminnan negatiivisia ympäristövaikutuksia
inertti	reagoimaton
kaasutus	yhdyskuntajätteen lämpökäsittely ali-ilmaisissa olosuhteissa
konversioprosessi	prosessi, joka muuntaa energiaa muodosta toiseen
plasma	aineen ionisoitunut olomuoto
pyrolyysi	yhdyskuntajätteen lämpökäsittely hapettomissa olosuhteissa
Rankine	ideaalinen kierto, jossa lämpö muuttuu työksi
rinnakkaispoltto	esikäsiteltyä yhdyskuntajätettä poltetaan samassa kattilassa rinnakkain esimerkiksi puun, turpeen tai kivihiilen kanssa
tulistin	höyryn arvojen nostamiseen käytettävä lämpöpinta
tuotekaasu	kaasutuksesta saatava kaasuseos, joka on toiselta nimeltään synteesikaasu

**Yksiköt**

°C	celsius, lämpötilan yksikkö
bar	baari, paineen yksikkö
kW	kilowatti, tehon yksikkö
kW <sub>e</sub>	sähkökilowatti, sähkötehon yksikkö
m <sup>3</sup> n	normikuutiometri, paine=1 bar lämpötila=0 °C
MJ/kg	megajoulea kilogrammaa kohti, energiasisällön yksikkö.
MJ/m <sup>3</sup> n	megajoulea normikuutiometriä kohti, energian yksikkö
MW <sub>e</sub>	sähkömegawatti, sähkötehon yksikkö
MWh	megawattitunti, energiantuotannon yksikkö

# 1 JOHDANTO

Yhdyskuntajätettä syntyy yhä enemmän ja samanaikaisesti sen sijoittamista kaatopaikoille vähennetään. Lisäksi energiakulutus on kasvussa, jolloin täytyy lisätä sähkön- ja lämmöntuotannon kapasiteettia. Eräs ratkaisu näihin kahteen ongelmaan on yhdyskuntajätteen hyödyntäminen yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon energialähteenä, mikä on tämän kandidaatintyön aiheena. Yhdyskuntajätteen polttaminen on perustunut alusta alkaen hygieenisten elinolosuhteiden turvaamiseen ja ympäristölle vaarallisten jätteiden käsittelemiseen. Näiden toimintaperiaatteiden lisäksi yhdyskuntajätteen energiahyötykäytössä korostuvat ilmastomuutoksen torjunta ja uusiutuvan energian tuotanto. Toiminnassa korostuu myös kestävän kehityksen periaatteet ja energiahyötykäytön maksimointi. Polton rinnalle on kehittymässä uusia teknologioita, joiden takia uudenlaista jätteenpolttolaitosta kutsutaan jäte energiaksi -laitokseksi (*engl. Waste-to-Energy, WtE*). WtE-laitoksessa voidaan yhdyskuntajätettä esimerkiksi kaasuttaa tai pyrolysoida, jolloin siitä voidaan tuottaa biopolttoaineita tai raaka-aineita kemikaalituotantoon.

Tämän kandidaatintyön taustalla on Tampereen teknillisen yliopiston kemian ja biotekniikan laitoksella tehty Cleantech-projekti, jossa tutkittiin nykyaikaisen jätehuoltojärjestelmän mahdollisuuksia. Projektissa selvitettiin kaupungeissa syntyviä yhdyskuntajätejakeita ja niiden tehokasta keräilyä, kierrätystä ja hyötykäyttömahdollisuuksia, joista yksi on energiahyötykäyttö. Työn tavoitteena on esitellä energiahyötykäytön nykytilaa, siihen liittyvää tekniikkaa ja esitellä yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön tulevaisuutta osana jätehuolto- ja energiatuotantojärjestelmiä.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys, jossa on hyödynnetty alan oppikirjoja, tieteellisiä julkaisuja, lakeja ja raportteja. Työn tarkoituksena on olla kattava selvitys WtE-laitoksen ja siihen liitetyn yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon mahdollisuuksista energiantuotantomuotona. Työn aluksi käydään läpi yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön tilannetta nykypäivänä maailmassa. Seuraavaksi esitellään yhdyskuntajätettä energialähteenä WtE-laitoksessa. Siinä syvennyttään yhdyskuntajätteen ominaisuuksiin, esikäsittelyyn ennen konversioprosessia ja termokemiallisiin konversioprosesseihin, joita ovat poltto, kaasutus ja pyrolyysi. Sen jälkeen keskitytään yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon konversioprosesseista saaduista tuotteista ja esitellään yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttöön soveltuvia lämpövoimakoneita. Työn lopuksi esitellään yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön tulevaisuutta sekä johtopäätökset WtE-laitoksen ja yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon mahdollisuuksista energiatuotantomuotona.

## 2 YHDYSKUNTAJÄTTEEN ENERGIAHYÖTYKÄYTÖN NYKYTILA

Yhdyskuntajäte määritellään vakinaisessa asunnossa, asuntolassa, vapaa-ajan asunnossa tai muussa asumisessa syntyviksi jätteiksi, joita ovat myös sako- ja umpikaivolietteet sekä laadultaan yhdyskuntajätteeseen rinnastettava hallinto-, palvelu- ja elinkeinotoiminnan jäte. Sekalaisella yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan jättejaetta, joka jää jäljelle, kun yhdyskuntajätteestä on poistettu syntypaikalla erilliskerätyt jätelajeittain yksilöidyt jakeet, kuten paperi- ja metallijakeet. [1] Energia määritellään fysiikan lakien mukaan kyvyksi tehdä työtä. WtE-prosesseissa yhdyskuntajätteen sisältämä energia muutetaan lämmöksi, sähköksi tai biopolttoaineeksi. Näihin kuuluvat jätteenpoltto ja energian talteenotto, pyrolyysi kiinteiksi, nestemäisiksi ja kaasumaisiksi biopolttoaineiksi, kaatopaikalla muodostuvan biokaasun keräys ja metaanin talteenotto, jätteiden kaasutus sekä jätteiden anaerobinen hajoaminen ja siitä syntyvän metaanin talteenotto [2]. Tässä työssä tarkastellaan termokemiallisia WtE-prosesseja, joissa lämmön avulla muutetaan yhdyskuntajätteen sisältämää energiaa toiseen muotoon. Vanhin ja yleisin näistä on jätteenpoltto ja energian talteenotto. Uusia termokemiallisia WtE-prosesseja ovat kaasutus ja pyrolyysi kiinteiksi, nestemäisiksi tai kaasumaisiksi biopolttoaineiksi.

Yhdyskuntajätteen WtE-prosessien syntyminen ja kehittyminen liittyvät yhdyskuntajätteen syntymiseen ja sen määrän kasvuun, jotka aiheutuivat yhdyskuntien kaupungistumisesta ja taloudellisesta kehityksestä. Yhdyskuntajätteen määrä alkoi kasvaa 1800-luvun loppupuolella, ja sen määrä on edelleen kasvussa. Vuonna 2012 maailmanlaajuisesti syntyi noin 1,3 miljardia tonnia yhdyskuntajätettä, ja määrän oletetaan kasvavan 2,2 miljardiin tonniin vuoteen 2022 mennessä. Nopeinta kasvu on tällä hetkellä Kiinassa ja muissa Itä-Aasian maissa sekä Itä-Euroopassa ja Lähi-idässä. [3] Syntyvän yhdyskuntajätteen määrä on riippuvainen yhdyskunnan tulotasosta (taulukko 2.1).

*Taulukko 2.1. Syntyvän yhdyskuntajätteen määrän riippuvuus tulotasosta [3].*

Tulotaso	Keskimääräinen yhdyskuntajätteen tuotto (kg/hlö/päivä)
Pienituloinen	0,6–1,0
Keskituloinen	0,8–1,5
Suurituloinen	1,1–4,5

Eniten yhdyskuntajätettä tuotetaan suuritulosisissa maissa ja vähiten pienituloisissa maissa. Yhdyskuntajätettä myös poltetaan enemmän suuritulosisissa kuin pienituloisissa

maissa, koska se on noin kolme kertaa kalliimpaa kuin kaatopaikkasijoitus, jolloin pieni- ja keskituloisissa maissa ei ole varaa perustaa WtE-laitoksia. Yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttö on siis yleisempää länsimaissa kuin kehitysmaissa, mutta molemmissa se on osa jätehuoltojärjestelmää. [3]

## 2.1 Energiahyötykäyttö osana jätehuoltojärjestelmää

Jätehuoltojärjestelmä koostuu monista erilaisista toimenpiteistä, jotka perustuvat neljään periaatteeseen. Ensimmäiseksi kaikilla on oikeus kuulua jätehuoltojärjestelmän piiriin terveydellisistä syistä, ja toiseksi jätehuoltojärjestelmän tulee tehokkaasti ja turvallisesti käsitellä jätteitä. Kolmanneksi jätehuoltojärjestelmässä maksimoidaan hyödyt, minimoidaan kustannukset ja optimoidaan resurssien käyttö. Neljänneksi toiminnassa korostetaan kestävästä kehitystä esimerkiksi teknisestä, ympäristöystävällisestä, kulttuurisesta, taloudellisesta, institutionaalisesta ja poliittisesta näkökulmasta. [3] Jätehuoltojärjestelmässä noudatetaan jätehierarkian arvojärjestystä, joka on määritelty esimerkiksi Euroopan parlamentin ja neuvoston jätedirektiivissä. [4] Direktiivin mukaan ensisijaisesti on ennaltaehkäistävä jätteen syntyminen. Jos jätettä kuitenkin syntyy, on se valmistettava uudelleenkäyttöä ja kierrätystä varten. Mikäli kierrätys ei ole mahdollista, niin jäte on ensisijaisesti hyödynnettävä materiaalina ja toissijaisesti energiana. Kaatopaikoille jäte voidaan sijoittaa vain silloin, kun sen hyödyntäminen materiaalina tai energiana ei ole taloudellisesti tai teknisesti mahdollista. Näiden lisäksi WtE-laitoksia ohjaavat monet tavoitteet ja yhteiskunnalliset tekijät, kuten ilmastotavoitteet ja lainsäädäntö.

## 2.2 WtE-laitoksien tavoitteet ja ohjaavat tekijät

Yhdyskuntajätteen polttamisella on ollut alusta asti kaksi tavoitetta: pienentää kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrää ja käsitellä ympäristölle vaarallista jätettä. Nämä tavoitteet ovat edelleen osa jätehuoltojärjestelmää erityisesti kehittyvissä maissa, joissa keräämätön, biohajoava yhdyskuntajäte aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä ja terveystahittoja. Biohajoava yhdyskuntajäte tuottaa hajotessaan metaania, joka on voimakas kasvihuonekaasu, joka aiheuttaa ilmaston lämpenemistä. Lisäksi keräämätön yhdyskuntajäte sisältää taudinaiheuttajia, jotka levittävät tauteja, kuten hengityssairauksia, ripulia sekä denguekuumetta. [3] Nykyaikaisella WtE-laitoksella on lisäksi muita tavoitteita, kuten ympäristönsuojelu ja luonnonvarojen säästäminen. Nykyaikaisen WtE-laitoksen tavoitteita ovat [5]:

1. Hygienisoinnissa korkea palamislämpötila (yli 850°C) ja savukaasujen riittävä viipymäaika tulipesässä (vähintään 2 sekuntia) varmistavat kaikkien bakteerien, viruksien ja muiden taudinaiheuttajien tuhoutumisen.
2. Vaarallisten aineiden mineralisoituminen ja reagoimattomuus WtE-laitoksen jäämissä, kuten pohjatuhkassa ja savukaasujen puhdistusmenetelmien jätteissä.



