

Tuomas Paso

**SAVUKAASUJEN PUHDISTUS KOTIMAISEN POLTTOAINEEN
KATTILALAITOKSESSA**

SAVUKAASUJEN PUHDISTUS KOTIMAISEN POLTTOAINEEN KATTILALAITOKSESSA

Tuomas Paso
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Talotekniikka

Tekijä(t): Tuomas Paso

Opinnäytetyön nimi: Savukaasujen puhdistus kotimaisen polttoaineen kattilalaitoksessa

Työn ohjaaja(t): Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät, 2014

Sivumäärä: 71 + 1

liitettä

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Puolangan kunta. Puolangalla Honkavaaran lämpölaitoksella on lämmöntalteenotolla varustettu märkäpatjasavukaasupesuri kiinteän polttoaineen kattilan yhteydessä. Savukaasupesurilla pyritään vähentämään polttoainekustannuksia tuottamalla mahdollisimman paljon energiaa biopolttoaineilla. Savukaasupesurilla saadaan talteen kostean polttoaineen savukaasujen ja niiden sisältämän vesihöyryn lauhtumisessa vapautuva energia.

Työn pääasiallinen tarkoitus on selvittää, millainen taloudellinen hyöty Puolangan savukaasupesurilla on saavutettu ja millaisilla toimenpiteillä sitä voitaisiin parantaa. Työssä selvisi, että savukaasupesurin hyötysuhde vuonna 2013 oli 12,4 % ja pesurin tehokkuutta parantamalla voidaan hyötysuhde saada nousemaan 15–25 %:iin. Pesurin tehokkuuden parantaminen vaatii kaukolämpöverkoston toiminnan tarkkailemista ja ongelmakohtien korjaamista, jotta kaukolämpöverkoston paluueden lämpötila saataisiin pysyvästi alle 50 °C:n.

Työssä esitetään savukaasujen koostumus sekä niiden puhdistuksen tarkoitus päästöjen vähentämisessä ja lämmön talteenotossa. Työssä käydään läpi kaukolämpölaitoksen kattilan ja savukaasupesurin toiminta teoriassa.

Työn aikana pohdittiin myös savukaasupesurin mahdollisia ongelmakohtia sekä niiden ehkäisemiseksi vaadittavia huoltotoimenpiteitä. Savukaasupesurin huoltoaikataulu on laadittu työn aikana ilmenneiden ongelmakohtien pohjalta

Työssä tutkittiin savukaasupesurin prosessia ja laskelmien perusteella todettiin, että tehokkuus vastaa toimittajan ilmoittamia arvoja. Savukaasupesurin tehokkuutta Puolangalla voidaan parantaa kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilaa alentamalla. Paremman tehokkuuden myötä polttoainekustannuksissa voidaan säästää 18–88 000 € enemmän kuin vuonna 2013.

Asiasanat: Savukaasu, päästöt, energia, polttoaineet, lämmitysjärjestelmät, kaukolämpö

ALKULAUSE

Kiitän Puolangan kuntaa ja eritoten Leila Holappaa ja Timo Kohosta, joilta sain mielenkiintoisen aiheen opinnäytetyöhön sekä siihen tarvittavan materiaalin. Kiitän Veli-Matti Mäkelää opinnäytetyön ohjauksesta.

Oulussa 3.2.2014

Tuomas Paso

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
1 JOHDANTO	7
2 SAVUKAASUT JA NIIDEN PUHDISTUS	8
2.1 Polttoaineet	8
2.2 Polttotekniikat	9
2.3 Savukaasujen puhdistus	9
2.3.1 Sykloni	10
2.3.2 Sähkösuodatin	11
2.3.3 Pesuri	11
3 LÄMPÖKATTILA	14
3.1 Kaukolämpökattiloiden hyötysuhde	15
3.2 Polttoaineen lämpöarvo	15
3.3 Konvektio-osa ja sykloni	16
3.3.1 Konvektio- osan sijoitus ja toiminta	17
3.3.2 Sykloni	18
4 SAVUKAASUPESURI	19
4.1 Toimintaperiaate	19
4.1.1 Savukaasupesurin toiminta virtauskaavion mukaan	21
4.1.2 Savukaasupesurin osat	23
4.2 Palamisreaktio ja kemiallinen koostumus	25
5 TEHON LASKENTA	27
5.1 Savukaasussa olevan vesihöyryn määrä	27
5.1.1 Veden massa kosteutena ja kuiva-aineen massa	27
5.1.2 Palamisreaktiossa muodostuvan veden massa	28
5.2 Palamisilman mukana tulevan veden massa	29
5.3 Kuivan savukaasun massa	34
5.4 Polttoaineen massa	34
5.5 Vesihöyryn lämpöteho	35
5.6 Kuivan savukaasun lämpöteho	36
5.7 Veden vastaanottama lämpöteho	37

5.8 Lämmön talteenoton teho ja kattilanhyötysuhde	37
6 HONKAVAARAN LÄMPÖLAITOS	39
6.1 Savukaasupesuri	40
6.2 Lämmönsiirrin	40
6.3 Hyötysuhde	41
7 SAVUKAASUPESURIN PROSESSI	43
7.1 Prosessin tuottama energia esimerkkitilanteessa	43
7.2 Polttoilman mukana tullut vesihöyry	44
7.3 Kuivan savukaasun massa	47
7.4 Entalpiaero	48
7.5 Vesihöyryn tiivistymisessä vapautuva energia	49
7.6 Savukaasun jäähtymä ja lämpöteho	50
7.7 Lämmönsiirtimen teho ja hyötysuhde	52
7.8 Pesurin tehokkuuden parantaminen	53
8 PARANNUSEHDOTUKSET	55
8.1 Lämmöntuotanto 2013	55
8.2 Pesurin tehokkuuden parantaminen	57
8.3 Pesurin tehokkuuden vaikutus taloudellisesti	57
8.4 Yhteenveto	59
8.5 Ongelmatilanteet	60
8.6 Kaukolämpöverkosto	60
9 HUOLTOTOIMENPITEET	62
9.1 Pesu	62
9.1.1 Märkäpatja	63
9.1.2 Lietteenpoisto	66
9.1.3 Putkisto ja lämmönsiirrin	67
9.2 Huoltoaikataulu ja toimenpiteet	68
10 YHTEENVETO	69
LÄHTEET	70

1 JOHDANTO

Työn tilaaja on Puolangan kunta ja työn tavoite on tarkastella savukaasupesurin prosessin toimintaa ja tehokkuutta. Työssä pohditaan, miten savukaasupesurin tehokkuutta voidaan parantaa ja miten savukaasupesurin tehokkuus vaikuttaa polttoaineen kulutukseen.

Työssä käsitellään savukaasujen puhdistusta kiinteän polttoaineen kattilalaitoksissa sekä sen merkitystä ympäristöllisesti ja taloudellisesti. Työssä esitetään savukaasujen mukana ilmaan pääsevät yleisimmät vaaralliset päästöt ja savukaasujen puhdistuksen merkitys päästöihin. Työssä esitetään kaukolämpökattilan toiminta sekä savukaasupesurin prosessin toiminta.

Työssä tarkkaillaan savukaasupesurin tehokkuutta vuonna 2013 Puolangan kunnassa ja pohditaan, miten savukaasupesurin tehokkuutta ja hyötysuhdetta voidaan saada paremmaksi. Työssä lasketaan savukaasupesurin prosessin tehokkuus ja varmistetaan valmistajan teholumpauksien täytyminen. Tulosten perusteella lasketaan savukaasupesurin hyötysuhde sekä taloudellinen hyöty nykytilanteessa ja hyötysuhteen parantuessa.

Lopuksi pohditaan huoltotoimenpiteitä, joilla pesurissa esiintyvät ongelmat voidaan ehkäistä. Savukaasupesurin huolloista laaditaan aikataulu.

2 SAVUKAASUT JA NIIDEN PUHDISTUS

Savukaasut ovat palamisessa poistuvia kaasuja. Savukaasut sisältävät hiilidioksidia, vesihöyryä, typpeä ja happea, sekä niissä voi olla pieniä pitoisuuksia typen ja rikin oksidia sekä häkää ja pienhiukkasia. Puhtaan palamisen savukaasut koostuvat hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Polttoaineesta muodostuvat savukaasut voidaan laskea kemiallisten reaktioiden avulla. (1, s. 129–130.)

Savukaasujen koostumukseen ja haitallisuuteen vaikuttaa merkittävästi missä palaminen tapahtuu. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi voimalaitoskattila, polttomoottori, tulisija, hallitsematon palo ja kyseessä oleva polttoaine. Hyvän palamisen merkinä savukaasut ovat hajuttomia, värittömiä ja kylmällä ilmalla niistä lauhtuva vesihöyry muodostaa ilmaan puhtaan valkoisen savuvan. Savukaasun koostumusta voidaan selvittää päästömittauksin. (2.)

2.1 Polttoaineet

Käytettävä polttoaine vaikuttaa savukaasujen koostumukseen huomattavasti. Fossiilisia polttoaineita käytettäessä vapautuu paljon kasvihuoneilmiötä aiheuttavaa hiilidioksidia. Biopolttoaineita käytettäessä hiilidioksidipäästöt ovat erittäin vähäisiä fossiilisten polttoaineiden päästöihin verrattuna. (1, s. 123–124.) Biopolttoaineet voivat sisältää pieniä määriä rikkiä ja klooria, joista muodostuu haitallista rikkidioksidia ja vetykloridia. (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Kiinteiden polttoaineiden tyypillisiä ominaisuuksia (3, s. 8)

Ominaisuus	Hake	Kuori	Puru	Jyrsinturve	Kivihiili
Kosteus, %	45-55	50-60	50-60	45-55	10
Tuhka, % (d)	0.5-2	1-3	0.5-1	6	14
Haihtuvat aineet, % (d)	80-90	70-80	70-80	65-70	30
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (d)	19-20	19-20	19-20	20-21	29
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (ar)	7-10	6-9	6-9	8-10	26
Hiili, % (d)	52	55	50	54	72
Vety, % (d)	6	6	6	5,5	4,5
Typpi, % (d)	<0,5	<0,5	<0,5	1,7	1,0
Rikki, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	<1,0
Happi, % (d)	40	37	43	33	8
Kloori, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1

Yleisesti vähäpäästöisempiä polttoaineita ovat kaasumaiset polttoaineet, kun taas korkeapäästöisempiä polttoaineita ovat kiinteät ja epähomogeeniset polttoaineet. Päästöiltään äärimmäisenä esimerkkinä voidaan mainita jätteiden polttaminen pientulisijoissa, mikä on Suomen lain perusteella laitonta vaarallisten päästöjen takia. (2.)

2.2 Polttotekniikat

Haitta-aineiden määrän pienentämiseksi käytetään korkeaa palamislämpötilaa ja palamistapahtuma pyritään pitämään mahdollisimman lyhyenä. Korkean palamislämpötilan ja lyhyen palamistapahtuman keston takia esimerkiksi jätteenpoltto voimalaitosmittakaavassa vastaa vapautuvilta päästöiltään maakaasun polttamista. (2.) Yleisimpinä biopolttoaineiden polttamiseen käytettyinä tekniikkoina voidaan mainita kerrosleijupoltto, arina- ja stokeripoltto sekä kaasutuspolttoto (3, s. 15–18).

2.3 Savukaasujen puhdistus

Polttoaineiden kehittymisen ja uusien puhdistusmenetelmien takia savukaasujen haitta-aineet ovat vähentyneet huomattavasti (rikkidioksidi, lyijy). Nykyaikana merkittävimpänä haitta-aineena voidaankin mainita pienhiukkaset. Pienhiukkasten haitallisuus riippuu käytetystä polttoaineesta, ja tutkimusten perusteella fossiilisten öljyjen noen pienhiukkaset olisivat terveydelle haitallisempia kuin esimerkiksi puun poltosta muodostuvat hiukkaset. (2.)

Teollisuudessa ja energiantuotannossa savukaasut puhdistetaan poikkeuksetta lähes aina (2). Puhdistusmenetelmiä ovat esimerkiksi sähkösuodattimet (hiukkasille), pesurit (mm. hiukkasille, rikkidioksidille ja muille haitta-aineille), pussisuodattimet, jälkipolttimet (haihtuvalle hiilivedylle) ja katalyyttiset puhdistimet (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Puhdistuslaitteiston kustannusarviot ja päästötasot (3, s. 21)

Puhdistuslaite	Polttoaine	Teho MW _{pa}	Investointi €/MW _{pa}	Käyttökust. €/MWh _{pa}	Päästötaso mg/m ³ h	Painehäviö mbar
Sähkösuodatin	kaikki	alle 5	40 000	ei tietoa	15–50	2–3
	kaikki	5–50	20 000	0,1		
	kaikki	50–150	15 000	ei tietoa		
	kiinteää ja lipeää	> 150	10 000	ei tietoa		
	nestee	> 150	7 000	ei tietoa		
Kuitusuodatin	kaikki	5–50	18 000	0,3	5–25	10–20
	kiinteää	> 150	13 000	0,2		
	nestee	> 150	10 000	ei tietoa		
Pesuri + LTO	kaikki	5–50	35 000	0,3	50–500	10–15
Pesuri	kaikki	5–300	60 000	0,5	50–500	10–15
	kaikki	300–1 000	80 000	0,3		
	kaikki	yli 1 000	40 000	ei tietoa		
Sykloni / multi-sykloni	kaikki	alle 5	6 000	ei tietoa	20–1500	10–20
	kaikki	5–50	1 600	0,1		

2.3.1 Sykloni

Syklonierottimet soveltuvat puhdistimiksi parhaiten pienen kokoluokan arinakattiloihin, joissa savukaasujen hiukkaspitoisuudet ja kosteudet ovat keskimäärin pienempiä kuin leijupetikattiloissa sekä puupolttoaine- ja turvekäytössä. Leijupedeissä poltetaan usein kosteampaa polttoainetta ja ilmakertoimet ovat pienempiä kuin pienissä arinakattiloissa. (3, s. 22.)

Syklonierottimet ovat kustannusteknisesti parhaita karkeiden hiukkasten poistossa. Niiden haittoina voidaan mainita tukkeutumisriski suurilla savukaasun hiukkas- ja kosteuspitoisuuksilla sekä heikko pienhiukkasten keräysteho. (3, s. 22.)

2.3.2 Sähkösuodatin

Sähkösuodatin on kallis mutta varma valinta puulle ja turpeelle. Päästöt voivat vaihdella polttoaineen ja polton säätöjen mukaan, koska hiukkasten sähköjohtavuus vaikuttaa erotustehoon. Sähkösuodattimen etuna ovat pienet käyttökulut, ja polttoaineen tuhkapitoisuuden vaihdellessa voi esierottimeksi asentaa syklonin tasaamaan vaihteluja. (3, s. 22.)

2.3.3 Pesuri

Työssä keskitytään märkäpatjapesureihin, joista suurin osa on tyypiltään rikin poistoon tarkoitettuja pesureita joiden edessä on hiukkaserotin. Pesuri koostuu erillisestä karkeiden hiukkasten märkäerottimesta ja lämmöntalteenottoyksiköstä (kuva 1). (3, s. 22.)



