



JÄTTEIDEN ENERGIAHYÖDYNTÄMINEN

Tekniikat ja ympäristövaikutukset

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Totti Nieminen

Tarkastaja: TkT Antti Pitkäoja

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Totti Nieminen

Jätteiden energiahyödyntäminen, tekniikat ja ympäristövaikutukset

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

32 sivua, 5 kuvaa

Tarkastaja: TkT Antti Pitkäoja

Avainsanat: jätteiden energiahyödyntäminen, jätteiden käsittely, kiertotalous, jätteenpolttotekniikat, jätteenpolton ympäristövaikutukset

Tämä kandidaatintyö käsittelee jätteiden energiahyödyntämistä osana kiertotaloutta ja kestäväää energiajärjestelmää. Tulevaisuudessa tarvitaan ympäristön ja ilmaston kannalta kestäviä energiantuotantomuotoja energian kultukseen saman aikaisesti lisääntyessä. Myös jätteiden määrä tulee lisääntymään, mikä tekee jätteiden energiahyödyntämisestä yhden potentiaalisista keinoista näiden ongelmien ratkaisemiseksi.

Työssä tarkastellaan jätteitä energianlähteenä, niiden ominaisuuksia sekä erilaisia tekniikoita, joilla jätteitä voidaan hyödyntää energiana. Erityisesti keskitytään jätteiden polttotekniikoihin, kaasutukseen ja orgaanisen jätteen mädätykseen. Lisäksi analysoidaan jätteiden energiahyödyntämisen merkitystä ilmastomuutoksen hillitsemisessä ja energiajärjestelmän kestävyuden parantamisessa.

Tulokset osoittavat, että jätteiden energiahyödyntäminen on merkittävä osa kestäväää energiajärjestelmää. Jätteiden polttaminen vähentää kaatopaikoille päätyvän jätteen määrää ja tuottaa samalla energiaa, mikä vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta. Erityisesti kehittyvissä maissa jätteenpolttotekniikat voivat tarjota kustannustehokkaan tavan vähentää kaatopaikan päästöjä ja parantaa jätehuollon tehokkuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Totti Nieminen

Waste-to-energy, techniques and environmental impacts

Bachelor's thesis

2024

32 pages, 5 figures

Examiners: D.Sc. (Tech.) Antti Pitkääoja

Keywords: waste-to-energy, waste management, circular economy, waste incineration techniques, environmental impacts of waste incineration

This thesis discusses waste-to-energy as part of the circular economy and a sustainable energy system. In the future, as energy consumption increases, we will need environmentally friendly and climate-friendly ways to produce energy. The amount of waste will also grow, making waste-to-energy a potential solution to these challenges.

The thesis looks at waste as a source of energy, its properties, and different techniques for turning waste into energy. The main focus is on waste incineration, gasification, and the digestion of organic waste. The thesis also examines how waste-to-energy can help reduce climate change and improve the sustainability of the energy system.

The results show that waste-to-energy is an important part of a sustainable energy system. Burning waste significantly reduces the amount of waste that ends up in landfills and provides energy. Waste incineration can substitute use of fossil-based fuels. Especially in developing countries, waste incineration can be a cost-effective way to cut greenhouse gas emissions of landfills and improve waste management.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	5
2	Kiertotalous ja jätteiden synty.....	6
2.1	Kiertotalouden periaatteet.....	6
2.2	Jätteiden synty.....	8
2.3	Jätejakeet.....	9
3	Jätteen ominaisuudet	11
3.1	Jätteen lämpöarvo, kosteus ja tuhkapitoisuus	11
3.2	Jätteen esikäsittely	12
3.3	Jätteen ominaisuuksien vaikutus polttoon	13
3.4	Jätteen ominaisuuksien vaikutus savukaasun käsittelyyn.....	14
4	Jätteiden hyödyntämistekniikat energiana.....	15
4.1	Polttotekniikat.....	15
4.1.1	Arinapoltto	15
4.1.2	Leijupeti.....	16
4.1.3	Rumpu-uunit	17
4.2	Kaasutus.....	18
4.3	Orgaanisen jätteen mädätys	20
4.4	Muut menetelmät	21
5	Merkitys ilmaston ja energiajärjestelmän kannalta	22
5.1	Jätteiden rooli energiana	22
5.2	Jätteiden energiahyödyttäminen ilmaston ja ympäristön kannalta	23
5.3	Jätteen energiahyödyttäminen tulevaisuudessa.....	24
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	26
	Lähteet	27

1 Johdanto

Jätteiden käsittely ja hyödyntäminen energiana ovat nousseet keskeisiksi osa-alueiksi nykyaikaisessa energiajärjestelmässä ja ympäristöhuollossa. Ilmastonmuutoksen ja luonnonvarojen ehtymisen kaltaiset kestävyysaasteet vaativat innovatiivisia ja kestäviä ratkaisuja. Jätteiden energiahyödyntäminen voi olla osa tätä ratkaisusta. Tämä kandidaatintyö tarkastelee jätteiden roolia energianlähteenä, niiden käsittelytekniikoita ja merkitystä ilmaston ja energiajärjestelmän kannalta.

Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti tavoitteena on vähentää jätteen syntyä ja hyödyntää materiaalit mahdollisimman tehokkaasti uudelleen. Siitä huolimatta maailmassa syntyy päivittäin valtavia määriä jätettä, mikä asettaa haasteita jätehuollossa ja ympäristönsuojelulle. Jätteen energiahyödyntäminen tarjoaa tehokkaan tavan käsitellä jätteitä, jotka eivät sovellu kierrätettäväksi, samalla kun ne tuottavat energiaa ja vähentävät fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Työn toisessa luvussa käsitellään kiertotalouden periaatteita ja jätteiden syntyä sekä niiden käsittelyn kehitystä niin Suomessa kuin globaalisti. Kolmannessa luvussa keskitytään jätteen ominaisuuksiin, kuten lämpöarvoon, kosteuteen ja tuhkapitoisuuteen, jotka vaikuttavat sen poltettavuuteen ja käsittelyyn. Neljäs luku esittelee erilaisia tekniikoita, joilla jätteitä voidaan hyödyntää energiana, kuten polttotekniikat, kaasutus ja mädätys. Viides luku analysoi jätteiden energiahyödyntämisen merkitystä ilmastonmuutoksen hillitsemisessä ja energiajärjestelmän kestävyden parantamisessa.

Tämän työn tutkimuskysymyksenä on selvittää miten jätteiden energiahyödyntämistekniikat voivat edistää kestävästä energiajärjestelmästä ja vähentää ilmastonmuutosta edistäviä päästöjä. Työn päätavoitteena on tutustua erilaisiin olemassa oleviin jätteiden energiahyödyntämistekniikoihin ja pohtia jätteen energiahyödyntämisen ympäristövaikutuksia, erityisesti ilmastonmuutoksen ja energiajärjestelmän kestävyden kannalta. Kokonaisuudessaan tämä työ pyrkii tarjoamaan yleiskuvan jätteiden roolista osana kestävästä energiajärjestelmästä ja kiertotaloutta.

2 Kiertotalous ja jätteiden synty

Kiertotalous on keskeinen osa nykypäivän kestävyysaasteiden ratkaisemisessa. Yksi kiertotalouden keskeisistä periaatteista on vähentää jätteiden syntyä. Vaikka kiertotalous on globaalisti keskeinen osa kestävä kehityksen tavoitteisiin pääsemisessä, synty maailmassa silti valtavat määrät jätettä päivittäin. Tässä kappaleessa pohditaan kiertotalouden määrittelyä ja tutustutaan maailmassa syntyviin jätteisiin sekä vertaillaan jätteiden käsittelyn kehitystä sekä Suomen että maailman mittakaavassa.

