

Eero Anttila

PALAMISILMAN KOSTUTUS JA
SAVUKAASUPESURIJÄRJESTELMÄ KPA-
KATTILALAITOKSESSA

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto
2014

PALAMISILMAN KOSTUTUS JA SAVUKAASUPESURIJÄRJESTELMÄ KPA-KATTILALAITOKSESSA

Anttila, Eero
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2014
Ohjaaja: Zenger, Pekka
Sivumäärä: 43
Liitteitä: 0

Asiasanat: savukaasupesurijärjestelmä, kostuttaminen, talteenotto

Opinnäytetyö toteutettiin Condens Heat Recovery Oy:lle, joka on suomalainen energia-alan yritys. Opinnäytetyössä tutkittiin savukaasupesurijärjestelmän toimintaa KPA-kattilalaitoksessa.

Tutkimuksessa selvittiin miten savukaasupesurijärjestelmän toiminta vaikuttaa KPA-kattilalaitokseen. Tutkimusta varten laskettiin kattiloiden hyötysuhteita ja adiabaattisia palamislämpötiloja eri tilanteissa. Tutkimuksen edetessä selvitettiin lämmön talteenottoa savukaasupesurilla ja savukaasupesuri-kostutin yhdistelmällä. Opinnäytetyöhön liittyy teoriaosuus, jonka avulla selvitettiin kiinteän polttoaineen käyttöä ja polttamista sekä savukaasuihin kohdistuvaa puhdistuksen tarvetta. Teoriaosuudessa käsiteltiin myös lauhduttavaa lämmön talteenottoa ja palamisilman kostuttamista.

Tutkimuksessa suoritettujen laskennan pohjalta tutkittiin savukaasupesurijärjestelmän kannattavuutta. Kannattavuuteen selvitettiin tutkimuksen mukaisen järjestelmän hankintahinta ja vuotuiset kulut. Hankintahinnan ja lämmön talteenoton avulla selvitettiin savukaasupesurijärjestelmälle neljä eri takaisinmaksuaikaa.

HUMIDIFICATION OF BURNING AIR AND FLUE GAS SCRUBBER SYSTEM IN SOLID FUEL BOILER UNIT

Anttila, Eero

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Mechanical and Production Engineering

May 2014

Supervisor: Zenger, Pekka

Number of pages: 43

Appendices: 0

Keywords: scrubber, humidification, recovery

The thesis was made for Condens Heat Recovery Oy which is a Finnish corporation that operates in the energy industry. The function of a scrubber system in a solid fuel boiler unit was researched in the thesis.

The research studied how the scrubber system influences on a solid fuel boiler units performance. Boiler coefficients and adiabatic burning temperatures were calculated in different situations for the research. Heat recovery of the scrubber and scrubber-humidifier combination were determined as the research proceeded. The thesis contains a theory part which was made to clarify the use and burning of solid fuels and the cleaning necessity that flue gas contains. The theory part clarified also condensing heat recovery and humidification of burning air.

The scrubber systems profitability was researched based on the calculation in the thesis. The profitability calculation consisted of the purchase price and from the annual expenses of the scrubber system. Four different repayment periods were calculated based on the purchase price and the annual expenses.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaukset.....	6
1.2	Opinnäytetyön teoriaosuudesta.....	6
2	KIINTEÄN BIOPOLTTOAINEEN KÄYTTÄMINEN	7
2.1	Kiinteä biopolttoaine puu.....	7
2.1.1	Kiinteän biopolttoaineen käyttöön vaikuttavat ominaisuudet	7
2.1.2	Kiinteän polttoaineen kattilat	8
2.1.3	Arinapoltto	9
2.1.4	Leijukerrosoltto	10
2.1.5	Ilman esilämmitys (LUVO, Luftvorwärmer)	11
2.2	Savukaasujen puhdistus	11
2.2.1	Sähkösuodin	11
2.2.2	Sykloni	12
2.2.3	Savukaasupesuri	12
2.3	Lämmön talteenotto savukaasusta	13
2.3.1	Lauhduttava lämmön talteenotto savukaasupesurijärjestelmällä	13
2.3.2	Lauhduttavan lämmön talteenoton tehostaminen.....	13
2.4	Palamisilmankostutus	14
3	POLTTOPROSESSIN LASKENTA	15
3.1	Kattilan hyötysuhde	17
3.1.1	Kattilan hyötysuhde laskennan tulokset, arinakattila	18
3.1.2	Kattilan hyötysuhde laskennan tulokset, leijukattila	19
3.1.3	Kostutuksen vaikutus kattilan hyötysuhteeseen	20
3.1.4	Kattilan hyötysuhdelaskennan analysointi	21
3.2	Kattilan adiabaattinen palamislämpötila.....	22
3.2.1	Adiabaattisen palamislämpötila laskennan tulokset, arinakattila.....	22
3.2.2	Adiabaattisen palamislämpötila laskennan tulokset, leijukattila.....	23
3.2.3	Adiabaattisen palamislämpötila laskennan analysointi	24
3.3	Savukaasupesurilla saatava lämmön talteenotto teho	25
3.3.1	Pesurin lämmön talteenottoteho laskennan tulokset, arinakattila.....	25
3.3.2	Pesurin lämmön talteenottoteholaskennan tulokset, leijukattila	26
3.3.3	Palamisilman esilämmityksen vaikutus lämmön talteenottotehoon.....	26
3.3.4	Pesurin lämmön talteenottoteholaskennan analysointi.....	27

3.3.5	Lämmön talteenoton vaikutus polttoprosessin kokonaisyötysuhteeseen	28
3.4	Palamisilmankostutuksen vaikutus savukaasupesurilla saatavaan lämmön talteenottoon	29
3.4.1	Kostutetun tilanteen lämmön talteenottoelaskennan tulokset	29
3.4.2	Kostutetun ja kostuttamattoman tilanteen vertailu	30
3.4.3	Kostutetun tapauksen laskennan analysointi	31
4	KANNATTAVUUS	32
4.1	Savukaasupesurijärjestelmän käyttökustannuksien laskennasta	33
4.1.1	Savukaasupesurijärjestelmän hankinta- ja käyttökustannukset	33
4.1.2	Savukaasupesurijärjestelmän puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutus	34
4.2	Savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika	36
4.2.1	Lämmön talteenoton arvo eri paluuvien lämpötiloilla	36
4.2.2	Investoinnin takaisinmaksuaika	38
4.2.3	Savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika toteutuneella lämmön talteenotolla	39
5	YHTEENVETO	41
	LÄHTEET	43

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaukset

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia savukaasupesurijärjestelmän toimintaa kiinteän polttoaineen kattilalaitoksessa. Savukaasupesurijärjestelmän toimintaa tutkittiin laskemalla polttoprosessia, jonka jälkeen selvitettiin miten järjestelmä vaikuttaa kattilalaitoksen talouteen. Polttoprosessin laskennassa tarkasteltiin kattilan hyötysuhdetta normaali tilanteessa ja kostutuksen vaikutusta hyötysuhteeseen. Adiabaattisessa laskennassa tutkittiin normaalia palamista ja kostutuksen vaikutusta adiabaattisiin palamislämpötiloihin. Savukaasupesurijärjestelmän lämmön talteenottoa tutkittiin erilaisissa tilanteissa pelkällä savukaasupesurilla ja savukaasupesuri-kostutin yhdistelmällä. Viimeisenä opinnäytetyössä tutkittiin savukaasupesurijärjestelmän kannattavuutta kostuttimen kanssa ja ilman kostutinta. Kannattavuuden tarkastelussa huomioitiin kulut, joilla on merkitystä kannattavuuden laskentaan.

Opinnäytetyötä rajattiin eri alueilta, jotta halutut aiheet saataisiin läpikäytyä kattavasti. Opinnäytetyö rajattiin kiinteisiin polttoaineisiin ja laskentaan valittiin polttoaineeksi puhdas puu. Kattilatyypeiksi laskentaan valittiin arina- ja leijukattila. Polttoaineiden kosteuksia, palamisilman lämpötiloja, savukaasun loppulämpötiloja ja paluveden lämpötiloja rajattiin, jotta laskennasta saataisiin järkevä ja johdonmukainen.

Laskennan tuloksissa tulee ottaa huomioon, että laskenta on suoritettu valituilla arvoilla ja yksillä kattiloiden arvoilla. Polttoaineita ja kattiloita on erilaisia, joten tuloksista tehtävät johtopäätelmät ovat ainakin suuntaa antavia.

1.2 Opinnäytetyön teoriaosuudesta

Teoriaosuus käsittelee biopolttoaineen käyttöä, biopolttoaineen polttamisessa käytettävää kattilatekniikkaa, savukaasujen puhdistusmenetelmiä, lämmön talteenottamista

savukaasusta ja palamisilman kostutusta. Teoriaosuudessa käsitellään opinnäytetyöhön liittyviä aihealueita kokonaiskuvan selkeyttämiseksi.

2 KIINTEÄN BIOPOLTTOAINEEN KÄYTTÄMINEN

2.1 Kiinteä biopolttoaine puu

Useimmin käytettyihin kiinteisiin biopolttoaineisiin lukeutuu opinnäytetyön laskennassa käytetty puu. Puu jakautuu kolmeen eri polttoainelajiin, jotka ovat hake, kuori ja puru. Puuaineksesta 13–14 % on puun jalostukseen kelpaamatonta kuorta, joka pystytään hyödyntämään polttoaineena voimalaitoksessa. Puru ja muu puun tuotannon jäte pystytään nykyään hyödyntämään polttoaineena pellettien muodossa. Pelletit valmistetaan puristamalla. Suomessa puupellettien käyttö ei ole erityisen suosittua, johtuen puupellettien korkeasta hinnasta. Ruotsissa puupelletit ovat saavuttaneet suuren suosion. Puupolttoainelajit jaetaan laadun mukaan. Laatuun vaikuttavat energiatiheys saapumistilassa, kosteusprosentti ja partikkelikoko. Puuta pidetään uusiutumisen ansiosta ympäristöystävällisenä polttoaineena. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 29-30)

2.1.1 Kiinteän biopolttoaineen käyttöön vaikuttavat ominaisuudet

Kiinteän biopolttoaineen käyttöön vaikuttavat polttoaineen kosteus, haihtuvat aineet, syttymislämpötila, tuhka ja lämpöarvo. Polttoaineen kosteus rajoittaa polttamista, sillä veden höyrytämiseen polttoaineesta vaaditaan paljon energiaa. Kosteus huonontaa polttoaineen lämpöarvoa, joka nostaa polttoaineenkulutusta ja lisää muodostuvia kaasuvirtoja. Biopolttoaineiden toimituskosteudet vaihtelevat 30–60 %:n välillä. Polttoaineen kosteuden mittaaminen ja määrittäminen on tärkeää, jotta polttoprosessia pystytään hallitsemaan tarkoituksenmukaisesti. (Huhtinen ym. 2000, 39-40)

Haihtuvia aineita ovat polttoaineen kaasuuntuvat komponentit. Polttoaineen haihtuvien komponenttien määrä riippuu polttoaineen geologisesta iästä. Polttoaineen van-

hetessa sen happipitoisuus laskee ja samalla haihtuvien aineiden osuus pienenee. Vertailun vuoksi, esimerkiksi puussa on haihtuvia aineita 70–85 % ja koksissa vain 1–3 %. Haihtuvat aineet vaikuttavat polttoaineen syttymislämpötilaan. Polttoaineet, joissa on vähän haihtuvia aineita vaativat suuremman syttymislämpötilan kuin polttoaineet, joissa on paljon haihtuvia aineita. Nopean syttymisen seurauksena myös palaminen on nopeaa ja täydellisempää kuin polttoaineiden, jotka sisältävät vähän haihtuvia komponentteja. (Huhtinen ym. 2000, 40)

Tuhka aiheuttaa useita erilaisia haittoja polttamiseen. Tuhka likaa, kuluttaa ja vähentää polttoaineen lämpöarvoa. Esimerkiksi kiinteätä polttoainetta poltettaessa on pidettävä pesän lämpötila riittävän alhaisena, ettei tuhka pääse sulamaan kattilan sisälle. Jos tuhka sulaa kattilan sisään, se muodostaa kiinteitä ja kovia paakkuja, joiden poistaminen kattilasta on hyvin työlästä. Tuhka saattaa myös aiheuttaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia, ja lentotuhkan takia savukaasut on puhdistettava. (Huhtinen ym. 2000, 41-42)

Lämpöarvo kertoo polttoaineen palamisessa kehittyvän energian polttoaineen massaa kohden. Energiatuotannon kannalta lämpöarvo on polttoaineen merkittävin ominaisuus. Jokaiselle polttoaineelle on määritelty oma lämpöarvo. Polttoaineen lämpöarvosta puhutaan sen mukaan, miten sen lämpömäärä on mitattu. Puhutaan joko tehollisesta eli alemmasta tai kalorimetrisestä eli ylemmästä lämpöarvosta. Kotimaisten polttoaineiden kosteuden vaihdellessa paljon, käytetään kuivan polttoaineen tehollista lämpöarvoa lämpöarvomäärityksen lähtökohtana. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa saadaan laskennallisesti määritettyä, kun polttoaineen kosteus saadaan tietää. (Huhtinen ym. 2000, 43)

2.1.2 Kiinteän polttoaineen kattilat

Työn rajaamiseksi tarkasteluun otettiin kiinteän polttoaineen kattilat, joista arina- ja leijupetikattilat toimivat laskennan esimerkkikattiloina. Kiinteän polttoaineen kattilassa voidaan polttaa esimerkiksi hiiltä, haketta, puuta, turvetta ja näiden erilaisia seoksia. KPA-kattilaloiden koot vaihtelevat kymmenistä kilowateista kymmeneen

megawatteihin. Pienimpiä kattiloita käytetään omakotitalojen lämmitysjärjestelminä, ja isoimmat kattilat toimivat teollisuudessa ja voimalaitoksissa.

