

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / Käyttö ja käynnissäpito

Joonas Kähärä

LÄMMÖN TALTEENOTTO SAVUKAASUISTA TEHDASVETEEN

Opinnäytetyö 2015

## TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

KÄHÄRÄ, JOONAS

Insinööri

Työn ohjaajat

Toimeksiantaja

Tammikuu 2015

Avainsanat

Lämmön talteenotto savukaasuista tehdasveteen

43 sivua + 1 liitesivu

Tutkimusinsinööri Tuomo Pimiä

Kehitysinsinööri Arja Sinkko

Kunnossapitopäällikkö Janne Auvinen

Ahlstrom Glassfibre Oy

talteenotto, savukaasut, lämmönvaihdin

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella Ahlstrom Glassfibre Oy:n Karhulan lasihuopatehtaalle lämmöntalteenottolaitteisto, jolla lämmitetään tehdasvesisäiliön vettä savukaasuista saatavalla lämpöenergialla. Tarkoituksena oli vähentää energiankulutusta sekä parantaa lasihuopakoneen tuotantoa.

Teoriaosuudessa käsitellään Ahlströmin historiaa Kotkan seudulla sekä Ahlstrom Glassfibre Oy:n Karhulan tehtaan syntyä ja vaihteita. Lasihuopakoneen toiminta käydään läpi yleisellä tasolla. Myös lämmönvaihtimien tyyppejä sekä toimintaa kuvailaan.

Työssä tuli laskea ja arvioida sopiva poistoilma. Sopivan poistoilman energiamäärän perusteella valittiin ja laskettiin oikean kokoiset laitteet. Tarkoituksena oli käyttää tehtaalta löytyviä laitteita. Tehtaan muut poistoilmat voisivat olla lisäsäästämiskohteita tulevaisuudessa.

Työn lopputuloksena syntyi lämmöntalteenottojärjestelmä, jolla säästetään energiankulutuksessa. Järjestelmän avulla tehdasprosessi pysyy stabiilina läpi vuoden.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

KÄHÄRÄ, JOONAS

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

January 2015

Keywords

Heat Recovery from Flue Gases to Factory Water

43 pages + 1 page of appendices

Tuomo Pimiä, Research Engineer

Arja Sinkko, Development Engineer

Janne Auvinen, Maintenance Manager

Ahlstrom Glassfibre Corp.

heat recovery, flue gases, heat exchanger

The objective of this thesis was to design a heat recovery system for Ahlstrom Glassfibre's plant in Karhula. The system recovers thermal energy from flue gases to factory water. The purpose was to reduce energy consumption and improve the manufacture of glassfiber tissue.

The theoretical part of this study discusses the history of Ahlstrom in Kotka and explains the phases of the Karhula plant. The manufacture of glassfiber tissue is examined at general level, and the types and operation of heat exchangers are described.

The purpose was to calculate and evaluate suitable exhaust air. The right size equipment was selected and calculated based on the amount of exhaust energy. The purpose was to make use of the equipment available in the plant. Further energy savings may be achieved with other exhaust airs in the future.

The result of thesis was an energy saving heat recovery system that enables a stable plant process throughout the year.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

SYMBOLILUETTELO	6
1. JOHDANTO	7
2. AHLSTRÖM	8
2.1 Yhtiön historiaa	8
2.2 Ahlström Karhulassa	9
2.3 Ahlstrom Glassfibre Oy	10
2.4 Lasihuopakone	12
3 LÄMMÖNVAIHDIN	14
3.1 Lämmönvaihtimien toiminta	14
3.2 Levylämmönvaihdin	14
3.3 Putkilämmönvaihtimet	15
3.4 Spiraalilämmönvaihdin	16
3.5 LTO-patteri	16
4 LÄMMÖN TALTEENOTTO SAVUKAASUISTA	16
4.1 Yleistä	16
4.2 Tehdasvesisäiliö	17
4.3 Pumppu	18
4.4 LTO-patteri	19
4.5 Säätopellit	20
4.6 Automaatio	20
5 LASKELMAT	20
5.1 Oikean poistokanavan valinta	20
5.2 Lämmönvaihtimen tilavuusvirta	34
5.3 Putken mitoitus ja painehäviöt	35
6 PROJEKTIN HYÖDYT	39
6.1 Energian säästömahdollisuudet	39

6.2	Projektin hinta ja takaisinmaksuaika	39
6.3	Hyödyt prosessissa	40
6.4	Muita lämmityksen säästömahdollisuuksia	40
7	YHTEENVETO	40
LIITTEET		
	Liite 1. Ote päästömittausraportista	

## SYMBOLILUETTELO

$R_{sk}$	Savukaasun kaasuvakio	[J/kgK]
$\rho_{sk}$	Savukaasun tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	Savukaasun ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
$\phi$	Teho	[kW]
$T$	Lämpötila	[K, °C]
$q_m$	Massavirta	[kg/s]
$q_v$	Tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$w$	Putkessa virtaavan aineen nopeus	[m/s]
$A$	Putken pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$d$	Putken sisähalkaisija	[m]
$\lambda$	Kitkakerroin	[-]
$L$	Putken pituus	[m]
$\rho$	Veden tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta P$	Painehäviöt	[Pa]
$P_e$	Pumpun teho	[W]
$\eta$	Hyötysuhde	[-]

## 1. JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella Ahlstrom Glassfibre Oy:lle lämmöntalteenottomenetelmä, jolla voitaisiin lämmittää tehdasvesisäiliön vettä savukaasusta saatavalla energialla. Tehdasvesisäiliön veden lämmityksellä pyritään stabilisoimaan tehdasprosessi läpi vuodeksi ja samalla tekemään säästöä energian kulutuksessa.

Työssä tutkitaan eri poistoilmojen käypäisyyttä lämmöntalteenottoon sekä tarkastellaan eri lämmönvaihtimien toimintaa. Opinnäytetyön alussa käsitellään yhtiön ja tehtaan historiaa. Lasihuopakoneen toimintaa käydään läpi yleisellä tasolla. Laskutoimituksissa selvitetään tehomääriä, painehäviöitä ja virtauksia.

Projektissa on tarkoitus käyttää mahdollisimman paljon tehtaalta löytyvää materiaalia kustannusten hillitsemiseksi. Työssä arvioidaan projektin investointihinta ja arvioidaan mahdolliset vuotuiset säästöt joiden pohjalta lasketaan takaisinmaksuaika.

Lopuksi arvioidaan hyödyt prosessissa ja mahdolliset tulevaisuuden investoinnit energian säästämiseksi.

## 2. AHLSTRÖM

### 2.1 Yhtiön historiaa

Antti Ahlström aloitti vuonna 1851 liiketoimintansa jauhomyllyn, lumpupaperikoneen ja saviastiatehtaan voimin Merikarvialla. Laivojen varustuksesta tuli myös tärkeä osa Ahlströmin liiketoiminnassa. Ahlströmin tuloskehityksen ansiosta hän osti itselleen uusia sahoja ja rautaruukkeja. Hän omisti neljä rautaruukkia, 14 sahaa ja 60 tuhatta hehtaaria maata ja oli kuollessaan 1896 yksi Suomen rikkaimpia. Hänen kuolemansa jälkeen yhtiötä hoiti hänen vaimonsa Eva, joka perusti osakeyhtiön vuonna 1907. Osakeyhtiö perustettiin Antin toivomuksesta, kun heidän lapsensa olivat saavuttaneet täysi-ikäisyyden. (1.)

Yhtiön perustamisen jälkeen Antti Ahlströmin vanhimmasta pojasta Walterista tuli yhtiön hallituksen puheenjohtaja ja hän puheenjohtajakaudellaan perustettiin Kauttuan tehdas ja Varkauden tehdas. Ensimmäisen maailman sodan seurauksena Ahlströmin talous vahvistui, sillä jälleenrakentamiseen tarvittiin paljon puutavaraa ja sitä Ahlströmin varastoissa riitti. Sota-aikanakin yhtiö pystyi kasvamaan ja mm. Karhulan lasitehdas ostettiin tuolloin. Ahlström nousikin vuonna 1931 Suomen suurimmaksi yritykseksi ja sillä oli maailman suurin paperikone Varkaudessa. Ahlströmin 30 tehtaassa työskenteli tuolloin yli 5000 työntekijää. Samaisena vuonna Walter Ahlström myös menehtyi. (1.)