2.1 Kiertotalouden periaatteet

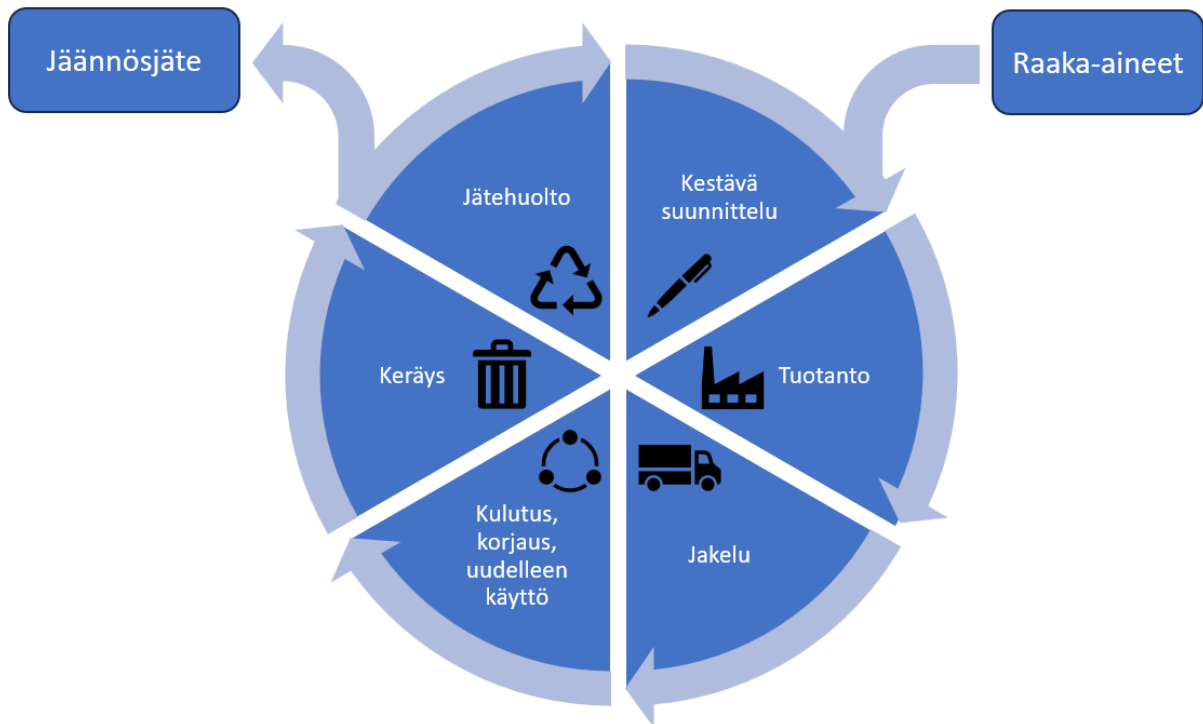
Kiertotaloudella terminä tarkoitetaan sellaista tuotanto ja kulutusmallia, jossa tuotteiden materiaalit pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti uudelleen. Yleisesti kiertotalouden termin voidaan kuitenkin ajatella tarkoittavan vaihtoehtoa tai vastakohtaa lineaariselle tuotanto- ja kulutusmallille. Kiertotalouden keskeinen tavoite on muuttaa yhteiskunnan toiminta kestävämmäksi, sillä väestönkasvu lisää rajallisten resurssien kysyntää. (Euroopan parlamentti 2023.)

Lineaaritaloudessa tuotteen vaatimat luonnonvarat otetaan käyttöön ja tuotteen elinkaaren päätyessä tuote hävitetään. Nimensä mukaisesti tuotteiden luonnonvarat liikkuvat vain yhteen suuntaan raaka-aineista jätteeksi. Lineaarinen malli on johtanut suureen energian ja materiaalien kulutukseen ja kasvihuonekaasujen sekä saasteiden lisääntymiseen. Yksi lineaaritalouden synnyttämistä ongelmista on lisääntyvä jätteen määrä. (Worrell & Reuter 2024.)

Kiertotalouden ydinajatuksena on materiaalien ja raaka-aineiden mahdollisimman tehokas uudelleen käyttäminen ja kierrättäminen ja tätä kautta materiaalien elinkaaren lisääminen. Kiertotalous ei ole kuitenkaan vain materiaalien kierrättämistä, vaan keskittyy tuotteen koko arvoketjun eri osissa syntyvien jätteiden ja päästöjen vähentämiseen. Siksi myös esimerkiksi tuotteen suunnittelu pitkäikäiseksi tai korjaaminen ovat osa kiertotaloutta. Jätteiden syntyamisen näkökulmasta jätteiden synty ei rajoitu vain tuotteen elinkaaren päättymiseen, vaan niitä syntyy myös muissa tuotteen elinkaaren vaiheissa. Uusien raaka-aineiden käyttöönoton

sijaan kiertotaloudessa käytetään mahdollisuuksien mukaan kierrätettyjä materiaaleja. Myös tällä tavoin syntyvän jätteen määrä vähenee, joka puolestaan pienentää tarvetta ottaa käyttöön uusia raaka-aineita. (Worrell et al. 2024.)

Materiaalivirrat muodostavat osittain suljetun kierron, josta kiertotalous terminä saa nimensä. Kuvassa 1 on esitelty yksinkertaistettu kiertotalousmalli, jossa nimettynä arvoketjun eri osa-alueet. Jäännösjäte on osuus kierrossa olevasta materiaalista, jota ei voida enää hyödyntää uudelleen. Vastaavasti kierto on ottaa vastaava määrä uusia raaka-aineita. (Euroopan parlamentti 2023.) Täydellisessä tilanteessa kierto olisi täysin suljettu, mutta todellisessa tilanteessa tämä ei ole koskaan täysin mahdollista (Worrell et al. 2024).



Kuva 1. Kiertotalousmalli (Mukaiillen Euroopan parlamentti 2023)

Kiertotalouteen siirtyminen on välttämätöntä, sillä keskeisiä raaka-aineita on saatavilla vain rajallinen määrä. Samaan aikaan väestönkasvu maailmassa lisää niiden kysyntää. Kiertotalouden pidentäessä tuotteen elinkaarta ja vähentäessä uusien raaka-aineiden hankkimisen tarvetta, sillä on suuri rooli kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. (Euroopan

parlamentti 2023.) Tässä työssä keskitytään siihen, miten tuo kierrosta poistuva jäännösjäte voitaisiin hyödyntää energiantuotannossa tai polttoaineena.

2.2 Jätteiden synty

Tilastojen mukaan maailmassa tuotetaan jätettä vuosittain 2,01 miljardia tonnia, joka tarkoittaa asukasta kohden noin 270 kg jätemäärää. Määrä kuitenkin vaihtelee runsaasti ja jätteiden synty painottuu erityisesti korkeiden tulotasojen maihin. Karkeasti arvioiden maailmassa syntyvien jätteiden määrästä kolmannelta ei käsitellä ympäristön kannalta turvallisella tavalla. Jätteiden puutteellista käsittelyä tapahtuu erityisesti kehittyvissä maissa. Vuosittain syntyvien jätteiden määrän odotetaan kasvavan 3,4 miljardiin tonniin vuoteen 2050 mennessä ja kasvun odotetaan olevan suurempaa kehittyvissä valtioissa. (World Bank 2024.)

Suomen lukuihin verrattuna vuonna 2021 yhdyskuntajätettä syntyi Suomessa yli 3,3 miljoonaa tonnia, mikä tarkoittaa yli 600 kg jätettä asukasta kohden. Suomessa jätteiden käsittely on kuitenkin erityisen hyvällä tasolla verrattuna kehittyviin maihin. Reilu kolmannes syntävästä jätteestä voidaan hyödyntää uudelleen ja loppu osa päättyy polttoon. Kuitenkin tilastojen mukaan Suomessa tuotetaan eniten jätettä kaikista EU maista. (Tilastokeskus 2022.)

Käytössä olevat jätteiden käsittelymenetelmät voidaan jakaa muutamaan eri päätapaan. Tavat ovat kierrätys, kaatopaikkasijoittaminen ja sekä erilaiset menetelmät, joissa jätteen sisältämä energia pyritään samaan hyötykäyttöön. Lisäksi niin sanottu ”open dump”, joka tarkoittaa jätteiden hallitsematonta sijoittamista maa- tai vesistöalueelle, on edelleen yleinen tapa jätteiden käsittelylle erityisesti kehittyvissä maissa. Tämä ei ole kuitenkaan ympäristön kannalta turvallinen vaihtoehto, sillä jätteen sisältämät aineet edistävät ilman, maaperän ja vesistöjen saastumista. (UN Environment Programme.)

Ympäristöministeriö on Suomessa rajoittanut voimakkaasti jätteiden kaatopaikkasijoittamista vuonna 2013 säädetyllä asetuksella. Asetuksen tavoitteena on minimoida jätteen sijoittamista kaatopaikoille ja käytännössä se on ensisijaisesti toimitettava kierrätettäväksi ja toissijaisesti energiana hyödynnettäväksi. (Ympäristöministeriö 2018.) EU:ssa vuonna 2018 hyväksytyssä jätesäädöspaketissa säädetään puolestaan jätehierarkian tehostamisesta,

resurssitehokkaasta materiaalien käytöstä ja kierrätyksestä, asettaen jäsenvaltioille velvoitteita täytäntöönpanoon ja asettaen kierrätystavoitteita kotitalousjätteille (Bröckl et al. 2021).

Luvuista nähdään, että jätteiden käsittely maailmassa on puutteellista ja tulevaisuudessa jätevirtojen kasvaessa entisestään tulee maailmassa olemaan kasvava tarve jätteiden käsittelytekniikoille ja -menetelmille. Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti syntyvien jätteiden ensisijainen käsittelymenetelmä olisi saattaa ne takaisin kiertoon, mutta muita menetelmiä ei voida poissulkea. Tässä työssä keskitytään juuri jätteiden energiahyödyntämiseen osana kiertotaloutta.