Kiinteiden polttoaineiden syöttöjärjestelmiä on paljon erilaisia. Eri polttoaineille on kehitetty omia syöttöjärjestelmiä ja tekniikat vaihtelevat prosessien mukaisesti. Opinnäytetyössä keskitytään kattilan palamisprosessiin ja palamisessa syntyviin kaasuihin.

2.1.3 Arinapoltto

Kiinteäarinakattilat olivat ensimmäisiä puita polttavia kattiloita. Nykyään mekaaniset arinat ovat syrjäyttäneet kiinteäarinakattilat suuremmissa teholuokissa. Mekaanista arinaa käytetään tyypillisesti 2-15 megawatin tehoilla. Arinakattilan hyvänä puolena pidetään palamisilman syötön laajaa säätöaluetta. Arinapoltto soveltuu hyvin kiinteille polttoaineille, kuten esimerkiksi turpeelle, puulle ja puujätteelle. Arinakattilan käyttö teollisuuden jäteliitteiden poltossa on haastavaa lietteiden suuren tuhkapitoisuuden vuoksi, sillä arinan ilmaraoit tukkeutuvat helposti pehmentyneestä tuhkasta. (Bioenergian verkkopalveluiden www-sivut 2012)

Mekaanisessa arinapoltossa arinalle syötetään polttoainetta, joka etenee arinaa pitkin hitaasti palamisen edistyessä. Arinan alkupäässä polttoainetta lämmitetään ja kuivataan kuumasta tulipesästä ja palavasta polttoainekerroksesta säteilevällä lämmöllä. Lämmitysenergiasta 50–70 % voi olla säteilylämpöä. Polttoaineen kosteus vaikuttaa lämmityksen energiantarpeeseen. Kosteat polttoaineet kuluttavat energiaa moninkertaisesti. Polttoaine alkaa kaasuuntua kuivumisen ja sitä seuraavan lämpenemisen jälkeen. Lämpötilan noustessa kaasuuntuminen voimistuu. Perusajatuksena arinakattilassa on, että pesään syötetään palamisilmaa kahdesta eri kohdasta. Primääri-ilmaa syötetään arinaraoista polttoainepatjan läpi ja sekundääri-ilmaa kaasutilaan, johon kaasuuntuvat komponentit siirtyvät polttoainekerroksesta. Sekundääri-ilman happi ja komponentit, jotka ovat kaasuuntuneet reagoivat lämpöä luovuttaen. Ensimmäisinä polttoainekerroksessa kaasuuntuvat komponentit syttyvät palamaan, jolloin niiden luovuttama lämpö sytyttää myös kaasuuntumatta jääneet kiinteät polttoainepartikkelit. Täydellisen palamisen edellytyksenä on tarpeeksi korkea lämpötila. Arinapoltto

edellyttää suhteellisen suurta ilmakerrointa 1,3–1,4. Kun polttoaine on palanut, palamisesta jäänyt tuhka poistetaan arinalta ja siitä hankkiudutaan eroon polttoprossin jätteenä. Arinarasituksen kasvaessa kiintoainepitoisuudet kasvavat, jolloin osa tuhkasta kulkeutuu savukaasun mukana ulos kattilasta. Arinarasituksella tarkoitetaan, että kattilalla ajetaan ylitehoa. (Huhtinen ym. 2000, 146-153)

2.1.4 Leijukerrospoltto

Energiantuotannossa leijukerrospolttoa alettiin käyttää vasta 1970-luvulla. Leijukerrospoltto mahdollistaa eri polttoaineiden polttamisen samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Samassa tulipesässä voidaan polttaa kosteita kotimaisia polttoaineita ja teollisuusjätteitä. Leijukerrospoltoissa käytettävä palamislämpötila on alhainen, joten typenoksidipäästöt ovat pienet. Leijukerrospoltto on yleistynyt viime vuosikymmeninä. (Huhtinen ym. 2000, 153-159)

Polttoaine syötetään useampia syöttöputkia pitkin tasaisesti koko leijupetin alueelle. Polttoaineen syöttö petin päälle tapahtuu mekaanisesti. Polttoainesiloista polttoaine etenee kuljetinta pitkin sulkusyöttimelle, josta polttoaine menee pudotusputken kautta petin päälle. Kuuma hiekkakerros leijupetissä mahdollistaa kosteiden polttoaineiden käyttämisen. Petin suuren lämpökapasiteetin ansiosta myös polttoaineen laatuheilahtelut tasaantuvat eikä polttoaineen kuivausta tarvita. Polttoaineiden tulee kuitenkin olla homogeenisiä. Palamiseen tarvittava happi tulee osittain leijutusilmasta, mutta sen lisäksi osa palamisilmasta tuodaan petin päälle sekundääri-ilmana. Petin lämpötilan tulisi olla vähintään 700 °C, mutta kuitenkin riittävän alhainen, ettei polttoaineen tuhka sula. Kotimaisten polttoaineiden tuhka alkaa pehmentyä noin 900 °C lämmössä. Hiekka voi tuhkan sulamisen vaikutuksesta sintraantua. Sintraantuneen hiekan poistaminen kattilasta on hankalaa ja vaatii usein kattilan alasajon. Polttoaineesta riippuen hiekka voi myös sulaa kattilaan. Petin lämpötila ja minimileijumisnopeus rajoittavat kattilan minimitehoa. Palamattomien määrän kasvu ja leijupetin maksimilämpötila sekä petimateriaalin karkaaminen rajoittavat tehoa taas yläpäässä. Tuhka poistuu leijupetistä, kun hiekkaa päästetään tietty määrä arinan aukosta. Osa tuhkasta poistuu myös savukaasun mukana, kuten arinapoltoissa. (Huhtinen ym. 2000, 157-159)

2.1.5 Ilman esilämmitys (LUVO, Luftvorwärmer)

Kiinteän biopolttoaineen kattiloissa käytetään palamisilman esilämmittimiä. Palamisilman esilämmityksellä saadaan nopeutettua palamista, kuivattua polttoaineesta kosteutta ja tehostettua polttoaineen syttymistä. Palamisilman esilämmityksen tarve riippuu polttoaineesta ja polttotavasta.

2.2 Savukaasujen puhdistus

Kiinteiden biopolttoaineiden polttamisesta syntyvät savukaasut sisältävät lentotuhkaa ja muita epäpuhtauksia, joten niihin sisältyy puhdistustarve. Savukaasujen puhdistamista on mahdollista tehdä kuivalle ja märälle savukaasulle. Savukaasuja puhdistetaan erilaisilla erottimilla, pesureilla ja suodattimilla. Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi yleisimmin Suomessa käytettyjä savukaasujen puhdistusmenetelmiä.

2.2.1 Sähkösuodin

Sähkösuodatin on yksi tehokkaimmista erottelumenetelmistä. Sähkösuodattimella pystytään käsittelemään suuria kaasumääriä ja sen käyttöikä on pitkä. Suodin sopii lähes kaikkiin prosesseihin ja sen käyttö on taloudellista pienen painehäviön ja vähäisen tehonkulutuksen vuoksi. (Huhtinen ym. 2000, 251–253)

Kaasuvirrasta erotettavat hiukkaset varataan sähkösuodattimessa negatiivisesti niiden kulkiessa ionisoituneen vyöhykkeen läpi. Varautuneet hiukkaset erotellaan voimakkaassa sähkökentässä. Kun pölyhiukkaset ovat varautuneet negatiivisiksi ne ajautuvat voimakkaan sähkökentän vaikutuksesta kohti erotuselektrodia, johon ne kiinnittyvät. Kiinnittynyt pöly poistetaan joko vesihuuhtelulla tai ravistimilla. (Huhtinen ym. 2000, 252-253)

2.2.2 Sykloni

Yleisimmin käytetty dynaaminen erotin on sykloni. Sen toiminta perustuu massavaikutukseen. Syklonin geometria, kaasun nopeus, viskositeetti sekä koko vaikuttavat syklonin erotusasteeseen. Syklonissa suuri kaasuvirta jaetaan usein useampaan pienen sykloniin, jolloin erotusaste saadaan kasvamaan. Syklonit suunnitellaan tietyille kaasuvirroille ja kiintoaineille, joten syklonin säädettävyys savukaasujen puhdistuksessa on hankalaa. (Huhtinen ym. 2000, 253)

Savukaasu johdetaan sykloniin tangentialisesti tai aksiaalisesti. Savukaasu ajetaan spiraalin muotoisessa liikeradassa kohti syklonin pohjaa, jossa pölyhiukkaset osuvat massavaikutuksesta johtuen syklonin seinään ja valuvat poistoaukkoon. Puhdistettu ilma imetään syklonista pois. (Huhtinen ym. 2000, 253)

2.2.3 Savukaasupesuri

Savukaasupesureita on monenlaisia riippuen prosesseista. Savukaasupesuri sijoitetaan usein joko syklonin tai sähkösuodattimen perään. Kun savukaasupesuri on jälkimmäisenä, saadaan kostean kiintoaineen osuutta pienemmäksi, jonka hävittäminen on kalliimpaa ja hankalampaa kuin kuivan kiintoaineen. Pesurilla suoritetaan yleensä savukaasujen pesun yhteydessä lauhduttavaa lämmön talteenottoa. Seuraavassa kappaleessa on selostettu kiinteäpatjapesurin, joka on opinnäytetyön laskennassa käytetty pesuri, toiminta yksinkertaisimmillaan.

Pesurissa savukaasu ajetaan pesurin alaosaan sisään, jolloin se joutuu kosketuksiin pesurista ylhäältä suihkutettavan veden kanssa. Vesi suihkutetaan matalalla paineella useista suuttimista savukaasua vastaan. Veden ja savukaasun kontaktipinta-alaa on kasvatettu pesurissa käyttämällä tätekappalepatjoja. Pölyhiukkaset kulkeutuvat ylhäältä tulevan veden mukana pesurin pohjalle, josta likainen vesi johdetaan puhdistettavaksi. Savukaasuista voidaan kiintoaineiden puhdistuksen yhteydessä kemiallisesti erotella happamia ja emäksisiä kaasuja. Puhdistunut ja lauhtunut savukaasu kulkeutuu pesurin yläpään kautta savupiippuun. Savukaasusta lauhtunut lauhde käsitellään ja poistetaan järjestelmästä tapauskohtaisesti.

2.3 Lämmön talteenotto savukaasusta

Savukaasut sisältävät runsaasti kosteutta jossa on energiaa. Energia voidaan ottaa savukaasusta talteen niin kauan kuin on tarpeeksi matalalämpöinen virta, johon savukaasu voidaan lauhduttaa. Savukaasuista talteen otettu energia siirretään usein kaukolämpölaitoksissa johonkin valmiina olevaan matalalämpöiseen vesivirtaan. Talteen otettua energiaa voidaan myös käyttää esimerkiksi polttoaineen kuivaukseen. (Condens Heat Recovery Oy:n www-sivut 2012)

2.3.1 Lauhduttava lämmön talteenotto savukaasupesurijärjestelmällä

Lauhduttavassa lämmön talteenotossa, savukaasujen jäähdytystä rajoittaa vastaanottavan materiaalivirran lämpötilataso. Vastaanottava materiaalivirta voi olla esimerkiksi kaukolämmön paluuvesi. Savukaasupesurissa savukaasu jäähdytetään kastepisteeseen, jolloin savukaasun suhteellinen kosteus on 100 %. Savukaasu kohtaa veden tullessaan sisään pesuriin. Vesi suihkutetaan pesurin yläosasta matalalla paineella vasten savukaasua. Kaasun jatkaessa matkaansa pesurissa se kohtaa täytekappalepatjan, jossa kaasun ja neste ovat kontaktissa toistensa kanssa täytekappaleiden pinnalla. Täytekappalepatjan avulla saadaan kasvatettua kontakti pinta-alaa, jossa savukaasu ja neste reagoivat toistensa kanssa. Savukaasu luovuttaa lämpöä nesteeseen, joka ajetaan lämmönvaihtimeen. Lämmönvaihtimessa savukaasusta saatu lämpö siirretään vastaanottavaan materiaalivirtaan. Savukaasun lauhtuessa syntyy myös lauhdetta, joka hävitetään tapauskohtaisesti. Savukaasut puhdistetaan pesurissa usein lämmön talteenoton yhteydessä. Savukaasujen puhdistuksessa erotetaan kiintoaineita savukaasuista ja syntyvät lauhteet käsitellään halutuiksi kemiallisesti. Kemialliset prosessit saadaan toteutettua helposti ja tarkoituksenmukaisemmin, kun kaasun ja nesteen välinen kontakti on vastavirtaan. (Condens Heat Recovery Oy:n www-sivut 2012)

2.3.2 Lauhduttavan lämmön talteenoton tehostaminen

Lämmön talteenottoa pystytään tehostamaan kostuttamalla palamisilmaa, käyttämällä mahdollisimman matalalämpöisiä virtoja ja lämpöpumpun avulla. Lämmön talteenoton tehostamisella pystytään nostamaan järjestelmän hyötysuhdetta ja vähentämään

polttoaineen kulutusta. Lämmön talteenoton tehostaminen edellyttää prosessin las-
kentaa ja tarkkaa suunnittelua. Prosessin lämpötilatasot vaikuttavat lopputulokseen.