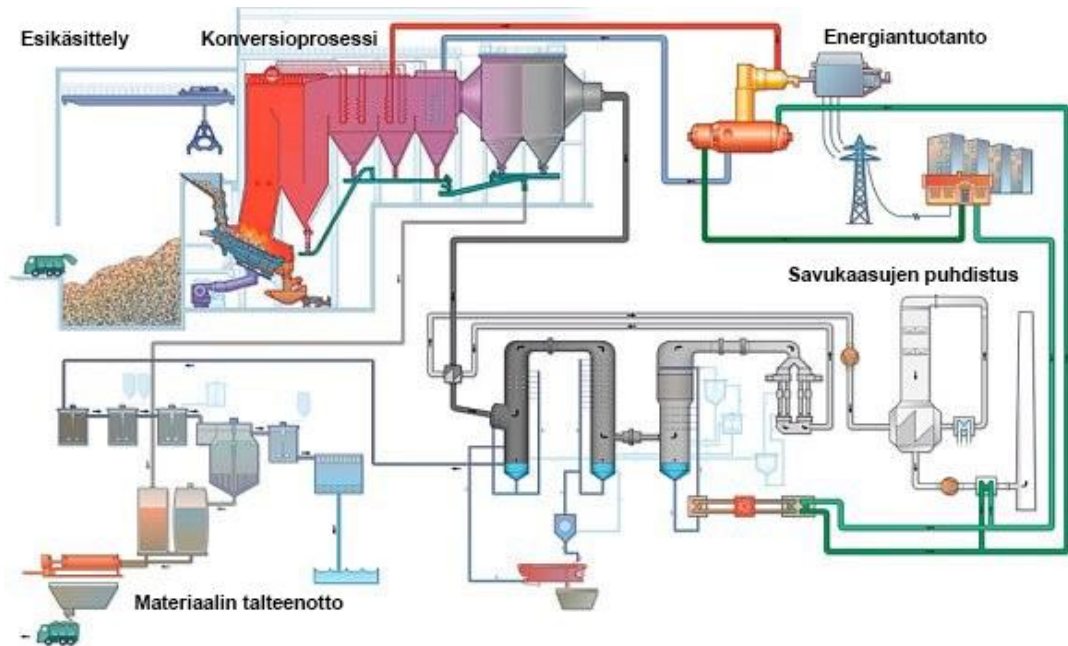
3. Loppusijoitettavan jätteen määrä vähenee noin 75 % alkuperäisestä painosta ja noin 90 % tilavuudesta, jolloin kaatopaikkatilaa tarvitaan vähemmän.
4. Ympäristönsuojelussa alitetaan tiukat päästöraajat kehittyneiden savukaasujen puhdistusmenetelmien avulla. Yleisesti käytössä olevia puhdistusmenetelmiä ovat esimerkiksi sähkösuotimet ja savukaasupesurit.
5. Laitoksen edullisten kustannuksien ja yleisen hyväksynnän saavuttaminen. WtE-laitoksien kustannuksia nostavat erityisesti yhdyskuntajätteen vastaanotosta perittävät porttimaksut ja savukaasujen puhdistusmenetelmät. Yleisen hyväksynnän saavuttamiseksi tarvitaan yhteisölle avointa ja luotettavaa työskentelyä, jossa korostetaan WtE-laitoksien ympäristöystävällisyyttä.
6. Materiaalin ja energian talteenottojen avulla voidaan säästää luonnonvaroja. Materiaalia, kuten metalleja, voidaan ottaa talteen esimerkiksi WtE-laitoksen pohjatuhkasta ja savukaasujen puhdistusmenetelmien jäämistä. Energian talteenotto perustuu usein yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon.

Yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttöä ohjaavat lisäksi erityisesti kaksi tekijää, jotka ovat nostaneet WtE-laitoksien kapasiteettia esimerkiksi Suomessa. [6] Ensimmäinen on Euroopan parlamentin ja neuvoston kaatopaikkadirektiivi, joka velvoittaa vähentämään kaatopaikoille sijoitettavan biohajoavan jätteen määrää 35 %:iin vuoden 1995 tasosta vuoteen 2016 mennessä [7]. Toiseksi Euroopan unionin tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 %:iin vuoden 1990 päästötasosta ja nostaa uusiutuvan energian määrää 20 %:iin tuotetusta kokonaismäärästä vuoteen 2020 mennessä. Yhdyskuntajätteen energiahyötykäytöstä syntyvän uusiutuvan energian määrä kuitenkin riippuu uusiutuvan jätejakeen osuudesta jätevirrassa. Keskimäärin uusiutuvan energian osuus yhdyskuntajättestä tuotetusta energiasta Euroopan maissa on ollut  $55\% \pm 9\%$  [6]. Tutkimukset ovat osoittaneet, että tehokas yhdyskuntajätteen uudelleenkäyttö, kierrätys, erilliskeräys ja lajittelu ovat nostaneet yhdyskuntajätteen muovijakeen osuutta ja laskenut orgaanisen jätejakeen sekä paperijakeen osuutta. Tämä on johtanut yhdyskuntajätteen lämpöarvon kasvamiseen ja toisaalta uusiutuvan energian osuuden vähenemiseen.

Yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön tekniset ratkaisut pohjautuvat parhaaseen käyttökelpoiseen tekniikkaan (*engl. Best Available Technique BAT*). BAT-tekniikka on määriteltä uuden ympäristösuojelulain mukaan [8] mahdollisimman tehokkaaksi ja kehittyneeksi, teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoiseksi tuotanto- ja puhdistusmenetelmäksi. BAT-tekniikkaa ovat myös toiminnan suunnittelu-, rakentamis-, ylläpito-, käyttö- ja lopettamistavat, joilla voidaan ehkäistä toiminnan aiheuttama ympäristön pilaantuminen tai tehokkaimmin vähentää sitä ja jotka soveltuvat ympäristölupamääräysten perustaksi. Tekniikka on silloin teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoista, kun se on saatavissa yleisesti käyttöön ja sitä voidaan soveltaa asianomaisella toimialalla kohtuullisin kustannuksin. Paras mahdollinen tekniikan taso määritellään vertailuasiakirjojen mukaan (*engl. Best Available Reference Document BREF*). [9] Jätteenpolton BREF-asiakirja on valmistunut vuonna 2006 ja uuden BREF-asiakirjan laadinta on käynnistynyt 2014 [10].

### 3 YHDYSKUNTAJÄTE ENERGIALÄHTEENÄ

Yhdyskuntajätteen sisältämästä energiasta voidaan WtE-laitoksella tuottaa sähköä, lämpöä tai biopolttoaineita. Tyypillisen WtE-laitoksen osaprosesseja ovat esikäsitely, konversioprosessi, energiantuotanto, materiaalin talteenotto ja savukaasujen puhdistus (kuva 3.1).



*Kuva 3.1. Tyypillinen WtE-laitos, jossa tuotetaan sähköä ja lämpöä [9].*

WtE-laitoksen prosesseista energiantuotantoon vaikuttavia ovat esikäsitely, konversioprosessi ja savukaasujen puhdistus. Esikäsitelyllä voidaan tehostaa konversioprosessia, jossa yhdyskuntajäte muutetaan esimerkiksi korkean lämpötilan omaaviksi savukaasuiksi tai lämpöarvon omaavaksi tuotekaasuksi. Savukaasuista voidaan ottaa talteen lämpöä, jolla esilämmitetään esimerkiksi polttoilmaa tai energiantuotannossa käytettäviä väliaineita, kuten vettä tai orgaanisia nesteitä. BREF-asiakirjan mukaan parasta käyttökelpoista tekniikkaa on valita WtE-laitoksella käytettävät prosessit käsiteltävän yhdyskuntajätteen ominaisuuksien mukaan [9].

#### 3.1 Yhdyskuntajätteen konversio-ominaisuudet

Yhdyskuntajätteen tärkeimpiä konversioprosesseihin liittyviä ominaisuuksia ovat korkea palavan aineksen prosenttiosuus ja matala kosteusprosentti [6]. Toisin sanoen yhdyskuntajätteen konversio-ominaisuudet paranevat, kun se sisältää runsaasti kuivia hyvin palavia jakeita, kuten paperia ja muovia ja vähemmän huonosti palavia jakeita, kuten biohajoavia

kosteita jätteitä, lasia ja metalleja. Yhdyskuntajätteelle on myös tyypillistä, että sen ominaisuudet vaihtelevat esimerkiksi tulotason mukaan (taulukko 3.1).

*Taulukko 3.1. Jätejakeet eri tulotason maissa [3].*

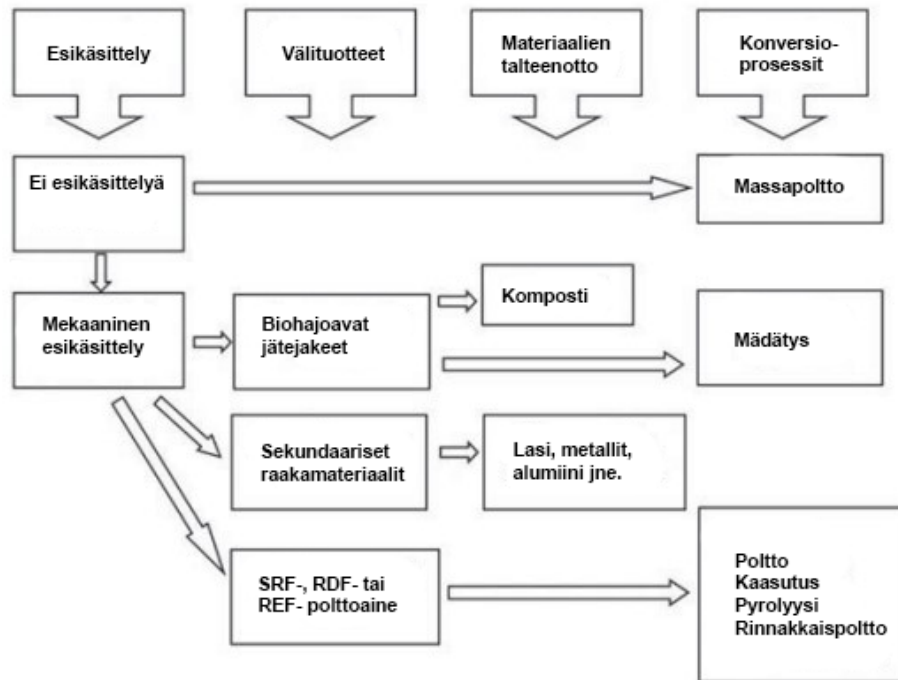
<b>Tulotaso</b>	<b>Orgaaninen (%)</b>	<b>Paperi (%)</b>	<b>Muovi (%)</b>	<b>Lasi (%)</b>	<b>Metalli (%)</b>	<b>Muu (%)</b>
Pieni	64	5	8	3	3	17
Alempi keski	59	9	12	3	2	15
Ylempi keski	54	14	11	5	3	13
Suuri	28	31	11	7	6	17

Suurituloisissa maissa syntyvä yhdyskuntajäte on konversio-ominaisuuksiltaan parempaa kuin pienituloisissa maissa syntyvä, koska orgaanisen jätteen osuus on pienempi ja paperin sekä muovin osuudet suurempia. Yhdyskuntajätteen ominaisuuksiin voidaan kuitenkin vaikuttaa esikäsittelemällä yhdyskuntajäte ennen konversioprosessia.