2.3 Jätejakeet

Jätteitä syntyy useista erilaisista lähteistä ja niitä voidaan jaotella eri tavoin niiden ominaisuuksien perusteella. Globaalisti jätteiden jaottelu eri jakeisiin eroaa riippuen käytetystä lähteestä. Maailmassa syntyvät jätteet voidaan kuitenkin jakaa karkeasti seuraaviin ryhmiin:

- biojätteet
- muovit
- paperit ja pahvit
- lasit
- metallit
- muut

Muut kategorian alle voidaan luokitella esimerkiksi tekstiili ja elektroniikkajäte (Mastellone 2015). Lisäksi merkittävä jätejake on vaarallinen jäte (Suomessa entiseltä nimeltään ongelmajäte (Helsingin seudun ympäristöpalvelut a)), joka sisältää ympäristön ja terveyden kannalta erittäin haitallisia aineita (U.S. Environmental Protection Agency 2024 A).

Sekajäte on kierrätyskelvoton loppujäte, josta on pyritty erottelemaan kaikki uusiokäyttöön sopiva materiaali (Helsingin seudun ympäristöpalvelut b). Suomessa noin puolet syntyvästä

jätteestä on sekajätettä (Tilastokeskus 2022). Yhdyskuntajäte puolestaan on kotitalouksissa ja palvelualoilla syntyvää jätettä, joka on verrattavissa kotitalousjätteisiin. Se on kulutuksessa syntynyttä jätettä, joka kuuluu kunnan järjestämän jätehuollon piiriin. (Tilastokeskus b). Lisäksi käytössä ovat termit syntypaikkalajiteltu jäte sekä energiajäte (Ekopartnerit 2024). Tässä työssä keskitytään jätteiden energiahyödyntämisen eri ratkaisujen pohtimiseen yleensä yhdyskuntajätteiden näkökulmasta. Osassa prosesseista hyödynnetään myös lajiteltuja jakeita, kuten biojätettä.

3 Jätteen ominaisuudet

Jätteeseen polttoaineena liittyy erilaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat jätepolttolaitoksen ja jätteen käsittelyn vaatimukseen. Polttoaineen palamisteknisten ominaisuuksien (lämpöarvo, kosteus, tuhkapitoisuus) lisäksi jätteen fyysisten ja kemiallisten ominaisuuksien vaihtelu aiheuttaa erityisvaatimuksia jätteenpolttolaitoksille. Erityisesti syntypaikkalajiteltu sekajäte saattaa olla sisällöltään monimuotoista. (Raiko et al. 2002.)

Sekajätettä voidaan polttaa suoraan sellaisenaan, tai jätteistä voidaan valmistaa niin sanottuja kierrätyspolttoaineita eli REF-polttoaineita. Erityisesti sekajätteen ominaisuuksien runsas hajonta luo erilaisia haasteita, jotka tulee ottaa huomioon jätepolttolaitoksen suunnittelussa. (Raiko et al. 2002.)

3.1 Jätteen lämpöarvo, kosteus ja tuhkapitoisuus

Lämpöarvo on suure, joka kuvaa täydellisessä palamisessa vapautuvaa energiamäärää ja se ilmoitetaan energiamääränä polttoaineen massayksikköä kohden. Lämpöarvon yksikkö on J/kg. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa niin sanottuna ylempänä lämpöarvona tai alempana lämpöarvona. Alempi lämpöarvo tarkoittaa sitä lämpöä, joka täydellisessä palamisessa saadaan talteen, kun polttoaineen sisältämän kosteuden oletetaan jäävän kaasumaiseen olomuotoon ja täten sen olomuodonmuutokseen kulunut energia jää hyödyntämättä. Käytännön tilanteissa, kuten voimalaitosten polttoaineista puhuttaessa, käytetäänkin yleensä alemmaa lämpöarvoa. Alempi lämpöarvo tunnetaan myös nimellä tehollinen lämpöarvo. (Huhtinen et al. 1994.)

Alempi eli tehollinen lämpöarvo voidaan vielä jakaa teholliseen lämpöarvoon saapumistilassa ja kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon (Motiva 2021). Erityisesti monien puuperäisten polttoaineiden esikäsittelyyn liittyy prosesseja, joissa polttoaineen kosteuspitoisuus laskee (Nummelin et al. 2014). Tavanomaisessa sekajätteen poltossa polttoa edeltäviin prosesseihin ei yleensä liity erillistä kuivausta, jonka vuoksi sekajätteen lämpöarvon vaihtelu on runsasta. Esimerkiksi Fortum Oyj:n Riihimäen jätevoimalaitosten asiakirjoista selviää, että

raja-arvot vastaanotettavan sekajätteen lämpöarvolle ovat 8–12 MJ/kg (Fortum 2018). Lappeenrannan yliopiston diplomityössä tutkittiin jätteen tehollista lämpöarvoa saapumistilassa ja saadut tulokset vaihtelivat hyvin suuresti väliltä 11,6–21,7 MJ/kg (Sorsa 2009). EU:ssa kierrätetyn jätteen lämpöarvo on keskimäärin 10 MJ/kg (Klinghoffer & Castaldi 2013). Lisäksi merkittävä tekijä lämpöarvoon on sekajätteen eri jätejakeiden osuudet. Vertailuna esimerkiksi hakkeen tehollisen lämpöarvon hajonta kuiva-aineessa on vain 1,5 MJ/kg (Motiva 2021).

Kosteuden vaihtelu riippuu voimakkaasti lajittelun tasosta ja erityisesti biojätteen määrän kasvu lisää sekajätteen kosteutta. Sorsan tutkimuksessa näytteiden kosteuspitoisuus vaihteli 9,5 ja 41,2 % välillä (Sorsa 2009). Toisaalta Riikinvoiman teettämässä tutkimuksessa jätepolttoaineen kosteudet vaihtelivat myös hyvin runsaasti jopa alle 20 %:sta lähes 60 %:iin. (Lahtonen 2018). Molemmissa lähteissä todetaan vuodenajan vaikuttavan merkittävästi polttoaineen kosteuspitoisuuteen. Myös jätepolttoaineen tuhkapitoisuus vaihtelee voimakkaasti. Tuhkan määrä vaihtelee kostean kiinteän yhdyskuntajätteen painosta 1–30 %:iin ja tilavuudesta 5–15 %:iin (Siddque 2010).

Erityisesti syntypaikkalajittelussa jätteessä on seassa myös palamatonta aineista, kuten kiviainesta, keramiikkaa, lasia ja metalleja. Nämä aineet eivät lisää polttoaineen lämpöarvoa. Kulkeutuessaan polttoprosessin läpi ne sitovat lämpöä, joka muuten saataisiin hyötykäyttöön ja tämän vuoksi jätteen lämpöarvo laskee. (Raiko et al. 2002.)

Yhteenvetona voidaan sanoa yhdyskuntajätteen sisältävän neljänneksen kosteutta ja toisen neljänneksen tuhkaa ja palamatonta ainesta (Klinghoffer et al. 2013). Nämä tekijät ja erityisesti niiden vaihtelu tekevät jätteestä polttoaineena haastavan verrattuna muihin tavanomaisiin polttoaineisiin. Tämän vuoksi myös sopivan tekniikan valinta erityyppisille jätteille on tärkeää.

3.2 Jätteen esikäsittely

Yllä mainittujen jätteen ominaisuuksien vaihtelun vuoksi on perusteltua, että jätettä esikäsitellään ennen sen polttamista (Raiko et al. 2002). Tyypillisesti jätevoimaloissa jätettä säilytetään ennen polttoprosessiin syöttämistä jätebunkkereissa, joissa kamarit sekoittavat jätettä.

Tällä tavoin pyritään lisäämään jätteen ominaisuuksien homogeenisyyttä. (Klinghoffer et al. 2013.)

Ennen prosessiin syöttämistä ei toivottujen aineiden poistamiseksi jätteestä on kehitetty erilaisia esikäsittelymenetelmiä. Näiden menetelmien avulla esimerkiksi jätteen sisältämä metalli saatetaan takaisin uusiokäyttöön. Jätteen esikäsittelylle on olemassa monia erilaisia tekniikoita, joista useimmat perustuvat jätteen mekaaniseen käsittelyyn. Näitä voivat olla esimerkiksi erilaiset rumpuseulat, magneettinen erottelu tai jätteen eri osien tiheyseroon perustuva erottelu. Myös jätteen fyysinen koko saattaa vaatia käsittelyä. Tämän vuoksi fyysisesti isokoinen jäte voi vaatia murskaamista tai repimistä. (Klinghoffer et al. 2013.)

