

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville-Matti Rissanen

SAVUKAASUPESURILAUHTEEN LÄMMÖN HYÖTY- KÄYTTÖ VANAJAN VOIMALAITOKSELLA

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Dosentti, TkT Juha Kaikko

Ohjaaja: DI Tero Saviniemi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville-Matti Rissanen

Savukaasupesurilauhteen lämmön hyötykäyttö Vanajan voimalaitoksella

Diplomityö

2016

85 sivua, 35 kuvaa, 22 taulukkoa, neljä yhtälöä ja yksi liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Dosentti, TkT Juha Kaikko

Ohjaaja: DI Tero Saviniemi

Hakusanat: Savukaasupesuri, lämmöntalteenotto, hukkalämpö, lauhteenkäsittely, kaukolämpö

Keywords: Flue gas scrubber, heat recovery, waste heat, condensate treatment, district heating

Tässä diplomityössä selvitetään Elenia Lämpö Oy:n toimeksiannosta savukaasupesurilauhteen lämmön hyötykäyttöä Vanajan voimalaitoksella. Kiristyvät päästömääräykset ja energiatehokkuuden tavoittelu ovat tehneet voimalaitoksissa monet hukkalämpöä hyödyntävät ratkaisut kannattaviksi investoinneiksi. Savukaasupesurit ovat yksi varteenotettavista lämmöntalteenottolaitteista ja niiden avulla onkin mahdollista tuottaa merkittävä osa esimerkiksi kaukolämmöstä hukkalämmön avulla. Vaikka pesureiden käyttö on yleistynyt, ei niiden täyttä potentiaalia vielä juurikaan hyödynnetä. Savukaasupesurilauhteen lämmöntalteenottojärjestelmällä on mahdollista hyödyntää pesurilta saatavaa lämpöä, jota ei voida käyttää kaukolämmön tuotantoon. Voimalaitoksilla on monia prosesseja ja kohteita, joissa lauhteen lämmöllä voidaan korvata esimerkiksi kaukolämmöllä tapahtuvaa lämmitystä.

Tehdyn selvityksen perusteella savukaasupesurilauhteen hukkalämpöä voidaan hyödyntää voimalaitoksella raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmittämiseen, palamisilman esilämmitykseen sekä rakennusten lämmittämiseen. Myös investointi näitä kohteita sisältävään lämmöntalteenottojärjestelmään on taloudellisesti kannattavaa. Merkittävimmät tekijät investoinnin kannattavuuteen ovat voimalaitoksen veden tarve, investointikustannus ja kaukolämmön tuotantokustannus, joiden vaikutus kannattavuuteen on samaa suuruusluokkaa. Lauhteen lämpötilalla ei ole merkittävää vaikutusta järjestelmän toimintaan tai kannattavuuteen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Ville-Matti Rissanen

Utilization of waste heat of flue gas condensate in Vanaja power plant

Master's thesis

2016

85 pages, 35 figures, 22 tables, four equations and one appendix

Examiners: Professor, D.Sc. Esa Vakkilainen
Docent, D.Sc. Juha Kaikko

Instructor: M.Sc. (Tech.) Tero Saviniemi

Keywords: Flue gas scrubber, heat recovery, waste heat, condensate treatment, district heating

The purpose of this master's thesis is to examine heat recovery of waste heat of flue gas condensate in Vanaja power plant. The assignment is given by Elenia Lämpö Ltd. Increasingly stringent emission regulations and the pursuit to energy efficiency have made use of waste heat profitable investments for power plants. Flue gas scrubbers are considerable heat recovery devices. A significant part of the district heat is possible to produce from waste heat with flue gas scrubbers. Although the use of scrubbers has become more common, their full potential is not utilized. Flue gas condensate heat recovery system can utilize the heat that cannot be used for district heating. The power plants have a number of processes and places where heating system with condensate waste heat can replace, for example district heating.

Based on the research, waste heat of flue gas condensate can be used to heat the untreated water and supplementary district heating water, for preheating combustion air and heating of buildings. Also, investment in heat recovery system containing these objects is profitable. The most important factors for profitability are the water demand of the power plant, the investment cost and the cost of production of district heat. Their effect on the profitability are alike. Temperature of the condensate has no significant effect on the usage or on the profitability of the waste heat recovery system.

ALKUSANAT

Näin jälkiviisaana voin sanoa, että diplomityön tekeminen ja samanaikaisesti toimiminen ylioppilaskunnan hallituksen puheenjohtajana ei ole ajankäytöllisesti kaikkein paras yhdistelmä. Molemmat ovat erittäin paljon aikaa vieviä ja keskittymistä vaativia tehtäviä ja tämän vuoden aikana en olekaan juuri muuta ehtinyt tekemään. Kuitenkin olen nauttinut molemmista pesteistä, sillä ne ovat myös mukavaa vastapainoa toisilleen.

Tämän vuoksi haluankin ensiksi kiittää Elenia Lämpöä ja kaikkia siellä jollain tavoin diplomityöprojektiini osallistuneita. Työn tekeminen oli koko ajan mielekästä ja mielenkiintoista. Erityisesti haluan kiittää joustavasta aikataulusta ja vapaista työskentelytavoista. Sain edistää diplomityötäni haluamaani tahtiin ja haluamassani paikassa, joiden lisäksi apua ja tukea oli aina saatavilla, kun sitä tarvitsin. Tämä osaltaan myös mahdollisti sen, että pystyin samanaikaisesti hoitamaan huolella tehtäväni ylioppilaskunnassa. Toivottavasti diplomityönsäni esittelemäni ideat pääsevät hyötykäyttöön ja toteutukseen lähitulevaisuudessa.

Haluan osoittaa kiitokseni myös muille tahoille, jotka olivat mukana edistämässä diplomityötäni. Sain teiltä paljon hyödynnettävää tietoa ja vastauksia kysymyksiin, joihin muualta sitä ei löytynyt. Kiitokset näistä erityisesti Valmetille ja Caligo Industrialle. Antamanne tiedot veivät diplomityötä oikeaan suuntaan ja sain niistä uutta näkökulmaa työhön.

Koko opiskeluaikani on ollut mieleenpainuva kokemus ja olen saanut siitä paljon enemmän irti kuin alkuperin pystyin kuvittelemaan. Olen ollut tyytyväinen saamaani koulutukseen ja osaamiseen. Kiitokset tästä tasapuolisesti koko yliopiston henkilökunnalle. Erityisesti olen ollut tyytyväinen myös kaikkeen opiskelun ulkopuolella. Kiitokset lukuisille ystäville, jotka mahdollistitte viihtyisän, opettavaisen ja mielettömän opiskelijaelämäkokemuksen. Uskon, että niin opiskelijaelämä, kahvipöytäkeskustelut kuin energiatekniikan asiantuntijakonferenssitkin ovat tulevaisuuteni kannalta yhtä tärkeitä kuin nyt saavuttamani tutkinto.

Lappeenrannassa 8.10.2016

Ville-Matti Rissanen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLIT JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	8
2 PÄÄSTÖRAJAT	11
3 SAVUKAASUPESURI	14
3.1 Toimintaperiaate	17
3.2 Päästöjen hallinta	22
3.3 Lämmöntalteenotto	26
4 LÄMPÖPUMPPU SAVUKAASUPESURISSA	32
5 PALAMISILMANKOSTUTIN SAVUKAASUPESURISSA	35
6 PESURIN LAUHTEENKÄSITTELY	38
6.1 Hiekkasuodatin	40
6.2 Lamelliselkeytin	42
6.3 Ioninvaihto	43
6.4 Kalvosuodatus	46
6.4.1 Mikro-, ultra- ja nanosuodatus	49
6.4.2 Käänteisosmoosilaite	50
6.4.3 Kalvosuodatintyypit	53
6.5 Kemikaalit lauhteenkäsittelyssä	56
7 LAUHTEEN HYÖDYNTÄMINEN	58
7.1 Raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmittäminen	60
7.2 Palamisilman esilämmitys	66
7.3 Lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmä	69
7.4 Lämmöntalteenoton kannattavuus	70
7.5 Herkkyysanalyysi	74
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	77
9 YHTEENVETO	80
LÄHTEET	82

LIITTEET

Liite 1. Suunnitellun lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitus ja laskenta.

SYMBOLIT JA LYHENTEET

P Teho [MW]

Alaindeksit

pa Polttoaine

Yhdisteet ja alkuaineet

Al Alumiini

$Al_2(SO_4)_3$ Alumiinisulfaatti

Ca Kalsium

$Ca(HCO_3)_2$ Kalsiumbikarbonaatti

$Ca(OH)_2$ Kalkki

$CaSO_4$ Kalsiumsulfaatti

Cl Kloori

CO_3^{2-} Karbonaatti-ioni

Fe Rauta

$FeCl_3$ Ferrikloridi

H^+ Vetyioni

HCl Vetykloridi, suolahappo

HCO_3^- Bikarbonaatti-ioni

HSO_3^- Sulfonihappoioni

Mg Magnesium

$Mg(HCO_3)_2$ Magnesiumbikarbonaatti

$MgSO_4$ Magnesiumsulfaatti

Mn Mangaani

Na Natrium

$NaAlO_2$ Natriumaluminaatti

$NaHCO_3$ Natriumbikarbonaatti

NaOH Natriumhydroksidi, lipeä

Na_2SO_4 Natriumsulfaatti

NH_3 Ammoniakki

NO _x	Typpioksidi
O ₂	Happi
OH ⁻	Hydroksidi
R	Ioninvaihtoharts
SiO ₂	Piidioksidi, kvartsi
SO ₂	Rikkidioksidi
SO ₄ ²⁻	Sulfaatti-ioni

Lyhenteet

BAT	Best Available Technology
BOD	Biochemical Oxygen Demand, biologinen hapenkulutus
BREF	BAT Reference Document
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
COP	Coefficient of Performance, tehokerroin
IE-direktiivi	Industrial Emissions -direktiivi
IV	Ilmanvaihto
JUP	Jatkuva ulospuhallus
KL	Kaukolämpö
KPA	Kiinteä (bio)polttoaine
MF	Microfiltration, mikrosuodatus
NF	Nanofiltration, nanosuodatus
NTU	Number of Transfer Units, lämmönvaihtimen laskentamenetelmä
RO	Reverse Osmosis, käänteisosmoosi
TN	Total Nitrogen, kokonaistyyppi
TOC	Total Organic Carbon, orgaaninen kokonaishiili
TSS	Total Suspended Solids, kokonaiskiintoaines
UF	Ultrafiltration, ultrasuodatus

1 JOHDANTO

Energia-alalla ja teollisuudessa on jo pitkään vallinnut trendi, jossa prosesseita ja energiantuotannosta pyritään saamaan mahdollisimman suuri hyöty. Tämä näkyy muun muassa panostuksissa energiatehokkuuteen ja laiteinvestointeihin, jotka nostavat kokonaishyötysuhdetta. Laiteinvestoinneilla ja energiatehokkuuteen panostamisella vastataan myös aika ajoin tiukentuvien ympäristönsuojelumääräyksien tuomiin vaatimuksiin tarkemmasta ja tehokkaammasta päästöjenhallinnasta. Laiteinvestoinnit ja panostaminen pelkästään päästöjenhallintaan kuitenkin kasvattaa energian tuotantokustannuksia, mikä vähentää omalta osaltaan perinteisen energiantuotannon kannattavuutta. Tämä näkyy myös usein kuluttajalle energian hinnannousuna, mikä yhdessä esimerkiksi aurinkopaneelien ja lämpöpumppujen hintojen laskemisen kanssa, on tuonut energian omatuotannon kannattavammaksi ja houkuttelevammaksi kuluttajan kannalta. Nämä seikat ovatkin tehneet erilaisista lämmöntalteenottoratkaisuista erittäin kannattavia perinteisessä, keskitetyssä energiantuotannossa. Varsinkin biomassaa polttavien energiantuotantolaitosten keskuudessa lämmöntalteenotolla varustetut savukaasupesurit ovat kasvattaneet jatkuvasti suosiotaan. Savukaasupesuri tuo laitokselle tehokkaan päästöjenhallinnan lisäksi mahdollisuuden merkittävään energiatehokkuuden parantamiseen lämmöntalteenoton muodossa. Aikaisemmin pesurit on nähty pelkästään päästöjenhallintakeinona, mutta nykyään ne nähdään enemmän lämmöntalteenottolaitteina, jotka samalla huolehtivat voimalaitoksen savukaasupäästöjen vähentämisestä.

Savukaasupesuri mahdollistaa lähes kaiken savukaasuihin sitoutuneen energian hyödyntämisen sähkön- ja lämmöntuotantoon. Pesurin tehokkuus perustuu savukaasuihin sitoutuneen vesihöyryn lauhduttamiseen, jonka energia voidaan siirtää esimerkiksi kaukolämmön paluuveteen. Tämä nostaa merkittävästi voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta. Vaikkakin savukaasupesurin avulla voimalaitoksen energiatehokkuus paranee merkittävästi, on prosessia mahdollisuus hyödyntää vieläkin enemmän. Savukaasupesurissa muodostuu paljon matalan lämpötilatason likaista lauhdevettä. Tällä hetkellä useissa savukaasupesureita käyttävissä laitoksissa tätä energiaa ei hyödynnetä, sillä likaisen lauhteen lämpötilataso ei riitä perinteiseen kaukolämmön- ja sähköntuotantoon. Voimalaitoksilla on kuitenkin monia muita poten-

tiaalisia kohteita, joissa tämä hukkalämpö olisi mahdollista hyödyntää. Hyödyntämällä voimalaitoksella tuotettua energia mahdollisimman tehokkaasti, on mahdollista parantaa entisestään laitoksen energiataloutta sekä vähentää ympäristökuormaa.

Tässä diplomityössä on tarkoitus selvittää savukaasupesurista jäävän lauhteen hyötykäyttöä voimalaitosprosesseissa. Diplomityö on tehty Elenia Lämpö Oy:n toimeksiannosta Hämeenlinnassa toimivalle Vanajan voimalaitokselle. Diplomityössä tarkastellaan mahdollisuuksia hyödyntää Vanajan voimalaitoksella olevan savukaasupesurin savukaasulauhdetta voimalaitosprosesseissa lisäten energiatehokkuutta ja vähentäen ympäristökuormaa. Työssä keskitytään erityisesti lämmöntalteenottoon savukaasulauhteesta ja selvitetään, miten kyseinen lämpö voimalaitoksella voidaan hyödyntää ja onko se taloudellisesti kannattavaa. Työssä myös sivutaan lauhteenkäsittelyä ja -puhdistusta, sillä se on yksi tärkeimmistä tekijöistä lauhteen hyötykäytön kannalta. Tavoitteena on, että tämän diplomityön avulla voimalaitokselta löydettäisiin kohteet, joissa savukaasupesurin lauhteen lämpöä on mahdollista hyödyntää. Lisäksi selvitetään löydettyjen kohteiden potentiaali, mahdolliset ongelmat sekä rajoitteet lämmön hyödyntämiselle. Tarkoituksena on kehittää lämmöntalteenottojärjestelmä, joka on sekä mahdollisimman tehokas, että investointina taloudellisesti kannattava. Vastavanlaista selvitystä ei ole tehty aiemmin, eikä ainakaan julkisesti ole saatavilla tietoa kyseisten lämmöntalteenottojärjestelmien toimivuudesta ja kannattavuudesta.

Työn pohjana käytetään voimalaitokselle aiemmin tehtyjä suunnitelmia lauhteenkäsittelystä ja selvityksiä lämpöä käyttävistä kohteista. Lämmöntalteenotossa pyritään ensin etsimään potentiaalisimman kohteet ja tekemään näille kannattavuusarviointi. Pois tästä tarkastelusta jätetään lähtökohtaisesti kannattamattomat ja lämmöntarpeeltaan minimaaliset kohteet. Tämän diplomityön ulkopuolelle jätetään kokonaan lauhteen hyötykäyttö muun kuin lämmöntalteenoton näkökulmasta. Kannattavuuslaskelmissa myös huomioidaan ainoastaan lämmöntalteenotosta syntyvät kustannukset ja investointitarpeet, eikä esimerkiksi mahdollisia lauhteenkäsittelylaitteita oteta mukaan tarkasteluun.

Diplomityön kirjallisuusosiossa käsitellään savukaasupesureiden toimintaa sekä pesurien lauhteenkäsittelyä. Kirjallisuusosion on tarkoitus toimia taustoittavana tekijänä, jonka avulla

pesurin sekä sen lauhteen lämmöntalteenottoa on helpompi ymmärtää. Kirjallisuudessa savukaasupesureita käsitellään tyypillisesti vain niiden päästöjenhallintaominaisuuksien kautta ja ne nähdään lähinnä hiukkaspäästöjen vähentämiseen tähtäävinä laitteina. Tämän diplomityön teoriaosuuden yhtenä tarkoituksena onkin tuoda esille savukaasupesureiden lämmöntalteenottokykyä ja –ominaisuuksia, sekä millaisia toimintaperiaatteita pesureilla on lämmöntalteenoton suhteen. Savukaasulauhteenkäsittelyä tarkastellaan osana lauhteen hyötykäyttöä ja tämän osion tarkoituksena on näyttää, miten lauhteenkäsittelyssä päästään erilaisille lauhteen puhtauden vaatimustasoille.

Laskentaosiossa tärkeimpiä tavoitteita ovat alustavan mitoituksen tekeminen lämmöntalteenottojärjestelmälle sekä investoinnin kannattavuuden arviointi. Mitoituksen tarkoituksena on havainnollistaa eri lämmön hyötykäyttökohteiden potentiaalia sekä esitellä yksi vaihtoehto lämmöntalteenottojärjestelmän toteutuksesta. Kannattavuutta arvioidaan järjestelmän synnyttämien kustannusten ja säästöjen perusteella laskemalla investoinnin takaisinmaksuaika sekä tekemällä herkkyyshanalyysi. Laskennan tarkoituksena on toimia tukena ja pohjana päätöksille siitä, onko kannattavaa investoida savukaasupesurin lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmään ja kuinka suuri lämmöntalteenottopotentiaali kyseillä järjestelmällä olisi mahdollista saavuttaa.

2 PÄÄSTÖRAJAT

Vuoden 2016 alusta alkaen kaikkiin Suomen suuriin polttolaitoksiin, joitain poikkeuksia lukuun ottamatta, on sovellettu valtioneuvoston asetusta suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta (936/2014), joka määrittää yksittäisten laitosten savukaasupäästörajat. Asetus määrittää muun muassa raja-arvot rikki-, typpi- ja hiukkaspäästöille. Asetus pohjautuu Euroopan unionin IE-direktiiviin (Industrial Emissions Directive eli teollisuuden päästöt -direktiivi). (VNa 936/2014.) Direktiivin tarkoituksena on edistää merkittävimpien teollisuusalojen (mukaan lukien energiateollisuus) ympäristövaikutusten vähentämistä ja parantaa kyseisten alojen ennakoalvontaa ympäristöasioissa. Direktiivin tarkoituksena on myös yhtenäistää EU-maiden ympäristölupamääräyksiä, jotka olivat ennen direktiivin voimaantuloa hyvin erilaiset jäsenvaltiosta riippuen. (Puheloinen et al. 2011, 18.)

Alla olevassa taulukoissa 1–3 esitetään uusien polttolaitoskohtaiset päästörajat riippuen laitoksen koosta ja polttoaineesta. Olemassa olevien laitosten päästörajat poikkeavat hieman alla esitetyistä ja ovat tyypillisesti suurimmassa kokoluokassa (>300 MW) suuremmat kuin uusien laitosten päästörajat. Seospolttoaineita käyttävissä laitoksissa päästörajat lasketaan polttoaineen tuottaman tehon mukaan painotettuna keskiarvona (VNa 936/2014).

Taulukko 1: Polttolaitosten päästöraja-arvot rikkidioksidille [$\text{mgSO}_2/\text{m}^3\text{n}$], 6 % O_2 (kiinteät) ja 3 % O_2 (nestemäiset). (VNa 936/2014.)

Polttoaineteho (P) [MW]	Biomassa	Turve	Kivihiili ja muut kiinteät polttoaineet	Nestemäiset polttoaineet
$50 \leq P \leq 100$	200	300	400	350
$100 < P \leq 300$	200	300/250 ^a	200	200
$P > 300$	150	150/200 ^a	150/200 ^b	150

^a Päästöraja-arvo leijupoltolle

^b Päästöraja-arvo kiertoleijupoltolle ja paineistetulle leijupoltolle

Taulukko 2: Polttolaitosten päästöraja-arvot typpidioksidille [$\text{mg}_{\text{NO}_2}/\text{m}^3\text{n}$], 6 % O_2 (kiinteät) ja 3 % O_2 (nestemäiset). (VNa 936/2014.)

Polttoaineteho (P) [MW]	Biomassa ja turve	Kivihiili ja muut kiinteät polttoaineet	Nestemäiset polttoaineet
$50 \leq P \leq 100$	250	300	300
$100 < P \leq 300$	200	200	150
$P > 300$	150	150	100

Taulukko 3: Polttolaitosten päästöraja-arvot hiukkaspäästöille [$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$], 6 % O_2 (kiinteät) ja 3 % O_2 (nestemäiset). (VNa 936/2014.)

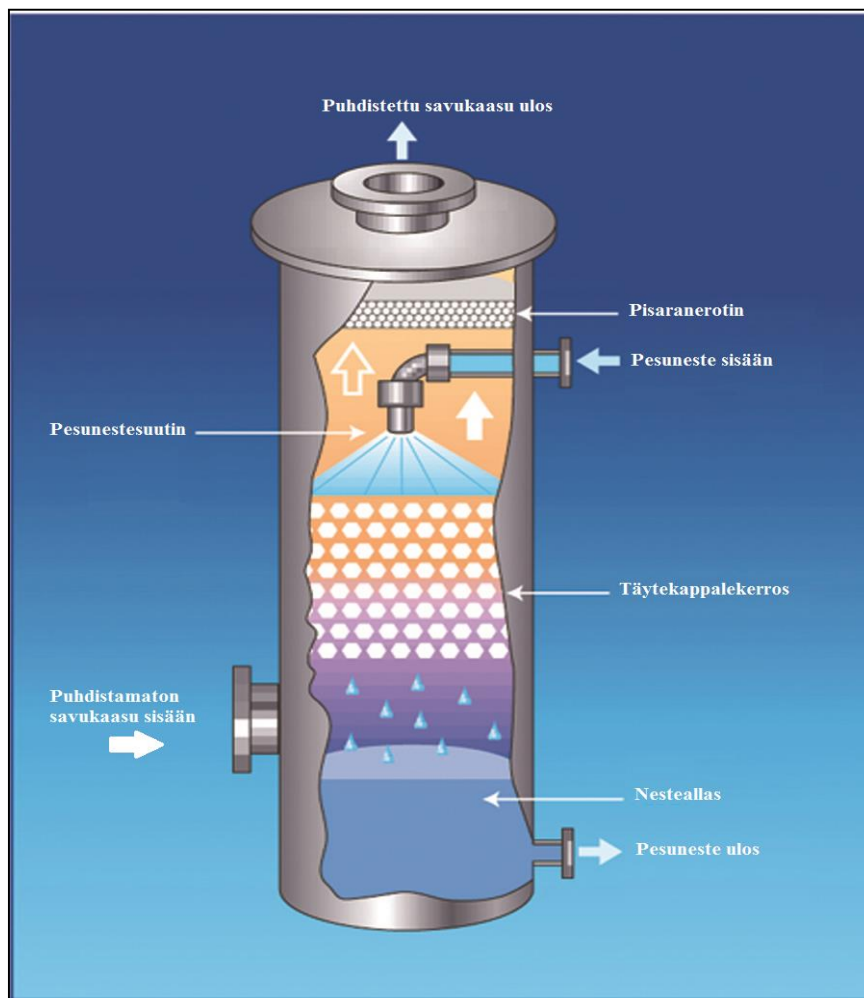
Polttoaineteho (P) [MW]	Biomassa ja turve	Muut kiinteät ja nestemäiset polttoaineet
$50 \leq P \leq 300$	20	20
$P > 300$	20	10

Tiukentuvien päästörajojen lisäksi IE-direktiivi korostaa entisestään BAT-vertailuasiakirjojen (BAT reference document eli BREF) merkitystä. BAT tarkoittaa parasta käyttökelpoista tekniikkaa ja BAT-vertailuasiakirjoilla pyritään levittämään tietoa tehokkaimmista teknistä ratkaisuista ja parhaista soveltuvista menetelmistä eri teollisuus- ja energiantuotantoprosesseissa. BAT-vertailuasiakirjoissa muun muassa esitetään päästöjen vaihteluvälit, jotka tiettyillä tekniikoilla on mahdollista saavuttaa. IE-direktiivin myötä BAT-päätelmien antamien päästötasojen sitovuutta on vahvistettu. BAT-vertailuasiakirjat eivät ole sitovia normeja, mutta ne ohjaavat vahvasti esimerkiksi ympäristölupaharkintaa. Tällöin esimerkiksi polttolaitos voi saada BAT-päätelmien perusteella tiukemmat päästöraja-arvot kuin yllä olevat taulukot 1–3 määrittävät. Tapauskohtaisesti BAT-päätelmistä voidaan poiketa, mutta tässä suhteessa uusi IE-direktiivi on tiukentunut edellisestä, mikä vähentää tapauskohtaisen harkinnan mahdollisuutta lupaprosessissa. (Puheloinen et al. 2011, 33.)

Tiukentuneet päästörajat ja BREF-dokumenttien ohjaavampi asema pakottavat uusia poltto-
laitoksia suunnittelevat toimijat panostamaan entistä enemmän kaasumaisten päästöjen hal-
lintaan. Myös olemassa olevat laitokset joutuvat investoimaan tehokkaampiin päästöjen hal-
lintamenetelmiin. Useammat ja tehokkaammat päästöjen hallintalaitteet lisäävät myös lai-
tosten investointi- ja käyttökustannuksia. Tämän vuoksi päästöjen hallintalaitteita valittaessa
kiinnitetään merkittävässä määrin enemmän huomiota myös niiden lämmöntalteenottomah-
dollisuuksiin ja muihin energiatehokkuutta parantaviin tekijöihin.

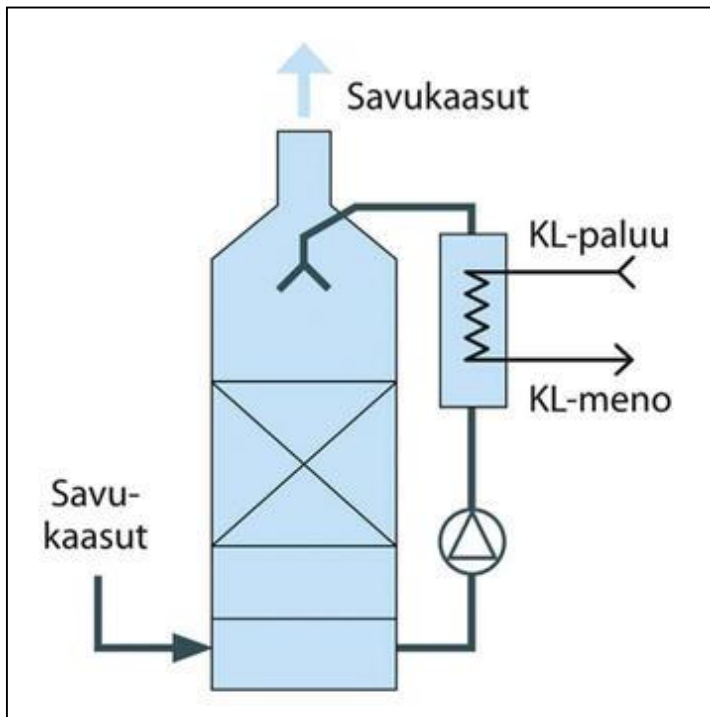
3 SAVUKAASUPESURI

Savukaasupesuri on voimalaitoksen päästöjenhallintalaitte, jossa savukaasut ovat suorassa kontaktissa veden tai muun pesunesteen kanssa päästöjen vähentämiseksi. Savukaasupesurit on alun perin suunniteltu hiukkaspäästöjen vähentämistä varten, mutta nykyään vähintään yhtä tärkeänä ominaisuutena pidetään lämmöntalteenottoa savukaasujen vesihöyrystä. Savukaasupesureita on muutamaa eri tyyppiä: Perinteinen märkäpesuri on pesutorni, jossa savukaasut virtaavat alhaalta ylöspäin ja niitä vastavirtaan suihkutetaan pesunestettä. Märkäpesurissa savukaasujen ja pesunesteen kontaktipinta-alaa voidaan kasvattaa täytekappalekerroksella. Märkäpesurissa likainen pesuneste kertyy tornin pohjalle, josta se poistetaan. Märkäpesurissa ei ole lämmöntalteenottoa, vaan sen ainoa tarkoitus on päästöjenhallinta. Alla olevassa kuvassa 1 esitetään märkäpesurin toimintaperiaate.



Kuva 1: Märkäpesurin periaatekuva (CR Clean Air 2016).

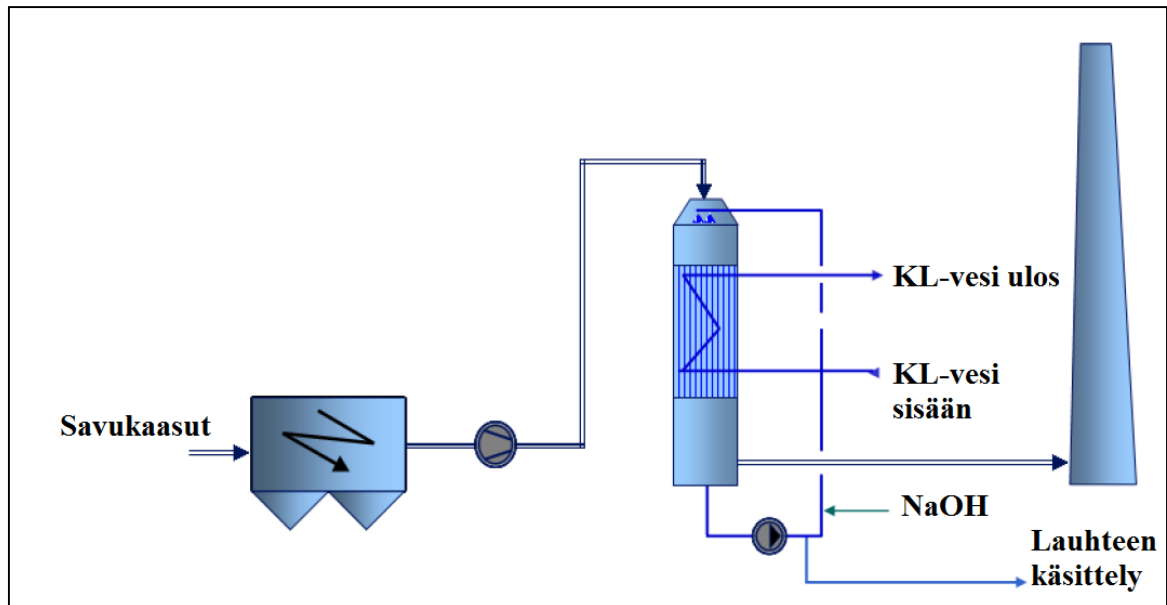
Lämmöntalteenotolla varustelluissa pesureissa tavoitteena on saada savukaasujen lämpötila niin alhaiseksi, että niissä oleva vesihöyry lauhtuu. Tällöin saadaan talteen vesihöyryn latenttilämpö, jonka energiasisältö on huomattavasti suurempi kuin pelkästä vesihöyrystä talteen saatava lämpö. Yksivaiheisessa savukaasupesurissa savukaasuista talteen saatu lauhde kierrätetään lämmönvaihtimelle, jonka toisiopiirissä kiertää lämmitettävä neste, esimerkiksi kaukolämmön paluuvesi. Lämmönvaihtimelta lauhde kierrätetään takaisin pesuriin. Alla olevassa kuvassa 2 esitetään lämmöntalteenotolla varustettu savukaasupesuri.