Toinen maailmansota päätti Ahlströmin ja muiden Suomen teollisuusyritysten nousukauden. Tuolloin lähes kaikki insinöörit keskittyivät sotatekniikkaan ja yli puolet yritysten tilauksista tuli puolustusvoimilta. (1.)

Sodan jälkeen Ahlström modernisoi tuotantolaitoksiaan silloin viimeisimmällä teknologialla. Yhtiö laajensi toimintaansa kemiallisessa puunjalostuksessa sekä konepajateollisuutta. Ahlström teki vuonna 1963 Suomen historian suurimman investoinnin ulkomaille ostettuaan Italiasta Cartiere Bosso S.p.A-yrityksen enemmistön. Tämä oli suuri askel kohti kansainvälistymistä Ahlströmille ja myös muille Suomen teollisuuden yrityksille. (1.)

Ahlström hankki Varkauteen Suomen ensimmäisen prosessitietokoneen. IBM 1800 otettiin käyttöön vuonna 1968 ja sen järjestelmään kuului raportointi-, ohjaus-, säätö-



ja tuotantosuunnittelu. Ympäristönsuojelu nosti maailmalla päätään samanaikaisesti. Ahlström sai 70-luvulla kiitosta mm. vaahdotuslaitoksestaan, joka oli ympäristöä säästävä. (1.)

Kahdeksankymmentäluvulla maailman paperimarkkinat muuttuivat ja Ahlström siirtyi erikoispapereiden valmistukseen. Sanoma- ja aikakauspaperin valmistusta vähennettiin, sillä tuolla paperialalla syntyi suurempaa kilpailua. Ahlströmin konepajateollisuus jatkoi koko ajan kasvuaan ja se ohitti lopulta puunjalostuksen tuotantomäärissä vuonna 1987. (1.)

Ahlström laajeni yhä enemmän ja enemmän ulkomaille. Se osti muun muassa Koreasta autoteollisuuden suodatinpaperia valmistavan tehtaan vuonna 1987. Vuonna 1991 se osti saksalaisen uusiopapereita valmistavan yhtiön ja vuonna 1996 ranskalaiset Sibille-Dalle- ja Sibille Tubes -yhtiöt, jotka erikoistuiivat erikoispaperiin ja lasikuituun. (1.)

2000-luvulla yhtiö jakautui kolmeksi eri yhtiöksi, joista yksi keskittyi hoitamaan tuotantoa, toinen hoiti sijoitustoimintaa ja kolmas Ahlströmin suvulle vuosien saatossa kertyneitä kiinteistöjä ja maa-alueita. Ahlstrom Oyj, joka hoiti tuotantoasioita, listautui Helsingin pörssiin vuonna 2006. Ahlström on edelleen maailmanmarkkinoilla yksi merkittävimmistä kuitukomposiittien ja erikoispapereiden valmistajista. Ahlström on myös näiden tuotteiden kehittäjänä yksi edelläkävijöistä. (1.)

## 2.2 Ahlström Karhulassa

Karhulan tehtaiden perustajan William Ruuthin kuoltua Karhulan tehtaat siirtyivät A. Ahlström osakeyhtiölle vuonna 1915. Vaikka omistus siirtyi A. Ahlströmille, jatkoi Karhulan tehtaat Karhula osakeyhtiö nimellä aina vuoteen 1941 saakka, jolloin se liitettiin Ahlströmiin. (2.)

Karhulan tehtaisiin investoitiin 1920-luvusta eteenpäin suuresti. Teräsvalimo valmistui 1921 ja se valoi teräksisiä koneenosia konepajalle. Sähköä tarvittiin koko ajan enemmän ja Korkeakoskelle saatiin uusi vesivoimalaitos vuonna 1927 tätä tarvetta täyttämään. Korkeakoskelle rakennettiin myös kaksi hiomoa. Vientipuuhiomo rakennettiin ensin 1927 ja puuhiomo rakennettiin tämän jälkeen 1934, sillä vientipuu-

hiomosta ei saatu riittävästi massaa eikä tarpeeksi laadukasta massaa kartonkitehtaalle. (3.)

Ahlström oli mukana myös Sunila Oy:ssa lähinnä A. Ahlström osakeyhtiön toimitusjohtaja Harry Gullichsenin ansiosta. Hän oli suuressa osassa siinä, että Alvar Aalto saatiin mukaan Sunilan arkkitehtuurin suunnitteluun. Gullichsen toimi myös Sunila Oy:n johtokunnan puheenjohtajana. (4.)

Ahlström kehitti Korkeakoskelle 1960-luvulla sähköhallintavalvomon vesivoimalaitoksen yhteyteen. Valvomosta ohjattiin ja seurattiin Karhulan tehtaita, vesivoimalaitoksia ja kauppalan sähkön tarvetta, kulutusta ja tuotantoa. 60-luvun lopulla valvomosta voitiin jo seurata koko Ahlström-yhtiön sähkön kulutusta, hallintaa ja tuottoa. Myös sähköpörssiä seurattiin tarkkaan Korkeakoskelta käsin. (5.)

Konepajateollisuus päätettiin jakaa eri osastoihin 70-luvun alussa. Itse konepajan lisäksi uusia osastoja olivat valimo, pumpputehdas ja laboratorio, joka kantoi Hans Ahlströmin nimeä. Ahlström investoi konepajateollisuuteen yhä enemmän ja sen osuus Karhulan osastoista oli noin kaksi kolmannesta. (6.)

Ahlström myi omistuksiaan Karhulassa 80–90-luvulla. Konepajateollisuus päättyi Metsolle, pumpputehdas Sulzerille, kartonkitehdas Sonocolle, lasitehdas Owens-Illinois-konsernille ja Korkeakosken voimalaitos päättyi lopulta Graninge Energia Oy:lle. (6.)

### 2.3 Ahlstrom Glassfibre Oy

Karhulan kuitulasi osakeyhtiö syntyi vuonna 1969, kun A. Ahlström Osakeyhtiö ja Scandinavian Glasfiber Ab päättivät yhdessä perustaa tehtaan Jumalniemeen. Tehdas valmistui kahdessa vuodessa ja siellä työskenteli aluksi noin sata ihmistä. Aluksi tehdas valmisti tekstiililasikuitua, kunnes vuonna 1975 lasihuopatuotanto alkoi. Aluksi vuonna 1975 Karhulan kuitulasi Oy yhdistettiin A. Ahlström osakeyhtiöön ja myöhemmin vuonna 1991 nimi muuttui nykyiseksi Ahlstrom Glassfibre Oy:ksi. (6.)

Lasikuitutuotanto ei ollut tuottavaa 1970-luvulla, jolloin Kuitulasin tulevaisuus oli vaakalaudalla. 80-luvulla Ahlström alkoi panostaa lasikuituun ja sen laatuun. Uusia markkinoita kehitettiin valikoimالاajennuksen avulla, jolloin toiminta saatiin lopulta

kannattavaksi. Uusia markkinoita olivat muun muassa tuulivoimalan lasikuitusiivet.  
(6.)

Lasihuopaa valmistettiin aluksi metrin levyisellä lasihuopakoneella. Valmistetut tuotteet menivät bitumikattohuopien valmistukseen, jossa niistä saatiin parempi laatu verrattuna ennen tätä käytettyihin lumppuhuopiin. Tällä ensimmäisellä lasihuopakoneella valmistettiin tuotteet Sahaniemessä, kun taas vuonna 1973 valmistuneella koneella valmistettiin tuotteet Jumalniemessä. Uusi lasihuopakone oli kaksi metriä leveä ja sillä pystyttiin valmistamaan korkealaatuista lasihuopaa joustovinyylilattiamattoja varten. Tästä muodostuikin Ahlstromille hyvä bisnes, sillä lasihuopa oli huomattavasti parempi runkoraaka-aine kuin asbestihuopa. Lasihuopaa voitiin käyttää myös muihin rakennustarvikkeisiin, joissa tarvittiin kevyttä ja myös ääntä eristävää materiaalia. Eri-laisissa akustisissa eristelevyissä ja autojen verhoilulevyissä on käytetty myös lasihuopaa. (6.)