### **3.2 Yhdyskuntajätteen esikäsitteily ennen konversioprosessia**

Yhdyskuntajätteen esikäsitteilyn tarkoituksena on tehostaa konversioprosessin toimintaa. [11] Esikäsitteilyssä yhdyskuntajätteestä voidaan poistaa huonosti palavia jakeita sekä homogenisoida yhdyskuntajätettä sekoittamalla ja murskaamalla sitä pienemmäksi. Kosteat, biohajoavat keittiö- ja puutarhajätteet pienentävät polttoaineen tehollista lämpöarvoa, kasvattavat tarvittavaa polttoainevirtaa ja vaikuttavat polttoaineen käsittelylaitteiden ja kattilan mitoitukseen. Kosteat jätejakeet voidaan joko kompostoida mullaksi tai niistä voidaan tuottaa mädättämällä biokaasua. Muita poistettavia jätejakeita ovat palamattomat jakeet, kuten kivet, lasi, keraamit ja metallit. Ne eivät myöskään nosta yhdyskuntajätteen lämpöarvoa, koska kattilassa ne vain lämmitetään ja jäädytetään ilman, että prosessissa vapautuisi energiaa.

Yhdyskuntajätteen murskaaminen tehostaa konversioprosessia, koska polttoaineen reaktiopinta-ala on kääntäen verrannollinen palakokoon, eli pieni palakoko tehostaa ja nopeuttaa palamista. Lisäksi käytettäessä leijupetikattilaa tarvitaan pienen partikkelikoon omaavaa polttoainetta leijutustilan mahdollistamiseksi. Lisäksi yhdyskuntajätettä tiivistämällä voidaan esimerkiksi vähentää varastointitilan tarvetta ja helpottaa jätteen käsittelyä. Poikkeuksena on yhdyskuntajätteen massapoltto, jossa ainoastaan poistetaan suuret palamattomat kappaleet jätevirrasta, koska ne tukkisivat kuljettimia ja polttoaineen syöttöä sekä aiheuttaisivat polttoteknisiä ongelmia kattilassa (kuva 3.2). [11]



*Kuva 3.2. Yhdyskuntajätteen esikäsitely- ja konversioprosessit [12].*

Esikäsitellyllä yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan joko syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä tai laitoksella lajiteltua yhdyskuntajätettä. Tällöin yhdyskuntajätteestä käytetään nimitystä solid recovered fuel eli SRF-polttoaine, refuse derived fuel eli RDF-polttoaine tai recovered fuel eli REF-polttoaine. SRF-polttoaineella tarkoitetaan syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä, joka täyttää polttoaineelle asetetut laatuvaatimukset, kuten korkean lämpöarvon, tietyn partikkelikoon sekä tietyt raskasmetalli-, halogeeni- ja rikkipitoisuudet. RDF- tai REF-polttoaineella tarkoitetaan WtE-laitoksella mekaanisesti erotettua yhdyskuntajätejakeetta, joka myös täyttää polttoaineelle asetetut laatuvaatimukset. SRF- tai RDF-polttoaineita käytetään joko rinnakkain pieniä määriä esimerkiksi kivihiilen, puun tai turpeen kanssa tai sellaisenaan WtE-laitoksen konversioprosessissa. [13]

### 3.3 Yhdyskuntajätteen termokemialliset konversioprosessit

WtE-laitoksessa käytettäviä termokemiallisia konversioprosesseja ovat poltto, kaasutus ja pyrolyysi (taulukko 3.2).

**Taulukko 3.2.** Yhdyskuntajätteen konversioprosessien ominaisuudet [9][14].

	<b>Poltto</b>	<b>Kaasutus</b>	<b>Pyrolyysi</b>
Tavoite	Maksimoida jätteen konversio korkealämpöiseksi savukaasuiksi	Maksimoida jätteen konversio korkean lämpöarvon omaaviksi kaasuiksi	Maksimoida jätteen konversio korkean lämpöarvon omaaviksi kaasuksi, nesteeksi ja kiinteiksi tuotteiksi.
Olosuhteet	Yli-ilmaiset	Ali-ilmaiset	Ei läsnä hapettimia
Konversioprosessiin syötettävä kaasu	Ilma	Ilma, puhdas happi, happirikas ilma, höyry	Reagoimaton kaasu, esimerkiksi typpi
Lämpötila (°C)	800–1450	500–1600	250–700
Toivotut reaktiotuotteet	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ja muut hiilivedyt
Paine (bar)	1	1–45	1
Päästöt	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, PCDD/F, hiukkaset	H <sub>2</sub> S, HCl, COS, NH <sub>3</sub> , HCN, terva, epämetallit, hiukkaset	H <sub>2</sub> S, HCl, NH <sub>3</sub> , HCN, terva, hiukkaset
Tuhka	Pohjatuhkasta voidaan ottaa talteen metalleja ja sitä voidaan käyttää maarakennuksessa. Lentotuhka käsitellään ja hävitetään teollisena jätteenä.	Poltosta syntyy pohjatuhkaa, jota voidaan käyttää esimerkiksi teiden rakennuksessa.	Ei hiilipitoista tuhkaa. Käsitellään ja hävitetään teollisena jätteenä.
Konversioprosessin tuotteet	Savukaasut johdetaan piippuun energian talteenoton ja puhdistuksen jälkeen.	Tuotekaasu voidaan puhdistaa käytettäväksi joko energia-tuotannossa polttoaineena tai kemikaalituotannon raaka-aineena.	Tuotteet voidaan puhdistaa käytettäväksi joko energia-tuotannossa polttoaineena tai kemikaalituotannon raaka-aineena.

Yhdyskuntajätteen konversioprosesseista yleisin on poltto, johon perustuvia WtE-laitoksia on ollut olemassa 80-luvulta asti. Uusia konversioprosesseja ovat kaasutus ja pyrolyysi. Kaasutukseen perustuvia, käytössä olevia kaupallisia sovelluksia on olemassa, joista esimerkiksi Suomessa on toiminnassa Lahti Energian Kymijärvi II voimalaitos [15]. Uudet prosessit kiinnostavat, koska konversioprosessin tuotteita voidaan esimerkiksi jatkojalostaa joko biopolttoaineiksi tai kemikaalituotannon raaka-aineiksi, jolloin yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön mahdollisuudet laajenevat.

### 3.3.1 Poltto

Poltossa yhdyskuntajäte palaa yli-ilmaisissa olosuhteissa ja riittävän korkeassa lämpötilassa tuottaen korkeassa lämpötilassa olevia savukaasuja, joiden energiasisältö käytetään hyödyksi sähkön- ja lämmöntuotannossa. Yli-ilmaisilla poltto-olosuhteilla varmistetaan polttoprosessin puhtas palaminen ja sen vieminen loppuun. Polton lämpötilan tulee olla vähintään kahden sekunnin ajan yli 850 °C dioksiinien tuhoamiseksi [8], mutta ei kuitenkaan yli tuhkan sulamispisteen, koska sulanut tuhka likaa ja tuhoaa esimerkiksi kattilan lämmönsiirtopintoja. Poltosta syntyvän savukaasun pääkomponentit ovat hiilidioksidi CO<sub>2</sub> ja vesi H<sub>2</sub>O, mutta siinä syntyy myös epäpuhtauksia, kuten rikkidioksidia SO<sub>2</sub>, typen oksideja NO<sub>x</sub>, vetykloridia HCl, dioksiineja ja furaaneja PCDD/F sekä hiukkasia, jotka vaativat energiaintensiiviset ja kalliit savukaasujen puhdistusmenetelmät. [11]

Yleisesti polttoprosessi etenee kolmen vaiheen kautta. Ensimmäisenä polttoainepartikkelista poistuu kosteutta ja partikkeli kuivuu lämpötilaan 160 °C asti [14]. Yhdyskuntajätteen kosteusprosentti on suoraan verrannollinen sen sisältämään orgaaniseen jättejakeeseen, joka puolestaan on hyvin riippuvainen yhdyskunnan tulotasosta. Yhdyskuntajätteen kosteusprosentti on varsin korkea, jolloin suurin osa kattilan tulipesätilasta on varattava kosteuden poistamiseen. Kuivausajan tulisi kuitenkin olla lyhyt, koska kuivuminen laskee tulipesän keskimääräistä lämpötilaa ja alentaa konversioprosessin hyötysuhdetta. Kuivumista voidaan tehostaa jätteiden esikäsitteilyllä ja käyttämällä esimerkiksi savukaasuilla lämmitettyä ilmaa kuivaamiseen. Tulipesän geometrian suunnittelulla voidaan myös lyhentää kuivumisaikaa. [11]

Seuraavaksi pyrolyysivaiheessa muodostuu haihtuvia komponentteja eli palamiskelpoisia kaasuja ja hyvin palavia nestemäisiä terva-aineita, jos happea on riittävästi läsnä. Pyrolyysiä tapahtuu lämpötilaan 700 °C asti [14]. Lämpötilan noustessa haihtuvat komponentit syttyvät ja palavat liekillä, joka edelleen nostaa lämpötilaa. Yhdyskuntajätteessä olevien haihtuvien komponenttien määrä on suuri, joka täytyy ottaa huomioon tulipesän rakenteita suunniteltaessa. Lisäksi täytyy varmistaa palamisilman tehokas sekoittuminen palavien haihtuvien komponenttien kanssa. [11]

Viimeisessä vaiheessa jäännöshiili palaa ilman liekkiä, kun riittävästi lämpöä ja happea on läsnä. Hiilen palaminen on hidasta, joten se vaatii enemmän aikaa kuin pyrolyysivaihe. Siihen voidaan vaikuttaa nostamalla lämpötilatasoa tai murskaamalla yhdyskuntajätettä pienemmäksi esikäsitteilyvaiheessa. Lämpötilatason nosto voi johtaa tuhkan sulamiseen. Jäännöshiilen määrä on vähäinen yhdyskuntajätteessä johtuen suuresta haihtuvien komponenttien määrästä. [11]