KUVA 1. Märkäpatjapesuri

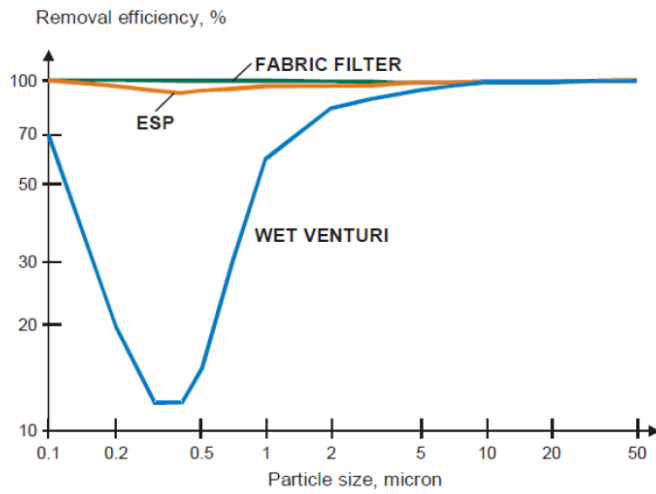
Pesurin ensisijaisena hankintaperusteena on savukaasujen vesihöyryn lauhdelämmöntalteenotosta saatava taloudellinen hyöty. Lauhde-energiaa käytetään kaukolämmön paluueden esilämmitykseen. Suomessa pesureita käytetään eniten lämmityskattiloissa, sillä yhteiskäytössä paluueden esilämmitys pienentää höyryturbiinin jäähtytystä ja sähkötehoa. (3, s. 22.)

Pesurit ovat tehokkaita rikkidioksidin ja vetykloridin erotuksessa. Rikkidioksidin erotusasteeseen vaikuttavat pesuveden lämpötila ja pH ja esimerkiksi turpeenpolton rikkidioksidin erotusaste on tavallisesti 80...98 %. Vetykloridin erotusaste on myös korkea, useimmiten 70...95 %. Lauhdevesi johdetaan selkeytysaltaasta neutraloituna ja suodatettuna viemäriin tai vesistöön. (3, s. 22.)

Pesurit ovat taloudellisesti edullisempia kosteita puupolttoaineita käyttävissä lämpökeskuksissa, koska silloin puun emäksinen tuhka neutraloi lauhdevettä jolloin neutralointikemikaalin käyttötarve on pieni. Neutralointikemikaalina käytetään tavallisesti natriumhydroksidia. (3, s. 22.)

Pesurin lämmöntalteenotto toimii tehokkaimmin kattilan nimellistehon alueella, jolloin lämmöntalteenotto voi parhaimmillaan olla noin 30 % kattilan tehosta. Suurella teholla pyritään polttamaan kuivempaa polttoainetta. Pienillä osatehoilla ilmakerroin kasvaa ja savukaasut laimenevat, jolloin lämmön talteenoton tehon osuus pienenee. (3, s. 23.)

Märkäpatjasavukaasupesuri on parhaimmillaan karkeiden hiukkasten erotuksessa savukaasusta (kuva 2). Hiukkaserottimena pesurilla ei kuitenkaan ole suurta taloudellista merkitystä, koska myös hinnaltaan edulliset syklonit erottavat karkeita hiukkasia tehokkaasti.

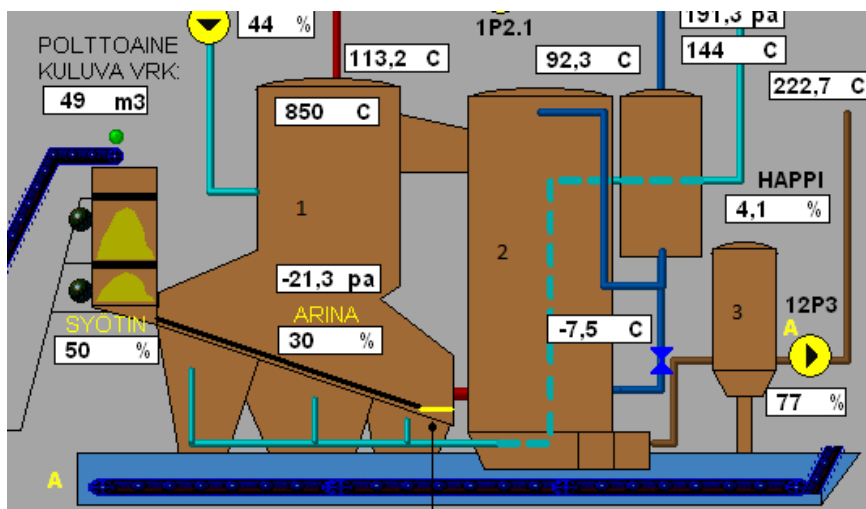


KUVA 2. Erilaisten puhdistusmenetelmien erotuskyky hiukkasten koon mukaan (3, s. 6)

3 LÄMPÖKATTILA

Lämpökattila on laite, jolla lämmitetään väliainetta polttoaineen palamisesta vapautuvalla energialla. Yleinen väliaine on vesi, jota käytetään rakennusten ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen sekä erilaisiin teollisuusprosesseihin. On olemassa erilaisia lämpökattiloita aina muutaman kilowatin lämpötehon tarpeesta tuhansien megawattien tarpeeseen asti. Mikäli lämmöntarve ylittää kymmenen megawattia, on laitos yleensä CHP-voimala, jossa lämmöntuotantoon käytetään höyrykattilaa ja sähköntuottoon höyryturbiinia. (4.)

Polttoaine eli tässä tapauksessa hake palaa arinan päällä. Kattilan pesästä (1) savukaasut ohjataan konvektio-osaan (2), jossa savukaasut jäähtyvät ja osa savukaasun lämmöstä otetaan talteen veteen. Konvektio-osan jälkeen savukaasut ohjataan syklonille (3), jossa savukaasusta erotellaan suuret hiukkaset. Syklonin jälkeen savukaasut ohjataan savukaasupesurille tai savupiipun kautta ulkoilmaan. (Kuva 3.)



KUVA 3. Kiinteän polttoaineen kattila

Lämpökattilat jaotellaan niiden tehon mukaan seuraavasti:

- kiinteistökattilat – käytetään yksittäisen rakennuksen lämmöntarpeen kattamiseen (alle 1 megawatti)
- kaukolämpökattilat - Käytetään keskitettyyn lämmöntuotantoon, eli kaukolämmön tuotantoon (yli 1 megawatti) (4).

Työssä keskitytään yli 1 megawatin kaukolämpökattiloihin, joten yksittäisien rakennuksien lämpökattiloita ei käsitellä.

3.1 Kaukolämpökattiloiden hyötysuhde

Tulipesän muoto ja lämmönsiirtoon käytetty pinta-ala vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen. Mitä suuremmaksi hyötysuhde kasvatetaan, sitä enemmän muodostuu käytännön teknisiä ongelmia. Myös eri polttoaineilla on erilaisia rajoitteita. Tyypillinen kattilan hyötysuhde, joka saadaan yhtälöstä, kattilasta saatu lämpöteho jaettuna polttoaineen energiasisällöllä, on noin 90 %. (4.)

Suurin osa häviöstä muodostuu savukaasujen mukana ilmaan menevästä lämmöstä, jonka huomattava osa on vesihöyryn sisältämää latenttilämpöä. Märkäpatjasavukaasupesureilla voidaan ottaa veden höyrystymisestä syntyvä energia talteen termodynaamisessa prosessissa. Koska yleisinä oletuksena on, että polttoaineesta saatavasta energiasta osa menee hukkaan vesihöyrynä polttoaineen kosteuden takia, voi tämän energian talteenotolla kattilan teoreettinen hyötysuhde nousta yli 100 %:n, kun käytetään polttoaineen alempaa lämpöarvoa (*LHV, Lower heating value.*) (4.)

3.2 Polttoaineen lämpöarvo

Lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun 1 kg polttoainetta palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 asteen lämpötilaan, kutsutaan polttoaineen ylemmäksi lämpöarvoksi eli kalorimetriseksi lämpöarvoksi. Polttoaineen ylemmässä lämpöarvossa polttoaineen kosteusprosentti on 0 %. (5.)

Alempi lämpöarvo eli tehollinen lämpöarvo on lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun polttoaineessa kosteutena oleva vesi ja palamisreaktiossa muodostunut vesi ovat vesihöyrynä. Alempi lämpöarvo on veden höyrystymiseen kuluneen energian verran pienempi kuin ylempi lämpöarvo. (5.)

3.3 Konvektio-osa ja sykloni

Kattilan konvektio-osa on tulipesän jatke, jolla lisätään lämmön talteenottoon tarkoitettua pinta-alaa. Konvektio-osan seinämän takana on yleensä vettä, johon lämpöä kerätään. Lämpö siirtyy sitä nopeammin, mitä suurempi on lämpötilaero savukaasun ja konvektiopinnan välillä. (4.)

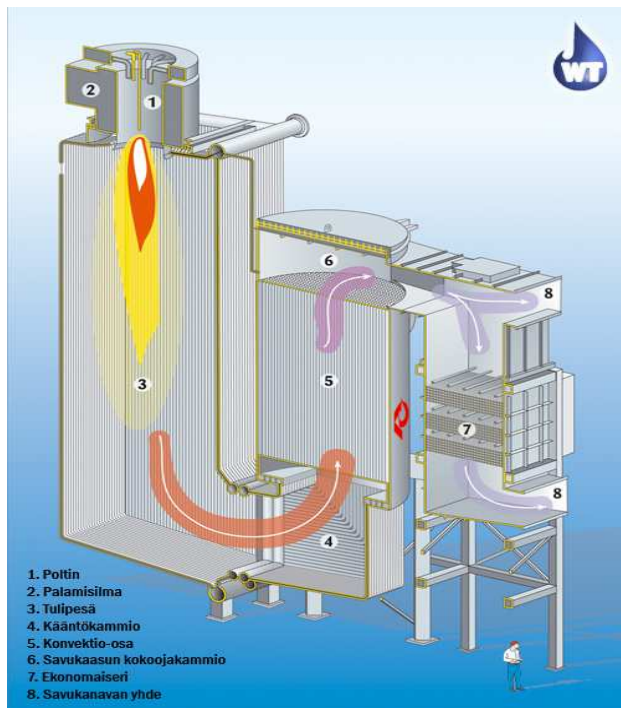
Yleensä kattiloissa käytetään pysty- tai vaakatoimisia konvektio-osia. Pysty- ja vaakatoimisten konvektiopintojen yhdistelmien käyttö on myös periaatteessa mahdollista. Konvektiopintojen materiaalina käytetään yleensä kestäväää Corten-terästä. (4.)

Puunpoltossa konvektio-osan pinnalla muodostuu nokea, kun kuumat palokaasut kohtaavat kylmän pinnan. Konvektio-osan puhtaana pito on näin ollen tärkeää toiminnan takaamiseksi. (4.)

Konvektion savukaasuja jäähdyttävän vaikutuksen kasvaessa riittävän suureksi syntyy kondenssivettä. Tämä ei sinällään ole huono asia, sillä myös kondenssiveden lämmönkeräily on menetelmä, jolla laskennallinen hyötysuhde voidaan saada yli 100 %:n, kun käytetään polttoaineen lämpöarvona alempaa lämpöarvoa (*LHV, Lower heating value*). Kondenssivedellä on kuitenkin ruostuttava vaikutus, ja mikäli käytetään polttoaineena öljyä, sen poltosta tulee aina hieman rikkiä, joka yhdistyessään kondenssiveteen muodostaa rikkihappoa. (4.)

3.3.1 Konvektio- osan sijoitus ja toiminta

Tulipesän jälkeen savukaasut ohjataan kääntökammion kautta konvektio-osaan. Savukaasujen kulkiessa konvektio-osan läpi siirtyy niissä olevaa lämpöä konvektio- osan seinän takana olevaan veteen. Konvektio-osan jälkeen savukaasut kootaan ja ohjataan savupiippuun tai savukaasujen puhdistimille (kuva 4).



KUVA 4. Konvektio-osa (6)

Kuumimmat kaasut kulkevat konvektio-osan keskellä, joten niiden siirtämiseen konvektio-osan reunan talteenottopinnoille käytetään turbulenssilevyjä. Levyjen tarkoitus on aiheuttaa savukaasun pyörteilyä, jolloin kuumimmat kaasut siirtyvät konvektio-osan keskeltä konvektiopinnoille.

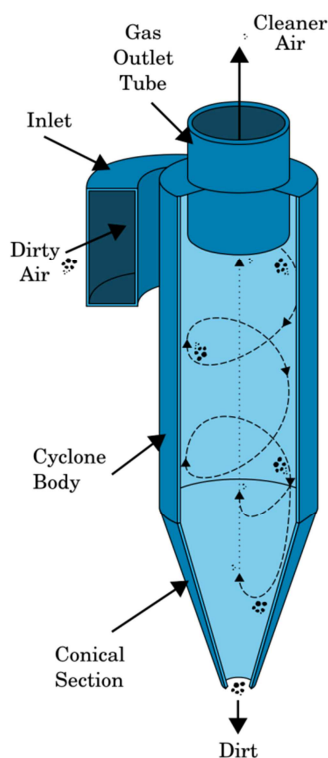
Pyörteilystä johtuen savukaasujen nopeus hidastuu, jolloin veto heikentyy ja palo hidastuu. Konvektio-osat eivät saa olla liian ahtaita, jotta palon hidastuminen ei heikennä hyötysuhdetta. Konvektio-osan jälkeen poistuvat palokaasut ohjataan savukaasupesurille tai savupiippuun. Palamiseen saadaan lisää vetoa pitkän savupiipun avulla.

Kun poltto ei ole jatkuvaa, kattilan läpi kulkeva polttojen välinen ilmavirtaus jäähdyttää kattilaa. Tämän ehkäisemiseksi pidetään kattilan luukut ilmatiiviinä ja polttimen ilmanotto suljettuna. Joissain kattiloissa on konvektio-osan perässä vetopelti, joka suljetaan puunpolttojen välillä. Vetopellin toiminta voidaan myös automatisoida.

3.3.2 Sykloni

Konvektio-osan jälkeen savukaasut kerätään yhteen ja ohjataan sykloniin, jossa niistä erotetaan suurimmat hiukkaset. Syklonissa savukaasu ohjataan pyörteisenä syklonin reunoille. Suurimmat hiukkaset irtoavat savukaasusta syklonin reunoille, josta ne valuvat märkäkolalle syklonin alaosasta. (Kuva 5.)

Syklonin jälkeen savukaasut ohjataan savupiippuun tai savukaasupesurille. Sykloni puhdistaa tehokkaasti hiukkasia savukaasusta.



KUVA 5. Sykloni

4 SAVUKAASUPESURI

Märkäpatjasavukaasupesuria käytettäessä saadaan kattilan laskennallinen hyötysuhde nousemaan yli 100 %:n, kun käytetään polttoaineen alemmaa lämpöarvoa (*LHV, Lower heating value*). Toiminta on kaksi-vaiheista, jossa ensimmäisessä pestään noki ja muut likapartikkelit pois. Toisessa vaiheessa tapahtuu lämmön talteenotto, joka perustuu termodynamiikkaan.

Savukaasupesurilla voidaan toteuttaa savukaasujen puhdistus lämmöntalteenoton yhteydessä.

4.1 Toimintaperiaate

Polttoaineessa oleva vesi höyrystyy polttoaineen palaessa vesihöyryksi, ja polttoaineessa oleva vety yhdistyy palamisilmassa olevan hapen kanssa muodostaen vettä. Palamisreaktiossa muodostunut vesi höyrystyy vesihöyryksi palamisen korkean lämpötilan ansiosta. Vesihöyry siirtyy savukaasun mukana eteenpäin. Savukaasupesurissa savukaasua jäähdytetään vedellä, jolloin savukaasussa oleva vesihöyry muuttuu takaisin vedeksi.

