

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**TUHKAYHDISTEIDEN VAIKUTUSTEN HUOMIOINTI  
KATTILASUUNNITTELUSSA JA KATTILAN KÄYTÖSSÄ**

Työn ohjaaja & tarkastaja: Antti Pitkäoja  
Liedossa 3.4.2020  
Kasper Heikkilä

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka

Kasper Heikkilä

### **TUHKAYHDISTEIDEN VAIKUTUSTEN HUOMIOINTI KATTILASUUNNITTELUSSA JA KATTILAN KÄYTÖSSÄ**

Kandidaatintyö 2020

Tarkastaja ja ohjaaja: Antti Pitkäoja

30 sivua ja 3 taulukkoa

Hakusanat: tuhkayhdisteet, kuumakorrosio, pedin tukkeentuminen

Päästotavoitteiden myötä varsinkin biopolttoaineiden poltto on lisääntymässä. Näin ollen yhä erilaisia biopolttoaineita pyritään hyödyntämään energiantuotannossa. Työn tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia ongelmia eri polttoaineet aiheuttavat ja pohtia, kuinka näitä ongelmia voidaan ratkaista.

Työssä selvitettiin kirjallisuuskatsauksen avulla, minkälaisia ongelmallisia yhdisteitä erilaisissa polttoaineissa on ja kuinka ne käyttäytyvät kattilassa. Lisäksi työssä pohdittiin kirjallisuutta apuna käyttäen, miten kyseisiä ongelmia voidaan ratkaista sekä minkälaista teknologista kehitystä voidaan mahdollisesti nähdä tulevaisuudessa, kun ongelmia pyritään ratkaista entistä pienemmillä investoinneilla.

Työssä havaittiin, että osa haasteista on nähtävissä tietyissä kattilatyypeissä huomattavasti toisia selkeämmin, osa taas vaikuttaa kaikkiin varsin yhtenevästi. Lisäksi havaittiin, että uusiutuvien polttoaineiden koostumuksissa on merkittäviäkin eroja. Kokonaisuudessaan voidaan sanoa, alkalien ja kloorien yhteisvaikutuksesta aiheutuvat ongelmat ovat hankalin tai vähintäänkin kallein haaste ratkaistavaksi, sillä ne aiheuttavat monenlaisia ongelmia eri puolilla kattilaa.

## SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	3
2	Taustaa .....	4
2.1	Leijukerroskattila.....	4
2.2	Tuhkan muodostuminen .....	7
2.3	Lämpöpintojen likaantuminen.....	8
2.3.1	Nuohous .....	8
2.4	Tuhkan käsittely .....	9
3	Polttoaineiden tuhka-analyysit.....	11
3.1	Verrokkipolttoaine.....	12
3.2	Olki.....	12
3.3	Eukalyptus .....	13
3.4	Turve ja hiili .....	13
3.5	Jäte.....	14
4	TUHKAN Vaikutukset kattilassa.....	16
4.1	Hiekka.....	16
4.2	Alkalit .....	16
4.3	Kloori.....	17
4.4	Rikki .....	18
4.5	Metallit .....	19
5	Hankaluuksien selättäminen.....	20
5.1	Lämpöpintojen suunnittelu .....	20
5.2	Savukaasun puhdistus.....	21
5.3	Sekapoltto .....	21
5.4	Palamisen hallinta.....	22
6	Kuinka tuhkeyhdisteet tulee huomioida kattilan suunnittelussa ja käytössä?.....	23
6.1	Suunnittelun lähtökohdat.....	23
6.2	Kattilan suunnittelu .....	24
6.3	Kattilan käyttö .....	24
6.4	Tulevaisuus.....	25
7	Polttoaineiden ongelmat ja niiden ratkaisu .....	27
7.1	Olki.....	27
7.2	Eukalyptus .....	28
7.3	Turve ja hiili .....	28
7.4	Jäte.....	29
8	Yhteenveto .....	30
	Lähteet .....	31

## 1 JOHDANTO

Yleisen trendin ollessa se, että energiantuotannossa pyritään siirtymään pois fossiilisista polttoaineista, on biopolttoaineiden polton suosio kasvamassa. Biopolttoaineet tarvitsevat erilaisia polttotekniikoita, kuin esimerkiksi mitä nykyisissä hiilivoimalaitoksissa on, ja koska biopolttoaineita on monenlaisia ja niiden saatavuus vaihtelee, on tavanomaista, että voimalaitoksen halutaan soveltuvan useammalle polttoaineelle. Lisäksi lähinnä puupohjaisten aineiden kysynnän kasvaessa myös sen hinta kasvaa, joten puu halutaan käyttää entistä tarkemmin ja sille halutaan myös löytää vaihtoehtoisia polttoaineita.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään erilaisten polttoaineiden poltosta jäljelle jäävän tuhkan vaikutuksia polttotapahtumaan ja kattilasuunnitteluun leijupetikattiloissa. Työn tavoitteena on ymmärtää, minkälaisia ratkaisuja voimalaitoksissa tullaan tulevaisuudessa näkemään ja kuinka polttamiseen liittyviä haasteita tullaan ratkaisemaan. Työn tarkistelu tekemään ensisijaisesti siltä kannalta, että pääpolttoaineet ovat biopohjaisia. Koska biopohjaisten polttoaineiden yksi ominaisuus on se, että saatavuuden vaihtelu voi vaihdella merkittävästi esimerkiksi vuodenajan tai vallitsevan säätilan mukaan, pyritään työssä myös tarkistelemaan mahdollisuutta käyttää polttoaineita sekaisin. Käsittelemään valittiin polttoaineita, joissa tiedettiin olevan merkittävä määrä kiinnostavia yhdisteitä sekä yksi verrokkipolttoaine.

Työn pääpaino on tuhkeyhdisteiden huomioiminen leijupoltossa. Osa haasteista on kuitenkin havaittavissa muissakin polttotavoissa ja kattilatyypeissä. Koska suuri osa tuhkasta poistuu savukaasun mukana tulipesästä, on myös savukaasujen aiheuttamia ongelmia käsiteltävä kokonaisuuden hahmottamiseksi. Työssä pyritään näin ollen selvittämään, minkälaisia yhdisteitä tuhkaan jää ja kuinka tuhkaan jäävien yhdisteiden vaikutukset tulee ottaa huomioon kattilaa suunniteltaessa ja käytettäessä.

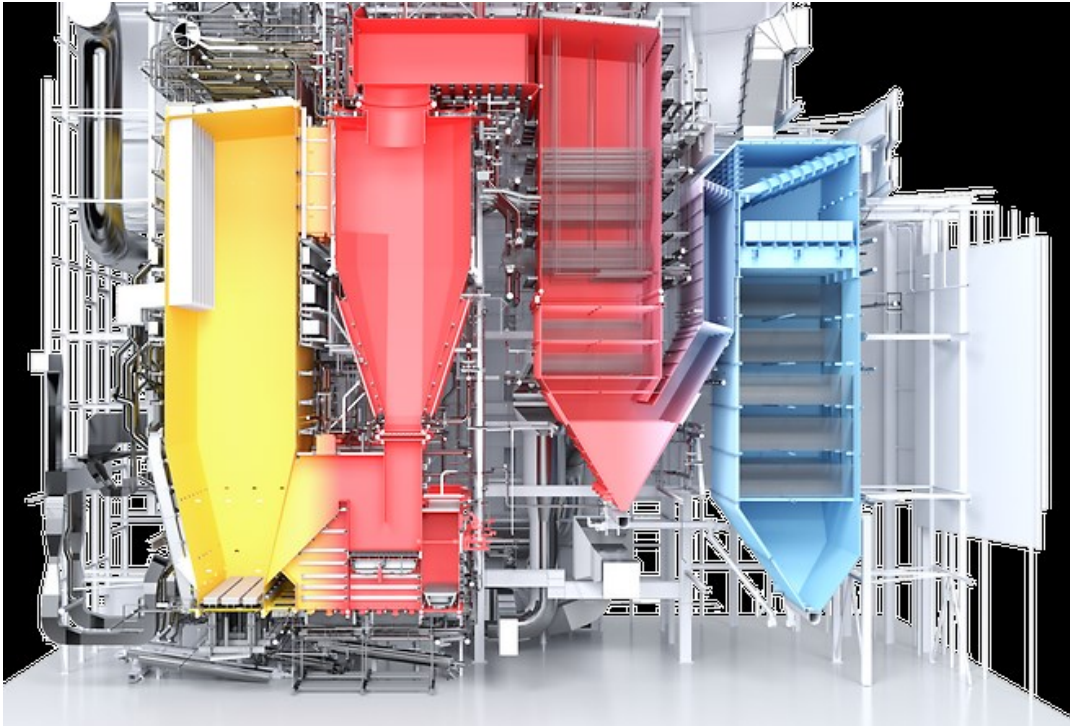
## 2 TAUSTAA

Työn aihealueen vaikutusten ymmärtämiseksi on ymmärrettävä tuhkanmuodostumisen ja -käsittelyn lisäksi myös kattiloiden peruseräaatteet. Ne käsitellään tässä kappaleessa.