Kaikki kolme vaihetta tapahtuvat yksittäisessä pienessä polttoainepartikkelissa peräkkäin, mutta suuressa partikkelissa voi pinnassa oleva hiili jo palaa, kun partikkelin ydin vasta kuivuu. Pieni partikkelikoko vähentää tätä ilmiötä. Pääosin yhdyskuntajätteen

poltto tapahtuu liikkuvalla eli mekaanisella arinalla, mutta myös muita kattilatyyppejä on olemassa. Vähäiselle yhdyskuntajättemäärälle voidaan käyttää kiinteää arinaa, SRF- ja RDF-polttoaineille ja lietteille leijupetikattilaa sekä kemiallisille jätteille ja ongelmajätteille rumpu-uuneja. [11]

### 3.3.2 Uudet konversioprosessit

Yhdyskuntajätteen polton kalliit kustannukset ja yhdyskuntajätteen kaatopaikkasijoituksen vähentäminen ovat lisänneet kiinnostusta uusia konversioprosesseja kohtaan. Uusista termokemiallisista konversioprosesseista eli kaasutuksesta ja pyrolyysistä saatavat tuotteet ovat kiinnostavia polttoaineita, koska esimerkiksi kaasua on helpompi käsitellä ja polttaa kuin kiinteää yhdyskuntajätettä. Lisäksi uusien konversioprosessien lämpötilaa, painetta ja reaktoritekniikkaa muuttamalla voidaan vaikuttaa saatavien tuotteiden ominaisuuksiin niin, että ne soveltuvat energialähteeksi esimerkiksi höyry- ja kaasuturbiinille tai polttomoottorille. Niitä voidaan käyttää myös biopolttoaineiden ja kemikaalien raaka-aineina. Kaasutuksen ja pyrolyysin matalampi lämpötila myös vähentää konversioprosessin päästöjä ja tuhkan sulamista. [14]

#### 3.3.2.1 Kaasutus

Kaasutus tarkoittaa yhdyskuntajätteen polttamista ali-ilmaisissa olosuhteissa eli hapetta ei ole saatavilla riittävää määrää, joka tarvittaisiin täydellisen palamisreaktion aikaansaamiseksi. Käytännössä joko osa yhdyskuntajätteestä poltetaan ja vapautuva lämpö kaasuttaa loput palamattomasta yhdyskuntajätteestä tai kaasutukseen tarvittava energia tuodaan prosessin ulkopuolelta. Kaasutuksen lopputuote on tuotekaasu eli synteetikaasu. Kaasutuksen päävaiheet mukailevat aluksi polton päävaiheita. Ensimmäiseksi jätepartikkeli kuivuu ja tämän jälkeen pyrolysoituu haihtuviksi komponenteiksi, tervaksi ja hiileksi. Lisäksi pelkistävässä olosuhteissa tapahtuu useita kemiallisia reaktioita, jossa tervat, hiilivedyt ja hiili hajoavat termisesti tuotekaasun pääkomponenteiksi. Tuotekaasun toivotut pääkomponentit ovat hiilimonoksidi CO, vety  $H_2$  ja metaani  $CH_4$  ja lisäksi se sisältää ei-toivottuja epäpuhtauksia, kuten rikki- ja klooriyhdisteitä (rikkivety  $H_2S$ , vetykloridi HCl, karbonyylisulfidi COS), ammoniakkia  $NH_3$ , vetysulfidia HCN sekä hiukkasia, tervaa ja alkalimetalleja. Tuotekaasun pääkomponenteilla on lämpöarvoa, jolloin se voidaan hyödyntää esimerkiksi sellaisenaan polttoaineena tai siitä voidaan jalostaa biokaasua tai muita polttoaineita. [14]

Kaasutuksen prosessityypit voidaan luokitella joko hapetuksessa käytettävän väliaineen tai käytettävän reaktorityypin perusteella. [14] Väliaineen mukaan luokitellut prosessityypit ovat yhdyskuntajätteen osittainen kaasuttaminen ilmalla, happirikkaalla ilmalla, puhtaalla hapella tai kokonaan kaasuttaminen höyryllä tai plasmalla. Reaktorityyppejä on kaksi. Lämpökaasuttimessa tuotettu tuotekaasu käytetään ensin energianlähteenä ja sen jälkeen savukaasut puhdistetaan. Voimakaasuttimessa tuotekaasu puhdistetaan ensin ja sen jälkeen käytetään energianlähteenä. Lämpökaasutin on yleisemmin käytetty reaktori-

tyyppi yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, jossa käytetään väliaineita kuten höyryä, ilmaa tai orgaanista nestettä. Tällöin tuotekaasu poltetaan kaasukattilassa, jossa syntyvistä kuumista savukaasuista otetaan energiaa talteen. Toisaalta voimakasuttimessa ensin puhdistettu tuotekaasu voidaan hyödyntää suoraan energiantuotannossa, jossa epäpuhtauksista on haittaa, kuten kaasuturbiineissa, polttomoottoreissa ja polttokennoissa. Lisäksi siitä voidaan jalostaa biopolttoaineita tai raaka-aineita kemikaalituotantoon. Käytettäviä reaktortyyppisiä ovat esimerkiksi kiintopeti-, leijupeti-, hiukkas-, rumpu-uuni- ja plasmakaasuttimet.

### 3.3.2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysissä yhdyskuntajäte hajotetaan inerteissä olosuhteissa, joissa ei käytetä ilmaa, happea tai höyryä reagoivana kaasuna. [14] Pyrolyysi mukailee polton ja kaasutuksen ensimmäisiä vaiheita, mutta pyrolyysissä haihtuvat komponentit ja jäännöshiili eivät pala, koska happea ei ole läsnä. Prosessiin tarvittava lämpö tuodaan systeemin ulkopuolelta ja pyrolyysin lämpötila on yleensä alhaisempi kuin poltossa ja kaasutuksessa. Tuotu lämpömäärä, lämpötila, viipymä kattilassa ja tuotteet riippuvat käytetystä pyrolyysitekniikasta (taulukko 3.3). Pyrolyysin tavoitteena on maksimoida hajoamistuotteiden, kuten hiilimonoksidin CO, vedyn H<sub>2</sub>, metaanin CH<sub>4</sub> ja hiilivetyjen saanto. [14]

*Taulukko 3.3. Pyrolyysitekniikat sekä niiden reaktio-olosuhteet ja päätuotteet [16].*

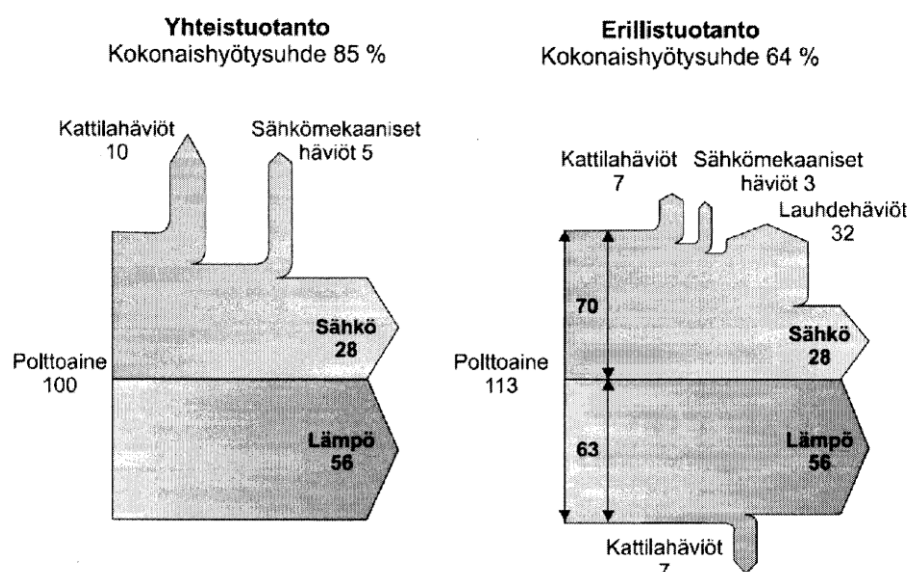
Teknologia	Viipymä	Lämpötila (°C)	Lämmöntuotintaste	Päätuotteet
Perinteinen hiillytys	tunteja-päiviä	300–500	Erittäin alhainen	Hiili
Paineistettu hiillytys	15 min–2h	450	Keskisuuri	Hiili
Hidas pyrolyysi	5–30 min	n. 600	Alhainen	Hiili, öljy, kaasu
Perinteinen pyrolyysi	tunteja	400–600	Alhainen	Hiili, öljy, kaasu
Perinteinen pyrolyysi	5–30 min	700–900	Keskisuuri	Hiili, kaasu
Nopea pyrolyysi	0,5–5 s	noin 650	Keskisuuri	Öljy
Nopea pyrolyysi	0,1–2 s	400–650	Korkea	Öljy
Välähdyspyrolyysi	Alle 1 s	650–900	Korkea	Öljy, kaasu
Ultrapyrolyysi	Alle 0,5 s	1000–3000	Erittäin korkea	Kaasu
Tyhjiöpyrolyysi	2–30 s	350–450	Keskisuuri	Öljy
Paineistettu vetypyrolyysi	Alle 10 s	Alle 500	Korkea	Öljy
Metanopyrolyysi	Alle 10 s	Yli 700		Öljyt, kemikaalit

Pyrolyysissä voidaan tuottaa kaasumaisia, nestemäisiä tai kiinteitä yhdisteitä, joita voidaan joko polttaa energiantuotantoa varten tai jalostaa edelleen biopolttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Lisäksi pyrolyysissä syntyy myös epäpuhtauksia, kuten vetysulfidia H<sub>2</sub>S, vetykloridia HCl, ammoniakkaa NH<sub>3</sub>, vetysyanidia HCN, tervaa ja hiukkasia, jotka voivat haitata jalostusprosesseja. [14] Pyrolyysissä käytettäviä kattilatekniikoita ovat esimerkiksi kiintopeti-, kerrosleiju-, hiukkas- ja rumpu-uunitekniikat [16].



## 4 YHDISTETTY SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANTO

WtE-laitoksen energiatuotannolla tarkoitetaan yleensä joko polton korkealämpöisten savukaasujen tai kaasutuksen lämpöarvon omaavan tuotekaasun hyödyntämistä yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa eli CHP-laitoksessa (*engl. Combined Heat and Power*). CHP-laitoksessa tuotetaan samasta energialähteestä sekä sähköä että lämpöä, joita hyödynnetään WtE-laitoksen omissa prosesseissa ja loput myydään asiakkaille. [17] Yhteistuotannon etuja ovat korkea kokonaishyötysuhde ja polttoaineen säästö (kuva 4.1).