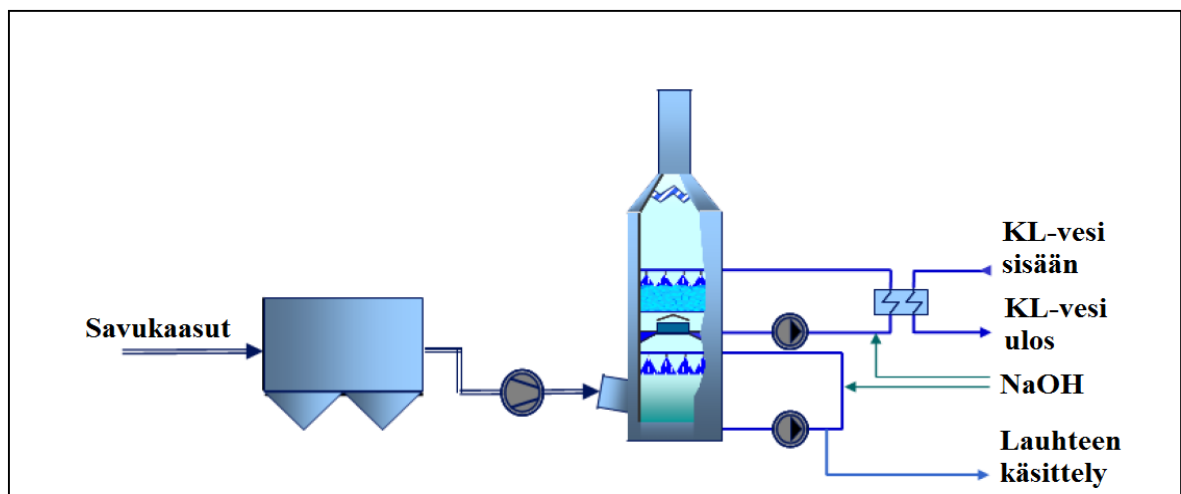
Kuva 2: Yksivaiheisen lämmöntalteenotolla varustetun savukaasupesurin yksinkertaistettu periaatekuva (Nummila & Järvenreuna 2015, 2).

Lämmöntalteenottavia pesureita on kahta tyyppiä: putkipesuri (kuva 3) ja savukaasupesuri (kuva 4). Putkipesurissa savukaasut kulkevat putkien läpi ja pesurin vaippapuolella kiertää lämmitettävä neste. Tällöin lämpö saadaan siirrettyä suoraan savukaasuista lämmitettävään nesteeseen ilman välivaiheita. Savukaasupesurissa pesuneste ja savukaasuista lauhtunut vesihöyry kierrätetään levylämmönvaihtimelle, josta lämpö siirtyy esimerkiksi kaukolämpövedeen. Molemmat pesurityypit tarvitsevat lauhteen poiston ja -käsittelyn pesurin yhteyteen.

Savukaasupesuri sijoitetaan viimeiseksi laitteeksi savukaasukanavassa ennen piippua. Pesuria ennen on tyypillisesti jokin kuivamenetelmä hiukkaspäästöjen vähentämiseen (sähkösuodatin tai letkusuodatin) sekä savukaasupuhallin. Pelkällä savukaasupesurilla ei aina päästä tarpeeksi hyvään erotuskykyyn kaikissa pienhiukkaskokoluokissa (Caligo 2015, 4).



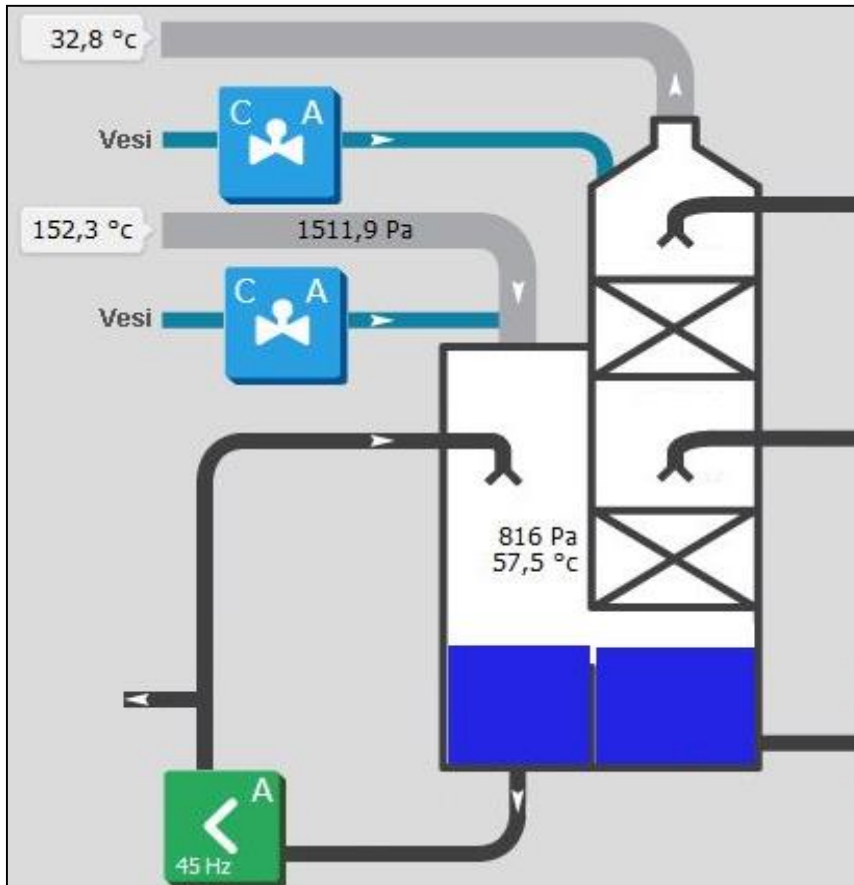
Kuva 3: Putkipesurissa savukaasu kulkee putkissa ja kaukolämpövesi vaippapuolella. Putkipesurissa on vain yksi pesuvaihe ja yksi lämmönsiirtopinta. (Valmet 2015, 11.)



Kuva 4: Kaksivaiheinen savukaasupesuri. Lämmöntalteenotto tapahtuu vain ylemmästä kierrosta, jossa tapahtuu savukaasujen lauhtuminen. Pesurin lisäksi ei aina tarvita erillistä piippua, vaan piippuna voi toimia pesurin yläosa. (Valmet 2015, 11.)

3.1 Toimintaperiaate

Savukaasut tuodaan pesurille tyypillisesti 150–200 °C lämpötilassa (Jalovaara et al. 2003, 63). Savukaasut käsitellään perinteisessä pesurissa kahdessa vaiheessa. Kaksivaiheista pesuria käytetään, sillä yksinkertaisen kytkennän haittapuolena on, että lauhteen mukana lämmönvaihtimelle pääsee paljon savukaasuista erotettua likaa, joka voi kertyä lämmönvaihtimen pinnoille. Lämmönvaihtimeen kertyvä lika heikentää vaihtimen lämmönsiirtokykyä sekä tukkimalla estää lauhteen virtaamisen sen läpi. Tästä syystä tyypillisesti savukaasupesurit sisältävät kaksi vaihetta: pesuvaiheen ja lämmöntalteenottovaiheen. Ensimmäisessä eli pesuvaiheessa, savukaasuista poistetaan suurin osa hiukkasista. Samalla savukaasut jäähtyvät noin 60–70 °C lämpötilaan. Tämä on niin sanottu märkälämpötila, joka on lähellä savukaasujen kastepistettä. (Nummila & Järvenreuna 2015, 2.) Pesuvaiheessa ei ole täytekallekerrosta, vaan pesuneste suihkutetaan suoraan savukaasuihin joko myötä- tai vastavirtaan, joista vastavirta on yleisempi toteutustapa. Pesuvaiheessa savukaasuihin suihkutettavassa pesunesteessä on veden lisäksi jotain alkalista kemikaalia, kuten lipeää (NaOH) happamien yhdisteiden erottamiseksi. Pesunestettä kuluu noin 3–4 litraa savukaasukuutiota kohti. (Jalovaara et al. 2003, 63.) Savukaasuista erotetut hiukkaset ja haitalliset yhdisteet valuvat pesunesteen mukana pesurin pohjalla olevaan altaaseen. Altaasta osa likaisesta nesteestä johdetaan pois pesurista lauhteen käsittelyyn ja osa hyödynnetään uudelleen pesukierrossa. Kuvassa 5 on esimerkki savukaasupesurin pesuvaiheesta.

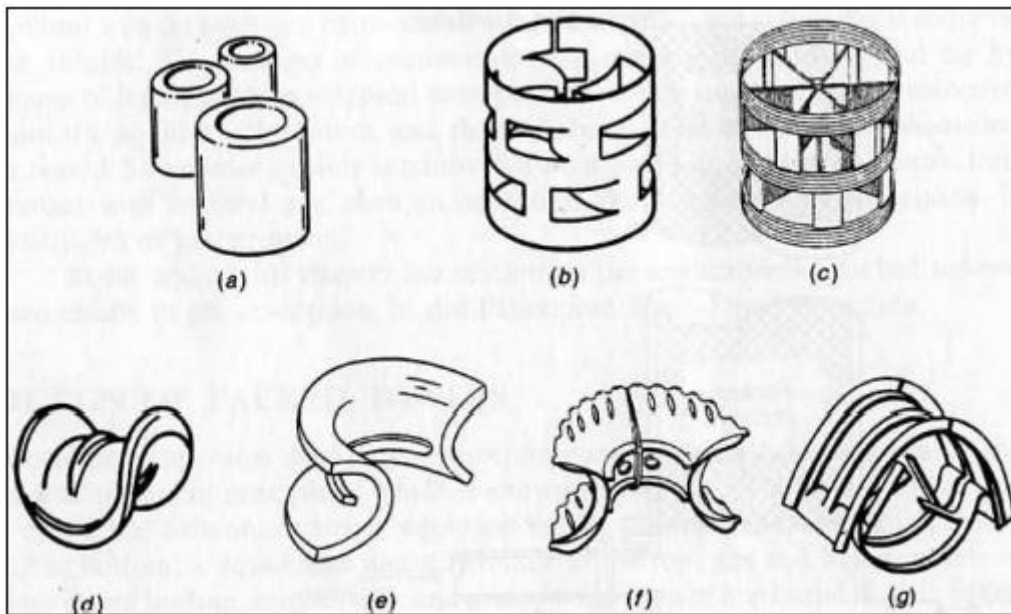


Kuva 5: Esimerkki 1 MW savukaasupesurin pesuvaiheesta KPA-laitoksessa (Elenia Lämpö 2015).

Savukaasut tulevat pesuriin hieman yli 150 °C lämpötilassa ja 15 mbar paineessa. Pesuvaihe on kuvassa vasemmalla puolella ja oikealla on kaksi lämmöntalteenottovaihetta. Jo pesuvaiheesta aiheutuu merkittävä painehäviö ja savukaasujen lämpötila laskee kastepisteeseen. Altaan pohjalle kertyy suurin osa erotelluista pienhiukkasista ja tämä likainen pesuneste kierretään uudelleen pesuvaiheeseen. Altaan yläosasta ns. puhtaampi pesuneste valuu lämmöntalteenoton alla olevaan altaaseen, josta se käytetään lämmöntalteenottovaiheen kierto-
nesteenä.

Pesuvaiheesta savukaasut johdetaan lämmöntalteenottovaiheeseen, jossa pesuvaiheen tapaan savukaasuihin suihkutetaan vettä tai alkaalista pesunestettä. Pesuvaiheesta poiketen lämmöntalteenottovaiheen pääasiallinen tarkoitus ei ole savukaasujen peseminen, vaan savukaasujen sisältämän vesihöyryn lauhduttaminen. Lauhdutuspinntana toimii tyypillisesti täytekappalekolonni, joka koostuu erimallisista kappaleista. Täytekappalekerroksessa savukaasut etenevät vastavirtaan valuvaa pesunestettä kohti ja samalla savukaasujen vesihöyry

lauhtuu. Pesurissa lauhdetta syntyy noin $1 \text{ m}^3/\text{h}$ jokaista pesurin tuottamaan lämpömegawattia kohden (Arola & Toivo 2015). Täytekappalekolonnin tehtävänä on kasvattaa savukaasujen ja pesunesteen kontaktipinta-alaa. Pinta-alan kasvattamisen lisäksi täytekappaleet lisäävät myös savukaasujen painehäviötä. Täytekappalekerroksen suunnittelu onkin tasapainoilla kontaktipinta-alan ja painehäviön välillä. Kuvassa 6 on esimerkkejä erilaisista täytekappaleista. Niiden ominaisuuksia kuvaillaan myöhemmin taulukossa 4.



Kuva 6: Esimerkkejä yleisimmistä täytekappaleista. (a) Raschig-renkas, (b) metallinen Pall-renkas, (c) muovinen Pall-renkas, (d) Berl-satula, (e) keraaminen Intalox-satula, (f) muovinen Super Intalox-satula ja (g) metallinen Intalox-satula. (McCabe, Smith & Harriot 1993.)

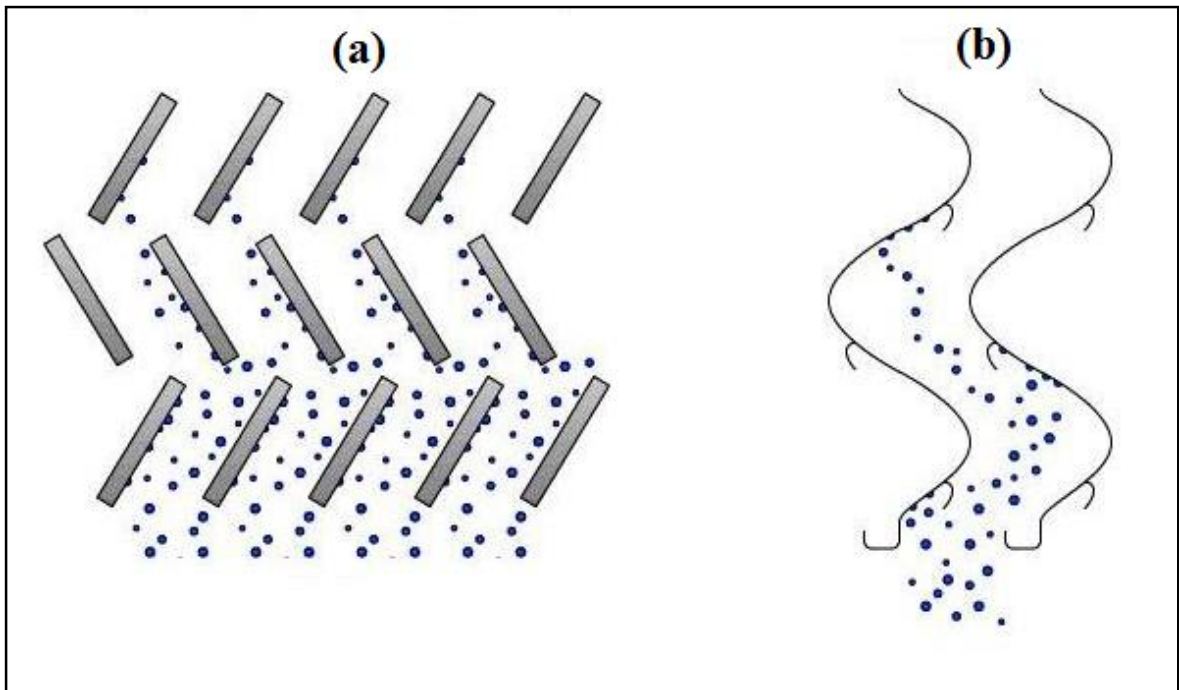
Täytekappaleet valmistetaan muovista tai keraamisesta materiaalista, joka ei reagoi savukaasun partikkeleiden kanssa. Täytekappaleissa suositaan epäsäännöllisiä muotoja, jolloin niistä muodostuu mahdollisimman huokoinen ja avonainen kerros.

Taulukko 4: Täytekappaleiden tyypillisiä ominaisuuksia (McCabe, Smith & Harriot 1993).

Täytekappale	Materiaali	Nimelliskoko [mm]	Irtotiheys [kg/m ³]	Ominaispinta-ala [m ² /m ³]	Huokoisuus	Painehäviötekijä
Raschig-rengas (a)	Keraaminen	12,5	880	367	0,64	580
		25	673	190	0,74	155
		37,5	689	121	0,73	95
		50	657	92	0,74	65
Pall-rengas	Metalli (b)	25	481	207	0,94	56
		37,5	384	128	0,95	40
		50	352	102	0,96	27
	Muovi (c)	25	88	207	0,90	55
		37,5	77	128	0,91	40
Berl-satula (d)	Keraaminen	12,5	865	466	0,62	240
		25	721	249	0,68	110
		37,5	641	151	0,71	65
Intalox-satula (e)	Keraaminen	12,5	737	623	0,71	200
		25	673	256	0,73	92
		37,5	625	194	0,76	52
		50	609	118	0,76	40
		75	577	92	0,79	22

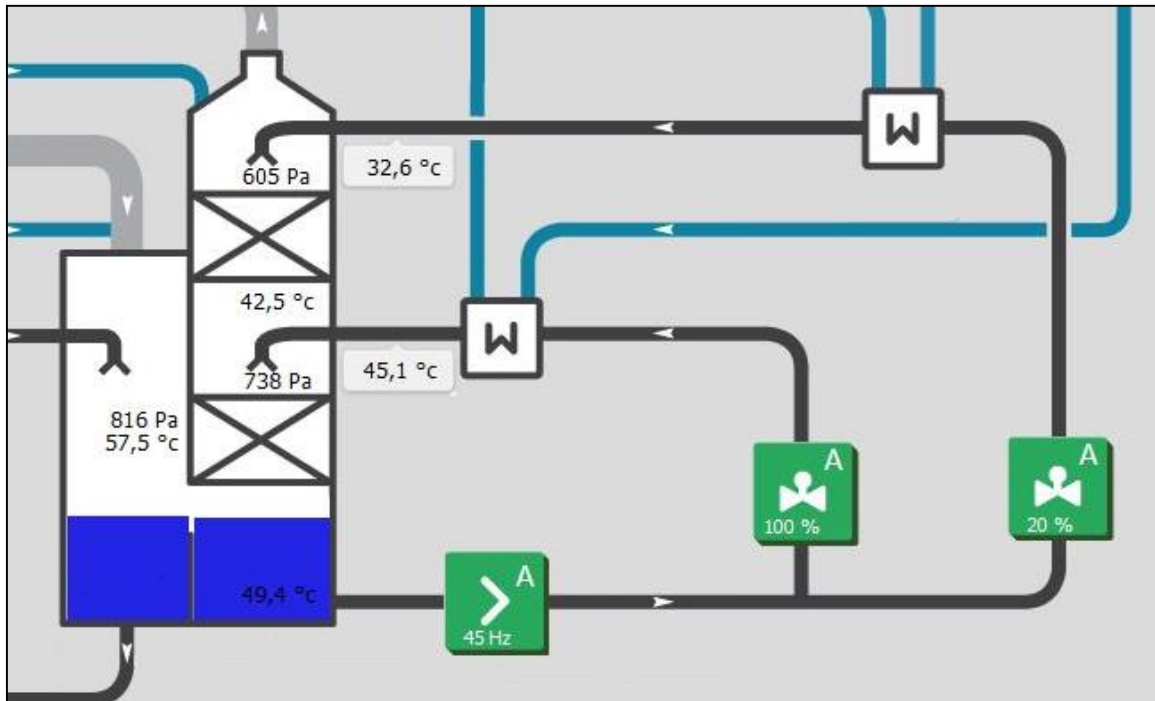
Kuten taulukosta voidaan huomata, Pall-renkaiden muoto antaa niille muita taulukon täytekappaleita suuremman huokoisuuden, minkä johdosta niiden käytöstä syntyy pienin painehäviö. Toisaalta niillä ei saavuteta yhtä suurta ominaispinta-alaa kuin muilla täytekappaleilla, joten yhtä suuren kontaktipinta-alan saavuttamiseksi Pall-renkaita tulee olla paksumpi kerros kuin muita täytekappaleita.

Ennen pesurista poistumista savukaasut kulkevat vielä pisaranerotin läpi. Pisaranerotin sijaitsee pesurin yläosassa ja se erottelee savukaasujen mukaan tempautuneet vesipisarot savukaasusta ja palauttaa ne pesuriin. Pisaranerotin toiminta perustuu savukaasuvirtauksen suunnanmuutoksiin (kuva 7), joka mahdollistaa pisaroiden erottaminen savukaasusta.



Kuva 7: Pisanerotimen toimintaperiaate. Kuvissa savukaasuvirtauksen suunta on alhaalta ylöspäin. (Viaches et al. 2016.)

Lämmöntalteenottovaihe laskee entisestään savukaasujen lämpötilaa ja savukaasupesurista poistuvien puhdistettujen savukaasujen lämpötila voi olla jopa 30–40 °C. Lämmöntalteenottovaiheessa kiertonesteinä toimii savukaasuista lauhdutettu vesi. Lauhde kerätään pesurin alaosasta ja kierrätetään lämmönvaihtimen kautta takaisin lämmöntalteenottovaiheeseen. Lämmönvaihtimella lauhteeseen sitoutunut lämpöenergia otetaan talteen. Lämmönvaihtimena toimii tyypillisesti levylämmönvaihdin, jonka toisella puolella kiertää kaukolämmön paluuvesi. Kuvassa 8 on esimerkki kahdessa vaiheessa toteutettavasta lämmöntalteenotosta.



Kuva 8: Esimerkki 1 MW savukaasupesurin lämmöntalteenottovaiheesta KPA-laitoksessa (Elenia Lämpö 2015).

Pesurin pohjalta kerättävä lauhde on 49,4 °C lämpötilassa. Erot pesunesteen lämpötiloissa lämmönvaihtimien jälkeen johtuu toisiopuolilla kiertävän kaukolämmön paluuvien lämpötiloista. Ylemmän lämmönvaihtimen kautta kiertävän kaukolämpöveden lämpötilaa on laskeutu lämpöpumpulla ennen lämmönvaihtimelle tuloa.

3.2 Päästöjen hallinta

Pesureita käytetään niin rikki- kuin pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen. Suomessa olevilla polttolaitoksilla pesureita on perinteisesti käytetty rikin poistoon, vaikkakin hiukkaspäästöjen vähentäminen pesureilla on yleistymässä. Pesurin erotustehokkuuteen vaikuttaa muun muassa pesunesteen pisarakoko sekä savukaasujen ja pisaroiden nopeusero. Pienemmät pisarat ja suuremmat nopeuserot parantavat erotuskykyä. (Ohlström et al. 2005, 26.) Varsinkin rikkidioksidin (SO₂) ja vetykloridin (HCl) erotuksessa pesurit ovat varsin tehokkaita. Pesurien kyky erottaa sekä happamia yhdisteitä, että pienhiukkasia samanaikaisesti on merkittävä etu vertailtaessa pienten laitosten hiukkastenerotuslaitteita (Jalovaara et al. 2003, 63). Jos

sekä happamien yhdisteiden, että pienhiukkasten osalta päästään tarpeeksi suureen erotustas- teeseen, ei laitokselle tarvita erillistä rikinpoistolaitteistoa.

Myös käytettävä polttoaine vaikuttaa pesurin erotustehokkuuteen, sillä eri polttoaineilla sa- vukaasujen koostumus on erilainen. Esimerkiksi puulla ja turpeella on hyvin erisuuruiset ja -tyyppiset rikki- ja pienhiukkaspäästöt. Alla olevassa taulukossa 5 esitellään tyyppillisten kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia.

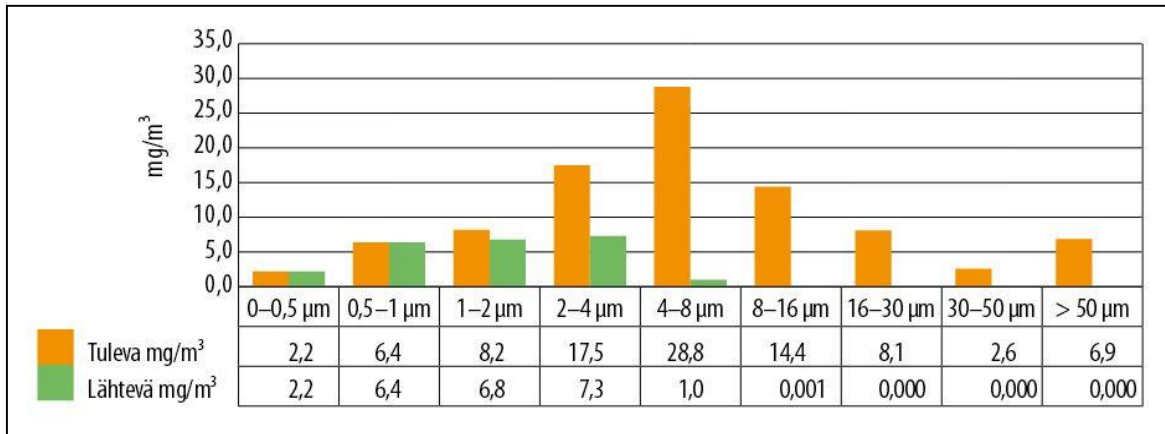
Taulukko 5: Kiinteiden polttoaineiden tyyppillisiä ominaisuuksia. Alkuainepitoisuudet on esitetty kuivan, tuh- kallisen polttoaineen mukaan. (Jalovaara et al. 2003, 27.)

Ominaisuus	Hake	Kuori	Puru	Jyrsinturve	Kivihili
Kosteus [%]	45–55	50–60	50–60	45–55	10
Tuhka [%] (Kuiva pa)	0,5–2	1–3	0,5–1	6	14
Haihtuvat [%] (Kuiva pa)	80–90	70–80	70–80	65–70	30
Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg] (Kuiva pa)	19–20	19–20	19–20	20–21	29
Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg] (Kostea pa)	7–10	6–9	6–9	8–10	26
Hiili [%]	52	55	50	54	72
Vety [%]	6	6	6	5,5	4,5
Typpi [%]	<0,5	<0,5	<0,5	1,7	1,0
Rikki [%]	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	<1,0
Happi [%]	40	37	43	33	8
Kloori [%]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1

Riippuen polttoaineen koostumuksesta, savukaasut koostuvat pääosin hiukkasista (tuhka), rikki- ja typpiyhdisteistä ja vesihöyrystä. Savukaasut voivat sisältää myös pieniä määriä joi- tain muita yhdisteitä, kuten esimerkiksi klooriyhdisteitä.

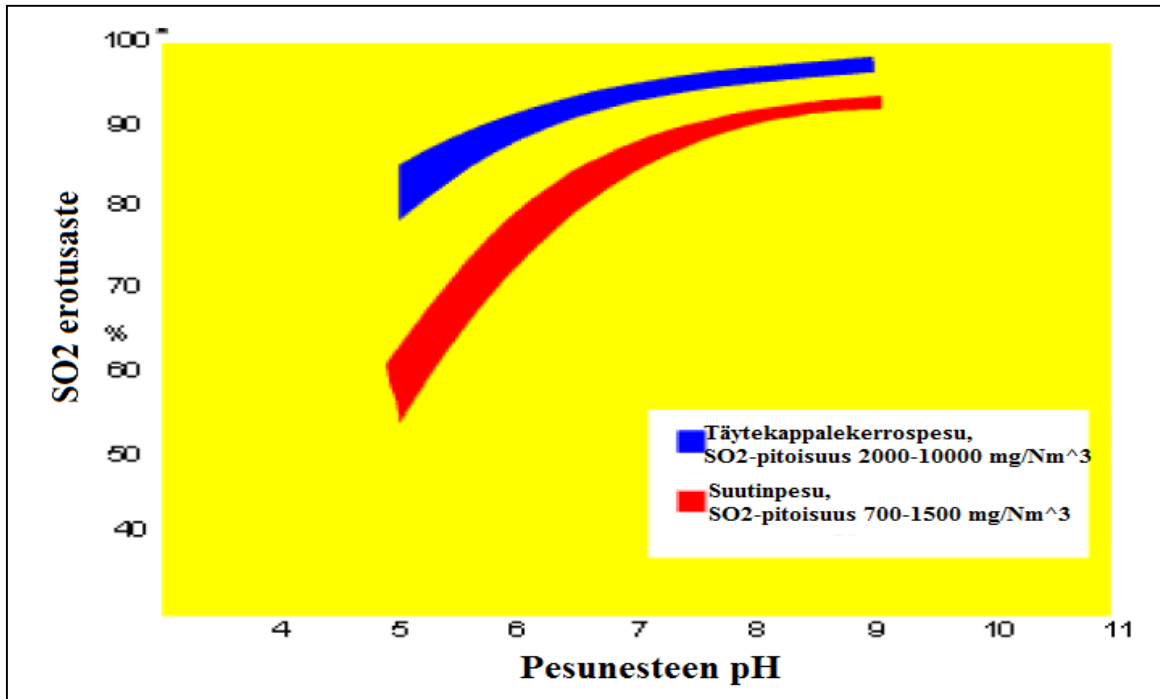
Turvetta poltettaessa pesurilla päästään rikkidioksidin osalta 80–98 % erotusasteeseen. HCl:n erotusaste on tyypillisesti 70–95 %. (Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012, 22.) Joissain tapauksissa SO₂- ja HCl-erotusasteet voivat olla lähes 100 % (Valmet 2015, 15). Puuperäisiä polttoaineita käytettäessä rikkipäästöjä syntyy jo lähtökohtaisesti vähän, sillä puun rikkipitoisuus on varsin vähäinen. Sen sijaan turve sisältää huomattavia määriä rikkiä. Turpeen aiheuttamia rikkipäästöjä pystytään hallitsemaan kuitenkin jo ennen pesuria varsin hyvin. Esimerkiksi puun ja turpeen seospoltto vähentää rikkipäästöjä, sillä puun emäksinen tuhka neutraloi rikkiyhdisteitä. (Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012, 7.)