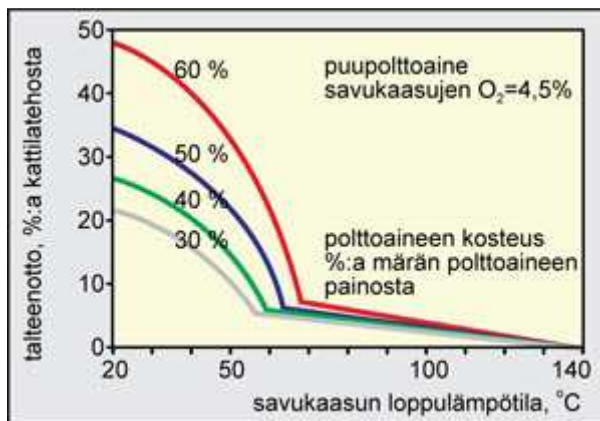
Savukaasussa olevan vesihöyryn tiivistyessä vedeksi vapautuu energiaa, joka lämmittää pesukierrossa olevaa vettä. Vesihöyryn tiivistyessä takaisin vedeksi saadaan siitä suurin piirtein saman verran energiaa kuin veden höyrystyessä. Veden olomuodon muutoksesta saatava energia on noin 540 kcal/kg normaalipaineessa lämpötilassa 100 °C. (7.)

Savukaasupesurissa savukaasuun sumutetaan vettä ohuena sumuna, jolloin savukaasu jäähtyy. Savukaasun jäähtyessä kastepisteeseen alkaa savukaasussa oleva vesihöyry tiivistyä takaisin vedeksi ja höyrystymiseen tarvittu energia vapautuu. Savukaasun lauhtuessa muodostuu lauhdetta pesupatjan pinnalle, joka toimii prosessin lämmönsiirtopintana. Myös kuivan savukaasun jäähtyessä vapautuu energiaa, joka lämmittää pesukierron vettä.

Lämmennyt pesukierron vesi kerääntyy savukaasupesurin alaosaan, josta se siirretään lämmönsiirtimelle. Lämmennyt pesukierron luovuttaa lämmönsiirtimellä vastaanotetun energian kaukolämpöverkoston paluuveteen. Pesukierron vesi sumutetaan lämmönsiirtimeltä jäähtyneenä takaisin savukaasuun.

Polttoaineen kosteusprosentti ja savukaasun loppulämpötila vaikuttavat oleellisesti savukaasupesurilla saatavaan tehoon. Kosteamman polttoaineen kastepisteen lämpötila on korkeampi, jolloin savukaasun lauhtuminen alkaa aikaisemmin. Näin ollen kosteamman polttoaineen savukaasun sisältämää vesihöyryä tiivistyy enemmän vedeksi, vaikka savukaasun loppulämpötila jää korkeaksi.

Kuivemman polttoaineen kastepisteen lämpötila on alhaisempi, jolloin savukaasun loppulämpötilan tulee olla alhaisempi, jotta enemmän vesihöyryä tiivistyy vedeksi. (Kuva 6).



KUVA 6. Savukaasun loppulämpötilan ja polttoaineen kosteuden vaikutus lämmön talteenottoon (8)

Savukaasupesurin tehokkuus on suoraan verrannollinen kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilaan, koska pesukierron veden lämpötila määräytyy kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilasta. Savukaasun loppulämpötila on pesukierron veden lämpötilan mukainen. Alemman savukaasun loppulämpötilan seurauksena savukaasussa olevasta vesihöyrystä tiivistyy enemmän vedeksi.

Alhainen veden lämpötila mahdollistaa suuremman savukaasun jäähtymän, jolloin vesi vastaanottaa enemmän savukaasun lauhtumisesta vapautuvaa energiaa. Yleensä savukaasupesurin tehokkuus rajoittuu kaukolämpöverkoston paluuveden korkeaan lämpötilaan. Mikäli pesukierron veden lämpötilan on kastepistettä korkeampi, toimii savukaasupesuri haihduttimena ja pesukierron vesi höyrystyy.

Savukaasupesuri on parhaimmillaan, kun sitä käytetään luonnollisesti kosteiden polttoaineiden, kuten biopolttoaineiden kanssa. Lämmöntuotantoon käytettävät biopolttoaineet ovat usein puuperäisiä tai turvetta (taulukko 3). (9.)

TAULUKKO 3. Puuperäisten polttoaineiden kosteusprosentteja (9)

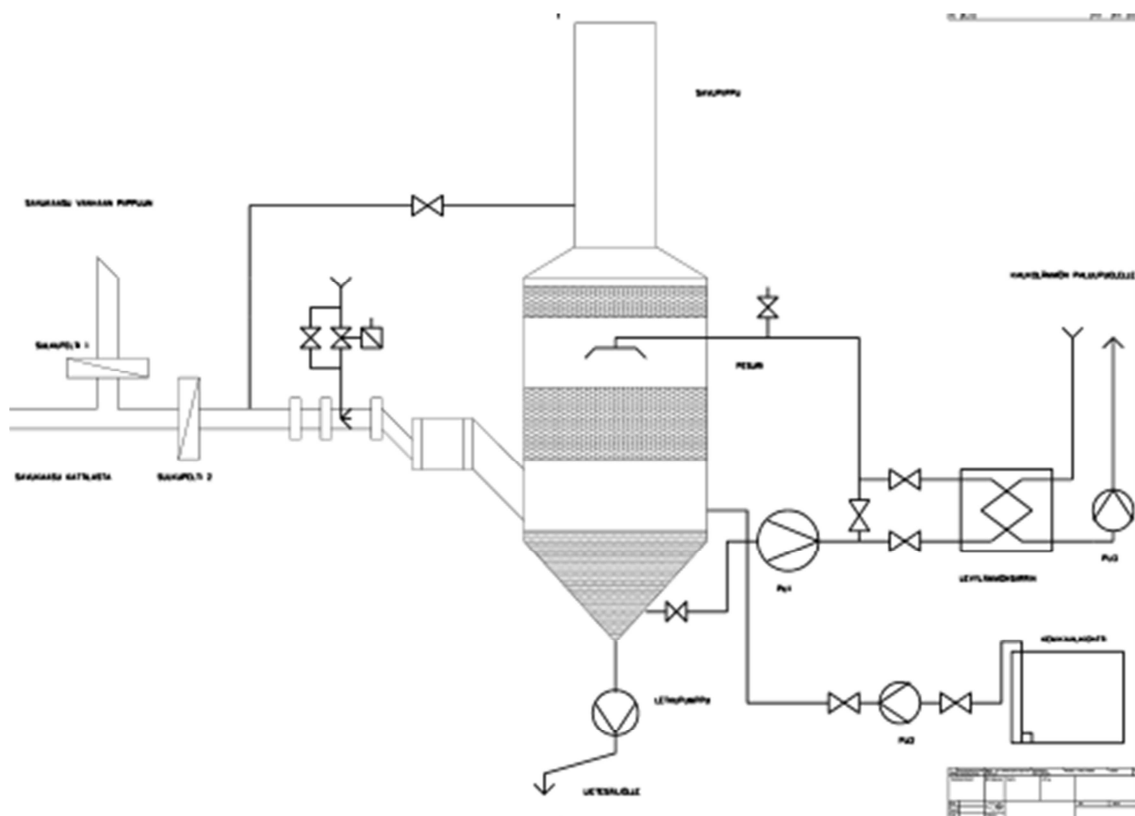
Polttoaine	Tehollinen lämpöarvo kWh/kg	Irtotiheys saapumistilassa kg/i -m ³	Energiatiheys MWh/i-m ³	Kosteusprosentti
Metsätähdehake	1,66 - 2,5	250 - 400	0,7 - 0,9	50 - 60
Kokopuuhake	1,94 - 2,78	250 - 350	0,7 - 0,9	45 - 55
Rankahake	1,94 - 3,06	250 - 350	0,7 - 0,9	40 - 55
Kantohake	2,22 - 3,61	200 - 300	0,7 - 1,0	30 - 50
Havupuun kuori	1,39 - 2,5	250 - 350	0,5 - 0,7	50 - 65
Koivun kuori	2,22 - 3,06	300 - 400	0,6 - 0,9	45 - 55
Pilke	3,72 - 4,03	240 - 320	1,35 - 1,6 *	20 - 25

4.1.1 Savukaasupesurin toiminta virtauskaavion mukaan

Savukaasupesuri toimii vastavirtaperiaatteella, jossa savukaasut tulevat pesutorniin pesutornin alaosasta ja pesukierron vettä sumutetaan savukaasuun savukaasupesurin yläosasta. Savukaasupesuriin tulevat savukaasut jäähtyvät, kun niihin sumutetaan vettä pesukierron suuttimella. (Kuva 7.)

Savukaasujen lämpötilan alentuessa kastepisteeseen alkaa niissä oleva vesihöyry tiivistyä vedeksi. Vesihöyry tiivistyy savukaasupesurin pesupatjalle, joka koostuu huokoisista muovihelmistä. Muovihelmien pinnat toimivat prosessin lämmönsiirtopintoina ja muodostunut lauhde valuu pesurin alaosaan. Lämmennyt lauhde siirretään lämmönsiirtimelle, jossa se luovuttaa vastaanotetun energian kaukolämpöverkoston paluuveteen ja palaa jäähtyneenä takaisin pesukiertoon.

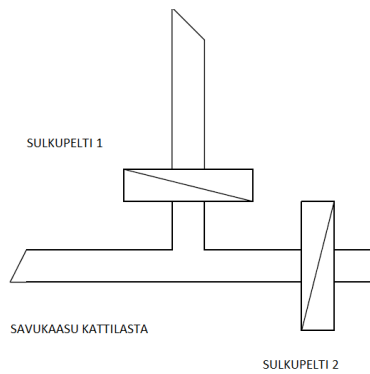
Pesurissa kiertävän veden pH pidetään arvojen 6–8 välillä lisäämällä siihen natriumhydroksidia (NaOH). Pesurin pesuveden pH-arvo laskee helposti savukaasuissa olevan rikkidioksidin takia. Savukaasussa olevat hiukkaset ja kaasumaiset epäpuhtaudet päätyvät lietteeksi pesurin alaosan suppiloon, josta ne pumpataan lietealtaaseen.



KUVA 7. Savukaasupesurin virtauskaavio

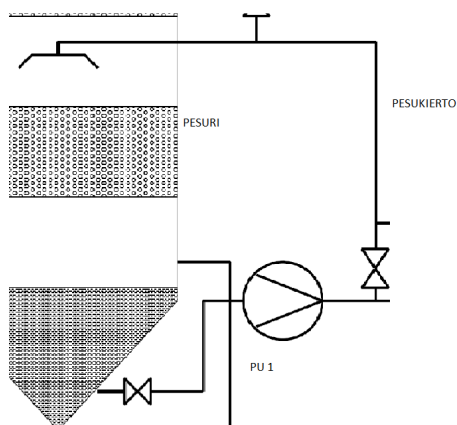
4.1.2 Savukaasupesurin osat

Savukaasu johdetaan kattilalta syklonin kautta pesurille. Vanha savupiippu suljetaan sulkupellillä 1 ja pesurille menevä savupiippu avataan sulkupellillä 2. Sulkemalla pelti 2 ja avaamalla pelti 1 voidaan savukaasut ohjata vanhaan savupiippuun esimerkiksi savukaasupesuria huollettaessa. (Kuva 8.)



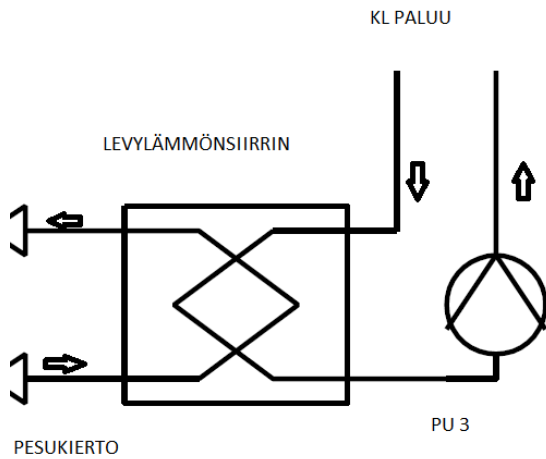
KUVA 8. Sulkupellit

Pesurin ylä- ja keskiosassa on pesupatja, joka koostuu huokoisista muovihelmistä. Muovihelmien pinta toimii vesihöyryn tiivistymisen lämmönsiirtopintana. Muodostunut lauhde valuu pesurin alaosaan, jossa on vettä. Pumppu numero 1 kierrättää pesurin pesukiertoa, joka lähtee liikkeelle pesurin alaosasta minne lämmennyt lauhdevesi kerääntyy. Lauhdevesi kierrätetään lämmönsiirtimelle, josta se palaa jäähtyneenä takaisin pesukiertoon. (Kuva 9.)



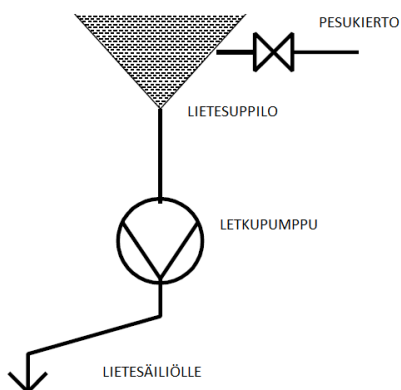
KUVA 9. Pesukierto ja PU

Lämmönsiirtimen toiselle puolelle johdetaan kaukolämmön paluuvettä, joka lämpenee pesurin lauhdeveden avulla. Kaukolämmön paluuvettä kierrätetään pumpulla numero 3. (Kuva 10.)



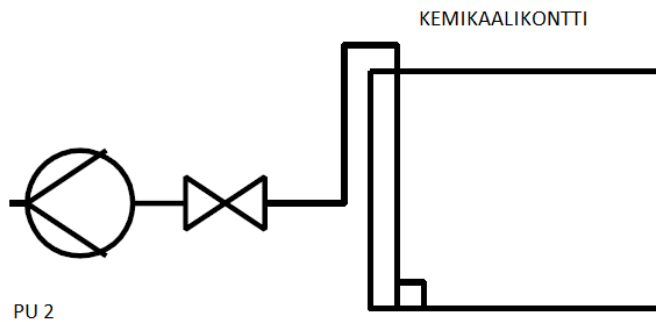
KUVA 10. Lämmönsiirrin

Pesurin käytössä muodostuu lietettä savukaasuissa olevista hiukkasista ja kaasumaisista epäpuhtauksista. Pesurin alaosassa sijaitsevalla letkupumpulla siirretään pesurista tuleva liete kattilan lietesäiliölle. Tarkoituksena on, että liete ei pääse pesukiertoon, sillä likainen vesi voi rikkoa lämmönsiirtimen. (Kuva 11.)