Kostuttimella lämmön talteenottoa pystytään tehostamaan kostuttamalla palamisil-
maa savukaasujen energialla, joka voisi muuten jäädä hyödyntämättä. Kostutuksen
ansiosta voidaan hyödyntää kuumempia energiavirtoja, johon lämpöä siirretään. Pa-
lamisilman kostutuksessa tulee pysyä reilusti alle kastepistelämpötilan. (Huhtinen
ym. 2000, 256)

Matalalämpöisellä virralla tarkoitetaan vastaanottavan ainevirran lämpötilaa, esimer-
kiksi kaukolämmön paluuveden lämpötilaa. Matalaan lämpötilaan pystytään tehok-
kaammin jäähdyttämään savukaasu, jolloin myös saadaan enemmän energiaa talteen.
(Condens Heat Recovery Oy:n www-sivut 2012)

Lämpöpumpulle on monia erilaisia ja tapauskohtaisia kytkentävaihtoehtoja. Lämpö-
pumpulla voidaan esimerkiksi viilentää kaukolämmön paluuvettä, jolloin pystytään
taas jäähdyttämään savukaasut tehokkaammin. Lämpöpumppu kytketään esimerkiksi
kaukolämmön paluuveden kanavaan, jolloin vesi ajetaan pumpun kautta ja jäähdyte-
tään. Lämpöpumpun hyöty korostuu varsinkin silloin, kun laitoksella ajetaan huippu-
tehoja ja kaukolämmön paluuveden lämpötilat nousevat korkeiksi. Lämpöpumppu on
kuitenkin hyötysuhteeltaan huono. Lämpöpumpun toimintaan vaikuttaa prosessin
suunnittelu ja käytettävissä olevat ainevirrat. Pumppuja on monenlaisia.

2.4 Palamisilmankostutus

Kostutuksella on monia kytkentävaihtoehtoja. Kostutuksessa palamisilmaan höyrys-
tetään vettä ja sitä lämmitetään lauhde-energialla, joka alhaisen lämpötilatasonsa ta-
kia jäisi muuten hyödyntämättä. Kun palamisilmaa kostutetaan, syötetään siis kattil-
laan enemmän kosteutta, jolloin savukaasujen kastepiste kohoaa vastaavasti. Näin
saadaan kastepisteen kohoamisen avulla palamisilmaan siirretty energia otettua tal-
teen korkeammalla lämpötilatasolla. (Condens Heat Recovery Oy:n www-sivut 2012
)

Palamisilman kostutus suunnitellaan ja lasketaan tapauskohtaisesti. Laskennassa tutkitaan palamisilman kostutuksen vaikutukset kaukolämpöjärjestelmään. Kostuttimen perään voidaan halutessa kytkeä lisää laitteita. Seuraavassa kappaleessa on esimerkki kostuttimen kytkennästä. Esimerkki on samankaltainen, kuin opinnäytetyön laskennassa käytetty.

Palamisilma syötetään kostuttimen alaosasta, jolloin se lähtee nousemaan kostutinta ylöspäin ja tulee kosketukseen savukaasupesurista tuodun lauhdeveden kanssa. Palamisilma kohtaa veden vastavirtaan jolloin kosteus kasvaa ja ilma alkaa lämmetä. Kostunut ja lämmitetty palamisilma jatkaa tietään ulos kostuttimen yläosasta kohti kattilaa. Palamisilman lämmitykseen käytetty vesi voidaan ajaa vielä lämmönvaihtimen kautta, jossa vedestä saadaan viimeiset energiat talteen. Lämmönvaihtimen jälkeen vesi ajetaan takaisin savukaasupesuriin. Näin kostuttimella saadaan laskettua pesurin lämpötilatasoa ja päästään matalampiin lämpötiloihin, jolloin pystytään lauhduttamaan savukaasuja enemmän. Kostuttimessa käytetään täytekappalepatjaa savukaasupesurin tavoin veden ja palamisilman kontakti pinta-alan kasvattamiseksi.

3 POLTTOPROSESSIN LASKENTA

Laskenta toteutettiin 5 % ja 8 % kuivan savukaasun hapenpitoisuuksilla, jotka kuvaavat leiju- ja arinakattilan kuivan savukaasun happipitoisuuksia. Kuivan savukaasun hapenpitoisuudella tarkoitetaan laskennallista happipitoisuutta savukaasussa, jossa ei ole savukaasun sisältämää kosteutta. Kattilan nimellistehona pidettiin 10 MW. Polttoaineena laskennassa käytettiin puhdasta puuta, jonka tehollinen lämpöarvo on 19,1 MJ/Kg. Polttoaineen kosteuksina käytettiin 30 %, 40 %, 50 %, 55 % ja 60 %. Märän massan osuus polttoaineessa oli laskennassa 100 %.

Palamisilman lämpötila normaali tilanteessa on 25 °C, mutta kosteus on 0 °C ilman tasapainokosteus. Palamisilman esilämmittimien lämpötiloina käytettiin tilanteesta riippuen 50 °C, 70 °C ja 200 °C. Kostutetuissa tapauksissa palamisilman lämpötilan

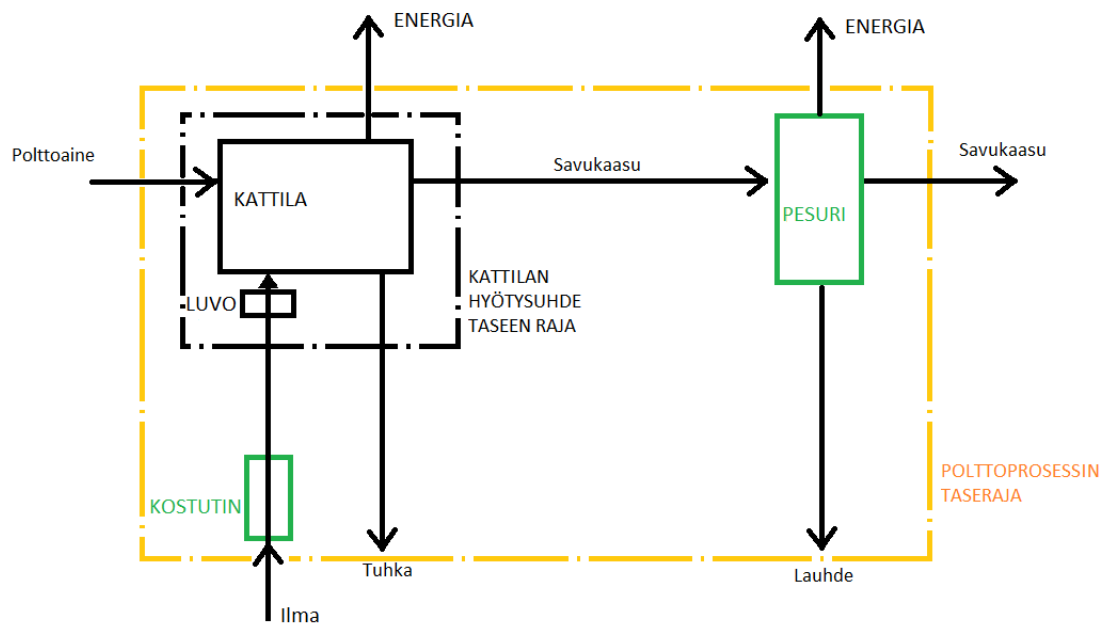
arvoina käytettiin 40 °C, 50 °C ja 60 °C. Kostutettu palamisilma on tasapainokosteudessa.

Kattilasta tulevan savukaasun lämpötila normaalissa tilanteessa on 150 °C. Savukaasupesurin lämmön talteenottoa laskettaessa, käytettiin savukaasun loppulämpötiloina 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C ja 60 °C tilanteesta riippuen. Savukaasun loppulämpötila on se lämpötila, jolla savukaasu poistuu savupiippuun.

Kostutetun tapauksen lämmön talteenoton laskennassa kaukolämmön paluuveden lämpötiloina käytettiin 30 °C, 40 °C, 50 °C ja 55 °C tilanteesta riippuen. Kaukolämmön paluuvettä käytettiin laskennan vastaanottavana virtana.

Laskennan tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että kaikkia kattiloita ei voida arvioida yhdellä tavalla. Kattilat käyttäytyvät eri tavoin riippuen siitä minkälaisille polttoaineilla ja palamislämpötiloille ne on suunniteltu. Johtopäätelmät, jotka voi tehdä kostutuksen suhteen, ovat ainakin suuntaa antavia.

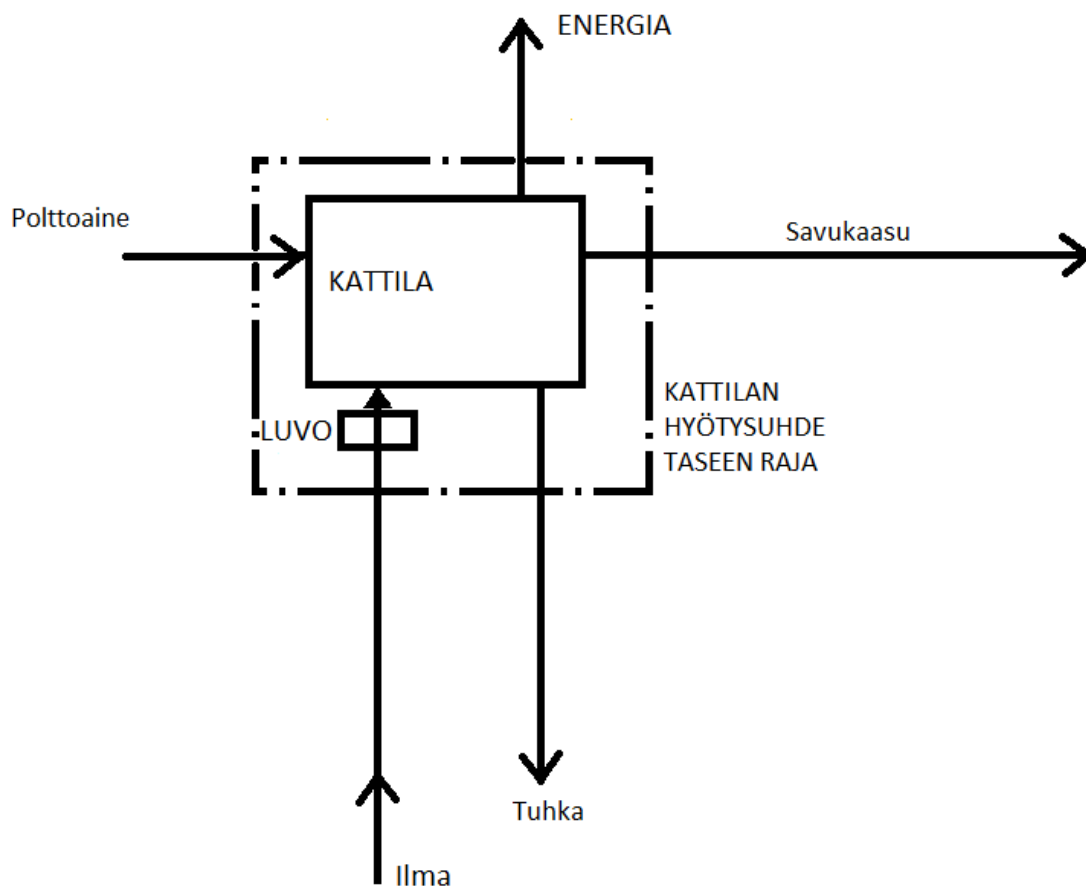
Laskentaan käytettiin Condens Heat Recovery Oy:n laskentaohjelmia. Laskentaohjelmista saatujen tuloksien perusteella lasketut hyötysuhteet on määritetty SFS-EN 12952–15 standardin epäsuoran menetelmän mukaisesti. Kuvassa 1 on esitetty polttoprosessin taseraja. Taserajan sisällä tarkastellaan kattilaa, palamisilmanesilämmitimiä (LUVO), pesuria ja kostutinta. (SFS-EN 12952–15, 8.4.3)



Kuva 1. Polttoprosessin taseraja.