**Kuva 4.1.** Energiavirrat sähkön ja lämmön yhteistuotannossa ja erillistuotannossa [18].

Kokonaishyötysuhde on korkeampi yhteistuotannossa kuin erillistuotannossa, koska CHP-laitoksen sähköntuotannossa syntyvät lauhdehäviöt hyödynnetään lämmöntuotannossa. Erillistuotannossa tämä energiamäärä menisi hukkaan. Lisäksi sama sähkö- ja lämpömäärä tuotetaan yhteistuotannossa vähemmällä polttoainemäärällä kuin erillistuotannossa, koska lauhdehäviöitä ei ole ja kattilahäviöt ovat pienemmät, kun polttoaine poltetaan vain yhdessä kattilassa kahden erillisen sijasta. [18] BREF-asiakirjan mukaan CHP-laitoksessa tuotettava energiamäärä tulee maksimoida. Sen täytyy olla vähintään 1,9 MWh hyödynnettyä yhdyskuntajätetonna kohden, kun yhdyskuntajätteen lämpöarvo on 10,4 MJ/kg [9].

CHP-laitoksen toiminnalle on tyypillistä, että laitoksen asiakkaat tarvitsevat säännöllisesti läpi vuoden sähköä ja lämpöä. [17] CHP-laitoksia suositetaan esimerkiksi kaupungeissa, joissa tarvitaan ympäri vuoden sähköä ja lämmintä vettä. Toisaalta suuren kokoluokan CHP-laitoksia käytetään myös energiaintensiivisessä teollisuudessa, kuten teräs- ja paperiteollisuudessa, joissa materiaalin jalostukseen tarvitaan sähköä ja lämpöä. CHP-

laitoksien energiatuotanto on hyvin paikallista, koska lämpöä ei voida siirtää pitkiä matkoja putkistossa tapahtuvien häviöiden vuoksi [19].

CHP-laitoksen energiantuotantojärjestelmä koostuu lämpövoimakoneesta sekä siihen liittyvästä lämmöntalteenotosta ja säätötekniikasta. [17] Lämpövoimakone muuntaa savu- kaasun tai tuotekaasun lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi esimerkiksi turbiinin tai moottorin avulla. Mekaanisesta energiasta tuotetaan sähköenergiaa generaattorin avulla. Kaupallisessa tai melkein täysin kaupallisessa käytössä olevia tekniikoita ovat höyryturbiini, kaasuturbiini, mäntähöyrykone, mikroturbiini, polttomoottorit, Stirling-moottori ja polttokennot. Orgaaninen Rankine kiertoprosessi (*engl. organic Rankine cycle ORC*) on kehitteillä oleva tekniikka, mutta muutamia siihen perustuvia CHP-laitoksia on jo toiminnassa (taulukko 4.1). [20]

**Taulukko 4.1.** Lämpövoimakoneiden ominaisuudet [20].

Lämpövoimakone	Koko (kW <sub>e</sub> )	Sähkön- tuotannon hyötysuhde (%)	Kokonaishyötysuhde (%)	Investointi- kustannukset (E/kW <sub>e</sub> )	Mahdolliset biopolttoaineet
Höyryturbiini	500–100 000	20–30	85–93	~1500	Kiinteä, neste, kaasu
Mäntähöyrykone	20–5 000	6–20	85–95	~1500	Kiinteä, neste, kaasu
Stirling-moottori	1–75	20–40	80–90	~3500	Kiinteä, neste, kaasu
ORC-kiertoprosessi	2–10 000	10–30	~85	~4500	Kiinteä, neste, kaasu
Kaasuturbiini	100–200 000	24–40	80–85	840–1200	Kaasu, etanoli, metanoli
Micro-kaasuturbiini	25–500	11–33	70–90	800–1700	Etanoli, metanoli, pyrolyysiöljy, biokaasu
Polttomoottorit					
Otto	2–2 000	25–40	80–90	800–1300	Etanoli, metanoli,
Diesel	50–50 000	40–45	85–90	1200–1800	pyrolyysiöljy, ja biokaasu
Polttokennot					
PAFC	200–1000	40–45	~90	~3000	Vety, metanoli
MCFC	200–5 000	50–60	-		Vety
SOFC	5–10 000	45–60	~80	1000–1500	Vety
PEFC	1–250	35–40	-	~3000	Vety, metanoli

Lämpövoimakoneen koko, sähköntuotannon hyötysuhde, kokonaishyötysuhde, investointikustannukset ja mahdolliset käytettävät biopolttoaineet vaihtelevat eri tekniikoiden

välillä. Polttoaineen laadulla on suuri merkitys lämpövoimakoneen käytössä, ja yhdyskuntajäte joudutaan jalostamaan kaasutuksen tai pyrolyysin avulla biopolttoaineeksi esimerkiksi kaasuturbiinia, polttomoottoreita ja polttokennoja käytettäessä. [20] Lämpövoimakoneet voidaan lajitella esimerkiksi koon tai konversioprosessien mukaan. Koon mukaan lajiteltaessa pienen kokoluokan eli mikro-CHP-laitoksiin luetaan laitokset, joiden lämpövoimakoneiden sähköteho on alle 50 kW<sub>e</sub> [21]. Konversioprosessin mukaan lajiteltaessa lämpövoimakoneet jaetaan polttoon ja kaasutukseen perustuviin. Pelkästään pyrolyysiin perustuvia lämpövoimakoneita ei ole olemassa, mutta pyrolyysin tuotteita voidaan polttaa sähkön ja lämmön tuottamiseksi. [17]

## 4.1 Polttoon perustuvat lämpövoimakoneet

CHP-laitoksissa käytettäviä polttoon perustuvia lämpövoimakoneita ovat höyryturbiini, mäntähöyrykone, ORC-kiertoprosessi ja Stirling-moottori. [17] Näissä kuumien savukaasujen energialla voidaan joko höyrystää vettä tai orgaanista nestettä tai kuumentaa ilmaa ja muita kaasuja. Poltettavan yhdyskuntajätteen keskimääräinen lämpöarvo on 8–12 MJ/kg eli noin kolmannes hiilen lämpöarvosta [12] ja yhdellä tonnilla yhdyskuntajätettä voidaan tuottaa noin 2 MWh lämpöä ja 0,66 MWh sähköä [22].

### 4.1.1 Höyryturbiini

Höyryturbiini on yleisin lämpövoimakone polttoon perustuvissa CHP-laitoksissa. Se perustuu Rankine-kiertoprosessiin, jolla tuotetaan noin 90 % kaikesta maailmassa tuotetusta sähköstä [22]. Sähköntuotannon nettohyötysuhde höyryturbiinilla varustetuissa WtE-laitoksissa on noin 25 % ja lämmöntuotannon noin 55 % [22]. Kokonaishyötysuhde on yhteensä noin 80 %, joka on alhaisempi kuin esimerkiksi hiilen polttoon perustuvissa CHP-laitoksissa. Suurin syy alhaisempaan hyötysuhteeseen on tuorehöyryn alhaisemmat arvot WtE-laitoksissa kuin hiilen polttoon perustuvissa CHP-laitoksissa. Tuorehöyryn eli tulistimien jälkeisen höyryn arvot WtE-laitoksissa ovat vakiintuneet lukemiin 40–45 bar ja 400–450 °C lämmönsiirtopintojen korroosio-ongelmien ja materiaalien kestävyysvuoksi [11] Tyypilliset tuorehöyryn arvot hiilen polttoon perustuvassa CHP-laitoksessa ovat esimerkiksi 142 bar ja 540 °C [24].

Höyryturbiini on ainoa lämpövoimakone, jota käytetään yleisesti yhdyskuntajätteen polttoon perustuvissa CHP-laitoksissa. Lisää tutkimusta tarvitaan kuitenkin uusien korroosiota kestävien tulistinmateriaalien kehittämisessä ja sähköntuotannon hyötysuhteen nostamisessa. [20] Uudet materiaalit voivat nostaa tuorehöyryn arvoja perinteisistä 40 bar/400 °C arvoista esimerkiksi arvoihin 125 bar/440 °C tai 90 bar/420 °C. [23] Arvojen nostaminen kasvattaa myös sähköntuotannon hyötysuhdetta. Muut polttoon perustuvat lämpövoimakoneet soveltuvat paremmin pienempien CHP-laitosten käyttöön, koska höyryturbiinin käyttö pienissä CHP-laitoksissa nostaa sen investointikustannuksia ja laskee sen tuottavuutta. Mikro-CHP-laitoksiin soveltuvien lämpövoimakoneiden kehittämisellä

pyritään lisäämään hajautettua energiantuotantoa, jossa vähennetään riippuvuutta isoista keskitetyistä voimalaitoksista. [17]

#### **4.1.2 Mäntähöyrykone**

Mäntähöyrykone toimii myös Rankine-kiertoon perustuen, mutta siinä turbiini on korvattu moottorilla. Mäntähöyrykoneen suurin hyöty on, että se pystyy käyttämään samoja polttoaineita kuin höyryturbiini. Haittapuolena on alhainen lämmönkestävyys, joka estää korkean lämpötilan omaavan höyryn käytön moottorissa. Korkeasta lämpötilasta aiheutuu ongelmia esimerkiksi voitelujärjestelmissä. Tästä syystä mäntähöyrykoneen sähkötuoannon hyötysuhde on matala. Lisäksi kone on hyvin äänekäs ja vaatii jatkuvaa huoltoa. Nykyään moottori on usein korvattu esimerkiksi höyryturbiinilla tai polttomoottorilla taloudellisista syistä. [20]

#### **4.1.3 ORC-kiertoprosessi**

ORC-kiertoprosessin toimintaperiaate on samanlainen kuin perinteisellä höyryturbiinilla, mutta väliaineena kierrossa ei käytetä vettä, vaan orgaanista nestettä, kuten esimerkiksi jäähdytysaineita ja hiilivetyjä. Näillä nesteillä on matalampi kiehumispiste kuin vedellä, jolloin ORC-kierrolla voidaan tuottaa sähköä esimerkiksi diesel-moottoreissa ja kaasuturbiineissa syntyvästä matalasta hukkalämmöstä. [20] Alhainen käyttölämpötila vähentää myös korroosioriskejä esimerkiksi kattilan lämmönsiirtopinnoilla. [17]

ORC-kiertoprosessin haittapuolia ovat kalliit orgaaniset nesteet, joiden häviöt voivat aiheuttaa suuria kuluja. Lisäksi jotkut nesteet, kuten tolueeni, ovat ympäristölle vaarallisia, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia esimerkiksi turvallisuuden ja nesteiden käsittelyjärjestelmien osalta. ORC-kiertoprosessin käytön yleistyminen CHP-tuotannossa vaatii myös lisää kehitys- ja tutkimustyötä, vaikka muutamia kaupallisia laitoksia onkin käytössä [20].