Hiukkasten erottimena pesuri ei ole yhtä tehokas kuin sähkösuodatin tai kuitusuodatin. Sähkö- ja kuitusuodattimilla päästään tyypillisesti kaikissa hiukkaskokoluokissa yli 99 % erotusasteeseen (Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012, 6). Pesurin hiukkasten erotuskykyyn vaikuttaa merkittävästi hiukkasten koko. Niin sanottujen kertymähiukkasten (läpimitta 0,1–1,0 µm) erotusaste on vain 30 %, kun taas karkeiden hiukkasten (läpimitta > 2,5 µm) erotusaste on 80–98 %. (Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012, 6–7.) Hiukkasten laatuun ja määrään vaikuttaa merkittävästi polttotapa ja polttoaine. Leijupoltossa syntyy huomattavasti enemmän savukaasuihin jääviä pienhiukkasia kuin arinapoltossa, jossa suurin osa tuhkasta jää kattilaan. Turpeen suuren tuhkapitoisuuden vuoksi siitä aiheutuu enemmän hiukkaspäästöjä kuin esimerkiksi puun poltosta. Tosin suurin osa vapautuvista hiukkasista ovat läpimitaltaan yli 2,5 µm, jolloin niiden erottaminen on varsin tehokasta (Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012, 6). Hyvin valitun ja oikein mitoitetun esisuodatuksen kanssa saadaan myös lähes kaikki hiukkaspäästöt erotettua savukaasuista (Nummila & Järvenreuna 2015, 2). Hiukkasten esisuodatukseen voidaan laitoksesta riippuen käyttää esimerkiksi letku- tai sähkösuodatinta. Kuvassa 9 esitellään erään pienen laitoksen savukaasun hiukkaspitoisuus ennen ja jälkeen pesurin. Kuvasta on selkeästi huomattavissa partikkelikoon vaikutus pesurin erotustehokkuuteen.



Kuva 9: Esimerkki savukaasupesurin hiukkasten erottelukyvystä (Caligo 2015, 5).

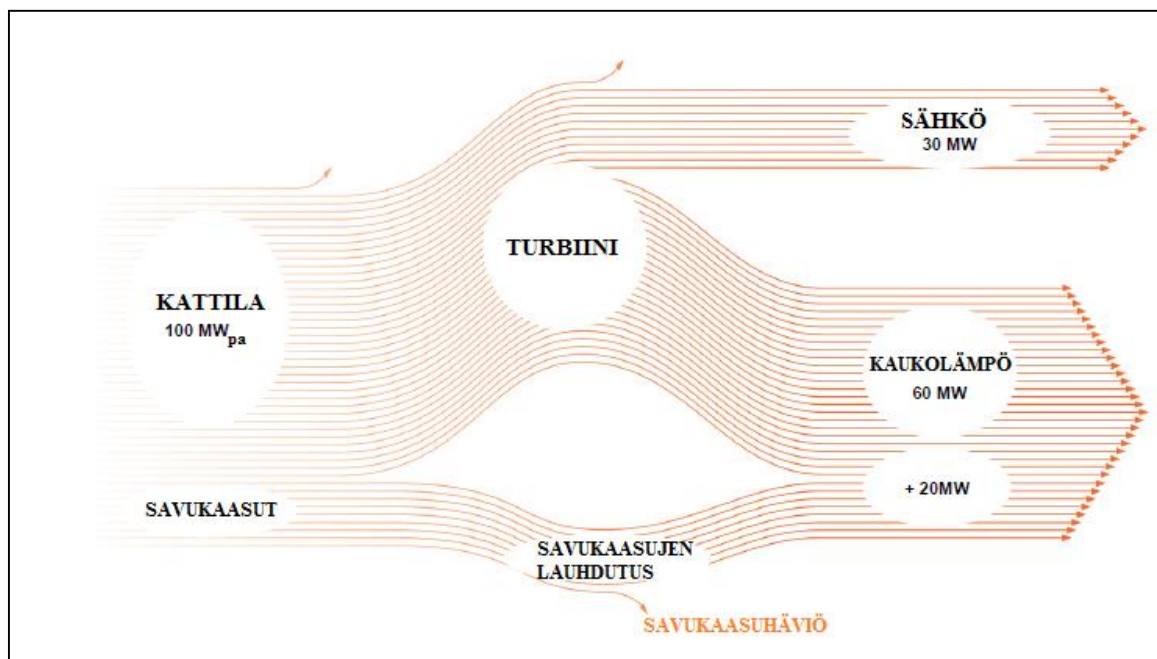
Vaikkakin savukaasupesuri on tehokkaimmillaan puhdistettaessa happamia yhdisteitä ja hiukkasia, kykenee se myös puhdistamaan emäksisiä yhdisteitä. Emäksiset haitalliset aineet, kuten ammoniakki (NH₃), voidaan saada pesurissa talteen säätämällä pesunesteen pH-arvo sopivalle tasolle. Tällä on kuitenkin vaikutusta happamien yhdisteiden erotustehokkuuteen. Pesunesteen pH tuleekin säätää sellaiselle tasolle, joka vastaa happamien ja emäksisten yhdisteiden erotustarvetta. Pesunesteen pH:n ollessa noin 6–7 saavutetaan hyvä erotusaste happamille yhdisteille, sekä saadaan vähennettyä myös esimerkiksi ammoniakin määrää (Valmet 2015, 15). Pesunesteen pH:n vaikutusta rikkiyhdisteiden erotuskykyyn esitellään kuvassa 10.



Kuva 10: Pesurin SO₂-erotuskyky pH:n funktiona. Myös pesutavalla on vaikutusta erotuskykyyn. (Valmet 2015, 15.)

3.3 Lämmöntalteenotto

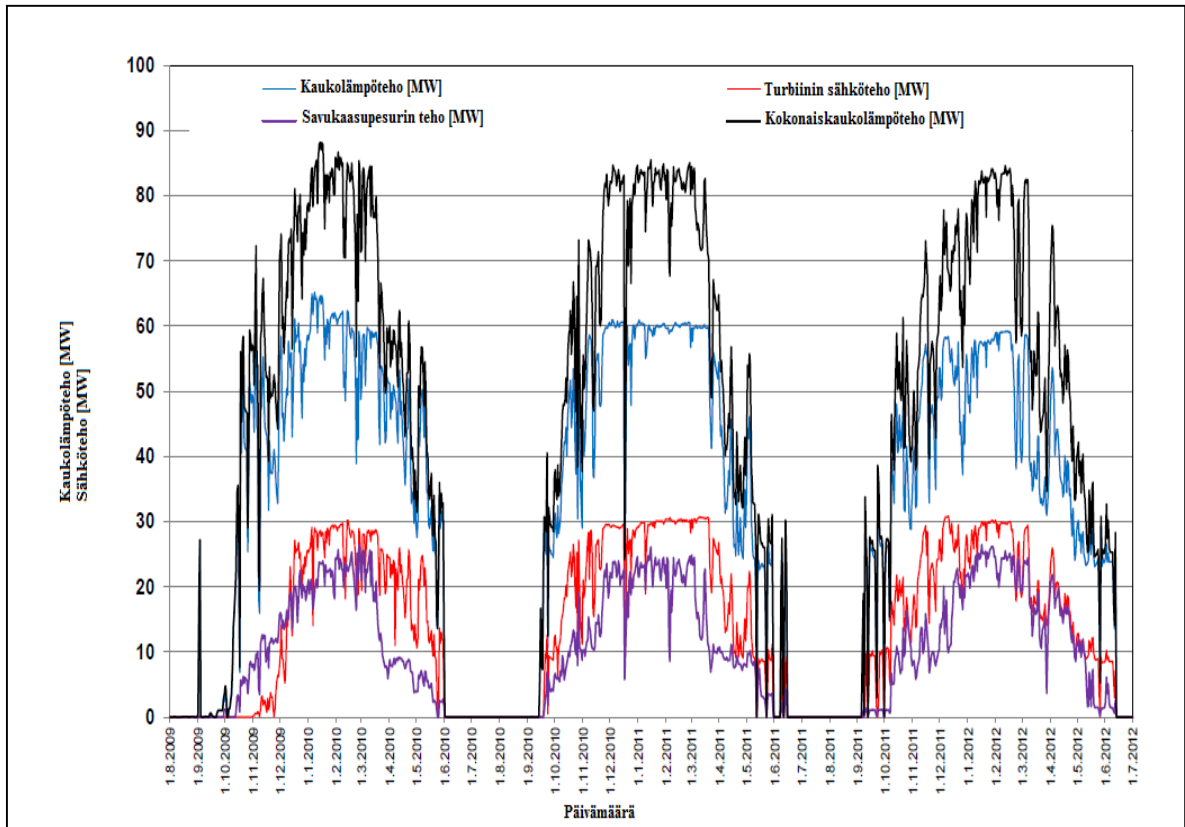
Pesurissa lämmöntalteenotto tapahtuu savukaasujen vesihöyrylauhteesta. Savukaasujen vesihöyrypitoisuus voi olla hyvinkin korkea, sillä esimerkiksi biomassossa kosteusprosentti voi olla 30–60 m-%. Perinteisessä voimalaitoksen savukaasujen käsittelyssä kaikki vesihöyryn sisältämä energia menetetään savukaasujen mukana. Savukaasupesurissa tämä energia saadaan talteen lauhduttamalla savukaasujen sisältämä vesihöyry (kuva 11). Pesurin avulla talteen saatu energia voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämpökapasiteetin nostamiseen tai turbiinilta tulevan lauhteen lämmitykseen. (Valmet 2015, 8.)



Kuva 11: Esimerkki biomassaa käyttävän CHP-laitoksen energiavirroista (Valmet 2015, 9).

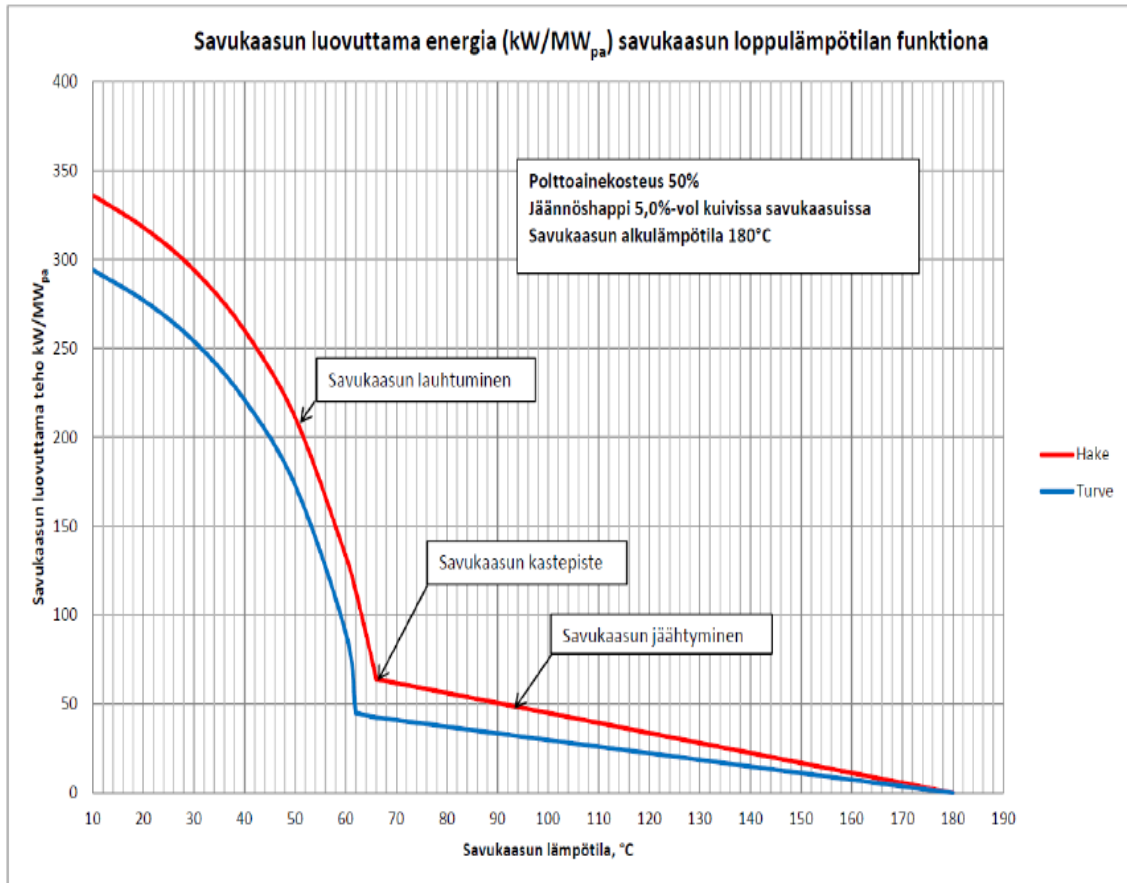
Kuten yllä olevasta kuvasta nähdään, on savukaasupesurin avulla mahdollista saada talteen suurin osa savukaasujen sisältämästä energiasta. Laskennallisesti savukaasupesurin avulla voimalaitoksen kokonaishyötysuhde voidaan saada nostettua yli 100 %:iin. Tämä johtuu alemman lämpöarvon käyttämisestä hyötysuhteen määrittämisessä. Alempaa lämpöarvoa laskettaessa oletetaan, että polttoaineen sisältämän veden höyrystämiseen käytettyä energiaa ei saada talteen.

Käytettäessä pesurin lämpöä hyödyksi kaukolämmön tuotannossa, voi pesurin tuottama energia olla jopa 20 % kaukolämmön kokonaistehosta (Arola & Toivo 2015). Tällöin laitokselle voi kertyä merkittäviä säästöjä polttoaineen kulutuksen laskiessa. Kuvassa 12 on esimerkki pesurilla varustetun voimalaitoksen energiantuotannosta. Kuvasta voidaan huomata, että suurin hyöty savukaasupesurista saadaan talvikuukausina, jolloin myös kaukolämmön kulutus on suurimmillaan. Tällöin pesurin tuottama teho on noin 20 % kaukolämmön kokonaistehosta. Muina kuukausina pesurin osuus on noin 10–20 %.



Kuva 12: Esimerkki savukaasupesurilla varustetun CHP-laitoksen sähkö- ja kaukolämpötehoista vuosina 2009–2012 (Valmet 2015, 10).

Pesurin lämmöntalteenoton toiminnan kannalta tärkeintä on, että savukaasujen lämpötila saadaan laskettua vesihöyryn kastepisteeseen. Lämpötilan laskettua kastepisteen alapuolelle, alkaa vesihöyry tiivistyä ja tällöin saadaan pesurin kiertonesteeseen talteen veden latenttilämpö. Latenttilämpö on huomattavasti suurempi kuin pelkkä vesihöyryn tai nestemäisen veden lämpötilamuutoksessa vapautuva energia. (Nummila & Järvenreuna 2015, 2–3.) Ku-
vassa 13 esitetään savukaasujen luovuttama lisäteho savukaasujen lämpötilan funktiona.



Kuva 13: Savukaasun luovuttama energia savukaasun lämpötilan funktiona (Caligo 2013, 6).

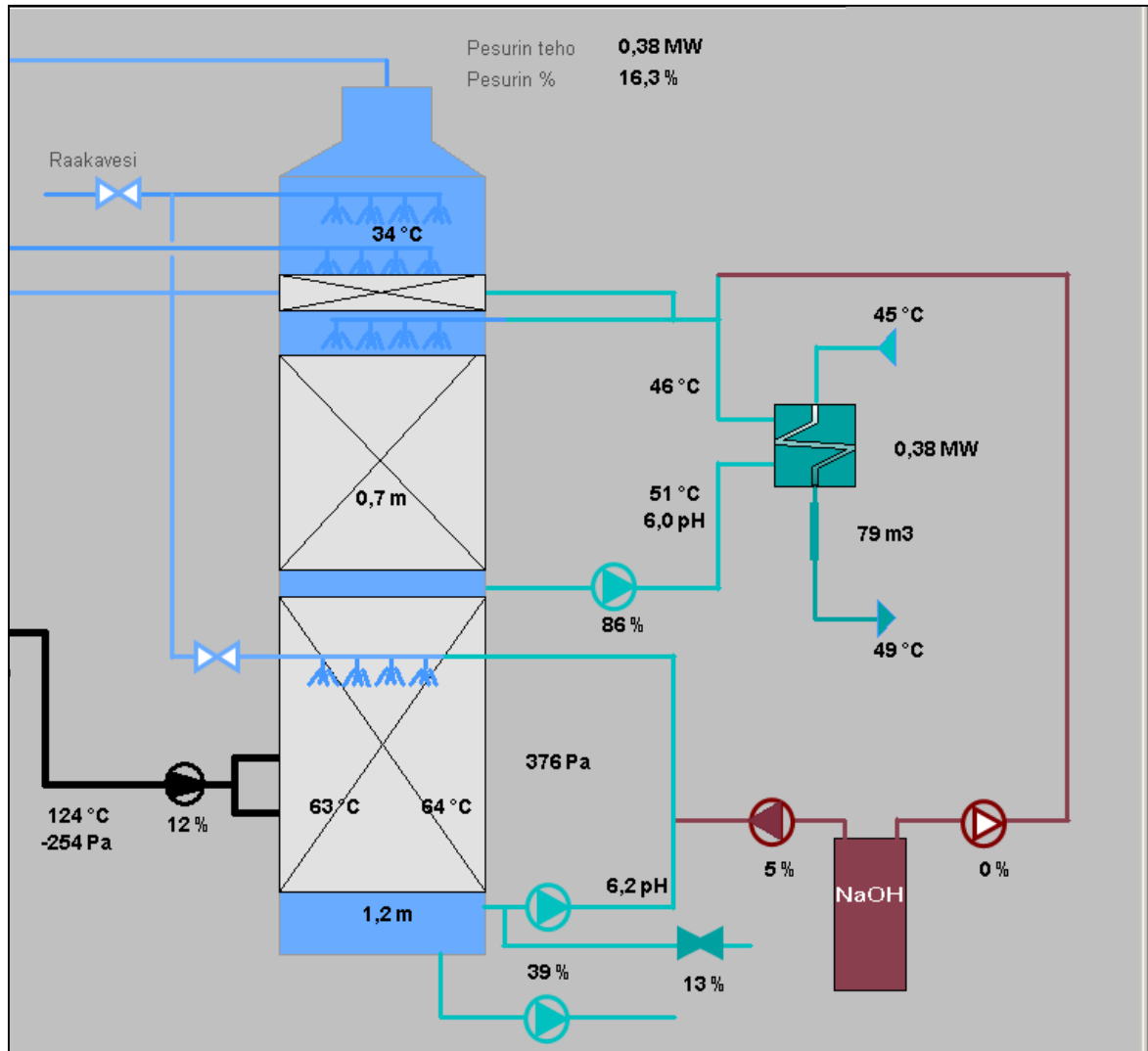
Kuvassa faasimuutoksen aiheuttama energian vapautuminen näkyy selkeästi lisätehon kasvuna. Jos pesurissa lämpötila jää huomattavasti kastepisteen yläpuolelle, ei savukaasujen vesihöyry pääse lauhtumaan. Tällöin myös pesunesteen vesi höyrystyy lisäten savukaasujen vesihöyrymäärää. Tämä aiheuttaa pesurin lämmöntalteenottokyvyn romahtamisen. (Nummila & Järvenreuna 2015, 3.) Savukaasujen vesihöyrykastepisteen lämpötila riippuu vesihöyryn suhteellisesta osuudesta savukaasuissa. Tämä puolestaan riippuu polttoaineen kosteudesta, joka on merkittävin vaikuttava tekijä kastepistelämpötilan suuruuteen. Taulukossa 6 esitetään polttoaineen kosteuden vaikutus kastepistelämpötilaan.

Taulukko 6: Polttoaineen kosteuden vaikutus kastepistelämpötilaan. Kastepiste ei muutu lineaarisesti polttoaineen kosteuden mukaan. (Pöyry 2010, 6.)

Polttoaineen kosteus [%]	Kastepistelämpötila [°C]
60	68,4
50	64,0
40	60,0

Lauhtumista ja savukaasujen loppulämpötilaa säädetään pesurissa pesunesteen tilavuusvirralla. Lämmöntalteenoton tehokkuutta parannetaan täytekappalekerroksella. Lämmin lauhdevesi kerätään täytekappalekerroksen alta ja pesurin pohjalta, josta se pumpataan levylämmönvaihtimelle. Levylämmönvaihtimen toisiopuolella kiittää kaukolämmön paluuvesi, jonka lämpötilaa saadaan lauhteella tyypillisesti nostettua muutamalla asteella. Lämmönvaihtimelta jäähtynyt lauhdevesi palautetaan takaisin pesukiertoon.

Vaikka savukaasuista saadun lauhteen avulla kaukolämmön paluueden lämpötilaa saadaan nostettua vain muutamia asteita, on sillä kuitenkin laitoksen kokonaishyötysuhteen kannalta suuri merkitys. Kuten jo aiemmin on mainittu, voidaan savukaasupesurilla tuottaa jopa 20 % laitoksen kaukolämpötehosta. Kuvassa 14 on esimerkki pienen 4 MW metsähaketta polttavan lämpölaitoksen savukaasupesurin tehosta.

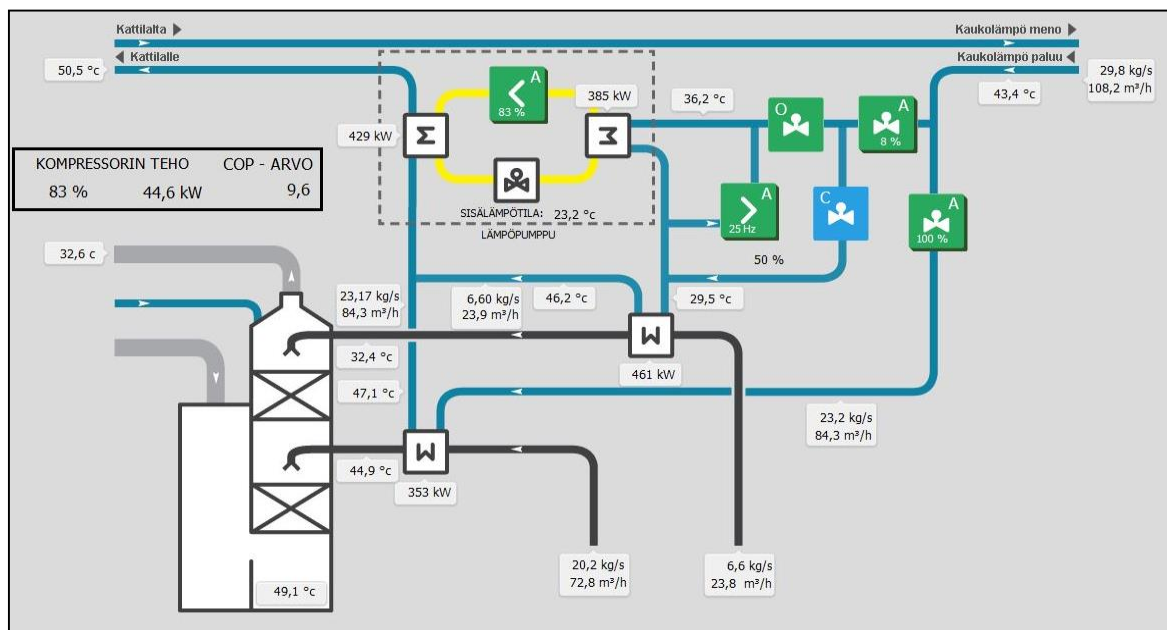


Kuva 14: 4 MW lämpölaitoksen savukaasupesuri. Kuvanottohetkellä laitoksen kaukolämpöteho oli 2,8 MW. (Elenia Lämpö 2015.)

Kuvan oikeassa laidassa olevan levylämmönvaihtimen lämpötilatasoista nähdään, että kaukolämmön paluuvien lämpötilaa saadaan nostettua 4 °C, samalla kun pesurissa savukaasut jäähtyvät 124 °C:sta 34 °C:seen. Pienestä lämpötilan noususta huolimatta, saadaan savukaasujen sisältämästä energista hyödynnettyä merkittävä osa. Pesurin tuottama teho (0,38 MW) kaukolämpöveeten on noin 14 % laitoksen kokonaistehosta (2,8 MW).

4 LÄMPÖPUMPPU SAVUKAASUPESURISSA

Lämpöpumppua voidaan käyttää parantamaan savukaasupesurin tehokkuutta. Lämpöpumpulla varmistetaan, että savukaasujen vesihöyry pääsee lauhtumaan polttoaineen kosteudesta tai kaukolämmön paluveden lämpötilasta riippumatta. Lämpöpumpun avulla savukaasupesurille tulevan kaukolämpöveden lämpötilaa voidaan laskea, mikä kasvattaa lämpötilaeroa lämmönvaihtimella ja siten tehostaa lämmöntalteenottoa. Tällä tavoin pyritään varmistamaan, että savukaasujen lauhteesta saadaan siirrettyä mahdollisimman paljon energiaa kaukolämmön paluuveteen. Kaukolämpöverkossa varsinkin huipputehontarpeen aikana paluuv veden lämpötila nousee ja samalla pyritään lämpölaitoksessa yleisesti käyttämään mahdollisimman kuivaa polttoainetta. Kuivan polttoaineen vuoksi kastepistelämpötila laskee ja samaan aikaan kun paluuv veden lämpötila nousee, voi syntyä tilanne, jossa kastepistettä ei säävytetä tai vähintäänkin savukaasupesurin lämmöntalteenottokyky heikkenee. Varsinkin näissä tilanteissa lämpöpumppukytkennästä (kuva 15) on hyötyä, sillä savukaasupesuria pystytään käyttämään korkeasta paluuv veden lämpötilasta huolimatta. (Nummila & Järvenreuna 2015, 3.)



Kuva 15: Esimerkki lämpöpumppukytkennästä (Elenia Lämpö 2015).

Yllä olevassa kytkennässä osa kaukolämmön paluuedestä ohjataan lämpöpumpulle ja osa suoraan pesurin lämmönvaihtimelle. Tämä mahdollistaa pesurin käytön optimoinnin riippuen kulloisestakin paluueden virtaamasta ja lämpötilasta. Lämpöpumpulle menevän paluueden suhteellista osuutta kasvatetaan paluulämpötilan noustessa (Nummila 2015). Kiertopumpun ja lämpöpumpun ohitusventtiilin avulla paluueden lämpötila saadaan pidettyä optimaalisella tasolla lämpöpumpun toiminnan kannalta.

Pesurilla kaukolämpövedeen siirretty energia saadaan laskemalla yhteen pesurin lämmönvaihtimien tehot (461 kW ja 353 kW) ja lämpöpumpun kompressorin teho (45 kW). Kompressorin sähkötehosta yli 90 % siirtyy lämpönä prosessiin ja vain pieni osa menee ns. hukkaan (Nummila 2015). Lämpöpumppu itsessään ei hukkaa energiaa, vaan paluuedestä otettu lämpö palautetaan takaisin pesurin jälkeen. Kuten kuvastakin voidaan nähdä, lauhttimella paluueden luovutettava teho (429 kW) on höyrystimellä otetun (385 kW) ja kompressorin sähkötehon (45 kW) summa.

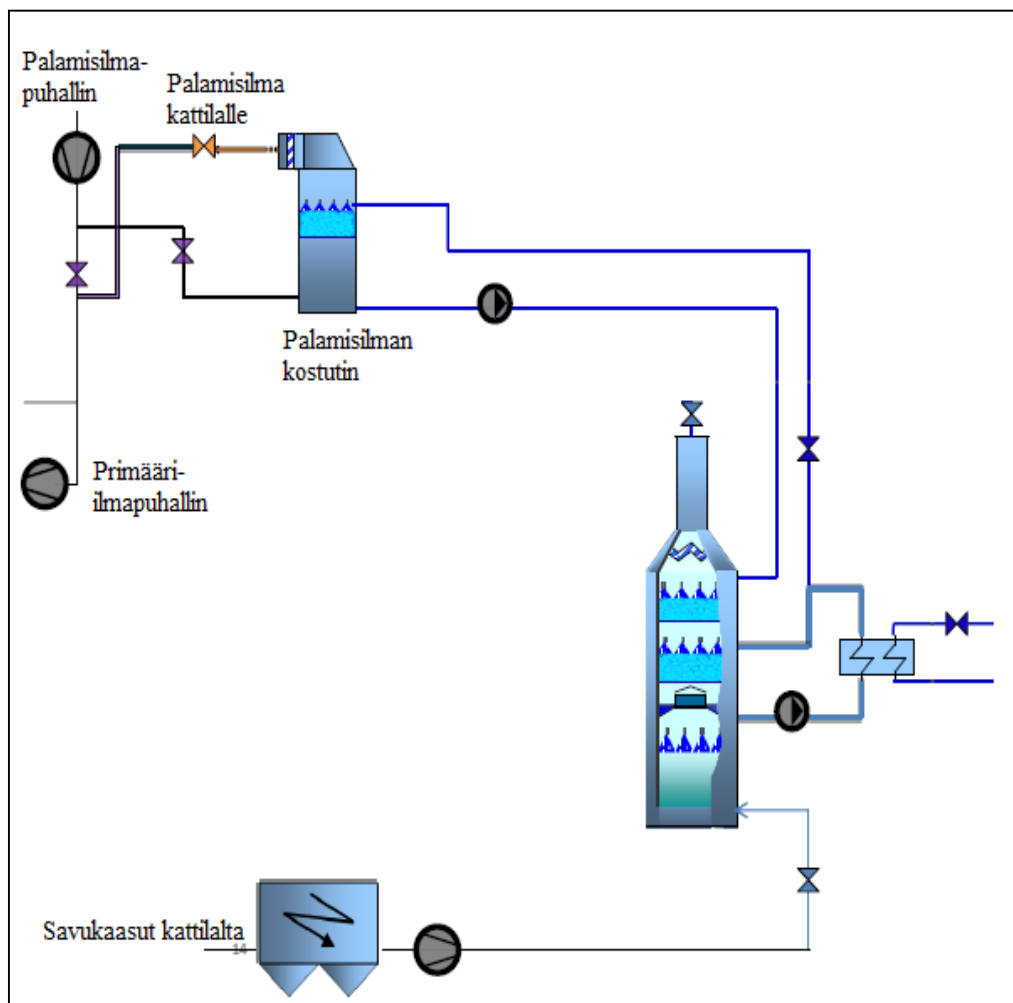
Perinteisessä savukaasupesurissa savukaasujen lämpötilaa saadaan alennettua korkeintaan muutaman asteen päähän kaukolämmön paluueden lämpötilasta. Lämpöpumpun avulla paluueden lämpötilaa voidaan alentaa jopa 20 °C, jolloin myös vastaavasti savukaasut saadaan jäädytettyä 20 °C viileämmiksi. (Nummila & Järvenreuna 2015, 3–4.) Kuvasta 15 voidaankin nähdä, että savukaasut (32,6 °C) saadaan jäädytettyä matalampaan lämpötilaan kuin mitä kaukolämmön paluuvesi (43,4 °C) on. Ilman lämpöpumppua tämä ei olisi mahdollista. Vaikka savukaasujen lämpötilan alentaminen mahdollisimman alhaiseksi lisää pesurin lämmöntalteenottotehoa, on käytännön alaraja savukaasujen lämpötilalle 30–35 °C. Tätä matalampia lämpötiloja lämpöpumppukytkennällä ei kannata tavoitella, sillä tässä lämpötilassa savukaasujen absoluuttinen kosteus, ja siten lauhtumisesta saatava lisäteho, on varsin vähäinen. (Nummila 2015.)

