

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Leijukerrostekniikkaratkaisut jätteiden hävittämisessä ja hyödyntämisessä

Fluidized bed technology solutions in waste disposal and utilization

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen

Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

Viitasaari 9.7.2020

Valtteri Liimatainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Valtteri Liimatainen
Kandidaatintyö 2020

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen
Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

28 sivua, 5 kuvaa ja 3 taulukkoa.

Hakusanat: leijukerros, kaasutus, jätteenpolto, PAKU.

Jättemäärien kasvaminen on globaali ongelma, joka vaatii nopeita toimenpiteitä. Jätteen energiahyödyntäminen on tärkeä osatekijä jättemäärän kasvun hillinnässä, sekä fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisessä. Sitä ei kuitenkaan voida pitää oikotienä onneen, vaan se on enemmänkin keino hillitä jo tapahtunutta. Jättemäärän pienentämiseksi ja kestävä kehityksen edistämiseksi tarvitaan toimenpiteitä jätteiden syntylähteillä. Toinen tärkeä keino jättemäärän ja jätteenpolton lopputuloksena syntyvän ylimääräisen pohjakuonan vähentämiseksi on lisätä jätteen kierrätysastetta.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään jätteenpoltoa Suomen näkökulmasta. Tavoitteena on tutkia leijukerrostekniikan käyttömahdollisuuksia energiantuotannossa jätteenpoltoaineilla. Kandidaatintyössä esitellään Suomessa käytössä olevia leijukerrostekniikan sovelluksia ja vertaillaan niiden ominaisuuksia keskenään. Viimeisessä kappaleessa pyritään selvittämään leijukerrostekniikoiden hyöty- ja haittapuolia jätteenpoltoissa. Työ perustuu kirjallisuuslähteistä peräisin olevaan tietoon.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn tavoitteet	7
1.2	Työn rajaukset	7
1.3	Työn rakenne	7
2	JÄTTEENPOLTOSSA KÄYTETTÄVÄT POLTTOAINEET	9
2.1	Suomen jätteenkäsittely	9
2.2	Jätteenpolton polttoaineet	10
2.2.1	Sekajäte	10
2.2.2	Energiajäte	11
2.2.3	Yhdyskuntaliete	11
3	LEIJUKERROSMENETELMÄT JÄTTEENPOLTOSSA	13
3.1	Leijukerrostekniikka	13
3.2	Leijukerrosoltto	15
3.2.1	Kerrosleijupoltto	16
3.2.2	Kiertoleijupoltto	16
3.2.3	Käyttö jätteenpoltossa	17
3.2.4	Riikinvoima Oy, Riikinvoiman ekovoimalaitos	18
3.3	Leijukerroskaasutus	19
3.3.1	Leijukerroskaasutuksen toimintaperiaate	19
3.3.2	Kaasutus jätteenpoltossa	21
3.3.3	Lahti Energia Oy, Kymijärvi II	22
3.4	PAKU-prosessi	22
3.4.1	PAKU-prosessin toimintaperiaate	23
3.4.2	PAKU-prosessi jätteenpoltossa	24
3.4.3	Napapiirin Energia ja Vesi Oy, Alakorkalon lietteenpolttolaitos	24

4 MENETELMIEN VERTAILU	25
4.1 Jätepoltoaineiden hyödyntäminen	25
4.2 Korrosionkesto.....	25
4.3 Toteutus	26
4.4 Oikean sovelluksen valinta	27
5 JÄTTEENPOLTON HYÖDYT JA HAITAT	28
5.1 Energiantuotanto.....	28
5.2 Jätteenpolton päästöt ja niiden hallinta.....	28
5.3 Jätteenpolton tuhka	30
6 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

RDF	refused derived fuel, mekaanisesti käsitelty sekajäte
REF	recovered fuel, mekaanisesti käsitelty energiajäte
MJ	megajoule

1 JOHDANTO

Energiantuotanto jätepolttoaineilla on vahvan kehityksen alla. Jättemateriaalien hävittämistä polttamalla on harjoitettu jo kauan, mutta jätteen varsinainen energiantuotantopotentiaali on jäänyt hyödyntämättä. Toimintametodeja paremman lopputuloksen aikaansaamiseksi kehitetään jatkuvasti. Jätteenpolton suurimpina kompastuskivinä voidaan pitää savukaasujen tarkkaa puhdistustarvetta sekä polttamisesta syntyviä tuhkia.

Kaatopaikat tuottavat noin 3–4 % antropologiseen ilmastonmuutokseen johtavista kasvihuonekaasuista. Onkin huomattu, että jätekasat vievät tilaa ja kaatopaikat aiheuttavat paljon turhia päästöjä. Merkittävä osa kerättävästä sekajätteestä on myös täysin kierrätettävissä olevaa jätettä. Magnetisoimattomien kierrätysmateriaalien kerääminen suurista jättemassoista ei nykytekniikalla ole taloudellisesti kannattavaa. Kierrättämisen jälkeen paras vaihtoehto jättemateriaalin hyödyntämiselle on valjastaa siitä saatava energiasisältö energiantuotantoon. Näin varsinaista loppusijoitettavaa jättemäärää saadaan pienennettyä huomattavasti ja jättemassan mätänemisestä aiheutuvat metaanipäästöt saadaan eliminoitua. Jätepolttoaineella saadaan myös korvattua muita fossiilisia polttoaineita kuten hiiltä ja öljyä. (Vainikka et al. 2011.)

Jätteenpolttoa ei kuitenkaan voida pitää lopullisena ratkaisuna globaaliin vuosittaiseen jättemäärän kasvamiseen. Ongelman ratkaisu lähtee liikkeelle hierarkian ylimmästä kohdasta, eli jättemäärän vähentämisestä ja ehkäisystä. Jättemäärän vähentämisen jälkeen täytyy pohtia miten jätteen uusiokäyttöä, lajittelua ja sitä kautta kierrätysastetta saadaan nostettua. Yksilöllä on suuri valta näiden asioiden edistämässä ja jokainen voi omilla valinnoillaan osaltaan vaikuttaa esimerkiksi kierrätysasteen kehityskulkuun. Vasta näiden toimenpiteiden jälkeen tulee harkita energiantuotantoa jätteen avulla. Jätevoimalat ovat siis vain osa isomman ongelman ratkaisua. Kuvassa 1 nähdään Euroopan komission näkemys jätehierarkiasta. Muulla talteenotolla viitataan tässä tapauksessa esimerkiksi energiantuotantoon jättemassalla.



Kuva 1. Euroopan komission näkemys jätehierarkiasta (Euroopan komissio 2017, 3, muokattu).

1.1 Työn tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on muodostaa lukijalleen kuva Suomessa käytössä olevista jätettä polttavista leijukerrossovelluksista ja niiden toimintaperiaatteista. Tavoitteena on myös kantaa ottamatta esitellä faktoja jätteenpolton hyödyistä ja haitoista.

1.2 Työn rajaukset

Kandidaatintyössä pääpaino on leijukerrostekniikoiden sovellusten esittelyssä ja analysoinnissa. Aiheen laajuuden vuoksi intressi on Suomessa toimivissa laitoksissa. Tarkastelu perustuu puhtaasti kirjallisuuslähteistä peräisin olevaan tietoon.

1.3 Työn rakenne

Tässä kandidaatintyössä esitellään ensimmäiseksi Suomessa poltettavia jätteenpoltoaineita. Kappaleessa kolme syvennyttään tarkemmin leijukerrostekniikkaan ja arvioidaan kirjallisuuslähteiden perusteella eri sovellusten kyvykkyksiä jätteenpoltoaineiden

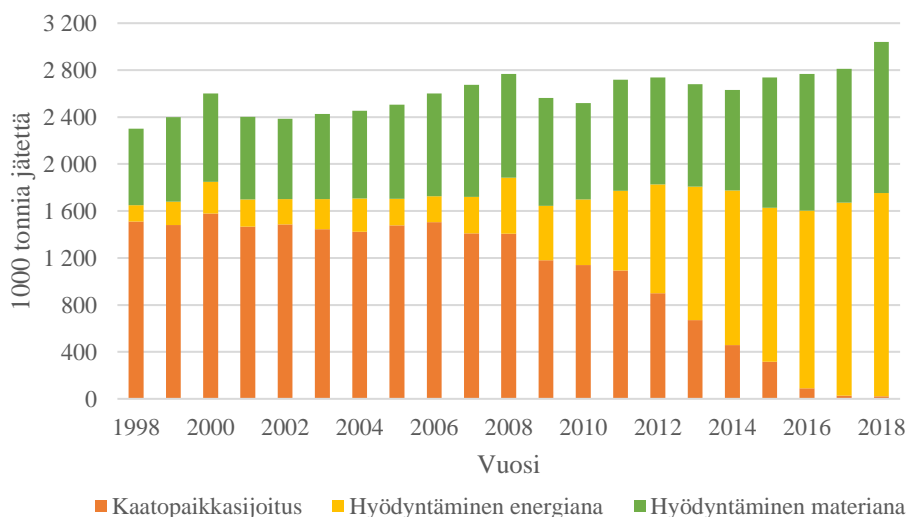
polttamiseen. Kappaleessa myös käydään läpi miksi leijukerrostekniikka on hyvä vaihtoehto jätepolttoaineen hyödyntämiseen. Tekniikoiden esittelyjen jälkeen on vuorossa vertailuosio, jossa eri sovellusten hyviä ja huonoja puolia vertaillaan keskenään. Lopuksi tutkitaan vielä yleisesti jätteenpolton hyviä ja huonoja puolia leijukerrostekniikan näkökulmasta.

2 JÄTTEENPOLTOSSA KÄYTETTÄVÄT POLTTOAINEET

Kappaleessa käsitellään Suomen jätepolitiikkaa, jätteenpoltossa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia ja pohditaan lähteisiin vedoten niiden soveltuvuutta leijukerrostekniikkaa hyödyntävän voimalaitoksen polttoaineeksi.