KUVA 11. Lietesuppilo ja letkupumppu

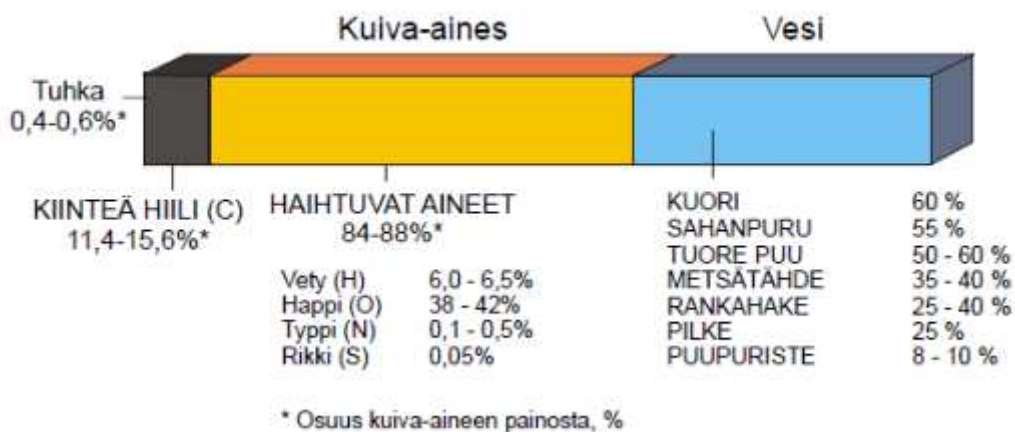
Pumpulla numero 2 voidaan annostella kemikaaleja suoraan pesuriin ja näin ollen säätää pesurin veden PH-arvoa (kuva 12). Neutralointikemikaalina käytetään tavallisesti natriumhydroksidia.



KUVA 12. Kemikaalikontti ja PU 2.

4.2 Palamisreaktio ja kemiallinen koostumus

Polttoaineen palaessa muodostuu erilaisia savukaasuja polttoaineen kemiallisen koostumuksen mukaan. Polttoaine koostuu tuhka-aineista, kiinteistä aineista, haihtuvista aineista ja polttoaineessa olevasta kosteudesta eli vedestä. Tässä työssä käytetään polttoaineena haketta (kuva 13.)



KUVA 13. Puun kemiallinen koostumus

Palamisreaktiossa polttoaineen sisältämät alkuaineet reagoivat polttoilmassa olevan hapen kanssa, jolloin polttoaineen kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi. Palamisen edellytyksiä ovat polttoaine, happi, riittävän korkea lämpötila ja esteetön ketjureaktio. Palamisen ketjureaktiossa puun sisältämät alkuaineet reagoivat polttoilman hapen kanssa seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$, Hiili (C) reagoi hapen (O_2) kanssa, muodostuu hiilidioksidia (CO_2)

$H_2 + \frac{1}{2}O \rightarrow H_2O$, Vety (H_2) reagoi happiatomin (O) kanssa, muodostuu vettä (H_2O)

$S + O_2 \rightarrow SO_2$, Rikki (S) reagoi hapen (O_2), muodostuu rikkidioksidia (SO_2). (1, s. 130.)

5 TEHON LASKENTA

Savukaasupesurista saatavaan tehoon vaikuttavat palamisreaktiossa muodostuvan veden määrä ja sen höyrystymiseen vaadittava energiamäärä, veden lämmitykseen tarvittava energiamäärä sekä kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötila. Pesurin hyötysuhde lasketaan vertaamalla lämmön talteenotosta saatavaa tehoa kattilasta saatavaan tehoon.

5.1 Savukaasussa olevan vesihöyryn määrä

Polttoaineen palaessa vesihöyryä muodostuu polttoaineen sisältämästä vedestä, palamisreaktiossa muodostuvasta vedestä ja palamisilman mukana tulevasta vedestä. Lasketaan, paljonko polttoaineesta, palamisilmasta ja palamisreaktiosta muodostuu vesihöyryä, kun polttoaine palaa.

5.1.1 Veden massa kosteutena ja kuiva-aineen massa

Polttoaineen sisältämä vesi ilmoitetaan kosteusprosenttina. Kosteusprosentti ilmaisee, montako prosenttia polttoaineen massasta on vettä. Kosteutena olevan veden massa lasketaan kaavalla 1.

$$m_{\text{vesi,polttoaine}} = \frac{m_{\text{polttoaine}} \cdot \%_{\text{kosteus}}}{100} \quad \text{KAAVA 1}$$

$m_{\text{vesi,polttoaine}}$ = veden massa polttoaineessa (kg)

$m_{\text{polttoaine}}$ = polttoaineen massa (kg)

$\%_{\text{kosteus}}$ = polttoaineen kosteusprosentti (%)

Polttoaineen kuiva-aineen massa voidaan laskea, kun tiedetään polttoaineen sisältämän veden massa. Polttoaineen kuiva-aine lasketaan kaavalla 2.

$$m_{\text{kuiva}} = m_{\text{kok}} - m_{\text{vesi,polttoaine}} \quad \text{KAAVA 2}$$

m_{kuiva} = polttoaineessa olevan kuiva-aineen massa (kg)

m_{kok} = polttoaineen kokonaismassa (kg)

$m_{\text{vesi,polttoaine}}$ = polttoaineessa olevan veden massa (kg)

5.1.2 Palamisreaktiossa muodostuvan veden massa

Polttoaineen kuiva-aine koostuu alkuaineista, joiden massa lasketaan kaavalla 3 (1, s. 39).

$$m_x = \text{paino} - \% * m_{\text{kuiva}} \quad \text{KAAVA 3}$$

m_x = Alkuaineen massa (kg)

paino - % = Alkuaineen osuus polttoaineessa (%)

m_{kuiva} = Polttoaineessa olevan kuiva-aineen massa (kg)

Alkuaineiden ainemäärä polttoaineessa lasketaan kaavalla 4 (1, s. 39).

$$n = \frac{m}{M} \quad \text{KAAVA 4}$$

n = ainemäärä (kmol)

m = alkuaineen massa (kg)

M = alkuaineen moolimassa (kg/kmol)

Palamisreaktiossa syntyneen yhdisteen moolimassa lasketaan kaavalla 5 (1, s. 133).

$$M_{\text{yhdiste}} = x * M_{\text{alkuaine 1}} + x * M_{\text{alkuaine 2}} \quad \text{KAAVA 5}$$

M_{yhdiste} = yhdisteen moolimassa (kg/kmol)

$M_{\text{alkuaine 1}}$ = alkuaineen yhden atomin moolimassa (kg/mol)

$M_{\text{alkuaine 2}}$ = alkuaineen yhden atomin moolimassa (kg/mol)

x = alkuaineen atomien lukumäärä

Palamisreaktiossa polttoaineen sisältämän vedyn ja hapen reagoiessa muodostuvan veden massa lasketaan kaavalla 6 (1, s. 133).

$$m_{\text{vesi,palaminen}} = \frac{m_{\text{vety}}}{M_{\text{vety}}} * (M_{\text{vety}} + M_{\text{happi}}) \quad \text{KAAVA 6}$$

$m_{\text{vesi,palaminen}}$ = veden massa (kg)

m_{vety} = vedyn massa kuiva-aineessa (kg)

M_{vety} = vedyn (H_2) moolimassa (kg/kmol)

M_{happi} = hapen (O) moolimassa (kg/kmol)

5.2 Palamisilman mukana tulevan veden massa

Savukaasuun höyrystyy myös vettä palamisilman sisältämästä vedestä.

Palamisilman sisältämä vesimäärä ilmenee ilmankosteutena. Ilman suhteellista kosteutta ilmaistaan kosteusprosentilla. Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus voidaan laskea vertaamalla vesihöyryn osapainetta ilmanpaineeseen.

Vesihöyryn osapaine lasketaan kaavalla 7 (10, s. 16).

$$P_h = RH * P_{hs} \quad \text{KAAVA 7}$$

P_h = vesihöyryn osapaine (kPa)

RH = ilman kosteusprosentti

P_{hs} = vesihöyryn osapaine kyseessä olevan ilman läpätilassa (kPa)

Vesihöyryn osapaineen avulla lasketaan palamisilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus kaavalla 8 (10, s. 16).

$$y_{h_2O} = \frac{P_h}{P}$$

KAAVA 8

y_{h_2O} = vesihöyryn mooliosuus palamisilmassa

P_h = vesihöyryn osapaine (kPa)

P = ilman paine kyseisellä ilman lämpötilalla ja suhteellisella kosteudella (kPa)

Seuraavaksi lasketaan palamiseen tarvittavan hapen määrä. Palamisilmassa oleva happi reagoi polttoaineen kuiva-aineessa olevien alkuaineiden kanssa ja niistä muodostuu erilaisia yhdisteitä. Lasketaan hapen tarve eri yhdisteille:

Hiili: $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Hiilestä muodostuu hiilidioksidia, kun siihen sitoutuu happea palamisilmasta. Hapen ainemäärä hiilidioksidille lasketaan kaavalla 9 (10, s. 17).

$$n_{CO_2} = \frac{m_{kuiva} * paino - \%_C}{M_C * 100}$$

KAAVA 9

n_{CO_2} = hiilen vaatima hapen ainemäärä (kmol)

m_{kuiva} = polttoaineen kuiva-aineen massa (kg)

$paino - \%_C$ = hiilen painoprosentti (%)

M_C = hiilen moolimassa (kg/kmol)

Vety: $H_2 + O \rightarrow H_2O$. Vedystä muodostuu vettä, kun se reagoi palamisilmassa olevan hapen kanssa. Hapen ainemäärä vedelle lasketaan kaavalla 10 (10, s. 17).

$$n_{H_2O} = 0,5 * \frac{M_H * \text{paino} - \%H}{100}$$

KAAVA 10

n_{H_2O} = vedyn vaatima hapen ainemäärä (kmol)

m_{kuiva} = polttoaineen kuiva-aineen massa (kg)

paino - %_H = vedyn painoprosentti (%)

M_H = vedyn moolimassa (kg/kmol)

Happi: Happi ei reagoi palamisilman kanssa vaan se käytetään palamisreaktion happea. Lasketaan hapen ainemäärä kaavalla 11 (10, s. 17).

$$n_{O_2,p} = \frac{m_{\text{kuiva}} * \text{paino} - \%O}{100}$$

KAAVA 11

$n_{O_2,p}$ = hapen ainemäärä (kmol)

m_{kuiva} = polttoaineen kuiva-aineen massa (kg)

paino - %_O = hapen painoprosentti (%)

M_O = hapen moolimassa (kg/kmol)

Seuraavaksi lasketaan palamiseen tarvitsema hapen määrä yhdisteiden tarvitseman moolimassan avulla. Polttoaineessa oleva happi vähentää hapen tarvetta. Hapen tarve lasketaan kaavalla 12 (10, s. 17).

$$n_{O_2} = (n_{CO_2} + n_{H_2O} - n_{O_2,p})$$

KAAVA 12

n_{O_2} = hapen tarve (kmol)

n_{CO_2} = hiilidioksidin muodostumiseen tarvittava hapen ainemäärä (kmol)

n_{H_2O} = veden muodostumiseen tarvittava hapen ainemäärä (kmol)

$n_{O_2,p}$ = hapen ainemäärä polttoaineessa (kmol)

Palamisreaktion nopeuttamiseksi palamiseen syötetään enemmän ilmaa, kuin palamisen tarve on. Ilmaylimäärää kuvataan ilmakertoimella, ja siinä oleva happi päätyy suoraan savukaasuun. Lasketaan ilmakertoimella tuleva lisähapen ainemäärä kaavalla 13 (10, s. 17).

$$n_{O_2,sk} = (i - 1) * n_{O_2} \quad \text{KAAVA 13}$$

$n_{O_2,sk}$ = lisähapen ainemäärä (kmol)

i = ilmakerroin

n_{O_2} = palamisreaktion tarvitsema happimäärä (kmol)

Palamisilma sisältää typpeä, joten palamisreaktioon tarvittavan hapen mukana tulee aina typpeä. Ilmassa typpeä on 79 % ja happea 21 %. Lasketaan typen ainemäärä kaavalla 14 (10, s. 17).

$$n_{N_2} = i * 3,77 * n_{O_2} \quad \text{KAAVA 14}$$

n_{N_2} = typen ainemäärä (kmol)

i = ilmakerroin

n_{O_2} = palamisreaktion tarvitsema hapen ainemäärä (kmol)

Palamisilman sisältämä vesihöyry lasketaan suhteuttamalla suhteellisen kosteuden mukainen vesihöyryn mooliosuus palamisilman ainemäärään kaavalla 15 (10, s. 18).

$$n_{H_2O,ilma} = (n_{O_2} + n_{O_2,sk} + n_{N_2}) * \frac{y_{H_2O}}{1-y_{H_2O}}$$

KAAVA 15

$n_{H_2O,ilma}$ = vesihöyryn ainemäärä palamisilmassa (kmol)

n_{O_2} = palamisreaktion tarvitsema hapen ainemäärä (kmol)

$n_{O_2,sk}$ = lisähapen ainemäärä (kmol)

n_{N_2} = typen ainemäärä (kmol)

y_{H_2O} = vesihöyryn mooliosuus palamisilmassa (kmol)

Palamisilma sisältämän vesihöyryn ainemäärän laskemisen jälkeen voidaan laskea palamisilmassa olevan veden massa kaavalla 16 (1, s. 39).

$$m_{H_2O,ilma} = M_{H_2O} * n_{H_2O,ilma}$$

KAAVA 16

$m_{H_2O,ilma}$ = veden massa palamisilmassa (kg)

M_{H_2O} = veden moolimassa (kg/kmol)

$n_{H_2O,ilma}$ = vesihöyryn ainemäärä ilmassa (kmol)

Polttoaineen poltossa muodostunut ja höyrystyvä kokonaisvesimäärä voidaan laskea laskemalla yhteen polttoaineen kosteudesta, palamisreaktiosta ja polttoilmasta saatu vesimäärä kaavalla 17 (1, s.39).

$$m_{vesi,kok} = m_{vesi,polttoaine} + m_{vesi,palaminen} + m_{H_2O,ilma}$$

KAAVA 17

$m_{vesi,polttoaine}$ = veden massa polttoaineessa (kg)

$m_{vesi,palaminen}$ = veden massa (kg)

$m_{H_2O,ilma}$ = veden massa palamisilmassa (kg)

5.3 Kuivan savukaasun massa

Savukaasun kuivien aineiden ainemäärä lasketaan kaavalla 18 (1, s. 133).

$$n_{kuiva} = n_{kosteaa} - \left(n_{kosteaa} * \left(\frac{y_{h_2o}}{1-y_{h_2o}} \right) \right) \quad \text{KAAVA 18}$$

n_{kuiva} = kuiva-aineen ainemäärä (kmol)

$n_{kosteaa}$ = kostean aineen ainemäärä (kmol)

y_{h_2o} = vesihöyryyn mooliosuus palamisilmassa (kmol)

Kuivan savukaasun kokonaismassa lasketaan kaavalla 19.

$$m_{kuiva,kok} = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n \quad \text{KAAVA 19}$$

$m_{kuiva,kok}$ = kuivan savukaasun kokonaismassa (kg)

$m_{1,2,3,n}$ = kuivan aineen massa (kg)

5.4 Polttoaineen massa

Työssä laskettiin palamisessa höyrystyvän veden energiamäärää.

Muodostuvien savukaasujen laskemiseksi tulee tietää polttoaineen massa.

Kattilan tehosta lasketaan energia kaavalla 20 (11, s. 92).

$$E = P * t \quad \text{KAAVA 20}$$

E = energia (MWh)

P = teho (MW)

t = aika (h)

Energia muunnetaan megajouleiksi kaavalla 21.

$$E_{MJ} = E * 3600$$

KAAVA 21

E_{MJ} = energia (MJ)

E = energia (MWh)

Kuluneen polttoaineen massa lasketaan kaavalla 22.

$$m_{\text{polttoaine}} = \frac{E_{MJ}}{L}$$

KAAVA 22

$m_{\text{polttoaine}}$ = polttoaineen massa (kg)

E_{MJ} = energia (MJ)

L = lämpöarvo (MJ/kg)

5.5 Vesihöyryn lämpöteho

Kun palamisessa muodostunut vesi höyrystyy, sitoutuu vesihöyryyn energiaa. Veden määrä pysyy koko ajan samana, joten energian säilymislain mukaan vesihöyryn tiivistyessä vapautuva energia vastaa veden höyrystymiseen kulunutta energiaa. Vesihöyryssä oleva energiamäärä eli latenttilämpö voidaan määrittää vesihöyryn entalpioiden avulla.