Lämpöpumpun käytön kannattavuus riippuu pitkälti lämpöpumpun tehokertoimesta eli COP-arvosta sekä laitoksen polttoaineen ja sähkön hintasuhteesta. Mikäli lämpöpumpun COP-arvo on suurempi kuin laitoksen käyttämän polttoaineen ja ostosähkön hintasuhte, on lämpöpumpun käyttö pesurin yhteydessä kannattavaa. Esimerkiksi polttoaineen hinnalla 20 €/MWh ja ostosähkön hinnalla 100 €/MWh (lämpölaitos), saadaan hintasuhteeksi 5,0. Jos

Samalla lämpöpumpulla saavutetaan yli 5,0 COP-arvo, on lämpöpumpun käyttäminen taloudellisesti kannattavaa. Tällöin lämpöpumpun tuoma säästö polttoaineen kulutusta pienentämällä on suurempi kuin sen käyttämisen ostosähkön tuomat lisäkulut. (Nummila 2015.)

5 PALAMISILMANKOSTUTIN SAVUKAASUPESURISSA

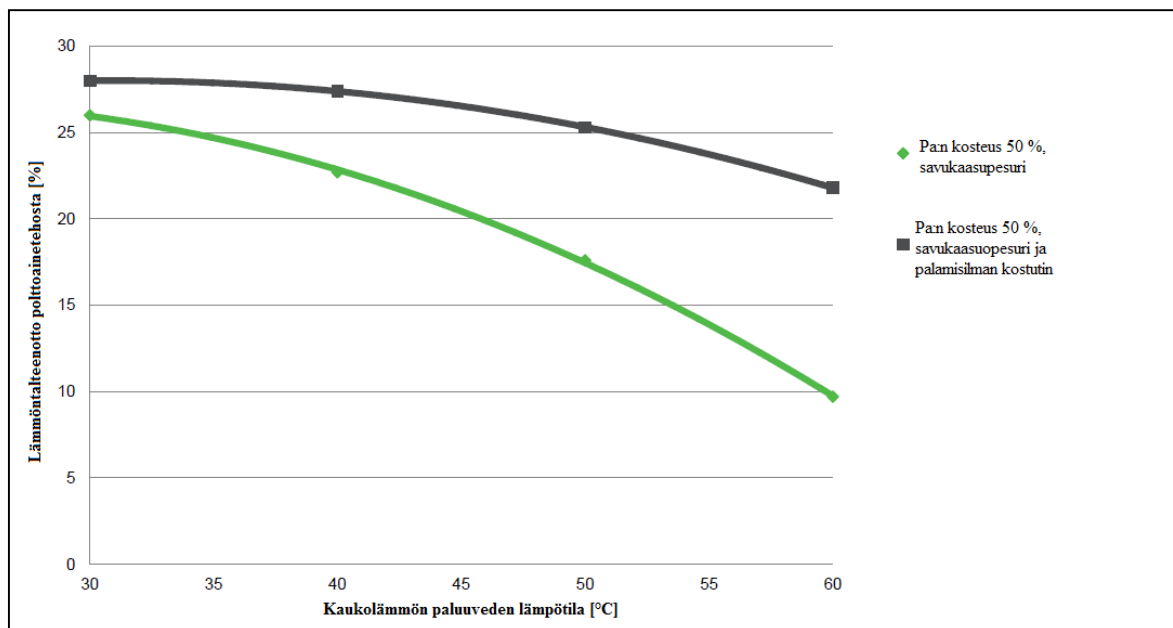
Kostuttimen käytöllä pyritään kasvattamaan pesurin lämmöntalteenottoa nostamalla savukaasujen kastepisteen lämpötilaa lisäämällä vesihöyryn määrää savukaasuissa. Tällöin pesurissa savukaasujen lauhtuminen alkaa korkeammassa lämpötilassa ja lauhtutettavan vesihöyryn määrä savukaasuissa on suurempi. Kostutus toteutetaan kostuttamalla palamisilmaa ennen sen syöttämistä kattilaan ja siihen käytetään savukaasupesurin lauhdevettä. Kostuttimessa palamisilman lämpötila nousee samalla kun sitä kostutetaan, mikä mahdollistaa suuremman absoluuttisen vesihöyryn määrän palamisilmassa. Kostutetun palamisilman suhteellinen kosteus on 100 %. (Jedfelt et al. 2013, 4.) Alla olevassa kuvassa 16 on esimerkki palamisilmakostutinkytkenästä savukaasupesuriin.



Kuva 16: Yksinkertaistettu esimerkki palamisilmankostuttimen kytkemisestä savukaasupesuriin (Valmet 2015, 14).

Palamisilman kostutukseen tarvittava lauhde otetaan pesurilta lämmönvaihtimen jälkeen, jolloin sen lämpötila on laskenut tasolle, jossa sitä ei voida enää hyödyntää kaukolämpöveden lämmittämiseen. Kuten pesurissa, niin kostuttimessakin lauhde suihkutetaan vastavirtaan kulkevaan palamisilmaan ja siinä voidaan pesurin tapaan käyttää täytekappalekerrosta lisäämään kontaktipinta-alaa. Kostuttimen alaosasta lauhde kierrätetään takaisin pesurille. Kostuttimen jälkeen kostea palamisilma voidaan vielä jälkilämmittää esimerkiksi matalalämpötilaisilla savukaasuilla (Condens 2014).

Palamisilman kostuttimen avulla savukaasupesurin suhteellista osuutta kaukolämmöntuotannosta saadaan nostettua 3-12 prosenttiyksikköä riippuen paluueden lämpötilasta (Valmet 2015, 13). Mitä korkeampi paluueden lämpötila on, sitä suurempi hyöty palamisilman kostuttimesta on verrattuna pesuriin ilman kostutinta. Palamisilman kostuttimesta saadaankin suurin hyöty talvella, jolloin paluueden lämpötila on tyypillisesti korkea. Kuvasta 17 nähdään palamisilman kostuttimen vaikutus savukaasupesurin lämmöntalteenottotehoon.



Kuva 17: Savukaasupesurin suhteellinen lämmöntalteenottoteho kaukolämmön paluueden lämpötilan funktiona (Valmet 2015, 13).

Kuten yllä olevasta kuvasta nähdään, kostuttimen tuoma suhteellinen lisähyöty vähenee matalammalla paluueden lämpötilatasolla. Matalammalla paluueden lämpötilatasolla lämpötilaerot ovat suuremmat, jolloin lämmönsiirto on tehokkaampaa kostuttimesta huolimatta.

Kun savukaasupesuriin on kytketty palamisilmankostutin, täytyy lämmöntalteenottoa ja lämmöntuotantoa tarkastella kokonaisuutena kattilan kanssa. Palamisilman kostuttaminen vaikuttaa kattilan palamisolosuhteisiin ja savukaasujen koostumukseen ja määrään. Tällä on vaikutusta esimerkiksi, kun kaukolämmöntarve on vähäinen ja kattilaa ajetaan lähellä minimikuormaa. Tällöin pesurin lämmöntalteenottoa täytyy rajoittaa, jotta kattila voidaan pitää päällä. Tyypillisesti ensimmäinen vaihe rajoittamisessa on kytkeä palamisilmankostutin pois päältä. Vastaavasti lämmöntarpeen kasvaessa palamisilmankostutin voidaan ottaa käyttöön vasta kun kattilan ja savukaasupesurin tehot ovat sellaisella tasolla, ettei kostutin häiritse niiden toimintaa. (Jedfelt et al. 2013, 9.)

6 PESURIN LAUHTEENKÄSITTELY

Kuten aiemmin mainittiin, syntyy savukaasupesurissa talteenotettua lämpöä kohden lauhdetta noin $1 \text{ m}^3/\text{MWh}$. Lauhdetta ei voi suoraan laskea ympäristöön, eikä se myöskään sovellu käytettäväksi muissa prosesseissa likaisuutensa vuoksi. Tämän vuoksi lauhdetta tulee käsitellä ennen sen päästämistä vesistöön. Kullekin laitokselle määritellään ympäristöluvassa kriteerit ympäristöön laskettaville vesille, kuten myös lauhteelle. Lauhteenkäsittely koostuu useasta eri vaiheesta, joilla pyritään muun muassa vähentämään raskasmetalli- ja kiinteiden partikkeleiden pitoisuuksia, sekä säätämään lauhteen pH ja lämpötila sopivalle tasolle ympäristöhaittojen minimoimiseksi.

Lauhteen laatu riippuu savukaasun ominaisuuksien lisäksi savukaasukanavassa ennen pesuria olevista päästöjenhallintalaitteista sekä pesurin erotustehokkuudesta. Alla olevaan taulukkoon 7 on kerätty lauhteen laatua kuvaavia tekijöitä ja eri päästöjenhallintatapojen vaikutusta niihin. Lauhdetta oletetaan syntyvän kaksivaiheisessa savukaasupesurissa, jossa alemmasta pesuvaiheesta ja ylemmästä lämmöntalteenottovaiheesta lauhteet kerätään erikseen.

Taulukko 7: Biomassaa polttavan laitoksen savukasupesurin lauhteen laatu (●●● suuri määrä, ● pieni määrä lauhteessa). (Smolander 2015, 22).

Ominaisuus/ lauhdepartikkeli	Yksikkö	ESP	ESP	Letkusuodatin	Letkusuodatin
		Pesuvaihe	Talteenotto	Pesuvaihe	Talteenotto
pH		6–8	6–8	6–8	6–8
Kiintoaines	mg/l	●●●	●●	●	●
Sähkönjohtavuus	mS/m	●●●	●●	●●	●●
Alkalisuus	mg/l	●●	●	●●	●
TOC	mg/l	●	●	●	●
Cl	mg/l	●●●	●●	●●	●
SO ₄ ²⁻	mg/l	●●●	●●	●●	●
SiO ₂	mg/l	●●●	●●	●	●
NH ₃	mg/l	●●●	●	●●●	●
Al	mg/l	●●●	●●	●	●
Fe	mg/l	●●●	●●	●	●
Ca	mg/l	●●●	●●	●	●
Mg	mg/l	●●	●●	●	●
Mn	mg/l	●●●	●	●	●
Na	mg/l	●●●	●●	●●	●
Raskas metallit	µg/l	●●●	●●	●●	●

Kuten yllä olevasta taulukosta nähdään, letkusuodattimen käyttö ennen savukaasupesuria johtaa puhtaampaan ja parempilaatuiseen lauhteeseen. Tämä johtuu letkusuodattimen paremmasta päästöjen erotuskyvystä. Parhaimman laatuista lauhdetta saadaan, kun letkusuodattimen jälkeisestä pesurista otetaan lauhde talteen yläkierrosta. Letkusuodattimen kanssa suurin osa epäpuhtauksista jää pesuvaiheeseen. Lauhdetta on kuitenkin otettava pois pesurista myös pesuvaiheesta, jossa lauhde on selvästi likaisempaa. Lauhteen laatuun vaikuttaa myös pesurin ajotapa. Esimerkiksi kesäkuukausina, jolloin lämmöntarve on pienempi, voi lauhteen partikkeleiden konsentraatio olla suurempi johtuen pienemmästä savukaasulauhteen määrästä. (Smolander 2015, 22–23)

Lauhteenkäsittely tehdään useassa eri vaiheessa, sillä yksittäinen laite ei kykene puhdistamaan lauhdetta kaikilta osin tarpeeksi puhtaaksi. Lauhteenkäsittelyyn käytetään erilaisia vedenkäsittelyn menetelmiä, jotka voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: mekaaniset, kemialliset ja energiaintensiiviset menetelmät. Mekaaniset menetelmät ovat pitkälti erilaisia suodatusratkaisuja. Kemiallisissa menetelmissä puhdistus perustuu lauhteen sekaan syötettäviin kemikaaleihin, jotka auttavat tietyn tai tiettyjen epäpuhtauksien poistamisessa tai ne toimivat katalyytteinä. Energiaintensiiviset menetelmät sisältävät muita puhdistuskeinoja, kuten kiehuttamisen ja elektrokemiallisia tekniikoita. (Cheremisinoff 2002, 1–3.) Seuraaviin kappaleisiin on kerätty joitain tyypillisimpiä voimalaitosten lauhteen- ja vedenkäsittelyn menetelmiä.

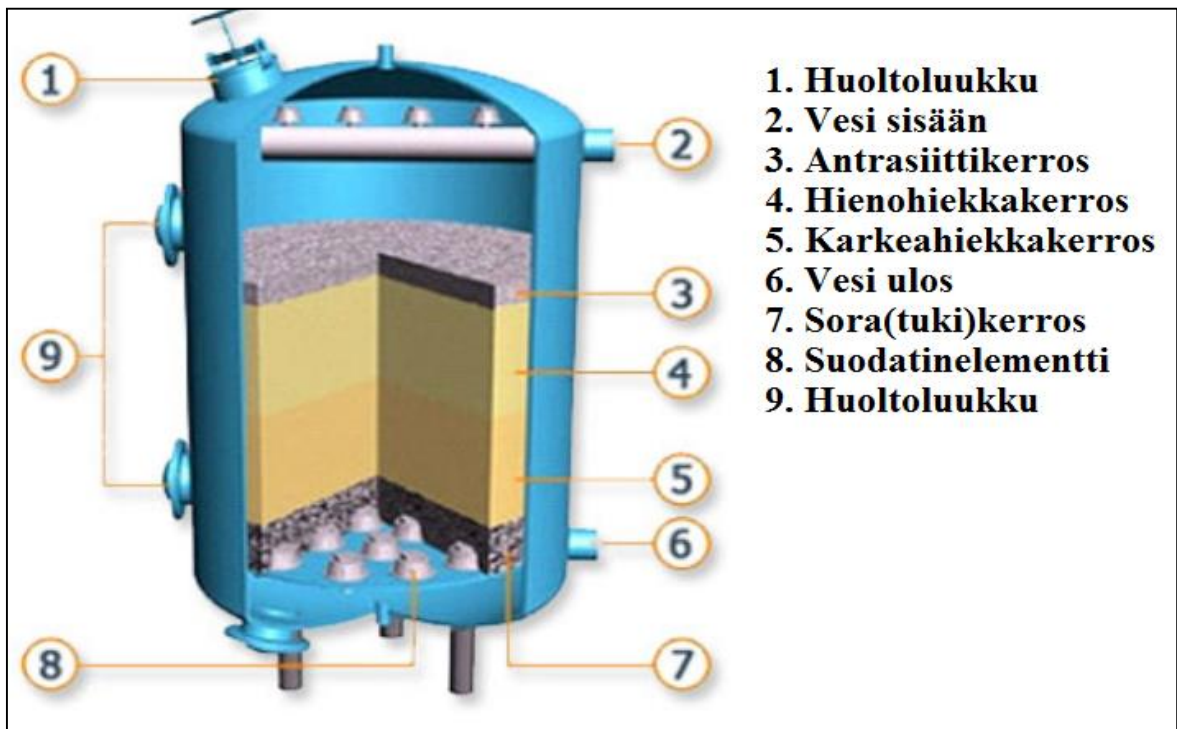
6.1 Hiekkasuodatin

Hiekkasuodatin on mekaaninen puhdistusmenetelmä, jota käytetään yleensä veden esikäsittelyyn tai viimeistelyyn. Sitä käytetään tavallisesti muiden suodatusmenetelmien kanssa yhdessä. Hiekkasuodattimella saadaan poistettua vedestä karkeimpia hiukkasia, sedimenttejä sekä orgaanisia aineita. Lisäksi hiekkasuodattimella saadaan poistettua osa metalleista ja ravinteista. Hiekkasuodattimella saadaan myös poistettua merkittävä osa vedessä olevasta kolibakteerista. (Cheremisinoff 2002, 235 & 247.) Alla olevaan taulukkoon 8 on koottu tyypillisiä hiekkasuodattimen puhdistusarvoja.

Taulukko 8: Tyypillisiä hiekkasuodattimen poistotehokkuuksia (Cheremisinoff 2002, 247).

Epäpuhtaus	Poistotehokkuus [%]	Epäpuhtaus	Poistotehokkuus [%]
Kolibakteeri	76	Orgaaninen kokonaishiili (TOC)	48
Biologinen hapenkulutus (BOD) (Orgaaninen aines)	70	Kokonaistyppeä (TN)	21
Kiintoainek (TSS)	70	Rauta, lyijy, sinkki	45

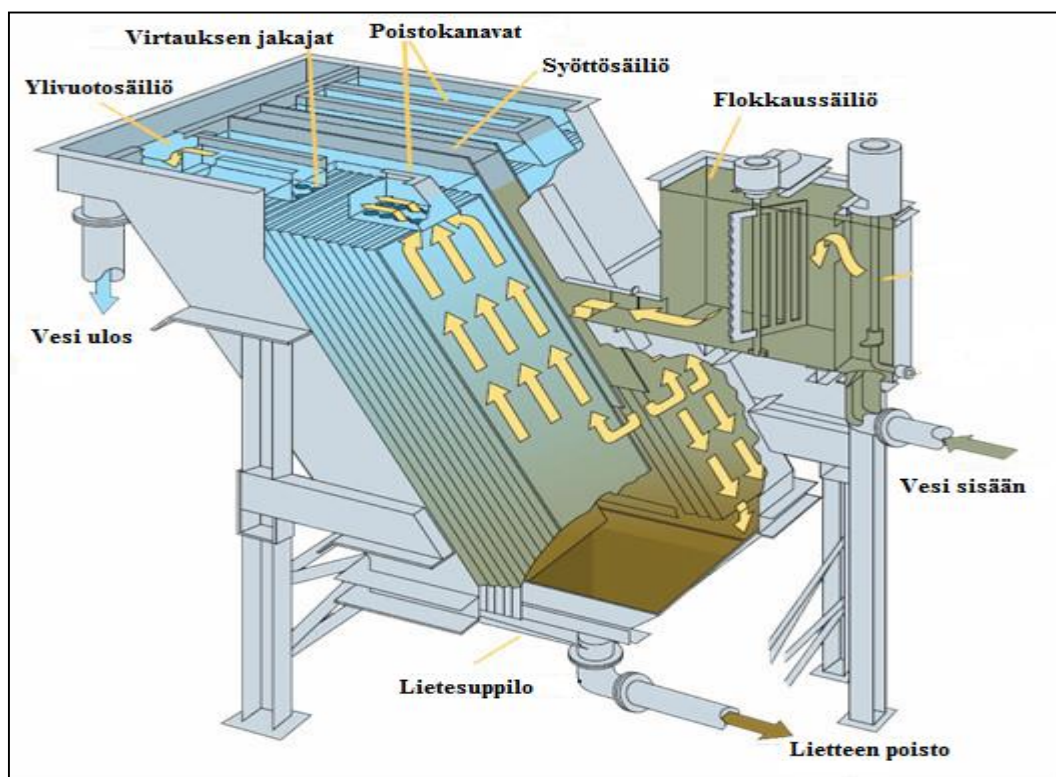
Hiekkasuodattimissa voidaan käyttää useampaa eri karkeusasteen hiekkää suodatuksen parantamiseksi. Hiekan tulee olla myös tarpeeksi puhdasta, jotta siitä ei irtoa lisää epäpuhtauksia puhdistettavaan veteen. Hiekkassa ei saa olla muun muassa savea, pölyä tai muita vastaavia epäpuhtauksia. Kalkkia, kalkkikiveä ja magnesiumoksidia saa olla korkeintaan 5 % hiekan massasta. (Cheremisinoff 2002, 249.) Alla olevassa kuvassa 18 on esimerkki hiekkasuodattimesta ja sen eri kerroksista.

**Kuva 18:** Esimerkki hiekkasuodattimesta (Raindrops 2016).

Kuvan 18 hiekkasuodattimessa vesi tuodaan suodattimeen yläpuolelta, jolloin se kulkeutuu painovoiman vaikutuksesta suodattimen pohjalle epäpuhtauksien jäädessä hiekkakerroksiin. Käytön myötä hiekkasuodatin alkaa tukkeutua siihen tarttuneista epäpuhtauksista. Tällöin suodatin voidaan puhdistaa vastavirtahuuhtelulla. Suodattimen likaantumista voidaan seurata esimerkiksi paine-eromittauksella.

6.2 Lamelliselkeytin

Lamelliselkeytintä (kuva 19) käytetään öljyjen ja kiintoaineksen poistamiseen vedestä. Lamelliselkeytin käyttää toimintaansa hyväkseen tiheyseroja. Vettä kevyemmät öljyt kertyvät veden pinnalle ja vettä tiheämpi kiintoaines painuu selkeyttimen pohjalle. Riippuen likaisen veden koostumuksesta, lamelliselkeyttimellä voidaan saada erotettua 90–99 % öljyistä, rasvoista ja kiintoaineesta. Emulgoimattomista öljyistä ja rasvoista saadaan erotettua 20–40 %. Lamelliselkeyttimellä pystytään käsittelemään vettä, joka sisältää korkeintaan 10 g/l rasvaa ja 3 g/l kiintoainesta. (Cheremisnoff 2002, 281.)



Kuva 19: Esimerkki lamelliselkeyttimen toiminnasta (Jorsun 2016).

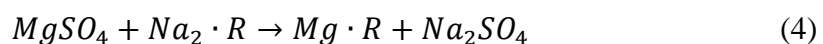
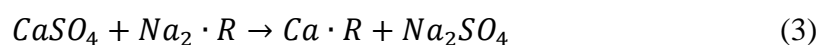
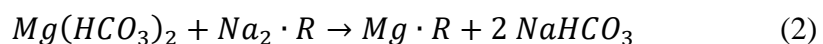
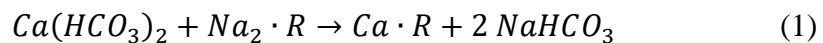
Lamelliselkeyttimessä vesi kulkee alhaalta ylöspäin vinojen lamellilevyjen välistä, jolloin liete ja kiintoaines laskeutuvat lamellin päälle ja alkaa valua kohti pohjaa veden jatkaessa virtausta ylöspäin. Liete poistetaan selkeyttimen pohjalta ja puhdistettu vesi otetaan talteen selkeyttimen yläosasta ylivuotosäiliön kautta.

Lamelliselkeyttimen etuna on, että se on kooltaan pienempi kuin vastaavaan erotuskykyyn pystyvät muut suodattimet. Lamelliselkeyttimen levyillä saadaan paljon kontaktipinta-alaa pieneen tilavuuteen. Lamelliselkeyttimen käyttökustannukset ovat varsin pienet, sillä tarve on vain pienelle pumppausteholle.

6.3 Ioninvaihto

Ioninvaihdossa vedessä olevat kalsium- ja magnesiumsuolat korvataan natriumsuoloilla. Kalsium- ja magnesiumsuolat aiheuttavat saostumista ja muodostavat kattilakiveä toisin kuin natriumsuolat, joten niiden poistaminen vedestä on tärkeää. Ioninvaihto voidaan suorittaa esimerkiksi pehmennyssuodattimella.

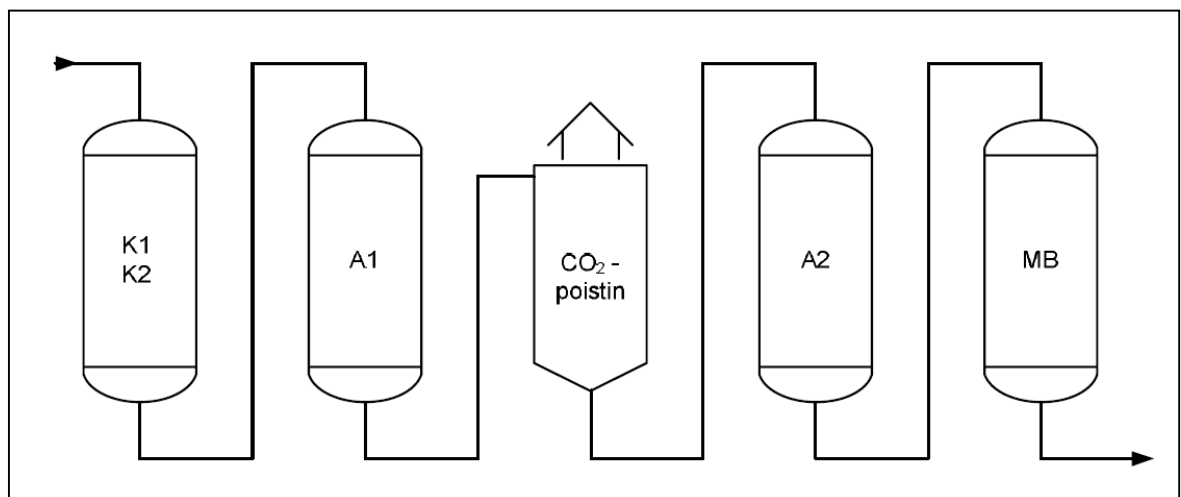
Pehmennyksessä vesi tuodaan kationimassalle (ioninvaihtoharts), jossa on natriumioneja. Pehmennyksessä vedessä olevat kalsium- ja magnesiumionit korvautuvat natriumioneilla ja poistetut kalsium- ja magnesiumionit jäävät kationinvaihtomassaan. Parhaimman laatuista vettä saadaan, kun käytetään useampaa ioninvaihtohartsia sarjaan kytkettyinä. Käytön myötä massan ioninvaihtokyky heikkenee natriumionien vähetessä. Tällöin vaihtomassa tulee elvyttää natriumkloridiliuoksella. (Luostarinen 2013, 21) Alla olevat yhtälöt kuvaavat ioninvaihtohartsilla tapahtuvia reaktioita.



R = ioninvaihtoharts

Yhtälöissä (1) ja (2) esiintyvät kalsiumbikarbonaatti ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) ja magnesiumbikarbonaatti ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) aiheuttavat vedessä karbonaattikovuutta. Yhtälöiden (3) ja (4) kalsiumsulfaatti (CaSO_4) ja magnesiumsulfaatti (MgSO_4) puolestaan aiheuttavat pysyvää kovuutta. Pehmennyksessä nämä korvautuvat vedessä natriumbikarbonaatilla (NaHCO_3) ja natriumsulfaatilla (Na_2SO_4), jotka jäävät veteen. Kalsium- ja magnesiumionit jäävät ioninvaihtohartsille (R).

Jos tarve on täysin suolattomalle vedelle, voidaan pehmennyksen sijaan vedelle suorittaa täyssiulanpoisto. Täyssiulanpoistossa vedessä olevat kaikki kationit vaihdetaan H^+ -ioneihin ja kaikki anionit OH^- -ioneihin. H^+ - ja OH^- -ionit muodostavat keskenään vettä. Täyssiulanpoisto koostuu heikosta kationinvaihtimesta, vahvasta kationinvaihtimesta, heikosta anioninvaihtimesta, vahvasta anioninvaihtimesta ja sekaioninvaihtimesta. (Luostarinen 2013, 22.) Kuvassa 20 esitellään täyssiulanpoiston kytkentävaihtoehto.



Kuva 20: Yleisesti käytettävä ioninvaihtosarjan kytkentä (Huhtinen et al. 2008).

Kuvaan merkityt osat ovat:

- K1 = heikko kationinvaihdin
- K2 = vahva kationinvaihdin
- A1 = heikko anioninvaihdin

- A2 = vahva anioninvaihdin
- MB = sekaioninvaihdin

Heikko kationinvaihdin käyttää ioninvaihtoon karboksyyliiryhmää (COOH). Heikko kationinvaihdin poistaa tehokkaimmin kalsiumia ja magnesiumia vedestä. Heikko kationinvaihdin pystyy kuitenkin poistamaan vedestä vain siinä olevan emäksisyyden määrän verran kationeja, sillä ioninvaihtoreaktio vaatii alkalisen ionin. Vahva kationinvaihdin puolestaan kykene vaihtamaan lähes kaikki kationit vetyioneiksi. Tähän vahva kationinvaihdin käyttää muun muassa orgaanisia sulfonihappoja (-HSO₃). Vahva kationinvaihdin on nopeampi ja tehokkaampi kuin heikko kationinvaihdin. Systeemissä, jossa käytetään peräkkäin heikkoa ja vahvaa kationinvaihdinta, heikkoa kationinvaihdinta käytetään ensin, joka on taloudellisempi kuin vahva kationinvaihdin. Tämän jälkeen olevalla vahvalla kationinvaihtimella vesi saadaan laadultaan paremmaksi kuin pelkällä heikolla kationinvaihtimella. (Cheremisinoff 2002, 382.)