2.1 Suomen jätteenkäsittely

Vuonna 2010 lähes puolet suomalaisten yhdyskuntajätteistä päätyi vielä loppusijoitukseen kaatopaikalle. Jätteen kaatopaikkasijoituksesta pyrittiin kuitenkin eroon ja vuonna 2013 valtioneuvosto antoi uuden asetuksen kaatopaikoista (331/2013). Uuden asetuksen tavoitteena on lisätä jätteen kierrätystä ja energiakäyttöä, sekä vähentää sen loppusijoitusta kaatopaikalle. Kaatopaikalle ei saa viedä jätettä, jonka orgaanisen hiilenkokonaismäärä tai hehkutushäviö on yli 10%. Asetuksella pyritään siis samalla myös hillitsemään kaatopaikkojen orgaanisen materiaalin hajoamisesta aiheutuvia metaanipäästöjä. Alla olevaa kuvaajaa tarkastelemalla voidaan todeta, että tavoitteeseen on selkeästi päästy. Tilastokeskuksen tietojen mukaan vuonna 2018 enää noin 1 % Suomen yhdyskuntajätteistä päätyi kaatopaikalle.



Kuva 2. Suomen yhdyskuntajätteen määrät käsittelytavoittain vuosina 1998–2018 (Suomen virallinen tilasto 2020).

2.2 Jätteenpolton polttoaineet

Tässä kappaleessa tutkitaan eri jätelajien kelpoisuutta energiantuotannon polttoaineeksi ja pohditaan, onko kyseisen jätelajin energiasisällön hyödyntäminen mahdollista leijukerrostekniikkaan perustuvalla voimalaitoskattilalla.

2.2.1 Sekajäte

Sekajätteellä tarkoitetaan sekalaista kierrätyskelvotonta loppujätettä. Sekajätteen määrää voidaan vähentää huomattavasti nykyisestä oikeaoppisella jätteenlajittelulla. HSY:n tekemän selvityksen mukaan pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteestä 76,2 % on sellaista jätettä, joka olisi voitu lajitella kierrätykseen. Tämä saa aikaan sen, että sekajäte on sisällöltään hyvin ennalta-arvaamatonta ja se voi sisältää paljon epäpuhtauksia ja palamatonta materiaalia kuten lasia ja metallia. Polttoprosessin jälkeen kierrätyskelvoisten metallien ja lasien erottaminen tuhkamassasta on vaikeaa tai jopa mahdotonta. (HSY 2018.)

Sekajätteen energiasisältö on perinteisesti hyödynnetty arinapolttotekniikalla. Arinapoltoissa polttoaine sijoitetaan liikkuvalle tai kiinteälle arinalle, jossa se poltetaan. Arinakattilassa palaminen on jaettu eri vaiheisiin, jotka ovat polttoaineen kuivuminen ja lämmitys, polttoaineen kaasuuntuminen ja kiinteän polttoaineen palaminen. Palamisesta aiheutuva tuhka poistetaan arinan pohjalta. Arinakattilan etuina jätteenpoltoissa ovat sen yksinkertainen rakenne ja kyky polttaa epäpuhtauksia sisältävää jätettä. (Huhtinen et al. 2008, 35–36.)

Leijukerrostekniikkaa hyödyntävät ratkaisut ovat myös vaihtoehto sekajätteen polttamiselle. Leijutusprosessin luonteen vuoksi leijukerroskattilat ovat myös tarkempia polttoaineen raekoosta ja laadusta. Sekajätteestä saadaan mekaanisella käsittelyllä tehtyä koostumukseltaan ja laadultaan tasaisempaa polttoainetta, jolloin sen käyttäminen herkemmissä leijukerroskattilassa on mahdollista. Tätä mekaanisesti käsiteltyä sekajätettä kutsutaan RDF:ksi. Lyhenne RDF tulee englannin kielen sanoista refused derived fuel, joka vapaasti suomennettuna tarkoittaa jätteestä johdettua polttoainetta. Sekajätteen leijukerrospolton haittapuolena voidaan pitää noin 60% saantoa alkuperäisestä polttoaineesta mekaanisen käsittelyn jälkeen. Jätepolttoaineen hyödyntäminen tapahtuu vaihtelevan laadun vuoksi jonkun vakaan polttoaineen, kuten puun kanssa rinnakkaispoltona. Jätteen laadusta riippuen sen osuus polttoaineesta voi olla jopa muutamia kymmeniä prosentteja. (Myllymaa et al. 2008, 36; Vesanto et al. 2006, 35.)

2.2.2 Energiajäte

Energiajäte on ennen keräämistä lajiteltua jätettä, joka on erikseen tarkoitettu poltettavaksi. Energiajätteeksi soveltuvat esimerkiksi kyllästämätön puu, muovi, erilaiset kuitumateriaalit, sekä muut palavat materiaalit, joita ei ole mahdollista kierrättää. Energiakäyttöön tuleva jättepolttoaine on laadultaan hyvin vaihtelevaa. Laadunvaihtelut aiheutuvat jätteen materiaalisäällön vaihteluista, tämä taas puolestaan riippuu suuresti jätteen tuottajasta. Alapuolella Suomen keskimääräinen energiajätteen koostumus. (Salmenperä et al. 2015, 150.)

Taulukko 1. Keskimääräinen energiajätteen koostumus (Salmenperä et al. 2015, 150).

Jätejake	Massa-%
Muovi	33
Paperi/kartonki	46
Puu	4
Muu palava	2
Epäpuhtaudet	15

Leijukerroskäyttöä varten polttoaine täytyy esikäsitellä, kuten sekajätteen tapauksessakin. Energiajätteestä tehtyä jättepolttoainetta kutsutaan REF:ksi. REF eli recovered fuel on lämpöarvoltaan parempaa kuin RDF ja sillä päästään korkeampaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen. (Myllymaa et al. 2008, 68.)

2.2.3 Yhdyskuntaliete

Yhdyskuntalietteellä tarkoitetaan jätevedenpuhdistamojen tuottamaa lietettä. Lietettä syntyy, kun jätevesiä puhdistessa vedestä erotetaan ylimääräinen aines. Yhdyskuntaliete sisältää ympäristölle haitallisia yhdisteitä, kuten raskasmetalleja, taudinvälittäjiä ja mikromuoveja. Tämän vuoksi lietteenkäsittelyssä on oltava tarkkana. Suomessa jätevesilietettä on arvioitu syntyvän noin miljoona kuutiota vuodessa. Tämä vastaa kuivapainoltaan noin 160 000 tonnia. (Endev 2017a; Laitinen et al. 2014, 9.)

Lietettä voi kuitenkin kaikesta huolimatta käyttää hyviin tarkoituksiin. Se sisältää orgaanisia aineita, joiden energiasäällön voi valjastaa energiantuotantoon. Kaksi yleisintä lietteeseen perustuvaa energiantuotantotapaa ovat mädätys ja polttaminen. (Kangas 2011, 14.)

Mädätyksessä lietteestä mädätetään orgaanista ainesta biokaasuksi, joka voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoksella sähkön ja lämmön tuotantoon. Helppo ratkaisu biokaasun polttamiseen on kaasukattila, sillä se on helppokäyttöinen ja toimintavarma. (Kangas 2011, 14.)

Lietteestä voi tuottaa energiaa myös suoraan polttamalla. Polttamalla tuotettu energiamäärä riippuu lietteen kosteudesta, sen sisältämän orgaanisen aineen määrästä sekä polttoprosessin säädyistä. Liette sopii sellaisenaan kuivattuna leijukerrostekniikkaa käyttävän voimalaitoksen polttoaineeksi. Liette polttamiselle on myös kehitetty täysin omia leijukerrosratkaisuja. Yksi esimerkki on tässä työssä myöhemmin läpi käytävä PAKU-prosessi, jossa liete kuivataan yli 95% kuiva-ainepitoisuuteen ennen polttoa. (Endev 2017a; Kangas 2011, 15.)

3 LEIJUKERROSMENETELMÄT JÄTTEENPOLTOSSA

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin erilaisia jätteenpoltoissa käytössä olevia leijukerrostekniikkaa hyödyntäviä menetelmiä. Yhteensä tässä työssä käsitellään kolme erilaista leijukerrostekniikan sovellusta jätteenpoltoissa. Sovelluksesta käydään ensin läpi lyhyt teoriaosuus, jonka jälkeen arvioidaan sovelluksen kyvykkyyttä jätteenpoltoon. Jokaisesta sovelluksesta esitellään myös Suomessa käytössä oleva kyseistä menetelmää hyödyntävä voimalaitos. Myöhemmän asian ymmärtämiseksi on kuitenkin tärkeää ymmärtää mitä leijukerrostekniikalla tarkoitetaan. Selvitetään se seuraavaksi.

3.1 Leijukerrostekniikka

Leijukerrostekniikalla tarkoitetaan energiatekniikassa polttoaineen energiasisällön hyödyntämismetodia, jossa polttoaine reagoi tulipesässä leijutettavan petimateriaalin seassa. Useimmiten suuri osa petimateriaalista on prosessissa palaneen polttoaineen tuhkaa. Tuhkan lisäksi petimateriaalina käytetään esimerkiksi hiekkaa, kalkkikiveä tai niiden sekoitusta. Petimateriaali toimii leijukerrostekniikassa lämmön välittäjäaineena, polttoaineen leijutusmateriaalina ja polttoaineen kuivurina. Leijukerrostekniikka soveltuu hyvin huonolaatuisten polttoaineiden polttoon ja sen käyttö mahdollistaa nopeat ja suuret polttoaineen laadunvaihtelut. Tämä on erityisen tärkeä ominaisuus, kun poltetaan esimerkiksi lämpöarvoltaan epästabiilia jätettä. (Raiko et al. 2002, 490; Vesanto et al. 2006, 31–32.)

Tärkeä käsite leijukerrostekniikassa on minimileijutusnopeus. Leijukerrostekniikassa puhalletaan leijutuskaasua pedin pohjaan tietyllä virtausnopeudella. Pienellä virtausnopeudella petimateriaali on patjana tulipesän pohjalla. Kasvatettaessa virtausnopeutta tulee vastaan piste, jolloin petiin syöksyvä kaasu kohdistaa pedin materiaalishiukkaseen maan vetovoimaa vastaavan nostovoiman. Tällöin peti alkaa leijua. Minimileijutusnopeus kertoo pienimmän leijutuskaasun virtausnopeuden, jolla petimateriaali alkaa leijua. (Huhtinen 2004, 154.)