3.3 Jätteen ominaisuuksien vaikutus polttoon

Konventionaalisia polttoaineita käytettäessä pyritään mahdollisimman korkeisiin höyryn paineisiin ja lämpötiloihin. Jätteenpoltossa rajoituksen näiden höyryn arvojen kasvattamiselle aiheuttaa korroosio. Jätteenpoltossa syntyvät savukaasut sisältävät yleensä runsaasti suolahappoa, metallisuolapartikkeleita sekä sulfaatteja, jotka aiheuttavat lämpötilan nousussa voimakasta korroosiota tulistinputkille. Tästä syystä jätevoimalaitos suunnitellaan alhaisemille höyryn arvoille verrattuna muihin polttoaineisiin, ja siksi myös sähköntuotannon hyötysuhde on alhaisempi. (Raiko et al. 2002.)

Jätteen ominaisuuksien vaihtelu aiheuttaa tarpeen prosessin säätämiseksi. Tyypillisesti säätö tapahtuu muuttamalla arinan nopeutta ja täten polttoaineen syötön nopeutta, sekä palamisilman määrää. Koska jätteen laadun mittaaminen ennen prosessiin syöttämistä ei ole mahdollista, säädetään prosessin toimintaa tyypillisesti tuotetun höyryn arvojen perusteella. Modernissa laitoksissa prosessiin liittyy myös runsaasti erilaisia mittauksia, joiden avulla säädöstä saadaan tarkempaa. (Raiko et al. 2002.)

3.4 Jätteen ominaisuuksien vaikutus savukaasun käsittelyyn.

Myös savukaasun käsittelyllä on jätettä poltettaessa erityisvaatimuksia. Typen oksidien muodostumista voidaan vähentää optimoimalla polttolämpötilaa, mutta usein tarvitaan myös ulkoisia pelkistysmenetelmiä. Selektiivinen katalyyttinen pelkistys käyttää ammoniakkia, joka reagoi savukaasunpuhdistuksen katalyytti materiaalin kanssa. Tämä on tehokas menetelmä, mutta on herkkä epäpuhtauksille. Toinen tapa on käyttää ammoniakkia tai ureaa korkeammassa lämpötilassa ilman katalyyttiä. Menetelmää kutsutaan ammoniakkiruiskutukseksi ja sen vaatiman korkeamman lämpötilan vuoksi tämä tapahtuu yleensä tulipesän yläosassa. Tämä menetelmä on yksinkertaisempi, mutta ei ole yhtä tehokas. (Vesanto 2006).

Dioksiini- ja furaaniemissioiden (PCDD/F) minimoinnissa parhaan käytettävissä olevan tekniikan mukaisesti käytetään useita menetelmiä ja tekniikoita samanaikaisesti. Tärkeintä on poltettavan jätteen tuntemus ja valvonta, jotta poltto-olosuhteet ovat optimaaliset dioksiinien ja furaanien hajoamiselle. Jätteenpolttolaitoksissa on pyrittävä estämään PCDD/F-yhdisteiden uudelleen muodostuminen savukaasujen jäähtymisen aikana, esimerkiksi jäähdyttämällä kaasu nopeasti alle 250 °C. Yhdisteiden poistamiseksi savukaasuista käytetään aktiivihiliabsorptiota ja katalyyttistä hajottamista. (Vesanto 2006.)

Elohopea ja sen yhdisteet höyrystyvät polttolämpötiloissa ja siirtyvät savukaasuun. Kuumissa osissa prosessia elohopea on pääosin metallisessa muodossa, mutta hapettuu savukaasujen jäähtyessä, jos läsnä on hapetinta kuten klooria. Hapettunut elohopea voidaan poistaa savukaasusta happamalla pesulla, kun taas metallinen elohopea sitoutuu aktiivihilipitoisiin adsorptioaineisiin. Parhaan käytettävissä olevan tekniikan mukaisesti elohopeapäästöjä vähennetään käyttämällä happamia pesureita, aktiivihilisuodatusta tai kuivaa lisäaineistusta. Elohopean sidonta dioksiinien ja furaanien tapaan voidaan varmistaa polttamalla adsorptioaineet riittävän hyvissä olosuhteissa. (Vesanto 2006.)

Lisäksi jätteenpoltossa syntyy myös muiden polttoaineiden tapaan haitallisia päästöjä. Näitä ovat esimerkiksi hiilimonoksidi, hiilivedyt sekä rikkioksidit. Lisäksi jätteenpoltossa on rajat myös halogeeni päästöille. (Raiko et al. 2002.)

4 Jätteiden hyödyntämistekniikat energiana

Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisia olemassa olevia tekniikoita, joilla jätteiden sisältämä energia voidaan muuntaa hyötykäyttöön lämmöksi ja sähköksi, tai jalostaa uusia polttoaineita. Osa menetelmistä soveltuu myös muille polttoaineille kuin jätteille. Alaluvuissa pyritäänkin esittelemään menetelmiä nimenomaan jätteiden näkökulmasta.

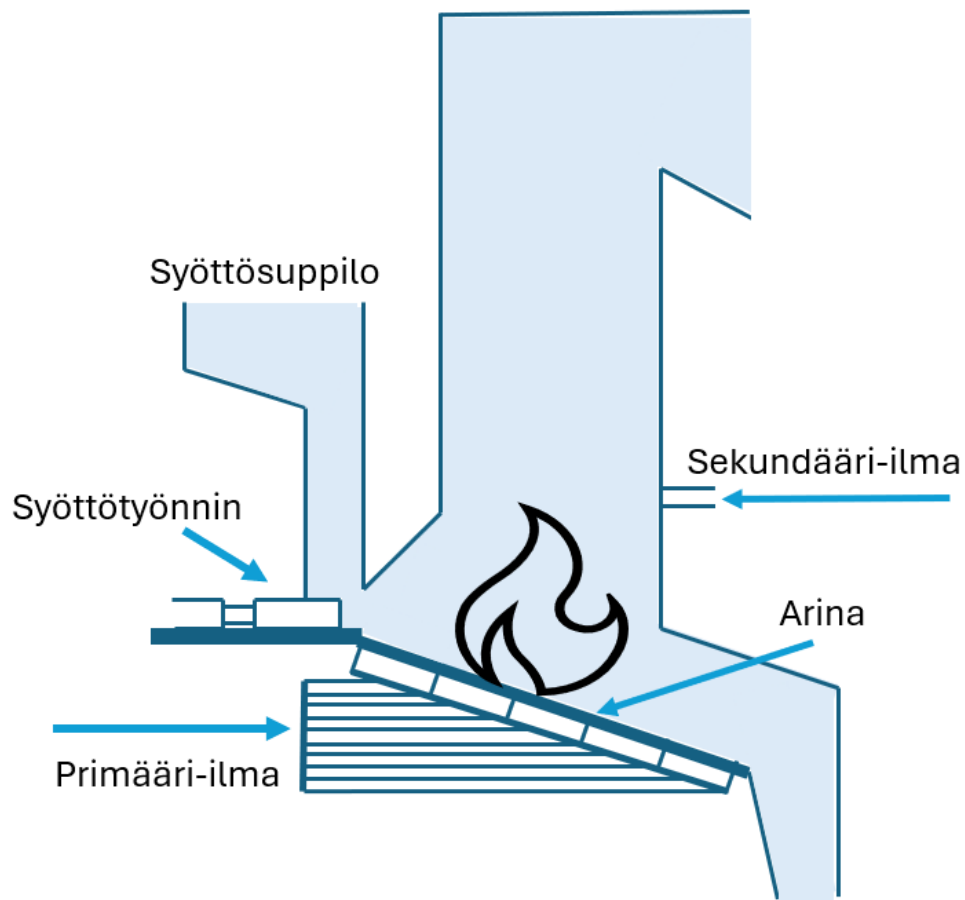
4.1 Polttotekniikat

Yleisin jätteiden energiahyödyntämismenetelmistä on jätteiden poltto. Jätteen poltolle on useita eri tekniikoita, mutta kaikki perustuvat samaan perusajatukseen; jäte poltetaan ja palamisen energia siirretään höyryyn. Höyryä voidaan käyttää sähköntuotantoon, kaukolämmitykseen tai teollisuuden prosesseihin. Samalla päästään eroon jätteestä. Polttaessa syntyy kuitenkin tuhkaa, ja polttoprosessin läpi kulkeutuu palamatonta ainesta, joka vaatii jatkokäsittelyä. Tämän lisäksi savukaasut vaativat monimutkaista käsittelyä verrattuna muihin tavanomaisia polttoaineita polttaviin laitoksiin. (Wang & Lawrence 2021)

4.1.1 Arinapoltto

Yleisin jätteenpolttomenetelmä on arinapoltto. Poltettaessa jätettä arinalla ei yhdyskuntajätettä tarvitse juuri käsitellä ennen sen polttoa. Tyypillisesti jäte siirretään kahmarin avulla syöttösuppiloon, josta syöttötyöntimet työntävät jätteen arinalle. Arinapoltto on jätteelle hyvä tekniikka, sillä prosessi sietää hyvin jätteen runsasta ominaisuuksien vaihtelua. (Vesanto 2006.)