Entalpiaa mitataan energian ja massan suhteella. Entalpiaero lasketaan kaavalla 23 (11, s. 109).

$$\Delta H = H_h - H_v$$

KAAVA 23

ΔH = vesihöyryn entapioiden erotus (kJ/kg)

H_h = vesihöyryn entalpia tietyssä lämpötilassa (kJ/kg)

H_v = veden entalpia tietyssä lämpötilassa (kJ/kg)

Vesihöyryn olomuodon muuttuessa vapautunut energia lasketaan kaavalla 24 (11, s. 107).

$$E = m_{vesi,kok} * \Delta H \quad \text{KAAVA 24}$$

E = vapautuva energia (kJ)

$m_{vesi,kok}$ = kokonaisvesimäärä (kg)

ΔH = vesihöyryn latenttilämpö (kJ/kg)

Kun tiedetään massavirta, lasketaan lämpöteho kaavalla 25 (11, s. 107).

$$Q = qm * \Delta H \quad \text{KAAVA 25}$$

Q = teho (kW)

qm = massavirta (kg/s)

ΔH = vesihöyryn latenttilämpö (kJ/kg)

5.6 Kuivan savukaasun lämpöteho

Kuivan savukaasun jäähtyessä vapautuu energiaa. Kuiva savukaasu lämmittää vettä, ja sen lämpöteho lasketaan kaavalla 26 (11, s. 107).

$$Q = qm * c * (T_1 - T_2) \quad \text{KAAVA 26}$$

Q = teho (kw)

qm = massavirta (kg/s)

T₁= savukaasun alkulämpötila (°C)

T₂= savukaasun loppulämpötila (°C)

5.7 Veden vastaanottama lämpöteho

Vesihöyryn lauhtumisessa vapautuvalla energialla lämmitetään pesukierron vettä. Pesupatjan toimiessa lämmönsiirtopintana vesi vastaanottaa lämpöä. Lämpöteholla saavutettava veden lämpötilaero lasketaan kaavalla 27 (11, s. 107) .

$$\Delta T = \frac{Q}{qm * c}$$

KAAVA 27

ΔT= lämpötilan muutos (°C)

Q = teho (kW)

qm = massavirta (kg/s)

c = ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C°)

5.8 Lämmön talteenoton teho ja kattilanhyötysuhde

Lämmönsiirtimen teho voidaan laskea, kun tiedetään veden massavirta ja lämpötilojen erotus kaavalla 28 (11, s. 107).

$$\Phi = qm * c * (T_1 - T_2)$$

KAAVA 28

\emptyset = lämmönsiirtimen teho (kW)

q_m = veden massavirta (kg/s)

c = ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg)

T_1 = veden loppulämpötila (°C)

T_2 = veden alkulämpötila (°C)

Lämmön talteenoton muuttuva teho voidaan laskea kaavalla 29.

$$\emptyset_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3} * \emptyset_1 \quad \text{KAAVA 29}$$

\emptyset_2 = uusi teho (MW)

\emptyset_1 = nykyinen teho (MW)

T_1 = veden uusi lämpötila lämpötila ennen lämmönsiirintä (°C)

T_2 = veden lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen (°C)

T_3 = veden vanha lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen (°C)

Savukaasupesurin hyötysuhde kattilatehosta lasketaan kaavalla 30 (11, s. 112).

$$\dot{\eta} = \frac{Q_{\text{pesuri}}}{Q_{\text{kattila}}} \quad \text{KAAVA 30}$$

$\dot{\eta}$ = pesurin lämmön talteenoton hyötysuhde

Q_{pesuri} = pesurin lämmön talteenottoteho (MW)

Q_{kattila} = kattilan teho (MW)

6 HONKAVAARAN LÄMPÖLAITOS

Puolangan kunnassa Honkavaaran lämpölaitoksen 3 megawatin kpa-kattilan yhteyteen on asennettu märkäpatjapesuri (kuva 14). Savukaasupesurilla puhdistetaan savukaasuja, ja sen yhteydessä on lämmön talteenottolaitteisto, jolla otetaan talteen savukaasujen lauhdelämpö. Esierottimena pesurille käytetään sykklonia. Huippukulutuksen aikana Puolangalla käytetään öljykattilaa kiinteän polttoaineen kattilan rinnalla.

Savukaasupesuri on asennettu vuonna 2009 paikkaamaan polttoaineen hinnan noususta johtuvia kustannuksia. Savukaasupesurilla pyritään nostamaan kiinteän polttoaineen kattilan hyötysuhdetta ja vähentämään öljykattilan käyttöä. Tavoitteena on, että polttoaineen käytön pienentyessä saadaan vuodessa noin 70 000 €:n säästö polttoainekustannuksissa. Pesuri lisää laitoksen käyttökustannuksia noin 15 000 € vuodessa, joten vuosittainen kokonaissäästö olisi 55 000 €.



KUVA 14. Puolangan kunnan savukaasupesuri

6.1 Savukaasupesuri

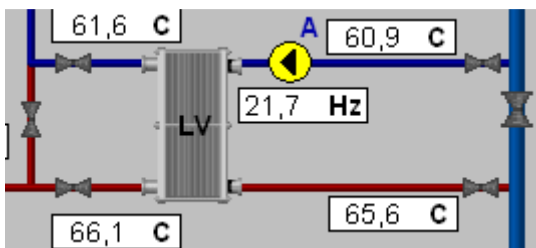
Savukaasupesuri on Condens Heat Recovery'n märkäpatjapesuri. Pesurissa on 2 märkäpatjaa lämmönsiirtopintoina ja lauhdeveden kerääjä pesurin alaosassa.

Pesurin yhteydessä on lämmöntalteenotto, jonka lämmönsiirtimen kautta lämmitetään lauhdevedellä kattilalle palaavaa kaukolämmön paluuvettä. Näin ollen kaukolämpöverkoston vettä tarvitsee lämmittää kattilassa vähemmän ja energiaa säästyy.

Savukaasut ohjataan esierottimena toimivan syklonin läpi savukaasupesuriin ja siitä eteenpäin savupiippuun ja ulkoilmaan. Savukaasut kulkevat pesurin läpi aina huoltotilanteita lukuun ottamatta. Pesuri on asennettu sisätiloihin sen huoltotoimenpiteiden helpottamiseksi ja siihen on asennettu automatiikka, joka mahdollistaa laitoksen käytön miehittämättömänä.

6.2 Lämmönsiirrin

Pesurin yhteydessä on vastavirtalevyllämmönsiirrin, jolla savukaasupesurin lauhdevedeen sitoutunut energia siirretään kaukolämmön paluuveteen. Lämmönsiirrin siirtää savukaasujen lauhdelämmön kaukolämpöverkoston paluuveteen (kuva 15).



KUVA 15. LTO-lämmönvaihdin

Lämmönsiirrin on mitoitettu huomattavasti alhaisemmalle kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilalle kuin nykytilanteessa. Lämmönsiirtimen mitoituksessa on käytetty seuraavia arvoja:

- savukaasun lämpötila 220 °C
- savukaasun pölypitoisuus max. 330 mg/m³n
- paluueden lämpötila max. 50 °C
- paluueden vesivirta mitoituspisteessä min. 15 kg/s
- lämmönsiirtoteho 650 KW
- lämpötilaero/asteisuus 2 °C.

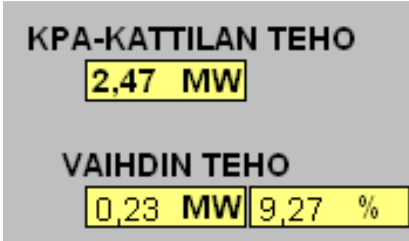
6.3 Hyötysuhde

Savukaasupesurin lämmöntalteenoton hyötysuhde on tällä hetkellä noin 10 % kattilan tehosta. Mikäli kaukolämmön paluueden lämpötila olisi alhaisempi, saataisiin pesurilla suurempi teho ja sen hyötysuhde kattilatehoon nähden nousisi. Pesurin mitoituspisteinä on käytetty seuraavia arvoja:

- kattilateho 3 MW
- polttoaineen kosteus 55 %
- paluueden lämpötila kaukolämpö 46 °C
- LTO- teho 1030 KW
- paluuesivirta 15 kg/s.

Savukaasupesurin mitoituspisteen mukainen hyötysuhde on 35 % kattilatehosta. Nykyisessä tilanteessa kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan ollessa huomattavasti korkeampi on pesurin tehokkuus ja näin hyötysuhde huomattavasti pienempi.

Esimerkkitalanteessa pesurin tehokkuus on 0,23 MW, kun kattilan teho on 2,47 MW. Lämmönsiirron hyötysuhteeksi muodostuu 9,27 % kattilatehosta. (Kuva 16.)



KUVA 16. Pesurin LTO- hyötysuhde

7 SAVUKAASUPESURIN PROSESSI

Savukaasupesurissa savukaasu jäädytetään alle vesihöyryn kastepisteen ja vesihöyry tiivistyy takaisin vedeksi. Prosessissa vesihöyry lauhtuu täyttekappalekolonnin lämmönsiirtopinnoille ja savukaasupesurin pesukierron vesi vastaanottaa vesihöyrystä vapautuvan energian. Pesukierron vesi vastaanottaa prosessissa myös kuivan savukaasun jäähtymisessä vapautuvaa energiaa.

Savukaasupesurin pesukierron veden lämpötila ei voi nousta savukaasun kastepisteen lämpötilan yläpuolelle. Savukaasun kastepiste on polttoaineen kosteudesta riippuen 62–72 °C. Savukaasupesurin hyötysuhde törmääkin yleensä korkeaan kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilaan, koska savukaasujen loppulämpötila ja pesukierron veden lämpötila määräytyvät kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilasta.

7.1 Prosessin tuottama energia esimerkkitalanteessa

Esitetään savukaasupesurin toiminta esimerkkitalanteessa. Kpa-kattilan teho on 2,47 MW ja savukaasujen kastepiste on noin 66 °C. Kastepisteen perusteella polttoaineen kosteusprosentti on noin 40 %. Lasketaan tunnin aikana kulunut polttoaine, kun polttoaineena käytetään haketta ja polttoaineen kosteusprosentti on 40 %. Kpa-kattilalla tuotetaan tunnin aikana 2,47 MWh energiaa, joka on megajouleiksi muutettuna 8892 MJ. Polttoaineen lämpöarvo 40 % kosteudella on 9 MJ/kg. Kaikki esimerkin tilanteen arvot on mitattu käytännön prosessin aikana. Laskussa oletetaan, että kaikki polttoaineen energia saadaan käytettyä kattilan lämpötehoksi. Lasketaan polttoaineen massa kaavalla 22.

$$m_{\text{polttoaine}} = \frac{8892 \text{ MJ}}{9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 988 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 22}$$

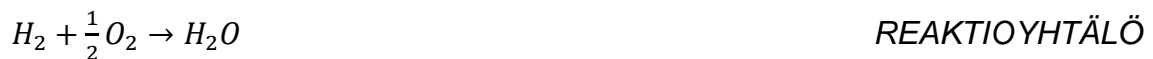
Polttoainetta kului energian tuottamiseen 988 kiloa. Polttoaineen kosteusprosentti on 40 %. Lasketaan polttoaineessa kosteutena oleva veden määrä kaavalla 1.

$$m_{\text{vesi,polttoaine}} = \frac{988 \text{ kg} * 40\%}{100} = 395 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 1}$$

Polttoaineessa on 395 kg vettä. Polttoaineen kuiva-aineen massa lasketaan kaavalla 2.

$$m_{\text{kuiva}} = 988 \text{ kg} - 395 \text{ kg} = 593 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 2}$$

Polttoaineessa on 593 kg kuiva-ainetta. Kuiva-aineesta 6 % on vetyä. Palamisreaktiossa vety reagoi polttoilman hapen kanssa ja muodostuu vettä reaktioyhtälön mukaisesti.



Muodostuvan veden massa voidaan laskea ainemäärän ja vedyn ja hapen moolimassan avulla. Vedyn (H₂) moolimassa on 2,002 kg/kmol ja hapen O₂ on 32 kg/kmol. Lasketaan veden massa kaavalla 6 (1, s. 133).

$$m_{\text{vesi,palaminen}} = \frac{0,06 * 593 \text{ kg}}{2,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} * \left(2,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} + 16,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) = 317 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 6}$$

Vedyn palaessa muodostuu vettä 317 kg. Kokonaisvesimäärä polttoaineessa on 395 kg + 317 kg = 712 kg.

7.2 Polttoilman mukana tullut vesihöyry

Polttoilman lämpötila on 25 °C, ja sen suhteellinen kosteus on 50 %. Lasketaan polttoilman mukana tuleva vesihöyry, kun käytetään ilmakerrointa 1,2. Vesihöyryn osapaine voidaan laskea suhteellisen kosteuden ja kylläisen vesihöyryyn paineella polttoilman lämpötilassa kaavalla 7 (10, s. 16).

$$P_h = 0,5 * 3,169 \text{ kPa} = 1,9014 \text{ kPa} \quad \text{KAAVA 7}$$

Vesihöyryn osapaineeksi saadaan 1,9014 kPa. Vesihöyryn osapaineen avulla lasketaan palamisilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus kaavalla 8 (10, s. 16).

$$y_{h_2o} = \frac{1,9014 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} = 0,019014 \text{ mol} \quad \text{KAAVA 8}$$

Vesihöyryn mooliosuudeksi palamisilmassa saadaan 0,019014 mol. Seuraavaksi lasketaan palamisen tarvitsema happi hakkeen kemiallisen koostumuksen avulla (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Hakkeen kemiallinen koostumus

Aine	m-%
C	52
H ₂	6
N ₂	0,4
O ₂	40
Tuhka	1,6

Kuiva-aineen osuus polttoaineesta on 593 kg. Kuiva-aine jakautuu alkuaineisiin kuvan mukaisesti. Palamisreaktiossa muodostuu seuraavia yhdisteitä.