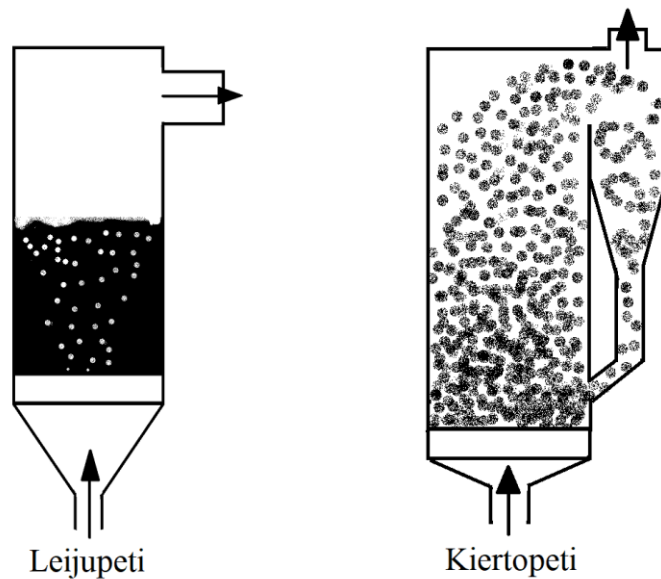
Leijutusmenetelmät voidaan jakaa kahteen perustyyppiin. Jaottelu perustuu leijutuskaasun virtausnopeuteen. Pienellä virtausnopeudella puhutaan kerrosleijutuksesta ja leijupedistä, tällöin petimateriaali ja polttoaine kuplivat tulipesän alaosassa. Suurella leijutusnopeudella puhutaan puolestaan kiertoleijutuksesta ja kiertopedistä. Leijutuskaasun suuremman

virtausnopeuden vuoksi petimateriaalin ja polttoaineen seos tempautuu osittain savukaasujen mukaan. (Huhtinen et al. 2008, 36.)

Leijutuskaasun virtausnopeuden ylittäessä pedin minimileijutusnopeuden peti alkaa kuplia. Tätä kuplimista kutsutaan kerrosleijutukseksi tai kuplapediksi. Kupliminen aiheutuu, kun ylimääräinen kaasumäärä tunkeutuu väkisin petimateriaalin läpi muodostaen kuplia. Leijutusmateriaalin partikkelikokona on yleensä käytössä noin 1 millin halkaisija (Raiko et al. 2002, 500). Eri lähteissä on annettu hieman toisistaan eroavia raja-arvoja kerrosleijutuksen leijutusnopeudelle. Basu esittää kerrosleijukattilan leijutuskaasun nopeudeksi 1–2 m/s (Basu 2010, 210), Huhtinen 0,7–2 m/s (Huhtinen et al. 2004, 159) ja Raiko puolestaan 1–3 m/s (Raiko et al. 2002, 490). Nämä ovat kuitenkin suuntaa antavia arvoja ja todelliset rajat ovat monen eri tekijän summa. Esimerkiksi petimateriaalin pyöreys ja raekoko vaikuttavat leijutilan toteutumiseen. Matalalla leijutusnopeudella petimateriaali ja polttoaine pysyvät tulipesässä, eivätkä tarraudu leijutusilman mukana savukaasukanavaan. (Raiko et al. 2002, 490.)

Kiertoleijutuksessa eli kiertopedissä petimateriaalin leijutusnopeus on suurempi ja petimateriaali on hienojakoisempaa kuin kerrosleijutuksessa. Kiertoleijutuksessa käytössä oleva partikkelikoko on halkaisijaltaan 0,1–0,5 mm. Suurempi leijutusnopeus ja pienempi partikkelikoko saavat leijutuskaasun nopeuden ylittämään petipartikkelien lento-ohjauksen nopeuden, ja partikkelit lähtevät kulkeutumaan leijutuskaasun mukana. Tämän vuoksi kiertoleijutekniikkaa hyödyntävissä laitoksissa täytyy petiosuuden jälkeen olla kuvassa 3 esiintyvä hiukkaserotin, jonka tehtävänä on erottaa petimateriaalihiukkaset savukaasujen joukosta. Hiukkaserotin mahdollistaa savukaasujen johtamisen eteenpäin ja petimateriaalin palauttamisen petiin. Kiertopedin tiheys pienenee mentäessä ylöspäin ja selkeää pedin yläreunaa ei voida turbulenttien olosuhteiden takia havaita. (Huhtinen et al. 2004, 159.)

Kuvassa 3 esitetään kupla- ja kiertopedin toimintaperiaatteet. Leijutuskaasu puhalletaan pedin pohjaan ja savukaasut poistetaan pesän yläosasta. Kiertopedin periaatekuvassa havaitaan ennen savukaasujen poistoa ympyräkartion muotoinen hiukkaserotin, jonka tehtävänä on erottaa savukaasut ja petimateriaali toisistaan.



Kuva 3. Leiju- ja kiertopedin toimintaperiaatteet (Huhtinen 2004, 154, muokattu).

Leijukerrostekniikan sovelluksissa on oltava tarkkana petilämpötilojen kanssa. Liian suuri petilämpötila johtaa helposti suuriin ongelmiin ja kattilan alasajoon. Suurin rajoittava tekijä petilämpötilalle on leijutusmateriaalin ja polttoaineen tuhkan agglomeraatio. Agglomeraatiota eli petimateriaalin yhteen liimaantumista pääsee tapahtumaan, mikäli poltettavan polttoaineen tuhka pääsee sulamaan ja näin reagoimaan leijutusmateriaalin kanssa. Pahimmassa tapauksessa niin suuri osa pedistä liimaantuu yhteen, että ei ole muuta vaihtoehtoa kuin ajaa kattila alas puhdistustoimenpiteitä varten. Agglomeraatiota voidaan välttää pitämällä leijutusmateriaalin tuhkapitoisuus riittävän alhaisena ja vaihtamalla petimateriaalia tarpeeksi lyhyin väliajoin. Petilämpötila saattaa joskus nousta yllättäen, kun esimerkiksi käytössä oleva polttoaine onkin odotettua kuivempaa. Tämän vuoksi kattiloissa on usein pedin jäähdytysjärjestelmä, joka on toteutettu esimerkiksi vesiruiskutuksella tai savukaasujen kierrätyksellä. (Huhtinen et al. 2004, 158; Raiko et al. 2002, 287.)

3.2 Leijukerros poltto

Ensimmäisenä leijukerrostekniikan sovelluksena esitellään leijukerros poltto. Leijukerros poltto on mahdollista sekä kerrosleiju- että kiertoleijukattilalla. Leijukerros poltto on syrjäyttänyt arinapolttotekniikan lähes kokonaan yli 20 MW:n tehoilla (Huhtinen et al. 2008, 36).

3.2.1 Kerrosleijupoltto

Kerrosleijukattilaan ajetaan lähteestä riippuen 10–40 % yli-ilmaa täydellisen palamisen varmistamiseksi. Polttoaine syötetään kattilaan pedin päälle useasta eri kohdasta paremman sekoittumisen varmistamiseksi. Pedin suuri lämpökapasiteetti mahdollistaa kosteidenkin polttoaineiden käytön kattilassa. Lämpökapasiteetti myös tasaa hyvin polttoaineen mahdollisia laadunvaihteluja. Kuplivan leijukerrospolton etuna kiertoleijupolttoon nähden on sen yksinkertaisuus ja siten halvempi hinta. (Huhtinen et al. 2004, 157; Raiko et al. 2002, 490–491.)

Ennen pääpolttoaineen syöttöä peti on lämmitettävä vähintään 500–600 °C lämpötilaan palamisprosessin aloittamiseksi. Leijupetikattilassa voidaan polttaa samanaikaisesti useampaa eri polttoainetta. Parhaiten palavat runsaasti haihtuvia aineita sisältävät lyhyen palamisajan polttoaineet, kuten teollisuusjätteet ja lietteet. Palamisen tarvitsema happi viedään kattilaan osittain leijutusilman mukana. Loppu palamisilma puhalletaan sekundääri-ilmana leijupedin päälle. Leijupetikattiloilla on yleisesti melko laaja tehonsäätöalue. Minimitehon rajoittavina tekijöinä ovat minimileijutusnopeus ja tarvittavan pedin lämpötilan säilyttäminen. Maksimitehon rajoittavina tekijöinä ovat petimateriaalin karkaaminen, palamattoman polttoaineen lisääntyminen ja pedin lämpötilan nousu. (Huhtinen et al. 2004, 157–159.)

3.2.2 Kiertoleijupoltto

Kiertoleijupoltossa kattilaan ajetaan lähteestä riippuen 10–30% yli-ilmaa. Kiertopetikattila tarvitsee toimiakseen hiukkaserottimen. Hiukkaserotin päästää savukaasut ja pienet hiukkaset jatkamaan savukaasukanavaan, suurempien hiukkasten palatessa petiin. Hiukkaserottimena käytetään usein sykklonia. Sykloni vaatii toimiakseen nopean savukaasujen virtauksen. Syklonin erotuskyky huononee sen halkaisijan kasvaessa ja yli kahdeksan metrin halkaisijan omaavia sykloneja ei yleensä rakenneta. Mikäli yksi sykloni ei riitä kattilan tarpeille, voidaan niitä laittaa useampi vierekkäin. (Huhtinen et al. 2004, 159.)

Kiertoleijupolton etuna kerrosleijupolttoon verrattuna on kyky polttaa myös vähän haihtuvia aineita sisältäviä polttoaineita hyvällä hyötysuhteella. Hiukkaserottimen ansiosta osittain palamattomat polttoainepartikkelit palaavat tulipesään mahdollistaen tarpeeksi pitkän palamisajan. Polttoaineen syöttö kattilaan tapahtuu joko suoraan pedin sekaan, tai

vaihtoehtoisesti hiukkaserottimen palautusputkeen. Hiukkaserottimen palautusputkessa ennen petiä sijaitsee myös kaasulukko, jonka tarkoituksena on estää savukaasujen virtaus tulipesästä hiukkaserottimen palautusputkeen. Kaasulukon yhteyteen on mahdollista sijoittaa höyryn tulistukseen tai mahdollisesti myös veden höyrystämiseen käytettäviä lämmönsiirtopintoja. Sovelluksesta riippuen petimateriaalin liikettä kaasulukon yli ohjataan esimerkiksi paineilmalla. (Huhtinen et al. 2004, 160–162; Raiko et al. 2002 490–491, 518.)

Kiertoleijukattilassa täytyy varoa leijukerroskattilan tavoin pedin agglomeraatiota. Kiertoleijukattilassa suurin agglomeraation vaara on hiukkaserottimessa ja sen palautusputkessa. Hiukkaserotin erottaa tehokkaasti suuremmat tuhka hiukkaset savukaasuista ja palauttaa ne pedin pohjalle. Tuhka hiukkasten sulamispisteen ylittyessä ovat palautusputki ja varsinkin kaasulukko ihanteellisia paikkoja pedin sintraantumiselle. Hiukkaserottimen palautusputken tukkeutuessa on kattila pakko ajaa alas. (Raiko et al. 2002, 287.)