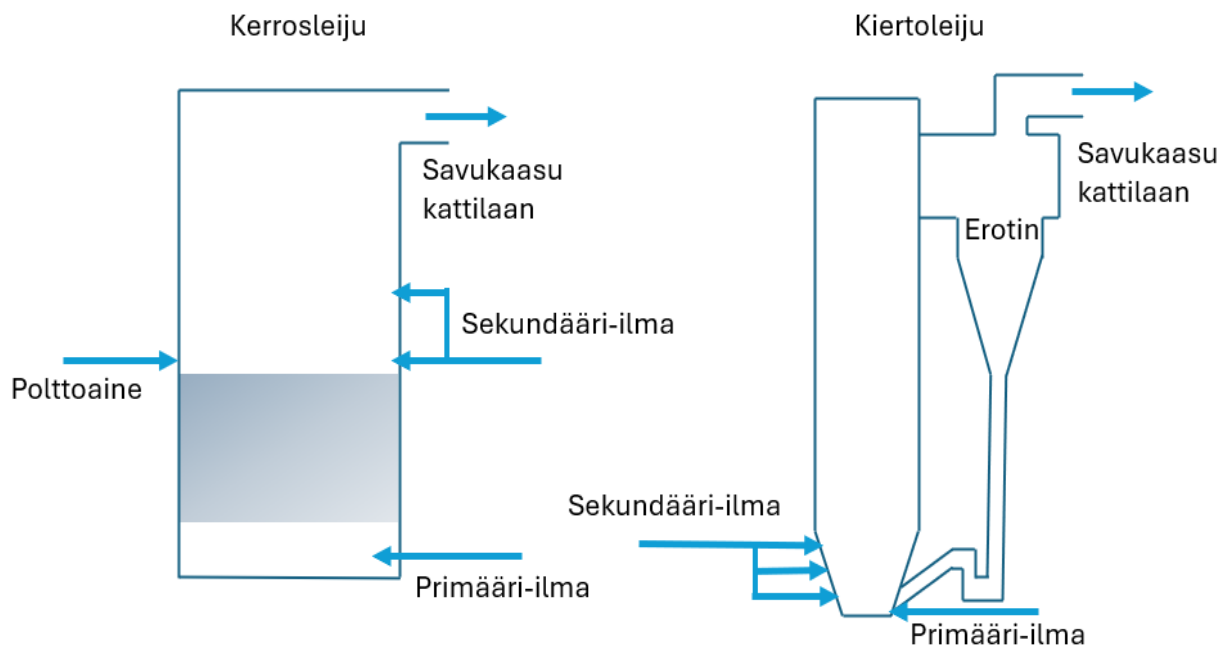
Jätteen poltossa käytettäviä arinoita on useita erilaisia, mutta niiden kaikkien tärkeimmät tehtävät ovat jätteen kuljettaminen ja sekoittaminen. Tyypillisesti primääri-ilma tulee arinan alta ja sekundäärinen ilma jätepatjan päälle. Erilaisia arinoita on monenlaisia ja eroina niiden välillä on arinan liikkumistapa. Arina voi muodostua useista paloista ja palat liikkuvat toisiinsa nähden, mikä saa aikaan jätteen liikkumisen. (Wang et al. 2021.) Kuvassa 2 poikkeus jätteen poltolle tarkoitettua arinakattilasta.



Kuva 2. Poikkileikkaus jätteenpoltoille tarkoitetusta arinakattilasta (Mukaiillen Vesanto 2006)

4.1.2 Leijupeti

Leijupetipoltossa jäte poltetaan ilmvirran avulla hehkuvassa hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa. Tällä menetelmällä jätteen sekoittuminen ja lämmönsiirtyminen on tehokasta. Leijupetipolton kaksi päätapaa ovat kerrosleijutekniikka ja kiertoleijutekniikka. Kerrosleijutekniikassa savukaasuvirran nopeus on pieni ja palava aines pysyy yhtenäisenä patjana. Kiertoleijutekniikassa virtausnopeus on suurempi, mikä kuljettaa petimateriaalia mukanaan. Kuvassa 3 poikkileikkaukset molempien tyyppisistä ratkaisuista tärkeimpinä komponentteineen. Kerrosleijutekniikan etuna on hyvä soveltuvuus märälle polttoaineelle. (Raiko et al. 2002.) Tätä voidaan pitää etuna jätepolttoaineiden kanssa.



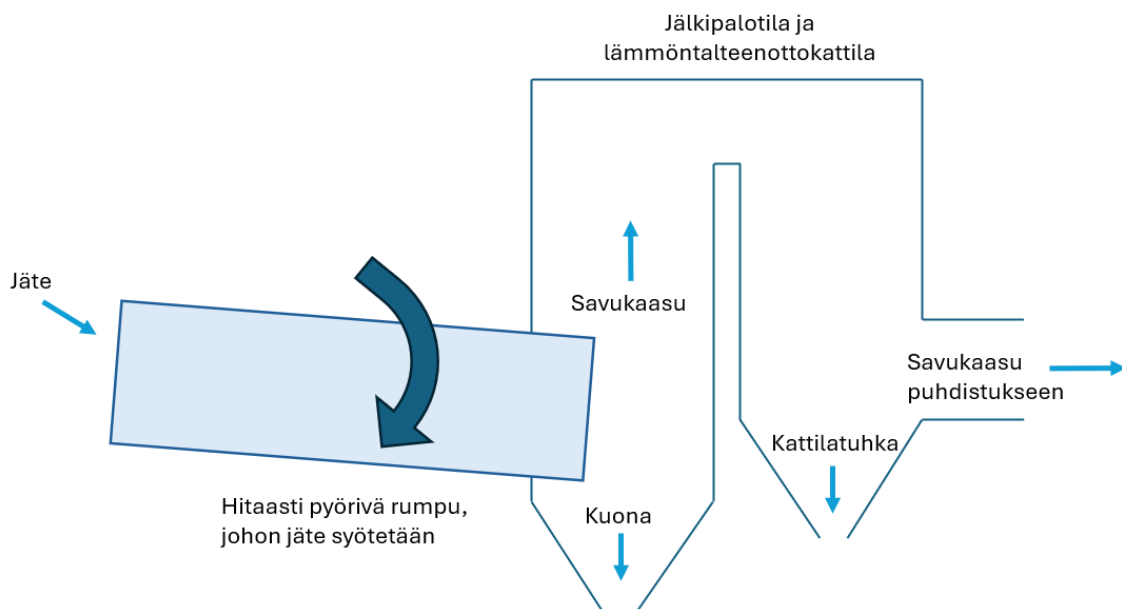
Kuva 3. Havainnekuva kahdesta erityyppisestä leijupetikattilasta (Mukaiillen Raiko et al. 2002)

Jätteen käyttäminen leijupetikattilan polttoaineena vaatii jätteen hyvän murskauksen ja metalliesineiden poistamisen, jotta polttoainepeti toimisi tarkoitetulla tavalla. Jäteperäisille materiaaleille suunnitellussa kerrosleijupoltossa savukaasu johdetaan tulipesästä esijäähdytyskammioon, jonka seinät toimivat lämmönsiirtopintoina. Tämä jäähdyttää savukaasua, jolloin höyrystyneet metallit ja epäorgaaniset aineet kiinteytyvät ja erottuvat osittain ennen kattilan lämmönsiirtopintoja. (Vesanto 2006.)

4.1.3 Rumpu-uunit

Rumpu-uuni on tyypillisesti 10–15 metriä pitkä loivasti vinoon asennettu rumpu, johon polttoaine ja palamisilman syötetään yläpäästä rumpun samalla pyöriessä hitaasti noin 5–40 kierrosta tunnissa. Rumpun sisäpinnan muurausten avulla polttolämpötila saadaan

korkeaksi ja pyörimisliikkeen ansiosta polttoaineen sekoittuminen on tehokasta ja jätteen viipymisaika rummussa pitkä. Tästä syystä rumpu-uunit soveltuvatkin erityisen hyvin vaarallisten jätteiden polttoon niin kiinteänä, nestemäisenä, pastamaisena kuin kaasumaisena. Palokaasut ja palamaton aines poistuvat rummun alapäästä jälkipalotilaan, jonka jälkeen savukaasut siirtyvät lämmöntalteenottokattilaan. Kuvassa 4 näkyvissä havainnekuva polttorummusta ja sen tärkeimmistä osista. (Vesanto 2006.)