### 2.1 Leijukerroskattila

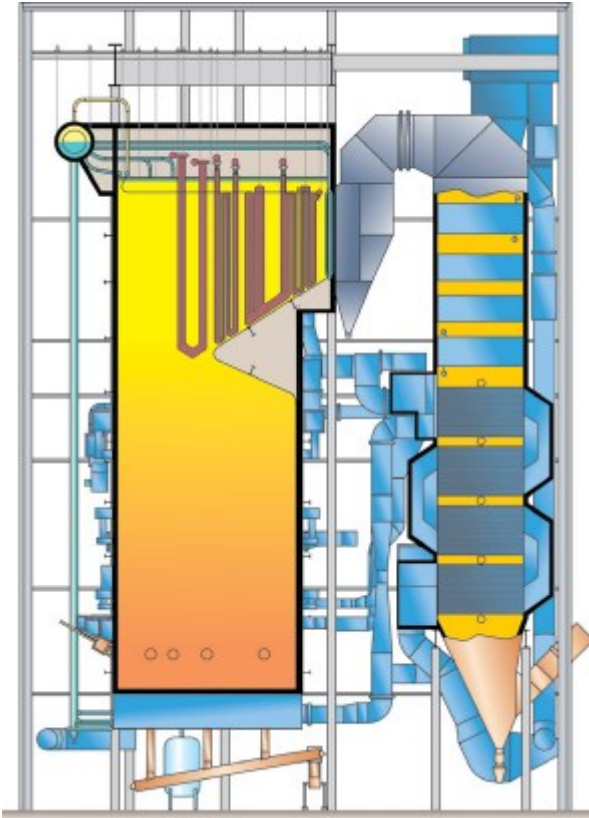
Leijukerroskattilat ovat kattiloita, joissa polttoaine poltetaan liikkeessä olevan, kuuman hiekan seassa. Kattilat jaetaan kahteen ryhmään: BFB- (bubbling fluidized bed) eli kuplapetikkattiloihin ja CFB- (circulating fluidized bed) eli kiertopetikattiloihin. Nimeämistapa perustuu kattilassa olevan petihiekan liikkeeseen. Vaikka kattilat ovat tarkemmin tarkisteltuna huomattavasti erilaisia, molempien kattilatyyppeiden toiminta perustuu siihen, että petihiekka ja palava polttoaine kulkevat tulipesässä ylöspäin ilmavirran avulla, kun partikkelien rajanopeus alittaa ilman nopeuden. Kun ilman puhaltaminen alkaa, alkaa hiekka käyttäytyä fluidin tavoin, mistä myös englanninkielinen nimitys juontaa juurensa. (Huhtinen et al. 2000 s. 154-155)

Kiertopetikattila, toiselta nimeltään kiertoleijukattila, on kattilatyyppeistä, jossa hiekka kattilan nimen mukaisesti kiertää ilman avulla. Palaminen tapahtuu hiekan seassa tulipesässä, ja tulipesästä poistuu savukaasut sekä hiekkaa. Tulipesän jälkeen savukaasu ja hiekka ajautuu sykloniin tai törmäyserottimeen, joka erottelee hiekan sekä mahdollisen palamattoman aineen savukaasusta, jonka jälkeen kiintoaine palautetaan takaisin tulipesän pohjalle. Tämän jälkeen savukaasu jatkaa kulkemistaan konvektiolämmönsiirtopintojen ohi kohti savupiippua. Kiertopetikattilan poikkileikkaus esitetty **Kuva 1**. (Basu 2015 s. 4-7, Huhtinen et al. 2000 s. 159-161)



**Kuva 1.** Kiertopetikattilan poikkileikkaus (Andritz 2019).

Kuplapetikattilassa hiekan alta puhalletaan ilmaa kiertopetikattilaan verrattuna pienemmällä nopeudella, jolloin noin 40-80 cm korkea hiekkapeti alkaa kuplimaan. Näin ollen suurin osa kattilasta poistuvasta aineesta on savukaasua. Kuitenkin, koska mekaanisen kulumisen vuoksi pedissä olevien partikkelien koko pienenee jatkuvasti, on osan partikkeleista rajanopeus niin pieni, että ne lähtevät savukaasun mukana pois tulipesästä. Nämä partikkelit kerätään talteen yhdessä lentotuhkan kanssa, eikä niitä enää laiteta takaisin tulipesään niiden prosessiin soveltumattomuuden vuoksi. Kuplapetikattilan poikkileikkaus on esitetty **Kuva 2.** (Huhtinen et al. 2000 s. 157-159)



**Kuva 2.** Kuplaleijukattilan poikkileikkaus (Sumitomo Heavy Industries, Ltd. & Sumitomo SHI FW 2017).

Suurissa ja keskikokoisissa biovoimalaitoksissa käytetään lähes yksinomaan joko BFB tai CFB -kattiloita, sillä niiden luontaiset ominaisuudet mahdollistavat muita vaihtoehtoja paremmin vaikeasti poltettavien polttoaineiden polttamisen ja lisäksi kiertopetikkattiloiden hyötysuhteet ovat korkeat vaikeasti polttavia polttoaineitakin poltettaessa. (Huhtinen et al. 2000 s. 153)

**Taulukko 1.** Leijupetikattiloiden merkittävimpiä parametrejä (Huhtinen et al. 2000 s. 157-161, Basu s. 5).

Ominaisuus	CFB	BFB
Ilmakerroin	1,1-1,3	1,1-1,4
Pedin tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	10-100	1000-1500
Polttolämpötila [°C]	800-950	700-1200
Leijutusnopeus [m/s]	3-10	0,5-3
Polttohyötysuhde [%]	95-99.5%	90-96%

Koska molemmat kiertoleijukattilat ovat pääpiirteittäin samanlaisia, kärsivät ne samanlaisista ongelmista. Tällaisia ovat muun muassa se, että liian korkean lämpöarvon polttoaineen poltto aiheuttaa hankaluuksia: mikäli leijupetikattilassa poltetaan esimerkiksi korkealaa-tuista kivihiiltä, nousee pedin lämpötila niin suureksi, että suurin osin tuhkasta koostuva petimateriaali alkaa sulaa, ja jäähtyessään se jähmettyy yhtenäiseksi. Lisäksi, koska ilmaa puhalletaan reippaalla nopeudella, ei ilma pelkästään tuo palamiseen tarvittavaa happea, vaan se myös vie tuhkatkin pesästä lentotuhkan muodossa. (Vakkilainen 2017 s. 213-217)

Kuplapetikattilan pedin päällä oleva korkea lämpötila aiheuttaa lisähaasteita poltossa, mikäli polttoaine sisältää helposti sulavia ainesosia, jotka eivät pala, esimerkiksi alkaleja. Koska kiertopetikattilassa peti on koko polttokammion kokoinen, palo-olosuhteet ovat hyvin yhtenevät ympäri kattilaa ja polttotapahtuma on hyvin tasainen. Lisäksi kuplapetikattilan korkeampi palolämpötila asettaa painetta lisätä kattilaan typen oksidien poistoon tarvittavia järjestelmiä, kun taas kiertopetikattilan palolämpötila jää sen verran matalaksi, ettei merkittäviä typpipäästöjä pääse syntymään. (Vakkilainen 2017 s. 220)

## **2.2 Tuhkan muodostuminen**

Perinteisesti arina- tai pölypoltossa tuhka koostuu polttoaineen osista, jotka eivät pala, esimerkiksi hiekasta, sekä palamattomasta hiilestä, sillä täydellistä palotapahtumaa on lähes mahdoton saavuttaa. Lisäksi erilaiset päästöjenhallintatavat, esimerkiksi kalkkikiven lisääminen rikki-pitoista polttoainetta polttaessa, lisäävät tuhkan määrää. Kattilapoltossa syntyvä tuhka jaetaan kahteen pääryhmään, lentotuhkaan ja pohjatuhkaan sen mukaisesti, kuinka tuhka poistuu kattilasta. (Vakkilainen 2017 s. 41)

Lentotuhkalla tarkoitetaan tuhkaa, joka poistuu kattilasta savukaasujen mukana, ja koska leijupetikattiloissa syötettävän ilman nopeus on esimerkiksi arinoita suurempi, on myös lentotuhkan suhteellinen määrä hyvin korkea. Lentotuhka koostuu sekä poltosta jäljelle jäävästä tuhkaosuudesta ja pienestä määrästä palamatta jäänyttä hiiltä, mutta myös pieneksi kulu-neesta petihiekasta. Lentotuhka on kerättävä pois savukaasusta ennen ilmaan pääsyä.



Pohjatuhkalla tarkoitetaan yleisesti ottaen palotilan pohjalta poistettua tuhkaa, jota leijupelitoltossa kertyy vain vähän. Perinteisessä arinapoltossa kuitenkin pohjatuhka on merkittävässä osassa, ja sen tutuin ilmenemä ihmisille on takan tai saunan pesän pohjalle jäävä tuhka, joka sisältää epäpuhtaasta palamisesta johtuen huomattavamman määrän palamatonta hiiltä, kuin mitä kattilapoltosta syntyisi.

## **2.3 Lämpöpintojen likaantuminen**

Kattilan lämpöpinnoille kertyy väistämättä tuhkaa, ellei kattilassa polteta hyvin puhdasta polttoainetta, esimerkiksi maakaasua. Tavanomaisimmin maakaasua poltetaan kattiloissa vain käynnistys- ja apupolttoaineena, ja pääsääntöinen energia tuotetaan esimerkiksi biomassalla, joten tuhkan kertyminen lämpöpinnoille on otettava huomioon lähes aina. Lämpöpinnan likakerros aiheuttaa lämpöpinnan ja virtaavan savukaasun väliin eristävän kerroksen, joka aiheuttaa kattilan suorituskyvyn heikkenemisen niin lämmönsiirtotehon pienenemisenä kuin lisääntyvänä painehäviönäkin. Lisäksi ongelmia syntyy itse lämmönsiirtopinnoille, ja ne on käsitelty työssä jäljempänä. (Huhtinen et al. 2000 s. 209)

Lämpöpinnat voivat likaantua eri tavoilla: koska savukaasu on kuumempaa, mitä lämmönsiirtimen vesi-höyry-piirin fluidi samassa kohdassa, voi savukaasussa olevat höyrystyneet alkalit tiivistyä lämmönsiirtopintaan. Lisäksi savukaasuvirtauksen mukana tuleva sula tuhka kiinnittyy helposti lämpöpintoihin. Tuhkapartikkelit kiinnittyvät pintoihin myös suoraan törmäämällä, mutta tästä ei aiheudu merkittävää haittaa. Mikäli tavanomaisia kiinteitä tuhkapartikkeleita ei puhdisteta lämmönvaihtimen pinnasta riittävän usein, on mahdollista, että ne takertuvat pintaan sintraantumalla. Tämä tarkoittaa sitä, että tuhkapartikkelit jäävät kiinni toisiinsa, vaikka niiden sulamislämpötila ei ylitä. (Huhtinen et al. 2000 s. 209)

### **2.3.1 Nuohous**

Tuhkaa voidaan poistaa lämpöpinnoilta erilaisilla nuohoimilla ja tärisyttimillä. Tyypillisin tapa poistaa tuhkaa on erityyppisesti asetellut puhallusnuohoimet, jotka poistavat tuhkaa puhaltamalla lämpöpintaa joko paineistetulla höyryllä tai paineilmalla. Nuohoimessa voi olla joko yksi tai useampi nuohousviuhka, ja nuohoinputki voi joko liikkua tai olla paikallaan. Nuohointyyppi valitaankin yleensä sen mukaan, mikä sopii parhaiten tiettyyn lämpöpintaan. (Huhtinen et al. 2000 s. 214-217)