Hiili: $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Hiilestä muodostuu hiilidioksidia, kun siihen sitoutuu happea palamisilmasta. Hapen ainemäärä hiilidioksidille lasketaan kaavalla 9 (10, s. 17).

$$n_{CO_2} = \frac{593 \text{ kg} \cdot 52}{12,01} = 25,67 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 9}$$

Vety: $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$. Vedystä muodostuu vettä, kun se reagoi palamisilmassa olevan hapen kanssa. Hapen ainemäärä vedelle lasketaan kaavalla 10 (10, s. 17).

$$n_{H_2O} = 0,5 * \frac{\frac{593 \text{ kg} * 6}{2,02}}{100} = 8,8 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 10}$$

Happi: Happi ei reagoi palamisilman kanssa vaan se käytetään palamisreaktion happea. Lasketaan hapen ainemäärä kaavalla 11 (10, s. 17).

$$n_{O_2} = \frac{\frac{593 \text{ kg} * 40}{32,00}}{100} = 7,41 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 11}$$

Seuraavaksi lasketaan palamiseen tarvitsema hapen määrä kaavalla 12 (10, s. 17).

$$n_{O_2} = (25,67 + 8,80 - 7,41) \text{ kmol} = 27,06 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 12}$$

Polttamiseen käytetään ilmakerrointa 1,2. Lasketaan savukaasuun päätyvä lisähapen määrä kaavalla 13 (10, s. 17).

$$n_{O_2,sk} = (1,2 - 1) * 27,06 \text{ kmol} = 5,41 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 13}$$

Palamisilma sisältää typpeä. Lasketaan typen ainemäärä kaavalla 14 (10, s. 17).

$$n_{n_2} = 1,2 * 3,77 * 27,06 \text{ kmol} = 122,4 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 14}$$

Palamisilman suhteellinen kosteus on 50 %. Palamisilman sisältämä vesihöyry lasketaan kaavalla 15 (10, s. 18).

$$n_{H_2O,ilma} = (27,06 + 5,41 + 122,4) \text{ kmol} * \frac{0,019014}{1 - 0,019014} = 3,00 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 15}$$

Lasketaan veden massa kaavalla 16 (1, s. 39).

$$m_{h_2o,ilma} = 18,02 \frac{kg}{kmol} * 3,00 kmol = 54,09 kg \quad \text{KAAVA 16}$$

Vesihöyryn kokonaismäärä lasketaan kaavalla 17 (1, s.39).

$$m_{vesi,kok} = 395 kg + 317 kg + 54,09 kg = 766,1 kg \quad \text{KAAVA 17}$$

Savukaasussa on vettä yhteensä 766,1 kg.

7.3 Kuivan savukaasun massa

Palamisesta muodostunut savukaasu koostuu vesihöyryn lisäksi hiilidioksidista ja hapestä. Palamisreaktiossa muodostuvan hiilidioksidin ainemäärä on 25,6 kmol. Lasketaan muodostuvan hiilidioksidin massa kaavalla 4 (1, s. 39).

$$m_{CO_2,kuiva} = 25,6 kmol * (12,01 + 32) \frac{kg}{kmol} = 1126,7 kg \quad \text{KAAVA 4}$$

Palamisreaktiossa savukaasuun päätyvän lisähapen määrä 5,41 kmol. Kuivan hapen määrä lasketaan kaavalla 18 (1, s. 133).

$$n_{O_2,kuiva} = 5,41 kmol - (5,41 kmol * \left(\frac{0,01914}{1-0,01914}\right)) = 5,30 kmol \quad \text{KAAVA 18}$$

Savukaasuun päätyvän kuivan hapen määrä lasketaan kaavalla 4 (1, s. 39).

$$m_{O_2,kuiva} = 5,30 kmol * 32 \frac{kg}{kmol} = 169,6 kg \quad \text{KAAVA 4}$$

Palamisilmassa oleva typpi päättyy savukaasuun. Kuivan typen määrä lasketaan kaavalla 18 (1, s. 133).

$$n_{N_2,kuiva} = 122,4 \text{ kmol} - \left(122,4 \text{ kmol} * \left(\frac{0,01914}{1-0,01914}\right)\right) = 120 \text{ kmol} \quad \text{KAAVA 18}$$

Savukaasuun päätyvän kuivan typen määrä lasketaan kaavalla 4 (1, s. 39).

$$m_{N_2,kuiva} = 120 \text{ kmol} * 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 3360 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 4}$$

Polttoaineessa on 4 % typpeä, joka myös päätyy kuivaan savukaasuun.

Polttoaineessa olevan typen massa lasketaan kaavalla 3 (1, s. 39).

$$m_{\text{typpi,polttoaine}} = \frac{4*593 \text{ kg}}{100} = 23,7 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 2}$$

Kuivan savukaasun komponentit lasketaan yhteen kaavalla 19.

$$m_{kuiva,kok} = 1126,7 \text{ kg} + 169,6 \text{ kg} + 3360 \text{ kg} + 23,7 \text{ kg} = 4680 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 19}$$

Kuivaa savukaasua on yhteensä 4680 kg.

7.4 Entalpiaero

Savukaasun lämpötila ennen savukaasupesuria on 220 °C ja savukaasun kastepiste on noin 68 °C. Polttoaineessa oleva ja palamisreaktiossa muodostunut vesi höyrystyy polttoaineen palaessa. Veden höyrystymisessä sitoutunut energia vapautuu energian säilymislain mukaan, kun vesihöyry lauhtuu takaisin vedeksi. Vesihöyryn sisältämä energiamäärä lasketaan kaavalla 23 (11, s. 109).

$$\Delta H = 302 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2629 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -2327 \text{ kJ/kg} \quad \text{KAAVA 23}$$

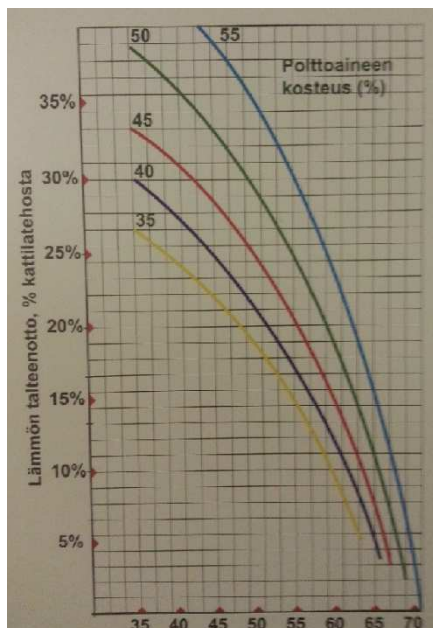
Veden höyrystyslämmöksi vallitsevissa olosuhteissa tulee -2327 kJ/kg. Vettä on yhteensä 766,1 kg. Lasketaan veden höyrystymiseen kulunut energia kaavalla 24 (11, s. 107).

$$\Delta E = \frac{766,1 \text{ kg} \cdot 2327 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1000} = 1783 \text{ MJ} \quad \text{KAAVA 24}$$

Veden höyrystyessä energiaa kuluu 1783 MJ. Energian säilymislain mukaan veden höyrystymiseen kulunut energia saadaan takaisin lauhduttamalla vesihöyry vedeksi. Savukaasupesurin lämmön talteenottolaitteistolla saadaan veden höyrystymiseen kulunut energia takaisin lauhduttamalla vesihöyry takaisin vedeksi. 1738 MJ on 0,49 MWh.

7.5 Vesihöyryn tiivistymisessä vapautuva energia

Koska savukaasun kastepiste on noin 66 °C, savukaasussa oleva vesihöyry on täysin nestemäisessä muodossa 36 °C:ssa. Vesihöyryn tiivistymiseen täysin vedeksi tarvitaan noin 30 °C:n lämpötilan lasku (kuva 17).



Kuva 17. Lämmöntalteenoton tehokkuuden suhde polttoaineen kosteuteen ja savukaasun loppulämpötilaan

Kun savukaasun lämpötila jää korkeaksi 64,9 °C, vain osa vesihöyrystä tiivistyy vedeksi. Lämpötilaero vastaa noin 4 % tiivistymistä kokonaismassasta.

Tiivistyvän veden massa voidaan laskea kaavalla 1.

$$m_{vesi} = \frac{4 \cdot 766,1 \text{ kg}}{100} = 30 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 1}$$

Savukaasun jäähtyessä lämpötilaan 64,9 °C, on vesihöyryn massavirta 0,009 kg/s. Lasketaan savukaasun tiivistymisessä vapautuva lämpöteho massavirran mukaan kaavalla 25 (11, s. 107).

$$q = 0,009 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2327 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 19,8 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 25}$$

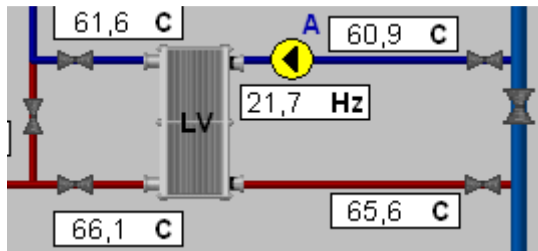
Vesihöyryn tiivistymisessä vapautuva lämpöteho on 19,8 kW. Pesukierron vesi sumutetaan ohuena sumuna vesihöyryyn, jolloin pesukierron vesi lämpenee sen vastaanottamalla teholla. Pesukierron massavirta tilanteessa on 12,35 kg/s. Pesukierron veden lämpötilaero lasketaan kaavalla 27 (11, s. 107).

$$\Delta T = \frac{19,8 \text{ kW}}{12,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{C}}} = 0,38 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{KAAVA 27}$$

Pesukierron veden lämpötilaeroksi muodostuu 0,38 °C. Koska savukaasupesurin prosessissa savukaasujäähtymä on suuri, siirtyy lämpöenergiaa myös savukaasun jäähtymisen seurauksena pesukierron veteen.

7.6 Savukaasun jäähtymä ja lämpöteho

Esimerkkitalanteessa kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötila on 60,9 °C. Pesukierron veden lämpötila on 61,6 °C, jolloin savukaasun loppulämpötilaksi muodostuu 61,6 °C (kuva 18).



KUVA 18: Esimerkkutilanne

Kuivan savukaasun kokonaismassa on 4680 kg. Kuivan savukaasun lämpötila ennen savukaasupesurin jäähdytystä on 221,6 °C ja jäähdytyksen jälkeen 64,7 °C. Savukaasun ominaislämpökapasiteettina käytetään ilman ominaislämpökapasiteettia 1,0 kJ/kg*°C. Lasketaan kuivan savukaasun jäähtymisen teho savukaasun massavirran ollessa 1,3 kg/s kaavalla 26 (11, s. 107).

$$= 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (221,6 - 64,7) ^\circ\text{C} = 203,97 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 26}$$

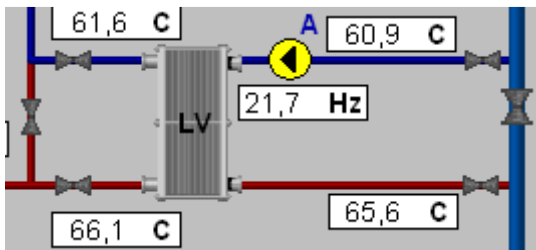
Pesukierron veden massavirta on 12,35 kg/s. Pesukierron veden lämpötilaero kuivan savukaasun lämpöteholla lasketaan kaavalla 27 (11, s. 107).

$$\Delta T = \frac{203,97 \text{ kW}}{12,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}} = 3,95 ^\circ\text{C} \quad \text{KAAVA 27}$$

Savukaasun kokonaisteho saadaan laskemalla vesihöyryn ja kuivan savukaasun lämpöteho yhteen. Yhteensä savukaasupesurin prosessin tuottamalla lämpöteholla voidaan lämmittää pesukierron vettä noin 4,5 °C.

7.7 Lämmönsiirtimen teho ja hyötysuhde

Esimerkin tilanteessa kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötila on 60,9 °C. Kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen on 65,6 °C ja sen massavirta on 11,8 kg/s. Lämmönsiirtimen toisella puolella pesukierron veden lämpötila ennen lämmönsiirintä on 66,1 °C ja lämmönsiirtimen jälkeen 61,6 °C. Pesukierron massavirta on 12,35 kg/s. (Kuva 19.)



KUVA 19. Esimerkkitalanne

Lämmönsiirtimen teho lasketaan kaavalla 28 (11, s. 107).

$$\dot{Q} = 12,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{C}} * (66,1 \text{ } ^\circ\text{C} - 61,6 \text{ } ^\circ\text{C}) = 232 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 28}$$

Lämmönsiirtimen tehoksi saadaan 232 kW, joka on 0,23 MW. Kattilatehon ollessa 2,47 MW saadaan lämmön talteenoton hyötysuhteeksi kaavalla 30 (11, s. 112).

$$\dot{\eta} = \frac{0,23 \text{ MW}}{2,47 \text{ MW}} * 100\% = 9,3 \text{ \%} \quad \text{KAAVA 30}$$

Lämmönsiirtimen hyötysuhteeksi saadaan 9,3 %. Biopolttoaineilla tuotettu teho yhteensä on 2,7 MW.

7.8 Pesurin tehokkuuden parantaminen

Lasketaan savukaasupesurin lämmöntalteenottoteho esimerkki tilanteessa kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilan ollessa 46 °C. Näin ollen pesukierron tuloveden lämpötila on 46,7 °C ja savukaasun loppulämpötila noin 50,7 °C.

Savukaasun kastepiste on sama kuin edellisessä tilanteessa ja vesihöyryä tiivistyy vedeksi noin 50 % kokonaismassasta savukaasun loppulämpötilan ollessa 50,7 °C. Vettä höyrystyy 393 kg ja massavirraksi saadaan 0,11 kg/s. Vesihöyryn tiivistymisen lämpöteho voidaan laskea kaavalla 25 (11, s. 107).

$$q = 0,11 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2327 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 254,2 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 25}$$

Pesukierron massavirta tilanteessa on 12,35 kg/s. Pesukierron veden lämpötilaero lasketaan kaavalla 27 (11, s. 107).

$$\Delta T = \frac{254,2 \text{ kW}}{12,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{C}}} = 4,92 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{KAAVA 27}$$

Lasketaan savukaasun jäähtymän lämpöteho kaavalla 26 (11, s. 107).

$$= 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{ } ^\circ\text{C}} * (221,6 - 50,7) \text{ } ^\circ\text{C} = 222,17 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 26}$$

Pesukierron veden massavirta on 12,35 kg/s. Pesukierron veden lämpötilaero kuivan savukaasun lämpöteholla lasketaan kaavalla 27 (11, s. 107).

$$\Delta T = \frac{222,17 \text{ kW}}{12,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,180 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{C}}} = 4,30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{KAAVA 27}$$

Pesukierron vesi lämpenee pesurissa 9,2 °C. Pesukierron veden loppulämpötilaksi muodostuu 56,0 °C.

Lasketaan lämmönsiirtimen uusi teho kaavalla 29.

$$\dot{Q}_2 = \frac{(56,0-46,7)^{\circ C}}{(66,1-61,6)^{\circ C}} * 0,23 \text{ MW} = 0,47 \text{ MW} \quad \text{KAAVA 29}$$

Lämmönsiirtimen uudeksi tehoksi saadaan 0,47 MW. Kattilatehon ollessa 2,47 MW lasketaan lämmön talteenoton hyötysuhde kaavalla 30 (11, s. 112).

$$\dot{\eta} = \frac{0,47 \text{ MW}}{2,47 \text{ MW}} * 100\% = 19\% \quad \text{KAAVA 30}$$

Lämmönsiirtimen hyötysuhteeksi saadaan 19 %. Biopolttoaineilla tuotettu teho yhteensä on 2,94 MW. Savukaasupesurista saatava lämmöntalteenottoteho on 9 % enemmän nykyiseen tilanteeseen verrattuna.

Kosteampaa polttoainetta poltettaessa olisi hyötysuhde ollut huomattavasti enemmän. Kosteammalla polttoaineella kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilalla 46 °C olisi hyötysuhde ollut noin 30 %.

Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilaa pysyvästi alentamalla saadaan savukaasupesurilla enemmän lämmöntalteenottotehoa. Savukaasupesurin parantunut hyötysuhde vähentää polttoainekustannuksia ja öljykattilan käyttöä kpa-kattilan rinnalla voidaan vähentää.

8 PARANNUSEHDOTUKSET

Savukaasupesurin tehokkuus jää nykyisellä kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilalla pienemmäksi kuin toimittajan ilmoittama tehokkuus. Prosessia tarkastelemalla voidaan päätellä, että savukaasupesurin tehokkuus nousee huomattavasti kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan alentuessa.