Kuva 4. Havainne kuva polttorummusta ja siihen liitetystä lämmöntalteenottokattilasta.

(Mukaillen Vesanto 2006)

4.2 Kaasutus

Kaasutus on perinteiselle polttoprosessille vaihtoehtoinen prosessi, jossa polttoainetta muunnetaan kaasuksi korkean lämpötilan ja hapen avulla. Prosessissa polttoaine altistetaan korkeille lämpötiloille (noin 500–1000 astetta) vähähappisissa olosuhteissa, mikä estää

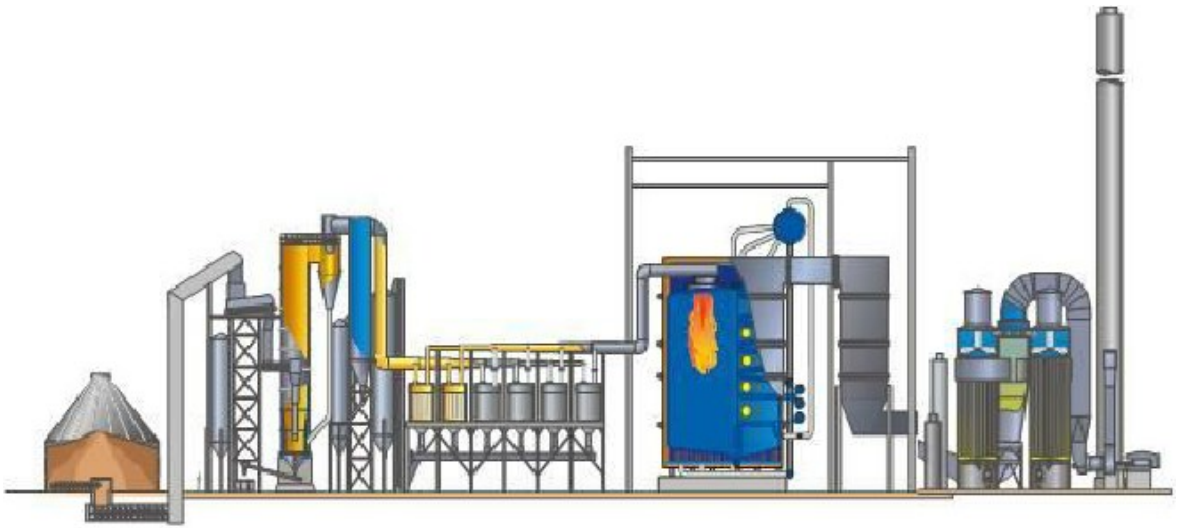
täydellisen palamisen ja johtaa polttoaineen kaasuuntumiseen. Tuloksena syntyy kaasua, joka koostuu pääasiassa hiilimonoksidista, hiilidioksidista, vedystä ja metaanista. Syntyvää kaasua kutsutaan synteetikaasuksi ja sitä voidaan käyttää polttoaineena, joko suoraan tai sitä voidaan jatkojalostaa. Tämä on hyödyllistä, sillä syntynyt kaasu voidaan hyödyntää jo olemassa olevalla tekniikalla, minkä lisäksi sen kuljettaminen ja varastointi on yksikertaisempaa verrattuna jätteeseen. (Klinghoffer et al. 2013.)

Kaasutus on monivaiheinen prosessi, joka koostuu perinteisesti polttoaineen kuivaamisesta, pyrolyysistä, palamisesta ja kaasuttamisesta. Kaasutuksen tehokkuus paranee, kun kaasutettavan aineen partikkelikoko pienenee, mikä luo tarpeen jätteen esikäsittelylle. (Klinghoffer et al. 2013.)

Sähkötuotannon näkökulmasta kaasutuksella jätteestä saadaan enemmän sähköä massayksikköä kohden verrattuna perinteiseen polttamiseen. Esimerkiksi perinteinen polttolaitos voi tuottaa tonnista jätettä noin 530 kWh sähköä, kun vastaava luku kaasutusjärjestelmän yhteydessä olevasta sähkötuotannosta on noin 650–1000 kWh. Lisäksi synteetikaasu voidaan puhdistaa epäpuhtauksista ennen polttamista, mikä vähentää savukaasun käsittelyn tarvetta. (Fouts 2020). Korkeamman sähkötuotannon hyötysuhteen vuoksi kaasutus on tärkeä tekniikka alueilla, joissa ei ole markkinoita lämmölle.

Jätteiden kaasutuksen kasvavaan kiinnostukseen on hyvät syyt, koska sillä on mahdollista tuottaa synteettistä kaasua pääasiallisena tuotteena lämpöenergian sijaan. Lisäksi kaasutus sietää suurempaa kosteuspitoisuutta, sen avulla on mahdollista suunnitella pienempiä laitoksia ja siten saavuttaa laitoksia, joilla on pienempi ympäristöjalanjälki. (Mastellone 2015.)

Kuvassa 5 on nähtävissä esimerkkinä havainnekuva Lahdessa sijaitsevasta kaasutuslaitoksesta, joka käyttää polttoaineenaan kierrätyspolttoaineita. Kaasutuksen jälkeen synteetikaasu poltetaan ja sen avulla tuotetaan sähköä ja kaukolämpöä. Synteetikaasun polton jälkeen savukaasu puhdistetaan. (Lahti Energia 2023.)



Kuva 5. Havainnekuva Lahden kaasutuslaitoksesta (Bolhar-Nordenkampf 2014)

4.3 Orgaanisen jätteen mädätys

Orgaanisesta jätteestä voidaan valmistaa mädätysprosessin avulla kaasua, jota jatkojalostamalla saadaan aikaan niin sanottua biokaasua, joka vastaa ominaisuuksiltaan maakaasua. Biokaasua voidaan käyttää polttoaineena teollisuuden prosessissa tai liikenteessä. (Gasum Oy 2024.)

Murskattu ja lietetty biojätettä mädätetään suurissa säiliöissä, eli biokaasureaktoreissa, noin kolmen viikon ajan. Mädättäminen vaatii lämpöä, jonka vuoksi seos lämmitetään noin 37-asteiseksi. Syntynyt kaasu käsitellään poistamalla siitä epäpuhtauksia ja hiilidioksidia. Mädätyksessä mikrobit käyttävät orgaanisen jätteen osia ravintonaan ja tuottavat metaania ja hiilidioksidia. Jäljellä jää niin sanottua mädätysjäännöstä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitteiden valmistuksessa tai siitä voidaan jalostaa multaa. (Gasum Oy 2024.) Biojätteen mädätystä voidaan pitää tärkeänä prosessina, sillä mädätykseen kelpaava biojäte ei ole hyvä valinta perinteisiin polttomenetelmiin sen korkean kosteuden vuoksi.

4.4 Muut menetelmät

Esiteltyjen yleisten käytössä olevien menetelmien lisäksi on olemassa monia muita jätteen käsittely menetelmiä, jotka täydentävät perinteisiä tekniikoita. Tässä kappaleessa on kerrottu lyhyesti esimerkkejä näistä. On kuitenkin hyvä huomata, että eri tekniikoiden määrä on suuri ja tässä on niistä vain muutama. Vaihtoehtoiset teknologiat ovat tärkeitä sillä, ne tarjoavat monipuolisia vaihtoehtoja jätteen hyödyntämiseen energiantuotannossa.

Yksi esimerkki on hydroterminen nesteytys, jossa orgaaninen jäte muunnetaan neste-mäiseksi polttoaineeksi korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Tämä menetelmä soveltuu erityisesti kosteille jätteille. (Ranjbar 2023). Toisena esimerkkinä toimii terminen depolyme-rointi, jossa jäte hajotetaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa, minkä tuloksena syntyy raa-kaöljyä muistuttavaa nestettä. (Aulich & Ness 2000.). Lisäksi olemassa oleville tekniikoille on paljon variaatioita ja muunnelmia.

5 Merkitys ilmaston ja energiajärjestelmän kannalta

Ilmastonmuutos ja vaatimukset kestävästä kehityksestä luovat tarvetta kehittää uusia energiaratkaisuja ja jätteellä voi olla tässä merkittävä rooli. Tämä luku tarkastelee jätteiden merkitystä energian tuotannossa ja niiden vaikutuksia ilmastoon sekä ympäristöön. Aluksi käsitellään jätteiden nykyistä ja tulevaa roolia energianlähteenä, minkä jälkeen analysoidaan jätteiden energiahyödyntämisen ympäristövaikutuksia, kuten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä. Lopuksi pohditaan jätteen energiahyödyntämisen tulevaisuuden näkymiä ja sen potentiaalia osana laajempaa siirtymää kohti kiertotaloutta ja vähähiilistä yhteiskuntaa.