3.2.3 Käyttö jätteenpoltossa

Jätteenpoltossa on käytössä sekä kerrosleiju- että kiertoleijupolttoa hyödyntäviä kattiloita. Petimateriaalina on yleisesti käytössä hiekkaa, mutta petiin voidaan syöttää myös muita lisäaineita käytössä olevan polttoaineen materiaalisisällön perusteella. Lisäaineita käytetään esimerkiksi edellä mainitun petimateriaalin agglomeraation estämiseksi. Toinen petimateriaalin valintaan vaikuttava tekijä on polttoaineen poltosta aiheutuvat päästöt. Mikäli polttoaine esimerkiksi sisältää paljon rikkiä, voidaan petiin ajaa kalkkikiveä tai muuta kalsiumyhdistettä rikkipäästöjen sitomiseksi lentotuhkaan, jolloin ne on mahdollista suodattaa pois. Jätteen leijukerros poltossa petimateriaali siis koostuu hiekasta, mahdollisista lisäaineista ja tuhkasta. Poltettaessa jätettä tuhkan osuus saattaa olla suurikin. Petiä poistetaan jatkuvasti kattilan pohjasta petimateriaalin ominaisuuksien pitämiseksi stabiilina. Samalla saadaan poistettua pedistä jättemateriaalin sisältämiä palamattomia epäpuhtauksia, kuten metalli- ja lasikappaleita. (Raiko et al. 2002, 352; Vesanto et al. 2006, 31–32.)

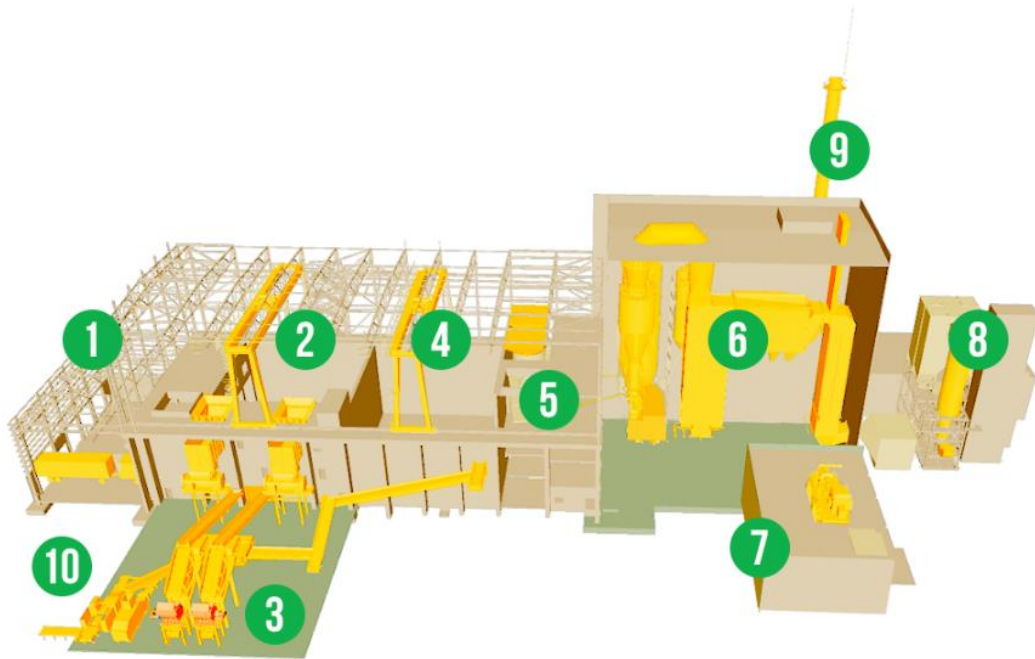
Poltettaessa jättemateriaalia on tärkeää myös huomioida jättemateriaalien epäpuhtauksien vaikutus polttoprosessiin. Epäpuhtaudet aiheuttavat leijukerroskattilassa esimerkiksi haitallista korroosiota. Jätteenpoltossa käytössä olevat kerrosleijukattilat suunnitellaankin yleensä noin 400 °C höyrynlämmöille korroosion minimoimiseksi. Kiertoleijukattilalla

päästään jätteenpoltossa kerrosleijukattilaa korkeampiin höyrynarvoihin, sillä kiertoleijukattilan kaasulukkoon voidaan sijoittaa leijukerroslämmönsiirtoon perustuva höyryn tulistin. Kaasulukkossa oleva tulistin sijaitsee hiukkaserottimen palautusputken jälkeen juuri ennen petiä. Koska tulistinta lämmittää petimateriaali eivätkä savukaasut, ovat esimerkiksi kloorikorroosion vaikutukset vähäisempiä. Kaasulukkoon sijoitettava tulistin mahdollistaa näin höyryn tulistuksen kuumemmaksi kuin kerrosleijukattilalla. (Vesanto et al. 2006, 32; Raiko et al. 2002, 518.)

Jätteenpoltossa on huolehdittava syntyvien savukaasujen huolellisesta puhdistuksesta. Tulipesästä poistuttuaan savukaasuja jäähdytetään, jotta mahdollisimman suuri osa jätteen sisältämistä epäorgaanisista materiaaleista ja höyrystyneistä metalleista saataisiin kiinteään muotoon. Näin vähennetään poltosta syntyvien korrosoivien aineiden vaikutusta savukaasukanavassa sijaitseviin höyryn tulistinlämmönsiirtopintoihin. Kiinteässä olomuodossa olevat epäpuhtaudet ovat myös helpompia suodattaa savukaasuista pois. Mikäli savukaasujen sisältämää rikkiä ja klooria ei saada poistettua suodatusprosessissa, ei savukaasuja voi kuitenkaan jäähdyttää liikaa savukaasukanavistossa. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuvat tällöin rikki- ja kloorikastepisteet. Rikin ja kloorin yhdisteet aiheuttavat korroosiota savukaasuputkistoon nopeallakin aikavälillä. Mikäli rikin ja kloorin yhdisteitä ei saada poistettua tehokkaasti suodattamalla, on suodatusprosessin perässä vielä erillinen savukaasupesuri niiden poistamiseksi. (Vesanto et al. 2006, 32.)

3.2.4 Riikinvoima Oy, Riikinvoiman ekovoimalaitos

Leijukerrospolton esimerkkilaitoksena käytetään Riikinvoiman ekovoimalaitosta. Riikinvoiman ekovoimalaitos sijaitsee Leppävirralla, Pohjois-Savossa. Voimalaitoksella poltetaan esikäsiteltyä jätettä kiertopetikattilalla. Polttoaineteho voimalaitoksella on 54 megawattia. Voimalaitos on CHP-tyyppinen, eli se tuottaa sekä kaukolämpöä, että sähköä. Voimalalla tuotettu sähkö riittää vuodessa noin 4300 omakotitalon tarpeisiin ja kaukolämpö puolestaan 10 000 omakotitalon lämmittämiseen. Alapuolella olevassa kuvassa esitetään Riikinvoiman ekovoimalaitoksen periaatekuva. (Riikinvoima 2020.)



Kuva 4. Riikinvoiman ekovoimalaitoksen periaatekuva (Riikinvoima 2020).

Taulukossa 2 avataan kuvassa 4 esiintyvien numeroiden merkitys.

Taulukko 2. Kuvan 4 numeroinnin selitykset (Riikinvoima 2020).

Numero	Selitys	Numero	Selitys
1.	Jätteen vastaanotto	6.	Kiertopetikattila
2.	Saapuneen jätteen varasto	7.	Höyryturbiini ja kaukolämmönvaihtimet
3.	Jätteenkäsittelylaitteisto	8.	Savukaasun puhdistuslaitteisto
4.	Käsitellyn jätteen varasto	9.	Piippu
5.	Polttoaineen syöttölaitteisto	10.	Käsitellyn jätteen paalaus

3.3 Leijukerroskaasutus

Käsitellään seuraavaksi kaasutusprosessia ja sen soveltamista jätteen energiahyödyntämisessä. Kaasuttimet voidaan jakaa toimintaperiaatteensa perusteella kolmeen eri ryhmään, kiinteäkerros-, pöly- ja leijukerroskaasuttimiin. Tässä työssä keskitytään leijukerroskaasutukseen.

3.3.1 Leijukerroskaasutuksen toimintaperiaate

Kaasutuksen tavoitteena on muodostaa kaasutusreaktoriin vietävästä polttoaineesta palavia kaasuja, kuten häkää ja vetyä. Kaasutuksen tuloksena syntyvä palavien kaasujen seos,

tuotekaasu, viedään kaasutusreaktorilta suodatuksen kautta eteenpäin hyödynnettäväksi esimerkiksi voimalaitoskattilassa. Polttoaine voidaan kaasuttaa joko osittain tai kokonaan, keskitytään nyt tarkastelemaan leijukerrostekniikalla toimivaan polttoaineensa kokonaan kaasuttavaa kaasutusreaktoria. (Huhtinen 2004, 179.)

Leijukerroskaasutuksen suurin ero leijukerrospoltoon on palamiselle annettu ilmamäärä. Kun polttoprosessissa kattilaan ajetaan aina hieman enemmän ilmaa kuin mitä stökiometrinen palaminen tarvitsee, kaasutusreaktorissa ilmamäärä on reilusti alle täydelliseen palamiseen vaaditun määrän. Kaasutettaessa biomassaa tyypillinen ilmakerroin on noin 0,2–0,3, kun stökiometriseen palamiseen tarvittava ilmakerroin on 1 (Basu 2010, 195). Kaasutusreaktori voidaan toteuttaa sekä kerrosleiju- että kiertoleijutekniikalla. Kaasutusprosessin tarvitsema happi voidaan tuoda kaasutusreaktoriin esimerkiksi ilman seassa tai puhtaana happikaasuna. (Huhtinen 2004, 180.)