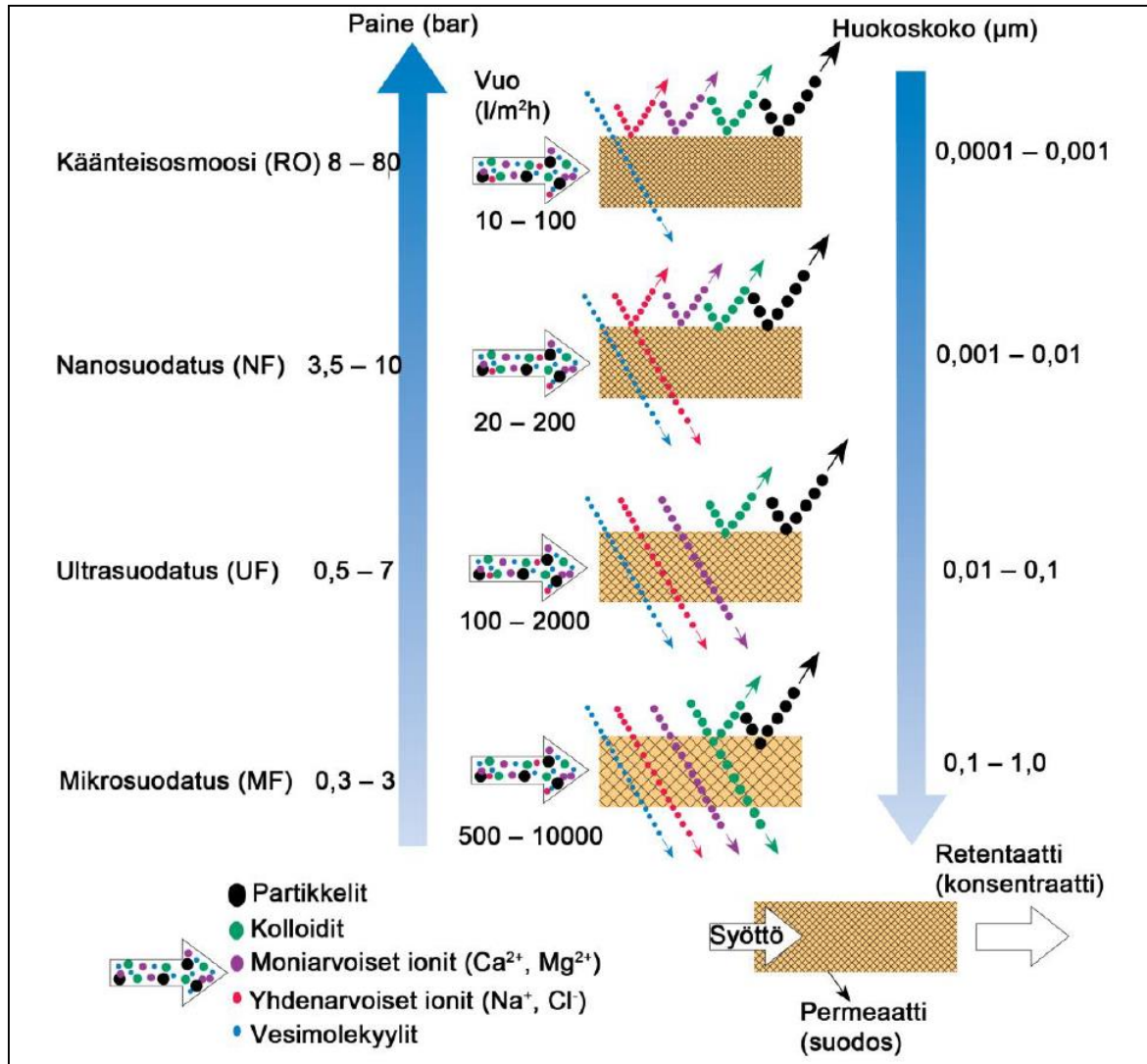
Heikossa anioninvaihtimessa ioninvaihtoon käytetään aminiryhmien ioneja. Heikon ja vahvan kationinvaihtimien jälkeen vesi on hyvin hapanta, mikä on hyvä heikon anioninvaihtimen toiminnan kannalta. Heikko anioninvaihdin ei vaihda anioneja enää kunnolla, kun veden pH-arvo on yli 6. Heikko anioninvaihdin ei myöskään poista häkää (CO₂), eikä silikaatteja. Heikon anioninvaihtimen kapasiteetti on kuitenkin suurempi kuin vahvan anioninvaihtimen. Vahva anioninvaihdin kykenee vaihtamaan kaikkien epäorgaanisten happojen anionit hydroksidin avulla. (Cheremisinoff 2002, 383–384.)

Kationin- ja anioninvaihtimien jälkeen olevassa sekaioninvaihtimessa on sekä kationi-, että anioninvaihtomassaa. Tämän vaihtimen tarkoituksena on vaihtaa ionit, jotka mahdollisesti ovat vuotaneet aikaisempien vaihtimien läpi. Sekaioninvaihdinta ei siis varsinaisesti käytetä ionien vaihtoon, vaan se toimii jälkisuodattimena. (Luostarinen 2013, 23.)

6.4 Kalvosuodatus

Kalvosuodatustekniikoita ovat mikro- (MF, microfiltration), ultra- (UF, ultrafiltration) ja nanosuodatus (NF, nanofiltration). Myös myöhemmin käsiteltävä käänteisosmoosi (RO, reverse osmosis) on toimintaperiaatteeltaan vastaava kuin muut kalvosuodatustekniikat. Ne eroavat toisistaan kalvon huokoskoon perusteella ja tähän perustuen päästävät erikokoisia molekyylejä lävitse ja niiden suodatustehokkuus on erilainen. Kalvosuodatustekniikoiden etuna on, että ne toimivat matalissa lämpötiloissa ja niiden energiankulutus on pientä. Suurin osa laitteen käyttämästä energiasta kuluu nesteen pumppaamiseen. Kalvosuodatusta voidaan käyttää tapauksesta riippuen esimerkiksi flokkauksen, hiekkasuodatuksen, aktiivihiiლისuodatuksen, ioninvaihdon, uuttamisen tai tislamisen sijaan (Lenntech 2016a).

Kalvon huokoskokoa pienemmät partikkelit läpäisevät kalvon ja suuremmat jäävät suodatimeen. Kalvosuodatuksessa kalvon läpäisevää, puhdistettua nestettä kutsutaan permeaatiksi eli suodokseksi. Epäpuhtaudet, jotka eivät läpäise kalvoa, jäävät likaiseen retentaattiin eli konsentraattiin. Kalvosuodatus mahdollistaa esimerkiksi savukaasulauhteen puhdistamisen niin puhtaaksi, että sitä voidaan käyttää kattilaveden valmistukseen. Kuvassa 21 esitellään erilaisten kalvosuodatustekniikoiden ominaisuuksia.

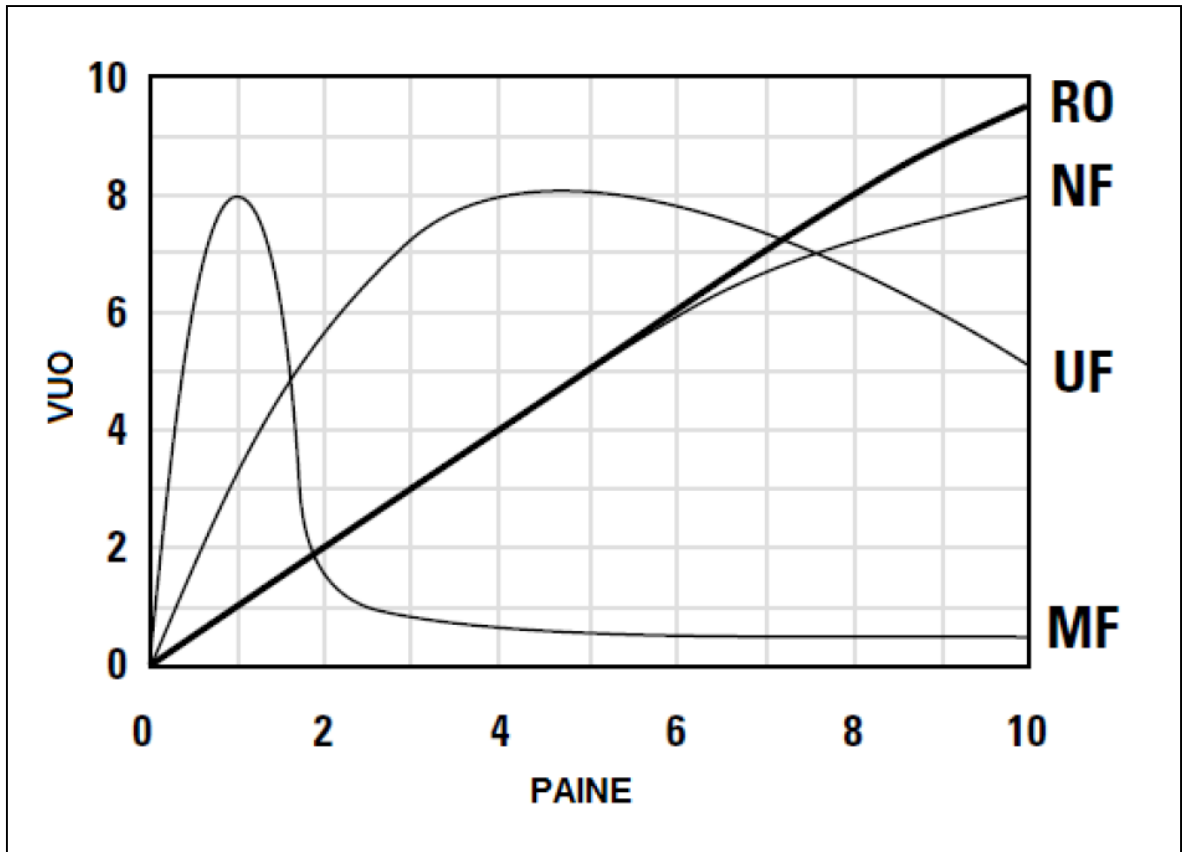


Kuva 21: Kalvosuodatustekniikoiden toimintapaineet, huokoskoot ja erotustehokkuudet (Smolander 2015, 26).

Mikro- ja ultrasuodatuksella tuotetun permeaatin määrä on huomattavasti suurempi kuin nanosuodatuksessa ja käänteisosmoosissa. Myös toimintapaine näissä on huomattavasti pienempi. Jos nesteestä on tarve erottaa kalvotekniikalla suoloja, tulee tällöin käyttää nanosuodatusta tai käänteisosmoosia. Ideaalitulanteessa käänteisosmoosissa kalvon läpäisevät ainoastaan vesimolekyylit (Smolander 2015, 27).

Kalvosuodatuksessa tuottavuutta kuvaa permeaattivuo (l/m²h), joka kertoo kalvon läpäisevän nesteen tilavuusvirran kalvon pinta-alaa kohden. Yleisesti paine-eron kasvattaminen kasvattaa myös permeaattivuota, mutta huokoisemmilla kalvoilla (MF ja UF) vain tiettyyn

rajaan asti. Paine-eroa voidaan siis käyttää prosessinsäätöön RO- ja NF-kalvoilla, mutta huo-
koisemmilla kalvoilla paine-ero tulee säätää tulevan nestevirran mukaan (Smolander 2015,
29). Paine-eron vaikutusta kalvosuodatustekniikoiden tuottavuuteen on kuvattu alla olevassa
kuvassa 22.



Kuva 22: Yleistetty kuvaaja kalvosuodatustekniikoiden permeaattivuosta paineen funktiona (Wagner 2001).

Paine-eron lisäksi merkittävästi kalvosuodattimen tuottoon vaikuttaa virtausnopeus. Virtaus-
nopeuden kasvaessa myös permeaatin tuotto kasvaa. Virtausnopeuden kasvattaminen myös
vähentää kalvon pinnan likaantumista. Toisaalta suurempi virtausnopeus vaatii myös enem-
män energiaa pumppaukseen ja isommat pumput. Virtausnopeuden valitsemisessa tuleekin
valita prosessin kannalta optimaalisin ratkaisu permeaatin tuoton ja pumppujen tehon kan-
nalta. (Dhawan 2016.)

6.4.1 Mikro-, ultra- ja nanosuodatus

Mikrosuodatuksessa kalvon materiaali on hyvin huokoista verrattuna muihin kalvosuodatus-tekniikoihin. Mikrosuodatuksella vedestä saadaan erotettua isoimmat partikkelit. Mikrosuodatus myös poistaa vedestä bakteerit ja sitä käytetäänkin muun muassa jäteveden käsittelyyn. Mikrosuodatusta voidaan käyttää myös öljyn erottamiseen vedestä. Mikrosuodatuksella ei kuitenkaan saada vedestä poistettua suoloja eikä viruksia. (Lenntech 2016b.)

Joissain tapauksissa mikrosuodattimeen syötettävää vettä voidaan joutua esikäsittelemään. Esikäsitteilyä tarvitaan muun muassa silloin kun suodatettava vesi sisältää joitain sellaisia isoja partikkeleita jotka voisivat mahdollisesti vahingoittaa mikrosuodattimen kalvoja.

Ultrasuodatuksella saadaan aikaiseksi mikrosuodatusta tehokkaampi veden puhdistus. Ultrasuodatuksella on mahdollista poistaa kaikki kiintoaines, kolloidit ja virukset. Ainoastaan pienen molekyylipainon partikkelit ja ionit läpäisevät ultrasuodatuskalvon. Tästä huolimatta ultrasuodattimen osmoottinen paine-ero ei ole merkittävä, mikä mahdollistaa pienen toimintapaineen. (Dhawan 2016.)

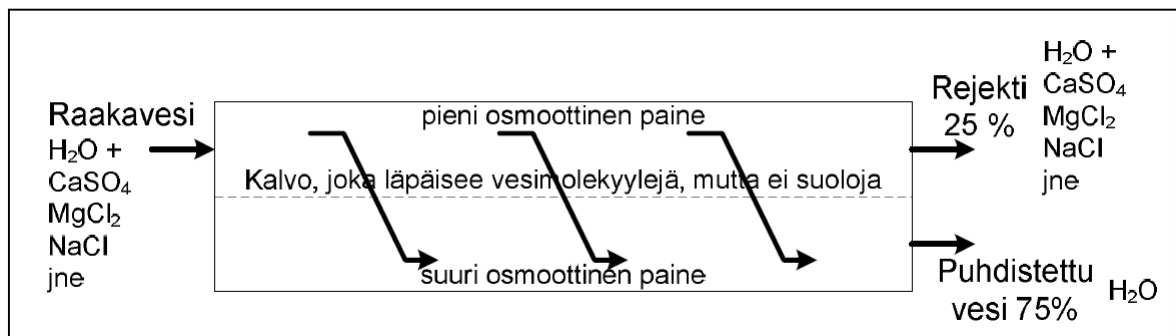
Sekä mikro- että ultrasuodatusta käytetään myös nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin esisuodatuksena. Tällaisessa sarjakytkenässä ensin olevalla mikro- tai ultrasuodattimella pyritään estämään jäljempänä olevan nanosuodattimen tai käänteisosmoosilaitteen likaantuminen ja varmistetaan tuotettavalle vedelle haluttu laatu.

Nanosuodatus on käänteisosmoosin kanssa tehokkaimpia kalvosuodatusmenetelmiä. Nanosuodatuksella vedestä pystytään erottamaan lähes kaikki epäpuhtaudet, tosin karkeimmat partikkelit tulee poistaa jollain esisuodatusmenetelmällä nanosuodattimen tukkeutumisen riskin vuoksi. Nanosuodatuksella saadaan poistettua vedestä niin orgaaninen aines, raskasmetallit, nitraatit kuin pienemmätkin partikkelit. Nanosuodatin soveltuu myös veden pehmennykseen, sillä vain osa suoloista kykenee läpäisemään sen kalvot. Nanosuodatus vaatii kalvon pienen huokoskoon vuoksi huomattavasti suuremman toimintapaineen kuin mikro- ja ultrasuodatus. (Lenntech 2016c.)

Nanosuodatuksen etuna on sen kyky veden pehmennykseen tehokkaan suodatuksen lisäksi. Nanosuodatus myös toimii huoneenlämmössä, eikä vaadi kemikaaleja tai muita lisäaineita kuin monet muut veden pehennyskeinot. Nanosuodattimien haittapuolena on niiden kallis hinta ja kalvojen likaantuminen.

6.4.2 Käänteisosmoosilaite

Käänteisosmoosilaite (Reverse Osmosis, RO-laite) on laite, jolla vedestä saadaan puhdistettua pois suoloja. RO-laitteessa paineen avulla pakotetaan vesimolekyylit puoliläpäisevän kalvon läpi väkevämmästä liuksesta laimeampaan (kuva 23). Prosessi on vastakkaissuuntainen kuin luonnollisessa osmoosissa.



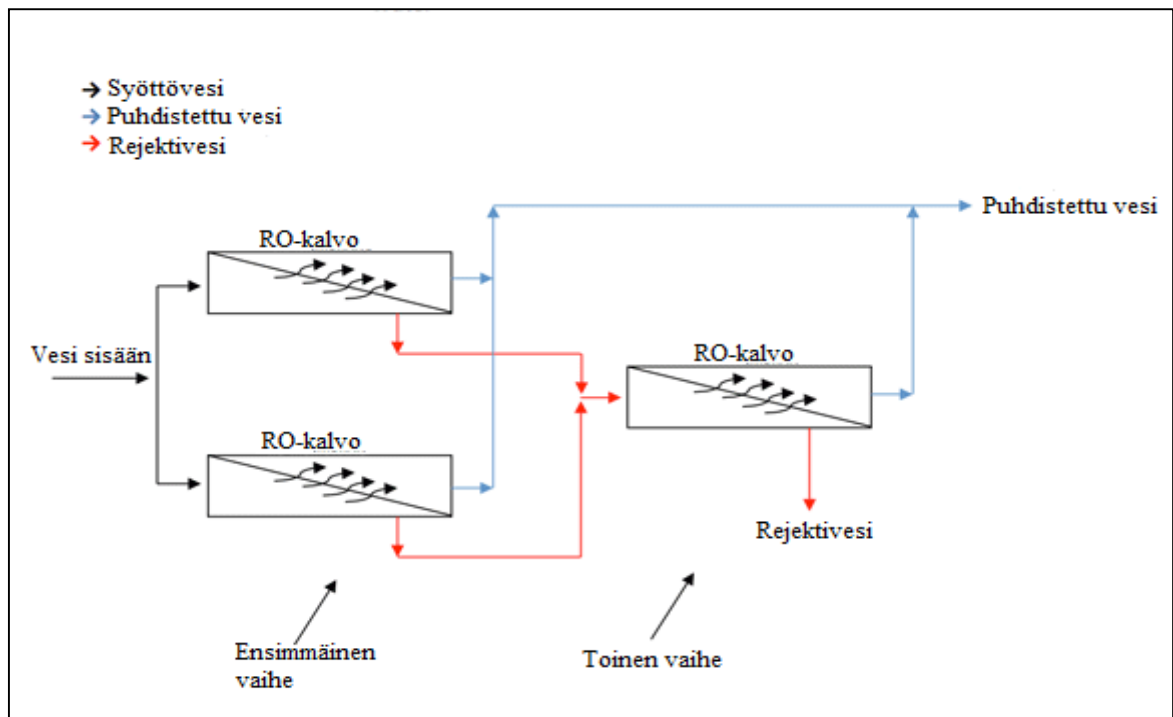
Kuva 23: Käänteisosmoosilaitteen toimintaperiaate (Huhtinen et al. 2008).

Kuvassa suoloja sisältävä vesi saapuu RO-laitteelle vasemmalta ja paineen avulla vesi pakotetaan puoliläpäisevän kalvon lävitse. Tällöin puhdas vesi jatkaa pois laitteelta kalvon toisella puolella. Samalla suolat poistuvat laitteelta kalvon samalta puolelta. Toimiakseen, tulee suoloja sisältävä vesi pumpata laitteelle suuremmalla paineella kuin kalvon eripuolilla olevien nesteiden välillä oleva osmoottinen paine. Mitä enemmän likaisen puolen vedessä on suoloja, sitä suurempi on pumppauksella voitettava osmoottinen paine. RO-laitteen erotuskyky on varsin hyvä. RO-laitteella on mahdollista poistaa veteen liuenneista suoloista 95–99 % (Puretec 2016).

RO-laitteen erotuskyky perustuu epäpuhtauksien kokoon ja varaukseen. Suolojen lisäksi RO-laite kykeneekin erottamaan vedestä myös partikkeleita, kolloideja, orgaanisia aineita,

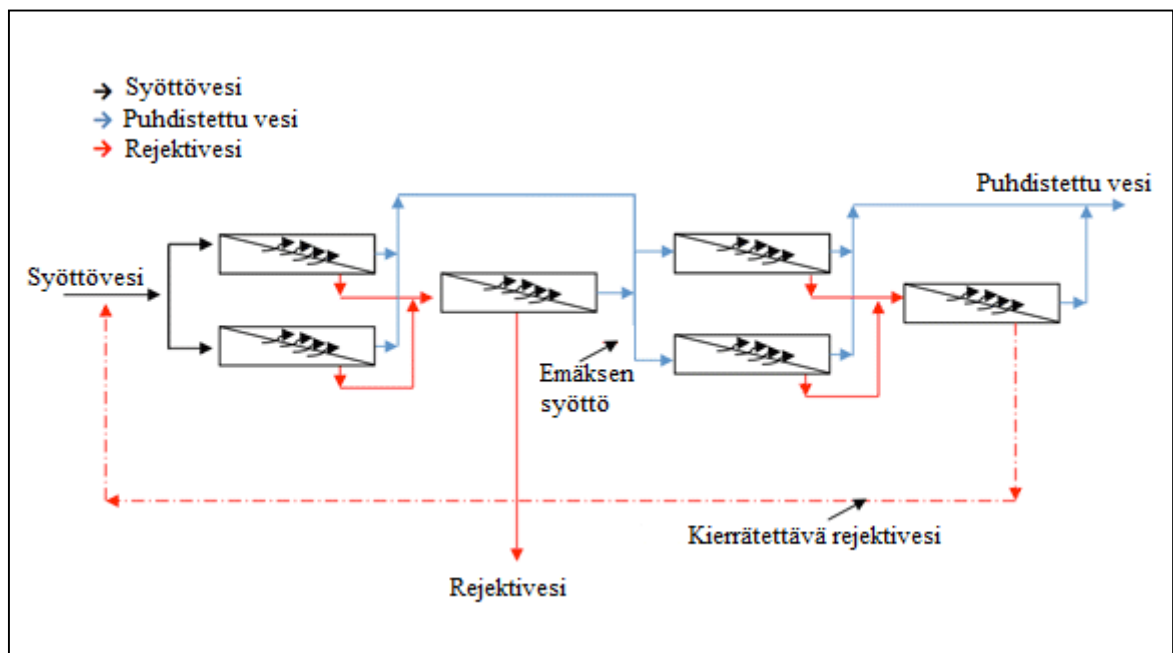
bakteereja ja pyrogeeneja. Toimiva RO-laite ei päästä puoliläpäisevän kalvon läpi epäpuhtauksia, joiden moolimassa on suurempi kuin 200 g/mol (esimerkiksi veden moolimassa on 18 g/mol). Suuremman sähkövarauksen epäpuhtauksien on haastavampi läpäistä RO-laitteen kalvon kuin pienen varauksen epäpuhtauksien. Johtuen epäpuhtauksien kokoon ja varaukseen perustuvaan erotuksesta, RO-laite ei poista kaasuja puhdistettavasta vedestä. Esimerkiksi hiilidioksidia (CO₂) RO-laite ei saa poistettua, sillä hiilidioksidi on kevyt ja lähes varaukseton. Tämän vuoksi RO-laitteella puhdistetun veden pH voi olla hieman normaalia matalampi, sillä CO₂ muodostaa hiilihappoa, joka aiheuttaa veteen happamuutta. (Puretec 2016.)

RO-laitteen tehokkuutta voidaan parantaa laittamalla useampi puhdistusvaihe peräkkäin (kuva 24). Tällöin toinen puhdistusvaihe käyttää syöttövetenä ensimmäisen vaiheen likaista rejektivettä. Tällaisella kytkennällä saadaan nostettua tuotetun puhdistetun veden määrää. Kaksivaiheinen kytkentä ei kuitenkaan tuota merkittävästi parempilaatuista vettä kuin yksivaiheinen RO-laite.



Kuva 24: Kaksivaiheinen RO-laite (Puretec 2016).

Yllä oleva kytkentä lisää RO-laitteen tuottaman puhtaan veden määrää, mutta samalla paineero laitteen yli kasvaa huomattavasti. Toiseen vaiheeseen tulevan syöttöveden epäpuhtauksien konsentraatio on suurempi kuin ensimmäisessä vaiheessa, sillä ensimmäisessä vaiheessa vedestä on kalvon läpi poistettu suurin osa puhtaasta vedestä. Suurempi epäpuhtauksien konsentraatio lisää osmoottista painetta toisessa vaiheessa. Parempilaatuista puhdasta vettä on mahdollista saada kytkemällä peräkkäin useampi RO-kalvo niin, että puhdas vesi käy useamman vaiheen läpi (kuva 25).



Kuva 25: RO-laitteen kaksoiskytkentä. Mahdollinen emäksen syöttö tulee puhdistettuun veteen ensimmäisen kaksivaiheen jälkeen. (Puretec 2016.)

Tällainen kytkentä mahdollistaa paremman vedenlaadun lisäksi esimerkiksi hiilidioksidin poistamisen vedestä (Puretec 2016). Ensimmäisen RO-kalvon jälkeen puhtaaseen veteen voidaan syöttää emäksistä ainetta, joka nostaa veden pH-arvoa. Tällöin vedessä oleva hiilidioksidi muodostaa bikarbonaatti- (HCO_3^-) ja karbonaatti-ioneja (CO_3^{2-}), jotka on mahdollista poistaa vedestä RO-laitteen toisessa vaiheessa. Yksivaiheisessa RO-laitteessa tämä ei ole mahdollista, sillä emäksisen aineen syöttäminen kationeja sisältävään veteen aiheuttaa RO-laitteen kalvon tukkeutumista. (Puretec 2016.)

Likaista vettä, kuten savukaasulauhdetta, ei voida suoraan syöttää RO-laitteelle. Vesi, joka sisältää RO-laitteen kannalta vääränlaisia epäpuhtauksia, voi aiheuttaa laitteen tukkeutumista tai likaantumista. Ennen RO-laitteelle syöttämistä vedestä tulee poistaa muun muassa hiekka, savi, kloori ja klooriamiinit (Puretec 2016.)

6.4.3 Kalvosuodatintyypit

Kalvosuodattimien permeaattituoton kannalta suodatuspinta-alalla on suuri merkitys. Suodattimen koon ja kalvojen pinta-alan kasvaessa kuitenkin myös investointikustannukset kasvavat. Tämän vuoksi kalvosuodattimissa pyritään mahdollisimman suureen pakkaustiheyteen (m^2/m^3) (Lenntech 2016a). Kalvot voidaan jakaa putki- ja tasokalvoihin niiden valmistavan mukaan. Putkimaisia kalvoja ovat onttokuitu-, kapillaari- ja putkikalvot ja tasokalvoja spiraali- ja tasokalvot. Pakkaustiheyden lisäksi kalvoissa tulee huomioida niiden tukkeutumisherkkyys, puhdistaminen ja riittävän virtauksen mahdollistaminen.

Putkikalvoissa puhdistettava neste virtaa kalvoputkissa, jotka sijaitsevat suurempien putkien sisällä. Puhdistettu permeaatti virtaa kalvoputkien seinämien läpi ja likainen retentaatti jatkaa putken kautta pois suodattimesta. Putkisuodattimien tyypillinen putken halkaisija on 5–15 mm, jolloin ne eivät tukkeudu helposti. Suurien putkien vuoksi pakkaustiheys jää kuitenkin pieneksi, mikä nostaa investointikustannuksia. (Lenntech 2016d.) Kuvassa 26 on esimerkki putkimallisesta kalvosuodattimesta.

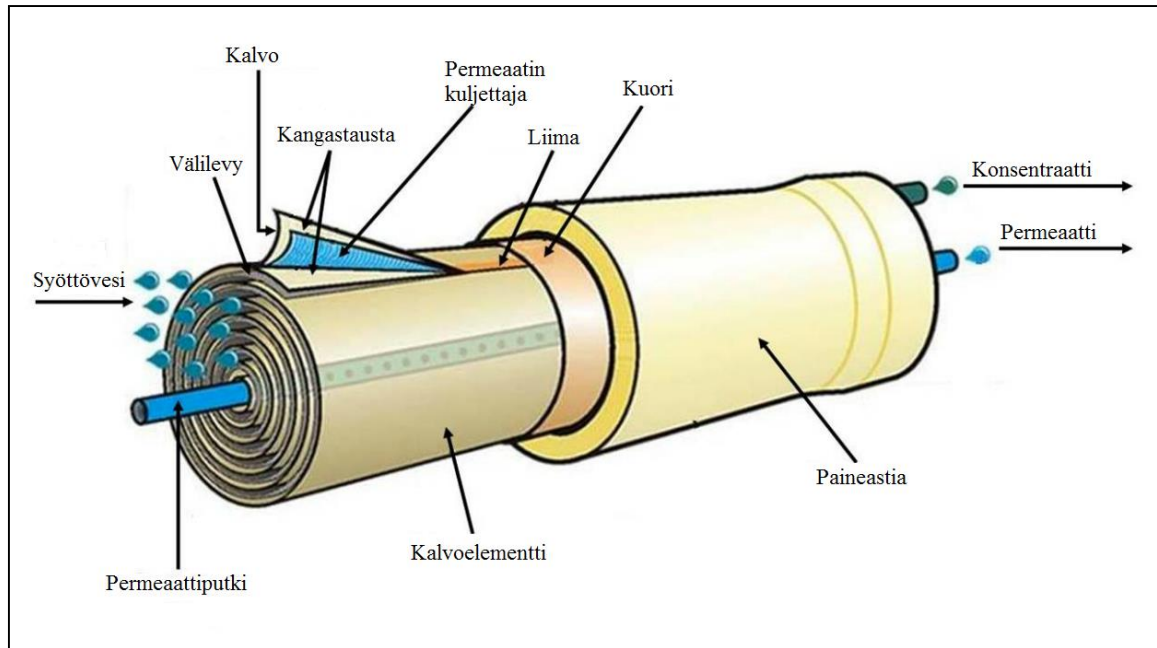


Kuva 26: Putkimallinen kalvosuodatin. Puhdistettava neste virtaa pienempien putkien sisällä ja puhdistettu permeaatti poistuu yksikön kyljestä olevasta aukosta. (Forward Osmosis Tech 2016.)

Kapillaarikalvot ovat rakenteeltaan samantyyppiset kuin putkikalvot, mutta niissä putket ovat halkaisijaltaan 0,5–5 mm. Yksi kapillaariputki sisältää aina useamman syöttökanavan. Kapillaarikalvoissa permeaattivirtaus voi olla joko putkien sisältä ulos tai toisinpäin. Pienemmät putket mahdollistavat suuremman pakkaustiheyden kuin putkikalvoissa, mutta samalla tukkeutumisriski on suurempi. Onttokuitukalvot ovat putkikalvojen pienin tyyppi. Niissä kalvojen sisähalkaisija on 70–600 μm (Smolander 2015, 44). Erittäin pienien putkien vuoksi ne soveltuvat vain pientä kiintoainesta sisältävän veden puhdistamiseen suuren tukkeutumisriskin vuoksi. Onttokuitukalvoja käytetään lähes aina nanosuodatuksessa. (Lenntech 2016d.)