5.1 Jätteiden rooli energiana

On arvioitu, että vuosittain syntyvän jätteen määrä tulee kasvamaan reilusta 2 miljardista tonnista 3,4 miljardiin tonniin vuoteen 2050 mennessä, josta noin kolmannesta ei tällä hetkellä käsitellä ympäristön kannalta kestävällä tavalla (World Bank 2024). Arvioidaan näiden lukujen perusteella, että tällä hetkellä vuodessa syntyy puutteellisesti käsiteltä jätettä noin 700 miljoonaa tonnia vuodessa. Jos jätteen lämpöarvona käytetään lukuarvoa 10 MJ/kg (Klinghoffer et al. 2013), voidaan sanoa, että tämän jätemäärän laskennallinen energiamäärä on noin 7 miljoonaa terajoulea. Koko maailman energiankulutus vuonna 2019 oli reilu 400 miljoonaa terajoulea (International Energy Agency 2021), eli pelkästään puutteellisesti käsitellyn jätteen energiasisältö kattaisi noin 1,75 % koko maailman energiankulutuksesta.

Globaalisti energiankulutuksen arvioidaan kasvavan väestön ja vaurauden lisääntyessä. Tämä kasvu tekee siirtymisen vähähiilisiin energialähteisiin haastavammaksi, koska uuden energian täytyy kattaa lisääntynyt kysyntä ja korvata fossiiliset polttoaineet. Energiankulutus on kasvanut lähes joka vuosi vuodesta 1980. (Ritchie et al. 2020.) Tällä hetkellä maailman energian kulutuksesta biopolttoaineilla ja jätteellä katetaan noin 43,4 miljoonaa terajoulea,

joka vastaa vajaata kymmentä prosenttia kokonaiskulutuksesta (International Energy Agency 2021.)

Jätteenpolto voisi ratkaista saman aikaisesti jätehuoltoon liittyvät ongelmat, että osan energia kysynnän kasvamisen myötä syntyvistä tuotantokapasiteetin nousuun liittyvistä ongelmista. Tämän lisäksi jätteen poltolla on merkittävä rooli kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Tämän vuoksi jätteenpolto tulisi nähdä osana tavoitetta saavuttaa kestävä yhteiskunta. Tämän saavuttamiseksi haasteina on niin teknologian, rahoituksen, instituutioiden ja lainsäätelyn haasteiden vuoksi. (Shu-Yuan et al. 2015.)

5.2 Jätteiden energiahyödyttäminen ilmaston ja ympäristön kannalta

Kierotalouden periaatteiden mukaisesti ensisijainen keino olisi kierrättää jäte. Kuitenkaan usein tämä ei ole mahdollista jätteen ominaisuuksien tai taloudellisten rajoitteiden vuoksi. Kierrätystekniikoiden puutteen vuoksi jäte päättyy yleensä kaatopaikoille. (Klinghoffer et al. 2013.)

Jos vertaillaan kaatopaikkasijoittamista tai jätteen energiahyödyntämistä, on jälkimmäinen näistä kahdesta parempi vaihtoehto. Molemmissa vaihtoehdoissa vapautuu ilmaston kannalta haitallisia kasvihuonekaasuja. Kaatopaikalle sijoitettu orgaaninen jäte tuottaa hiilidioksidia ja metaania. Jätettä poltettaessa puolestaan syntyy kasvihuonekaasujen osalta vain hiilidioksidia. Metaani on hiilidioksidein verrattuna noin 25 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu. (U.S. Environmental Protection Agency. 2024 B). Poltettaessa saadaan talteen jätteen sisältämä energia. Tämä vähentää osaltaan tarvetta fossiilisten polttoaineiden käytölle. (Klinghoffer et al. 2013.) Lisäksi polton jälkeen tuhkasta voidaan erotella metalleja, joiden hyödyntäminen on kasvihuonekaasujen osalta tehokkaampaa verrattuna uuden raakamateriaalin jalostukseen (Klinghoffer et al. 2013.).

Jätteen poltossa päästään energiantuotannon lisäksi suurimmaksi osaksi eroon jätteestä, pois lukien poltosta jäävä tuhka. Poltettaessa jätteen tilavuus pienenee 80–90 % (Wang et al. 2021). Puutteellisesti käsitelty jäte aiheuttaa vakavia terveys-, turvallisuus- ja ympäristövaikutuksia. Huonosti käsitelty jäte toimii esimerkiksi tautien levittäjänä (World Bank 2024).

Erityisesti kehittyvissä maissa jätteen ja maaperän sekä vesistöjen saasteet nostavat kuolleisuuslukuja merkittävästi (Yhdistyneet Kansakunnat 2023).

Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (IPCC) tunnistaa jätteenpolton yhdeksi keinoksi vähentää kasvihuonekaasuja fossiilisia polttoaineita korvaavana energiana. Paneelin raportin mukaan tehokkain tapa vähentää päästöjä on käyttää yhdistelmää erilaisia teknologioita ja strategioita. Näistä esimerkkeinä kierrätys, kompostointi ja metaanin talteenotto kaatopaikoilta. (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007.)

5.3 Jätteen energiahyödyntäminen tulevaisuudessa

Jätteiden hyödyntäminen energiana on kasvava ala, jonka arvo oli vuonna 2022 42,41 miljardia dollaria. Kasvun odotetaan olevan noin 6,9 % ja alan arvon oletetaan kasvavan noin 82,27 miljardiin dollariin vuoteen 2032 mennessä. Kasvua ajaa erityisesti hallitusten politiikat ja säädökset, jotka edistävät jätteiden asianmukaista käsittelyä ja energian tuotantoa niistä. Erityisesti Eurooppa johtaa markkinoita tiukkojen ympäristösäädösten ja suurten toimijoiden ansiosta. Aasian ja Tyynenmeren alueen odotetaan kuitenkin kasvavan nopeasti, johtuen teollistumisen ja kaupungistumisen lisääntymisestä sekä kasvavista ympäristöhuolista. Alan markkinoiden haasteita ovat lainsäädännölliset toimet ja korkeat jätteenkäsittelykustannukset, mutta hallitusten tukitoimet ja teknologiset innovaatiot luovat merkittäviä kasvumahdollisuuksia. Markkinoiden ennustetaan jatkavan kasvuaan, kun yhä useammat maat pyrkivät vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään ja hyödyntämään jätteitä kestäväna energialähteenä. (Presedence Research 2023.)

Globaalin kaupungistuminen myötä jätteiden hallinta on kohonnut merkittäväksi ongelmaksi. Jätehuolto on kehittynyt 1800-luvulta, jolloin sen tehtävä oli jätteiden poistaminen hygienian syistä, nykyiseen rooliinsa, osaksi resurssitehokkuutta ja energiantuotantoa. Kehitys on johtunut kestävämmästä kasvusta ja jätteiden määrän lisääntymisestä. (Mastellone 2015.)

Havaintojen mukaan jätteenpolton lisääntyessä myös muu jätteen kierrätyksen taso paranee. Tätä voidaan selittää muutamilla tekijöillä, joista keskeisimpinä on tietoisuuden

paraneminen ja jätteenpolton mukana tuoma jätevirtojen parempi hallittavuus. (Klinghoffer et al. 2013.)

Jätteen määrän lisääntyessä jätteen energiahyödyntämistä voidaan siis pitää tärkeänä osana siirtymää kohti kiertotaloutta, eivätkä nämä kaksi ole toisiaan pois sulkevia tekijöitä.

Lisäksi uudet tulevaisuuden teknologiat mahdollistavat jätteenpolton kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen. Esimerkiksi Fortum Oyj:llä on käynnissä projekti Riihimäen jätevoimalaitoksilla, joka liittyy jätteenpolton päästöjen vähentämiseen hiilidioksidin talteenottotekniikan avulla. Tavoitteena on jätteenpolton hiilinegatiivisuus ja muovin kierrätyksen parantaminen. (Fortum 2024.)

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä työssä tarkasteltiin jätteiden hyödyntämistä energiana kiertotalouden ja kestävän kehityksen näkökulmasta. Työssä tutustuttiin jätteiden syntyyn ja kiertotalouteen, erilaisiin jätteen energiahyödyntämismenetelmiin ja pohdittiin jätteiden energianhyödyttämisen merkitystä ympäristön ja ilmaston kannalta. Tutkimuksen lähtökohtana oli selvittää, miten jätteen energiahyödyntäminen voi tukea siirtymää kohti kiertotaloutta ja vähähiilistä yhteiskuntaa.