3.1 Kattilan hyötysuhde

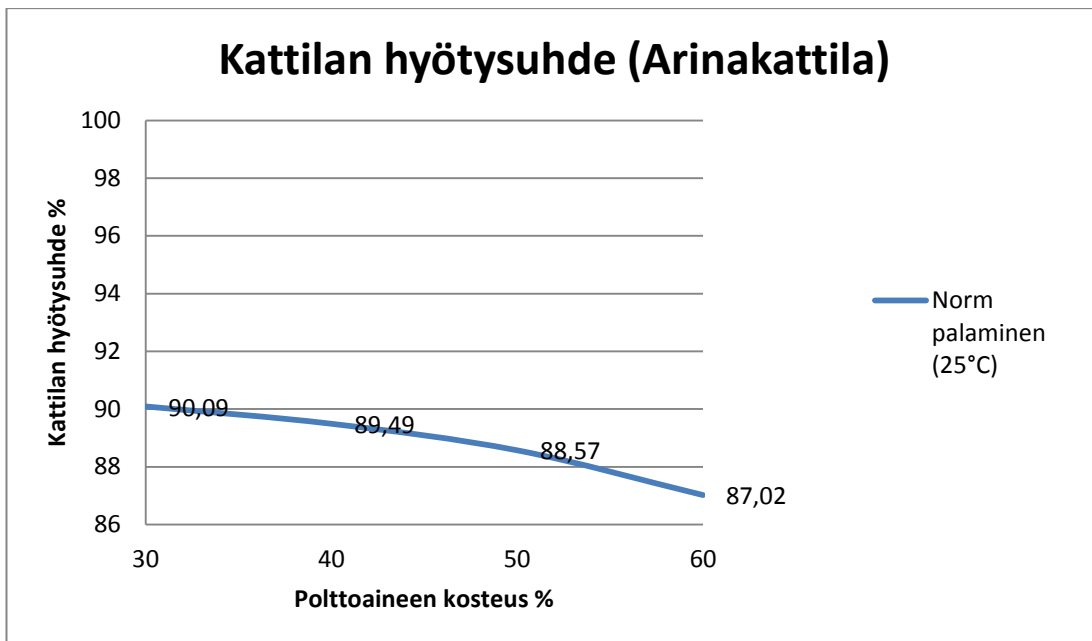
Kattilan hyötysuhteella tarkoitetaan kattilaan tuodun energiavirran suhdetta kattilasta hyödyksi saatavaan lämpövirtaan. Kuvassa 2 on esitetty kattilan hyötysuhde taseen raja. Kattilan taserajan sisään kuuluu itse kattila ja palamisilman esilämmittimet (LUVO). Palamisilman lämmittimet eivät vaikuta kattilan hyötysuhdelaskentaan, koska ne on sijoitettu hyötysuhdetaserajan sisälle. Kattilaan tuodaan polttoaine ja palamisilma. Kattilasta poistuu energia, savukaasu ja tuhka. (Huhtinen ym. 2000, 101)



Kuva 2. Kattilan hyötysuhdetaseen raja.

3.1.1 Kattilan hyötysuhde laskennan tulokset, arinakattila

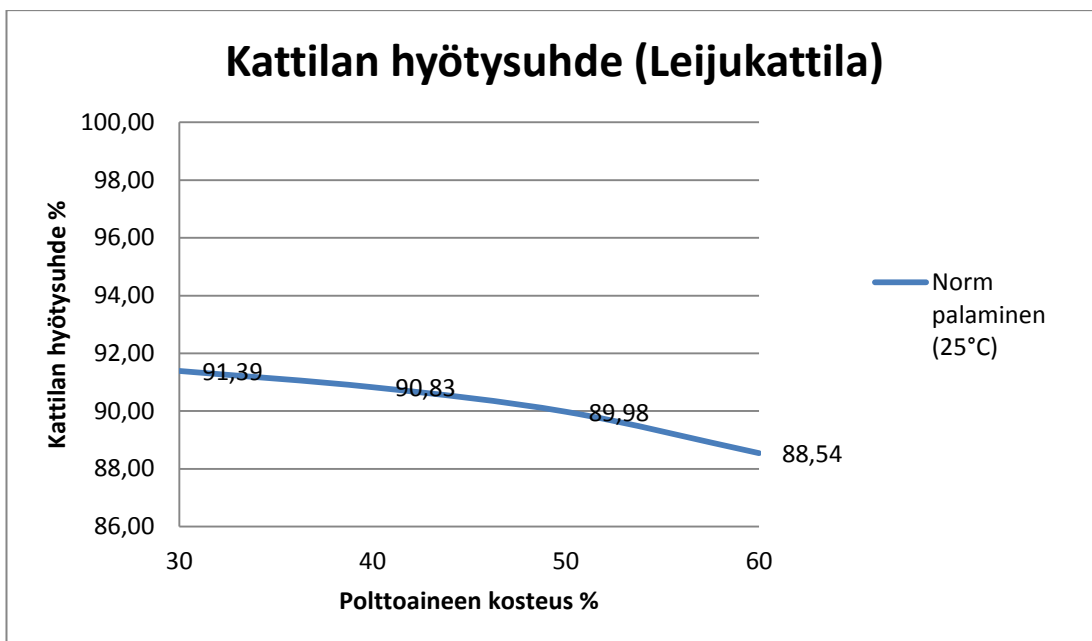
Kuvaajassa 1 on esitetty kattilan hyötysuhde eri polttoaineiden kosteuksilla, palamislämpötilan ollessa normaali 25 °C. Savukaasun kuiva happipitoisuus on 8 %. Palamisilman lämpötila pysyy vakiona kattilan hyötysuhdetaserajan sisällä. Palamisilman lämpötila on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan sulkujen sisällä olevaan selitteeseen.



Kuvaaja 1. Polttoaineen kosteuden vaikutus arinakattilan hyötysuhteeseen.

3.1.2 Kattilan hyötysuhde laskennan tulokset, leijukattila

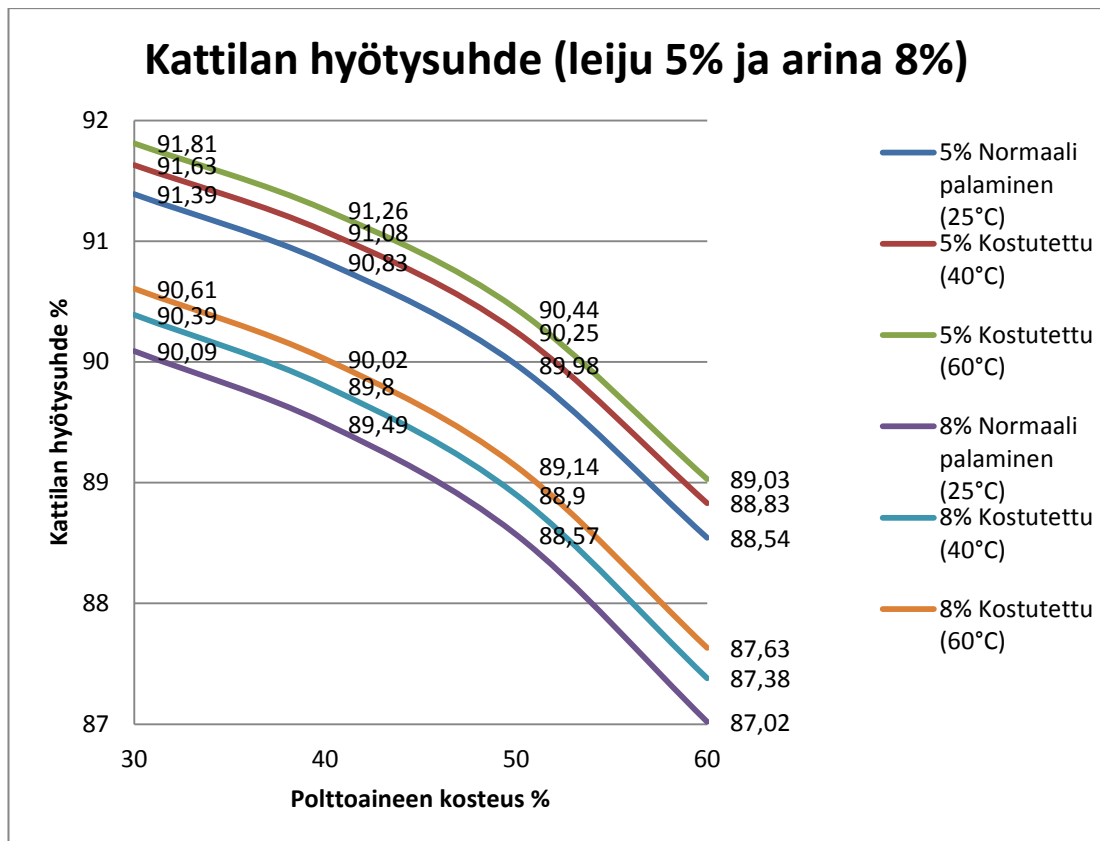
Kuvaajassa 2 on esitetty leijukattilan hyötysuhde eri polttoaineiden kosteuksilla. Savukaasun kuivahappipitoisuus on 5 %. Palamisilman lämpötila on sama kuin kuvaajan 1 tilanteessa.



Kuvaaja 2. Polttoaineen kosteuden vaikutus leijukattilan hyötysuhteeseen.

3.1.3 Kostutuksen vaikutus kattilan hyötysuhteeseen

Kostutus ei kuulu kattilan hyötysuhdetaserajan sisäiseen laskentaan. Palamisilman-kostutuksella pystytään kumminkin vaikuttamaan kattilan hyötysuhteeseen, jonka vuoksi kostutuksen vaikutuksia tarkastellaan seuraavaksi. Kuvaajassa 3 vertaillaan kostuttamattoman palamisilman ja kostutetun palamisilman vaikutusta kattilan hyötysuhteeseen eri polttoaineen kosteuksilla. Kuvaajaan on kerätty laskennan tulokset, sekä arina- että leijukattilasta. Leiju- (5 %) ja arinakattiloita (8 %) kuvataan selitteessä savukaasun kuivan hapen pitoisuuksilla. Kuvaajiin on valittu vertailun vuoksi ensimmäiseen tilanteeseen molemmilta kattilatyypeiltä normaalin palamislämpötilan (25 °C) käyrät. Toisessa tilanteessa palamisilma on kostutettu 40 °C lämpötilaan. Kolmannessa tilanteessa palamisilma on kostutettu 60 °C lämpötilaan.



Kuvaaja 3. Palamisilman kostutuksen, lämpötilan ja polttoaineen kosteuden vaikutus leiju- ja arinakattilan hyötysuhteeseen.

3.1.4 Kattilan hyötysuhdelaskennan analysointi

Kattilan hyötysuhdetta saadaan nostettua, pienentämällä polttoaineen kosteutta. Suurimmillaan kattilan hyötysuhde on laskennassa, kun polttoaineen kosteus on 30 %. Polttoaineen kosteuden laskiessa hyötysuhde kasvaa tasaisesti. Polttoaine ei saa kuitenkaan olla liian kuivaa, muuten palamisen hallinta vaikeutuu.

Kostutetussa tapauksessa kattilan hyötysuhdetta saadaan nostettua lämmittämällä ja kyllästämällä palamisilmaa kostuttimessa. Kuten edellä jo todettiin, että kuivemmalla polttoaineella päästään korkeampiin kattilan hyötysuhteisiin pätee sama kostutetussa tapauksessa. Palamisilman kostutuksessa tulee kumminkin ottaa huomioon polttoaineen kosteus ja palamisolosuhteet ettei kosteutta nosteta liikaa palamistilassa. Jos kosteus nousee liikaa, kattilanhyötysuhde laskee palamisen vaikeutuessa.

Kattiloiden väliset hyötysuhteiden erot ovat pieniä. Kostuttamattomissa tapauksissa erot kattiloiden välillä ovat 1-2 %. Leijukattilan hyötysuhde on arinakattilaa parempi. Kostutetuissa tapauksissa kattiloiden hyötysuhteiden erot ovat 1-1,5 % luokkaa. Leijukattilan hyötysuhde pysyy kostutetuissa tapauksissa korkeampana kuin arinakattilan hyötysuhde.

3.2 Kattilan adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella lämpötilalla tarkoitetaan korkeinta teoreettista lämpötilaa, joka on saavutettavissa polttoaineen palaessa, jos ympäristöön ei siirry liekistä lämpöä. Tässä tapauksessa kaikki vapautuva lämpö kuluu savukaasujen lämmittämiseen. Eri polttoaineilla adiabaattiset palamislämpötilat vaihtelevat. (Huhtinen ym. 2000, 95)

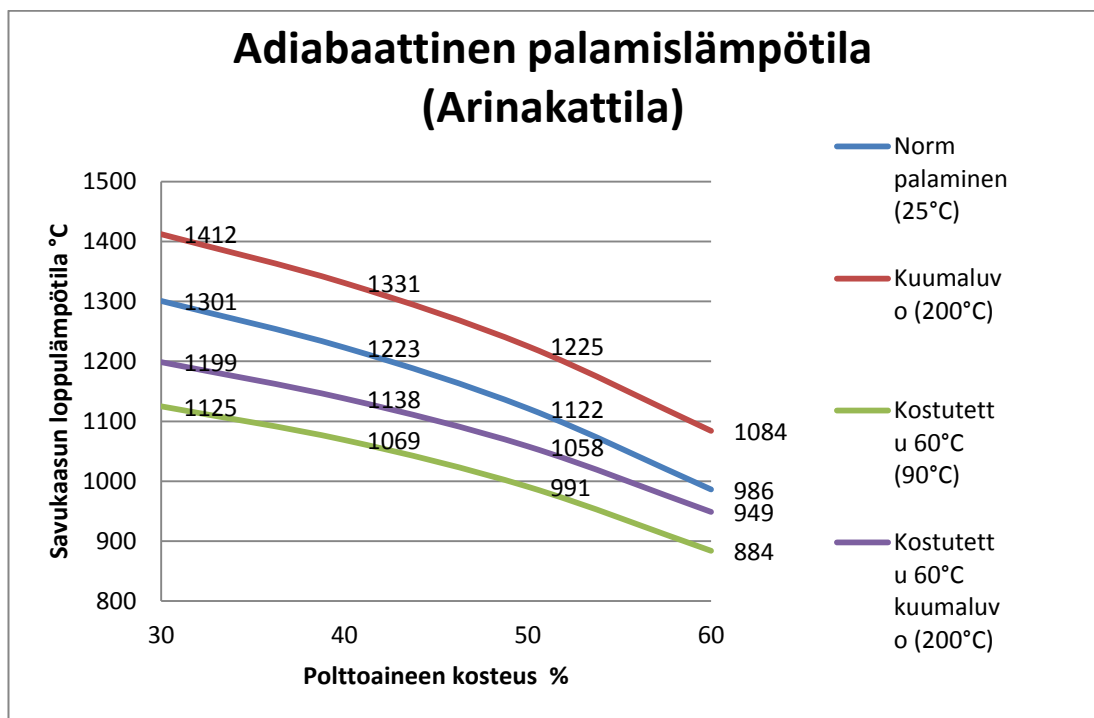
Adiabaattiseksi lämpötilaksi valittiin laskennassa yli 1000 °C, jotta polttoprosessi voi tapahtua palamisilmaa kostutettaessa. Adiabaattinen lämpötila kertoo miten on mahdollista polttaa ja missä vaiheessa polttaminen alkaa rajoittua. Laskennan tuloksista nähdään miten kostuttaminen vaikuttaa adiabaattiseen palamislämpötilaan.