Lasihuovan menekki vain kasvoi vuosien saatossa ja tekniikka kehittyi. Vuonna 1985 Ahlstromille tuli aiheelliseksi rakennuttaa isompi halli ja isompi lasihuopakone. Uusi lasihuopakone oli neljä metriä leveä ja siinä käytettiin uutta disproteknologiaa. Disproteknologiaa oltiin kokeilu jo vanhassa kaksi metriä leveässä lasihuopakoneessa, mutta se otettiin kunnolla käyttöön uudessa koneessa. Uudessa teknologian avulla lasihuovasta saatiin ohuempaa sekä sileämpää. Ehdoton parannus oli veden kulutuksen tippuminen jopa 10 prosentilla, mikä on lasihuopaprosessissa merkittävä parannus.  
(6.)

Edes 90-luvun lama ei vaikuttanut lasikuidun ja huovan valmistukseen. Ahlstrom investoi tehtaaseen, joka toi lisää työpaikkoja. Jatkojalustus, lisäsuunit sekä laboratorio olivat merkittäviä uudistuksia lama-ajan Suomessa. 90-luku menestys oli jatkuvat kehittämisen tuotosta. Kiristyvän kilpailun johdosta Ahlstromin oli kehitettävä omaa toimintaansa koko ajan. Asiakaspalvelun kautta myyntiä oli saatava lisättyä, tuotteiden oli oltava laadukkaita ja prosessin jatkuva sekä tehokas. (6.)

2000-luvulla Ahlstromin markkinat suuntautuivat koko ajan enemmän ulkomaille. Tuotetuista lasikuitu/huopatuotteista myytiin Suomeen 5 prosenttia, muut menivät suurimmalta osin Eurooppaan. Lasikuitukoneen kapasiteettia pystyttiin nostamaan erilaisten automaatio investointien yhteydessä. Myös sen ilmanvaihtokoneistoa uusittiin, joka vaikutti myös sisäilmaan positiivisesti. (6.)

Ahlstrom rakennutti Venäjälle lasihuopakoneen vuonna 2007. Yhtiö myös lopetti vuonna 2011 Karhulassa lasikuidun valmistamisen. Myös lasikuitumattoa ei enää valmisteta Karhulan tehtaalla. Karhulaan jäi lasihuovan valmistus. (6.)

## 2.4 Lasihuopakone

Ahlstrom Glassfibre Oy:n nykyinen neljä metriä leveä lasihuopakone valmistui vuonna 1985 laajentuneille markkinoille. Siinä käytettiin uutta disproteknikkaa eli vaahtoprosessia. Vanhassa kaksi metriä leveässä lasihuopakoneessa disproteknikkaa testattiin jo, mutta vesiprosessi oli sen käyttämä tekniikka. Lasihuopakoneiden ajonopeudet nopeutuivat aikojen saatossa huomasti. Ensimmäinen lasihuopakone Sahaniemessä pystyi tuottamaan 40 metriä minuutissa, kuten myös Glassfibrelle vuonna 1974 valmistunut kaksi metrinen lasihuopakone. Uusin neljä metrinen kone pystyi alussa tuottamaan vain 35 m/min. Tekniikka on kehittynyt huomasti eteenpäin, joten nykyisin koneella pystytään ajamaan jopa 145 m/min. Vanhan 2 metriä leveän lasihuopakoneen tuotanto lopetettiin vasta 1997, jonka jälkeenkin sillä ajettiin koeajoja aina vuoteen 2001, jonka jälkeen se purettiin vuonna 2003. (7.)

Nykyisin koneen vuosituotanto on noin 7 000 tonnia. Koneelta tulevien rullien leveys vaihtelee 1000 – 4200 mm välillä ja sen jälkeen ne voidaan vielä rullata ja pituusleikata tuotantovirheiden minimoimiseksi ja asiakkaan erikoisvaatimusten mukaisiksi. Rullaimia on kaksi nelimetristä ja yksi kaksimetrisen. Pakattu tuote menee asiakkaille, joiden käyttökohteita ovat muovimatot, laminaatit tai esimerkiksi katolle kattuhuovaksi. Suurin osa menee muovimatoiksi PVC-lattiamattoihin (75 %), toiseksi eniten laminaatteihin pintahuovaksi (10 %). (7.)

Pääraaka-aineena lasihuovassa käytetään lasikuitua märkähaketettuna. Kuidun koko vaihtelee laadun mukaan. Useimmiten pääläätu on halkaisijaltaan 10 micronia ja 10 millia pitkä. Lasin osuus lasihuovassa on noin 70–80 %. (7.)

Valmistusprosessissa lasihuopa liimataan kasaan sideaineen avulla liimaverhouksella, joka on n. 24 % lopputuotteesta. Lisäainetta voidaan lisätä myös kuivauksen jälkeen ilmanläpäisyn vähentämiseksi. Tätä kutsutaan optisizeriksi, joka on kokonaisneliöpainosta 2 – 10 %. (7.)

Disproteknikkassa väliaineena on vaahto, joka erottaa sen normaalista paperikoneesta ja sen prosessista. Vaahdon ominaismassa on 300–400 g/l, kun taas paperiprosessissa veden ominaismassa on 1000 g/l. Vaahdon avulla huovasta saadaan laadukkaampaa ja ohuempaa sekä sen flokkisuus on parempaa. (7.)

Itse tuotteen valmistus alkaa märässäpäässä, kun perälaatikolta lasikuitu syötetään viiralle, joka kuljettaa massan sideaineosalle, jossa on verholevitin. Rata jatkaa matkansa ensimmäiselle kuivainosalle, jossa kuuma ilma puhalletaan radan läpi. Ensimmäisen kuivaimen kapasiteetti on 8 MW ja se on tehokkain kuivain. Tämän jälkeen tulee 2. kuivain, jossa myös kuuma ilma kuivattavat rataa läpipuhalluksella. 2. kuivaimen kuivauskapasiteetti on 3 MW. Kahden ensimmäisen kuivaimen jälkeen tulee 1. mittapalkki ja optisizer liimausyksikkö. Optisizerin jälkeen tuote menee 3. kuivaimeen, joka on leijukuivain. Leijukuivaimessa tuote leijuu ilmassa ylhäältä ja alhaalta tulevien ilmapuhallusten avulla. Sen kuivauskapasiteetti on 7,2 MW. Kuivainten jälkeen tulee 2. mittapalkki ja WIS-vikailmaisoin, jonka jälkeen tuote rullataan poperullaimen avulla. (7.)

Valmistusprosessin kuivaimet toimivat kiertoilmapuhaltimilla niin, että kuuma ilma siirtää energiansa tuotteen veteen sen yläpuolella. Höyrystynyt vesi puhalletaan alaosaan, jossa poistopuhaltimet puhaltaa kosteuden pois. Ilmaa lämmitetään maakaasupolttimilla, joita on yhteensä yksitoista kuivaimissa. (7.)

Leijukuivain sisältää myös maakaasupolttimia sekä poisto-, kierto-, ja korvausilmalaitteiston. Leijukuivaimessa on myös leijulaatikoita, joita on ylä- ja alapuolella. Laatikoita on lohkoissa aina kaksi ja lohkoja on neljä. Ensimmäisessä lohkoissa on suurin teho sekä oma poistopuhallin, jotta suurin kosteus saadaan heti pois tuotteesta. Muissa lohkoissa on yhteinen poistopuhallin. Kuivatuksen tarkoituksena on myös saada sideaine kypsymään valmiiksi. Myös leijukuivaimessa lämmitetty ilma siirtää lämpöenergiaa tuotteessa olevaan kosteuteen, joka näin höyrystyy. Höyry imetään kiertokanavan kautta pois ja poistetaan laitteistolla. Tämän jälkeen se korvataan kuivalla ilmalla ja lämmitetään uudelleen. (7.)