Kaasutus vaatii toteutuakseen endotermisiä, eli energiaa sitovia reaktioita. Tämän vuoksi osa kaasutusreaktoriin syötetystä polttoaineesta palaa jo kaasuttimessa kuluttaen saatavilla olevan hapen. Palamisen tuloksena syntyvä lämpö käytetään leijukerroskaasuttimen pedin lämpötilan ylläpitämiseen ja sitä kautta näiden endotermisten kaasuuntumisreaktioiden toteuttamiseen. Pedin lämpötilaa säädellään polttoaineen ja kaasutusilman annostelulla. Leijukerroskaasutuksessa on leijukerrospolton tavoin pidettävä petilämpötila suhteellisen alhaisena tuhkan sulamisvaaran vuoksi. Tyypillisesti petilämpötila on noin 800–1000 °C. (Huhtinen et al. 2004, 180–181.)

Leijukerroskaasutuksessa käytettävän polttoaineen partikkelikoko voi vaihdella. Leijutusmateriaalina voidaan käyttää samoja materiaaleja kuin leijukerrosoltossakin. Leijukerroskaasutin soveltuu hyvin laadultaan vaihtelevalle polttoaineelle hyvän sekoittumisen ja tasaisen lämpötilajakauman ansiosta. (Huhtinen et al. 2004, 181.)

Ilmakaasutuksessa tuotekaasun lämpöarvo on tyypillisesti matala, 3–7 MJ/m³. Lämpöarvoa laskee kaasutusilman mukana tuleva inertti typpi. Happikaasutuksella puolestaan päästään parempiin lämpöarvoihin, tyypillisesti tuotekaasun lämpöarvo on tällöin noin 7–15 MJ/m³. Happikaasutusprosessin toteuttaminen on puolestaan haastavampaa sen tarvitessa kalliin hapenerotuslaitteiston. (Raiko et al. 2002, 568–569).

Kaasutusprosessi voidaan toteuttaa myös epäsuoralla lämmöntuonnilla. Epäsuoran lämmöntuonnin tavoitteena on muodostaa keskilämpöarvoista tuotekaasua ilman kallista hapenerotuslaitteistoa. Epäsuorassa lämmöntuonnissa leijutuskaasuna käytetään esimerkiksi tulistettua vesihöyryä tai kierrätettyä tuotekaasua. Epäsuora lämmöntuonti voidaan toteuttaa esimerkiksi tuomalla lämpö vieressä olevasta leijukattilasta kuuman petimateriaalin muodossa. Tällöin puhutaan kaksoisleijukerroksesta. Toinen vaihtoehto on polttaa jäännöshiiltä tai osa polttoaineesta erillisessä kattilassa ja johtaa poltosta syntyvät savukaasut kaasutusreaktorissa sijaitsevien lämmönvaihdinputkien läpi. Tätä menetelmää kutsutaan tuliputkikaasutukseksi. Epäsuoraa lämmöntuontia käytetään kohteissa, joissa matalalämpöarvoinen tuotekaasu ei ole vaihtoehto. (Raiko et al. 2002, 569.)

3.3.2 Kaasutus jätteenpoltossa

Kaasutus on hyvä vaihtoehto jätteen energiasisällön hyödyntämiseksi. Kaasutusprosessin luonteen vuoksi jätemateriaali täytyy kuitenkin saada käsiteltyä partikkelikooltaan pieneksi kaasuuntumisprosessin tehostamiseksi.

Leijukerrospoltoissa jätteen sisältämät epäpuhtaudet siirtyvät savukaasuihin. Kaasutusprosessissa nämä epäpuhtaudet siirtyvät kaasutusreaktorissa tuotettuun tuotekaasuun. Nämä epäpuhtaudet ovat pääosin jätemateriaalien kaasumaisia reaktiotuotteita, kuten rikkivetyjä, suolahappoa, ammoniakkaa ja höyrystyneitä metalleja. Ennen kaasun varsinaista polttoa se kannattaa puhdistaa. Puhdistamalla kaasua estetään korroosiota aiheuttavien ainesosien pääsy kaasun jatkokäyttökohteeseen. (Raiko et al. 2002, 575.)

Kaasutuskaasun puhdistusmenetelmiä on kehitetty useita erilaisia. Ne voidaan kuitenkin jakaa toimintaperiaatteensa perusteella kahteen pääryhmään: kylmiin märkäpuhdistusmenetelmiin ja kuumiin kuivapuhdistusmenetelmiin.

Poistuessaan leijukerroskaasutusreaktorista tuotekaasu on noin 750–850 celsiusasteen lämpötilassa. Kaasun suodattamiseksi sitä täytyy jäähdyttää. Jäähdyttämällä tuotekaasua sen sisältämät kaasumaiset epäpuhtaudet saadaan jäähtymään hiukkasmaiseen olomuotoon, jolloin niiden poistaminen kaasusta on helpompaa. Jäähdytettäessä kaasua on myös mahdollista hyödyntää sen sisältämää lämpöenergiaa energiantuotannossa. (Raiko et al. 2002, 574.)

Kuivapuhdistusmenetelmissä jäädytetty tuotekaasu suodatetaan esimerkiksi metallisilla tai keraamisilla suodattimilla. Suodatuksen tavoitteena on poistaa tuotekaasusta kiinteytyneet raskasmetallit, reagoimattomat hiilet ja tuhkakomponentit. Kaasumaisten alkalimetallien kuivasuodatus edellyttää tuotekaasun jäädytystä 400–600 celsiusasteeseen. Tällöin kaasumaiset metallit muuttuvat suurimmilta osin takaisin hiukkasiksi ja niiden poistaminen kaasusta on mahdollista. Toinen vaihtoehto kaasun puhdistamiselle on märkäpesuritekniikka. Märkäpuhdistus toimii kuivapuhdistusta matalammilla lämpötiloilla, yleensä alle 150 °C. Märkäpuhdistuksessa haitalliset aineet siirtyvät savukaasuista pesuveteen. Märkäpuhdistuksen haittapuolena verrattuna kuivasuodatukseseen on monimutkaisempi tekniikka ja tarve tehokkaalle jätevedenpuhdistamolle. (Raiko et al. 2002, 574–575.)

Suodatuksen jälkeen tuotekaasu on valmista käytettäväksi. Jätteestä tuotettu kaasu voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoskattilan polttoaineena. Huolellisella suodatuksella tuotekaasusta saadaan poistettua suurin osa korrosoivista materiaaleista, jolloin varsinaista höyrykattilaa voidaan ajaa korkeammilla höyrynarvoilla.

3.3.3 Lahti Energia Oy, Kymijärvi II

Kaasutusvoimalaitoksista esimerkkinä Lahti Energian Kymijärvi II. Kymijärvi II-kaasutusvoimalaitos valmistui vuonna 2012. Se koostuu kahdesta 80 megawatin kaasutusreaktorista, kaasukäyttöisestä höyrykattilasta ja höyryturbiinista. Kymijärvi II käyttää polttoaineenaan kierrätykseen kelpaamatonta, hyvin palavaa jätettä, kuten muovია, paperia, pahvia ja puuta. Polttoaine kaasutetaan kaasutusreaktoreissa, jonka jälkeen tuloksena saatu tuotekaasu poltetaan kaasukattilassa. (Lahti Energia 2020.)

3.4 PAKU-prosessi

PAKU-prosessi on suomalaisen Endev Oy:n suunnittelema erityisesti jätelietteiden käsittelyyn tarkoitettu leijukerrostekniikan sovellus.

PAKU-prosessi on kehitetty vastaamaan jätevedenpuhdistamojen tarpeeseen käsitellä ja hyödyntää niissä syntyvää jäteliettä. Jätevedenpuhdistamoilla syntyvä jäteliete sisältää paljon erilaisia ympäristölle haitallisia kemikaaleja, jonka vuoksi sen loppusijoittaminen on ongelmallista. Liete sisältää myös hyödyllisiä aineita, kuten typpeä ja fosforia, joita voidaan

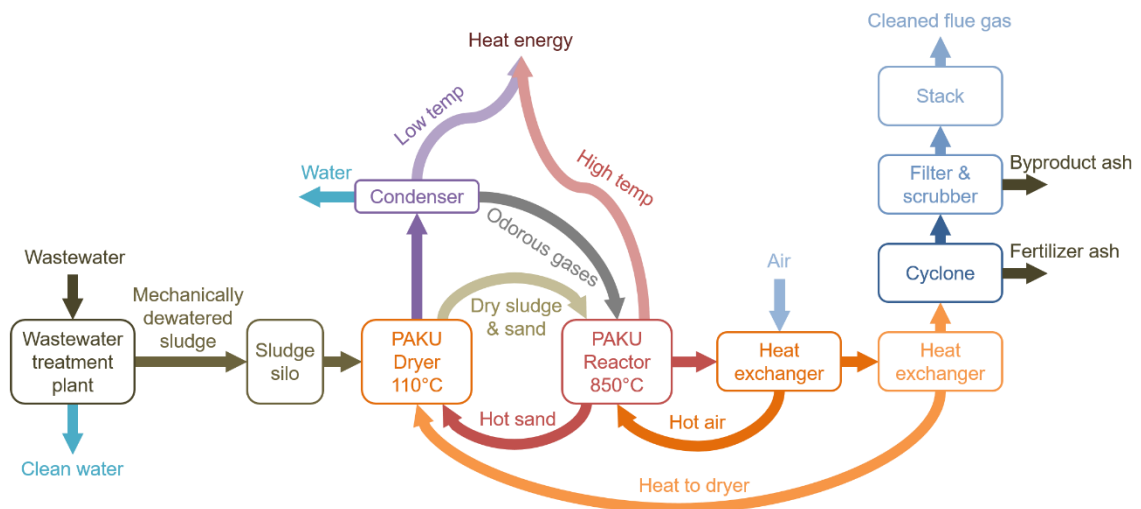
käyttää esimerkiksi lannoitteina. Suoraan lietteestä niitä ei kuitenkaan voida käyttää, vaan ne täytyy erottaa ensin haitallisista aineista. PAKU-prosessissa liete käsitellään termisesti haitta-aineiden poistamiseksi, jonka jälkeen fosforin ja typen erottaminen on mahdollista. (Endev 2017a.)

3.4.1 PAKU-prosessin toimintaperiaate

PAKU-prosessi on kehitetty erityisesti jätelietteen käsittelyyn ja hyödyntämiseen. PAKU-laitos koostuu kahdesta erillisestä osasta, jotka toimivat kierto-prosessissa. PAKU-prosessiin tuotava jätevesiliete kuivataan ennen polttoa mekaanisesti. Vähintään 20% kuiva-ainepitoisuudella ajettava PAKU-prosessi on tyypillisellä yhdyskuntalietteellä energiaomavarainen. PAKU-reaktorin pääideana on siis tuhota haitallista jätelietettä ja ottaa talteen siitä sivutuotteena saatavaa energiaa. Teknologian avulla myös jätelietteen sisältämät ravinteet on mahdollista saada hyötykäyttöön esimerkiksi lannoitteena. (Endev 2017b.)