Spiraalikalvot ovat nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin yleisin kalvoratkaisu. Spiraalimoduulissa permeaattinkeräysputki on moduulin keskellä ja puhdistettava neste virtaa putken suuntaisesti sen ympärillä kalvojen läpi. Moduulissa on useampi levymainen kalvo, jotka on

kierteellä spiraalinmuodossa. Kalvot muodostavat kalvopareja, jotka ovat kiinni toisissaan kolmelta sivulta. Auki oleva sivu on kiinni permeaatinkeräysputkessa. Spiraalikalvoilla on suuri pakkaustiheys. (Smolander 2015, 49.) Alla olevassa kuvassa 27 on esimerkki spiraalikalvoista.



Kuva 27: Esimerkki spiraalikalvomoduulista. Syöttövesi suodattuu spiraalissa kalvon läpi ja permeaatti etenee putken keskelle. Konsentraatti poistuu moduulin päästä. (Porex 2016.)

Alla oleviin taulukkoihin 9 ja 10 on koottu vertailut erilaisista kalvosuodatintyypeistä ja niiden ominaisuuksista. Pakkaustiheyden kasvaessa investointikustannukset pienenevät, mutta toisaalta tukkeutumis- ja likaantumisherkyys kasvaa. Tiheämmin pakatuissa kalvoissa permeaatin päivätuotto on yleensä suurempi, mutta ne myös vaativat paremman esisuodatuksen.

Taulukko 9: Kalvosuodatintyyppien ominaisuuksien suhtautuminen toisiinsa (Smolander 2015, 42).

	Putkikalvot	Tasokalvot	Spiraalikalvot	Kapillaarikalvot	Onttokuitukalvot
Pakkaustiheys	Alhainen				Todella korkea
Investointikustannukset	Korkea				Matala
Foulaantumisherkyys	Alhainen				Todella korkea
Vuon palautuminen pesulla	Hyvä				Huono
Käyttökustannukset	Korkea				Matala

Taulukko 10: Vertailu kalvosuodatintyyppien ominaisuuksista (Cheremisinoff 2002 ,338).

Ominaisuus	Kalvotyyppi		
	Putkikalvo	Spiraalkalvo	Onttokuitukalvo
Pakkaustiheys [m ² /m ³]	300	1000	15 000
Sisähalkaisija [mm]	20–50	4–20	0,5–2
Syöttöveden virtaus päivässä [l/m ²]	300–1000	300–1000	30–100
Tuotto päivässä [m ³ /m ³ _{kalvo}]	100–1000	300–1000	450–1500
Esisuodatus tarve	Pieni	Keskiverto	Suuri
Tukkeutumisherk- kyys	Pieni	Keskiverto	Suuri
Mekaaninen puhdis- tus	Mahdollinen	Ei mahdollinen	Ei mahdollinen
Kemiallinen puhdis- tus	Mahdollinen	Mahdollinen	Mahdollinen

6.5 Kemikaalit lauhteenkäsittelyssä

Lauhteenkäsittelyssä kemikaaleja käytetään eri vaiheissa puhdistusprosessia tehostamaan suodatusprosesseja ja esisuodatuksena erilaisten partikkelien poistoon. Tyypillisesti kemikaaleja käytetään flokkauksen tehostamiseen ja pH:n säätämiseen. Käytettyjä flokkaukemi-
kaaleja ovat muun muassa alumiinisulfaatti Al₂(SO₄)₃ ja ferrikloridi FeCl₃. pH:n säätöön

käytetään kalkkia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, lipeää NaOH ja natriumaluminaattia NaAlO_2 . (Luostarinen 2013, 18.)

Flokkauskemikaalien avulla lauhhteessä olevat partikkelit saadaan kiinnittymään toisiinsa ja muodostamaan suurempia partikkeleita, jotka on helpompi poistaa puhdistettavasta lauhhteesta. Tässä prosessissa pH:n säätö on tärkeässä roolissa, sillä liian korkea tai matala pH estää partikkeleiden kiinnittymisen toisiinsa. (Luostarinen 2013, 18.)

Flokkauskemikaaleista alumiinisulfaatti ei ole korrodoivaa ellei se esimerkiksi ole kontaktissa ilmankosteuden kanssa. Alumiinisulfaatin pH on alhainen (~3,5) ja se reagoi vedessä olevien alkaalisten yhdisteiden kanssa laskien pH:ta. Jotta veden pH ei laske liian alhaiseksi, voidaan siihen syöttää kalkkia, lipeää tai muuta pH:ta nostavaa kemikaalia. (Cheremisinoff 2002, 91 & 96.)

Ferrokloridi on toisin kuin alumiinisulfaatti korrodoivaa, mutta halvempaa. Ferrokloridi reagoi alumiinisulfaatin tavoin hydroksidi-ioneiden kanssa laskien veden pH:ta. Ferrokloridi voi jättää vaikeasti poistettavia tahroja putkistojen ja astioiden pintoihin. (Cheremisinoff 2002, 97.)

Lauhtenkäsittelyssä pH:n säätäminen on tärkeässä roolissa, sillä jotkin lauhhtenkäsittelyn prosessit ja laitteet vaativat tietyn pH-tason toimiakseen kunnolla. Kemikaalit, joita käytetään pH:n säätöön, tulee syöttää lauhhtenkäsittelyprosessiin niin, että pH on halutulla tasolla jokaisessa prosessin eri vaiheessa.

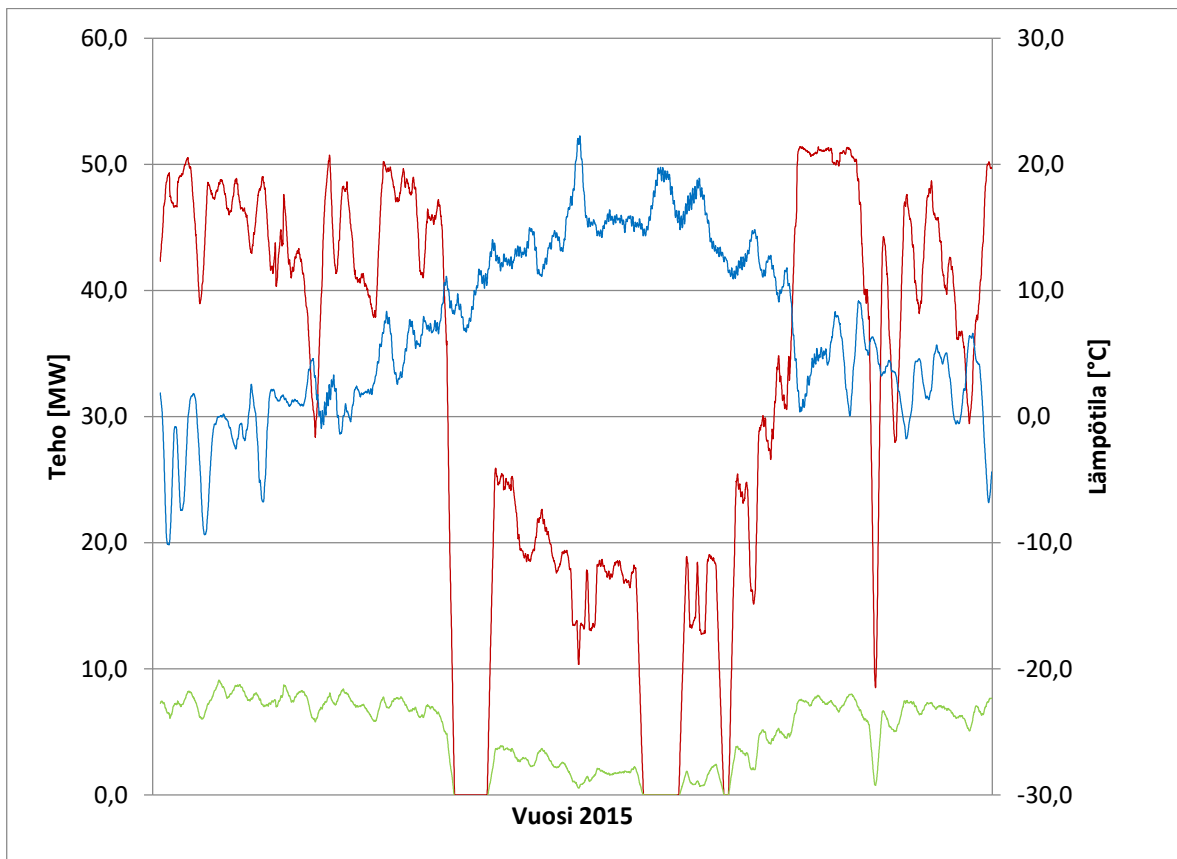
7 LAUHTEN HYÖDYNTÄMINEN

Savukaasupesurilta poistettava lauhdevesi on voimalaitoksille pitkälti jätettä, josta on päästävää eroon. Lauhteesta puhdistetaan kiintoainesta ja muita epäpuhtauksia niin paljon kuin on tarpeellista, jonka jälkeen käsitelty lauhde lasketaan poistoviemäriin tai vesistöön. Vaikka savukaasupesurissa lauhdeesta saadaan paljon lämpöä talteen kaukolämmön paluuveteen, on pesurista poistettava lauhde silti vielä lämmintä, parhaimmillaan jopa 60-asteista. Kaukolämmön- ja sähköntuotantoon lauhteen lämpötilataso ei tuossa vaiheessa ole enää riittävä, mutta sen lämpöenergiaa on mahdollista hyödyntää muualla voimalaitoksessa. Lämmön lisäksi lauhdevettä itsessään voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön lisäveden valmistuksessa, mikä vähentää voimalaitoksen raakaveden tarvetta.

Tässä diplomityössä lauhteen hyötykäyttöä tarkastellaan esimerkklaitoksen kautta. Esimerkkinä toimii Elenia Lämpö Oy:n Vanajan voimalaitoksen K5 kattilan savukaasupesuri. Potentiaalisia lauhteen lämmön hyödyntämiskohteita on etsitty Vanajan voimalaitoksen tarpeiden ja mahdollisuuksien perusteella, joten tässä työssä esitellyt potentiaaliset hyödyntämiskohteet eivät ole ainoita, joissa lämpöä voidaan hyödyntää. Muilla laitoksilla mahdolliset kohteet voivat olla erilaisia ja vastaavien kohteiden lämmönhyödyntämispotentiaali erisuuruisen.

Vanajan voimalaitoksen K5 kattila on vuonna 2009 käyttöönotettu kiertoileijukattila, jonka polttoaineteho on 58 MW. Kattila tuottaa höyryä nimellisteholtaan 20 MW:n höyryturbiinille ja kaukolämpö tuotetaan vastapaineella. Kattila voi käyttää polttoaineenaan pelkkää biopolttoainetta tai turvetta tai näiden sekoitusta. Kattilan jälkeen savukaasukanavassa on 10 MW tehoinen savukaasupesuri, josta on lämmöntalteenotto kaukolämmön paluuveteen. Ennen savukaasupesuria savukaasut puhdistetaan sähkösuodattimella. Pesurilta pohjalta likainen lauhde poistetaan lauhtenkäsittelyn kautta ja lasketaan laitoksen viereiseen vesistöön. Lauhtenkäsittely sisältää lietteen poiston sekä pH:n ja lämpötilan säädön. Voimalaitoksella on käytössä kaukolämpöakku, jolla tasataan kaukolämmön kuormitusvaihteluita. Kaukolämpöakku mahdollistaa kattilalle suuremman käyttötehon ja paremman hyötysuhteen alhaisessa kulutustilanteessa. (Hämeen ympäristökeskus 2008, 5–11.)

Savukaasupesurista poistettavan lauhteen määrä ja lämpötila ovat tärkeimpiä tekijöitä, kun mietitään lauhteen hyötykäyttöä. Myös lauhteen sisältämällä epäpuhtauksilla, pH:lla ja muilla ominaisuuksilla on merkitystä, jos lauhdetta on tarkoitus hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön lisäveden valmistukseen. Tällöin lauhteen ominaisuudet määrittävät millaiset puhdistuslaitteet lauhteenkäsittely vaatii. Muodostuvan lauhteen määrään ja lämpötilaan vaikuttavat savukaasun määrä ja kosteus sekä kuinka paljon lämpöä pesurin lämmönvaihdin siirtää kaukolämmön paluuveteen. Lauhdetta muodostuu kokemuksen mukaan savukaasupesurissa noin $1 \text{ m}^3/\text{MWh}$. Kuvassa 28 kuvataan ulkolämpötilan vaikutusta tarkasteltavan kattilan ja pesurin tehoon Vanajan voimalaitoksella.



Kuva 28: Ulkolämpötilan vaikutus kattilan ja pesurin tehoon. Ulkolämpötila (°C) kuvaajassa sinisellä, kattilan K5 höyryteho (MW) punaisella ja savukaasupesurin lämmönvaihtimen teho vihreällä (MW). Tarkastelujaksona 1.1.–31.12.2015.

Yllä olevasta kuvasta 28 nähdään, että vaikka ulkolämpötila ja siten kaukolämmöntarve vaikuttavat selkeästi kattilan tehoon, on pesurin teho huomattavasti tasaisempi. Pesurin teho ei vaihtele kattilan tehon mukana, kun voimalaitoksen ajotavassa pyritään saamaan pesuriin

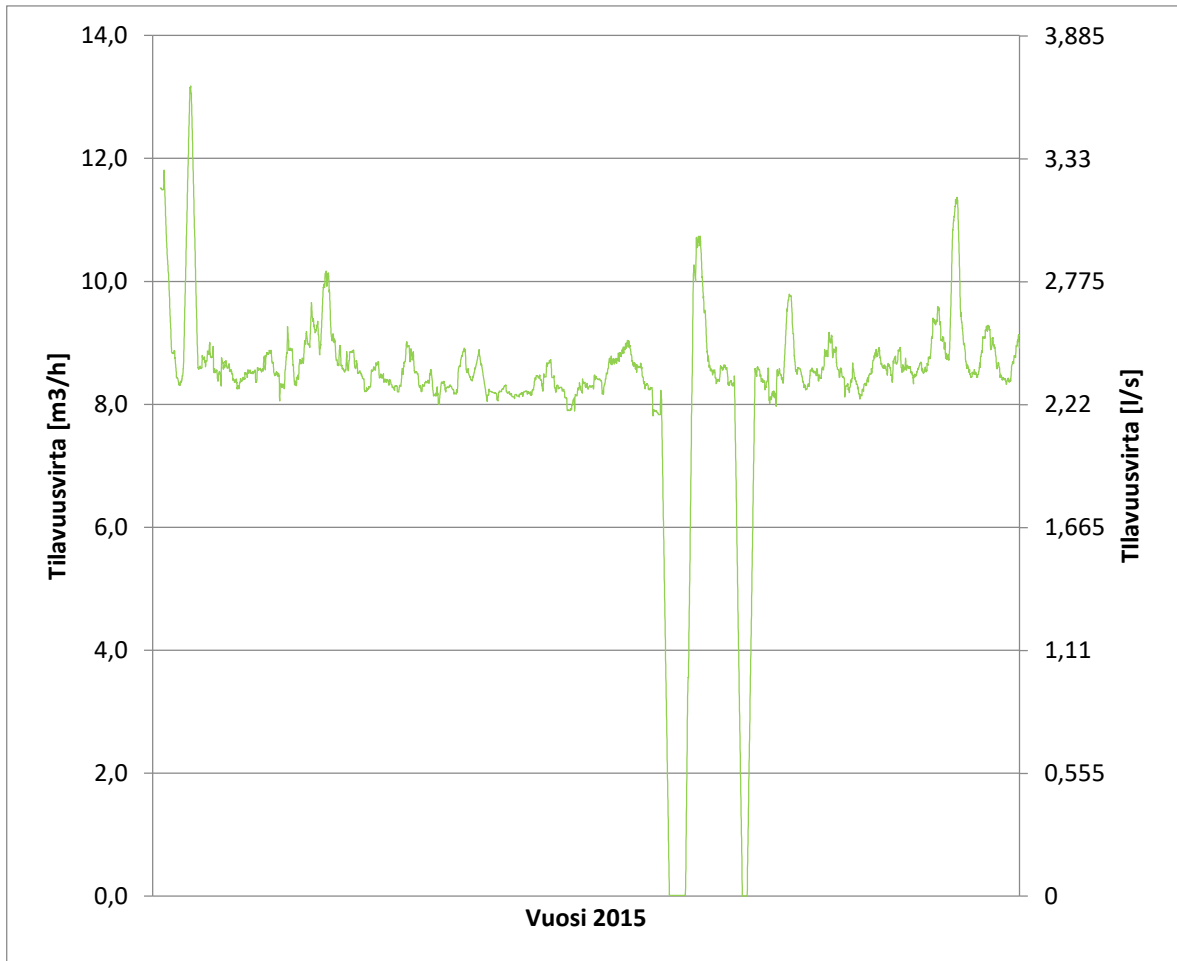
mahdollisimman optimaaliset olosuhteet. Tällöin myös pesurilta tuleva lauhde on pitkälti tasalaatuista, mikä tekee lauhteen hyötykäytöstä ennakoitavampaa.

Yllä oleviin tietoihin, muihin mittauksiin ja aiemmin tehtyihin selvityksiin pohjautuen tarkastellaan voimalaitoksella olevia potentiaalisia kohteita lauhteen lämmön hyötykäytölle. Tarkastelussa pyritään löytämään kohteita, jotka vähentävät omakäyttölämmön tai -sähkön tarvetta tai muuten parantavat voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta. Tarkastelussa potentiaalisiksi lämmön hyödyntämiskohteiksi huomattiin raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmitys, kattilan palamisilman esilämmitys ja voimalaitoksen rakennusten lämmitys. Lämmön hyödyntämisvaihtoehtoja on useita ja lauhteesta saatava lämpö ei riitä kaikkien kohteiden lämmittämiseen halutulle tasolle. Varsinkin palamisilman lämmittämiseen on mahdollista hyödyntää kaikki saatavissa oleva lämpö, sillä ulkolämpötilan laskiessa palamisilman tarve kasvaa, joka moninkertaistaa lämmön tarpeen. Tarkastelun perusteella lämmityskohteista priorisoidaan raakaveden ja lisäveden lämmitystä sekä palamisilman esilämmitystä. Rakennusten lämmittämiseen lauhdetta käytetään vain, jos sitä on riittävästi saatavilla muiden lämmityskohteiden jälkeen.

Tarkastelun yhteydessä selvitettiin myös voimalaitoksen muiden hukkalämmönlähteiden hyödyntämistä. Tarkastelussa päätettiin samalla selvittää kattilan jatkuvan ulospuhallushöyryn lämmön hyötykäyttöä samoihin kohteisiin lauhteen lämmöntalteenoton kanssa. JUP-höyryn lämmön hyödyntäminen jätetään kuitenkin tarkastelussa toissijaiseksi lauhteen lämmöntalteenoton ollessa ensisijainen tarkastelun kohde. Mitoitus ja laskenta löytyvät tämän diplomityön liitteestä 1.

7.1 Raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmittäminen

Käytettäessä pesurin lauhdetta raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmittämiseen, korvataan tällä näiden vesien lämmittämistä kaukolämmöllä. Näin ollen lauhteen hyödyntäminen vähentää voimalaitoksen omakäyttölämmön tarvetta. Alla olevaan kuvaan 29 ja taulukoon 11 on koottu Vanajan voimalaitoksen raakaveden ja kaukolämmön lisäveden tunnuslukuja ja tietoja, joiden perusteella tarkastelua tehdään.



Kuva 29: Vanajan voimalaitoksen raakaveden keskiarvoinen kulutus vuoden 2015 aikana.

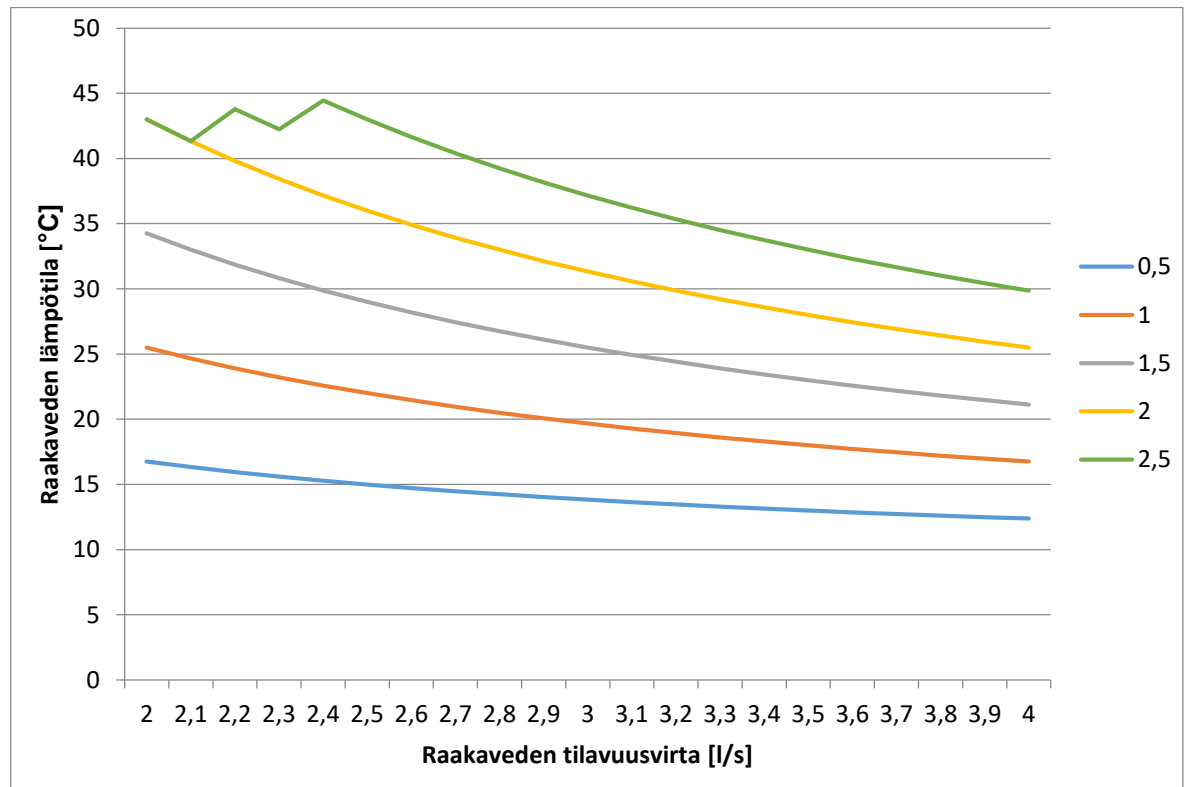
Taulukko 11: Raakaveden ja kaukolämmön lisäveden tarve ja lämmitys Vanajan voimalaitoksella.

	Raakavesi	KL-lisävesi
Tulolämpötila [°C]	8	20
Tavoitelämpötila [°C]	20	–
Kulutus [m ³ /h]	8–10	–
Kokonaiskulutus [m ³ /a]	73 000	0–5000

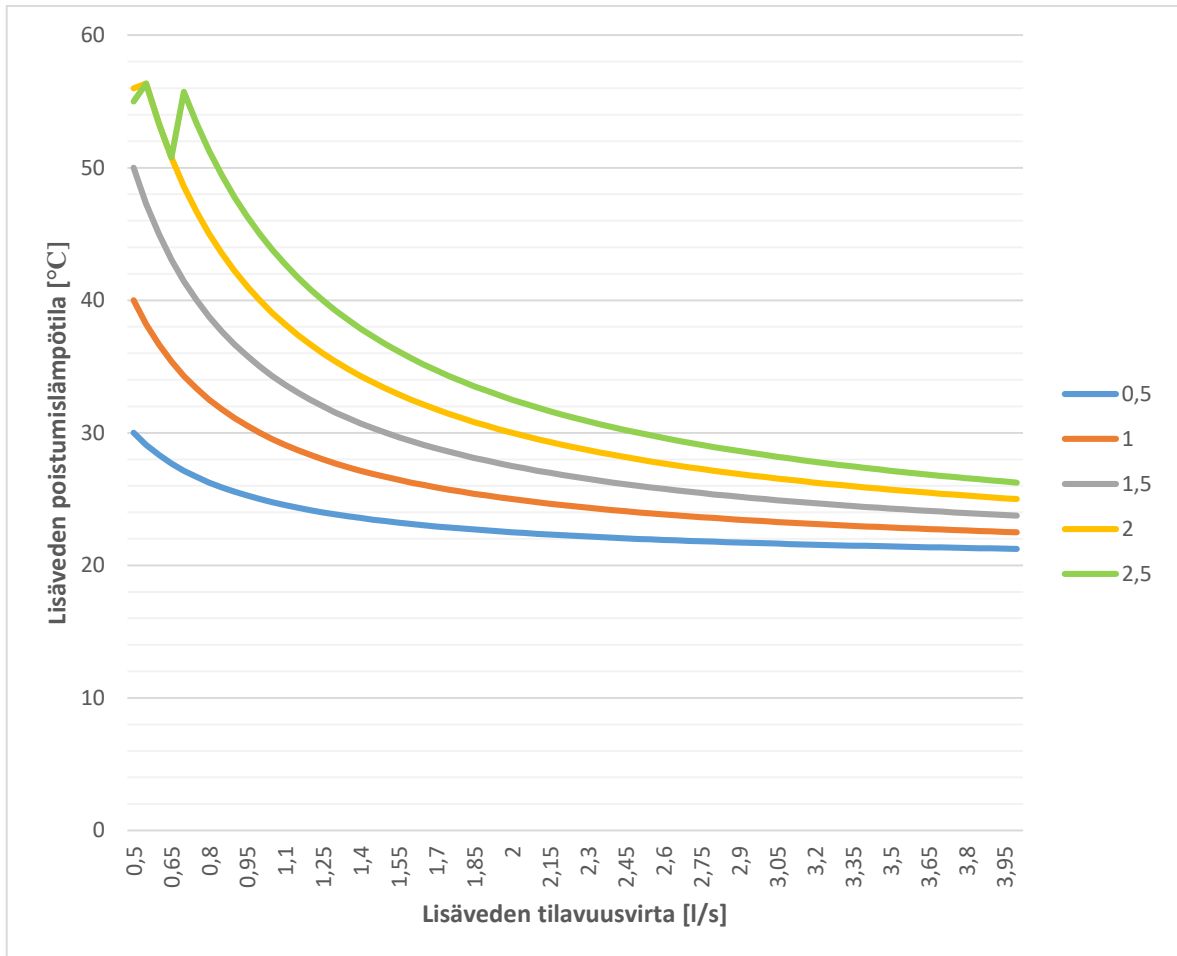
Voimalaitoksella on lähes jatkuva raakaveden tarve. Raakavettä otetaan yli 8 m³/h läheisestä järvestä sen keskilämpötilan ollessa noin 8 °C. Raakavettä ei voida lämmittää yli 20-asteiseksi, sillä tämä aiheuttaisi levän, bakteerien ja muiden vastaavien kasvua putkistoissa ja

säiliöissä. Kaukolämmön lisäettä tarvitaan raakavettä huomattavasti harvemmin ja suurimman osan vuodesta lisäettä ei oteta ollenkaan. Kun lisäettä otetaan, sen tilavuusvirta on noin $3 \text{ m}^3/\text{h}$. Lisävesi on puhdasta ja se on säiliössä noin 20-asteisena. Tällöin sen lämmittämisellä ei ole samanlaista ylärajaa kuin raakavedellä. Tavoitteena on lämmittää lisävesi mahdollisimman lämpimäksi ennen sen syöttämistä syöttövesisäiliöön.

Mittaustietojen ja taulukon 11 arvojen perusteella tarkastellaan lämmönsiirtoprosessia, jossa lauhdeella lämmitetään kaukolämmön lisäettä ja raakavettä. Lauhde kulkee ensin lämmönsiirtimeen, jossa toisella puolella virtaa lisävesi ja sen jälkeen lauhde siirtyy raakavesilämmönvaihtimeen. Lämmönsiirtimien laskentaan käytetään NTU-menetelmää. Kuvista 30 ja 31 sekä taulukoista 12 ja 13 nähdään laskennan tulokset.



Kuva 30: Raakavesi-lauhdelämmönvaihtimen mitoitus viidellä eri lauhteen tilavuusvirralla (l/s).



Kuva 31: Lisävesi-lauhdelämmönvaihtimen mitoitus viidellä eri lauhteen tilavuusvirralla (l/s).

Taulukko 12: Raakavesi-lauhdelämmönvaihtimen arvot.

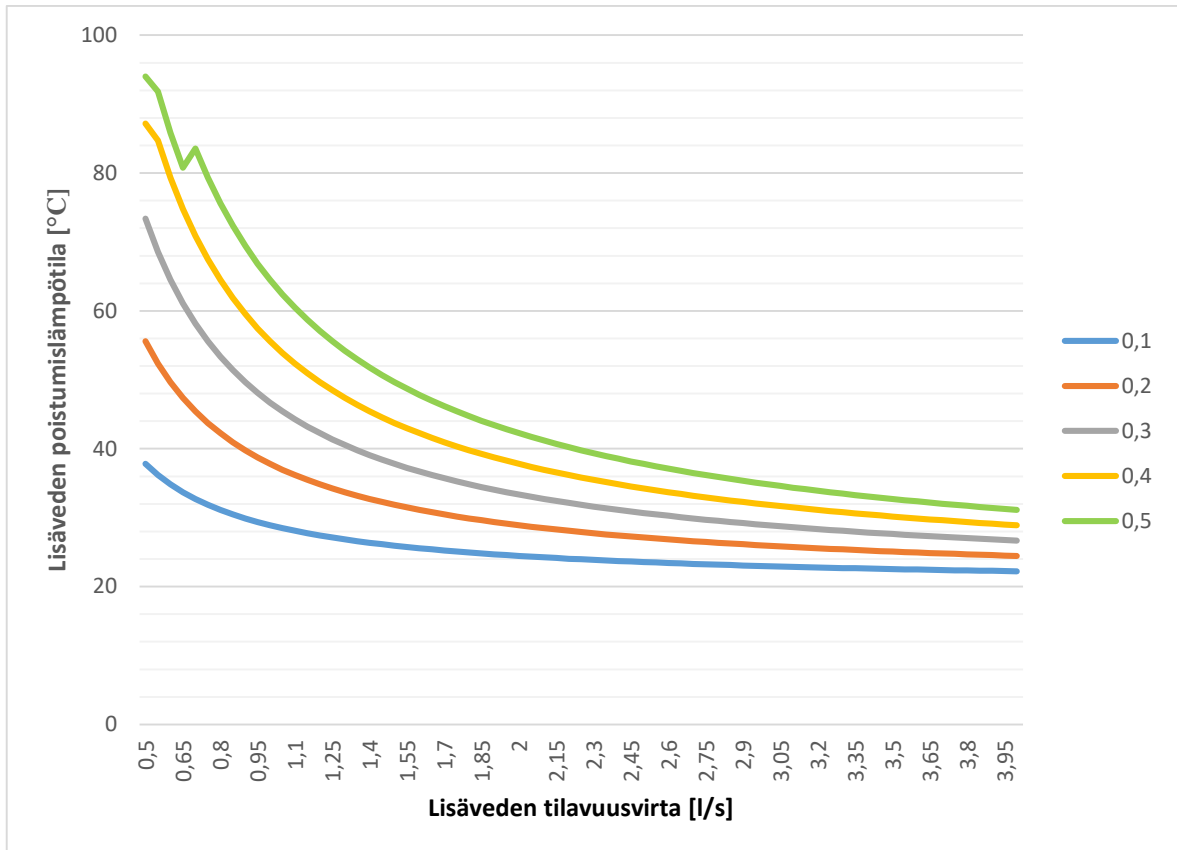
Raakavesi-lauhdelämmönvaihdin	Raakavesi	Lauhde
Lämpötila sisään/ulos [°C]	8/20	50/37
Tilavuusvirta [l/s]	2,2–3,3	0,8–1,2
Lämmönsiirtimen teho [kW]	50	
Siirretty lämpö [MWh/a]	1020	

Taulukko 13: Lisävesi-lauhdelämmönvaihtimen arvot.