### 3 LÄMMÖNVAIHDIN

#### 3.1 Lämmönvaihtimien toiminta

Lämmönvaihtimissa energia käytetään tehokkaasti lämmityksissä ja viilennyksissä. Ne ovat luontoa säästäviä, sillä lämpöhäviö on pieni. Viimeisen vuosikymmenen aikana on alettu kiinnittää enemmän huomiota energian säästämiseen ja keräämiseen. Lämmönvaihtimien käyttö on lisääntynyt suuresti, sillä se on loistava tapa ottaa esimerkiksi savukaasuista lämpöenergia hyötykäyttöön. (8.)

Lämmönvaihtimia on tyyliltään kolmea eri lajia. Myötävirtalämmönvaihtimessa aineiden virtaussuunta on sama, kun taas vastavirtalämmönvaihtimessa suunta on vastakkainen. Tästä johtuen myötävirtalämmönvaihdin ei pysty lämmittämään lämmitettävää ainetta sen poistumislämpötilaa kuumemmaksi, kun taas vastavirtalämmönvaihdin pystyy ja yleensä pienemmällä levypinta-alalla. Kolmas lämmönvaihdintyyppi on ristivirtauslämmönvaihdin, joita usein kattiloissa käytetään. Niissä lämpö tai kylmä voi aiheuttaa materiaalille räsitusta, sillä lämpötilavaihtelut ovat suuria. (9.)

Kun aletaan mitoittaa hankittavaa lämmönvaihdinta, täytyy tietää lämpötilat ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen. Myös jomman kumman aineen massavirta täytyy olla tiedossa. Lämmönvaihtimen teho määräytyy aineiden lämpötilaeron, läpäisykerroimen ja pinta-alan mukaan. Pinta-alan suuruus taas riippuu läpäisykerroimesta, jotta lämpöenergia siirtyisi tehokkaasti aineiden välillä. Lämmönläpäisykerroin määritetään lämmön määrän ja siirtotapojen mukaan. (9.)

Lämmön siirtotapoja on kolmea eri kappaletta. Lämmön johtumisessa väliaineen läpi kulkee lämmönvirtaus lämpötilaeron ansiosta. Konvektiossa lämpövirta siirtyy aineesta kiinteään pintaan esimerkiksi levyyn. Säteilyssä aineet lähettävät säteilyä eli lämpöä toisiin aineisiin. Säteilyn määrä riippuu lämpötiloista. Jokainen aine, jonka lämpötila ylittää absoluuttisen nollopisteen (-273,15 celsiusta) säteilee lämpöenergiaa. (9.)

#### 3.2 Levylämmönvaihdin

Levylämmönvaihtimessa on kaksi päätylevyä, jotka ovat muita levyjä paksumpia. Näiden levyjen välissä on tiiviisti pienempiä levyjä jopa satoja. Esimerkiksi lämmitettävä neste pumpataan toiselta puolelta, kun taas lämmitettävä neste toiselta puolelta.

Prosessissa nesteet ovat kosketuksissa suuriin levypinta-aloihin ja vaihtavat lämpöä keskenään. (8.)

Levylämmönvaihtimen sisällä olevien ohuiden levyjen profiilia voidaan vaihdella eri käyttötarkoituksiin. Levyjen V-kulman jyrkkyydellä voidaan vaikuttaa painehäviöihin. Jyrkkäprofiilisessa levyssä on vähän painehäviöitä, kun taas matalaprofiilisessa on paljon painehäviöitä, mutta siinä on suurempi lämmönsiirtoteho. Virtaussolia voidaan myös muokata tarpeen mukaan. Solia voidaan suurentaa tai pienentää kuumassa ja kylmässä puolessa, jotta saadaan täydellinen lämmönsiirto. (10.)

Levylämmönvaihtimissa nesteet erotetaan levyjen sisällä olevilla kumitiivisteillä. Myös kumitiivisteiden kehitys on mennyt paljon eteenpäin, sillä ne ovat levylämmönvaihtimen heikoin lenkki. Tiivisteiltä vaaditaan hyviä ominaisuuksia, sillä lämpötilat lämmönvaihtimessa voivat äärimmäisen haastavia. Lämpötila voi vaihdella kovasta pakkasesta (-45 celsiusta) aina tulikuumaan (200 celsiusta). Levylämmönvaihtimissa levyjen suuruus vaihtelee paljon käyttötarkoitusten ja lämpötilojen mukaan. Suurimmat levyt voivat olla jopa 1,5 metriä leveitä, viisi metriä korkeita ja neljä metriä pitkiä. Tiivisteiden suurin paksuus saattaa ylittää 20 millimetriin. Levylämmönvaihtimissa voi olla levyjä muutamista kymmenistä aina satoihin. Paine-ero kasvaa mitä enemmän levyjä lämmönvaihtimessa on, jotta vesi jaksaa virrata levyjen läpi. (8.)

Levylämmönvaihtimet voidaan esimerkiksi varustaa tuplaeristyksellä, roiskesuojilla ja suojamaalilla, jos sijoituspaikka on haastavassa paikassa. Myös erikoissuodattimet, maadoituskiinnikkeet ja CIP-puhdistus ovat mahdollisia lisävarusteita. (10.)

### 3.3 Putkilämmönvaihtimet

Putkilämmönvaihtimet sisältävät putkisarjoja, joissa yhden sarjan sisällä kulkee lämmintä ainetta ja toisessa viileää ainetta. Lämmönvaihtimen kuori on paineastia ja lämmitettävä aine voi olla kuoren ja putkisarjan välissä. Näin toinen putkisarja siirtää lämpöenergiaa toiseen aineeseen kuoren puolella. Putkilämmönvaihtimet kestävät suuria paineita ja lämpötiloja. Putket lämmönsiirtimen sisällä voivat olla U-muotoiset tai suorat. Kuori- ja putkimateriaaliksi tulisi valita sellainen, joka kestää suuria lämpötiloja ja painetta. Materiaalin tulisi olla korroosiokestävä ja lämpöjohtava. Yleisimpiä putkilämmönvaihtimissa käytettyjä materiaaleja ovat ruostumaton teräs ja hiiliteräs. (11.)

### 3.4 Spiraalilämmönvaihdin

Spiraalilämmönvaihtimessa putket menevät spiraalin muotoisesti. Spiraalissa menee kaksi putkilinjaa, joista toisessa kulkee lämmittävä aine ja toisessa lämmitettävä aine. Spiraalilämmönvaihtimessa pääideana on tehokas tilankäyttö. Se myös putsaa tehokkaasti itse itsensä pienen painehäviön ansiosta. Spiraalilämmönvaihtimet jaetaan kolmeen luokkaan aineiden virtauksen perusteella. Vastavirtaus on yleisin ja siinä aineet virtaavat vastakkaisiin suuntiin. Loput kaksi ovat hajautettu virtaus ja pyörrevirtaus. (12.)

### 3.5 LTO-patteri

Lämmöntalteenottopatteri on yleensä kaksiosainen, jossa ensimmäinen osa lämmittää ilmaa esimerkiksi tehdashalliin eli se on ilma-ilmalämmönvaihdin. Toinen osa lämmittää vettä esimerkiksi tehdasvettä prosessiin eli se on ilma-vesilämmönvaihdin. LTO-pattereita käytetään tehtaissa, jossa kuumat savukaasut ja lämmitysilmat puhalletaan savupiipun kautta taivaalle. LTO-patterin tarkoituksena on käyttää näiden savukaasujen lämpöenergia hyödyksi. Sen avulla voidaan jopa 60 % hukatusta energiasta palauttaa prosessiin. Sijoituspaikka patterille on savupiipun lähelle eli usein tehtaan katolle. Ne ovat yleisiä paperitehtaissa, sillä ne parantavat kuivatusosan ilmanvaihtoa. Tämän ansiosta tuotanto paranee ja radan nopeutta voidaan lisätä. (13.)