Mekaanisen kuivauksen jälkeen liete syötetään kierto-prosessin ensimmäiseen osaan, PAKU-kiertomassakuivuriin, jonka lämpötila on noin 110 °C. Kuivuriin tuleva kuuma hiekka kuivattaa jätelietteen noin 95% kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivuttuaan kuiva liete ja jäähtynyt hiekka johdetaan prosessin toiseen osaan, PAKU-kiertomassareaktoriin. Reaktorissa liete poltetaan kierto-petiteknikalla. Palamisesta syntyvä lämpö lämmittää hiekkapetiä, joka johdetaan takaisin kuivuriin. Palamisprosessin yhteyteen on myös mahdollista liittää kaukolämpö- tai höyrypiiri prosessissa syntyvän lämmön talteen ottamiseksi. Ylimääräinen lämpö johdetaan savukaasujen mukana ulos ja sillä lämmitetään PAKU-reaktoriin tulevaa palamisilmaa. (Endev, 2017a.)

Kuvassa 5 on PAKU-prosessin periaatekuva. Vasemmalla on jätevedenkäsittelylaitos, josta syntyvä liete kuivataan mekaanisesti ja johdetaan siilon kautta PAKU-reaktoriin.



Kuva 5. PAKU-prosessin periaatekuva (LUT University 2020).

3.4.2 PAKU-prosessi jätteenpoltossa

PAKU-prosessi on suunniteltu yksinomaan jätelietteiden käsittelyyn ja se on kohtuullisen tuore innovaatio. PAKU-prosessin varsinainen tarkoitusperä ei niinkään ole energiantuotanto, vaan jätelietteen massan pienentäminen ja sen sisältämien ravinteiden hyötykäyttöön saaminen. Lietetonna kohden PAKU-prosessi tuottaa keskimäärin yhden megawattitunnin lämpöenergiaa. PAKU-prosessin läpi mentyyään lietteen massasta häviää yli 90%. Jätelietteen kuivauksesta aiheutuvat hajukaasut ohjataan myös reaktoriin. PAKU-prosessista jäljelle jäävästä tuhkasta 95% on käyttökelpoista materiaalia lannoitteeksi, tai lannoitteen raaka-aineeksi. Lisäksi PAKU-käsittely poistaa jätelietteestä haitalliset lääkeainejäämät, torjunta-aineet, bakteerit, virukset, hormonit, mikromuovit ja osan raskasmetalleista. (Endev 2018.)

3.4.3 Napapiirin Energia ja Vesi Oy, Alakorkalon lietteenpolttolaitos

Esimerkkilaitoksena Napapiirin Energian ja Veden PAKU-prosessiin perustuva lietteenpolttolaitos. Laitos on tällä hetkellä koekäyttövaiheessa. Prosessissa syntyvä lämpö on tarkoitus hyödyntää kaukolämpönä. Lämpöä tulee riittämään noin 300–400 omakotitalon tarpeisiin. Lietteenpoltosta syntyvä tuhka pystytään hyödyntämään NEVE:n tuhkarakeistamon lannoiteraaka-aineena. (Endev 2018; Napapiirin Energia ja Vesi 2019.)

4 MENETELMIEN VERTAILU

Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi leijukerrostekniikan sovellusten eroavaisuuksia ja millä tavalla tekniikoiden ominaisuudet mahdollisesti vaikuttavat varsinaisen jätteenpolttolaitoksen toteuttamiseen, toiminta-asteeseen ja käytännöllisyyteen.

4.1 Jätepolttoaineiden hyödyntäminen

Leijukerrostekniikkaan perustuvat metodit ovat herkempiä polttoaineen materiaalisällölle esimerkiksi pedin agglomeraation vuoksi. Niissä karkeampien polttoaineiden esikäsittely pienempään raekokoon on välttämätöntä. Toisaalta leijukerrosmenetelmät soveltuvat hyvin polttoaineen vaihtelevalle energiasällölle. Petilämpötilan pysyessä tuhkan sulamispisteen alapuolella ne ovat erittäin kilpailukykyisiä elleivät parhaita vaihtoehtoja jätteen energiahyödyntämiseen.

Leijukerrosmenetelmistä helpoin toteuttaa on kuplapetikattila. Kuplapetikattilan heikkouksina ovat matalat höyrynarvot lämmönsiirtoputkiston korroosioriskin vuoksi. Matalammilla höyrynarvoilla sähköntuotannon hyötysuhde jää heikommaksi ja näin jätepolttoaineen energiasällön hyödyntäminen ei ole niin tehokasta. Korkeampiin höyrynarvoihin päästään kiertopetikattilalla sekä kaasutusreaktorilla. Näissä korrosio on mahdollista huomioda sen kuitenkin vaikuttamatta negatiivisesti höyrynarvoihin ja sitä kautta voimalaitosprosessin sähköntuotannon hyötysuhteeseen.

Poltettaessa matalalämpöarvoista, kosteaa lietettä on PAKU-reaktori varteenotettava vaihtoehto. PAKU soveltuu esimerkiksi jätevedenpuhdistamon viereen tuhoamaan siitä syntyvän haitallisen lietteen. PAKU on vasta koekäyttövaiheessa, joten siitä ei löydy samanlaista kirjallisuus pohjaa kuin muista leijukerrosmenetelmistä.

4.2 Korrosionkesto

Epäpuhtauksien aiheuttaman korroosion huomioiminen on jätteenpoltossa erittäin tärkeää. Pahimpia epäpuhtauksien aiheuttamia ongelmia ovat pedin sintraantuminen ja lämmönsiirtopintojen korrosio. Mikäli polttoaine sisältää klooria, on korkeiden höyrynarvojen käyttö mahdotonta ilman erityistoimenpiteitä. Tämä aiheutuu siitä, että kloorin reaktiotuotteiden alin sulamispiste on jopa 515 °C. Tämä lämpötila on lämmönsiirron

kannalta erittäin matala ja monissa kattiloissa tulistimien lämpötila on tätä korkeampi. Kloorisula aiheuttaa vakavia korroosiovaurioita, sillä osittain sula alkalisulfaattien ja kloridien seos on erittäin syövyttävää. (Raiko et al. 2002, 286.)

Korroosion vuoksi useimmat jätettä polttavat kuplapetikattilat ovatkin suunniteltu matalammille, noin 400 °C höyrynlämpötiloille. Näin niillä voidaan polttaa kaikenlaista jätettä muodostamatta kuitenkaan ongelmaa korroosiosta. Matalammilla höyrynarvoilla hyötysuhde ei tietenkään ole yhtä korkea. Aikaisempi motivaattori jätteenpoltolle onkin ollut enemmän jätemäärän pienentäminen kuin varsinainen tehokas energiantuotanto.

Kiertoleijupolttotekniikan käyttö mahdollistaa korkeammat höyrynarvot hyödyntämällä pedin lämpöä höyryn tulistuksessa savukaasujen sijaan. Kaasutuksessa puolestaan tuotekaasun huolellisella esikäsitteilyllä varsinaisen kattilan korroosio-ongelmat saadaan minimoitua.

4.3 Toteutus

Jätteenpoltossa yksinkertaisin sovellus on kuplapetikattila. Kuplapetikattilalla ongelmaksi muodostuu aiemmin mainittu tulistinpintojen korroosioriski. Kuplapetikattilan etuna on myös sen soveltuvuus vanhaan kattilainfraan muutostyön avulla. Tällöin kattilan vanhat rajoitukset tietenkin pätevät yhä. Kiertopetikattila puolestaan on kuplapetiä monimutkaisempi toteuttaa mutta sillä päästään parempiin höyrynarvoihin esimerkiksi kaasulukossa sijaitsevan tulisimen avulla. Kiertopetikattilassa on kuitenkin yksinkertaisempi polttoaineensyöttö kuin kuplapedissä paremman pedin sekoittuvuuden ansiosta (Basu 2015, 11). Monimutkaisin sovellus toteutuksen kannalta on kaasutusreaktori. Kaasutusprosessi tarvitsee kaasuttimen, kaasunsuodatusjärjestelmän ja kaasun käyttökohteen, esimerkiksi kaasukattilan, varsinaisen voimalaitosprosessin mahdollistamiseksi. Kaasutusprosessin etuna, kaasunsuodatuksen toimiessa optimaalisesti, on jätteen korrosoivan vaikutuksen eliminointi lähes kokonaan ennen varsinaista tuotekaasun käyttökohdetta.

Jäte lisää kattilan epävarmuustekijöitä polttoaineen vaihtelevan lämpöarvon johdosta. Varsinaista polttoaineen lämpöarvomittausta on jatkuvasti vaihtelevan lämpöarvon vuoksi vaikea tehdä, joten polttoprosessin säätö tapahtuu esimerkiksi syntyvän höyrymäärän perusteella. Tukipolttoaineen käytöllä on myös mahdollista tasata polttoaineen

lämpöarvovaihteluiden huippuja. Esikäsittelyssä saattaa esiintyä ongelmia polttoaineen sisältämien epäpuhtauksien vuoksi.

4.4 Oikean sovelluksen valinta

Oikeaa sovellusta valittaessa täytyy priorisoida, mikä on suurin intressi jätemateriaalin käsittelyssä, onko se jätekasojen ja metaanipäästöjen pienentäminen vai onko tavoitteena tuottaa energiaa mahdollisimman tehokkaasti. Jätepolttoaineen poltossa varsinainen polttoaine on edullista, joten rajoittavaksi tekijät nousevat varsinaiset laitoksen suorat ja epäsuorat investointikustannukset.

Toinen rajoittava tekijä on prosessilaitoksen käyntivarmuus. Leijukerrostekniikkaa hyödyntävät vaihtoehdot ovat esimerkiksi arinakattilaa herkempiä polttoaineen mukana tuleville epäpuhtauksille. Päädyttäessä leijukerrosratkaisuun on siis huolehdittava huolellisesta polttoaineen esikäsittelystä varsinaisen prosessin käyntivarmuuden nostamiseksi mahdollisimman korkealle tasolle.