Lämpöpintoja voidaan myös tärisyttää mekaanisesti tai äänen avulla. Tällöin massanhitauksen vuoksi lämpöpinnan ja lian nopeus on eri, jolloin lika irtoaa pinnasta. Nämä menetelmät soveltuvat erityisesti erittäin likaisille pinnoille, sillä suuret likamäärät irtoavat helpommin, kun taas hienojakoinen pöly on hankala irrottaa kyseisillä menetelmillä. Lisäksi esimerkiksi rikkiä sisältävistä polttoainetta poltettaessa nousee esille se hyöty, ettei menetelmät lisää savukaasuihin kosteutta ja täten lisää korroosioriskiä. (Huhtinen et al. 2000 s. 217-219)

Kaikille tuhkanirrotustavoille on yhteistä se, että mikäli lämpöpinnalle päätyy polton seurauksena hyvin vaikeasti poistettavaa sulaa tuhkaa, eivät ne kykene sitä poistamaan. Tämän vuoksi on ensiarvoisen tärkeää, että kattilassa käytettävä polttoaine on sellaista, että voidaan varmistaa, että kattilaan ei pääse muodostumaan sinne kuulumattomia kertymiä, sillä ne aiheuttavat lämmönsiirtotehon heikkenemistä sekä epätasaista lämpökuormaa, painehäviöitä tai pahimmassa tapauksessa koko savukaasun kierron tukkeentumista ja tietenkin myös lisääntyvää korjaus- ja huoltotarvetta. (Vakkilainen 2017 s. 182)

## **2.4 Tuhkan käsittely**

Tuhkaa käsitellään sen mukaan, mistä se on lähtöisin ja kuinka paljon sitä on. Perinteisesti arinakattilan pohjalla on ruuvikuljetin, jolla pohjatuhka kuljetetaan pois kattilasta, ja tätä voidaan käyttää myös leijupetikattiloissa tiettyyn pisteeseen asti. Koska leijupetikattiloiden tuhka on usein kuitenkin hyvin kuumaa, käytetään niissä tyypillisesti vesijäähdytteisiä kuljettimia. (Vakkilainen 2017 s. 162)

Lentotuhka erotellaan useimmiten sähkösuodattimella, sillä sen hyötysuhde on erittäin korkea ja painehäviöt pienet. Sähkösuodattimessa korkeajännitteellä luodaan tuhkaan varaus, joka on vastakkainen suodattimen metallipintaan nähden. Näin tuhkapartikkelit ajautuvat kiinni vastakkaisesti varautuneisiin metallipintoihin. Tuhka poistetaan pinnoilta edelleen tärisyttämällä pintaa joko iskemällä pintaa esimerkiksi vasaralla tai pyörittämällä epäkeskoakselista kappaletta siten, että tärinä välittyy pintaan. Sähkösuodattimen pohjalle pudonnut tuhka siirretään edelleen yleensä paineilman avulla. (Vakkilainen 2017 s.161, 163)

Toinen vaihtoehto on pölynimurin pussia muistuttava suodatinkankaaseen perustuva suodatin, joka on yksinkertaisempi ja halvempi rakentaa, kuin sähkösuodatin, mutta sen painehäviöt ovat korkeammat, suodatin suodattaa vain silmäkokoa suuremmat partikkelit ja suodatin ei kestä korkeita lämpötiloja. Koska tuhka jää suodattimen sisälle, vaatii sen puhdistus tai vaihto joko laitoksen alasajon tai vastaavasti vierelle vaihtoehtoisen suodattimen, joka ei sekään ole kustannustehokas ratkaisu. (Vakkilainen 2017 s. 161-162)

### 3 POLTTOAINEIDEN TUHKA-ANALYYSIT

Polttoaineille on saatavilla laajasti analyysijä niiden alkuainepitoisuuksista. Tässä työssä ollaan kiinnostuneita lähinnä tuhkaan jäävistä yhdisteistä, mutta myös rikistä, joka palaa polttoaineen mukana muodostaen rikkidioksidia. Myös kloori on alkuaineena kiinnostava, sillä se kaasuuntuu palamisreaktiossa, ja reagoi mahdollisesti vasta myöhemmin esimerkiksi lämpöpintojen metallien kanssa.

**Taulukko 2.** Polttoaineiden tuhkapitoisuus ja kiinnostavat parametrit (Girón et al. 2012 s. 1544, Karampinis et al. 2011, Strömberg 2006, Shao et al. 2012 s. 26).

	Tuhkapitoisuus [%]	Rikkipitoisuus [%]	Klooripitoisuus [%]
Kuori	2-6	0-0,1	0-0,02
Olki	4-10	0,05-0,2	0,05-1,5
Eukalyptus	3-5	0,03-0,1	0,5-1
Turve	2-9	0,1-0,5	0-0,1
Hiili	22-29	0,5-1,1	0
Jäte	5-13	0,07-0,5	0,01-1,5

**Taulukko 3.** Polttoaineiden tuhkan alkuainepitoisuudet, pitoisuudet massaprosentteina (Girón et al. 2012 s. 1544, Karampinis et al. 2011, Strömberg 2006, Shao et al. 2012 s. 26).

	Si	Al	Fe	P	Ca	Mg	Na	K
Kuori	7,3	2,0	0,9	1,3	26,3	1,9	0,5	4,1
Olki	30,3	0,2	0,2	1,7	7,7	1,2	0,7	5,6
Eukalyptus	14,4	4,5	1,3	1,6	54,9	9,1	1,3	2,9
Turve	19,0	5,1	9,0	1,0	11,0	0,9	0,3	0,7
Hiili	49,8	19,7	3,8	0,3	9,9	2,1	4,2	1,0
Jäte	16,1	5,9	1,9	0,3	16,6	1,5	2,0	1,6

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty tärkeimmät luvut työn kulkua ajatellen. Kaikki luvut eivät ole samasta lähteestä haettuja, joten lukujen suora vertailu toistensa välillä ei välttämättä kerro pitoisuuksien absoluuttisia eroja. Toinen asia, mikä tulee huomioida, on se, että polttoaineissa on eroja esimerkiksi hankintapaikan mukaan: mainittu kuori on havupuun kuorta, eikä sen arvot vastaa esimerkiksi lehtipuiden kuoren arvoja. Lisäksi myös vertailun eukalyptus on tarkemmin ottaen eukalyptuksen kuorta, ja tarkemmin ottaen kyseessä on kuumepuu. Hiileksi on valikoitu ligniitti eli ruskohiili, koska leijupedin hyödyt korostuvat huonolaatuisempaa hiiltä polttaessa, ja hyvälaatuiset hiilet poltetaankin yleensä erikseen pölypoltolla.

Hiilen alkuainepitoisuuksissa on merkittäviä eroja sen mukaan, mistä louhoksesta hiili on louhittu. Analyysin hiili on louhittu itäisestä Kanadasta (Shao et al. 2012 s. 26).

### **3.1 Verrokkipolttoaine**

Verrokkipolttoaineeksi valikoitui perinteinen suomalainen biopolttoaine, puun kuori. Sitä syntyy sivutuotteena metsä- ja paperiteollisuudesta, kun puut kuoritaan tuotantoa varten. Alkuaineanalyysin arvot ovat havupuun kuorelle, mutta kuoren suurin ongelma on yhtäläinen kaikkien tavallisten puulajien kohdalla. Kasvaessaan puun kuori kerää maaperän hiekan ja näin ollen kuorta polttaessa kattilaan jää hiekkaa. Myös se, että puupohjaisissa polttoaineissa on huomattavan paljon haihtuvia, on otettava huomioon kattilasuunnittelussa, sillä kun suuri määrä haihtuvia palaa, myös liekin koko kasvaa suureksi. (Alakangas et al. 2016 s. 54)

Suomessa puupolttoaineet ovat merkittävä energianlähde, ja niiden polttaminen soodakattilapolttota lukuun ottamatta yleensä hyvin samankaltainen prosessi riippumatta siitä, mitä osaa puusta poltetaan. Puupolttoaineiden poltossa tulee aina huomioida se, että energiasisältö ja tiheys voivat olla hyvin vaihtelevia puun osan ja säilytysajan mukaan, ja näin ollen polttoaineensyöttö ja polttoaineen syötön mittausjärjestelmät on suunniteltava riittävän monipuolisiksi, jotta kattilaa pystytään säätämään riittävän monipuolisesti. Nämä aiheuttavat kuitenkin myös sen, ettei kattilan säätö ole kovinkaan nopeaa ja tarkkaa.

### **3.2 Olki**

Oljen suurin haaste kattilapoltoissa on sen matala tiheys, mutta polttoteknisesti suurin haaste on sen sisältämä korkea määrä alkaleja. Tuoreen oljen kemialliseen koostumukseen vaikuttaa kuitenkin kasvuolosuhteet, ja vastaavasti keräämisajankohta vaikuttaa poltettavaksi saapuneen oljen kemialliseen koostumukseen: mikäli oljen annetaan seistä pellolla, vesisade huuhtoo siitä klooria ja alkaleita, mutta vastaavasti pellolla seisottaminen lisää oljen kosteutta ja laskee sen energiatiheyttä, ja pahimmassa tapauksessa kostea olki vaatii jopa koneellista kuivatusta, jolloin poltosta saatava hyöty jää matalaksi. Aikaisin korjatun oljen klooripitoisuus onkin niin korkea, että se saattaa aiheuttaa ongelmia poltettaessa. (Alakangas et al. 2016 s. 133)

Koska olki on sekä matalasta energiatiheydestä että haastavan kemiallisen koostumuksen takia hankalahkoa polttaa, on sen poltto usein myös kannattamatonta. Oljen matalan energiatiheden vuoksi sen kuljettaminen pitkiä matkoja ei ole järkevää, ja tähän kukkuraksi tulee itse polttotekniikan haasteet: vaikka oljen tehollinen lämpöarvo on samankaltainen kuin puulla, on energiatiheys matala. Tämä vaikuttaa muun muassa polttoaineensyötön mitoitukseen, joten mikäli laitos on mitoitettu sopivaksi esimerkiksi puupolttoaineita varten, ei polttoaineensyöttökapasiteetti riitä oljelle. Näiden syiden vuoksi olkea poltetaan pääsääntöisesti juuri oljen polttoon suunnitelluissa laitoksissa lähellä tuotantolähdettä. Kattilatyyppejä on lähes poikkeuksetta arina, ja tähän on kaksi syytä: myöhemmin selitettävä käyttäytyminen poltettaessa sekä energiatiheden ja saatavuuden aiheuttamat kattilatehoa rajoittavat haasteet. (Alakangas et al. 2016 s. 131)