## 4 LÄMMÖN TALTEENOTTO SAVUKAASUISTA

### 4.1 Yleistä

Tämän työn tarkoituksena on ottaa lasihuopakoneen kuivaimen savukaasuista lämpöä talteen ja siirtää lämpöenergia tehdasvesisäiliöön. Tähän tarkoitukseen tarvitsemme lämmöntalteenottopatterin, joka siirtää lämpöenergiaa savukaasuista tehdasveteen. Tehdasveden lämpötila tulee pitää samana ympäri vuoden, jotta prosessi pysyy stabiilina. Projektin tarkoituksena on säästää rahaa energiakuluissa ja parantaa lasihuovan valmistusta. Säästöä pystytään tekemään talvella kun tehdasvetenä käytettävän joki-veden lämpötila laskee lähelle nollaa celsiusastetta. Tämä aiheuttaa lasihuopakoneelle haasteita ja prosessia joudutaan säätämään.



Projektissa on mahdollista hyödyntää tehtaalla olevia ylimääräisiä putkistoja ja pumppeja hankintakustannuksien hillitsemiseksi. Myös ylimääräisiä levylämmönvaihtimia on mahdollista käyttää, jos esimerkiksi glykolikiertoa tarvitsee käyttää.

Lasketaan lasihuopakoneen poistokaasujen energiamäärät lasihuopakoneella kohteittain ja päätetään sopiva kohde energian talteenottamiseksi. Sopivia kohteita ovat Poisto 1 ja Leiju 1. Kohteita tarkastellessa täytyy ottaa huomioon kohteiden sijainti, savukaasun sisältö, lämpötila, kosteus ja puhtaus. Likainen savukaasu likaannuttaa lämmönvaihdinta, jolloin lämmönvaihtimen putsaus ja huoltaminen on tärkeää. Savukaasu voi sisältää myös eri yhdisteitä ja sideaineita. Esimerkiksi eri määriä typpeä, hiilidioksidia, happea ja vettä eli kosteutta voi olla vaihtelevia määriä. Lämpötila on tärkeä tehon tarvetta ajatellen.

Lämmöntalteenottopatterin sijoitus on myös suunniteltava huolellisesti. Jos talteenotokohde on ulkona, on mahdollisesti suunniteltava glykolikierto jäätymisen estämiseksi. Myös kohteen sijainti tehdasvesisäiliöön nähden on tärkeää putkiston ja pumpun sijoittamisen kannalta. Jos kohde sijaitsee kaukana tehdasvesisäiliöstä, tulevat projektin kustannukset suurenemaan huomattavasti. Myös kohteen korkeus vaikuttaa pumpun nostokorkeuden ja paineen tarpeeseen.

## 4.2 Tehdasvesisäiliö

Tehdasvesisäiliö sijaitsee tehtaan alakerroksessa. Tehdasvettä käytetään mm. lasihuopakoneen viirojen pesuun sekä sideaineen valmistukseen. Tehdasvesisäiliön tilavuus on 25 m<sup>3</sup> ja säiliön täyttöaste pyritään pitämään 80–90 prosentissa automaation avulla. Vettä kulkee säiliöstä prosessiin n. 700 litraa minuutissa. Tehdasvettä tultaisiin mittaamaan lämpötila-antureilla ja sen lämpötila olisi tarkoitus pitää n. 20–30 asteisena läpi vuoden. Tehdasvesisäiliöön tuleva jokivesi puhdistetaan hiekkasuodattimilla.



Kuva 1 Tehdasvesisäiliö (taustalla)

#### 4.3 Pumppu

Pumppua tarvitaan pumppaamaan vesi tehdasvesisäiliöltä lämmöntalteenottopatterille. Koska LTO-patteri sijaitsee kaukana tehdasvesisäiliöstä, tarvitaan painetta. Pumpun tarvittava teho lasketaan ja pumppuna tullaan käyttämään 7,5 kW tehoista teollisuus-pumppua, jonka on valmistanut Kolmeks. Pumpun tuottama paine riittää huomattavasti pumppaamiseen, vaikka painehäviöitä syntyisikin suunniteltua enemmän.



Kuva 2 Pumppu

#### 4.4 LTO-patteri

Projektiin suunniteltuun lämmöntalteenottopatterista on tehnyt tarjouksen yritys nimeltä EV Group. He ovat mitoittaneet LTO-patterin savukaasuista saatavan energiamäärän mukaan. LTO-Patterin tarkoituksena on lämmittää savukaasuilla tehdasvettä eli se on ilma/vesilämmönvaihdin. Painehäviötä lämmönvaihtimesta kertyy 40 205 Pa. Lämmönvaihdin on mitoiltaan 1000 mm · 650 mm, ilmansuunnassa 2500mm korkea. Painoa lämmönvaihtimella on 1600 kiloa. Lämmönvaihtimen yläpuolelle asennetaan pesurilohko. Kondenssivettä syntyy lämmönsiirrossa runsaasti, mikä auttaa lämmönvaihtimen puhtaana pidossa, sillä vesi puhdistaa lämmönvaihdinta. LTO-patteri likaantuu savukaasuissa olevien sideaineiden sekä kiintoainepartikkeleiden takia ja se tulee puhdistaa aina pesuseisokeissa.

## 4.5 Säätopellit

Säätopellit asennetaan ennen lämmönvaihdinta ja niiden tarkoituksena on säädellä lämmönsiirtoa ja tehdasvesisäiliön veden lämpötilaa. Säätopeltiä ohjataan automaatiojärjestelmän kautta. Kun tehdasvettä ei tarvitse lämmittää esimerkiksi kesällä, säätopellit ohjaavat savukaasun ohituksen kautta savupiippuun ohi lämmönvaihtimen. Kriittisimmät ajanjaksot säätopeltien käytössä ovat kevät ja syksy, kun jokiveden lämpötilassa tapahtuu muutoksia. Muutos ei saa näkyä kuivainten toiminnassa, ettei prosessiin tule muutoksia.

## 4.6 Automaatio

Jotta prosessi pysyy stabiilina ympäri vuoden, reagoidaan muuttuviin lämpötiloihin automaation avulla. Tehdasvesisäiliöön tulisi lämpötila-anturit, jotka ilmaisevat lämmöntarvetta automaatiolle. Automaatio säättää säätopeltiä lämmöntarpeen mukaan. Se avaa ohitusventtiilin ja kääntää pellen niin, että savukaasut menevät ohituksen kautta katolle. Pumppu, joka syöttää vettä lämmönvaihtimelle, voisi olla ohjelmoitu niin, että putkistossa olisi tasainen paine. Paine tiedon se saisi paineanturilta. Pumpun kierroksia säädetäisiin taajuusmuuttajalla. Tehdasvesisäiliön pintaa myös mitataan pintaantureilla, että säiliössä on aina 80–90 % täynnä.

Kaikki automaatio liitetään tehdasjärjestelmään, jotta nähdään reaaliajassa käyntitiedot ja mittaukset. Tällöin prosessimies pystyy reagoimaan vikatilanteisiin välittömästi ja hän näkee hälytyslistalta vikatieidot. Tällöin hälytyksiä voidaan analysoida jälkikäteen ja tehdä tarvittavia korjaustoimenpiteitä.

# 5 LASKELMAT

## 5.1 Oikean poistokanavan valinta

Mahdollisina lämmöntaiteenottokanavina ovat Poisto 1 ja Leiju 1. Lasketaan näiden poistokanavien energiamäärät ja analysoidaan savukaasun käypäisyys lämmöntaiteenottoon. Myös poistokanavan sijainti ja suunnitelmat tulevaisuudelle tulee ottaa huomioon. Leiju 1 on suunniteltu tulevaisuudessa käytettävän myös tehtaan lämmitykseen, joten sen savukaasun energiamäärä tulisi olla suuri.

Ensimmäiseksi lasketaan Poisto 1:n savukaasusta saatava energiamäärä. Mittausarvot ovat Kyamkin päästömittausraportista, jonka lukemat ovat peräisin elokuulta 2013.