Taulukossa 3 esitetään kirjallisuuslähteiden perusteella arvioidut parhaat vaihtoehdot eri kriteerien avulla. Taulukko on suuntaa antava ja on muistettava, että jokainen voimalaitosprosessi on yksilö. Ei siis ole valmista oikeaa vastausta vaan se on useiden eri tekijöiden summa. Lopullisen valinnan suurimmiksi kriteereiksi noussevat budjetti ja sen hetkiset ympäristömääräykset.

Taulukko 3. Leijukerrossovellusten suoriutuminen jätteenpoltossa.

Kriteeri	Kerrosleijupoltto	Kiertoleijupoltto	Kaasutus	PAKU
Investoinnin edullisuus	1	2	3	-
Toteutuksen helppous	1	3	4	2
Käyttöaste	2	3	4	1
Sähköntuotannon hyötysuhde	3	1	1	4
Todella kostean materiaalin poltto	3	2	4	1

Taulukossa sovellukset on numeroitu asteikolla 1–4. Numero 1 tarkoittaa tässä yhteydessä parasta vaihtoehtoa ja 4 heikointa. Kuten taulukosta voidaan havainnoida, vaihtelua parhaan vaihtoehdon välillä on paljonkin eri kriteereissä. Todellisessa valintaprosessissa täytyy tehdä esimerkiksi yksityiskohtaiset kannattavuuslaskelmat, jotta toteutuksen helppous ja investoinnin edullisuus saadaan linjaan.

5 JÄTTEENPOLTON HYÖDYT JA HAITAT

Suomessa yhdyskuntajätteet on perinteisesti viety kaatopaikalle loppusijoitukseen tai mahdollisesti jopa poltettu ilman asiaankuuluvaa savukaasujen suodatusta. Tämä ei ole kuitenkaan kovin viisasta, sillä näin hukataan jättemateriaalissa oleva energiantuotantopotentiaali ja samalla kaatopaikoilta vapautuu lajittelemattoman orgaanisen jätteen hajotessa ajan saatossa suuria määriä metaania ilmakehään. Polttamisesta aiheutuvat savukaasut ovat myös ensiarvoisen tärkeää suodattaa negatiivisten ympäristövaikutusten minimoimiseksi. Suomessa tätä on myös rajoitettu valtioneuvoston asetuksella 331/2013. Hallitun polttoprosessin avulla jätemäärän energiasisältö saadaan valjastettua hyötykäyttöön ja samalla vähennetään kaatopaikkojen ympäristöpäästöjä.

5.1 Energiantuotanto

Ensimmäisenä jätteenpolton hyötynä mainitaan yhteiskunnalle käytännössä hyödyttömän jättemassan energiasisällön valjastaminen energiantuotantoon. Aikaisemmin polttoprosessilla onnistuttiin lähinnä pienentämään jätteen määrää polttamalla sitä huonolla hyötysuhteella. Leijukerrostekniikoiden yleistyttyä jätteenpoltossa jätevoimaloiden hyötysuhteet ja sitä kautta energiansaanti ovat parantuneet.

Jätteen energiahyödyntäminen on myös ympäristön kannalta perinteisiä fossiilisia polttoaineita parempi valinta. Jättepolttoaine on yhteiskunnalle käytännössä ylimääräistä ja hyödyttöä materiaalia, joten sen energiasisällön valjastaminen hyötykäyttöön sähkö- ja lämpöenergiaksi on kestävä kehityksen mukaista. Energiantuotanto jättepolttoaineella voidaan myös ajatella olevan hiilidioksidineutraalia, joten se tulee olemaan olennaisessa roolissa Suomen ilmastotavoitteisiin pääsemisessä.

5.2 Jätteenpolton päästöt ja niiden hallinta

Jätteenpoltossa syntyy pitkälti samoja päästöjä kuin tavallisia fossiilisia polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa. Yleisimmät päästöt savukaasujen poistuessa kattilasta ovat typen oksidipäästöt eli NO_x :t, rikkidioksidi eli SO_2 , häkä eli CO, hiilidioksidi eli CO_2 , vesihöyry eli H_2O , suolahappo eli HCl, jättemateriaalin sisältämät höyrystyneet raskasmetallit, sekä savukaasujen mukana kulkeutuva lentotuhka.

Typen oksidipäästöt ovat leijukerrostekniikassa luonnostaan kohtalaisen matalat johtuen tekniikalle ominaisesta 800–900 celsiusasteen petilämpötilasta. Typen oksidipäästöt muodostuvat palamisilman ja polttoaineen mukana tulevan typen reagoitessa kuumissa lämpötiloissa hapen kanssa. Typen oksidipäästöjä pystytään kuitenkin hillitsemään kohtalaisen helposti esimerkiksi käyttämällä katalyyttejä ja ammoniakkiruiskutusta savukaasukanavassa. Toinen tehokas keino rajoittaa typen reaktiotuotteiden syntymistä on käyttää poltossa vaiheistettua ilmansyöttöä. Tällöin vain osa palamisilmasta tuodaan primääri-ilmana polttoon ja ilmaa ajetaan lisää myöhemmässä vaiheessa vaiheistetun polton aikaansaamiseksi. Kiertoleijutuksessa syntyy vähemmän typpipäästöjä kuin kerrosleijutuksessa. (Basu 2015, 145–147.)

Rikin oksidipäästöt aiheutuvat puhtaasti polttoaineen sisältämästä rikistä. Rikkipäästöt aiheuttavat ilmakehään päästessään esimerkiksi happosateita. Rikkipäästöjä voidaan hillitä esimerkiksi sekoittamalla leijutusmateriaaliin kalkkikiveä. Kalkkikivi reagoi kemiallisesti rikin kanssa, jonka jälkeen se muuttuu kaasumaisesta muodosta hiukkasmaiseksi ja se on mahdollista suodattaa pois. Savukaasujen sisältämä rikki myös nostaa savukaasujen minimipoistolämpötilaa rikkikastepisteen ja sitä kautta korroosioriskin vuoksi. Kalkkikiven käyttö petimateriaalina saattaa toisaalta edistää typen oksidien muodostumista. (Basu 2015, 146–147.)

Häkää muodostuu epätäydellisen palamisen seurauksena. Kerrosleijutuksessa polttoaineen viipymäaika kattilassa on lyhyempi kuin kiertoleijutuksessa. Tällöin myös mahdollisuus epätäydelliselle palamiselle kasvaa. Savukaasujen häkämäärän kasvaessa kertoo tämä yleensä riittämättömästä palamisilmasta polttoaineen tarpeisiin nähden. Kaasutusprosessissa häkää muodostuu kaasuuntumisvaiheessa, mutta se poltetaan polttovaiheessa.

Hiilidioksidia vapautuu polttoaineen sisältämän hiilen palamisprosessin seurauksena. Hiilidioksidipäästöt ovat suuressa roolissa kasvihuoneilmiössä ja sitä kautta antropologisessa ilmastonmuutoksessa.

Vesihöyryä muodostuu polttoaineiden hiilivetyjen hajoamisprosessissa, jossa syntyy lähinnä hiilidioksidia ja vesihöyryä. Vesihöyryä vapautuu savukaasuihin myös, kun polttoaineen ja palamisilman sisältämä kosteus höyrystyy. Polttoaineen suuri kosteus madaltaa sen lämpöarvoa suuremman energiamäärän kuluessa sen sisältämän vesimäärän

höyrystämiseksi. Vesihöyryä ei pidetä kasvihuonekaasuna, vaikka ilmakehässä sillä on suuri osuus lämpötilan säätelyssä.

Klooriyhdisteet kuten suolahappo aiheutuvat polttoaineen sisältämän kloorin reagoiessa polttoprosessissa. Klooripäästöihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi lisäämällä savukaasuihin lisääaineita. Kloorilla on samanlaisia korrosoivia ominaisuuksia kuin rikillä. Kloorikastepiste onkin toinen rajoittava tekijä savukaasujen poistolämpötilalle.

Höyrystyneitä raskasmetalleja syntyy juuri jätemateriaalin polton seurauksena. Ne saadaan suodatettua pois jäädyttämällä savukaasuja, jolloin ne voidaan poistaa savukaasujen hiukkaspuhdistuksen yhteydessä. Kaasutusprosessissa ne puolestaan saadaan poistettua tuotekaasun suodatuksen yhteydessä.

Lentotuhkaa eli hiukkaspäästöjä syntyy aina polttoprosessin yhteydessä. Hiukkaspäästöt ovat ympäristölle haitallisia ja ne täytyy suodattaa pois. Suodattamiseen voidaan käyttää esimerkiksi sähkökäyttöisiä sähkösuotimia, joissa erotuskyky perustuu hiukkasten sähköistymiseen. Toinen vaihtoehto on savukaasujen letku- tai pussisuodatusjärjestelmä. Niissä savukaasut kulkevat putkissa olevien todella pienten reikien läpi, jolloin niiden sisältämät hiukkaset jäävät putkien ulkopinnalle ja ne on mahdollista kerätä talteen.

5.3 Jätteenpolton tuhka

Tuhka on yleisnimitys kaikelle poltosta ylijäävälle materiaalille. Jätteenpolton perinteisenä ongelmana voidaan pitää siitä syntyviä tuhkalajeja, joita ei haitallisten aineiden pitoisuuksien vuoksi yleensä voida sellaisenaan käyttää. Jätteenpoltoaineet sisältävät normaalien polttoprosessille haitallisten kloorin ja alkalimetallien lisäksi muita erilaisia metalleja, jotka hankaloittavat varsinaista polttoprosessia, mutta muodostuvat myös ongelmaksi tuhkassa. Nämä raskasmetallit usein estävät jätteenpolton tuhkan hyödyntämistä sellaisenaan. Polttoaineen heterogeenisen materiaalisällön lisäksi eri polttolaitoksista syntyvät tuhkalajit voivat olla keskenään hyvin erilaisia. Tämä johtaa siihen, että jokaiselle jätteenpolttolaitokselle joudutaan miettimään yksilöllisesti tuhkan jatkokäyttömahdollisuuksia. (Kaartinen et al. 2007, 18–19.)

Jätteen leijukerrospoltoissa saadaan kahta erilaista tuhkaa, polttovaiheessa syntyvää leijutusmateriaalin, palamattoman polttoaineen ja polttoaineen reaktiotuotteiden

muodostamaa pohjatuuhkaa, sekä savukaasuista ennen poistoa erotettavaa lentotuhkaa. Kaasutusprosessissa voidaan näiden kahden lisäksi erottaa vielä kolmatta tuhkalaajaa, joka suodatetaan tuotekaasusta kaasuttamisen jälkeen ennen polttoa. (Vakkilainen 2017, 160–162.)