### **3.3 Eukalyptus**

Lämpimissä olosuhteissa viihtyvä nopeakasvuinen kuumepuu sekä myös muut eukalyptuslajikkeet sisältävät muihin puupolttoaineisiin nähden huomattavan paljon klooria. Koska kloori ei osallistu itse palamisreaktioon mutta kaasuuntuu savukaasujen joukkoon, on palamislämpötila merkityksellinen asia: kloorikaasun reaktio vesihöyryn kanssa aiheuttaa vetykloridin muodostumisen ja joka edelleen veden kanssa reagoiessaan aiheuttaa suolahapon muodostumisen. Koska kumpikin reaktio on lämpötilasta riippuvainen ja molemmat ovat voimakkaasti syövyttäviä happoja, on palolämpötilan huomiointi tärkeää. Tämä tulee ottaa huomioon hyvin jo kattilan suunnittelussa, mutta vastaavasti monessa lämpimässä maassa erilaiset eukalyptuslajikkeet ovat nopean kasvunsa vuoksi hyviä paitsi paperin raaka-aineena, myös energianlähteenä. (Xie & Ma 2014)

Muuten eukalyptus muistuttaa hyvin lähelle muita puupohjaisia biopolttoaineita: siinä on huomattavasti haihtuvia ja näin ollen se tarvitsee tarpeeksi suuren palotilan. Myös alkalipitoisuudet ovat muiden puupohjaisten biopolttoaineiden tavoin korkeat, joten se tulee ottaa poltossa huomioon. (Girón et al. 2012 s. 1544)

### **3.4 Turve ja hiili**

Sekä turve että hiili lasketaan fossiiliseksi polttoaineiksi, eli niiden ei katsota uusiutuvan niin nopeasti, että niiden polttamisen nähdään tuovan ilmakehään hiilidioksidia luonnonkierron

ulkopuolelta. Kumpikin polttoaine on syntynyt, kun eloperäistä ainetta on jäänyt hapettomaan tilaan, jossa eloperäinen aines ei ole voinut hajota ja on jäänyt kerrostumaksi maan alle. Mitä pidemmän aikaa polttoaine on maan alla ollut, sitä tiiviimmäksi se on pakkautunut ja samaan aikaan haihtuvat ovat poistuneet. Näin ollen polttoaineet ovat suurimmiltaan osin hiiltä, mutta koska myöskään rikki ei ole haihtuva, on myös sen pitoisuus korkea molemmissa polttoaineissa, mutta varsinkin hiilessä. Samasta syystä myös tuhkapitoisuus on suuri: mikäli aikanaan eloperäisen polttoaineen seassa on ollut esimerkiksi hiekkaa, on se jäänyt sellaisenaan polttoaineen sekaan, ja pitoisuus on kasvanut, kun lähinnä haihtuvat ovat hävinneet. (Alakangas et al. 2006)

Asia, joka tulee lisäksi hiiltä polttaessa huomioida, on sen sisältämä lämpöarvo. Mikäli leijupetipoltossa lämpötila kasvaa liian korkeaksi, pedissä oleva tuhka alkaa sulamaan. Tämä aiheuttaa sen, että tuhkan jäähtyessä peti paakkuuntuu ja täten se ei ole enää kykeneväinen toimimaan toivotusti.

### **3.5 Jäte**

Ihmisen toiminnasta, niin kotitalouksista kuin teollisuudestakin, jää jäljelle heikosti hyödynnettävää ainesta, josta halutaan eroon, eli jätettä. Tärkein motiivi jätteenpoltolle on se, että jätteestä halutaan eroon ja polttamalla vältetään esimerkiksi kaatopaikalta eloperäisen materiaalin mätänemisestä syntyvät metaanipäästöt. Lisäksi nykypäivän trendien mukaan raaka-aineet halutaan käytettävän mahdollisimman tarkasti, ja jätteessä onkin merkittävä potentiaali energiantuotantoon. Metaanipäästöistä halutaan eroon, koska metaani on 25 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu (Eurostat 2017). Vaikka kaatopaikkakaasut voidaan kerätä ja edelleen polttaa, on se usein kuitenkin varsin kustannustehoton ratkaisu ja kaasun keräysaste jää usein pieneksi, ja näin ollen isojen jätemäärien polton nähdään olevan hyvä ratkaisu, jolloin myös kaatopaikkatoimintaan vaadittava tila on vähäisempää. (Pekonen 2014)

Mikäli jätettä poltetaan voimalaitoksessa, on se lajiteltava riittävän tarkasti, jotta se soveltuu poltettavaksi. Näin ollen jätteestä on eroteltava se osa, jota ei haluta poltettavan, esimerkiksi

lasi ja metalli. Koska erottelu ei kuitenkaan ole täydellistä, aiheuttavat jätteen joukossa olevat epäpuhtaudet haastetta niin suunnittelussa, kuin käytössäkin.

Alkuaineanalyysin jäte koostui puun, paperin ja muovin sekoituksesta, eli kotitalous-, toimisto- ja rakennusjätteen pääsääntöisistä komponenteista. Varsinkin paperi aiheuttaa suuren määrän tuhkaa ja vastaavasti muovin ollessa öljystä jalostettu tuote, on myös öljyn poltossa ilmeneviä päästöjä havaittavissa jätteenpoltossa. Koska seoksen suhteet vaihtelevat kuitenkin hyvin voimakkaasti, aiheuttaa se haasteita niin polttoaineen syötön kuin kattilasuunnittelun saralle: kaikessa on mentävä sen mukaan, mikä on vaikein mahdollinen skenaario.

Jätteenpoltossa muihin polttotekniikoihin nähden myös myrkyllisten yhdisteiden vapautuminen on suurempi kysymysmerkki. Koska jätteen seassa voi olla mitä tahansa, myös savukaasukoostumus voi olla hyvin vaihteleva. Tämä tarkoittaa sitä, että polttoaineen seassa voi olla aineita, jotka muodostavat hyvinkin myrkyllisiä yhdisteitä. Myrkyt eivät aiheuta yleensä merkittäviä haasteita itse polttamista ajatellen, mutta ympäristömääräysten vuoksi ne tulee huomioida ja niiden poistaminen savukaasuista voi vaatia merkittäviä ponnisteluja. (Lavric et al. 2003 s. 141-142)



## 4 TUHKAN VAIKUTUKSET KATTILASSA

Kaikki huomioitavat aineet aiheuttavat haasteita kaikissa kattilatyypeissä, mutta osa haasteista korostuu leijupetipoltossa. Tähän syytä on kaksi: suuri paloilmaman nopeus ja tästä aiheutuva tuhkan käyttäytyminen sekä hiekkapedin ominaisuudet ja käyttäytyminen.

### 4.1 Hiekka

Lähes kaikkia kiinteitä polttoaineita polttaessa polttoaineen seassa on hiekkaa. Kivihiili, turve sekä puun osat, jotka ovat lähellä maata tai maan sisällä, sisältävät paljon hiekkaa, joka on pääasiallisesti kvartssia. Koska kuitenkin fossiilisten polttoaineiden muodostumisessa on korkeat paineet, ovat hiekanjyvät pienentyneet hienoiksi, kun taas esimerkiksi kantoja polttaessa polttoaineen joukossa on isompaakin kiveä. (Alakangas et al. 2016 s. 83, Stoch 2015)

Kun kivihiiltä poltetaan sille parhaalla mahdollisella tavalla, eli pölypoltolla, kivihiilen tuhka päätyy suurimmaksi osin kattilan pohjalle, josta se voidaan poistaa normaalisti. Kun taas hiekkapitoista polttoainetta poltetaan leijupetikattilassa, päätyy se partikkelikokonsa mukaan joko lähes välittömästi ilman mukana savukaasukanavaan tai vaihtoehtoisesti se jää osaksi petihiekkaa. Suurin haaste aiheutuu kivistä, joiden muoto on epätasainen: pyöreällä kivellä rajanopeus on hyvin matala, mutta kun kivessä on pinta-alaa enemmän tietyllä seinällä, se lähtee paloilmaman mukana ennaikaisesti kohti savukaasukanavaa. Tämä tarkoittaa sitä, että tavallista raskaammat hiekanjyvät pääsevät kosketuksiin lämpöpintojen kanssa, jolloin suunniteltua kovempaa eroosiota alkaa tapahtumaan pinnoilla. Lisäksi partikkelin kovuus vaikuttaa olennaisesti siihen, kuinka paljo se aiheuttaa eroosiota, ja kivi verrattuna esimerkiksi suolaan on kovempaa ja näin ollen aiheuttaa merkittävän eroosiovaaran kattilassa. (Huhtinen et al. 2000 s. 213, Vakkilainen 2017 s. 190-191)

### 4.2 Alkalit

Yksivuotisissa viljelyskasveissa on suuret määrät alkaleja, ja tämä aiheuttaa useampia haasteita poltossa. Suurimpana ongelmana voidaan pitää sitä, että alkalien sulamislämpötila on sen verran matala, että se ylitetään kattilapoltossa helposti, ja tästä aiheutuu se, että sulat alkalit alkavat sitoa hiekkaa aiheuttaen paakkuja. Kun taas hiekka alkaa jäähtyä, alkaa syntyä suuria paakkuja, joita ei enää saada uudelleen sulamaan. Tällöin ainoa vaihtoehto pedin

saamiseksi uudelleen toimintakykyiseksi on poistaa vanha hiekka kattilasta ja laittaa uutta tilalle. Koska hiekka paakkuuntuu usein tällaisessa tilanteessa pahoin, on hiekan vaihto tehtävä miestyövoimalla.

Tuhkan sulamisesta aiheutuvaa ongelmaa on helpompaa hallita CFB-kattilassa kuin BFB-kattilassa. Tämä johtuu siitä, että kiertopedissä lämpötila on koko pedissä tasainen, mutta kuplapetikattilassa lämpötila on huomattavasti korkeampi itse pedin päällä. Myös kiertopetikattilassa lämpötilaa on kuitenkin tarkasteltava, ettei tuhka pääse sulamaan (Huhtinen et al. 2000 s. 157-161).