Kattilan adiabaattisia lämpötiloja tutkittiin eri palamisilman lämpötiloilla ja eri polttoaineen kosteuksilla. Tutkittiin myös mitä palamisilman esilämmitys ja kostuttaminen vaikuttavat adiabaattiseen palamislämpötilaan.

3.2.1 Adiabaattisen palamislämpötila laskennan tulokset, arinakattila

Kuvaajassa 4 on esitetty adiabaattisia lämpötiloja eri palamisilman arvoilla, kuivan kaasun happipitoisuuden ollessa 8 %. Polttoaineen kosteus vaihtelee välillä 30–60 %. Ensimmäisessä tilanteessa adiabaattinen lämpötila laskettiin normaalilla 25 °C palamisilman lämpötilalla. Toisessa tilanteessa palamisilma on esilämmitetty 200 °C lämpötilaan. Kolmannessa tilanteessa palamisilma on lämmitetty ja höyrystetty kostuttimessa 60 °C lämpötilaan sekä esilämmittimellä lämmitetty vielä 90 °C lämpötilaan. Neljännessä tilanteessa palamisilma on lämmitetty ja höyrystetty kostuttimella 60 °C lämpötilaan sekä esilämmittimellä lämmitetty vielä 200 °C lämpötilaan. Pala-

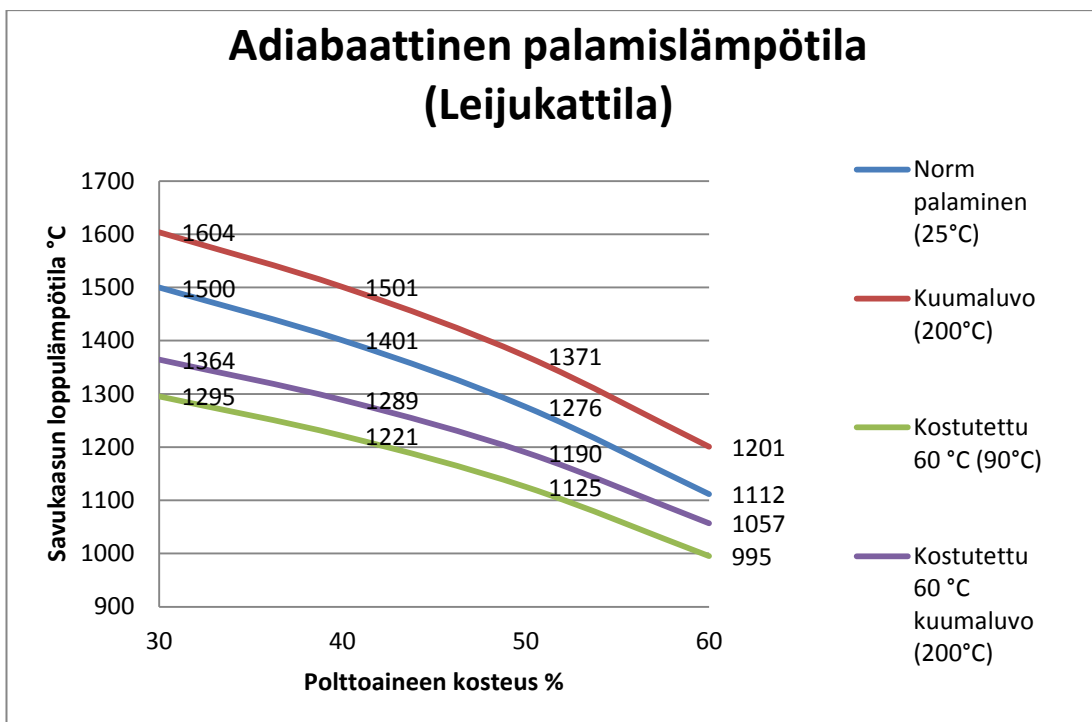
misilman lämpötilat on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan selitteeseen sulkujen sisään.



Kuvaaja 4. Polttoaineen kosteuden sekä palamisilman lämpötilan ja kosteuden vaikutus adiabaattiseen palamislämpötilaan arinakattilassa.

3.2.2 Adiabaattisen palamislämpötila laskennan tulokset, leijukattila

Kuvaajassa 5 on esitetty adiabaattisia lämpötiloja eri palamisilman arvoilla, kuivan kaasun happipitoisuuden ollessa 5 %. Polttoaineiden kosteudet ja palamisilman lämpötilat ovat samat kuin kuvaajan 4 tilanteissa. Palamisilman lämpötilat on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan selitteeseen sulkujen sisään.



Kuvaaja 5. Polttoaineen kosteuden sekä palamisilman lämpötilan ja kosteuden vaikutus adiabaattiseen palamislämpötilaan leijukattilassa.

3.2.3 Adiabaattisen palamislämpötila laskennan analysointi

Suurimmat adiabaattiset lämpötilat saadaan luotua kattilaan palamisilmaa esilämmitämällä. Polttoaineen kosteuden kasvaessa adiabaattinen lämpötila laskee. Kostutuksen vaikutus adiabaattiseen lämpötilaan on myös negatiivinen. Palamisilmankosteuden kasvaessa kattilan adiabaattinen lämpötila laskee.

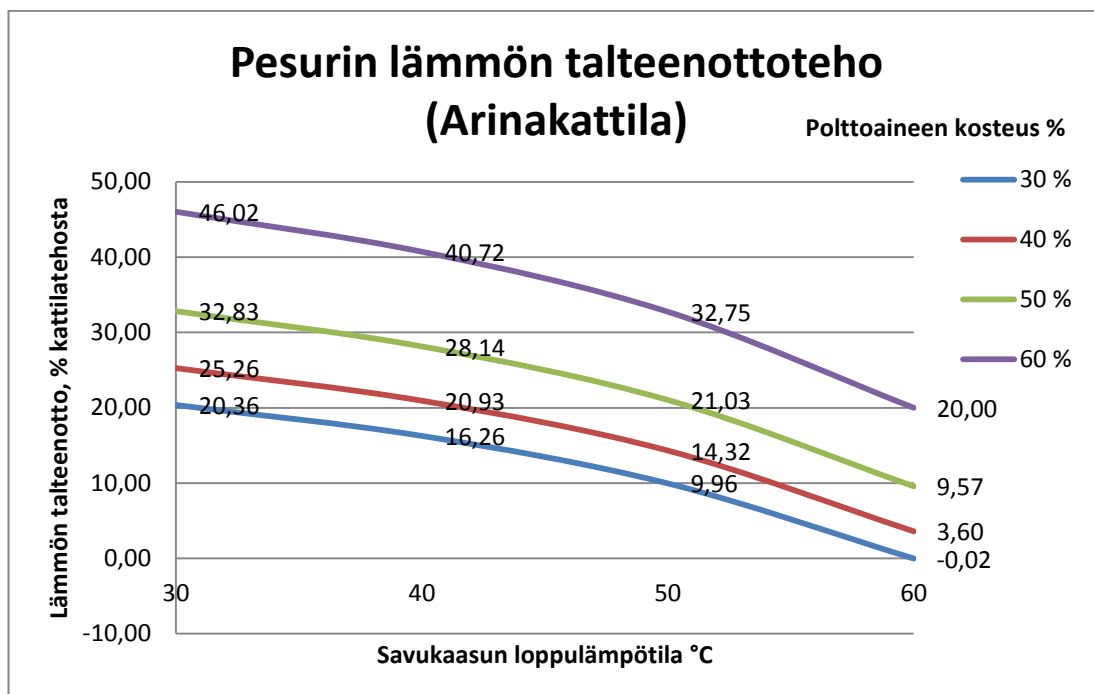
Kattiloiden adiabaattiset lämpötilat ovat kostuttamattomissa tapauksissa noin 200 °C korkeampia leijukattilassa verrattuna arinakattilaan. Kostutetuissa tapauksissa adiabaattinen lämpötila on 100–170 °C korkeampi leijukattilassa, kuin arinakattilassa. Leijukattilalla päästään korkeampiin adiabaattisiin lämpötiloihin, kuin arinakattilalla.

3.3 Savukaasupesurilla saatava lämmön talteenotto teho

Savukaasupesurilla saadaan energiaa talteen savukaasusta lauhduttamalla, myös ilman palamisilman kostutusta, jolloin järjestelmässä on pelkkä savukaasupesuri. Pesurin talteenottotehot laskettiin neljällä eri savukaasun loppulämpötilalla. Savukaasun loppulämpötila on se lämpötila, mihin savukaasut lauhdutetaan pesurissa ja mikä lämpöisinä savukaasut poistuvat savupiippuun. Laskennasta saadut lämmön talteenottotehot on esitetty kuvaajissa prosentteina kattilatehosta.

3.3.1 Pesurin lämmön talteenottoteho laskennan tulokset, arinakattila

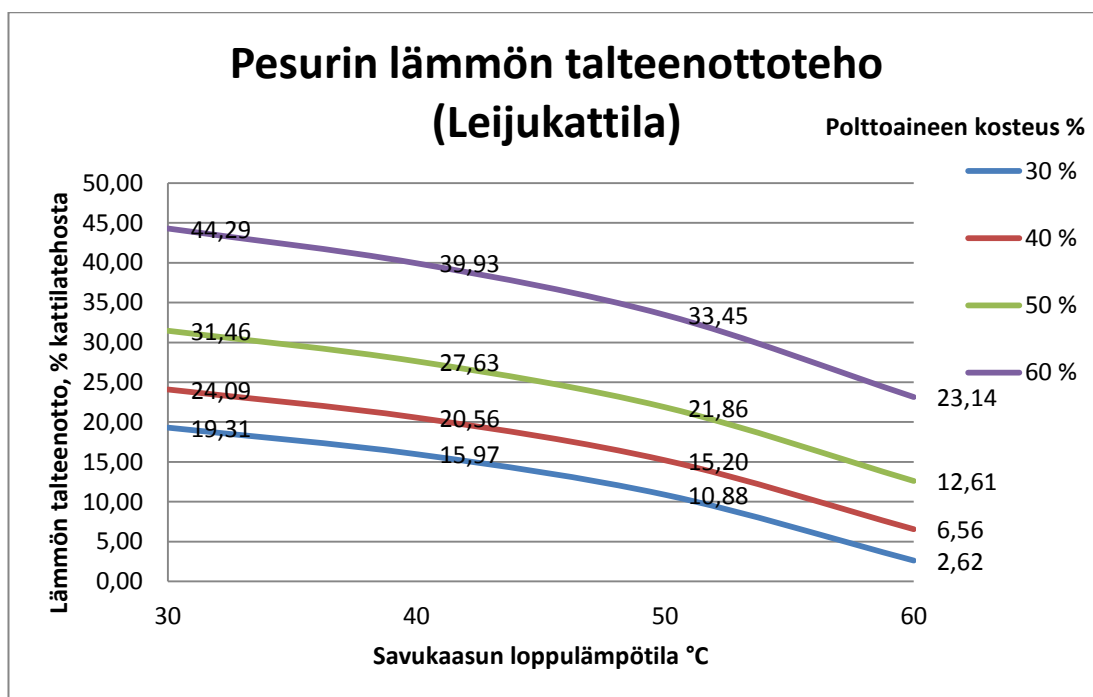
Kuvaajaan 6 on esitetty lämmön talteenottotehoja prosentteina kattilatehosta. Palamisilman lämpötilana käytettiin normaalin tilanteen lämpötilaa (25 °C). Savukaasun loppulämpötiloiksi laskentaan on valittu 30 °C, 40 °C, 50 °C ja 60 °C. Kuvaajien viivat on piirretty polttoaineen kosteuksien mukaan, jotka on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan selitteeseen.



Kuvaaja 6. Savukaasupesurin lämmön talteenottoteho arinakattilalla.