#### **4.1.4 Stirling-moottori**

Stirling-moottori on ulkoinen polttomoottori, jonka toiminnan teoriana on Carnot'n kierto. Polttoaineen palaminen tapahtuu Stirling-moottorin ulkopuolella, joka mahdollistaa monenlaisten polttoaineiden käytön energialähteenä. Kiinteän yhdyskuntajätteen polttaminen voi kuitenkin aiheuttaa esimerkiksi korroosio-ongelmia lämmönsiirtopinnoilla. Puhdistetun tuotekaasun käyttö vähentää korroosiota ja myös palamisprosessia pystytään paremmin hallitsemaan. Väliaineena moottorissa voi toimia joko ilma, helium, typpi tai vety. [20]

Stirling-moottorin hyviä puolia ovat esimerkiksi alhaiset päästö-, tärinä- ja melutasot sekä korkea kokonaishyötysuhde. Lisäksi sähkön- ja lämmöntuotanto ovat riippumattomia toisistaan ja moottorin toimintaa on helppo säätää. Haittapuolia ovat esimerkiksi kallis hinta ja moottorin lämmönsiirtopintojen likaantuminen. [20]

## 4.2 Kaasutukseen perustuvat lämpövoimakoneet

Kaasutukseen perustuvia lämpövoimakoneita ovat kaasuturbiini, mikrokaasuturbiini, polttomoottori ja polttokennot. Niissä käytettävän tuotekaasun lämpöarvo riippuu käytetystä kaasutustekniikasta. [14] Yhdyskuntajätteen osittainen polttaminen ilmalla tuottaa lämpöarvoltaan 4–7 MJ/m<sup>3</sup>n olevaa tuotekaasua, joka on liian alhainen hyödynnettäväksi kaasuturbiinissa. Puhtaalla hapella kaasutettaessa lämpöarvo on korkeampi kuin ilmalla kaasutettaessa (10–15 MJ/m<sup>3</sup>n), mutta puhtaan hapen tuottaminen on kuitenkin erittäin kallista. Yhdyskuntajätteen kaasuttaminen höyryllä tuottaa korkean vetypitoisuuden ja matalan typpipitoisuuden tuotekaasuun, joka nostaa lämpöarvoa 15–20 MJ/m<sup>3</sup>n. Tällöin tarvitaan kuitenkin paljon ulkopuolista energiaa, koska vesihöyryllä kaasuttaminen on energiaa sitovaa. Paras ratkaisu on kaasuttaa yhdyskuntajäte plasmalla. Kaasutuksen lämmönlähteenä toimii yksi tai useampi plasmakaaripoltin, jotka tuottavat sähkövalokaaria ja jopa 15 000 °C plasmakaasua. Korkea lämpötila sallii vaihtelut yhdyskuntajätteen laadussa ja reagoivassa kaasussa. Plasmakaasutuksella saatavan tuotekaasun lämpöarvo on 10–14 MJ/m<sup>3</sup>n. Puhtaan maakaasun lämpöarvo on 38 MJ/m<sup>3</sup>n, joka on huomattavasti korkeampi kuin tuotekaasun lämpöarvo. Yhdyskuntajätteen kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu on puhdistettava epäpuhtauksista ennen kuin se voidaan hyödyntää kaasutukseen perustuvissa lämpövoimakoneissa. [17] Tuotekaasun puhdistus ja jalostus on kuitenkin hyvin kallista ja energiaintensiivistä, jolloin vaihtoehtoina ovat tuotekaasun polttaminen esimerkiksi rinnakkaispolttolaitoksessa ja maakaasun käyttäminen kaasutukseen perustuvissa lämpövoimakoneissa, kunnes tuotekaasun käyttö on taloudellisesti kannattavaa.

### 4.2.1 Tuotekaasun puhdistus

Kaasutuksessa syntyviä tuotekaasun epäpuhtauksia ovat esimerkiksi H<sub>2</sub>S, HCl, COS, NH<sub>3</sub>, HCN, terva, metallisuolat ja hiukkaset. Näiden poistamiseksi voidaan käyttää monenlaisia tekniikoita. [25] Tekniikat voidaan jakaa kuumiin, kylmiin tai lämpimiin puhdistusmenetelmiin puhdistuksen lämpötilan mukaan. Kuumat menetelmät perustuvat esimerkiksi syklonien, suodattimien ja plasman käyttöön lämpötilan ollessa yli 300 °C. Kylmät menetelmät perustuvat tuotekaasuun ruiskutettavaan veteen, jolloin epäpuhtaudet absorboituvat vesipisaroihin tai toimivat tiivistymispaikkoina vesihöyrylle. Lämpimät menetelmät toimivat yli veden kiehumispisteen lämpötilassa, mutta alempana kuin kuumat menetelmät. Tällöin vesihöyry ei pääse tiivistymään, mutta jotkut tervat, metallisuolat ja kloridit tiivistyvät ja ne voidaan poistaa tuotekaasusta. Tuotekaasun laatu vaikuttaa lämpövoimakoneiden toimivuuteen ja jokaiselle koneelle onkin omat tuotekaasun laatu- ja puhtausvaatimukset [17].

### 4.2.2 Kaasu- ja mikrokaasuturbiini

Tuotekaasu poltetaan kaasuturbiiniin kytketyssä polttokammiossa ja kaasuturbiinista poistuvista kuumista savukaasuista otetaan talteen energiaa lämmöntalteenottokattilassa,

jonka toiminta perustuu Rankine-kiertoon ja höyryturbiinin käyttöön. Tämänlaista laitosta kutsutaan biokaasukombivoimalaitokseksi. Yleisimmin kuitenkin WtE-laitoksessa käytetään maakaasua tuotekaasun sijaan, jolloin puhutaan kaasukombivoimalaitoksista (IGCC). Kaasuturbiinien haittapuolia ovat esimerkiksi korkeat melutasot ja pitkät huoltotauot. Hyviä puolia ovat esimerkiksi pieni koko, lyhyet käynnistysajat ja korkeat hyötysuhteet. [20] IGCC-laitoksista on tullut kehityksen myötä yksi suosituimmista vaihtoehdoista nostaa WtE-laitoksen energiatuotannon tehokkuutta. [17]

Mikrokaasuturbiinien energiatuotannossa ei hyödynnetä höyryturbiinia, mutta sen energiatehokkuutta voidaan nostaa esimerkiksi esilämmittämällä palamisilmaa savukaasujen avulla. Mikroturbiineilla on alhaiset päästö- ja tärinätasot ja korkea tehokkuus osakuormilla. Lisäksi ne ovat modulaarisia, joka lisää niiden käyttömahdollisuuksia esimerkiksi hajautetun energiatuotannon mallissa. Haittapuolina ovat korkeat polttoaineen laatuvaatimukset, jotka lisäävät kustannuksia polttoaineen käsittelyn osalta. [20]

### 4.2.3 Polttomoottorit

Polttomoottorit ovat hyvin yleisiä sähkön- ja lämmöntuotannon pienissä yksiköissä. Niiden tekniikka on hyvin tunnettua, kestävä ja luotettava, mutta ne vaativat paljon huoltotöitä. Polttomoottorit voidaan jakaa Otto- ja Diesel-moottoreihin. Niiden tekniikkaa kehitetään edelleen paremman hyötysuhteen ja ympäristöystävällisyyden saavuttamiseksi. Moottorien hyviä puolia ovat lyhyet käynnistysajat, pitkä käyttöikä ja korkea tehokkuus myös osakuormilla toimittaessa. Haittapuolia ovat esimerkiksi korkeat melutasot ja huoltokustannukset. [20] CHP-tuotannon lisäksi polttomoottoreita voidaan käyttää hätä- ja varavoimaloina esimerkiksi sähkön suurkäytön aikaan talvella. [17]

### 4.2.4 Polttokennot

CHP-laitoksessa käytettäviä polttokennoja ovat fosforihappokenno (*engl. phosphorus acid fuel cell PAFC*), kiinteäoksidikeno (*engl. solid oxide fuel cell, SOFC*), sulakarbonaattikeno (*engl. molten carbonate fuel cell MCFC*) ja polymeerielektrolyyttikeno (*polymer electrolyte fuel cell, PEFC*). Polttokennoilla on korkea sähköntuotannon hyötysuhde pienissä yksiköissä, jonka vuoksi niitä voidaan käyttää hajautetun energiatuotannon mallissa. Muita hyviä puolia ovat esimerkiksi alhainen huoltotarve, sopeutuvuus nopeisiin kuormituksen muutoksiin ja korkea automaatioaste. Haittapuolia ovat esimerkiksi korkeat polttoaineen laatuvaatimukset, korkeat materiaali- ja valmistuskustannukset sekä korkeat investointikustannukset. [20]

### 4.3 Yhteenveto lämpövoimakoneista

CHP-laitoksen lämpövoimakonetta valittaessa tulee huomioida esimerkiksi niiden hyötysuhteet ja niissä käytettävät polttoaineet (taulukko 4.1). Lisäksi tulee ottaa huomioon jokaisen lämpövoimakoneen hyvät ja huonot puolet (taulukko 4.2).

*Taulukko 4.2. Lämpövoimakoneiden hyvät ja huonot ominaisuudet.*

Lämpövoimakone	Hyvät ominaisuudet	Huonot ominaisuudet
Höyryturbiini	+ yleisesti käytössä + suhteellisen korkea hyötysuhde	- tuorehöyry vaatii korkeat arvot, jotta turbiinin rakentaminen on taloudellisesti kannattavaa
Mäntähöyrykone	+ Samat polttoaineet kuin höyryturbiinilla	- matala sähköntuotannon hyötysuhde - äänekkyys, korkea huoltotarve
ORC-kierto	+ hukkalämmönlähteiden hyödyntäminen + pienemmät korroosioriskit	- kalliit orgaaniset nesteet - lisäkustannukset nesteiden ympäristövaarallisuuden vuoksi - tarvitsee lisää tutkimus- ja kehitystyötä.
Stirling-moottori	+ matalat päästö-, värinä- ja melutasot + korkea hyötysuhde + laaja polttoainevalikoima	- kallis hinta - lämmönsiirtopintojen likaantuminen
Kaasuturbiini	+ yleisesti käytössä + korkea hyötysuhde + nopea käynnistys + pieni koko	- tuotekaasun puhdistus on kallista ja energiantensiivistä - korkea melutaso, pitkät huoltotaumat
Mikroturbiini	+ alhaiset päästö- ja värinätasot + korkea tehokkuus osakuormilla + modulaarisuus	- tuotekaasun puhdistus on kallista ja energiantensiivistä
Polttomoottorit	+ yleisesti käytössä + nopea käynnistys + pitkä käyttöikä + vara- ja hätävoimala käyttö	- korkea melutaso - korkeat huoltokustannukset - tuotekaasun puhdistus on kallista ja energiantensiivistä
Polttokennot	+ korkea hyötysuhde + alhainen huoltotarve	- korkeat kustannukset - korkeat polttoaineen laatuvaatimukset

Yleisin WtE-laitoksen energiatuotannossa käytettävä lämpövoimakone on höyryturbiini. Lisäksi usein käytetään myös kaasuturbiineita sekä polttomoottoreita, mutta niiden energialähteenä käytetään maakaasua tuotekaasun sijasta. [20] Höyryturbiinilla on suhteellisen korkea hyötysuhde, mutta se soveltuu pienen kokoluokan laitoksiin huonosti. Kaasuturbiinilla on myös korkea hyötysuhde, mutta sen kannattavuus laskee esimerkiksi kalliiden tuotekaasun puhdistusmenetelmien vuoksi. Polttomoottoreita käytetään usein vara- ja hätävoimaloina, mutta sen kannattavuus laskee myös korkeiden tuotekaasun puhdistusmenetelmien ja moottoreiden huoltokustannuksien vuoksi.