Toinen haaste on se, että alkalit tekevät lentotuhkasta tahmaista, ja se alkaa tarttua lämmönsiirtopintoihin tavallista herkemmin. Tämä aiheuttaa sen, että lämmönsiirtopintojen lämmönsiirtokyky laskee merkittävästi, sillä tuhka on hyvä eriste. Koska miedosti emäksinen alkalipitoinen tuhka ei ilman riittävää sulamista aiheuta voimakkaita kemiallisia reaktioita lämmönsiirtopintojen materiaalien kanssa sellaisenaan, voidaan ilmiöllä nähdä olevan myös positiivinen puoli: kun lämmönsiirtopinnalla on tuhkerakos, se suojaaa itse pintaa sekä eroosiolta että korroosiolta. Tuhkerakos estää esimerkiksi klooriyhdisteiden suoran kosketuksen lämmönsiirtopinnan kanssa ja myös mekaaninen kuluminen loppuu, kun välissä on suojaava kerros. (Naganuma et al. 2013, Vakkilainen 2017 s. 182, 187)

Koska savukaasuvirtauksen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka tuhka lämmönsiirtopinnalle kerrostuu, voidaan joutua tilanteeseen, jossa voimakkaimman rasituksen alla olevat kohdat lämpöpinnoista ovat paljaita, eli ne altistuvat edelleen muun muassa eroosiolle, joten kuluminen jatkuu entiseen tapaan. Lisäksi lähinnä tulistimilla lämpötilojen ollessa riittävän kuumia, ovat alkalit sulia, ja tuhkan nestepitoisuuden kasvaessa tarpeeksi ne alkavat valua pitkin putkien pintoja. Tämä aiheuttaa pintojen korroosiota. Kun tuhka kerrostuu vähemmän eroosioalttiille pinnoille, on kuitenkin lämmönsiirtoon vaikuttavat ilmiöt merkittäviä. (Vakkilainen 2017 s. 187)

### **4.3 Kloori**

Kloori on yksi merkityksellisimmistä alkalivaikutusten aiheuttajista. Kloori on sekä kaliumiin että natriumiin yhdistyneenä erittäin haasteellinen, sillä se aiheuttaa hyvin

voimakasta korkean lämpötilan korroosiota. Poltossa kloori kaasuuntuu tai vaihtoehtoisesti reagoi vedyn kanssa muodostaen suolahappoa. Koska lämmönsiirtopinnat ovat yleensä terästä tai rautaa, reagoi kloori niiden kanssa varsinkin alkalimuodossa hyvin voimakkaasti muodostaen rautakloridia (Bankiewicz et al. 2012). Tämä tarkoittaa sitä, että lämpöpinnasta kuluu materiaalia pois, jonka seurauksena materiaalien paineenkestävyys heikkenee ja lämpöpinnoissa saattaa alkaa esiintymään vuotoja. Lisäksi on mahdollista, että vetykloridi käytäytyy rikkihapon tavoin kattilan loppupäässä, jossa lämpötilat laskevat. (Vakkilainen 2017 s. 187)

Erityisesti jätteenpoltossa ongelmallinen seikka on myrkylliset klooriyhdisteet, dioksiinit. Varsinkin käsiteltyä puuta ja PVC-muovia polttaessa suurien dioksiinipäästömäärien muodostuminen on mahdollista, mutta hyvällä polttotapahtuman hallinnalla suuri osa dioksiinipäästöistä voidaan saada kuriin. (Lavric et al. 2003 s. 141-142, Vakkilainen 2017 s. 51).

#### **4.4 Rikki**

Rikkiä käsitellessä merkittävin haaste on rikkihapposyöpyminen, ja se onkin varsinkin hiilen poltossa hyvin tunnettu ongelma jopa hyötysuhdetta rajoittavana tekijänä. Palaessaan rikki muodostaa rikkidioksidia, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa heikon hapon, nimeltään rikkihapokkeen, joka on myös happosateiden muodostumisen kannalta merkityksellinen tekijä. Jos taas rikkidioksidi pääsee edelleen reagoimaan hapen kanssa, on lopputuloksena rikkitrioksidia. Rikkitrioksidin reagoidessa veden kanssa, syntyy hyvin hapanta happoa, rikkihappoa. Rikkihapposyöpyminen alkaa, kun savukaasun lämpötila laskee alle rikkihapon kastepisteen. Tällöin rikkihappo alkaa tiivistyä pinnoille aiheuttaen voimakasta korroosiota. (Huhtinen et al. 2000 s. 212, Vakkilainen 2017 s. 187)

Kattilan pinta on tyypillisesti oksidien suojaama, toisin sanoen ruosteessa, koska metallit reagoivat herkästi hapen kanssa muodostaen oksideja. Korkeissa lämpötiloissa on mahdollista, että rikkipitoisen savukaasun rikki pääsee tunkeutumaan oksidikerroksen läpi, jolloin se alkaa muodostaa metallin kanssa sulfideja. (Huhtinen et al. 2000 s. 211)

## 4.5 Metallit

Metallit ovat varsinkin jätteenpoltossa merkittävä haaste. Raskasmetallipäästöille on asetettu tiukat rajat, sillä niille on ominaista, että ne siirtyvät ravintoketjuissa aina ylöspäin aiheuttaen täten muun muassa ihmisille suurta raskasmetallikuormaa elimistöön, mikäli raskasmetallipäästöjä ei kontrolloida. Lisäksi metallit saattavat olla joko voimakkaasti pintoja likaavia tai vastaavasti kykenevät aiheuttamaan voimakasta korroosiota. (Alakangas et al. 2016 s. 150-151)

Polttoteknisesti haasteellisin metalli on alumiini. Se sulaa jo matalissa lämpötiloissa, eikä se hapetu kuten esimerkiksi teräs. Tällöin savukaasuun jää sulaa metallia, joka tarraa kiinni lämpöpintoihin aiheuttaen pahimmillaan kattilan tukkeutumisen. Alumiinin haasteellisuutta jätteenpoltossa lisää se, että sitä tulee runsaasti esimerkiksi kotitalouksista alumiinifolion muodossa. Tämän takia onkin ensiarvoisen tärkeää, että jäte esikäsitellään riittävän tehokkaasti. (Alakangas et al. 2016 s. 150-151)

## 5 HANKALUUKSIEN SELÄTTÄMINEN

Poltettaessa mitä tahansa tyypillistä polttoainetta kattilassa, on huomioitava polttoaineelle tyypilliset haasteet. Kun halutaan polttaa useampaa polttoainetta sekaisin, tulee huomioida sekä jokaisen polttoaineen yksittäiset haasteet, että myös näiden yhdistelmien haasteet. Suunnittelussa ja käytössä pyritään aina siihen, että voimalaitoksen elinaikana se tuottaa mahdollisimman paljon voittoa omistajilleen, joten rakentamisen ja käytön kulut pyritään minimoimaan ja vastaavasti tehoa toivotaan tulevan mahdollisimman paljon. Tässä kohdassa myös kattilan käyttövarmuus nousee suureen merkitykseen, sillä pysäytetty kattila aiheuttaa pelkästään menoja.

### 5.1 Lämpöpintojen suunnittelu

Kattilan lämpöpinnat pyritään aina suunnittelemaan siten, että niissä on kulumisvaraa. Koska teräksen hinta kasvaa merkittävästi, mitä enemmän sekä lämpöä että kulumista kestäväää se on, ei lämpöpintoja voida rakentaa yltiöpäisen suuriksi ja vahvoiksi. Hintaan vaikuttaa suuresti se, että materiaalin on kestävä vesipiirin korkeat paineet kuumissa olosuhteissa. Raha onkin ainoa merkittävä lämpöputkien seinämäpaksuutta rajoittava tekijä, sillä teräksen lämmönjohtavuuskyky on niin korkea, ettei se aiheuta merkittäviä lämpövastuksia, vaikka seinämäpaksuutta kasvatettaisiinkin. Myös lämpöpintojen sijoittelu on avainasemassa: lämpöpinnat on sijoitettava lämmönsiirto edellä, mutta eroosion ja korroosion vaikutuksia voidaan vähentää oikeaoppisella lämpöpintojen asettelulla. Yhdistämällä järkevä syöttöilman nopeus, sopiva sijoittelu ja optimaalinen materiaali, esimerkiksi käyttämällä savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisissä lämpöpinnoissa kestävämpiä materiaaleja, saavutetaan hyvä teknistaloudellinen ratkaisu. (Vakkilainen 2017 s. 62-63)

Kun lämpöpinta likaantuu, sen lämmönjohtavuuskyky heikkenee. Tämän vuoksi lämpöpinnan koko tulee optimoida sopivaksi, sillä mikäli lämpöpinta suunnitellaan sopivaksi puhtaana tai laskennassa käytetään likaantumiskorrelaatioita, jotka eivät täsmää käytettävän polttoaineen likaantumiskorrelaatioiden kanssa. Tällöin tuloksena on kahdenlaisia ongelmia: joko se ei todellisuudessa pysty siirtämään riittävästi lämpöä, jolloin seuraavalle lämpöpinnalle menee toivottua kuumempaa savukaasua, joka voi aiheuttaa pahimmillaan kattilan toiminnassa häiriöitä tai kattilan osien rikkoontumisen. Lisäksi yleisin murhe tilanteessa on se, että koska myöskin muut lämpöpinnat on mitoitettu tietyille lämmönsiirtotehoille, eivät ne

kykene siirtämään ylimääräistä lämpöä, jolloin savupiipusta ulos lähtevä savukaasu on toivottua kuumempaa ja näin ollen kattilan hyötysuhde laskee. Vastaavasti, mikäli jokin lämmönsiirtopinta ylimitoitetaan räikeästi, aiheuttaa se matalamman savukaasun tulolämpötilan seuraavalle lämmönsiirtopinnalle. Tästä saattaa aiheutua häiriötä kattilan vesikiertoon sekä rikkihappokastepisteen saavuttamisesta aiheutuvia ongelmia (Huhtinen et al. 2000 s. 209)

## **5.2 Savukaasun puhdistus**

Yleinen tapa vähentää happamia yhdisteitä, lähinnä rikkiä, leijupoltossa on lisätä polttokammioon happamia yhdisteitä sitovia aineita, kuten kalkkia. Kun kalkki reagoi ensin paloilmalla kanssa ja tämän jälkeen rikin yhdisteiden kanssa, muodostuu tuloksena lähinnä suolaa, vettä ja hiilidioksidia. Näin ollen tavalliset tuhkanerotusjärjestelmät riittävät yleensä savukaasun puhdistukseen happamien päästöjen osalta. Tuloksena on kuitenkin suurehko määrä kipsiä, joten se tulee huomioida erotuslaitteiden suunnittelussa ja aiheuttaa myös laitoksella kysymysmerkin, kun kyseinen kipsi pitää saada hävitettyä. (Vakkilainen 2017 s. 49-50)

Mikäli savukaasua joudutaan edelleen puhdistamaan happamista yhdisteistä, voidaan siihen suihkuttaa emäksisiä aineita, kuten ammoniakkaa, ureaa. Tämä on tavallista, kun savukaasusta joudutaan poistamaan korkean palolämpötilan aiheuttamia typen oksideja. Rikinpoisto esimerkiksi hiilen pölypoltossa täytyy hoitaa vasta palotapahtuman jälkeen, ja tähän käytetään yleensä kuivia tai märkiä rikkipesureita. (Vakkilainen 2017 s. 49)

Kalkkikiven lisäämisellä leijupetiin voidaan myös saavuttaa toisenlaista hyötyä: kalkkikivellä voidaan myös vähentää alkalipitoisen polttoaineen aiheuttamia kerrostumia, muttei kokonaan välttää niitä (Vakkilainen 2017 s. 31). Vastaavasti alkalipitoisen polttoaineen tuhkan sulamispistettä voidaan lisätä merkittävästi sekoittamalla joukkoon kaoliinia (Alakangas et al. 2016 s. 133).