Lisävesi-lauhdelämmönvaihtimen	Lisävesi	Lauhde
Lämpötila sisään/ulos [°C]	20/34–45	60/50
Tilavuusvirta [l/s]	0–2,0	1,2–1,8
Lämmönsiirtimen teho [kW]	150	
Siirretty lämpö [MWh/a]	90	

Yllä olevista kuvista ja taulukoista nähdään, että lauhteen hyödyntäminen lisäveden ja raakaveden lämmitykseen on mahdollista. Molemmissa tapauksissa lämmön talteenotossa päästään tavoitteeseen ja vuositasolla talteenotettavaa lämpö määrää voidaan pitää merkittävänä. Tarvittava lauhteen määrä (1,2–1,8 l/s) on pienempi kuin mitä pesurista poistetaan käytön aikana.

Kattilan jatkuvan ulospuhalluksen lämpöä ei voida hyödyntää raakaveden lämmittämiseen, sillä jo pelkällä lauhteen lämmöllä raakaveden lämpötila saadaan nostettu maksimitasolle. Kaukolämmön lisäveden lämmittämiseen JUP-lämpöä voidaan kuitenkin hyödyntää sijoittamalla lisävesi-lauhdelämmönvaihtimen jälkeen lisävesi-JUP-lämmönvaihtimen. Kuvassa 32 ja taulukossa 14 esitellään lisävesi-JUP-lämmönvaihtimen arvoja, kun se sijoitetaan lisävesi-lauhdelämmönvaihtimen jälkeen.



Kuva 32: Lisävesi-JUP-lauhdelämmönvaihtimen mitoitus viidellä eri lauhteen tilavuusvirralla (l/s).

Taulukko 14: Lisävesi-JUP-lämmönvaihtimen arvot.

Lisävesi-JUP-lämmönvaihdin	Lisävesi	JUP-lauhde
Lämpötila sisään/ulos [°C]	34–45/48–61	104/65
Tilavuusvirta [l/s]	0–2,0	0,2–0,4
Lämmönsiirtimen teho [kW]	100	
Siirretty lämpö [MWh/a]	60	

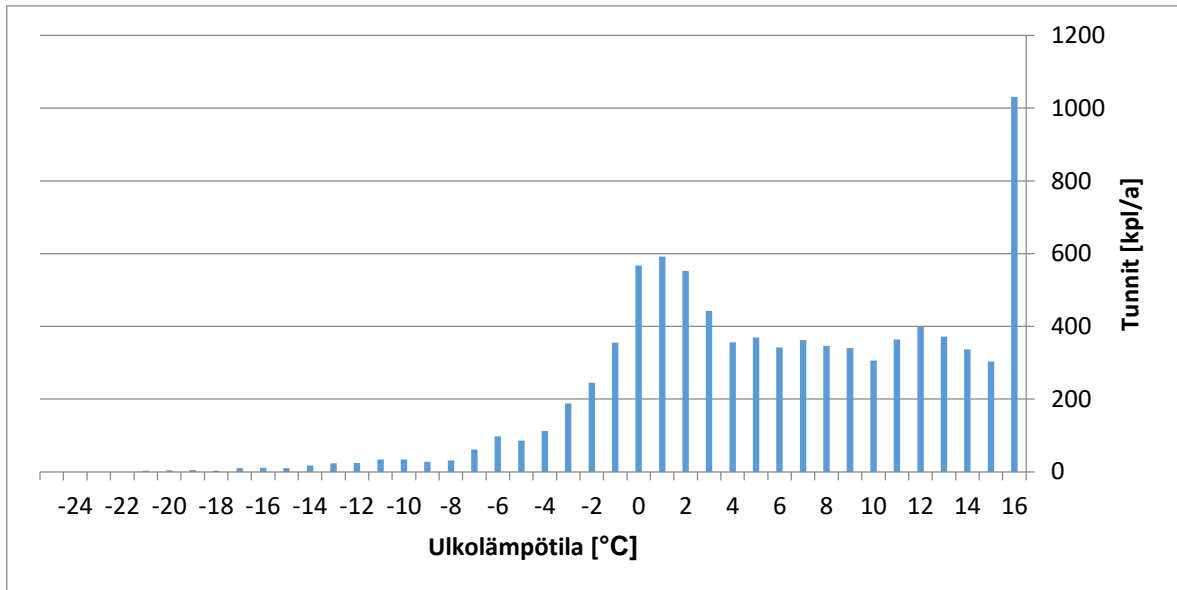
7.2 Palamisilman esilämmitys

Palamisilman esilämmitys vähentää kattilan polttoaineen kulutusta, kun ilmaa tarvitsee lämmittää vähemmän itse kattilassa. Palamisilman lämmitys kuitenkin muuttaa hieman kattilan olosuhteita, joten lisätty palamisilman esilämmitys tulee huomioida kattilan käytössä. Palamisilman lämmittämiseen voi käyttää kaiken lauhteesta saatavissa olevan lämmön, jota ei hyödynnetä joku muualla.

Vanajan voimalaitoksella lauhteen lämmön hyödyntämistä tarkastellaan kattilan K5 palamisilman esilämmitykseen. Mitoituksessa palamisilmaa lämmitetään aina kun ulkolämpötila on alle 15 °C. Palamisilman lämpötila pyritään nostamaan mahdollisimman korkeaksi. Jos lauhteen lämpö ei riitä palamisilman lämmittämiseen halutulle tasolle, voidaan tarvittaessa loput lämmityksestä tehdä kaukolämmöllä. Alla olevissa kuvassa 33 ja taulukossa 15 kuvataan Vanajan voimalaitoksen K5 kattilan palamisilman tarvetta ja olosuhteita.

Taulukko 15: Suunniteltu K5 kattilan palamisilman lämmitys Vanajan voimalaitoksella.

Ulkolämpötila [°C]	Palamisilman tarve (kattilan tehon perusteella) [kg/s]
yli 15	9
10 – 15	10 – 20
5 – 10	20 – 25
< 5	25



Kuva 33: Ulkolämpötilan jakauma Hämeenlinnassa vuonna 2015. Kaikki yli 15 °C tunnit (1031 kpl) on summattu viimeiseen sarakkeeseen.

Kattilan palamisilma otetaan kattilahuoneen katon kautta. Palamisilma puhalletaan kattilahuoneeseen tuloilmapuhaltimilla, joiden ilmavirtaa säädetään kattilan tehon mukaan. Tuloilmapuhaltimissa on jälkilämmityspatterit, joiden avulla ilmaa lämmitetään. Jälkilämmityspattereita on kaksi kappaletta. Ensimmäisessä ilmaa lämmitetään savukaasulauhteella ja toisessa jatkuvan ulospuhalluksen lämmöllä. Palamisilman lämmitys mitoitetaan niin, että ulkoilmaa otetaan kattilan tehon mukaisesti ja lämmitys on käytössä, kun ulkolämpötila on alle 15 °C. Näin ollen lämmitys olisi käytössä noin 90 % vuoden tunneista. Alla olevassa taulukoissa 16 ja 17 esitellään jälkilämmityspattereiden mitoitus.

Taulukko 16: Ilma-lauhdelämmönvaihtimen arvot 37 °C lauhteella.

Ilma-lauhdelämmönvaihdin	Ilma	Lauhde
Lämpötila sisään/ulos [°C]	-25 – 15/-17 – 23	37/11 – 28
Tilavuusvirta [l/s]	9000 – 26 000	1,9
Lämmönsiirtimen teho [kW]	200	
Siirretty lämpö [MWh/a]	1200	

Taulukko 17: Ilma-jatkuva ulospuhalluslämmönvaihtimen arvot.

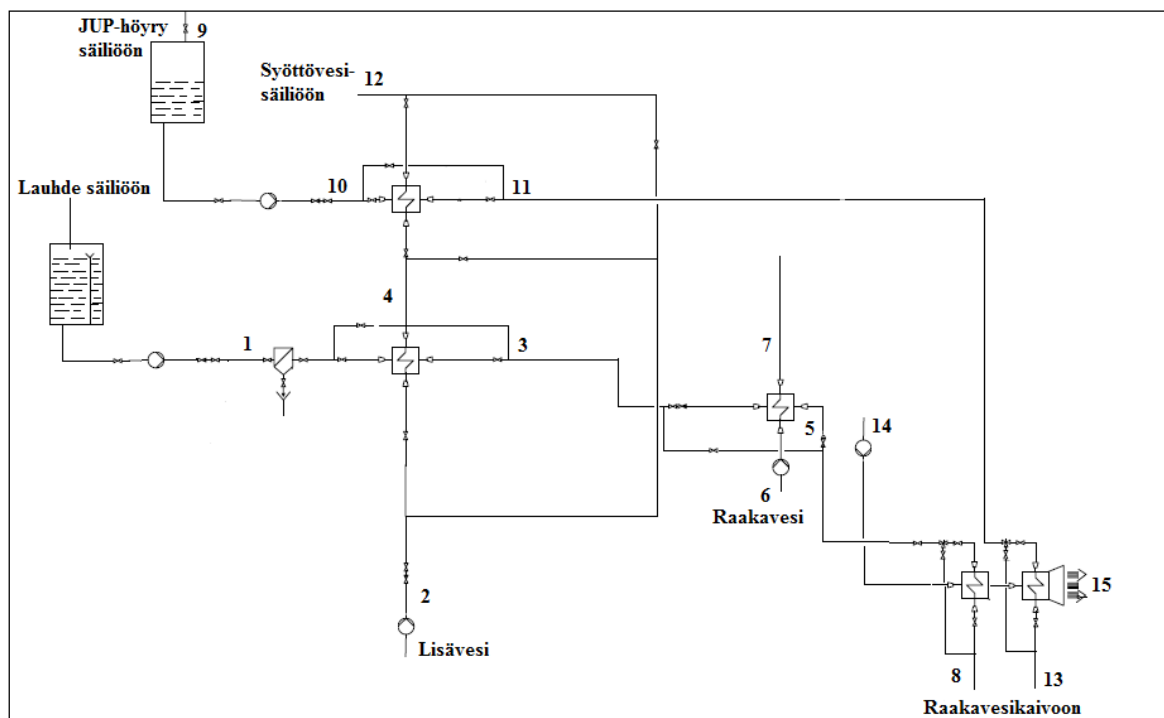
Ilma-JUP-lämmönvaihdin	Ilma	JUP-lauhde
Lämpötila sisään/ulos [°C]	-17 – 23/-15 – 25	65/13–35
Tilavuusvirta [l/s]	9000 – 26 000	0,2–0,4
Lämmönsiirtimen teho [kW]	40	
Siirretty lämpö [MWh/a]	250	

Yllä olevista taulukoista voidaan todeta, että lauhteen lämmöllä on mahdollista lämmittää kattilan palamisilmaa. Johtuen palamisilman suuresta määrästä, sen lämpötilaa ei saada nostettua kovin montaa astetta, mutta vuodessa palamisilman lämmityksellä säästetty energiamäärä on merkittävä.

Myös lisävesi-JUP-lämmönvaihtimelta tulevalta JUP-lauhteesta on vielä riittävästi lämpöä tuloilman lämmittämiseen. Syntyvän JUP-lauhteen määrä on kuitenkin vähäinen, minkä vuoksi siitä riittää lämpöä korkeintaan yhdelle lämmönvaihtimelle. Lämpöä on kuitenkin sen verran, että se kannattaa hyödyntää, eikä päästää sellaisenaan viemäriin.

7.3 Lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmä

Edellä laskettuihin tietoihin pohjautuen saadaan mitoitettua alla olevan kuvan 34 mukainen lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmä. Järjestelmä sisältää tuloilman lämmityksen sekä raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmönvaihtimet lauhteelle. Lisäksi järjestelmää täydennetään jatkuvan ulospuhalluksen lämmöntalteenotolla, jolla lämmitetään kaukolämmön lisävetä sekä tuloilmaa.



Kuva 34: Yksinkertaistettu kuva lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmästä.

Taulukossa 18 avataan kuvaan 34 merkityt tilapisteet. Tilapisteiden esimerkkiarvot ovat tilanteesta, kun ulkolämpötila on 5 °C.

Taulukko 18: Lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmän tilapisteet ulkolämpötilan ollessa 5 °C.

	Tilapisteet	Massavirta [kg/s]	Paine [bar]	Lämpötila [°C]
1	Pesurin lauhde pumpun jälkeen	1,9	3,0	60
2	Lisävesi säiliöltä	0,5	5,0	20
3	Lauhde lisävesi-lauhdevaihtimen jälkeen	1,9	3,0	50
4	Lisävesi lisävesi-lauhdevaihtimen jälkeen	0,5	4,0	43
5	Lauhde raakavesi-lauhdevaihtimen jälkeen	1,9	3,0	37
6	Raakavesi säiliöltä	2,0	3,0	8
7	Raakavesi raakavesi-lauhdevaihtimen jälkeen	2,0	3,0	20
8	Lauhde raakavesikaivoon	1,9	1,4	16
9	Höyry JUP-säiliöön	0,4	27,0	230
10	JUP-lauhde ennen lisävesi-JUP-vaihdinta	0,2	1,4	104
11	JUP-lauhde lisävesi-JUP-vaihtimen jälkeen	0,2	1,4	65
12	Lisävesi syöttövesisäiliöön	0,5	5,0	58
13	JUP-lauhde raakavesikaivoon	0,2	1,4	17
14	Ilma tuloilmakoneelle	24,0	1,0	5
15	Ilma tuloilmakoneen jälkeen	24,0	1,0	14

Savukaasupesurin lauhde tuodaan säiliöön lauhteenkäsittelystä selkeyttimen jälkeen. Säiliöstä lauhde pumpataan suodattimen kautta ensin lisäveden lämmönvaihtimelle ja sen jälkeen raakaveden lämmönvaihtimelle. Ennen päästämistä raakavesikaivoon, lauhdetta käytetään vielä tuloilman lämmittämiseen. Jatkuva ulospuhallushöyry tuodaan JUP-säiliöön, jossa se lauhtuu nesteeksi. Tämä lauhde pumpataan lisävesilämmönvaihtimelle, josta se vielä käytetään yhden tuloilmalämmönvaihtimen kautta ennen viemistä raakavesikaivoon. Kaikilla lämmönvaihtimilla on molemmin puolin ohitus- ja säätöventtiilit, joiden avulla järjestelmän lämmönsiirtokyky saadaan pidettyä mahdollisimman optimaalisena.

7.4 Lämmöntalteenoton kannattavuus

Lauhteen lämmöntalteenoton kannattavuus perustuu lähes kokonaan investointikuluihin, kaukolämmön tuotantokustannukseen sekä järjestelmän käyttö- ja kunnossapitokuluihin. Kaukolämmön tuotantokustannus on omakustannushinta, jonka voimalaitos joutuu maksamaan kaukolämmön tuotannostaan. Tuotantokustannus sisältää polttoaineen hinnan sekä

kaukolämmön tuotantokulut. Koska lauhteen lämmöntalteenotolla korvataan omakäyttölämpöperusteista lämmitystä, on kaukolämmön tuotantokustannus hinta, joka lämmöntalteenotolla säästetään sen vähentäessä omakäyttölämpöä. Kaukolämmön keskimääräinen tuotantokustannus puupohjaisia polttoaineita käyttävälle CHP-laitokselle on noin 40 €/MWh ja tätä hintaa käytetään määrittäessä lämmöntalteenoton taloudellisuutta (Ihalainen & Niskanen 2010, 42).

Alla olevaan taulukkoon 19 on kerätty suunnitellun lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmän kustannuksia. Käyttökustannukset on eritelty taulukossa 20. Käyttökustannukset on arvioitu muodostuvan pumppujen ja puhaltimien sähkömoottorien kuluttamasta sähköstä. Muiden laitteiden kuten mittalaitteiden ja säätöventtiilien aiheuttamat kulut ovat merkityksettömiä edellä mainittuihin kuluihin nähden.

Taulukko 19: Suunnitellun järjestelmän kustannukset.

Investointi	285 000 €
Lämmön tuotantokustannus	40 €/MWh
Sähkön keskimääräinen spot-hinta	29,66 €/MWh
Polttoaineen hinta	21,00 €/MWh
Huolto- ja kunnossapitokustannukset	4250 €/a

Taulukko 20: Suunnitellun järjestelmän käyttökustannukset.

	Käyttötunnit [h/a]	Kulutus [kWh/a]	Käyttökustannus [€/a]
Tuloilmapuhaltimet	7700	77 000	2284
Raakavesipumppu	8400	42 000	1246
Lisävesipumppu	1200	6000	178
Ulospuhalluspumppu	7700	15 400	457
Lauhdepumppu	8400	42 000	1246
Yhteensä		182 400	5411

Voimalaitoksella järjestelmän sähkönkulutus lisää omakäytösähkön tarvetta, jonka omakustannushinnaksi on arvioitu vuoden keskimääräinen sähkön pörssihinta. Vuoden keskimääräinen sähkön Suomen aluehinta vuonna 2015 oli 29,66 €/MWh, jota käytetään tarkastelussa sähkön hintana (Fingrid 2016). Laskennallisesti palamisilman esilämmitys vähentää kattilan polttoaineen kulutusta saman verran kuin palamisilman esilämmityksen kautta kattilaan tuodaan energiaa. Tällöin ei huomioida kattilan ajotavan ja palamisolosuhteiden muutosten vaikutusta kattilahyötysuhteeseen. Kannattavuuslaskennassa polttoaineen hintana käytetään vuoden 2016 (tammi-maaliskuu) keskimääräistä metsähakkeen hintaa Suomessa, joka oli 21,00 €/MWh (Tilastokeskus 2016).

Järjestelmän investointikustannukset on arvioitu voimalaitokselle aikaisemmin tehtyjen selvitysten ja arvioiden sekä toteutuneiden projektien pohjalta. Investointikustannusarvio on suuntaa-antava. Investointikustannusarvio on kuitenkin suuruusluokaltaan oikeansuuntainen. Investointikustannusarvio sisältää laiteinvestointien lisäksi putkistotyö sekä sähkö- ja automatiikkakustannukset. Huolto- ja kunnossapitokustannuksiksi on arvioitu vuodessa keskimäärin 1 % alkuperäisinvestoinnista. Huolto- ja kunnossapitokustannusarvio sisältää järjestelmälle vuosittain tehtävät huollot sekä mahdolliset laiteuusinnat.

Taulukossa 21 esitetään suunnitellun lämmöntalteenottojärjestelmän säästöpotentiaali voimalaitoksen todellisiin vuosikulutuksiin ja lämmöntarpeisiin verrattuna. Vaikkakin raakavettä lämmitetään keskimääräisestä kahdeksasta asteesta 20-asteiseksi, tuo sen lämmittäminen yli 50 % koko järjestelmän tuomasta säästöpotentiaalista. Tämä johtuu raakaveden huomattavasti suuremmasta tarpeesta verrattuna muihin lämmitystarpeisiin.

Taulukko 21: Suunnitellun järjestelmän säästöpotentiaali.

	Kulutus [m ³ /a]	Lämmitys [MWh/a]	Säästöpotentiaali [€/a]
Palamisilman esilämmitys	588 168 000	1471	30 890
Lisäveden lämmitys	3400	152	6080
Raakaveden lämmitys	73 000	1017	40 685
Yhteensä		2640	77 655

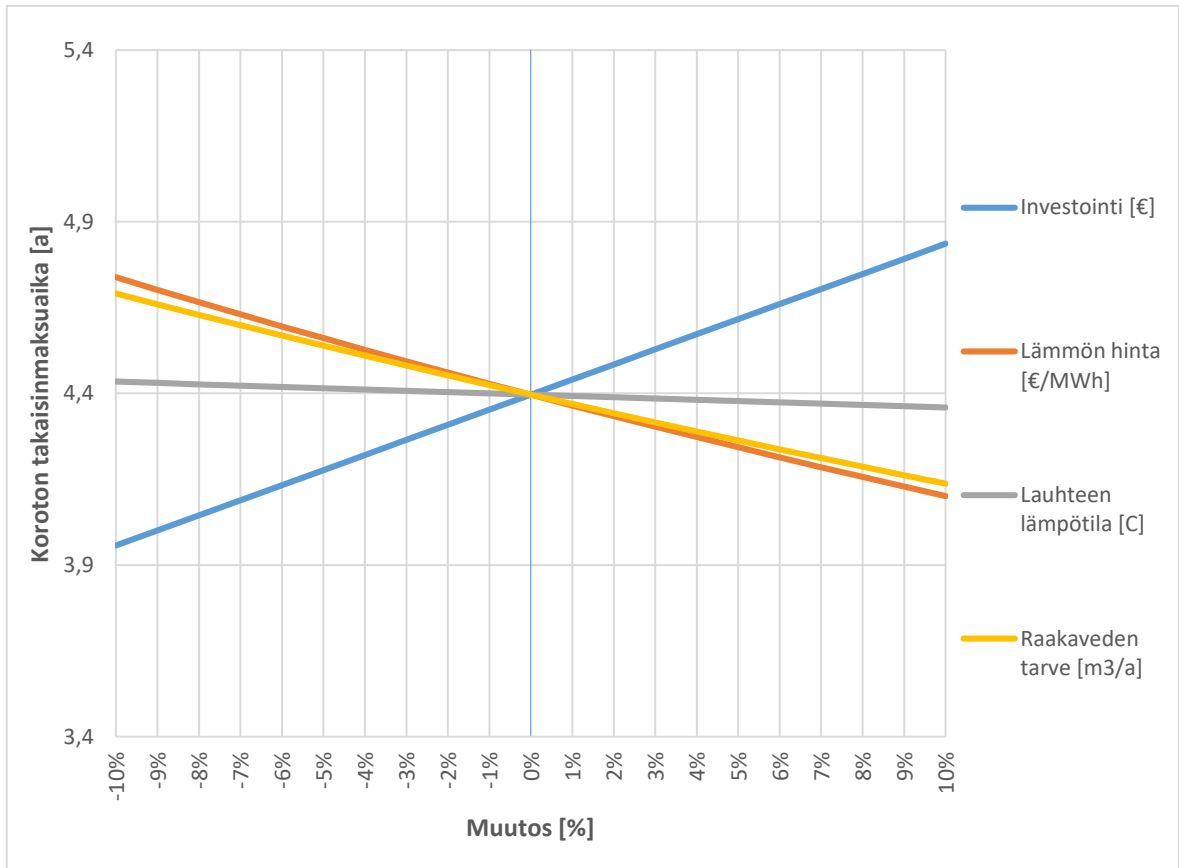
Yllä oleviin tietoihin perustuen saadaan suunnitellulle lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmälle takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuajan laskennassa on huomioitu investointikustannus, käyttökustannukset, huolto- ja kunnossapitokustannukset sekä lämmöntalteenoton tuoma säästöpotentiaali. Korollisessa takaisinmaksuajassa on huomioitu todennäköisen vuosittaisten kustannustason nousun lisäksi säästöpotentiaalın kasvu kaukolämmön tuotantokustannusten kasvaessa. Lasketut takaisinmaksuajat ovat alla olevassa taulukossa 22.

Taulukko 22: Suunnitellun järjestelmän takaisinmaksuaika.

	Takaisinmaksuaika [a]
Koroton	4,4
Korko 3 %	4,8
Korko 5 %	5,2

7.5 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissä tarkastellaan tärkeimpien muuttujien vaikutusta investoinnin kannattavuuteen. Tarkasteltavina kohteina ovat investoinnin kokonaiskustannus (€), kaukolämmön tuotantokustannus (€/MWh), lauhteen lämpötila (°C) ja raakaveden tarve (m³/a). Nämä tekijät ovat järjestelmän kustannusten, mitoituksen ja toimivuuden kannalta tärkeimmät tekijät ja herkkyysanalyysissä tarkastellaankin millaiset vaikutukset näiden tekijöiden mahdollisilla muutoksilla olisi kokonaiskannattavuuteen. Investoinnin ja kaukolämmön tuotantokustannuksen osalta tarkastellaan hinnan muutosta. Raakaveden tarpeen arvioinnissa muutetaan raakaveden vuosikulutusta, joka vaikuttaa siihen siirrettävissä olevan lämmön määrään. Lauhteen lämpötilan tarkastelussa selvitetään miten savukaasupesurista poistettavan lauhteen lämpötila vaikuttaa suunniteltujen lämmönvaihtimien lämmönsiirtopotentiaaliin ja millaiset vaikutukset lämpötilan muutoksella on suunniteltuun järjestelmään. Kuvassa 35 esitetään herkkyysanalyysin tulokset. Kuvassa tarkastellaan edellä mainittuihin tekijöihin tehtyjen -10 % – 10 % muutoksien vaikutusta korottomaan takaisinmaksuaikaan. Muut aiemmin tarkastellut takaisinmaksuajat muuttuvat samassa suhteessa.



Kuva 35: Lauhteen lämmöntalteenoton herkkyyssanalyysin tulokset.

Yllä olevasta kuvasta nähdään, että investoinnin takaisinmaksuajan kannalta investoinnin kokonaiskustannus, kaukolämmön tuotantokustannus sekä raakaveden tarve ovat kaikki yhtä merkittäviä kannattavuuden näkökulmasta. Kustannusten muutos 10 % vaikuttaa näistä jokaisen takaisinmaksuajaan 0,3–0,4 vuotta. Näin ollen pienet muutokset kustannuksissa eivät ole merkittävä riski investoinnin kannattavuudelle. Kaukolämmön tuotantokustannusten lasku ei ole todennäköistä tulevina vuosina, joten tuotantokustannuksen muutos ole merkittävä riski investoinnin kannattavuudelle. Todennäköisempi tuotantokustannusten kasvu puolestaan parantaa investoinnin kannattavuutta.

Toinen tärkeä tekijä on voimalaitoksen raakaveden tarve. Raakaveden tarve on lauhteen lämmöntalteenotosta riippumaton ja tähän liittyviä muutoksia tuleekin tarkastella kokonaisuutena voimalaitoksen kannalta, eikä ainoastaan lämmöntalteenottojärjestelmän näkökulmasta. Voimalaitoksella raakaveden kulutuksen väheneminen tuo monessa muussa

kohteessa säästöjä, jotka voivat jopa kokonaan kompensoida lauhteen lämmöntalteenotossa nousevan takaisinmaksuajan.

Investointikustannusten muutosta voidaan pitää suuririskisimpänä yksittäisenä tekijänä, sillä se on todennäköisin herkkyyksianalyysissä tarkastelluista tekijöistä. Koska tässä tarkastelussa oletettu investointikustannus on ainoastaan arvio, ei voida antaa tarkkaa arviota siitä, kuinka lähellä se on todellisia kustannuksia. Kun mahdollinen investointi on vaiheessa, jossa kokonaishinnasta on tarkempi arvio, voidaan tällöin tehdä parempi arvio investointikustannuksen nousun aiheuttamasta riskistä.

Todennäköisimpänä muuttujana näistä neljästä voidaan pitää lauhteen lämpötilaa, joka ei kuitenkaan herkkyyksianalyysin perusteella ole riski investoinnin kannattavuudelle. Vaikka lämmöntalteenottoon tuotavan lauhteen lämpötila muuttuisi useilla asteilla, ei se romahduta siirrettävää lämpöä. Alhaisempi lauhteen lämpötila voidaan suunnitellussa järjestelmässä korvata suuremmalla lauhteen tilavuusvirralla, sillä lauhdetta syntyy enemmän kuin mitä nyt mitoitettu järjestelmä tarvitsee. Kun lämmönsiirtimet mitoitetaan mahdollisiin muutoksiin varautuen, pitäisi järjestelmän lämmönsiirtokyky pysyä lähes ennallaan. Tehdyn herkkyyksianalyysin perusteella lauhteen lämpötilan muutos vaikuttaa merkittävästi vain kaukolämmön lisäveden lämmittämiseen, jossa lauhteen lämpötilan kahden asteen lämpötilamuutos aiheuttaa lisäveden poistumislämpötilassa noin asteen muutoksen samaan suuntaan. Lisävedeen siirrettävä lämpömäärä on kuitenkin vuositasolla vähäinen kokonaisuuden kannalta, joten siinä aiheutuvat muutokset jäävät kokonaisuuden kannalta vähäisiksi.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tehdyn selvityksen perusteella savukaasupesurin lauhteen lämmön hyödyntäminen voimalaitosprosesseissa on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa. Vaikka pesurilta poistettavan lauhteen lämpötila on tavallisesti vain 50–60 °C, eikä siten riittävä perinteiseen sähkön- ja kaukolämmön tuotantoon, voidaan lämpöä hyödyntää useissa kohteissa voimalaitoksella. Selvityksen perusteella Vanajan voimalaitoksella soveltuvia kohteita lämmön hyödyntämiseen ovat raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmitys, palamisilman esilämmitys sekä rakennusten lämmitys. Näissä kohteissa lämmöntalteenotosta saadaan merkittävä hyöty prosessien kannalta sekä taloudellisessa mielessä. Edellä mainitut kohteet ovat sopivia lauhteen lämmöntalteenottoon myös, koska niiden tarve kasvaa pesurin tehon, ja siten syntyvän lauhteen määrän mukana. Pesurin teho kasvaa kaukolämmön tarpeen lisääntyessä, mikä lisää voimalaitoksella raakaveden ja lisäveden kulutusta. Vastaavasti lisääntynyt kaukolämmön tarve johtuu laskevasta ulkolämpötilasta, jolloin myös palamisilman ja rakennusten lämmitystarve kasvaa silloin, kun pesurista on saatavilla enemmän hukkalämpöä lauhteen muodossa.