3.3.2 Pesurin lämmön talteenottoteholaskennan tulokset, leijukattila

Leijukattilaan yhdistetyn savukaasupesurin lämmön talteenottotehot laskettiin samoilla arvoilla kuin arinakattilan tapauksessa. Kuvaajassa 7 on esitetty lämmön talteenottotehoja prosentteina kattilatehosta. Kuvaajien viivat on piirretty polttoaineen kosteuksien mukaan, jotka on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan selitteeseen

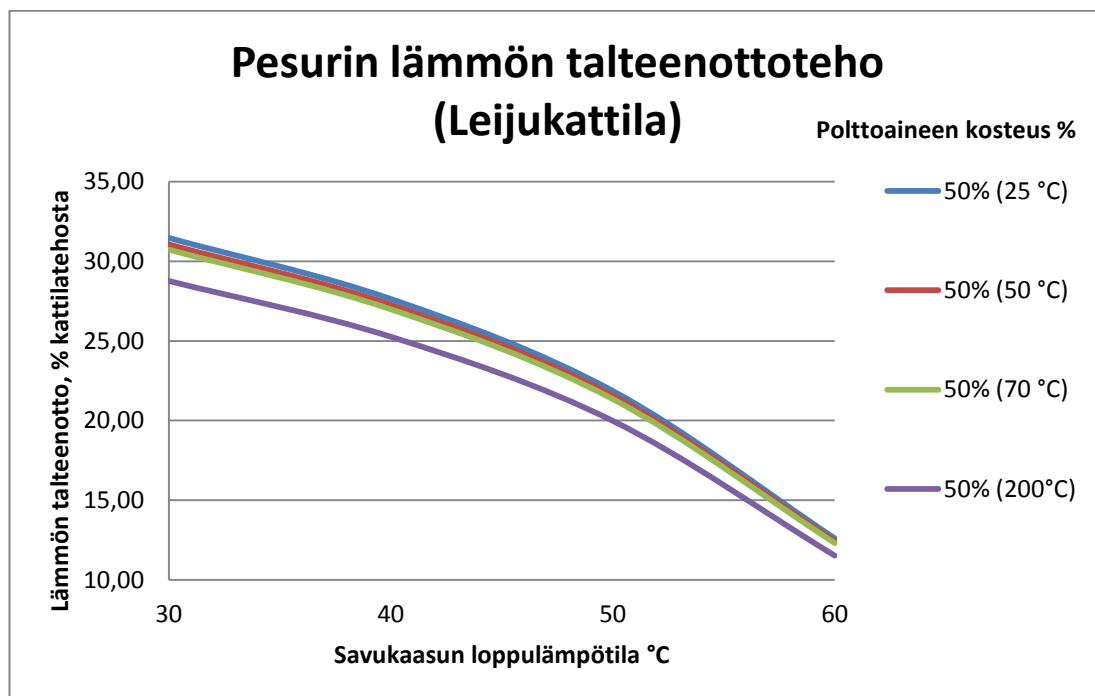


Kuvaaja 7. Savukaasupesurin lämmön talteenottoteho leijukattilalla.

3.3.3 Palamisilman esilämmityksen vaikutus lämmön talteenottoon

Kuvaajaan 8 on kerätty lämmön talteenottotehoja leijukattilalla eri palamisilman lämpötila-arvoilla. Polttoaineen kosteus on 50 % jokaisessa tilanteessa. Savukaasun loppulämpötilat ovat samat kuin edellisissä lämmön talteenottokuvaajissa. Ensimmäisessä tilanteessa palamisilman lämpötila on normaali 25 °C. Lopuissa tilanteissa, palamisilma on esilämmitetty normaalia lämpötilaa kuumemmaksi. Toisessa tilanteessa palamisilma on esilämmitetty 50 °C, kolmannessa tilanteessa palamisilma on esilämmitetty 70 °C ja viimeisessä tilanteessa palamisilma on esilämmitetty 200 °C.

Polttoaineen kosteus ja palamisilman lämpötila on merkitty kuvaajan oikeaan reunaan selitteeseen.



Kuvaaja 8. Savukaasupesurin lämmön talteenottoteho leijukattilalla eri palamisilman lämpötiloilla.

3.3.4 Pesurin lämmön talteenottoteholaskennan analysointi

Laskennan tuloksista nähdään tekijät, jotka vaikuttavat lämmön talteenottotehoon. Ensimmäisenä tekijänä on savukaasun loppulämpötila. Pesurilla lämpöä talteen otettaessa pyritään jäädyttämään savukaasu mahdollisimman viileäksi. Mitä alhaisempaan savukaasun loppulämpötilaan päästään sitä suurempi teho saadaan savukaasusta otettua talteen. Matalat savukaasun loppulämpötilat tietenkin edellyttävät tarpeeksi matalalämpöistä virtaa, johon energia siirretään.

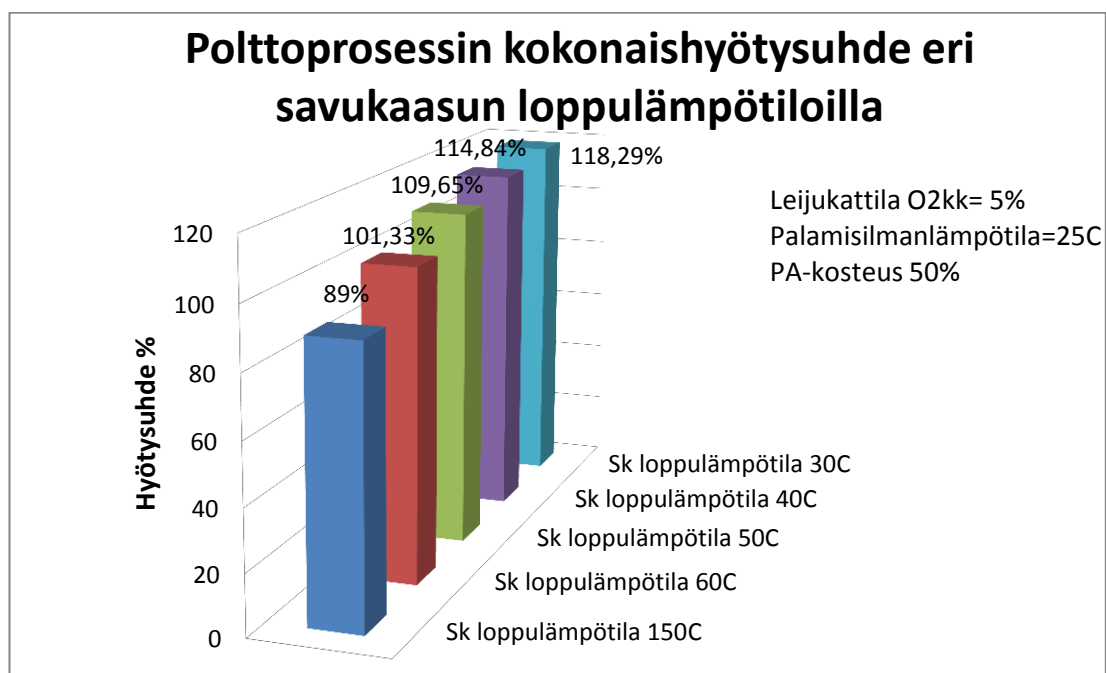
Toinen tekijä, joka vaikuttaa lämmön talteenottoon on polttoaineen kosteus. Palaessa polttoaineesta siirtyy kosteutta savukaasuun, joka nostaa lämmön talteenottoa. Kosteuksen kasvaessa lämmön talteenottoa saadaan kasvatettua. Tekniikka asettaa kuitenkin

kin rajan polttoaineen kosteudelle. Polttoaineen kosteuden kasvaessa suureksi, polttaminen vaikeutuu ja tarvitaan suurempia palamislämpötiloja.

Palamisilman esilämmitys laskee lämmön talteenottoa, koska savukaasun kosteus vähentyy. Suurin lasku lämmön talteenottoon tulee kun palamisilmaa lämmitetään 200 °C:een. Pienellä palamisilman esilämmityksellä ei ole juuri vaikutusta lämmön talteenottoon.

3.3.5 Lämmön talteenoton vaikutus polttoprosessin kokonaishyötysuhteeseen

Kun lämpöä otetaan talteen, se vaikuttaa polttoprosessin kokonaishyötysuhteeseen. Kuvaajaan 9 on koottu leijukattilan hyötysuhteita, ilman pesuria ja pesurin kanssa, eri savukaasun loppulämpötiloilla. Polttoaineen kosteus on kaikissa tilanteissa 50 % ja palamisilman lämpötila 25 °C. Jokaisen pylvään päällä on ilmoitettu kyseisen tilanteen hyötysuhde ja oikealla puolella savukaasun loppulämpötila. Kokonaishyötysuhde on laskettu lisäämällä pesurin energia kattilan energiaan, jonka jälkeen saatu tulos on jaettu kattilan polttoaineteholla. Ensimmäisessä tilanteessa savukaasusta ei ole otettu lämpöä talteen.



Kuvaaja 9. Polttoprosessin kokonaishyötysuhde leijukattilalla eri savukaasun loppulämpötiloilla.

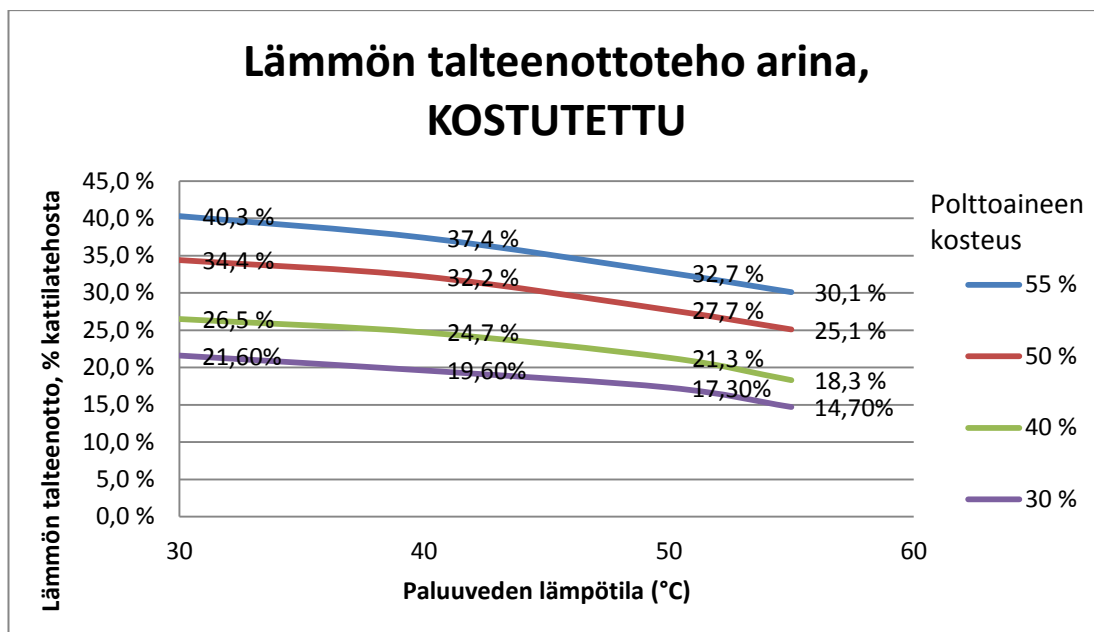
Kuvaajasta nähdään miten kokonaishyötysuhde kasvaa mentäessä matalampiin savukaasun loppulämpötiloihin. Suurimmat erot kuvaajaan tulevat kun savukaasut lauhdutetaan alle 60 °C lämpötilaan normaalista 150 °C lämpötilasta. Suurin hyötysuhde saadaan kun savukaasu lauhdutetaan 30 °C lämpötilaan.

3.4 Palamisilmankostutuksen vaikutus savukaasupesurilla saatavaan lämmön talteenottoon

Kostutetun tilanteen laskenta suoritettiin arinakattilan arvoilla. Laskennassa tutkittiin miten palamisilman kostuttaminen vaikuttaa savukaasupesurilla saatavaan lämmön talteenottoon. Polttoaineen kosteutta ja kaukolämmön paluueden lämpötilaa muuteltiin laskennassa. Kaukolämmön paluuvesi on vesivirta, jota lämmitetään pesurista tulevalla energialla. Kostutuksen avulla kaukolämpövettä voidaan lämmitellä korkeampaan lämpötilaan, kuin pelkällä pesurilla, jolloin energiaa siirtyy savukaasuista enemmän vastaanottavaan virtaan.

3.4.1 Kostutetun tilanteen lämmön talteenottoholaskennan tulokset

Kuvaajaan 10 on laskettu lämmön talteenottohot neljällä eri polttoaineen kosteudella ja neljällä eri paluueden lämpötilalla. Polttoaineen kosteuksina käytettiin 30 %, 40 %, 50 % ja 55 %. Paluueden lämpötiloina käytettiin 30 °C, 40 °C, 50 °C ja 60 °C. Paluueden lämpötila on noin 5 °C savukaasun loppulämpötilaa korkeampi.

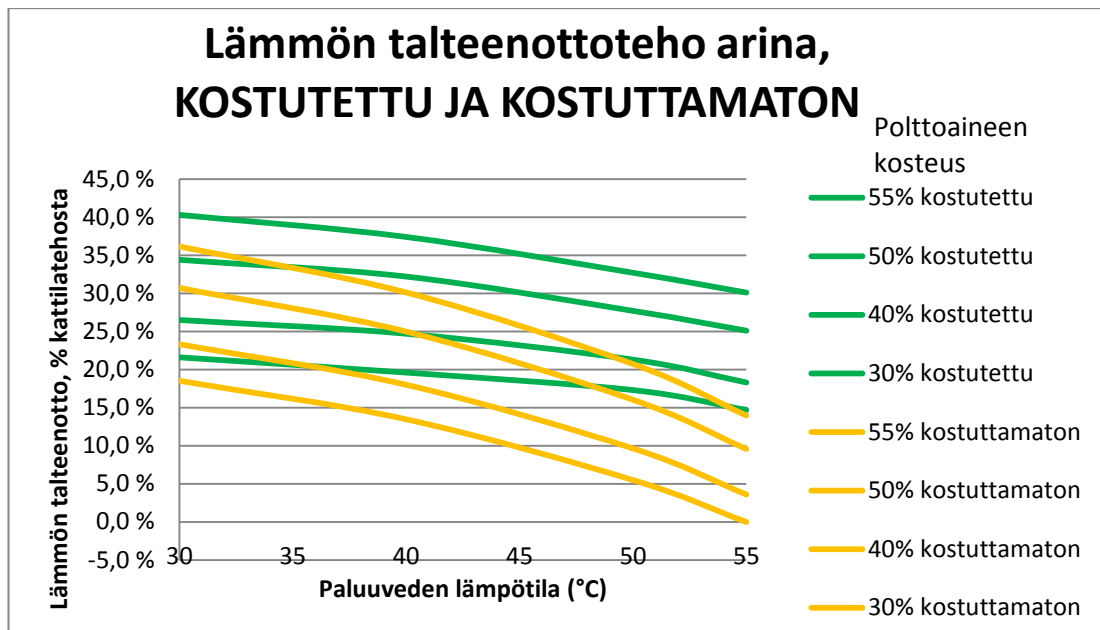


Kuvaaja 10. Savukaasupesurin lämmön talteenottoarinakattilalla, kun palamisilmaa on kostutettu.