Pohjatuuhka poistetaan leijukerroskattilasta tai kaasutusreaktorista polttoprosessin ensimmäisessä vaiheessa leijutusarinan pohjan kautta. Pohjatuuhkan koostumus riippuu täysin polttoaineesta. Jätepolttoainetta käyttäessä koostumus voi siis vaihdella paljonkin polttoaineen senhetkisen koostumuksen mukaan. Polttoaineesta aiheutuvasta tuhkasta keskimäärin 15–45% on jätepolttoainetta polttaessa palamatonta materiaalia, kuten lasia ja 55–85% palamisreaktioissa syntyneitä sulamistuotteita. (Kaartinen et al. 2007, 15.)

Lentotuhkan erottamiseen on useampi eri sovellusvaihtoehto. Elektrostaattiset sähkösuodattimet perustuvat tuhka hiukkasten sähköiseen varaamiseen, jolloin sähkökenttä vetää ne pois savukaasuista suodattimen pohjalle. Toinen vaihtoehto on kankaisten letkusuodattimet. Letkusuodattimissa savukaasut ohjataan erittäin pienireikäisen materiaalin läpi, jolloin savukaasuissa olevat hiukkaset jäävät materiaalin pinnalle varsinaisten savukaasujen matkatessa materiaalin läpi. Materiaalin kertyneet hiukkaset nuohotaan ajoittain pois suodatinmateriaalista, jolloin ne voidaan kerätä talteen. Kankaisten suodattimien käytön haittapuolena on niiden alhainen 200 °C maksimikäyttölämpötila. Yksittäistä suodatinelementtiä ei myöskään voida vaihtaa suodattimen ollessa käytössä. (Vakkilainen 2017, 161–162.)

Jätteenpoltosta syntyvälle tuhkalta ei ole toistaiseksi keksitty Suomessa kustannustehokasta tapaa jatkokäyttöä varten. Jatkokäyttökohteita voisivat olla esimerkiksi maantäyttö, lentotuhkaa voisi myös mahdollisesti käyttää betonin raaka-aineena. Näissä ongelmiksi saattavat muodostua tuhkamateriaalin epäpuhtaudet ja niiden mahdollinen saastuttava vaikutus. Esimerkiksi Japanissa jätteenpoltosta syntyvä tuhka sulatetaan inerteiksi rakeiksi, jonka jälkeen niitä voidaan käyttää esimerkiksi maanrakentamisessa. Tämä ei kuitenkaan ole kovin kustannustehokasta. Japanissa suurempi intressi onkin tuhkan turvallisessa loppusijoittamisessa kuin kustannustehokkuudessa. Suomessa samanlaista kiirettä keksiä jatkokäyttökohteita ei ole, sillä toisin kuin Japanissa, Suomessa on maapinta-alaa säilyttää tuhkia. Tuhkan jatkokäyttökohteisiin kannattaa kuitenkin investoida ja paneutua. Mikäli

tuhkalle keksitään kustannustehokas käyttökohde, tulee jätteenpoltosta vielä entistään kannattavampaa. (Kaltschmitt et al. 2013, 1505, 1511.)

6 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä pohdittiin jätteenpolton osuutta jätemäärien ja jätteiden aiheuttamien päästöjen rajoittamisessa. Todettiin että jätteenpoltolla on positiivinen vaikutus jäteongelman ratkaisussa, mutta se on vain osatekijä isommassa kokonaisuudessa. Suurin ratkaisuvälä on lopulta yksilön valinnoilla.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli luoda lukijalle kuva Suomessa tällä hetkellä käytössä olevista leijukerrostekniikan sovelluksista jätteenpoltossa. Esittely alkoi yleisellä teoriolla leijukerrostekniikasta, jonka jälkeen siirryttiin käsittelemään jätteen energiahyödyntämisen leijukerrosmenetelmiä yksittäisinä kokonaisuuksina. Kappaleen tarkoitus oli muodostaa lukijalle kuva leijukerrosmenetelmien toimintaperiaatteista ja ominaisuuksista.

Esittelykierroksen jälkeen siirryttiin vertailemaan eri sovellusten soveltuvuutta jätteenpolttoon. Vertailuosiossa todettiin, että sopivan sovelluksen löytäminen on jokaiselle tarpeelle yksilöllistä ja se riippuu suuresti loppukäyttäjän tarpeista ja intresseistä. Lopuksi vielä tutkittiin yleisesti jätteenpolton hyöty- ja haittavaikutuksia. Hyödyksi löydettiin jätteenpoltoaineen käytön vähentävän varsinaisten fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Jätteenpolto myös vähentää loppusijoitukseen vietävää materiaa huomattavasti ja tuhoaa niistä muuten mahdollisesti syntyvät orgaanisen aineksen muodostamat päästöt. Haittapuolena jätteenpoltolle nähtiin lopputuotteena syntyvä epäorgaanisen aineksen tuhka, jolle ei ole Suomessa vielä löydetty kunnollisia käyttökohteita. Toinen haittapuoli jätteenpoltossa on palamisesta syntyvät myrkylliset hiukkaset ja kaasut, jotka täytyy suodattaa huolellisesti pois savukaasuista ennen savukaasujen poistoa ilmakehään.

LÄHTEET

Basu Prabir. 2010. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory [e-kirja]. Burlington (MA): Elsevier/Academic Press. 365 s. ISBN 978-0-08-096162-0

Basu Prabir. 2015. Circulating fluidized bed boilers: design, operation and maintenance [e-kirja]. Springer International Publishing. 370 s. ISBN 978-3-319-06173-3

Euroopan Komissio. 2017. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Energian hyödyntäminen kiertotaloudessa [verkkajulkaisu]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/?fuseaction=list&coteId=1&year=2017&number=34&language=FI>

Endev Oy. 2017a. PAKU-prosessi. [verkkosivu]. [Viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: <https://www.endev.fi/paku-prosessi/>

Endev Oy. 2017b. Ravinteet talteen jätevesilietteen termisessä käsittelyssä [verkkodokumentti]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/Documents/biotuhka_yva_05.pdf

Endev Oy. 2018. Lietteen terminen käsittely PAKU-laitoksessa [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BCFF053E8-FEF6-491B-ADCB-8D455A2319CA%7D/136839>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. 2018. Pääkaupunkiseudun sekajätteen koostumus vuonna 2018 – Kotitalouksien sekajätteen koostumustutkimuksen loppuraportti [verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <https://julkaisu.hsy.fi/paakaupunkiseudun-sekajatteen-koostumus-2018.html>

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi & Pakkanen Heikki. 2004. Höyrykattilatekniikka. 6. Painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 379 s. ISBN 951-37-3360-2

Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo & Urpalainen Samu. 2008. Voimalaitostekniikka. 1. Painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. 342 s. ISBN 978-952-13-3476-4

Kaartinen Tommi, Laine-Ylijoki Jutta & Wahlström Margareta. 2007. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet [verkkojulkaisu]. Espoo: VTT Oy. [Viitattu 23.6.2020]. Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/j%C3%A4tteen-termisen-k%C3%A4sittelyn-tuhkien-ja-kuonien-k%C3%A4sittely-ja-sijoi>

Kangas Ari et al. 2011. Energiatehokas lietteenkäsittely. Suomen ympäristö 17/2011 [verkkojulkaisu]. Suomen ympäristökeskus. [Viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/37060>

Kaltschmitt Martin et al. 2013. Renewable energy systems [e-kirja]. Springer International Publishing. 1922s. ISBN 978-1-4614-5820-3

L 2.5.2013/331 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista [verkkosivu]. [Viitattu 25.3.2020.] Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331#L5P28>

Lahti Energia Oy: Kymijärvi II [verkkosivusto]. [Viitattu 8.5.2020]. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/fi/lahti-energia/energian-tuotanto/kymijarvi-ii>

Laitinen Jyrki, Alhola Katriina, Manninen Kaisa & Säylä Jonne. 2014. Puhdistamolietteen ja biojätteen käsittely ravinteita kierrättäen [verkkojulkaisu]. Suomen ympäristökeskus. [Viitattu 27.5.2020]. Saatavissa: https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Puhdistamolietteen_ja_biojätteen_kasittely_ravinteita_kierrattaen

LUT University. 2020. Climate Action – Solutions for Carbon Neutral Transport, MOOC-course [verkkosivusto]. [Viitattu 3.7.2020]. Saatavissa: <https://mooc.lut.fi/>

Napapiirin Energia ja Vesi Oy. 2019. Lietteenpolttolaitoksen koekäyttö alkaa Rovaniemellä [verkkouutinen]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: <https://www.neve.fi/tietoa-meista/uutiset/lietteenpolttolaitoksen-koekaytto-alkaa-rovaniemella>

Myllymaa Tuuli et al. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Suomen ympäristö 39/2008 [verkkojulkaisu]. Suomen ympäristökeskus [viitattu 25.6.2020]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38383>

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko & Kurki-Suonio Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. Toinen painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. 750 s. ISBN 951-666-604-3

Riikinvoima Oy: Voimalaitos [verkkosivusto]. [viitattu: 8.7.2020] Saatavissa: <http://riikinvoima.fi/voimalaitos/>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 17.3.2020]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/jate/2016/13/index.html>

Salmepärä Hanna, Moliis Katja & Nevala Sanna-Mari. 2015. Jättemäärien ennakointi vuoteen 2030. Painopisteenä yhdyskuntajätteet ja kierrätystavoitteiden saavuttaminen. Ympäristöministeriön raportteja 17/2015. Helsinki: Ympäristöministeriö. 64s. [viitattu 23.3.2020] Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/155189>

Vainikka Pasi, Tsupari Eemeli, Sipilä Kai & Hupa Mikko. 2011. Comparing the greenhouse gas emissions from three alternative waste combustion concepts [verkkojulkaisu]. [Viitattu 13.6.2020]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0956053X11004697?via%3Dihub>

Vakkilainen Esa. 2017. Steam generation from biomass: construction and design of large boilers [e-kirja]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann. 302 s. ISBN 978-0-12-804389-9

Vesanto Petri, Ruonala Seppo & Nuutila Matti. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. Jätteenpolton BREF 2006. Suomen ympäristö 27/2006. Helsinki: Suomen ympäristökeskus [viitattu 28.3.2020]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38712>