Savukaasupesurin lauhteen lämmöntalteenottoa suunniteltaessa saatavan lauhteen lämpötilan lisäksi on huomioitava lauhteen laatu. Lauhde sisältää paljon savukaasuista puhdistettuja pienhiukkasia ja muita partikkeleita, jotka voivat aiheuttaa tukkeutumista ja likaantumista muun muassa putkistossa, venttiileissä ja lämmönvaihtimissa. Tämän vuoksi tulee lauhteesta poistaa vähintään kiintoaines mahdollisimman hyvin ennen lämmöntalteenottolaitteistoa. Myös ajoittainen likaa irrottavien kemikaalien syöttäminen laitteistoon ehkäisee likaantumista. Lämmönvaihtimien säännöllisellä huoltamisella ja puhdistamisella estetään vaihtimia tukkeutumasta ja ylläpidetään niiden lämmönsiirtokykyä. Jos lauhteen laatu muodostuu ongelmaksi käytön aikana, voidaan harkita lisäsuodattimien käyttöönottoa lauhteenkäsitelyssä.

Lauhteen lämmöntalteenoton kannattavuutta tarkasteltaessa tärkein tekijä on se mitä lämmöntalteenotolla korvataan tai mitä lisäarvoa se tuo prosessille. Vanajan voimalaitoksen tapauksessa lauhteesta talteenotettu lämpö käytetään kohteisiin, joita tällä hetkellä lämmitte-

tään kaukolämpövedellä. Lisäksi palamisilman esilämmitys vähentää laskennallisesti kattilan polttoaineen kulutusta. Näissä kohteissa lauhteen lämmöllä korvataan arvokkaampia lämmönlähteitä, mikä tekee lämmöntalteenotosta kannattavaa. Jos lauhteen lämmöllä korvattaisiin jotain muuta hukkalämpöä tai lämpöä, jolla ei ole voimalaitokselle rahallista arvoa, ei vastaavaa säästöä ja taloudellista kannattavuutta syntyisi. Lauhteen lämpöä voidaan hyödyntää myös voimalaitoksella kohteissa, jotka eivät varsinaisesti nosta talteenoton taloudellista kannattavuutta, jos lämpöä jää varsinaisista kohteista yli. Tällaisia kohteita voisi olla esimerkiksi sellaisten tilojen lämmitys tai alueiden sulana pito, joihin ei ole järkevää investoida lämmitystä kaukolämmöllä tai sähköllä.

Tarkastelun ja laskennan perusteella Vanajan voimalaitokselle suositellaan kappaleessa 7.3 esiteltyä lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmää, joka sisältää raakaveden, kaukolämmön lisäveden ja palamisilman lämmityksen. Laskennan perusteella kyseisellä järjestelmällä saadaan hyötykäyttöön lähes kaikki lauhteen sisältämä lämpö ja säästettävän energian määrä vuodessa on noin 2600 MWh. Järjestelmälle laskettu takaisinmaksuaika 4,4 vuotta on selvästi alle järjestelmän pitoajan, joten vaikkakin jokin herkkyysoanalyysin riskeistä toteutuisi epäedullisella tavalla, jää lämmöntalteenoton hankinta silti kannattavaksi. Lämmöntalteenotosta saatavan taloudellisen hyödyn lisäksi vähenevät myös voimalaitoksen ympäristövaikutukset, kun lauhde saadaan laskettua vesistöön lähempänä sen omaa lämpötilaa.

Lämmöntalteenoton lyhyt takaisinmaksuaika antaa mahdollisuuden toteuttaa sen osana laajempaa investointia ja kattaa osan kuluista lämmöntalteenotossa syntyvillä säästöillä. Vanajan voimalaitoksen tapauksessa tällainen voisi olla esimerkiksi investointi lauhteenkäsittelyyn. Lauhteenkäsittelyllä olisi mahdollista puhdistaa pesurilta tulevaa lauhdetta ja käyttää sitä esimerkiksi kaukolämmön lisävetenä. Tämä vähentäisi voimalaitoksen tarvetta tuottaa lisävettä raakavedestä ja siten myös raakaveden kulutusta. Jos kaikki pesurilta tuleva lauhdevesi on mahdollista puhdistaa ja ottaa hyötykäyttöön voimalaitoksella, vähentäisi se entistään voimalaitoksen ympäristökuormaa, kun lauhdetta ei tarvitsisi enää laskea vesistöön. Sama lauhteenkäsittelylaitteisto voisi soveltua myös muiden voimalaitoksella syntyvien, viemäriin laskettavien vesien käsittelyyn ja hyötykäyttöön. Lauhteenkäsittelyyn investointi lämmöntalteenoton investoinnin kanssa on vähintäänkin selvítettävä asia, sillä tällöin mo-

lempien laitteistojen mitoitus saadaan toisiaan tukeviksi investoinnin toteutuessa. Lisäksi sijoittamalla lauhteenkäsittely ennen lämmöntalteenottoa vältetään likaantumis- ja tukkeutumisongelmilta laitteistoissa. Investoimalla sekä lämmöntalteenottoon, että lauhteenkäsittelyyn saadaan pesurin lauhteesta kaikki hyöty irti ja poistetaan lauhteen osalta voimalaitoksen ympäristövaikutukset lähes kokonaan.

9 YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli selvittää savukaasupesurista jäävän lauhteen lämmön hyötykäyttöä Vanajan voimalaitoksella. Diplomityö tehtiin Elenia Lämpö Oy:n toimeksiannosta. Tavoitteena oli, että diplomityön avulla löydettäisiin keino hyödyntää savukaasulauhteen lämpöä voimalaitoksella ja siten lisätä energiatehokkuutta ja vähentää ympäristökuormaa. Lisäksi diplomityön teoriaosan tarkoituksena on toimia yleisesittelynä savukaasupesureista ja savukaasupesurin lauhteenkäsittelystä.

Kirjallisuudessa savukaasupesureita usein esitellään ja käsitellään ainoastaan niiden päästöjenhallintaominaisuuksien näkökulmasta. Näin ollen niiden lämmöntalteenotonperiaatteet jäävät vähemmälle huomiolle. Oikein mitoitettuina pesurit ovat merkittäviä voimalaitoksen energiatehokkuuden parantajia. Savukaasupesurilla on lämpölaitoksessa mahdollista tuottaa 20 % kaukolämpötehosta. Pesurin tehokkuutta ja lämmöntalteenottokykyä voidaan entisestään parantaa käyttämällä pesurin kanssa kattilan palamisilmankostutinta tai pesurin lämpöpumppukytkenällä. Pesurin toiminnan lisäksi lauhteenkäsittely on tärkeässä roolissa lauhteen lämmöntalteenoton kannalta. Pesurilta tulevan lauhteen laatu määrittää millaisia lauhteenkäsittelylaitteita tarvitaan, jotta poistettava lauhde täyttää ympäristömääräykset. Lauhteenkäsittely myös parantaa lauhteen lämmöntalteenottolaitteiston toimintaa vähentämällä likaantumis- ja tukkeutumisongelmia. Tehokkaalla ja monipuolisella lauhteenkäsittelyllä savukaasupesurin lauhde on mahdollista hyötykäyttää voimalaitoksella esimerkiksi kaukolämmön lisävetenä ja näin vähentää voimalaitoksen raakaveden kulutusta ja ympäristökuormitusta.

Tarkastelussa voimalaitoksella lauhteenlämmön mahdollisiksi hyötykäyttökohteiksi löydettiin raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmitys, palamisilman esilämmitys ja rakennusten lämmittäminen. Vuosittaisen ja hetkellisen kulutuksen, lämmitystarpeen ja taloudellisuuden perusteella, missä kohteissa lauhteen lämmön hyötykäyttö olisi taloudellisesti kannattavaa. Tarkastelun ja laskennan perusteella todettiin, että lauhteen lämmön hyötykäyttö on taloudellisesti kannattavaa kaikissa edellä mainituissa kohteissa, kun niiden käytöllä voidaan korvata jokin arvokkaampi lämmönlähde kuten kaukolämpö. Myöskin kattilan polttoaineenkulutusta vähentävät kohteet olivat tarkastelun perusteella kannattavia. Tarkastelun ja

laskennan perusteella päädyttiin suositteluun Vanajan voimalaitokselle lauhteen lämmöntalteenottojärjestelmää, joka sisältää raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmityksen sekä palamisilman esilämmityksen. Raakaveden ja kaukolämmön lisäveden lämmitykset ovat järjestelmässä ensisijaisia ja palamisilman esilämmitykseen käytetään jäljellä oleva lämpö. Järjestelmää täydennetään kattilan jatkuvan ulospuhallushöyryn lämmöntalteenotolla, jolla lisätään kaukolämmön lisäveden lämmitystä sekä palamisilman esilämmitystä.

Laskennan perusteella suositellun järjestelmän takaisinmaksuaika on selvästi suunniteltua pitoaikaa alhaisempi eli järjestelmä on taloudellisesti kannattava. Herkkyysanalyysin perusteella suurimmat riskit järjestelmän kannattavuudelle ovat muutokset kaukolämmön tuotantokustannuksissa, investointikustannusten muutos ja raakaveden tarpeen vaihtelu voimalaitoksella. Sen sijaan savukaasupesurista tulevan lauhteen lämpötilalla ei ole merkittävää vaikutusta investoinnin kannattavuuteen.

Harkittaessa savukaasupesurin lauhteen lämmöntalteenottoon investointia, kannattaa samalla myös selvittää mahdollisuuksia lauhteen muuhun hyötykäyttöön. Lämmöntalteenoton tuomalla säästöllä on mahdollista kompensoida syntyviä lisäkuluja esimerkiksi lauhteenkäsittelystä, joka mahdollistaisi lauhteen veden hyödyntämisen voimalaitoksella. Lauhteen hyödyntäminen niin lämmön kuin vedenkin osalta vähentäisi merkittävästi pesurin ympäristökuormaa sekä toisi tehokkuutta voimalaitoksen prosesseihin niin energian- kuin vedenkäytön näkökulmasta.

LÄHTEET

Arola Joonas & Toivo Teemu. 2015. Product Manager & Technology Manager, Valmet. Tampere. Haastattelu 11.11.2015.

Caligo. 2015. Caligo CS_xHP-savukaasupesurijärjestelmä. Caligo Industria Oy. 8 s.

Caligo. 2013. Caligo Industria Oy [pdf-tiedosto]. 17 s.

Cheremisinoff Nicholas P. 2002. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. 653 s. ISBN: 0-7506-7498-9

Condens Oy. 2014. Savukaasun puhdistus ja LTO tehostettuna palamisilman kostutuksella [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.condens.fi/fin/kostutus.htm>

CR Clean Air. 2016. Wet scrubbers [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: www.crcleanair.com/products/wet-scrubbers

Dhawan Gil. 2016. About Ultrafiltration [pdf-tiedosto]. Applied Membranes Inc. Saatavissa: http://www.appliedmembranes.com/media/wysiwyg/pdf/membranes/about_ultrafiltration_technical_article.pdf

Elenia Lämpö. 2015. Kuvakaappauksia savukaasupesurilaitoksien ohjausohjelmistoista.

Energiateollisuus & Ympäristöministeriö. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta [pdf-tiedosto]. Jyväskylä: Energiateollisuus & Ympäristöministeriö. 51 s.

Fingrid. 2016. Elspot Suomen aluehinta [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/tasesahko/taseselvitysinformaatio/Sivut/Elspot-Suomen-Aluehinta.aspx?showTable=1&beginDate=20150101&endDate=20151231&showChart=0>

Forward Osmosis Tech. 2016. Tubular modules made from tubular forward osmosis membranes [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.forwardosmosistech.com/tubular-forward-osmosis-membrane-modules/>

Huhtinen et al. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus. ISBN: 952-13-3476-2

Hämeen ympäristökeskus. 2008. Ympäristölupapäätös, Vattenfall Lämpö Oy, lupa nro: YSO/75/2008, HAM-2004-Y-418-111 [pdf-tiedosto]. 42 s. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC9685797-7653-4621-B9ED-426B7E60193F%7D/81964>

Ihalainen Tanja & Niskanen Anssi. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. Metlan työraportteja 166. Metsäntutkimuslaitos. 56 s. ISBN: 978-951-40-2245-6.

Jalovaara Jukka, Aho Juha, Hietämäki Eljas & Hyytiä Hille. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristö 649. Suomen ympäristökeskus. 126 s. ISBN: 952-11-1488-6

Jedfelt Daniel, Eteläaho Risto & Korhonen Tarja. 2013. Energy-efficient operation of a biomass-fired CHP plant. Kalmar Energi Värme AB & Metso Power Oy. 9 s. Saatavissa: <http://pennwell.websds.net/2013/vienna/pge/papers/t2s4o3-paper.pdf>

Jorsun. 2016. Lamella Clarifier for waste water treatment [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: http://www.alibaba.com/product-detail/Lamella-Clarifier-for-waste-water-treatment_561125132.html

Lenntech. 2016a. Membrane Technology [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.lenntech.com/membrane-technology.htm>

Lenntech. 2016b. Micro Filtration and Ultra Filtration [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.lenntech.com/microfiltration-and-ultrafiltration.htm>

Lenntech. 2016c. Nano filtration and Reverse Osmosis [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.lenntech.com/nanofiltration-and-rosmosis.htm>

Lenntech. 2016d. Tubular-shaped membranes [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.lenntech.com/tubular-shaped-membranes.htm>

Luostarinen Kari. 2013. BH50A0400 Vedenkäsittely [pdf-tiedosto]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa kurssin Moodle-sivustolta.

McCabe Warren L., Smith Julian C. & Harriot Peter. 1993. Unit Operations of Chemical Engineering. 5. Painos. 1130 s. ISBN: 0-07-112738-0

Nummila Mika. 2015. DI; Teknologiajohtaja, Caligo Industria. Sähköpostikeskustelu 14.12.2015.

Nummila Mika & Järvenreuna Juha. 2015. Nykyaikainen savukaasupesuri. Caligo Industria Oy. 4 s.

Ohlström Mikael, Tsupari Eemeli, Lehtilä Antti & Raunemaa Taisto. 2005. Pienhiukkas-päästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. VTT Tiedotteita 2300. Espoo: VTT. 97 s. ISBN: 951-38-6721-8

Porex. 2016. A Unique Zero Liquid Discharge System Utilizing Microfiltration Technology [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://www.porexfiltration.com/downloads/lime-softening-case-study/>

Puheloinen Eeva-Maija et al. 2011. Teollisuuden päästödirektiivin (IED) voimaansaattaminen ja muita ympäristönsuojelulain kehittämisajatuksia. Ympäristöministeriön raportteja 6/2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. 392 s. ISBN 978-952-11-33847-8

Puretec. 2016. What is Reverse Osmosis? [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://puretecwater.com/what-is-reverse-osmosis.html#>

Pöyry. 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Energiateollisuus ry. 53 s.

Raindrops. 2016. Pressure Sand Filter [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://ropland.net/pressure-sand-filter.html?panel=0>

Smolander Sampo. 2015. Savukaasulauhteen käsittely ultrasuodatustekniikalla. Diplomityö. Kemianteeniikan korkeakoulu, Aalto-yliopisto. 136 s.

Tilastokeskus. 2016. Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hinnat [verkkajulkaisu]. 1. Vuosineljännes 2016. Helsinki: Tilastokeskus. [1.10.2016]. ISSN: 1799-7984. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2016/01/ehi_2016_01_2016-06-08_tie_001_fi.html

Valmet. 2015. Scrubbers and flue gas heat recovery [pdf-tiedosto]. 19 s.

Viaches Daniel, Charlton Christy, Wesorick Steve & Kaplan Kelsey. 2016. Mist Eliminators [Internet-sivusto]. [1.10.2016] Saatavissa: <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/SeparationsMechanical/MistEliminators/MistEliminators.html>

Vna 936/2014. Valtioneuvoston asetus 13.11.2014 suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta.

Wagner J. 2001. Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints. Osmonics Inc. 63 s.

Palamisilma, ensimmäinen lämmityspatterit		Tuloilma		Savukaasulauhe		Massavirta		Tulolämpötila		Tehokkuus	
Ulkolämpötila [°C]	Tavotelämpötila [°C]	Tehontarve [kW]	Ulkolämpötilan toteuma v. 2015 [kpl tunteja]	Lämmöntarve [kWh]	Lämmönvaihtimen anoja	C_{lauhde} [kW/K]	C_{ilma} [kW/K]	C_{min} [kW/K]	C_{max} [kW]	E_{I}	Lauhteen poistumislämpötila [°C]
20	20	9	0	0	7,9	9	7,942	135,014	0,00	37	37
19	19	9	0	0	7,9	9	7,942	142,956	0,00	37	37
18	18	9	0	0	7,9	9	7,942	150,898	0,00	37	37
17	17	9	0	0	7,9	9	7,942	158,84	0,00	37	37
16	16	9	0	1031	0	7,9	7,942	166,782	0,00	37	37
15	23	9	72	303	21816	7,9	7,942	174,724	0,41	28	28
14	23	9	81	337	27297	7,9	7,942	182,666	0,44	27	27
13	20	13	91	372	33852	7,9	7,942	190,608	0,48	26	26
12	20	13	104	398	41392	7,9	7,942	198,55	0,52	24	24
11	18	17	119	364	43316	7,9	7,942	206,492	0,58	22	22
10	17	17	119	306	36414	7,9	7,942	214,434	0,55	22	22
9	16	19	133	340	45220	7,9	7,942	222,376	0,60	20	20
8	15	19	133	346	46018	7,9	7,942	230,318	0,58	20	20
7	13	22	132	362	47784	7,9	7,942	238,26	0,55	20	20
6	13	22	154	342	52668	7,9	7,942	246,202	0,63	18	18
5	12	24	168	369	61992	7,9	7,942	254,144	0,66	16	16
4	11	24	168	356	59808	7,9	7,942	262,086	0,64	16	16
3	10	25	175	442	77350	7,9	7,942	270,028	0,65	15	15
2	9	25	175	552	96600	7,9	7,942	277,97	0,63	15	15
1	9	25	200	592	118400	7,9	7,942	285,92	0,70	12	12
0	8	26	208	567	117936	7,9	7,942	293,854	0,71	11	11
-1	7	26	208	355	73840	7,9	7,942	301,796	0,69	11	11
-2	6	26	208	245	50960	7,9	7,942	309,738	0,67	11	11
-3	5	26	208	188	39104	7,9	7,942	317,68	0,65	11	11
-4	4	26	208	112	23296	7,9	7,942	325,622	0,64	11	11
-5	3	26	208	86	17888	7,9	7,942	333,564	0,62	11	11
-6	2	26	208	97	20176	7,9	7,942	341,506	0,61	11	11
-7	1	26	208	61	12688	7,9	7,942	349,448	0,60	11	11
-8	0	26	208	31	6448	7,9	7,942	357,39	0,58	11	11
-9	-1	26	208	28	5824	7,9	7,942	365,332	0,57	11	11
-10	-2	26	208	34	7072	7,9	7,942	373,274	0,56	11	11
-11	-3	26	208	34	7072	7,9	7,942	381,216	0,55	11	11
-12	-4	26	208	24	4992	7,9	7,942	389,158	0,53	11	11
-13	-5	26	208	23	4784	7,9	7,942	397,1	0,52	11	11
-14	-6	26	208	17	3536	7,9	7,942	405,042	0,51	11	11
-15	-7	26	208	10	2080	7,9	7,942	412,984	0,50	11	11
-16	-8	26	208	11	2288	7,9	7,942	420,926	0,49	11	11
-17	-9	26	208	10	2080	7,9	7,942	428,868	0,48	11	11
-18	-10	26	208	3	624	7,9	7,942	436,81	0,48	11	11
-19	-11	26	208	5	1040	7,9	7,942	444,752	0,47	11	11
-20	-12	26	208	4	832	7,9	7,942	452,694	0,46	11	11

Palamisilma, toinen lämmityspatteri		Tulolilma		JUP-lauhde		Massavirta		Tulolämpötila		Lämmönvaihtimen arvoja		Maksimitheho		Tehokkuus	
Tavoitelämpötila [°C]	Tavoitelämpötila [°C]	Palamisilman tarve [kg/s]	Tehontarve [kW]	Ulkolämpötilan toteuma v. 2015 [kpl tunteja]	1 kJ/kgK	1 kJ/kgK	Ominaislämpök.	Ominaislämpök.	Tulolämpötila	C_lauhde [kW/K]	C_ilmalämpötila [kW/K]	C_min [kW/K]	q_max [kW]	E [-]	Lauhteen poistumislämpötila [°C]
20	20	9	0							0,8	9	9	0,8	33,9	0,00
19	19	9	0							0,8	9	9	0,8	34,6	0,00
18	18	9	0							0,8	9	9	0,8	35,4	0,00
17	17	9	0							0,8	9	9	0,8	36,1	0,00
16	16	9	0	1031						0,8	9	9	0,8	36,9	0,00
23	25,5	9	22,5	303					6817,5	0,8	9	9	0,8	31,6	0,71
23	25,5	337	22,5	337					7582,5	0,8	9	9	0,8	31,6	0,71
20	22	13	26	372					9672	0,8	13	13	0,8	33,9	0,77
20	22	13	26	398					10348	0,8	13	13	0,8	33,9	0,77
18	19,5	17	25,5	364					9282	0,8	17	17	0,8	35,4	0,72
17	18,5	17	25,5	306					7803	0,8	17	17	0,8	36,1	0,71
16	17,5	19	28,5	340					9690	0,8	19	19	0,8	36,9	0,77
15	16,5	19	28,5	346					9861	0,8	19	19	0,8	37,6	0,76
13	14,5	22	33	362					11946	0,8	22	22	0,8	39,1	0,84
13	14,5	22	33	342					11286	0,8	22	22	0,8	39,1	0,84
12	13,5	24	36	369					13284	0,8	24	24	0,8	39,9	0,90
11	12,5	24	36	356					12816	0,8	24	24	0,8	40,6	0,89
10	11,5	25	37,5	442					16575	0,8	25	25	0,8	41,4	0,91
9	10,5	25	37,5	552					20700	0,8	25	25	0,8	42,1	0,89
9	10,5	25	37,5	592					22200	0,8	25	25	0,8	42,1	0,89
8	9,5	26	39	567					22113	0,8	26	26	0,8	42,9	0,91
7	8,5	26	39	355					13845	0,8	26	26	0,8	43,6	0,89
6	7,5	26	39	245					9555	0,8	26	26	0,8	44,4	0,88
5	6,5	26	39	188					7332	0,8	26	26	0,8	45,1	0,86
4	5,5	26	39	112					4368	0,8	26	26	0,8	45,9	0,85
3	4,5	26	39	86					3354	0,8	26	26	0,8	46,6	0,84
2	3,5	26	39	97					3783	0,8	26	26	0,8	47,4	0,82
1	2,5	26	39	61					2379	0,8	26	26	0,8	48,2	0,81
0	1,5	26	39	31					1209	0,8	26	26	0,8	48,9	0,80
-1	0,5	26	39	28					1092	0,8	26	26	0,8	49,7	0,79
-2	-0,5	26	39	34					1326	0,8	26	26	0,8	50,4	0,77
-3	-1,5	26	39	34					1326	0,8	26	26	0,8	51,2	0,76
-4	-2,5	26	39	24					936	0,8	26	26	0,8	51,9	0,75
-5	-3,5	26	39	23					897	0,8	26	26	0,8	52,7	0,74
-6	-4,5	26	39	17					663	0,8	26	26	0,8	53,4	0,73
-7	-5,5	26	39	10					390	0,8	26	26	0,8	54,2	0,72
-8	-6,5	26	39	11					429	0,8	26	26	0,8	54,9	0,71
-9	-7,5	26	39	10					390	0,8	26	26	0,8	55,7	0,70
-10	-8,5	26	39	3					117	0,8	26	26	0,8	56,4	0,69
-11	-9,5	26	39	5					195	0,8	26	26	0,8	57,2	0,68
-12	-10,5	26	39	4					156	0,8	26	26	0,8	57,9	0,67

Raakavesi-lauhde	Lauhde		Tulolämpötila [°C]		Poistumislämpötila [°C]		Ominaislämpök. [kJ/kgK]		Raakaveden poistumislämpötila														
	C _{raakavesi} [kW/K]	C _{lauhde} [kW/K]	C _{min1} [kW/K]	C _{min2} [kW/K]	C _{min3} [kW/K]	C _{min4} [kW/K]	C _{min5} [kW/K]	q _{max1} [kW]	q _{max2} [kW]	q _{max3} [kW]	q _{max4} [kW]	q _{max5} [kW]	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	T _{cout1} [°C]	T _{cout2} [°C]	T _{cout3} [°C]	T _{cout4} [°C]	T _{cout5} [°C]	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	5	5	5	5	5	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	8	8
0,2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	10	10	10	10	10	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	34	43
0,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	15	15	15	15	15	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	43	31
0,4	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	20	20	20	20	20	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	34	43
0,5	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	25	25	25	25	25	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	36
0,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	30	30	30	30	30	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	43	37
0,7	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	35	35	35	35	35	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	38	33
0,8	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	40	40	40	40	40	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	41	41
0,9	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	45	45	45	45	45	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	41	41
1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	50	50	50	50	50	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	43
1,1	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	55	55	55	55	55	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	40
1,2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	60	60	60	60	60	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	40
1,3	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	65	65	65	65	65	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	40
1,4	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	70	70	70	70	70	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
1,5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	75	75	75	75	75	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
1,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	80	80	80	80	80	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
1,7	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	85	85	85	85	85	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
1,8	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	90	90	90	90	90	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
1,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	95	95	95	95	95	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	100	100	100	100	100	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,1	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	105	105	105	105	105	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	110	110	110	110	110	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,3	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	115	115	115	115	115	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	120	120	120	120	120	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	125	125	125	125	125	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,6	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	130	130	130	130	130	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,7	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	135	135	135	135	135	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,8	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	140	140	140	140	140	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
2,9	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	145	145	145	145	145	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
3	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	150	150	150	150	150	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
3,1	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	155	155	155	155	155	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
3,2	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	160	160	160	160	160	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42
3,3	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	165	165	165	165	165	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	43	43	43	40	42

Optimialue

Herkkyyshanalyysi	-											-											-											-											-										
	-10%	-9%	-8%	-7%	-6%	-5%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%																																		
Investointi [€]	256500	259350	262200	265050	267900	270750	273600	276450	279300	282150	285000	287850	290700	293550	296400	299250	302100	304950	307800	310650	313500																																		
Koroton takaisinmaksuaika [a]	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,6	4,6	4,7	4,7	4,7	4,8	4,8																																		
Lämmön hinta [€/MWh]	36	36,4	36,8	37,2	37,6	38	38,4	38,8	39,2	39,6	40	40,4	40,8	41,2	41,6	42	42,4	42,8	43,2	43,6	44																																		
Kokonaissäästö [€/a]	72978	73446	73914	74381	74849	75317	75784	76252	76719	77187	77655	78122	78590	79058	79525	79993	80461	80928	81396	81864	82331																																		
Koroton takaisinmaksuaika [a]	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1																																		
Lauhteen lämpötilä [C]	60	54,6	55,2	55,8	56,4	57	57,6	58,2	58,8	59,4	60	60,6	61,2	61,8	62,4	63	63,6	64,2	64,8	65,4	66																																		
Lauhteen virtaus [l/s]	2																																																						
Lisäveden virtaus [l/s]	0,85																																																						
C lisävesi [kW/K]	3,55																																																						
C lauhde [kW/K]	8,36																																																						
C minimi [kW/K]	3,55																																																						
Tehokkuus [-]	0,59																																																						
Lisäveden poistumislämpötila [C]		40,0	40,4	40,7	41,1	41,4	41,8	42,1	42,5	42,8	43,2	43,5	43,9	44,2	44,6	44,9	45,3	45,6	46,0	46,4	46,7	47,1																																	
Keskimääräinen lämpötilaero [C]		20,0	20,4	20,7	21,1	21,4	21,8	22,1	22,5	22,8	23,2	23,5	23,9	24,2	24,6	24,9	25,3	25,6	26,0	26,4	26,7	27,1																																	
Siirretty lämpö [MWh/a]		79	80	82	83	85	86	87	89	90	91	93	94	96	97	98	100	101	103	104	105	107																																	
Säästö [€/a]		3158	3214	3270	3325	3381	3437	3493	3548	3604	3660	3716	3771	3827	3883	3938	3994	4050	4106	4161	4217	4273																																	
Lauhde raakavesivaihtimelle [C]		45,5	46,0	46,4	46,9	47,3	47,8	48,2	48,7	49,1	49,6	50,0	50,5	50,9	51,4	51,8	52,3	52,7	53,2	53,6	54,1	54,5																																	
Raakaveden virtaus [l/s]	2,2																																																						
C raakavesi [kW/K]	9,196																																																						
C minimi [kW/K]	8,36																																																						
Tehokkuus [-]	0,83																																																						
Raakaveden poistumislämpötila [C]		36,4	36,8	37,1	37,4	37,8	38,1	38,5	38,8	39,1	39,5	39,8	40,2	40,5	40,8	41,2	41,5	41,9	42,2	42,5	42,9	43,2																																	
Lämpötila rajoitetaan 20 C	12																																																						
Lauhde pois [C]	37																																																						
Lauhteen tarve [l/s]		2,0	1,9	2,0	1,9	2,0	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5																																	
Lauhde tuloilmakoneelle [C]		32	33	33	34	34	35	35	35	36	36	37	37	38	38	39	39	40	40	40	41	41																																	
Lauhde pois tuloilmakoneelta [C]		10,6	10,7	10,9	11,0	11,2	11,3	11,5	11,6	11,8	11,9	12,1	12,2	12,3	12,5	12,6	12,8	12,9	13,1	13,2	13,4	13,5																																	
Lauhteen lämpötila vaikuttaa vain lisäveden lämmitykseen																																																							
Kokonaissäästö [€/a]	77655	77102	77158	77214	77269	77325	77381	77436	77492	77548	77604	77659	77715	77771	77827	77882	77938	77994	78050	78105	78161	78217																																	
Koroton takaisinmaksuaika [a]		4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4																																	
Raakaveden tarve [m³/a]	73000	65700	66430	67160	67890	68620	69350	70080	70810	71540	72270	73000	73730	74460	75190	75920	76650	77380	78110	78840	79570	80300																																	
Siirretty lämpö [MWh/a]	1017,13	915,42	925,59	935,76	945,93	956,11	966,28	976,45	986,62	996,79	1006,96	1017,13	1027,30	1037,48	1047,65	1057,82	1067,99	1078,16	1088,33	1098,50	1108,68	1118,85																																	
Säästö [€/a]	40685	36617	37024	37431	37837	38244	38651	39058	39465	39872	40278	40685	41092	41499	41906	42313	42720	43126	43533	43940	44347	44754																																	
Koroton takaisinmaksuaika [a]		4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1																																	