3.4.2 Kostutetun ja kostuttamattoman tilanteen vertailu

Arinakattilan kostuttamattoman tapauksen laskenta suoritettiin uudelleen vastaamaan kostutetun tapauksen laskentaa. Kostuttamattoman tapauksen paluuvien lämpötilat muutettiin vastaamaan kostutetun tapauksen paluuvien lämpötiloja ja sen lisäksi lämmön talteenottoarina laskettiin 55 % polttoaineen kosteudella.

Molempien laskentojen tulokset lisättiin kuvaajaan 11. Kuvaajasta voi verrata kostutettua ja kostuttamatonta tapaus toisiinsa. Oikealla olevaan selitteeseen on lisätty kunkin tilanteen polttoaineen kosteus ja tieto siitä onko palamisilma kostutettua vai kostuttamatonta. Vihreät viivat kuvaavat kostutettua tapaus ja keltaiset viivat kostuttamatonta tapaus.



Kuvaaja 11. Savukaasupesurin lämmön talteenotto teho arinakattilalla, kostutetun- ja kostuttamattoman tapauksen vertailu.

3.4.3 Kostutetun tapauksen laskennan analysointi

Palamisilmaa kostuttamalla päästään suurempiin lämmön talteenotto tehoihin pienemmällä polttoaineen kosteuksilla ja suuremmilla paluuveden lämpötiloilla kuin palamisilmaa kostuttamatta. Palamisilmaa kostuttamalla saadaan savukaasun kosteus kasvamaan, jolloin pesurille saadaan johdettua enemmän kosteutta. Kun pesuriin johdetaan kosteampaa savukaasua, saadaan lämmön talteenottoa tehostettua.

Vaikka pienillä polttoaineen kosteuksilla päästään kostuttamalla kelvollisiin lämmön talteenotto tehoihin, näkee kuvaajista kuinka lämmön talteenotto tehostuu kun polttoaineen kosteutta lisätään. Pienimmälläkin polttoaineen kosteudella ja kuumimmalla paluuveden lämpötilalla päästään jo yli 17 % lämmön talteenotto tehoon kattilatehosta, joka on siis läpi laskennan ollut 10 MW. Optimaalisimmassa tilanteessa jossa polttoaineen kosteus on 55 % ja paluuveden lämpötila 30 °C päästään jopa yli 40 % lämmön talteenotto tehoon kattilatehosta. Polttoaineen kosteus ja palamisilman kostuttaminen ovat molemmat rajallisia. Jos kattilassa on liikaa kosteutta, menee veden höyrytämiseen enemmän energiaa, kuin polttoaineen palamisesta vapautuu.

Kuvaajien vertailussa käy hyvin ilmi kuinka palamisilmaa kostuttamalla saadaan lisää lämmön talteenottoa. Suurimmat erot kostutetun ja kostuttamattoman tapauksen välille tulevat pienillä polttoaineen kosteuksilla ja suurilla paluuveden lämpötiloilla. Erot tasoittuvat kun mennään pienempiin paluuveden lämpötiloihin, jolloin energiaa saadaan siirrettyä pienemmällä lämpötilatasolla vastaan ottavaan virtaan.

4 KANNATTAVUUS

Kannattavuutta lasketaan, jotta saadaan tietää, miten taloudellista on sijoittaa johonkin. Tämän tutkielman kannattavuuslaskenta koskee kostutettua ja kostuttamatonta tapauksia. Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmään kuuluu savukaasupesuri, kostutin, kaikki tarvittavat instrumentit, pumput sekä automaatio ja sähköistys. Kostuttimella on tapauskohtaisesti kustannuksia korottavia vaikutuksia. Märän palamisilman johtaminen kattilaan tuo omat haasteensa ja kustannuksensa. Kuivaa palamisilmaa on helpompi johtaa kattilaan. Kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmä on samanlainen, kuin kostutetun, mutta siihen ei sisälly kostutinta. Kannattavuuden tarkastelussa on huomioitu kulut, joilla on kannattavuuden laskennan kannalta merkitystä. Kattila tyypiksi kannattavuuslaskelmiin on valittu arinakattila, jonka kuiva happipitoisuus on 8 %. Kannattavuuslaskennan polttoaineena toimi puhdaspuu, jonka kosteus on 50 %.

Vertailun vuoksi takaisinmaksuaika -kappaleeseen on tehty oma otsikko eräälle käytössä olevalle biolämpölaitokselle, jossa on opinnäytetyön kaltainen kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmä. Laitoksen kattilana toimii 10 MW leijupetikattila, joka on nimellisteholtaan samaa kokoluokkaa kuin opinnäytetyön kattilat. Polttoaineina laitoksessa on käytetty erilaisia hakkeita, kuten metsätähdehaketta. Käytössä on ollut myös sahanpurua ja erilaisia terminaaleista haettuja sekoituksia. Polttoaineiden keskimääräinen kosteus on ollut 40 %. Savukaasupesurijärjestelmälle on kappaleessa laskettu takaisinmaksuaika laitoksessa toteutuneen lämmön talteenoton mukaan.

4.1 Savukaasupesurijärjestelmän käyttökustannuksien laskennasta

Laskentaan on otettu huomioon pesurin käyttö ja huoltokustannukset sekä puhaltimien ja pumppujen aiheuttama sähkönkulutus. Sähkön hintana laskennassa käytettiin Pori Energian yrityksille suunnatun tehotuotehinnaston antamaa energiamaksua 4,76 snt/kWh. Järjestelmän huipputehon käyttöajaksi sovittiin 5000 h/a. Järjestelmän käytettävyys on huipputehon käyttöajasta 98 %. (Pori Energia Oy:n www-sivut 2014)

Syntyvä lauhde neutraloidaan, selkeytetään ja suodatetaan asetuksen 750/2013 mukaisesti, jonka jälkeen useimmissa tapauksissa lauhde voidaan ajaa sadevesiviemäriin tai muuhun järjestelmään, mistä ei tule kustannuksia. Jätevesimaksuja ei tästä syystä ole otettu huomioon laskennassa. Kemikaalikulutus on hyvin pientä puhtaan puun poltossa syntyvien yhdisteiden neutraloimisessa. (Asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista 750/2013, 9 §)

4.1.1 Savukaasupesurijärjestelmän hankinta- ja käyttökustannukset

Järjestelmän hankintahinta on aina tapauskohtainen. Tutkielman mukaisen kostutetun tapauksen järjestelmän hankintahinta on noin 1000000 €. Kostuttamattoman tapauksen järjestelmän hankintahinta on noin 800000 €. Savukaasupesurijärjestelmien vuotuiset käyttökustannukset koostuvat huoltokuluista ja järjestelmien käyttöön liittyvistä kuluista. Huoltokulut ovat 1,5-3 % hankintahinnasta sisältäen tarvittavat varaosat ja tarvikkeet. Huoltokuluiksi valittiin 3 % hankintahinnasta. Käytön vuotuinen kustannus on laskettu sen mukaan, että pesuri olisi toiminnassa 230 vrk/a, josta käyttöön kuluisi 1 h/vrk. Huoltotoimenpiteisiin on arvioitu vuodessa kuluvan kahdelta mieheltä viikko, yhteensä 80 h. Yhden tunnin arvoksi on asetettu 45 €. Kemikaalikustannuksiksi on valittu 2000 €. Taulukossa 1 on esitetty laskelmat kostutetun tapauksen järjestelmän kustannuksista. Taulukossa 2 on esitetty kostuttamattoman tapauksen laskelmat.

Kostutettu tapaus		
Savukaasupesurijärjestelmän hankintahinta n.		1000000 €
Pesurin:		
Huoltokulut	15000 - 30000 €	= 30000 €/a
Käyttö	1h/vrk * 230vrk * 45 €/h	= 10350 €/a
Toimenpiteet	80h/a * 45 €/h	= 3600 €/a
Kemikaalikustannukset	1000 - 2000 €	= 2000 €/a
		= 45950 €/a

Taulukko 1. Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmän hankintahinta, huolto ja käyttökustannukset €/a.

Kostuttamaton tapaus		
Savukaasupesurijärjestelmän hankintahinta n.		800000 €
Pesurin:		
Huoltokulut	12000 - 24000 €	= 24000 €/a
Käyttö	1h/vrk * 230vrk * 45 €/h	= 10350 €/a
Toimenpiteet	80h/a * 45 €/h	= 3600 €/a
Kemikaalikustannukset	1000 - 2000 €	= 2000 €/a
		= 39950 €/a

Taulukko 2. Kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmän hankintahinta, huolto ja käyttökustannukset €/a.

4.1.2 Savukaasupesurijärjestelmän puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutus

Molemmat savukaasupesurijärjestelmät tarvitsevat savukaasupuhaltimen, jotta pesurin aiheuttama painehäviö saadaan poistettua. Kostutetussa tapauksessa palamisilman puhaltimella poistetaan kostuttimen aiheuttama painehäviö. Sähkönkulutus on laskettu savukaasun ja palamisilman virtaaman, laitteista syntyvän paine-eron ja puhaltimien hyötysuhteen avulla. Pesurin ja kostuttimen veden pumppaamiseen tarvittavat tehot on laskettu käyttämällä mitoituspisteen palautuspainetta, pumppujen hyötysuhdetta ja vesivirtaa, joka kulkee pumpuissa.

Savukaasu- ja palamisilman puhaltimien vuosikulutus on laskettu huipputehon käyttöajan perusteella. Huomioon on otettu 98 % käytettävyys laitteille. Sähkön hintana

on kappaleessa 4 esitettyä energiamaksua. Taulukossa 3 on esitetty kostutetun tapauksen laskelmat sähkönkulutuksesta. Kostuttamattomassa tapauksessa ei tarvita palamisilman puhallinta eikä kostuttimen pumppua. Taulukossa 4 on esitetty kostuttamattoman tapauksen laskelmat sähkönkulutuksesta.

Arinakattila		Vuosikulutus	Kustannus
Savukaasupuhaltimen kulutus	$\Delta P = 14,90$ kW	72996,23 kWh/a	3474,62 €/a
Palamisilmapuhaltimen kulutus	$\Delta P = 8,77$ kW	42996,33 kWh/a	2046,625 €/a
Pesurin veden pumppaus			
Pesurin vesivirta 65 kg/s	$\Delta P = 23,8$ kW	116783,3 kWh/a	5558,887 €/a
Kostuttimen veden pumppaus			
Kostuttimen vesivirta 16 kg/s	$\Delta P = 4,0$ kW	19600 kWh/a	932,96 €/a
			Yhteensä= 12013,09 €/a

Taulukko 3. Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmän puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutus €/a.

Arinakattila		Vuosikulutus	Kustannus
Savukaasupuhaltimen kulutus	$\Delta P = 14,90$ kW	42715,7 kWh/a	2033,267 €/a
Pesurin veden pumppaus			
Pesuri vesivirta 65 kg/s	$\Delta P = 23,8$ kW	116783,3 kWh/a	5558,887 €/a
			Yhteensä= 7592,15 €/a

Taulukko 4. Kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmän puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutus €/a.

Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmän puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutuksesta kertyy vuodessa 12013,09 €, kostuttamattoman tapauksen sähkönkulutuksesta 7592,15 €. Sähkönkulutukseen lisätään järjestelmän huoltokulut, niin

saadaan järjestelmästä aiheutuvat kokonaiskulut. Kostutetun tapauksen kokonaiskulut ovat 57963,09 €/a ja kostuttamattoman tapauksen 47542,15 €/a.

4.2 Savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika on tärkeimpiä tekijöitä, kun lasketaan kannattavuutta. Takaisinmaksuaikaa varten laskettiin järjestelmien lämmön talteenottoteholla säästyvä energia. Kaukolämmön paluueden lämpötiloina lämmön talteenottolaskennassa käytettiin 30 °C, 40 °C, 50 °C ja 55 °C. Säästetyn energian arvoa laskettaessa käytettiin kappaleessa neljä esitettyä energiamaksua. Takaisinmaksuaika laskettiin jakamalla investointi nettotuotolla.