## **5.3 Sekapoltto**

Usean eri polttoaineen poltto kattilassa asettaa vaatimuksia suunnittelulle. Lähtökohtaisesti tilanteessa suunnittelu täytyy tehdä siten, että pyritään huomioimaan polton aiheuttamat maksimaaliset haasteet, mutta joskus polttoaineiden yhtäaikaisella poltolla saadaan myös huomattavan positiivisia vaikutuksia. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää oljen ja hiilen

sekapolttoa: hiilessä oleva rikki nostaa tuhkan sulamislämpötilaa ja vastaavasti alkalit sitovat rikkidioksidia. Tämän seurauksena kalkkikiven tai vastaavan aineen lisäämistarve vähenee. (Alakangas et al. 2016 s. 133)

Toinen tyypillinen tapa sekoittaa polttoaineita on polttaa yhdyskuntajätettä ja biopolttoainetta sekaisin. Yleensä tämä johtuu siitä, että yhdyskuntajäte likaa kattilaa merkittävästi, ja polttamalla seassa lähinnä puupohjaisia polttoaineita voidaan kattilan puhdistustarvetta vähentää. Lisäksi asetelma antaa joustoa polttoaineiden saatavuuden ja hinnan mukaan. Biopolttoaineet ovat kuitenkin lähinnä kysyntänsä vuoksi usein huomattavasti kalliimpia, joten niitä ei energiayhtiöt ensisijaisesti halua polttaa jätteenpolttoon kykenevässä voimalaitoksessa. (Pöyry 2015, Uuskallio 2014)

#### **5.4 Palamisen hallinta**

Hallitsemalla kattilan palamisolosuhteita voidaan vaikuttaa siihen, kuinka tuhkan ominaisuudet realisoituvat. Mikäli kattilassa alkaa olla ongelmia rikkikastepisteen kanssa, voidaan palolämpötilaa nostaa aavistuksen, jolloin myös ulos lähtevän savukaasun lämpötila kasvaa. Tämä laskee kattilan hyötysuhdetta, mutta mahdollistaa tietyissä tapauksissa haastavampien polttoaineiden polton.

Nykypäivänä todennäköisempi tilanne on, että kattilan palolämpötilaa halutaan laskea. Tällöin esimerkiksi tuhkan sulaminen vähenee. Tärkein yksittäinen syy kattilan palolämpötilan laskemiselle on kuitenkin typpioksidipäästöjen vähentäminen. Kattilan lämpötilaa voidaan laskea esimerkiksi kierrättämällä pakokaasua paloilmän joukkoon. Toinen yleinen tapa on säätää primääri-, sekundääri ja tertiääri-ilman määrää ja jakautumista ja näin voidaan hallita liekkiä ja palamislämpötilaa kattilassa. (Huhtinen et al. 2000 s. 267-268, Vakkilainen 2017 s. 153)

## 6 KUINKA TUHKAYHDISTEET TULEE HUOMIOIDA KATTILAN SUUNNITTELUSSA JA KÄYTÖSSÄ?

### 6.1 Suunnittelun lähtökohdat

Kattilan suunnittelutyö voi alkaa pääpiirteittäin kahdenlaisesta lähtökohdasta: joko siten, että energiantuotannolle on tarvetta, jolloin aletaan selvittämään, minkä polttoaineen käyttö tulisi edullisimmaksi, tai sitten ollaan tilanteessa, jossa on jotain tiettyä polttoainetta ylimääräisenä, ja se halutaan valjastaa energiantuotantoon. Tästä voidaan pitää esimerkkinä jätteenpolttolaitoksia sekä metsäteollisuuden soodakattiloita. Joka tapauksessa kummassakin tilanteessa polttoainevalinta tiedetään hyvissä ajoin, ja sen pohjalta kattilaa aletaan suunnittelemaan.

Polttoaine määrää hyvin pitkälle kattilasuunnittelun pääpiirteet, ja osa polttoaineista on toisia huomattavasti haasteellisimpia. Tässä kohtaa pitää kohdata realiteetit, jotka tulevat sekä polttoaineen saatavuudesta, että polttotekniikasta. Koska metsä- ja peltopinta-ala pysyy varsin Euroopassa osapuilleen samanlaisena vuodesta toiseen, voidaan esimerkiksi pelto- ja metsäpolttoaineilla nähdä varsin hyvä saatavuus vuodesta toiseen. Siitä huolimatta keskikokoisen olkikattilan suunnittelu on paljon haasteellisempaa, kuin esimerkiksi keskikokoisen kuorikattilan. Tähän vaikuttaa se, että koska kuori on helppo polttoaine, voidaan sitä polttaa sekä kupla- että kiertopetikattilassa, mutta jos olkea ruvetaan polttamaan kuplapedissä, aiheuttaa se varsin pian koko kattilan toimintakyvyttömyyden, kun alkalipitoinen tuhka sulaa ja peti jämähtää kiinni. Vastaavasti, kun lähdetään kokoluokkaa ylemmäs, tulee vastaan se tosiseikka, että oljen pienen energiatihedden ja lyhyen korjuuajan vuoksi sen hankinta tulee ylitsepääsemättömäksi.

Kun polttoainevalintaa tehdään, on hyvä harkita monen polttoaineen sekapolttoa. Tämä vaatii kattilaan erityissuunnittelua ja -tekniikoita, mutta se myös palkitsee. Alkali- ja rikki- ja rikkipitoisten polttoaineiden sekapoltossa voidaan käyttää perinteisiä polttotekniikoita ja silti molempien ominaiset haasteet selättävät toinen toisensa. Lisäksi joko tuhkan liikaavuuden tai polttoaineen saatavuuden kannalta voidaan tehdä sekapolttoratkaisuja, joilla päästään esimerkiksi eroon tietynlaisesta määrästä jonkinlaista jätettä tai sivutuotetta, ja samalla voidaan tuottaa tarpeellinen määrä energiaa.



## 6.2 Kattilan suunnittelu

Mekaanisen suunnittelun alkaessa tuhkan vaikutuksiin paneutuminen on erittäin tärkeää, sillä nämä määräävät käytännössä sen, kuinka varmasti ja pitkään kattila tulee toimimaan. Tällöin on hyvä lähteä pahimpien mahdollisten vaikutusten huomioimisesta kattilassa. Loppupeleissä nämä samat kysymykset saattavat ratkaista kokonaisen kattilavalmistajan kohtalon. Kattilan kestävyyttä voidaan lisätä muutamalla suunnitteluratkaisulla, ja näiden kannattavuuden puntarointi vastaavasti on merkittävä kysymys.

Materiaalivalinnat ovat ilmiselvin tapa kasvattaa kattilan käyttöikä: kestävämpi teräs kuluu hitaammin, paksumpi teräs kestää kulutusta pidempään, ennen kuin se kuluu puhki. Nämä kuitenkin lisäävät kustannuksia merkittävästi, ja vastaavasti materiaalin kulutusta voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä mahdollisuuksien mukaan paksumpaa putkea: koska kulumisvara täytyy olla jokaisessa putkessa, tulee se halvemmaksi lisätä pienempään määrään putkia. Tätä ratkaisua tukee myös se, että paksummista ja harvemmin sijoitetuista putkista tehdyt lämmönsiirtimet ovat vähemmän alttiita tukkeentumiselle.

Odotetun kattilan käyttöiän lisäksi kustannuksia huomioidessa tulee esille heti se seikka, että mitä isompi kattila on, sitä enemmän siihen voi tehdä kalliita ratkaisuja. Mitä enemmän tehoa kattila tuottaa, sitä enemmän sekä hyötysuhdetta laskevat häviöt että alhaallaoloaika aiheuttavat taloudellista tappiota. Tästä näkökulmasta myös siis paksumpien ja kestävämpien putkien valinta voi olla järkevää: kun putket vuotaa, osa höyrystä lähtee häviönä piipusta pihalle ja vastaavasti niiden korjaamiseen menee aikaa.

## 6.3 Kattilan käyttö

Kattilan tulipesässä sijaitsevien lämpöpintojen eroosiota voidaan leijupoltossa vähentää merkittävästi laskemalla leijutusnopeutta. Varsinkin hiekkapitoisten polttoaineiden kohdalla tämä on merkittävä osa suunnittelua, mutta vastaavasti siinä tulee toinen puoli: kun nopeus laskee, myös lämmönsiirto ja palamisnopeus laskevat, joten kattilasta on tehtävä suurempi. Tämä taas lisää kustannuksia, mutta yleisesti ottaen on ollut nähtävissä, että kattilavalmistajat tekevät mieluummin hieman isomman kattilan, kuin että joutuvat taistelemaan vaikeita eroosio-ongelmia vastaan.

Kun kattila on valmis ja sitä aletaan käyttää, ei tuhkasta aiheutuvia haasteita voi päästää mielestä hetkeksikään. Esimerkiksi polttoaineen saatavuus ja varsinkin hinta voi kannustaa polttamaan vaikeammin poltettavia, epäpuhtaampia polttoaineita. Tällainen toiminta saattaa osua kuitenkin melko nopeastikin omaan nilkkaan: mikäli kattilaan laitetaan liian alkalipitoista polttoainetta tai vastaavasti sitä yritetään polttaa kovemmin liian suuressa lämpötilassa, tuhka sulaa ja tukkii kattilan. Mikäli taas sinne laitetaan suunnitteluarvoja enemmän liikaavia polttoaineita, kärsii lämmönsiirto ja hyötysuhde ja pahimmillaan kattila tukkeutuu.