Savukaasun lämpötila  $T_{sk} = 382 \text{ K}$  ja tilavuusvirta (kostea)  $q_{v,sk} = 5,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aineiden ominaislämpökapasiteetti-arvot ovat kirjasta Fundamentals of Heat and Mass Transfer (14.).

Taulukko 1 Poisto 1:n savukaasujen ominaisuudet

	Kuivat osuudet [%]	Kosteat osuudet [%]	Moolimassa M [kg/kmol]	massa [g]	massaosuus [m %]
CO <sub>2</sub>	1,7	1,63	44	71,51	2,57
O <sub>2</sub>	17,7	16,92	32	541,48	19,47
N <sub>2</sub>	80,6	70,25	28	1967,10	70,72
H <sub>2</sub> O	0	11,20	18	201,60	7,25
Yhteensä	100	100		2781,69	100

Savukaasun kaasuvakio

$$R_{sk} = m\%_{CO_2} \cdot R_{CO_2} + m\%_{H_2O} \cdot R_{H_2O} + m\%_{O_2} \cdot R_{O_2} + m\%_{N_2} \cdot R_{N_2} \quad (1.)$$

jossa

$$R_{CO_2} = \frac{R}{M_{CO_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,0257 \frac{kg}{mol}} = 189,0 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{H_2O} = \frac{R}{M_{H_2O}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,0725 \frac{kg}{mol}} = 461,9 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{O_2} = \frac{R}{M_{O_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,1947 \frac{kg}{mol}} = 259,8 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{N_2} = \frac{R}{M_{N_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,7072 \frac{kg}{mol}} = 296,9 \frac{J}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavan 1.

$$R_{sk} = 0,0257 \cdot 189,0 \frac{J}{kgK} + 0,0725 \cdot 461,9 \frac{J}{kgK} +$$

$$0,1947 \cdot 259,8 \frac{J}{kgK} + 0,7072 \cdot 296,9 \frac{J}{kgK} = \mathbf{298,9 \frac{J}{kgK}}$$

Savukaasun tiheys

$$\rho_{sk} = \frac{p}{R_{sk} \cdot T_{sk}} \quad (2.)$$

jossa

$$p = 101300 \text{ Pa}$$

$$R_{sk} = 298,9 \frac{J}{kgK}$$

$$T_{sk} = 382 \text{ K}$$

Sijoitetaan kaavaan 2.

$$\rho_{sk} = \frac{101300 \text{ Pa}}{298,9 \frac{J}{kgK} \cdot 382 \text{ K}} = 0,887 \frac{kg}{m^3}$$

Savukaasun massavirta

$$q_{m,sk(m\ddot{a}rk\ddot{a})} = q_{v,sk} \cdot \rho_{sk} \quad (3.)$$

jossa

$$q_{v,sk} = 5,1 \frac{m^3}{s}$$

$$\rho_{sk} = 0,887 \frac{kg}{m^3}$$

Sijoitetaan kaavaan 3.

$$q_{m,sk(märkä)} = 5,1 \frac{m^3}{s} \cdot 0,887 \frac{kg}{m^3} = 4,525 \frac{kg}{s}$$

Savukaasun ominaislämpökapasiteetti

$$C_{p_{sk}} = m\%_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}} + m\%_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} + m\%_{O_2} \cdot C_{p_{O_2}} + m\%_{N_2} \cdot C_{p_{N_2}} \quad (4.)$$

Lasketaan savukaasun ominaislämpökapasiteetti 109 celsius asteessa

$$C_{p_{H_2O}} = 1,893 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 0,927 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{O_2}} = 0,936 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{N_2}} = 1,042 \frac{kJ}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavaan 4.

$$C_{p_{sk1}} = 0,0257 \cdot 0,927 \frac{kJ}{kgK} + 0,0725 \cdot 1,893 \frac{kJ}{kgK} +$$

$$0,1947 \cdot 0,936 \frac{kJ}{kgK} + 0,7072 \cdot 1,042 \frac{kJ}{kgK} = 1,080 \frac{kJ}{kgK}$$

Lasketaan savukaasun ominaislämpökapasiteetti 36 celsiusasteessa

$$C_{p_{H_2O}} = 1,869 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 0,865 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{O_2}} = 0,922 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{N_2}} = 1,04 \frac{kJ}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavaan 4.

$$C_{p_{skz}} = 0,0257 \cdot 0,865 \frac{kJ}{kgK} + 0,0725 \cdot 1,869 \frac{kJ}{kgK} +$$

$$0,1947 \cdot 0,922 \frac{kJ}{kgK} + 0,7072 \cdot 1,04 \frac{kJ}{kgK} = \mathbf{1,073 \frac{kJ}{kgK}}$$

Savukaasun kuivamassavirta

$$q_{m,sk(vesi)} = m\%_{H_2O} \cdot q_{m,sk(märkä)} \quad (5.)$$

jossa

$$m\%_{H_2O} = 0,0725$$

$$q_{m,sk(märkä)} = 4,525 \frac{kg}{s}$$

Sijoitetaan kaavaan 5.

$$0,0725 \cdot 4,525 \frac{kg}{s} = 0,328 \frac{kg}{s}$$



$$q_{m,sk(kuiva)} = q_{m,sk(märkä)} - q_{m,sk(vesi)} \quad (6.)$$

jossa

$$q_{m,sk(märkä)} = 4,525 \frac{kg}{s}$$

$$q_{m,sk(vesi)} = 0,328 \frac{kg}{s}$$

Sijoitetaan kaavaan 6.

$$4,525 \frac{kg}{s} - 0,328 \frac{kg}{s} = 4,2 \frac{kg}{s}$$

Savukaasun teho

Lämmönvaihtimelle

$$\phi_1 = q_{m,sk(märkä)} \cdot C_{p_{sk1}} \cdot T_1 \quad (7.)$$

jossa

$$q_{m,sk(märkä)} = 4,525 \frac{kg}{s}$$

$$C_{p_{sk1}} = 1,080 \frac{kJ}{kgK}$$

$$T_1 = 109 \text{ °C}$$

Sijoitetaan kaavaan 7.

$$\phi_1 = 4,525 \frac{kg}{s} \cdot 1,080 \frac{kJ}{kgK} \cdot 109 \text{ °C} = 532,688 \text{ kW}$$

Lämmönvaihtimelta

$$\phi_2 = q_{m,sk(kuiva)} \cdot C_{p_{sk2}} \cdot T_2 \quad (8.)$$

jossa

$$q_{m,sk(kuiva)} = 4,197 \frac{kg}{s}$$

$$C_{p_{sk2}} = 1,073 \frac{kJ}{kgK}$$

$$T_2 = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sijoitetaan kaavaan 8.

$$\phi_2 = 4,197 \frac{kg}{s} \cdot 1,073 \frac{kJ}{kgK} \cdot 36 \text{ } ^\circ\text{C} = 162,054 \text{ kW}$$

Veden lauhtumisenergia

$$\phi_{höyry} = q_{m,höyry} \cdot r \quad (9.)$$

jossa

$$q_{m,höyry} = 0,328 \frac{kg}{s}$$

$$r = 2417 \frac{kJ}{kg}$$

Sijoitetaan kaavaan 9.

$$\phi_{höyry} = 0,328 \frac{kg}{s} \cdot 2417 \frac{kJ}{kg} = 792,588 \text{ kW}$$

Kokonaisteho

$$\phi_{sk} = \phi_1 - \phi_2 + \phi_{höyry} \quad (10.)$$

jossa

$$\phi_1 = 532,688 \text{ kW}$$

$$\phi_2 = 162,054 \text{ kW}$$

$$\phi_{höyry} = 792,588 \text{ kW}$$

Sijoitetaan kaavaan 10.

$$\phi_{sk} = 532,688 \text{ kW} - 162,054 \text{ kW} + 792,588 \text{ kW} = \mathbf{1163,2 \text{ kW}}$$