Tarkastellaan lämmöntuotantoa vuonna 2013 ja pohditaan, kuinka kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan aleneminen vaikuttaa lämmöntuotantoon. Lasketaan savukaasupesurin nousevan tehokkuuden vaikutus polttoainekustannuksiin.

8.1 Lämmöntuotanto 2013

Vuonna 2013 Biopolttoaineilla tuotettiin 87 % ja öljyllä 13 % kokonaislämmöntuotannosta. Kpa- ja öljykattilaa käytettiin rinnan pääosin huippukulutuksen aikana, jolloin kpa-kattilalla ei voitu tuottaa kokonaislämmöntarvetta. Suurin öljykattilan käyttöaste oli tammikuun aikana, jolloin lämmöstä tuotettiin 77 % kpa-kattilalla ja 23 % öljykattilalla. Tavoitteena on, että biopolttoaineiden osuus kokonaislämmöntuotannossa nousee mahdollisimman suureksi.

Vuoden 2013 seurannan perusteella pesurin vuosittaiseksi hyötysuhteeksi saatiin 12 % kattilatehosta. Suurin savukaasupesurin hyötysuhde, 24 % saavutettiin helmikuussa. Savukaasupesurin lämmön talteenoton hyötysuhde oli alhaisimmallaan noin 10 %.

Kaukolämpöverkoston paluueden keskiarvoinen lämpötila oli 58 °C. Tuloksista voidaan päätellä, että paluueden lämpötila ja polttoaineen kosteus on vaihdellut huomattavasti.

Taulukossa 5 on esitetty vuoden 2013 lämmöntuotanto kuukausittain.

TAULUKKO 5. Lämmöntuotanto 2013

KAUKOLÄMMÖN PALUUVESI KA. 58 C

Vuosi 2013				Pesuri/kattila				yht/bio	yht/öljy
Kuukausi:	KPA-teho ka (MW)	Pesuriteho ka (MW)	Bio (MW)	LTO-hyötysuhde %	Öllyteho ka (MW)	Kokonaisteho (MW)	Bio %	Ölly %	
Tammi	2,08	0,21	2,29	10,10	0,7	2,99	77	23	
Helmi	1,79	0,43	2,22	24,02	0,32	2,54	87	13	
Maalis	2,05	0,33	2,38	16,10	0,52	2,9	82	18	
Huhti	1,5	0,28	1,78	18,67	0,16	1,94	92	8	
Touko	1,04	0,001	1,041	0,10	0,08	1,121	93	7	
Kesä	0,25	0	0,25	0,00	0,32	0,57	44	56	
Heinä	0,66	0	0,66	0,00	0	0,66	100	0	
Elo	0,66	0,03	0,69	4,55	0	0,69	100	0	
Syys	0,87	0,13	1	14,94	0,06	1,06	94	6	
Loka	1,49	0,16	1,65	10,74	0,12	1,77	93	7	
Marras	1,74	0,21	1,95	12,07	0,22	2,17	90	10	
Joulu	2,01	0,22	2,23	10,95	0,26	2,49	90	10	
KA:	1,35	0,17	1,51	12,40	0,23	1,74	87	13	

Taulukossa esiintyvät termit:

- kpa-kattilan keskimääräinen teho (KPA-teho k.a.)
- savukaasupesurin lämmön talteenoton keskimääräinen teho (Pesuriteho k.a.)
- kpa-kattilan ja lämmön talteenoton keskimääräinen yhteenlaskettu teho (Bio)
- savukaasupesurin lämmön talteenoton keskimääräinen hyötysuhde (LTO-hyötysuhde %)
- öljykattilan keskiarvoinen teho (Öllyteho k.a.)
- keskiarvoinen kokonaislämmöntuotto teho (Kokonaisteho)
- biopolttoaineiden keskimääräinen osuus kokonaislämmöntuotannosta (Bio %)
- öljykattilan keskimääräinen osuus kokonaislämmöntuotannosta (Ölly %)

Vuonna 2013 savukaasupesurin lämmön talteenoton avulla tuotettiin 12,4 % enemmän energiaa bio-polttoaineesta verrattaessa tilanteeseen ilman lämmön talteenottoa. Öljyn kulutus on noin 40 % pienempi kuin tilanteessa ilman savukaasupesurin lämmön talteenottoa.

8.2 Pesurin tehokkuuden parantaminen

Kaukolämmön paluueden lämpötilan keskiarvo vuonna 2013 oli 58 °C. Jos kaukolämpöverkoston paluueden lämpötila saadaan alennettua pysyvästi alle 50 °C:n, pesurin tehokkuus kasvaa. Näin ollen pesurin vuosihyötysuhde nousee ja polttoaineesta saadaan enemmän energiaa talteen. Samalla öljykattilan käyttöaste lämmityksessä laskee.

Taulukossa 6 on esitetty lämmöntuotanto optimaalisessa tilanteessa, jolloin kaukolämpöverkoston paluueden lämpötila on aina alle 50 °C.

TAULUKKO 6. Lämmöntuotanto 2013 kaukolämmön paluuesi alle 50 °C

KAUKOLÄMMÖN PALUUVESI MAX. 50 C						VUOSI 2013			
Vuosi 2013				Pesuri/kattila				yht/bio	yht/öljy
Kuukausi:	KPA-teho k.a. (MW)	Pesuriteho k.a. (MW)	Bio (MW)	LTO-hyötysuhde %	Öljyteho k.a. (MW)	Kokonaisteho (MW)	Bio %	Öljy %	
Tammi	2,08	0,49	2,57	23,56	0,42	2,99	86	14	
Helmi	1,79	0,60	2,39	33,54	0,15	2,54	94	6	
Maalis	2,05	0,58	2,63	28,29	0,27	2,9	91	9	
Huhti	1,5	0,49	1,99	32,67	-0,05	1,94	103	-3	
Touko	1,04	0,002	1,042	0,19	0,08	1,12	93	7	
Kesä	0,25	0	0,25	0,00	0,32	0,57	44	56	
Heinä	0,66	0	0,66	0,00	0	0,66	100	0	
Elo	0,66	0,07	0,73	10,61	-0,04	0,69	106	-6	
Syys	0,87	0,18	1,05	20,86	0,01	1,06	99	1	
Loka	1,49	0,37	1,86	24,83	-0,09	1,77	105	-5	
Marras	1,74	0,49	2,23	28,16	-0,06	2,17	103	-3	
Joulu	2,01	0,5	2,51	24,88	-0,02	2,49	101	-1	
k.a. (kk):	1,35	0,31	1,66	23,38	0,082	1,74	94	6	

Taulukkoja 1 ja 2 vertailemalla saadaan tulokseksi seuraavaa:

- Pesurin keskiarvoinen hyötysuhde kasvaa 23,38 % - 12,40 % = 10,98 %.
- Vuodessa biopolttoaineesta saadaan 10,98 % enemmän energiaa.
- Öljykattilan käyttö vähenee 53 % vuodessa verrattuna lämmön talteenoton tehokkuuteen vuonna 2013.
- Biopolttoaineilla voidaan tuottaa 94 % kokonaislämmöntarpeesta.

8.3 Pesurin tehokkuuden vaikutus taloudellisesti

Savukaasupesurin avulla saatava taloudellinen hyöty muodostuu alentuneista polttoainekustannuksista. Pesurin avulla biopolttoaineesta saadaan enemmän energiaa, jolloin öljykattilan käytön tarve vähenee. Öljykattilan käytöllä on suuri taloudellinen merkitys polttoöljyn korkean hinnan takia.

Vuoden 2013 polttoaineen kulutuksen perusteella on laskettu, kuinka paljon pesurin tehokkuuden parantaminen vaikuttaa taloudellisesti. Pesurin käyttökustannukset ovat 15 000 € vuoden 2009 säästölaskelman mukaisesti:

Nykyinen tilanne, pesurin vuosihyötysuhde 12,4 %:

- biopolttoaineiden osuus kokonaislämmöntuotannosta 87 %
- öljykattilan osuus kokonaislämmöntuotannosta 13 %
- öljyn vuosikulutus on 40 % pienempi verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria.
- polttoainekustannuksista tuleva säästö 95 000 € vuodessa verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- pesurin kustannukset huomioon ottaen säästö vuodessa 80 000 €.

Pesurin vuosihyötysuhde 15 %:

- biopolttoaineiden osuus kokonaislämmöntuotannosta 90 %
- öljykattilan osuus kokonaislämmöntuotannosta 10 %
- säästö öljyn kulutuksessa 123 000 € verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- pesurin kustannukset huomioon ottaen säästö vuodessa 108 000 €
- vuosisäästö 18 000 € enemmän kuin vuoden 2013 hyötysuhteella.

Pesurin vuosihyötysuhde 20 %:

- biopolttoaineiden osuus kokonaislämmöntuotannosta 94 %
- öljykattilan osuus kokonaislämmöntuotannosta 6 %
- säästö öljyn kulutuksessa 168 000 € verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- pesurin kustannukset huomioon ottaen säästö vuodessa 153 000 €
- vuosisäästö 73 000 € enemmän kuin vuoden 2013 hyötysuhteella.

Pesurin vuosihyötysuhde 23,38 %

- biopolttoaineiden osuus kokonaislämmöntuotannosta 95 %
- öljykattilan osuus kokonaislämmöntuotannosta 5 %
- säästö öljyn kulutuksessa 179 000 € verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- säästö bio- polttoaineen kulutuksessa 4000 € verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- säästö polttoainekustannuksissa 183 000 € verrattaessa toimintaan ilman savukaasupesuria
- pesurin kustannukset huomioon ottaen säästö vuodessa 168 000 €
- vuosisäästö 88 000 € enemmän kuin vuoden 2013 hyötysuhteella.

Pesurin hyötysuhde on verrannollinen kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilaan ja käytettävän polttoaineen kosteusprosenttiin, joten yli 25 %:n vuosihyötysuhteeseen on vaikea päästä. Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan alentuessa pysyvästi alle 50 °C:n on savukaasupesurin hyötysuhde 20–25 %.

Öljykattilan osuus kokonaislämmöntuotannosta on alhaisimmillaan 5 %, koska öljykattilaa tarvitaan äärimmäisen kulutuksen aikana. Äärimmäisen kulutuksen aikana kpa-kattilan teho ei riitä kokonaislämmöntuotantoon.

8.4 Yhteenveto

Kaukolämpöverkoston tehtävät muutokset ja korjaustoimenpiteet säästäisivät vuodessa noin 18–88 000 € polttoainekustannuksissa. Vertailussa on käytetty savukaasupesurin vuoden 2013 hyötysuhdetta. Hyötysuhdetta on verrattu hyötysuhteeseen 15–23,38 %. Säästölaskelmat on tehty biopolttoaineen ja polttoöljyn vuoden 2013 kuluttajahinnan mukaan.

Polttoainekustannuksista tuleva säästö muodostuu hyötysuhteiden parantuessa seuraavasti:

- hyötysuhde 15 %: 18 000 € enemmän kuin vuonna 2013
- hyötysuhde 20 %: 73 000 € enemmän kuin vuonna 2013
- hyötysuhde 23,38 %: 88 000 € enemmän kuin vuonna 2013

Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan alentuessa alle 50 °C:n, on savukaasupesurin parantuneella hyötysuhteella saavutettu säästö huomattava. Kaukolämpöverkoston korjaustöihin investoiminen tulee säästämään polttoainekustannuksissa tulevaisuudessa.

8.5 Ongelmatilanteet

Savukaasupesurin alhaisen tehokkuuden syy on kaukolämpöverkoston paluueden korkea lämpötila. Savukaasujen loppulämpötila jää korkeaksi ja osa polttoaineen energiasta hävitään.

Savukaasupesurin huoltoon tulee kiinnittää huomiota ja varmistaa, että savukaasuista irtaantuva liete ei pääse pesukiertoon, vaan se ohjataan aina lietesäiliöön. Savukaasupesurin toiminnan takaamiseksi on tärkeää noudattaa huoltoaikataulua ja täyttää päiväkirjaa pesurin huolloista. Huoltotoimenpiteistä ja aikatauluista on kerrottu lisää kappaleessa 9. Huoltotoimenpiteet.

8.6 Kaukolämpöverkosto

Puolangan kunnan kaukolämmön paluueden lämpötila on huomattavan korkea. Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilaa alentamalla saadaan savukaasupesurin tehokkuus paremmaksi. Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötilan tulisi pysyvästi olla alle 50 °C. Vuonna 2013 paluueden lämpötila oli huomattavan korkea keskiarvolla 58 °C

Kaukolämpöverkoston toimintaa ja sen säätöjä tulee tutkia ja löytää syy korkeaan paluueden lämpötilaan. Ongelmaan voi olla useita syitä, ja siihen vaikuttavat myös alkuperäiset asennustekniset ratkaisut.

Kaukolämpölaitoksella tarkastetaan, että kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila vastaa vallitsevia sääolosuhteita. Kaukolämpöverkoston virtaama tarkastetaan ja säädetään tarpeen vaatiessa.

Kaukolämpöverkostosta paikannetaan mahdolliset vuodot ja verkostoon liitetyt lämmönsiirtimet tarkastetaan. Verkostoon liitetyistä lämmönsiirtimistä tarkastetaan käyttöveden lämpötila, joka tulee olla 58 °C. Lämmönsiirtimistä tarkastetaan kaukolämmön jäähtymä, joka on lämmönvaihtimille tulevan kaukolämpöveden ja sieltä palaavan kaukolämpöveden lämpötilan erotus. Erittäin hyvä jäähtymä on talvella yli 60 °C ja kesällä jäähtymän tulisi olla yli 15 °C.

Koska kaukolämpöverkoston paluueden lämpötila on tällä hetkellä huomattavan korkea, tulee verkoston toiminta tarkastaa ja korjata mahdolliset viat. Kaukolämpöverkoston paluueden lämpötila pyritään alentamaan alle 50 °C:n. Savukaasupesurin lämmön talteenoton tehon kasvulla saavutettavat polttoainekulutuksen säästöt ovat suuret, joten kaukolämpöverkoston toiminnan tarkailu ja korjaaminen on ajankohtaista.

9 HUOLTOTOIMENPITEET

Pesurin toiminnan takaamiseksi on tärkeää suorittaa vuosittain perusteellinen huolto kesäseisokin aikana. Pesurin pesukierto puhdistetaan 6 kuukauden välein tilanteen salliessa. Muihin huoltotoimenpiteisiin kuuluu pesurin lietteenpoistojärjestelmän puhdistus kolmen kuukauden välein tukoksien estämiseksi.

9.1 Pesu

Pesutorni ja pesukierto tulee pestä kauttaaltaan muurahaishappoliuoksella 6 kuukauden välein. Pesu tapahtuu kierrättämällä pesukiertoa muurahaishappoliuoksella noin vuorokauden ajan. Tämän jälkeen pesuri huuhdellaan vedellä kierrättämällä ensin pesukiertoa noin vuorokauden ajan vedellä, tyhjentämällä se ja kierrättämällä pesukiertoa uudestaan vedellä. Toimenpide toistetaan niin kauan kun pesurista poistettavasta vedestä löytyy lietettä ja tuhkanjäämiä. Huuhtelujen jälkeen veden PH mitataan, minkä jälkeen pesukierto tyhjennetään ja täytetään uudella pesuvedellä, joka jää pesukiertoon. Mikäli veden PH ei vastaa asetusarvoa, huuhdellaan pesuri uudestaan niin, että varsinaisen pesuveden jäädessä pesuriin on veden PH asetusarvossa.