Työn tulokset osoittavat, että vaikka kiertotalouden periaatteiden mukaisesti jätteiden ensisijainen käsittelytapa tulisi olla materiaalien palauttaminen takaisin kiertoön, energiahyödyntämismenetelmillä on merkittävä rooli siirtyessä kohti kestäväää järjestelmää. Tämä on erityisen tärkeää tilanteissa, joissa jätteiden kierrätys ei ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista. Tärkeä havainto on, että jätteen energiahyödyntäminen ei myöskään sulje pois kiertotalouden muita ratkaisuja, vaan se voi toimia rinnakkain muiden jätteenkäsittelymenetelmien kanssa. Tärkeä johtopäätös on myös se, että kehittyvissä maissa, joissa jätteenkäsittely on usein puutteellista, jätteenpolttotekniikat voivat tarjota kustannustehokkaan ja ympäristöystävällisen ratkaisun jäteongelmaan. Tämä korostaa jätteen energiahyödyntämisen merkitystä globaalissa mittakaavassa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että jätteen energiahyödyntäminen on olennainen osa tulevaisuuden kestäväää energiantuotantoa ja jätehuoltoa. Se tarjoaa ratkaisuja, jotka auttavat vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä, pienentämään jätteen määrää ja tukemaan siirtymää kohti kiertotaloutta. Tämä työ tuo esiin, että jätteenpolttotekniikat ja muut energiahyödyntämismenetelmät ovat tärkeitä osia tätä kokonaisuutta, ja niiden kehittäminen ja käyttö tulisi nähdä osana laajempaa strategiaa kestävään kehityksen ja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

Lähteet

Bolhar-Nordenkampf, M. 2014. Advanced Gasification Technologies for Large Scale Energy Production. Viitattu 19.7.2024. Saatavilla: https://www.researchgate.net/figure/Lahti-gasification-power-plant_fig7_270217511

Ekopartnerit. 2024. ENERGIAJÄTTEET. Viitattu: 29.4.2024. Saatavilla: <https://www.ekopartnerit.fi/lajitteluohjeet/energiajatteet/>

Aulich, T. R., Ness Jr, R. O. 2020. THERMAL DEPOLYMERIZATION OF POSTCONSUMER PLASTICS. U.S. Viitattu 26.7.2024. Saatavilla: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=63444

U.S. Environmental Protection Agency. 2024 A. Learn the Basics of Hazardous Waste. Viitattu. 14.4.2024. Saatavilla: <https://www.epa.gov/hw/learn-basics-hazardous-waste>

U.S. Environmental Protection Agency. 2024 B. Basic Information about Landfill Gas. Viitattu. 12.10.2024. Saatavilla: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>

Euroopan parlamentti. 2023. Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä? Viitattu: 12.7.2024. Saatavilla: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>

Fortum. 2018. Poltettava jäte. Viitattu 31.3.2024. Saatavilla: https://www.fortum.fi/sites/default/files/documents/poltettavajate_riihimaelle_10.1.2018_1.pdf

Fortum. 2024. Carbon2x – kohti uuden sukupolven kierto-taloutta. Viitattu 21.7.2024. Saatavilla: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/kierratys-ja-jatepalvelut/carbo2x>

Fouts, M. 2020. Waste Gasification: How Old Technology Can Solve a Modern Problem. Pennsylvania: Kleinman Center for Energy Policy. Viitattu 19.7.2024. Saatavilla: <https://kleinmanenergy.upenn.edu/news-insights/waste-gasification-how-old-technology-can-solve-a-modern-problem/>

Gasum Oy. 2024. Miten biokaasua tuotetaan? Viitattu 21.7.2024. Saatavilla: <https://www.gasum.com/fi/gasum/tuotteet-ja-palvelut/biokaasu-ja-nesteytetty-biokaasulbg/miten-biokaasua-tuotetaan/>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut a. Hazardous waste. Viitattu 20.7.2024. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/en/waste-and-recycling/waste-guide/sorting/hazardous-waste/>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut b. Sekajäte. Viitattu 18.2.2024. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/jatteet-ja-kierratys/lajittelu/sekajate/>

Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. Pakkanen, H. 1994. Höyrykattilatekniikka. 2. tarkistettu painos. Edita. ISBN: 951-37-1327-X

International Energy Agency. 2021. World total final consumption by source, 1971-2019. Viitattu 27.7.2024. Saatavilla: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-final-consumption-by-source-1971-2019>

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Waste Management. Viitattu 24.7.2024. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg3-chapter10-1.pdf>

Klinghoffer, N. B. Castaldi, J. M. 2013. Waste to Energy Conversion Technology. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN: 978–0–85709–011–9

Lahti Energia. 2023. KYMIJÄRVI II KAASUTUSVOIMALAITOS. Viitattu 7.7.2024. Saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Kymij%C3%A4rvi%20II%20J%C3%A4tteenpolttoasetuksen%2026%20mukainen%20selvitys.pdf>

Lahtonen, A. 2018. Riikinvoiman ekovoimalaitoksen polttoaineen ladunhallinta. AMK-opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Viitattu 31.3.2024. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018060612910>

Bröckl, M. Kiuru, H. Heads, S. Kämäräinen, K. Patronen, J. Luoma-Aho, K. Armila, N. Sipilä, E. Semkin, N. 2021. Jätteenpolton kiertotalous ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjauskeinoin. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia. Viitattu 13.4.2024. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162690/VNTEAS_2021_08.pdf

Mastellone, M. L. 2015. Waste Management and Clean. Waste management and clean energy production from municipal solid waste. New York: Nova Publishers. ISBN: 1–63482–421–0

Motiva. 2021. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Viitattu 13.4.2024. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja

Nummelin, J. Hankalin, V. Raiko, M. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Helsinki: Motiva. Viitattu 2.3.2024. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaa-malammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf

Precedence Research. 2023. Waste to Energy Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034. Viitattu 24.7.2024. Saatavilla: <https://www.precedenceresearch.com/waste-to-energy-market>

Raiko, R. Saastamoinen, J. Hupa, M. Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja Palaminen. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemioiden julkaisut. ISBN 951666-604-3

Ranjbar, S. 2023. Hydrothermal Liquefaction: How the Holistic Approach by Nature Will Help Solve the Environmental Conundrum. *Molecules* 2023, 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28248127>

Ritchie, H. Pablo, R. Roser, M. 2020. Energy Production and Consumption. OurWorldIn-Data. Viitattu 23.7.2024. Saatavilla: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

Shu-Yuan, P. Michael A. D. I-Te, H. I-Hung, L. E-E, C. Pen-Chi, C. 2015. Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. *Vol* 108. 409–421. Viitattu 24.7.2024. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.124>

Siddique, R. 2010. Use of municipal solid waste ash in concrete. *Vol.* 55. 83–91. Viitattu 22.5.2024. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.003>

Sorsa, R. 2009. Syntypaikkalajitellun sekajätteen palamistekniset ominaisuudet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. Viitattu 9.5.2024. Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/52566/nbnfi-fe201001211149.pdf?sequence=3>

Tilastokeskus b. Yhdyskuntajäte. Viitattu 24.4.2024. Saatavilla: <https://stat.fi/meta/kas/yhdyskuntajate.html>

Tilastokeskus. 2022. Yhdyskuntajätteen määrä pysyi edellisvuoden tasolla vuonna 2021 – yhä suurempi osa jätteistä hyödynnettiin energiana. Viitattu 11.2.2024. Saatavilla <https://www.stat.fi/julkaisu/cktwkksr43wo20b61h94063h3>

UN Environment Programme. Open dumping. Viitattu 16.2.2024. Saatavilla: <https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/waste/open-dumping>

Vesanto, P. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. Helsinki: Suomen ympäristö keskus. Viitattu 20.7.2024. Saatavilla: <https://core.ac.uk/download/pdf/14927315.pdf>

Wang, L. K. Mu-Hao, S. W. Yung-Tse, H. Solid Waste Engineering and Management: Vol 1. 1st Edition 2021 Cham: Springer International Publishing AG. ISBN: 3 030 841 782.

Worldbank. 2024. Trends in solid waste management. Viitattu 11.2.2024. Saatavilla https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html

Worrell, E. Reuter, A. M. Handbook of Recycling: State-Of-the-Art for Practitioners, Analysts, and Scientists. 2st ed. San Diego: Elsevier, 2024. ISBN: 978–0–323–85514-3

Yhdistyneet Kansakunnat. 2014. Ympäristön saastuminen – hiljainen tappaja. Viitattu 25.7.2024. Saatavilla: <https://unric.org/fi/ympaeristo-en-saastuminen-hiljainen-tappaja/>

Ympäristöministeriö. 2018. Orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon soveltaminen. VN3347/2018. Viitattu 17.2.2024. Saatavilla: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Orgaanisen-jatteen-kaatopaikkakiellon-soveltaminen-3BBE6023_43F0_44D0_BEFE_AAF4AE464968-138515.pdf/1f31fd19-504d-1f23-d46a-aa34b1fe7e08/Orgaanisen-jatteen-kaatopaikkakiellon-soveltaminen-3BBE6023_43F0_44D0_BEFE_AAF4AE464968-138515.pdf?t=1603260910164