Poisto 1:n savukaasujen energiamääräksi saatiin 1163 kW. Tämän jälkeen lasketaan Leiju 1:n savukaasujen energiamäärä. Savukaasun lämpötila  $T_{sk} = 428,9 \text{ K}$  ja tilavuusvirta (kosteaa)  $q_{v,sk} = 6,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Taulukko 2 Leiju 1:n savukaasujen ominaisuudet

	Kuivat osuudet [%]	Kosteat osuudet [%]	Moolimassa M [kg/kmol]	massa [g]	massaosuus [m %]
CO <sub>2</sub>	0,4	0,38	44	16,83	0,6
O <sub>2</sub>	19,9	19,02	32	608,78	21,5
N <sub>2</sub>	79,7	76,19	28	2133,41	75,2
H <sub>2</sub> O	0	4,40	18	79,20	2,8
Yhteensä	100	100		2781,69	100

Savukaasun kaasuvakio

$$R_{sk} = m\%_{CO_2} \cdot R_{CO_2} + m\%_{H_2O} \cdot R_{H_2O} + m\%_{O_2} \cdot R_{O_2} + m\%_{N_2} \cdot R_{N_2} \quad (1.)$$

jossa

$$R_{CO_2} = \frac{R}{M_{CO_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,0257 \frac{kg}{mol}} = 189,0 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{H_2O} = \frac{R}{M_{H_2O}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,0725 \frac{kg}{mol}} = 461,9 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{O_2} = \frac{R}{M_{O_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,1947 \frac{kg}{mol}} = 259,8 \frac{J}{kgK}$$

$$R_{N_2} = \frac{R}{M_{N_2}} = \frac{8,3145 \frac{J}{molK}}{0,7072 \frac{kg}{mol}} = 296,9 \frac{J}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavan 1.

$$R_{sk} = 0,0059 \cdot 189,0 \frac{J}{kgK} + 0,0279 \cdot 461,9 \frac{J}{kgK} +$$

$$0,2145 \cdot 259,8 \frac{J}{kgK} + 0,7517 \cdot 296,9 \frac{J}{kgK} = \mathbf{292,9 \frac{J}{kgK}}$$

Savukaasun tiheys

$$\rho_{sk} = \frac{p}{R_{sk} \cdot T_{sk}} \quad (2.)$$

jossa

$$p = 101300 \text{ Pa}$$

$$R_{sk} = 292,9 \frac{J}{kgK}$$

$$T_{sk} = 428,9 K$$

Sijoitetaan kaavaan 2.

$$\rho_{sk} = \frac{101300 Pa}{292,9 \frac{J}{kgK} \cdot 428,9 K} = 0,806 \frac{kg}{m^3}$$

Savukaasun massavirta

$$q_{m,sk(m\ddot{a}rk\ddot{a})} = q_{v,sk} \cdot \rho_{sk} \quad (3.)$$

jossa

$$q_{v,sk} = 6,8 \frac{m^3}{s}$$

$$\rho_{sk} = 0,806 \frac{kg}{m^3}$$

Sijoitetaan kaavaan 3.

$$q_{m,sk(m\ddot{a}rk\ddot{a})} = 6,8 \frac{m^3}{s} \cdot 0,806 \frac{kg}{m^3} = 5,482 \frac{kg}{s}$$

Savukaasun ominaislämpökapasiteetti

$$C_{p_{sk}} = m\%_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}} + m\%_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} + m\%_{O_2} \cdot C_{p_{O_2}} + m\%_{N_2} \cdot C_{p_{N_2}} \quad (4.)$$

Lasketaan savukaasun ominaislämpökapasiteetti 109 celsiusasteessa

$$C_{p_{H_2O}} = 1,915 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 0,96 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{O_2}} = 0,948 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{N_2}} = 1,047 \frac{kJ}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavaan 4.

$$C_{p_{sk1}} = 0,0059 \cdot 0,96 \frac{kJ}{kgK} + 0,0279 \cdot 1,915 \frac{kJ}{kgK} +$$

$$0,2145 \cdot 0,948 \frac{kJ}{kgK} + 0,7517 \cdot 1,047 \frac{kJ}{kgK} = \mathbf{1,049 \frac{kJ}{kgK}}$$

Lasketaan savukaasun ominaislämpökapasiteetti 36 celsiusasteessa

$$C_{p_{H_2O}} = 1,869 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 0,865 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{O_2}} = 0,922 \frac{kJ}{kgK}$$

$$C_{p_{N_2}} = 1,04 \frac{kJ}{kgK}$$

Sijoitetaan kaavaan 4.

$$C_{p_{sk2}} = 0,0059 \cdot 0,865 \frac{kJ}{kgK} + 0,0279 \cdot 1,869 \frac{kJ}{kgK} +$$

$$0,2145 \cdot 0,922 \frac{kJ}{kgK} + 0,7517 \cdot 1,04 \frac{kJ}{kgK} = \mathbf{1,037 \frac{kJ}{kgK}}$$

Savukaasun kuivamassavirta

$$q_{m,sk(vesi)} = m\%_{H_2O} \cdot q_{m,sk(märkä)} \quad (5.)$$

jossa

$$m\%_{H_2O} = 0,0279$$

$$q_{m,sk(märkä)} = 5,482 \frac{kg}{s}$$

Sijoitetaan kaavaan 5.

$$0,0279 \cdot 5,482 \frac{kg}{s} = 0,153 \frac{kg}{s}$$

$$q_{m,sk(kuiva)} = q_{m,sk(märkä)} - q_{m,sk(vesi)} \quad (6.)$$

jossa

$$q_{m,sk(märkä)} = 5,482 \frac{kg}{s}$$

$$q_{m,sk(vesi)} = 0,153 \frac{kg}{s}$$

Sijoitetaan kaavaan 6.

$$5,482 \frac{kg}{s} - 0,153 \frac{kg}{s} = 5,3 \frac{kg}{s}$$

Savukaasun teho

Lämmönvaihtimelle

$$\phi_1 = q_{m,sk(märkä)} \cdot c_{p_{sk1}} \cdot T_1 \quad (7.)$$

jossa

$$q_{m,sk(märkä)} = 5,482 \frac{kg}{s}$$

$$C_{p_{sk1}} = 1,049 \frac{kJ}{kgK}$$

$$T_1 = 155,9 \text{ °C}$$

Sijoitetaan kaavaan 7.

$$\phi_1 = 5,482 \frac{kg}{s} \cdot 1,049 \frac{kJ}{kgK} \cdot 155,9 \text{ °C} = 896,991 \text{ kW}$$

Lämmönvaihtimelta

$$\phi_2 = q_{m,sk(kuiva)} \cdot C_{p_{sk2}} \cdot T_2 \quad (8.)$$

jossa

$$q_{m,sk(kuiva)} = 5,329 \frac{kg}{s}$$

$$C_{p_{sk2}} = 1,037 \frac{kJ}{kgK}$$

$$T_2 = 36 \text{ °C}$$

Sijoitetaan kaavaan 8.

$$\phi_2 = 5,329 \frac{kg}{s} \cdot 1,037 \frac{kJ}{kgK} \cdot 36 \text{ °C} = 198,876 \text{ kW}$$

Veden lauhtumisenergia

$$\phi_{höyry} = q_{m,höyry} \cdot r \quad (9.)$$



jossa

$$q_{m,höyry} = 0,153 \frac{kg}{s}$$

$$r = 2417 \frac{kJ}{kg}$$

Sijoitetaan kaavaan 9.

$$\phi_{höyry} = 0,153 \frac{kg}{s} \cdot 2417 \frac{kJ}{kg} = 369,767 kW$$

Kokonaisteho

$$\phi_{sk} = \phi_1 - \phi_2 + \phi_{höyry} \quad (10.)$$

jossa

$$\phi_1 = 896,991 kW$$

$$\phi_2 = 198,876 kW$$

$$\phi_{höyry} = 369,767 kW$$

Sijoitetaan kaavaan 10.

$$\phi_{sk} = 896,991 kW - 198,876 kW + 369,767 kW = \mathbf{1067,9 kW}$$

Sopivaksi poistoilmaksi valitaan Poisto 1. Sen energiamäärä on suurempi ja sen logistinen sijainti on parempi tehdasvesisäiliötä ajatellen. Poisto 1:n savukaasu on myös puhtaampaa, vaikka sisältää sideaineita sekä kiintoainepartikkeleita. Myös suunnitelmat Leiju 1:n käyttämisestä tulevaisuudessa tehtaan lämmitykseen vaikuttaa valintaan.