Vastaavasti, jos kattilassa aletaan polttamaan esimerkiksi suunniteltua rikki- tai klooripitoisempia polttoaineita, saattaa olla, että aluksi kaikki sujuu niin kuin on suunniteltu. Myöhemmin kuitenkin alkaa syntymään erilaisia korroosio-ongelmia, jotka johtavat siihen, että kattila täytyy mahdollisesti ajaa alas välittömästi tai vähintäänkin korjata seuravan seisakin yhteydessä. Polttoaineessa tehty säästö saattaa nyt näkyä moninkertaisesti niin alhaallaoloajan tulonmenetyksinä kuin korjauskustannuksissakin.

Ei ole ennennäkemätöntä, että kattilassa aletaan polttamaan jopa selkeästi erilaista polttoainetta, kuin mihin se on alun perin suunniteltu. Tällainen toiminta vaatii kuitenkin aina sen, ettei kattilaan ruveta vain päättömästi syöttämään uutta polttoainetta, vaan että kattilalle tehdään perinpohjainen arviointi ja mahdollinen uudelleensuunnittelu ja muutostyöt koskien uutta polttoainetta. Vaikka koko kattila jouduttaisiin vaihtamaan, silti voimalaitoksen muut osat voivat olla edelleen hyvin käyttökelpoisia ja näin ollen näiden rakentamiskustannuksilta vältytään, jos verrattaisiin tilannetta siihen, että rakennettaisiin vanhan tilalle kokonaan uusi laitos. Näin ollen siis hyvällä johtamisella ja ymmärryksellä kattilan toiminnasta ja vaatimuksista voidaan pitkällä aikavälillä tehdä useita rahallisesti merkittäviä päätöksiä.

## **6.4 Tulevaisuus**

Ei ole kaukaa haettavaa ajatella, että tulevaisuudessa ollaan tilanteessa, jossa on yhä laajempi kirjo polttoaineita käytössä. Lisäksi kattiloiden hyötysuhteiden halutaan olevan mahdollisimman korkeita, joten arinoista halutaan eroon. Tällöin ollaan tilanteessa, jossa polttoaineesta riippuen esimerkiksi likaantuminen tai korroosio saattaa olla merkittävä ongelma. Näin ollen tulee tarkastella uusia vaihtoehtoja ongelmien selättämiseen.

Lämpöpintojen kestävyys ratkaisee raha, eikä kalliita seoksia haluta käyttää yhtään enemmän, mitä on taloudellisesti järkevää. Tämän vuoksi tulisi tarkastella mahdollisuuksia uusille materiaaleille: esimerkiksi jonkinlaisen keraamisen pinnoitteen käyttöä. Tällöin pinta ei olisi korroosiolle altis ja liukas pinta vähentäisi likaantumista. Materiaalin täytyy kuitenkin kestää todella hyvin eroosiota ja lämpöä, koska muuten sen ominaisuudet kääntyvät pääläelleen: epätasaisesti kulunut pinta kerää likaa ja myös liian kuumassa jotkin materiaalit muuttuvat tahmeiksi.

Hyvin likaantuvia polttoaineita polttaessa tavallinen höyry- tai ilmanuuhous ei välttämättä riitä puhdistamaan pintoja, joihin tahmainen sula tuhka on jähmettynyt. Tällöin voi olla aiheellista tarkastella mahdollisuuksia esimerkiksi lisätä hiovia ainesosia, kuten hiekkaa, nuohousilman tai -höyryn joukkoon. Tämä kuitenkin asettaa taas lisävaatimuksia pintojen kestävyydelle, joten suunnitelmia on tutkittava tarkoin.

## 7 POLTTOAINEIDEN ONGELMAT JA NIIDEN RATKAISU

Verrokkipolttoaineeksi valikoitunut puun kuori on kattilasuunnittelun ja -käytön kannalta helppo polttoaine. Se sopii lämpöarvonsa ja kosteutensa vuoksi erinomaisesti leijupetikattiloihin, sillä siitä saadaan biopolttoaineeksi hyvin energiaa, mutta palolämpötila ei ole kuitenkaan liian korkea. Vaikka kuori sisältää alkaleja, on niitä suurin osa kalsiumia, joka ei aiheuta ongelmia kattilassa yhtä helposti kuin kalium, ja muiden alkalien määrät ovat niin pieniä, etteivät ne aiheuta esimerkiksi pedin tukkeutumista. Tärkeimpänä asiana on kuitenkin se, että puun kuoren tuhkapitoisuus on itsessään jo matalahko. Kuoren ongelmat energiantuotannossa ovatkin lähinnä sen sisältämä hiekka ja säännöstely kattilaan. Hiekan vaikutuksia voidaan hallita valitsemalla vaikutusalueella oleville pinnoille kestävämpiä materiaaleja tai suojaamalla niitä muuten, mikäli se on mahdollista, esimerkiksi muurauksella. Biomassan säännöstely kattilaan on hankalaa sen raekoon ja tiheyden muutosten vuoksi, mutta hyvillä mittausinstrumenteilla nämäkin saadaan hoidettua, ja nykypäivänä tähän voidaan yhdistää pitkälle automatisoitu polttoaineen syöttö, jolloin ongelmaa voidaan pitää vähäisenä.

### 7.1 Olki

Olkea voidaan pitää jopa hankalimpana biopolttoaineena, mitä on yleisesti ottaen käytössä. Verrattuna esimerkiksi puun kuoreen, sen energiatiheys on hyvin pieni, joten sitä ei kannata kuljettaa pitkiä matkoja varsinkaan maanteitse. Lisäksi oljen saatavuus on hyvin kausiluonteista ja oljen säilöminen on myös hankalaa ja kallista: pienen energiatihetyensä vuoksi se vaatii isot varastot, varastoinnin aikana se haihduttaa osan energiastaan ja saattaa syttyä myös palamaan. Lisäksi olki aiheuttaa pitkän kuiturakenteensa vuoksi ongelmia kuljettimissa, sillä se takertuu pyöriviin komponentteihin kiinni. Näin ollen voidaan todeta, ettei sitä voida käyttää samoilla apulaitteilla, kuin esimerkiksi puun kuorta.

Myös oljen polttaminen on haasteellista. Siinä, missä puun kuoren alkalit ovat pääasiassa kalsiumia, on oljessa myös paljon kaliumia, jonka sulamispiste on hyvin matala. Näin ollen tuhka pääsee sulamaan ja aiheuttaa pedin tukkeentumisen. Kun yhdistetään oljen saatavuuden haasteet ja tästä aiheutuvat kattilan kokoa ja tyyppiä rajoittavat tekijät, huomataan, että vain kuplapetikattila on tässä kokoluokassa järkevä valinta. Vastaavasti kuplapetikattilassa lämpötilat ovat osassa kattilaa hyvinkin korkeita, joten sulamisongelma korostuu. Näin ollen, mikäli olkea halutaan polttaa, voidaan se tehdä kahdella tavalla: joko polttaa esimerkiksi

puun kuoren tai fossiilisten polttoaineiden seassa kiertopetikattilassa tai arinassa, joka kykenee poistamaan kattilasta sulan tuhkan.

Mikäli olkea saadaan poltettua, aiheuttaa se myös samankaltaisia ongelmia lämpöpinnoissa, mitä esimerkiksi eukalyptus. Alkaleihin sitoutunut kloori aiheuttaa korkean lämpötilan korroosiota, joka on varsinkin tulistimissa merkittävä ongelma. Tätä ongelmaa vastaan voidaan taistella sopivilla materiaaleilla, jotka ovat kuitenkin usein hyvin kalliita. Lisäksi sama alkalipitoinen lentotuhka aiheuttaa sen, että lämpöpinnoille alkaa kertymään tahmeaa likaa, joka heikentää lämmönsiirron ominaisuuksia. Puuta polttaessa lämpöpinnoille kertyvä tuhka ei ole tahmeaa, joten se saadaan poistettua pinnoilta erilaisilla nuohouslaitteilla, mutta alkali-pitoista sulaa tuhkaa ei. Näin ollen kattilan ominaisuudet eivät enää vastaa suunniteltuja, josta voi aiheutua esimerkiksi ylikuumenemista seuraavissa lämpöpinnoissa. Likaantuminen tulee ottaa tarkasti huomioon suunnitteluprosessissa.

## **7.2 Eukalyptus**

Eukalyptuksen suurin ongelma on sen sisältämä kloori, ja sitä lukuun ottamatta sen poltto-ominaisuudet ovat hyvin vastaavat, kuin vertailupolttoaineella. Sen lisäksi, että eukalyptuksen kloori aiheuttaa samanlaisia ongelmia pedissä kuin olkea polttaessa, sen sisältämä kloori myös kaasuuntuu. Tämä aiheuttaa sen, että sopivassa lämpötilassa kloorin alkaliyhdisteet ja lämpöpinnoissa oleva rauta reagoi ja muodostaa rautaklorideita, jolloin lämpöpinnasta syöpyy materiaalia. Tämä korostuu, kun sulat yhdisteet aiheuttavat sen, että syövyttävä tuhka tiivistyy ja kerrostuu lämpöpinnoille. Tällaiseen tilanteeseen voidaan reagoida valitsemalla putkimateriaalia, joka kestää hyvinkin voimakasta korroosiota. Tästä aiheutuu kuitenkin se, että putkiin tarvittava materiaali tulee hyvin kalliiksi.

## **7.3 Turve ja hiili**

Turve ja hiili ovat fossiilisia polttoaineita ja niiden kemiallinen koostumus eroaa verrokkipolttoaineesta merkittävästi. Lähtökohtaisesti, mitä pidempään polttoaine on maan sisällä muovautunut, sen vähemmän siinä on haihtuvia aineita. Näin ollen varsinkin hiili koostuu lähinnä pelkästä hiilestä, rikistä ja tuhkeyhdisteistä. Polttoaineiden energiatiheys on myös biopolttoaineita korkeampi, mistä aiheutuu haaste: mikäli korkealaatuista hiiltä, esimerkiksi antrasiittia, laitetaan suoraan verrokkipolttoaineen tilalle kattilaan, aiheuttaa hiilen korkea

lämpöarvo sen, että lämpötila kasvaa korkeaksi. Tällöin, kun hiilestä on jäänyt merkittävät määrät piiksidia tuhkana, tuhka alkaa sulaa. Näin ollen siis piiksidia pyrkii muuttumaan lasiksi ja jäähtyessään peti tukkeutuu.