Vähemmän käytössä olevia lämpövoimakoneita ovat mäntähöyrykone, ORC-kiertoprosessi, Stirling-moottori, mikroturbiini ja polttokennot. Syinä vähäkäyttöisyyteen ovat esimerkiksi korkeat investointikustannukset, polttoaineen korkeat laatuvaatimukset tai tekniikan huono soveltuvuus CHP-laitoksiin. Useiden pienten lämpövoimakoneiden, kuten mikroturbiinin, polttokennojen ja Stirling-moottorien, käyttö voi kuitenkin tulevaisuudessa yleistyä, kun siirrytään keskitetystä energiatuotantomallista hajautettuun malliin.

Näiden kaupallisessa käytössä olevien lämpövoimakoneiden lisäksi on myös tutkimus- ja kehitystyön alla olevia uusia lämpövoimakoneita, jotka voisivat soveltua WtE-laitoksien käyttöön. [20] Niitä ovat esimerkiksi ilmakombivoimalaitos (*engl. air bottoming cycle ABC*), kostea ilmaturbiini (*engl. humid air turbine HAT*), kuumailmaturbiini (*engl. externally fired gas turbine EFGT*) ja lämpöionikonvertteri (*engl. thermoionic converter*). ABC-tekniikan erikoisuutena on, että kaasuturbiinista poistuvista savukaasuista otetaan energiaa talteen ilmakiertoon, joka mahdollistaa esimerkiksi lämpimän prosessi-ilman tuottamisen lämmitystä tai kuivausta varten. Kostean ilmaturbiinin erikoisuus on veden lisäys kiertoon ennen polttoa, jolloin on mahdollista tuottaa höyryä kaasuturbiinin tekniikalla ilman erillistä höyrykiertoa. Kuumailmaturbiinissa polttokammio on korvattu lämmönvaihtimella, jolla voidaan ottaa talteen energiaa kattilasta. Näiden tekniikoiden kaupallistumiseen vaaditaan esimerkiksi korkean lämpötilan kestävien materiaalien kehitystä ja laitoksien kustannuksien alentamista.



## 5 YHDYSKUNTAJÄTTEEN ENERGIAHYÖTYKÄYTÖN TULEVAISUUS

WtE-laitoksissa tuotettu energiamäärä on vielä vähäinen, vaikka laitoksia ajetaan koko ajan täydellä teholla. Syitä alhaiseen energiamäärään ovat yhdyskuntajätteen korkea hinta, hankala varastointi ja WtE-laitosten korkeat investointikustannukset. Lisäksi hiilen hinta on alhainen ja CO<sub>2</sub>-päästöjen hinta päästökaupassa on korkea. [26] Myös poliittiset ja ympäristön suojeluun kohdistuvat paineet ovat estäneet WtE-laitoksien perustamisen erityisesti Yhdysvalloissa. Siellä WtE-laitoksien maine on kuitenkin parantumassa ja niiden rakentaminen on lisääntymässä, koska WtE-laitokset on tunnustettu bioenergialaitoksiksi, jos niissä maksimoidaan yhdyskuntajätteen energiahyötykäyttö. [27]

### 5.1 Bioenergian rooli

Yleisesti bioenergian rooli on tulevaisuudessa merkittävä, mikäli fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiotaan luopua vuoteen 2100 mennessä. [28] Lisäksi mahdollinen luopuminen ydinvoimasta lisää uudenlaisen, joustavan ja kysyntään perustuvan bioenergiajärjestelmän tarvetta. Tämä näkyy esimerkiksi Saksassa, jossa maan energiatuotannon halutaan perustuvan aurinko- ja tuulienergiaan. Näillä tuotettaisiin sähköä ja lämpöä niin paljon kuin mahdollista ja bioenergialla tuotettaisiin loput. Tällöin bioenergia toimisi säätövoimana, koska aurinko- ja tuulienergian tuotannot ovat esimerkiksi voimakkaasti säästä riippuvaisia ja toisaalta energian kysyntä ja tuotanto vaihtelevat niin vuorokausi-, kuin vuositasolla. Muutos vaatii kuitenkin energiatuotantojärjestelmän radikaalia muokkaamista esimerkiksi lainsäädännön, talouden, organisaatioiden ja teknisten ratkaisujen osalta. [29]

Tuotettu kokonaisenergiamäärä vähenee, kun tuotantoa siirretään kysynnän mukaiseksi eikä laitoksia ajeta enää täydellä teholla kokoaikaisesti. Lisäksi rakennusten kasvanut energiatehokkuus on esimerkiksi vähentänyt lämmityksen tarvetta, jolloin yhä suurempi osa lämmöstä jäähdytetään jäähdytystornissa jos kaukolämpöverkoston ei voida varastoida enempää lämpöä. Lämmöntuotannon vähentyessä vähenee myös sähköntuotanto, jolloin tarvitaan lisää CHP-kapasiteettia riittävän sähköntuotannon varmistamiseksi. Jotta vältetään lämmön tai sähkön liiallinen tuottaminen, täytyy joustavuutta tuoda energian varastointiin esimerkiksi kehittämällä polttoaineen varastointitekniologiaa tai kasvattamalla sähkö- ja kaukolämpöverkkojen kapasiteettia sitoa itseensä energiaa. [29]

## 5.2 Yhdyskuntajäte energialähteenä

Yhdyskuntajätteen massapoltto arinakattilassa on edelleen merkittävässä roolissa tulevaisuudessa, koska sen energiatehokkuuteen ja ympäristöystävällisyyteen on käytetty paljon resursseja. Lisäksi RDF:n ja tuotekaasun käytön kehittämiseen on käytetty paljon resursseja. RDF-polttoainetta on suositeltavaa polttaa rinnakkain kivihiilen kanssa tai kaasuttaa tuotekaasuksi. Tuotekaasu käytetään joko polttoaineeksi tai jalostaa edelleen biokaasuksi. Vanhojen kivihiiivoimaloiden päivittäminen RDF-polttoainetta käyttäviksi on yleistynyt esimerkiksi Tanskassa. Kaasutusteknologioiden ja tuotekaasun jatkojalostuksen kehittyessä yhä suurempi osuus RDF-polttoaineesta on suositeltavaa jalostaa biokaasuksi, koska sillä on pienemmät ympäristövaikutukset kuin RDF:n rinnakkaispoltolla. Tällöin on myös tarkasteltava, että RDF-polttoainetta on tarjoilla riittävästi ja sen poistaminen yhdyskuntajätevirrasta ei vähennä jo olemassa olevien WtE-laitoksien tehokkuutta. Yhdyskuntajätteen orgaaninen jätejäte suositellaan mädättäväksi yhdessä lannan kanssa, mikäli käsittelemätöntä lantaa ja orgaanista jätejätettä on riittävästi saatavilla ja polttoainekustannukset ovat alhaiset. Mädätyksen avulla tuotettu biokaasu joko poltetaan kaasukombivoimalaitoksessa tai se jatkojalostetaan liikennepolttoaineeksi riippuen CO<sub>2</sub>-päästöjen hinnasta päästökaupassa. Alhaisilla CO<sub>2</sub>-hinnoilla on kannattavampaa jatkojalostaa biokaasu liikennepolttoaineeksi, koska se tuottaa vähemmän CO<sub>2</sub>-päästöjä kuin biokaasun polttaminen. [26]

Biopolttoaineiden jalostaminen yhdyskuntajätteestä kasvattaa energiatuotannon joustavuutta ja mahdollistaa voimalaitosten ajotapojen muuttamisen kysyntäperusteisiksi, jolloin varastoja tarvitaan enemmän. [26] Yhdyskuntajätettä voidaan varastoida kiinteänä, nestemäisenä ja kaasumaisena polttoaineena. Kiinteän yhdyskuntajätteen varastointi on teknisesti helppoa, koska siihen ei tarvita esimerkiksi paineenalaisia säiliöitä tai pumppuja. Ongelmina on kuitenkin yhdyskuntajätteen hajoaminen varastoinnin aikana ja kiinteän polttoaineen hankala käyttö esimerkiksi vara- ja käynnistyspolttoaineena. Yhdyskuntajätteen kaasutuksen ja pyrolysoinnin tuotteet ovat vakaampia varastoida eli esimerkiksi biohiili hajoaa hitaammin kuin käsittelemätön yhdyskuntajäte. Nestemäiset ja kaasumaiset biopolttoaineet ovat nopeita ottaa käyttöön CHP-laitoksissa esimerkiksi varatai käynnistyspolttoaineina, koska ne syttyvät nopeasti ja palavat puhtaasti. Kaasumaisista biopolttoaineista varsinkin tuotekaasulla on merkittävä rooli tulevaisuudessa, kun se jalostetaan biometaaniksi ja syötetään joko kaasuverkostoon tai käytetään paikallisesti energiantuotannossa. Kaasun varastointi ja kuljettaminen on kuitenkin teknisesti haastavaa. [29]

### 5.3 Lämpövoimakoneet

Sähkötehoalueella 1–20 MW<sub>e</sub> mahdollisia käytettäviä lämpövoimakoneita ovat perinteinen höyryturbiini, kaasuturbiini yhdistettynä höyryturbiiniin, ilmakombivoimalaitos, polttomoottorit sekä SOFC- ja MCFC-polttokennot. Näistä ainoastaan höyryturbiinin energialähteenä voidaan käyttää yhdyskuntajätettä sellaisenaan tai jalostettuna biopolttoaineeksi. Muiden lämpövoimakoneiden käyttö vaatii yhdyskuntajätteen jalostamista biopolttoaineeksi. Pienemmistä lämpövoimakoneista (50–1000kW<sub>e</sub>) lupaavimmat teknologiat ovat mikroturbiini, Stirling-moottori, polttomoottorit ja polttokennot. Niiden käytön vaatimuksena on, että yhdyskuntajätteestä jalostetut biopolttoaineet täyttävät lämpövoimakoneille asetetut laatuvaatimukset. Jos käytetään kiinteää biopolttoainetta, niin lupaavin pienemmistä lämpövoimakoneista on Stirling-moottori. Nestemäisiä biopolttoaineita käytettäessä voidaan hyödyntää PEFC-polttokennoa, mikroturbiineja ja polttomoottoreita. Kaasumaisille biopolttoaineille voidaan puolestaan käyttää kaikkia aiemmin mainittuja lämpövoimakoneita. [20]