4.2.1 Lämmön talteenoton arvo eri paluueden lämpötiloilla

Savukaasupesurijärjestelmien vuotuiset tuotot laskettiin neljällä eri kaukolämmön paluueden lämpötilalla. Lämmön talteenottoteho kasvaa, kun paluueden lämpötila laskee. Siten saadaan siirrettyä enemmän energiaa veteen. Lämmön talteenottotehon kannalta on tärkeää, että kattilaitoksen kaukolämpöverkko toimii moitteettomasti. Joissain tilanteissa kaukolämpöä verkkoa joudutaan virittämään, jotta paluueden lämpötilat saadaan otollisiksi lämmön talteenottoa ajatellen. Lämmön talteenoton arvot laskettiin käyttämällä huipputehon käyttöaikaa, johon on huomioitu 98 % käytettävyys. Taulukossa 5 on esitetty lämmön talteenotolla säästyvä energia eri paluueden lämpötiloilla kostutetussa tapauksessa. Taulukossa 6 on esitetty kostuttamattoman tapauksen lämmön talteenotolla säästyvä energia samoilla paluueden lämpötilojen arvoilla, kuin taulukossa 5.

Huipputehon käyttöaika 5000 h	LTO-teho kW	Paluuvesi
4900 h kun käytettävyys 98 %	2510	55 C
	2770	50 C
Polttoaineen kosteus 50 %	3220	40 C
	3440	30 C
Säästää energiaa		
2510kW*4900 h/a= 12299 MWh/a	Energiamaksu €/MWh	
2770kW*4900 h/a= 13573 MWh/a	47,6	
3220kW*4900 h/a= 15778 MWh/a		
3440kW*4900 h/a= 16856 MWh/a		
Lämmön talteenoton arvo on Energiamaksu * Säästetty energia =		
47,6 €/MWh * 12299 MWh/a= 585432 €/a		
47,6 €/MWh * 13573 MWh/a= 646075 €/a		
47,6 €/MWh * 15778 MWh/a= 751033 €/a		
47,6 €/MWh * 16856 MWh/a= 802346 €/a		

Taulukko 5. Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmän lämmön talteenoton arvo eri paluuvien lämpötiloilla €/a.

Huipputehon käyttöaika 5000 h	LTO-teho kW	Paluuvesi
4900 h kun käytettävyys 98 %	957	55 C
	2103	45 C
Polttoaineen kosteus 50 %	2814	35 C
	3283	25 C
Säästää energiaa		
957kW*4900 h/a= 4689 MWh/a	Energiamaksu €/MWh	
2103kW*4900 h/a= 10305 MWh/a	47,6	
2814kW*4900 h/a= 13789 MWh/a		
3283kW*4900 h/a= 16087 MWh/a		
Lämmön talteenoton arvo on Energiamaksu * Säästetty energia =		
47,6 €/MWh * 4689 MWh/a= 223211 €/a		
47,6 €/MWh * 10305 MWh/a= 490504 €/a		
47,6 €/MWh * 13789 MWh/a= 656337 €/a		
47,6 €/MWh * 16087 MWh/a= 765727 €/a		

Taulukko 6. Kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmän lämmön talteenoton arvo eri paluuvien lämpötiloilla €/a.

Kostutetun tapauksen jokaisessa tilanteessa päästään yli puolen miljoonan nettotuotoon lämmön talteenotossa. Suurimman ja pienimmän säästyvän energian arvon erotus on 233288 €/a. Erotus korostaa sitä, kuinka tärkeää on, että kattilalaitoksella on sopivan lämpöinen ainevirta, johon savukaasuista lauhdutettua energiaa siirretään.

Kostuttamattoman tapauksen lämmön talteenotto jää selvästi kustutetulle tapaukselle suurilla paluuveden lämpötiloilla. Erot tasoittuvat huomattavasti, kun mennään pieniin paluuveden lämpötiloihin. Suurimman ja pienimmän säästyvän energian arvon erotus kustuttamattomassa tapauksessa on 542516 €/a. Kostuttamattomassa tapauksessa paluuveden lämpötila korostuu vielä enemmän kuin kustutetussa tapauksessa. Kostutuksen avulla pystytään ottamaan huomattavasti paremmin lämpöä talteen suuremmilla paluuveden lämpötiloilla.

4.2.2 Investoinnin takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika laskettiin edellä saatujen lämmön talteenoton ja savukaasupesurijärjestelmien kokonaiskulujen arvoilla. Saadut arvot muodostavat savukaasupesurijärjestelmien nettotuoton. Taulukossa 7 on esitetty kustutetulle ja taulukossa 8 kustuttamattomalle tapaukselle neljä eri takaisinmaksuaikaa neljällä eri lämmön talteenottoteholla.

Investoinnin takaisinmaksuaika: Investointi/Nettotuotto	
(LTO-teho 2510 kW)	1000000 € / 527469 €/a = 1,90 a
(LTO-teho 2770 kW)	1000000 € / 588112 €/a = 1,70 a
(LTO-teho 3220 kW)	1000000 € / 693070 €/a = 1,44 a
(LTO-teho 3440 kW)	1000000 € / 744383 €/a = 1,34 a

Taulukko 7. Kostutetun tapauksen savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika lämmön talteenoton eri arvoilla.

Investoinnin takaisinmaksuaika: Investointi/Nettotuotto

(LTO-teho 957 kW) 800000 € / 175669 €/a = **4,55 a**

(LTO-teho 2103 kW) 800000 € / 442962 €/a = **1,81 a**

(LTO-teho 2814 kW) 800000 € / 608795 €/a = **1,31 a**

(LTO-teho 3283 kW) 800000 € / 718185 €/a = **1,11 a**

Taulukko 8. Kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika lämmön talteenoton eri arvoilla.

Kostutetussa tapauksessa takaisinmaksuajaksi tulee jokaisessa tilanteessa alle kaksi vuotta. Lyhyimmän ja pisimmän takaisinmaksuajan ero on 0,56 a. Kostuttamattomassa tapauksessa pisin takaisinmaksuaika tulee ensimmäisessä tilanteessa, jossa paluuveden lämpötila on korkeimmillaan. Lyhyimmän ja pisimmän takaisinmaksuajan ero on kostuttamattomassa tapauksessa 3,44 a. Paluuveden lämpötilan laskiessa erot kostutettuun tapaukseen tasoittuvat. Viimeisten kahden tilanteen takaisinmaksuajat ovat jopa lyhyempiä kostuttamattomassa kuin kostutetussa tapauksessa. Takaisinmaksuaika on laskettu yksinkertaisella tavalla, mutta se on hyvin suuntaa antava tämänkaltaisen järjestelmän takaisinmaksuajasta.

4.2.3 Savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika toteutuneella lämmön talteenotolla

Taulukossa 9 on esitetty erään biolämpölaitoksen savukaasupesurin lämmön talteenoton arvo vuosilta 2012 ja 2013. Laskennassa on käytetty samaa kappaleessa 4.1 esitettyä energiamaksua, kuin edellisissä laskuissa.

Polttoaineen keskimääräinen kosteus 40 %	Energiamaksu €/MWh 47,6
Lämmön talteenoton arvo on Energiamaksu * Säästetty energia =	
Vuosi 2012	47,6 €/MWh * 9925 MWh/a= 472430 €/a
Vuosi 2013	47,6 €/MWh * 9362 MWh/a= 445631 €/a

Taulukko 9. Savukaasupesurijärjestelmän lämmön talteenoton arvo vuosina 2012 ja 2013 €/a.

Takaisinmaksuaika laskettiin taulukossa 9 olevilla lämmön talteenoton arvoilla ja taulukossa yksi esitetyllä savukaasupesurijärjestelmän hankintahinnan avulla. Taulukossa 10 on esitetty kaksi takaisinmaksuaikaa, kahden eri vuoden toteutuneilla lämmön talteenoton arvoilla. Nettotuoton laskennassa on käytetty kostutetun tapauksen kokonaiskulutusta, joka on 57963,09 €/a.

Investoinnin takaisinmaksuaika: Investointi/Nettotuotto
(Vuosi 2012) 1000000 € / 414467 €/a = 2,41 a
(Vuosi 2013) 1000000 € / 387668 €/a = 2,58 a

Taulukko 10. Savukaasupesurijärjestelmän takaisinmaksuaika toteutuneilla lämmön talteenoton arvoilla.

Takaisinmaksuaika kyseiselle laitoksella on saatujen lämmön talteenoton arvojen mukaan alle kaksi ja puoli vuotta. Tulokset ovat samankaltaisia kuin opinnäytetyön tutkielman laskennassa saadut. Takaisinmaksuaikojen ero on suurimmillaan 1,24 a ja pienimmillään 0,51 a.

5 YHTEENVETO

Palamisilman kostuttaminen KPA-kattilalaitoksessa savukaasupesurijärjestelmällä on pitkä ja monivaiheinen prosessi. Järjestelmän tulee olla oikein mitoitettu kattilalaitokseen nähden, jotta päästään tuotannollisesti hyvään lopputulokseen. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon kaikki muuttujat. Kattilan rakenne, käytettävä polttoaine, polttoaineen kosteus ja palamisilman lämpötila sekä kosteus vaikuttavat suuresti saattavaan lopputulokseen.

Kostutuksen vaikutusta tutkittaessa KPA-kattilalaitoksessa oli tutkittava aluksi mikä on kattilan hyötysuhde ilman järjestelmää, jotta nähtäisiin miten kostutus ja lämmön talteenotto vaikuttavat alkuperäiseen hyötysuhteeseen. Laskennan tuloksista kävi ilmi, että palamisilmaa kostuttamalla pystytään nostamaan kattilan hyötysuhdetta alkuperäisestä.

Adiabaattinen laskenta suoritettiin, jotta saataisiin kattilasta tietoa, miten pystytään polttamaan ja millaisissa olosuhteissa voidaan vielä pitää liekkiä kattilassa. Laskennasta nähdään kostutuksen vaikutus adiabaattiseen lämpötilaan. Kostutus laskee adiabaattista lämpötilaa, koska kosteus palamisprosessissa lisääntyy, mutta ei tee palamista mahdottomaksi.

Kattilan hyötysuhde- ja adiabaattisen lämpötila laskennan jälkeen selvitettiin, kuinka paljon energiaa savukaasupesurilla pystytään talteen ottamaan, ilman palamisilman kostuttamista. Lämmön talteenoton vaikutusta polttoprosessin kokonaishyötysuhteeseen tarkasteltiin myös. Palamisilman esilämmityksen vaikutus lämmön talteenottoon oli tarkastelussa negatiivinen. Lopputuloksien tarkastelussa käy ilmi, että savukaasupesurilla pystytään hyvin korkeaan lämmön talteenottotehoon optimaalisissa olosuhteissa ilman kostutustakin. Kokonaishyötysuhde nousee myös huomattavasti, kun lämpöä otetaan talteen.

Polttoprosessin laskennassa viimeisenä tutkittiin palamisilman kostuttamisen vaikutusta lämmön talteenottotehoon. Kostutettua tilannetta verrattiin kostuttamattomaan tilanteeseen, jotta kostutuksen hyödyt tulisivat selvemmin ilmi. Kuvaajien vertailussa kävi ilmi, että palamisilmaa kostuttamalla päästään korkeampiin lämmön talteenotto

tehoihin kuin kostuttamattomassa tilanteessa. Kostuttamalla saadaan selvästi enemmän tehoa suurilla paluuveden lämpötiloilla ja pienillä polttoaineen kosteuksilla, verrattuna kostuttamattomaan tapaukseen.

Kannattavuuslaskennassa selvitettiin kostutetun ja kostuttamattoman tapauksen savukaasupesurijärjestelmän hankintahinta, vuotuiset huolto- ja käyttökustannukset. Takaisinmaksuaika laskettiin arinakattilasta savukaasupesurijärjestelmällä saatavilla lämmön talteenottoarvoilla. Kaikilla paluuveden lämpötiloilla investoinnin takaisinmaksuaika oli kostutetussa tapauksessa alle kaksi vuotta. Kostuttamattomassa tapauksessa päästiin myös alle kahden vuoden takaisinmaksuaikoihin kaikissa muissa tilanteissa, paitsi ensimmäisessä. Kostutetun tapauksen kannattavuuslaskennan takaisinmaksuajan tuloksia verrattiin käytössä olevan savukaasupesurijärjestelmän, jossa on kostutin, takaisinmaksuajan tuloksiin. Kattilat ja polttoaineet ovat erilaisia, mutta takaisinmaksuajoissa oli eroa vain puolesta vuodesta vähän yli vuoteen riippuen tilanteesta.

Savukaasupesurijärjestelmällä KPA-kattilaitoksessa pystytään nostamaan kattilan- ja polttoprosessin hyötysuhdetta. Investointina savukaasupesurijärjestelmä on kannattava lyhyen takaisinmaksuajansa ja tuottoonsa nähden vähäisten huolto- ja käyttökulujen vuoksi. Laitteiston elinikä on 10–30 vuotta, riippuen käytöstä, joten savukaasupesurijärjestelmä pystyy elinikänsä aikana tuottamaan itsensä takaisin moninkertaisesti.

LÄHTEET

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. ja Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uud. p. Helsinki: Opetushallitus, Edita Oy.

Bioenergian verkkopalveluiden www-sivut. 2012. Viitattu 11.3.2014.
<http://www.bioenergiatieto.fi>

Condens Heat Recovery Oy:n www-sivut. 2013. Viitattu 31.3.2014
<http://www.condens.fi>

SFS-EN 12952–15. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 15: Vastaanotokokeet (12952–15:2003). 2003. Finnish Standards Association SFS. Helsinki: SFS

Pori Energia Oy:n www-sivut. 2014. Viitattu 24.4.2014
<http://www.porienergia.fi>

Asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista. 2013. A24.10.2013/750