Merkittävin ongelma kuitenkin molemmissa biopolttoaineissa on niiden sisältämä korkea rikki- ja trioksidipitoisuus. Polttotapahtuman seurauksena rikkidioksidi ja -trioksidi sitoutuu vesihöyryyn, jonka tiivistyessä lämpöpinnalle se aiheuttaa syöpymistä. Näin ollen, mikäli verrokipolttoainetta polttavaan kattilaan vaihdetaan polttoaineeksi esimerkiksi turve, saattaa se aiheuttaa merkittävää korroosiota varsinkin viimeisillä lämpöpinnoina, eli lähinnä ilman esilämmittimessä. Näin ollen ainoa järkevä vaihtoehto on poistaa savukaasu kuumempaan järjestelmästä, mikä aiheuttaa savukaasuhäviöiden kasvua. Koska rikkipäästöille on asetettu rajat, täytyy myös niiden poistovaihtoehtoja tarkastella. Näin ollen lisäjärjestelmät aiheuttavat lisäkustannuksia verrattuna siihen, että poltettaisiin verrokipolttoainetta.

## 7.4 Jäte

Vaikka verrokipolttoaineen kosteus ja lämpöarvo voivat vaihdella jonkin verran, on jäte huomattavasti haastavampi tapaus, sillä sen sisältö saattaa vaihdella hyvinkin runsaasti. Siinä, missä verrokipolttoainetta voidaan syöttää lähinnä ison siivilän läpi vältyäkseen isoimmilta sattumilta kattilassa, täytyy jäte lajitella tarkkaan sekä rouhia sopivaksi. Siitä huolimatta jätteen koostumus vaihtelee merkittävästi. Lisäksi jäte sisältää hyvin paljon erilaisia yhdisteitä, ja esimerkiksi PVC-muovin kloori aiheuttaa samankaltaisia ongelmia, kuin mitä eukalyptusta polttaessa esiintyy.

Vaikka puujäte ja verrokipolttoaineena toimiva puun kuori ovat lähtökohtaisesti samankaltaisia polttoaineita, ihmisen toiminnan seurauksena puujätteen ominaisuudet ovat saattaneet muuttua huomattavasti puun käytön aikana: se on saattanut lahota, siinä saattaa olla kyllästettä tai maalia ja siinä saattaa olla esimerkiksi nauvoja. Näin ollen polttoprosessiin päätyy myrkyllisiä yhdisteitä, joita ei saa päästää ilmakehään ja lisäksi metalleja, jotka ovat myöskin haitallisia sekä ihmiselle että myös polttoprosessille aiheuttaen lämpöpintojen tukkeutumista.

## 8 YHTEENVETO

Useat eri yhdisteet polttoaineen tuhkassa aiheuttavat haasteita kattilapoltossa. Osa haasteista on nähtävissä tietyissä kattilatyypeissä huomattavasti toisia selkeämmin, osa taas vaikuttaa kaikkiin varsin yhtenevästi. Vastaavasti kattilatyypillä voi olla merkittävä vaikutus haasteiden ratkaisuun esimerkiksi erilaisten palolämpötilojen kautta.

Varsinkin alkalipitoisten polttoaineiden, kuten eukalyptuksen ja oljen, polttamisesta syntyvän tuhkan sulaminen ja täten petihiekan jähmettyminen on tyypillinen leijukattilan ongelma. Sitä voidaan ehkäistä laskemalla polttolämpötilaa esimerkiksi ilmansyötön säädöllä tai polttamalla seassa puhtaampaa polttoainetta, kuten puuta, jolloin tuhkan määrä jää vähäisemmäksi.

Lämpöpintojen keston kannalta ongelmia on useita: puupohjaisten polttoaineiden, kuten kuoren, mukana tulee usein hiekkaa, joka aiheuttaa pintojen mekaanista kulumista, eroosiota. Tästä voidaan päästä eroon rakentamalla lämpöpinnat kestävämmästä materiaalista ja vaihtamalla polttoaine puhtaampaan. Vastaavasti oljessa, eukalyptuksessa ja mahdollisesti jätteessä olevat alkalit sekä varsinkin eukalyptuksessa ja PVC-muovia sisältävässä jätteessä suurina pitoisuuksina esiintyvä kloori kaasuuntuneena aiheuttavat kemiallista kulumista, korroosiota, korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi jätteenpoltossa esiintyvät metallit voivat aiheuttaa voimakasta korroosiota. Myös korkean lämpötilan korroosiota voidaan vähentää laskemalla lämpötilaa ja tärkeimpänä valitsemalla paremmin korroosiota kestäviä putkia.

Polttoaineen valinta ja siitä aiheutuvat tuhkeyhdisteiden tuomat haasteet ovat läsnä heti suunnittelun alusta lähtien kattilan käyttöänsä loppuun asti. Työssä esiintyvien haasteiden ratkaisuun löytyykin pääosin jo keinot, mutta ongelmaksi muodostuu raha: esimerkiksi putkien hinta kasvaa todella merkittävästi, kun tarvitaan materiaaleja, jotka ovat hyvin korroosiota kestäviä. Vastaavasti kattilat halutaan suunnitella yhä paremmin soveltuvaksi useille polttoaineille, jolloin niiden suunnittelun optimointi ei tule hyvin kyseeseen. Tulevaisuudessa saatetaankin mahdollisesti pyrkiä löytämään valmistustekniikoita, kuten pinnoitteita, joilla rakenteiden hintaa voidaan laskea, ja myös ratkaisuja vaikeiden polttoaineiden polttoon, kuten kuinka tahmea tuhka saadaan poistettua lämpöpinnoilta.

## LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Espoo, Suomi: VTT. ISBN: 978-951-388-419-2

Andritz 2019. *Andritz to supply the sixth high-efficiency PowerFluid circulating fluidized bed boiler for Tokushima Tsuda biomass power plant, Japan* [verkkosivu]. [Viitattu 23.12.2019]. Saatavilla: <https://www.andritz.com/group-en/news-media/environmental-solutions/2019-05-02-tokushima-power-fluid-circulating-fluidized-bed-boile>

Bankiewicz, D., Vainikka, P., Lindberg, D., Frantsi, A., Silvennoinen, J., Yrjas, P. & Hupa, M. 2012. *High temperature corrosion of boiler waterwalls induced by chlorides and bromides - Part 2: lab-scale corrosion tests and thermodynamic equilibrium modeling of ash and gaseous species*. Fuel 94, s. 240-250.

Basu, P. 2015. *Circulating Fluidized Bed Boilers – Design, Operation and Maintenance*. Cham, Sveitsi: Springer International Publishing AG. ISBN: 978-331-906-173-3

Eurostat 2017. *Glossary: Carbon dioxide equivalent*, [verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2019]. Saatavilla: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Carbon\\_dioxide\\_equivalent](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Carbon_dioxide_equivalent)

Girón, R. P.; Suárez-Ruiz, I.; Ruiz, B.; Fuente, E. & Gil, R. R. 2012. *Fly Ash from the Combustion of Forest Biomass (Eucalyptus globulus Bark): Composition and Physicochemical Properties*. Energy & Fuels 26 (3), s. 1540-1556.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki, Suomi: Edita. ISBN: 951-373-360-2

Karampinis, E., Vamvuka, D., Sfakiotakis, S., Grammelis, P., Itskos, G. & Kakaras, E. 2011. *Comparative Study of Combustion Properties of Five Energy Crops and Greek Lignite*. Energy & Fuels 26 (2), s. 869-878.



Lavric, E. D., Konnov, A. A. & De Ruyck, J. 2003. *Dioxin Levels in Wood Combustion – A Review*. Biomass and Energy 26 (2), s. 115-145.

Naganuma, H., Ikeda, N., Ito, T., Satake, H., Matsuura, M., Ueki, Y., Yoshiie, R. & Naruse, I. 2013. *Control of Ash Deposition in Solid Fuel Fired Boiler*. Fuel Processing Technology 105, s. 77-81.

Pekonen, T. 2014. *Kaatopaikkakaasujen käsittelyn kehittäminen Korvenmäen kaatopaikalla*, [diplomityö]. Lappeenranta, Suomi: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötekniikka.

Pöyry 2015. *Energiateollisuus Ry – Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa*, [loppuraportti]. [Viitattu 21.1.2020]. Saatavilla: [www.energia.fi](http://www.energia.fi)

Shao, Y., Xu, C., Zhu, J., Preto, F., Wang, J., Tourigny, G., Badour, C. & Li, H. 2012. *Ash and chlorine deposition during co-combustion of lignite and a chlorine-rich Canadian peat in a fluidized bed – Effects of Blending Ratio, Moisture Content and Sulfur addition*. Fuel 95, s. 25-34.

Sumitomo Heavy Industries, Ltd. & Sumitomo SHI FW 2017. *Bubbling Fluidized-Bed (BFB) Steam Generators*, [verkkosivu]. [Viitattu 23.12.2019]. Saatavilla: <https://www.shi-fw.com/clean-energy-solutions/bfb-boilers/>

Stoch, A. 2015. *Fly Ash from Coal Combustion – Characterization*, [diplomityö]. Krakova, Puola: AGH University of Science and Technology; Gliwice, Puola: SUT Silesian University of Technology & Lissabon, Portugali: IST Instituto Superior Técnico. Energy Engineering and Management.

Strömberg, B. 2006. *Fuel Handbook*. Tukholma, Ruotsi: Värmeforsk Service AB. ISSN: 0282-3772

Uuskallio, V. 2014. *Lahti Energian jätti-investoinnin lastentaudit jatkuneet kaksi vuotta: "Vakavia prosessiin liittyviä ongelmia"*, Etelä-Suomen Sanomat, [verkkajulkaisu]. [Viitattu 21.1.2020]. Saatavissa: <https://www.ess.fi/uutiset/kotimaa/2014/04/28/lahti-energian-jatti-investoinnin-lastentaudit-jatkuneet-kaksi-vuotta-vakavia-prosessiin-liittyvia-ongelmia>.

Vakkilainen, E. 2017. *Steam Generation from Biomass – Construction and Design of Large Boilers*. Oxford, Yhdistynyt kuningaskunta: Elsevier. ISBN: 978-012-804-389-9

Xie, Z. & Ma, Z. 2014. *HCl Emission Characteristics during the Combustion of Eucalyptus Bark*. *Energy & Fuels* 28 (9), s. 5826–5833.