Uusien lämpövoimakoneiden käyttöönotto kuitenkin vaatii, että markkinaolosuhteet ovat kunnossa. Sähkön hinnan alhaisuus ja korkeat investointikustannukset eivät suosi uusien teknologioiden käyttöönottoa. Lisäksi niiden on pystyttävä kilpailemaan isompien lämpövoimakoneiden kanssa esimerkiksi taloudellisuuden ja alhaisten päästöjen osalta. Eräs mahdollisuus uusien lämpövoimakoneiden käyttöönottoon on hajautetun energiatuotannonmalli. Se suosii pieniä lämpövoimakoneita, joita on suurin osa vähemmän kaupallisessa käytössä olevista. Hajautetussa energiatuotantomallissa pienet kaupunginosat tai yksittäiset asunnot voivat olla omavaraisia niin sähkön, kuin lämmön suhteen. Lisäksi energiantuotanto on lähellä kuluttajaa, jolloin häviöt esimerkiksi sähkön- ja lämmönsiirrossa vähenevät ja pienten yksiköiden kannattavuus nousee. Toinen mahdollisuus on teollisuusyritykset, jotka haluaisivat tuottaa käyttämänsä energian itse varsinkin, kun he tuottavat polttoainetta itse esimerkiksi tuotannon sivuvirran kautta. [20] Pienet CHP-laitokset on myös tunnustettu keinoksi vähentää energiatuotannon CO<sub>2</sub>-päästöjä, mikä edistää niiden käyttöä siirryttäessä kestävämpään energiatuotantoon. [21]

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yhdyskuntajätteen käyttö energiatuotannossa on haastavaa. Yhdyskuntajätteellä on matala lämpöarvo ja vaihtelevat konversio-ominaisuudet, jotka vaikuttavat esimerkiksi kattiloiden suunnitteluun ja polttoprosessin hallittavuuteen. Erityisiä haasteita ovat korroosio-ongelmat kattiloiden lämmönsiirtopinnoilla ja kalliit savukaasujen puhdistusmenetelmät. Lisäksi yhdyskuntajätettä on hankalaa varastoida ja WtE-laitoksilla on korkeat investointikustannukset, jotka aiheuttavat sen, että WtE-laitoksia ajetaan koko ajan täydellä teholla.

WtE-laitoksissa tuotettu energiamäärä tulee todennäköisesti tulevaisuudessa kasvamaan, kun syntyvän yhdyskuntajätteen määrä kasvaa ja bioenergia yleistyy energiatuotantomuotona. Toisaalta jätehierarkia vähentää syntyvän yhdyskuntajätteen määrää tehostamalla eri jakeiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Lisäksi bioenergian osalta merkittävämpiä tuotantomuotoja ovat aurinko- ja tuulivoima ja energiankulutuksessa pyritään energiatehokkuuteen, jolloin WtE-laitoksissa tuotettu energiamäärä ei välttämättä kasva. Teknologian kehittyminen voi kuitenkin muuttaa energiantuotantomuotoja, jolloin yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön mahdollisuudet laajenevat, kun uudet konversioprosessit ja lämpövoimakoneet yleistyvät.

Yhdyskuntajätteen massapoltto tulee luultavasti tulevaisuudessa vähenemään, koska jätejakeita, kuten orgaanista jätejätettä ja RDF-polttoainetta, hyödynnetään energiatuotannossa erikseen. Niistä voidaan myös jalostaa biopolttoaineita uusien konversioprosessien avulla. Kaasutuksessa ja pyrolysoinnissa syntyvien tuotteiden käyttö on helpompaa esimerkiksi polttoaineen käsittelyn ja polttoprosessin osalta. Lisäksi ne lisäävät joustavuutta energiatuotantoon, kun yhdyskuntajätteestä voidaan tuottaa helpommin varastoivia biopolttoaineita. Erityisesti kaasutuksesta saadulla tuotekaasulla on mahdollisesti suuri merkitys energiatuotannossa, koska kaasumaisilla biopolttoaineilla on myös laajin käytettävissä oleva valikoima lämpövoimakoneista. Ongelmana ovat kuitenkin uusien konversioprosessien tuotteiden sisältämät epäpuhtaudet, jotka vaativat energiaintensiiviset ja kalliit jalostusmenetelmät, jotta biopolttoaineelle asetetut laatuvaatimukset täyttyvät.

CHP-laitos on tehokkain tapa käyttää hyödyksi yhdyskuntajätteen sisältämä energia, koska se maksimoi yhdyskuntajätteen energiahyötykäytön. Yleisin käytettävä lämpövoimakone on höyryturbiini, jonka lisäksi usein WtE-laitoksissa käytetään maakaasukäyttöistä kaasuturbiinia nostamaan höyryturbiiniin menevän tuorehöyryn arvoja ja siten laitoksen hyötysuhdetta. Maakaasukäyttöisiä polttomoottoreita käytetään myös hätä- ja varavoimaloina niiden nopean käynnistettävyyden vuoksi. Näissä lämpövoimakoneissa tuotekaasun käyttö maakaasun sijasta ei ole vielä yleistynyt esimerkiksi kalliiden puhdistus- ja jalostusprosessien vuoksi.

WtE-laitoksen käytön mahdollinen muuttuminen säätövoimaperusteiseksi uudistaa käytettävän lämpövoimakonekannan ja antaa mahdollisuudet uudenlaisten WtE- ja CHP-laitoksien yhdistelmien kehittämiseksi, mikäli esimerkiksi taloudelliset ja poliittiset näkökulmat ovat kehityksen kannalta myönteisiä. Höyryturbiini soveltuu huonosti mikro-CHP-laitoksiin, joiden rooli kasvaa siirryttäessä keskitetystä energiatuotannosta hajautettuun. Mikro-CHP-laitoksissa käytettävien pienten lämpövoimakoneiden korkeat investointikustannukset ja polttoaineen laatuvaatimukset hidastavat kuitenkin niiden käyttöönoton yleistymistä. Tulevaisuudessa suurin osa käytettävästä sähköstä tuotetaan edelleen höyryturbiinin avulla, mutta pienten lämpövoimakoneiden merkitys energiatuotannossa tulee todennäköisesti kasvamaan. Ne osoittavat suurta potentiaalia olla yksi tulevaisuuden kestävästä energiantuotantomuodoista.

## LÄHTEET

- [1] Jätelaki, L 17.06.2011/646, 2011, [WWW] [Viitattu 05.12.2014] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>
- [2] AccessScience Editors, Waste-to-energy, McGraw-Hill Education, 2014, [WWW] [Viitattu 14.8.2014] Saatavissa: <http://www.accessscience.com/content/waste-to-energy/BR0129142>
- [3] Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., What A Waste – A Global Review of Solid Waste Management, World Bank, 2012, [WWW] [Viitattu 12.9.2014] Saatavissa: <http://go.worldbank.org/BCQEP0TMO0>
- [4] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä, D 19.11.2008/98/EU, 2008, [WWW] [Viitattu 05.12.2014] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=FI>
- [5] Brunner, P.H., Rechberger, H., Waste to energy – key element for sustainable waste management, Waste Management, 2014, in Press
- [6] Horttainen, M., Teirasvuo, N., Kapustina, V., Hupponen, M., Luorainen, M., The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland, Waste Management, 2013, Vol 33, pp. 2680–2686
- [7] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi kaatopaikoista, D 26.04.1999/31/EY, 1999, [WWW] [Viitattu 05.12.2014] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=FI>
- [8] Ympäristönsuojelulaki, L 27.06.2014/527, 2014, [WWW] [Viitattu 05.12.2014] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>
- [9] European Commission, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Integrated Pollution Prevention and Control, 2006, [WWW] [Viitattu 5.12.2014] Saatavissa: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf)
- [10] Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu, Paras käyttökelpoinen tekniikka BAT, 2014, [WWW] [Viitattu 6.10.2014] Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Paras\\_tekniikka\\_BAT](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Paras_tekniikka_BAT)

- [11] Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I., Poltto ja palaminen, International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto, 2002
- [12] Golušin, M., Dodić, S., Popov, S., Strategic Priorities of Sustainable Energy Development, Sustainable Energy Management, Boston Academic Press, 2013
- [13] Rotter, V.S., Lehmann, A., Marzi, T., Möhle, E., Schingnitz, D., Hoffmann, G., New techniques for the characterization of refuse-derived fuels and solid recovered fuels, Waste Management & Research, 2011, Vol 29, pp 229–236
- [14] Arena, U., Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, Waste Management, 2012, Vol. 32, pp. 625–639
- [15] Lahti Energia, Energian tuotanto, 2014, [WWW] [Viitattu 14.9.2014] Saatavissa: <http://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/energian-tuotanto>
- [16] Lee, S., Shah, Y.T., Conversion of Waste to Biofuels, Bioproducts and Bioenergy, Biofuels and Bioenergy Processes and Technologies, CRC Press, 2012
- [17] Liu, H., Boukhanouf, R., Combined Heat and Power Generation from Biomass, Sustainable Bioenergy Production, CRC Press, 2014
- [18] Raiko, R., Tolvanen, H., Pääkkönen, A., Luentomoniste Energiatalous, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014
- [19] Green, D., Perry, R., Thermal Energy Conversion and Utilization, Perry's Chemical Engineers' Handbook, AccessEngineering, 2008.
- [20] Salomón, M., Savola, T., Martin, A., Fogelholm, C.F., Fransson, T., Small-scale biomass CHP plants in Sweden and Finland, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, Vol 15, pp. 4451–4465.
- [21] Pehnt, M., Environmental impacts of distributed energy systems – The case of micro cogeneration, Environmental Science & Policy, 2008, Vol 11, pp. 25–37.
- [22] Tobiasen, L., Kamuk, B., Waste-to-Energy for District Heating, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer New York, 2012
- [23] Van Berlo, M.A.J., Waste-to-Energy Facilities as Power Plants, Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer New York, 2012

- [24] Savikoski, A., Suomenoja power plant, Fortum, 2010, [WWW] [Viitattu 23.9.2014] Saatavissa: [http://fortum.com/Lists/ArchiveLibraryList/Capital%20Markets%20Day%202010/CMD2010\\_Suomenoja\\_sitevisit\\_Savikoski.pdf](http://fortum.com/Lists/ArchiveLibraryList/Capital%20Markets%20Day%202010/CMD2010_Suomenoja_sitevisit_Savikoski.pdf)
- [25] Woolcock, P.J., Brown, R.C., A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas, *Biomass and Bioenergy*, 2013, Vol.52, pp. 54–84.
- [26] Münster, M., Meiborn, P., Optimization of use of waste in the future energy system, *Energy*, 2011, Vol. 36, pp. 1612–1622
- [27] Psomopoulos, C.S., Bourka, A., Themelis N.J., Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA, *Waste Management*, 2009, Vol. 29, pp. 1718–1724
- [28] Pachauri R.K., Meyer, L., *Climate Change 2014 Synthesis report*, 2014, *Integrated Pollution Prevention and Control*, [WWW], [Viitattu 4.12.2014] Saatavilla: [http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_SPMcorr1.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_SPMcorr1.pdf)
- [29] Szarka, N., Scholwin, F., Trommler, M., Jacobi, H., Eichhorn, M., Ortwein, A., Thrän, D., A novel role for bioenergy: A flexible, demand-oriented power supply, *Energy*, 2013, Vol. 61, pp. 18–26