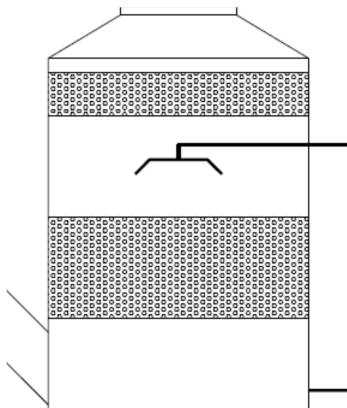
On erittäin tärkeää, että pesun aikana katkaistaan veden pääsy lämmönsiirtimelle ja pesu suoritetaan ainoastaan suljetun pesukierron alueella. Lämmönsiirrin puhdistetaan siihen erikseen tehtyjen ohjeiden mukaisesti, sekä tarkastetaan siirtimen tiivisteiden kunto.

Ennen pesukierron puhdistuksen aloitusta pesutornin lietesuppilo pestään mahdollisesta kivettyneestä lietteestä ja tuhkasta esimerkiksi painepesurilla. Pesutornissa lietteen poistumissuppilo ja sen poistoputki on erittäin pieni, joten putkessa olevan sulkuventtiiliin päälle kertyy lähes poikkeuksetta lietettä, joka ei pääse pois lietteenpoiston kautta.

Mikäli on mahdollista, että pesukiertoon pääsee lietettä pesurin käyttöaikana, suoritetaan huoltotoimenpide useammin kuin kerran vuodessa. Liete voi tukkia lämmönsiirtimen ja aiheuttaa suurempia ongelmia. Syklonin tulee olla aina toiminnassa, jotta suuremmat tuhkapartikkelit on erotettu ennen pesutornia.

9.1.1 Märkäpatja

Pesurin lämmönsiirtopintana toimivan märkäpatjan huokoisiin muovihelmiin kertyy ja kivettyy ajan kuluessa lietettä. Muovihelmien puhdistuksessa patjan muovihelmet poistetaan pesurista, minkä jälkeen ne pestään muurahaishappoliuoksella esimerkiksi betonimyllyssä. Pesun jälkeen muovihelmet huuhdellaan huolellisesti vedellä. Puhdistetut patjat asennetaan takaisin pesuriin pesukierron puhdistuksen jälkeen. Muovihelmet voi myös vaihtaa uusiin, mikäli niissä on rikkoutumia tai kivetymä ei poistu pesun aikana. Pesupatjojen kunto tarkastetaan silmämääräisesti 6 kuukauden välein ja pesu suoritetaan kesäseisokin aikana. Tarpeen vaatiessa helmet puhdistetaan myös 6 kuukauden välein pesukierron puhdistuksen yhteydessä. Tukkeutunut pesupatja vähentää lämmönsiirtopinnan alaa (kuva 20).



KUVA 20. Pesurin pesupatjat

Huoltotoimenpiteissä kesäseisokin aikana todettiin, että savukaasupesurin lietteenpoisto toimi puutteellisesti ja pesutornin patjat ja lietesuppilo olivat kauttaaltaan kivettyneen tuhkan ja lietteen peitossa.

Viime kesän huoltoseisokin aikana todettiin, että syklonin vajaatoiminta aiheutti suuren hiukkaspitoisuuden pääsyn pesuriin. Pesuri oli pysäytetty ilman välittömiä huoltotoimenpiteitä, joten liete kivettyi pesukierron ja pesurin sisälle. Todettiin, että pesupatjat olivat kivettyneen lietteen peitossa (kuva 21).



KUVA 21. Tukkeutunut pesupatja

Liete tukkii kivettyessään pesuhelmien rakenteen. Pesuhelmet olivat täysin tukkeutuneita (kuva 22).



KUVA 22. Tukkeutunut pesuhelmi

Pesurin märkäpatjan pesuhelmet saadaan puhdistettua kivettyneestä lietteestä muurahaishapolla. Kivettynyt liete saadaan irti pesuhelmestä ja tukokset liukenevat. (Kuva 23).



KUVA 23. Puhdistettu pesuhelmi

Pesurin pesupatjat poistetaan pesurista ja ne puhdistetaan muurahaishappoliuoksella. Toimenpidettä jatketaan, kunnes kaikki liete on irronnut pesuhelmistä (kuva 24). Puhdistuksen jälkeen helmet siirretään takaisin pesuriin.



KUVA 24. Puhdistettu yläpatja

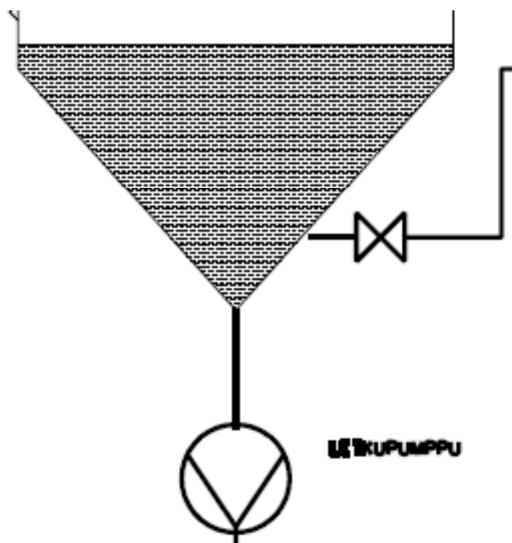
9.1.2 Lietteenpoisto

Pesurin lietesuppilo ja lietteenpoistoputki tukkeutuvat helposti, ja etenkin lietteenpoistoputkessa oleva sulkuventtiili kerää lietettä, joka poistumisen estyessä kivistyy sulkuventtiin päälle. Lietteentoistopumppuna toimivan letkupumpun toiminta on myös varmistettava. Mikäli letkupumpun letku on rikkoontunut, vaihdetaan se uuteen tarpeen vaatiessa.

Lietesuppilon ja lietteentoistoputken tukkeutuessa voidaan ohjata vettä paineella ns. väärään suuntaan, jolloin kivistymä sulkuventtiin päällä saadaan rikottua ja johdettua liete letkupumpulle. Tämä vaatii pumpun irrottamisen manuaalisesti ja vesiletkun kytkemisen lietteentoistoputkeen.

Toimenpiteen helpottamiseksi lietteentoistoputkeen voitaisiin asentaa yhde, josta vettä saisi ohjattua sulkuventtiin päälle ilman, että lietteentoistoa tarvitsisi katkaista. Näin voidaan ehkäistä lietteentoiston tukkeutuminen.

Lietteentoiston toiminnan takaamiseksi edellytetään, että liete poistuu letkupumpun kautta lietesäiliöön. Mikäli lietteen pinta nousee liian korkealle pääsee se pesukiertoon pesukierron ottoputken kautta, joka näkyy kuvassa 25 ylempänä. Tässä tilanteessa pesukierrossa kiertää puhtaan veden sijasta lietteistä vettä, joka aiheuttaa ongelmia (kuva 25.)

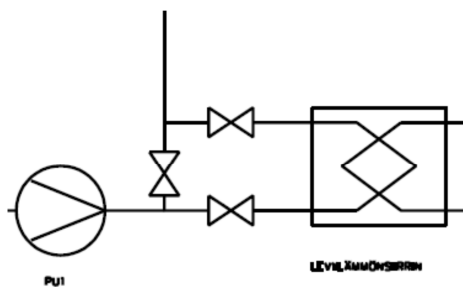


KUVA 25. Lietesuppilo

9.1.3 Putkisto ja lämmönsiirrin

Pesurin pesukierron putkisto huuhdellaan samalla muurahaishappoliuoksella pesutornin pesun aikana. Mikäli putkisto on todella tukkeutunut kivettyneestä lietteestä ja tuhkasta, irroitetaan pesukierron pumppu ja putkisto puhdistetaan manuaalisesti painepesurilla ennen pesukierron puhdistuksen aloittamista. Erityisenä ongelmakohtana voidaan mainita putki, jonka kautta pesukiertoa voidaan ajaa ilman lämmönsiirrintä.

Lämmönsiirtimen ohitusputkessa olevan sulun päälle kivettyä helposti lietettä mikäli lietettä on pesukierron vedessä. Vuosihuollon yhteydessä on tärkeää irrottaa putkessa oleva sulkuventtiili ja puhdistaa putki mahdollisesta kivettyneestä lietteestä (kuva 26).



KUVA 26. Lämmönsiirtimen ohitusputki, jolla eristetään lämmönsiirrin pesukierrosta

Ohitusputki avataan sulkuventtiilin kohdalta ja puhdistetaan venttiili sekä putki painepesurilla. Mikäli lietettä pääsee pesukiertoon, muodostuu putken sulun päälle ns. mutapussi, sillä putkessa oleva sulku on normaalitilanteessa kiinni. Sulun päältä löytyvästä lietteestä voidaan todeta, että liete on päässyt lämmönsiirtimelle, joka myös on tarkastettava putkiston puhdistuksen yhteydessä.

Lämmönsiirrin puhdistetaan 12 kuukauden välein valmistajan ohjeiden mukaisesti. Lämmönsiirrin tarkastetaan pesukierron pesun yhteydessä 6 kuukauden välein ja puhdistetaan tarvittaessa. Myös mahdollisesti rikkoutuneet tiivisteet vaihdetaan puhdistuksen yhteydessä.

9.2 Huoltoaikataulu ja toimenpiteet

Pesurin huolto suoritetaan edellä mainittujen ohjeiden ja aikamääreiden mukaisesti. Huoltotoimenpiteistä täytetään päiväkirjaa, jota täytetään aina kun suoritetaan huoltotoimenpiteitä. Pesuveden PH- arvoa tarkkaillaan jatkuvasti pesurissa manuaalisesti, sillä pesuriin ei ole asennettu PH- mittaus automatiikkaa.

Vuosihuolto ajoitetaan kesäkauden ajalle samaan aikaan, kun suoritetaan KPA-kattilan vuosihuolto. Tällöin polttoainekuormat ovat pieniä ja vuosihuolloista ei tule suurta taloudellista tappiota. Huollon aikana kaukolämpöä lämmitetään öljykattilalla. Pesurin huollot toteutetaan ennalta määrättyllä aikataululla huolto-ohjelman mukaisesti (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Pesurin huoltotoimenpiteet ja aikataulu

Toimenpide:			Aikataulu		
			1kk välein	6kk välein	12kk välein
Lietepumpun tarkastus:			x		
Lietesuppilon tarkastus:			x		
Pesuveden PH:			x		
Pesukierron huuhtelu:				x	
Pesukierron puhdistus:				x	
Lämmönsiirtimen tarkastus:				x	
Lämmönsiirtimen puhdistus:					x
Vuosihuolto:					x
Märkäpatjojen tarkastus:				x	x
Märkäpatjojen puhdistus:					x

10 YHTEENVETO

Työn päätarkoitus oli perustella savukaasupesurin tarpeellisuus ja selvittää millä toimenpiteillä savukaasupesurin tehokkuutta voidaan parantaa. Nykyistä tilannetta verrattiin vanhaan säästösuunnitelmaan ja laskettiin paremmalla tehokkuudella saatava lisäsäästö.

Työssä selvisi savukaasupesurin prosessia tutkimalla, että savukaasupesurin tehokkuus on alhainen kaukolämpöverkoston korkean paluueden lämpötilan takia. Työssä laskettiin, että savukaasupesurin prosessi vastaa toimittajan ilmoittamaa tehokkuutta ja savukaasupesurilla voidaan päästä luvattuihin tuloksiin. Laskelmien avulla saatiin selville, että savukaasupesurin toiminta vastaa valmistajan arvoja ja savukaasupesurin huono tehokkuus johtuu kaukolämpöverkoston puutteellisesta toiminnasta.

Työssä laskettiin kaukolämpöverkostoon tehtävillä huoltotoimenpiteillä saavutettava säästö polttoainekustannuksissa. Laskelmien perusteella kaukolämpöverkoston korjaustoilla voidaan savukaasupesurin tehokkuus saada yli 50 % paremmaksi vuoden 2013 tehokkuuteen verrattuna. Savukaasupesurin tehokkuutta parantamalla voidaan saavuttaa jopa 88 000 €:n säästö polttoainekustannuksissa vuoden 2013 tilanteeseen verrattuna.

Työssä käsiteltiin kaukolämpöverkoston huoltotoimenpiteitä pääpiirteisesti ja laadittiin savukaasupesurille yksityiskohtainen huolto-ohjelma. Tulevaisuudessa on tärkeää noudattaa huolto-ohjelmaa.

LÄHTEET

1. Antila, Anna-Maija – Karppinen, Maarit – Leskelä, Markku – Mölsä, Heini – Pohjakallio, Maija 2008. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita Publishing Oy.
2. Savukaasu. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Savukaasu>. Hakupäivä 15.1.2014.
3. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012 Ympäristöministeriö. Saatavissa: www.ymparisto.fi/download/filename/257B200B1E69-09BB-4654-8DBC-F67274431193%257D%2F30742&ei=r-3bUtKsCqeO4wTk5oCYDA&usq=AFQjCNEhURbt7DAfXpIJ9d4pS_Wp18OEg&sig2=62VUIrpWwIV9wnm9iYyeUQ&bvm=bv.59568121,d.bGE. Hakupäivä 1.12.2013
4. Lämpökattilat. 2011. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/L%C3%A4mp%C3%B6kattila>. Hakupäivä 15.1.2014.
5. Lämpöarvo. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/L%C3%A4mp%C3%B6arvo>. Hakupäivä 15.1.2014
6. Unicon WT -kattilalaitokset. 2013. KPA-Unicon. Saatavissa: http://www.kpaunicon.com/tuotteet.asp?tuotesivu=unicon_wt. Hakupäivä 15.1.2014
7. Höyrystyslämpö. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/H%C3%B6yrystysl%C3%A4mp%C3%B6>. Hakupäivä 15.1.2014

8. Savukaasujen lämmön talteenotto. 2013. Condens Heat Recovery.
Saatavissa:
<http://www.condens.fi/fin/tuotteet/pesurit/savukaasupesuri.htm>
[Hakupäivä 15.1.2014](#)
9. Bio-polttoaineet. 2013. Micre EU. Saatavissa:
<http://www.micre.eu/fi/energiantuotanto/biopolttoaineet/>. Hakupäivä
15.1.2014
10. Kärmeniemi, Henri 2006. Sulakaasutustutkimuslaitteiston suunnittelu ja
testaus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö
11. Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani –
2005. Tekniikan kaavasto. Tampere: Tammertekniikka.

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Tuomas Paso

Tilaaaja Puolangan kunta

Tilaaajan yhdyseshenkilö ja yhteystiedot Leila Holappa, tekninen johtaja

Työn nimi Savukaasujen puhdistus kotimaisen polttoaineen kattilaitoksissa

Condensing Heat Recovery in Domestic Fuel Boiler

Työn kuvaus Työssä käsitellään märkäpatjasavukaasupesurin toimintaa kpa-kattilan yhteydessä.

Työn tavoitteet Työssä selvitetään savukaasupesurin toiminta ja lasketaan, että se vastaa valmistajan arvoja. Työssä pohditaan kuinka pesurin tehokkuutta voidaan parantaa ja lasketaan pesurin taloudellinen merkitys. Pesurille laaditaan huoltoaikataulu

Tavoiteaikataulu Työ toimitetaan tilaajalle tammikuun 2014 loppuun mennessä.

Päiväys ja allekirjoitukset

Tuomas Paso 30.1.2014