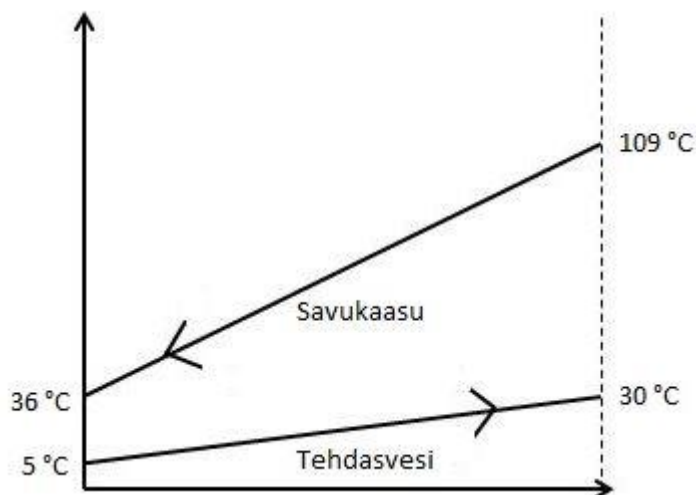
Poistopuhallin 1 käännetään 90 astetta niin, että säätöpellit saadaan paremmin asennettua (kuva 3).



Kuva 3 Poistopuhallin 1 ja savukaasun poistoputki

## 5.2 Lämmönvaihtimen tilavuusvirta

Seuraavaksi lasketaan lämmönvaihtimen tilavuusvirta. Lämmönvaihdinta ei tarvitse mitoittaa, sillä EV-Group on mitoittanut sen.



Kuva 4 Savukaasu-tehdasvesi lämpötiladiagrammi

Lämmönvaihtimen tilavuusvirta

$$\phi = q_m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q_m = \frac{\phi}{C_p \cdot \Delta T} \quad (11.)$$

jossa

$$\phi = 1163,222 \text{ kW}$$

$$C_p = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T = 73^\circ\text{C}$$

Sijoitetaan kaavaan 11.

$$q_m = \frac{1163,222 \text{ kW}}{4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot 73^\circ\text{C}} = 3,794 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

$$\text{Veden tiheys on } 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$q_v = \frac{3,794 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

### 5.3 Putken mitoitus ja painehäviöt

Mitoitetaan putki virtausnopeuden ollessa  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

$$q_v = w \cdot A$$

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot w}} \quad (12.)$$

jossa

$$q_v = 0,004 \frac{m^3}{s}$$

$$w = 1 \frac{m}{s}$$

Sijoitetaan kaavaan 12.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,004 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot 1 \frac{m}{s}}} = 0,071 m$$

Putken halkaisijan täytyy olla suurempi kuin 71 mm. Lasketaan DN 125 putken sopivuus.

$$w = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d^2} \quad (13.)$$

jossa

$$q_v = 0,004 \frac{m^3}{s}$$

$$d = 0,135 m$$

Sijoitetaan kaavaan 13.

$$w = \frac{4 \cdot 0,004 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot 0,135 m^2} = 0,265 \frac{m}{s}$$

Putkeksi valitaan DN 125, sillä sitä on tehtaalla ylimääräisenä riittävä määrä projektiin. Näin säästetään kustannuksissa. Putkien halkaisijat ovat otettu Suomen kaukolämpö ry:n internetsivujen taulukosta (15.).

Painehäviöiden laskeminen

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (14.)$$

jossa

$$\lambda = 0,03$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$d = 0,135 \text{ m}$$

$$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w = 0,265 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sijoitetaan kaavaan 14.

$$\Delta p = 0,03 \cdot \frac{1 \text{ m}}{0,135 \text{ m}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,265 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 7,8 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Käytetään lukemaa  $10 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$ . Projektissa käytetään putkea yhteensä 200 metriä, joten painehäviötä syntyy 2 000 Pa. Lisäksi LTO-patterin painehäviö on 40 205 Pa, joten kokonaispainehäviö on 42 205 Pa. Pumpun hyötysuhde on 60 %.

Pumpun teho

$$P_e = \frac{q_v \cdot \Delta P}{\eta} \quad (15.)$$

jossa

$$q_v = 0,004 \frac{m^3}{s}$$

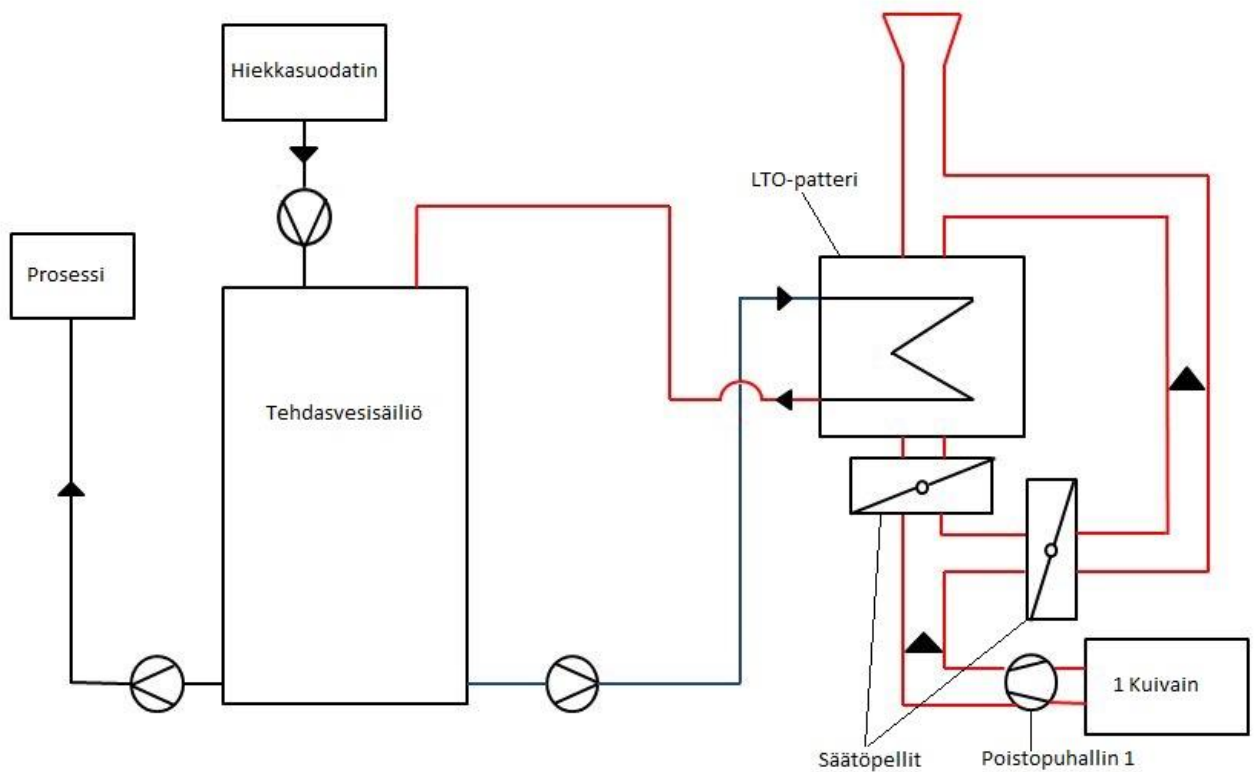
$$\Delta Pa = 42\,205 Pa$$

$$\eta = 0,60$$

Lisätään kaavaan 15.

$$P_e = \frac{0,004 \frac{m^3}{s} \cdot 42\,205 Pa}{0,60} = \mathbf{266,9 W}$$

Pumpputa projektissa käytetään Kolmeksin valmistavaa 7,5 kW pumppua (kuva 2). Pumpun teho riittää loistavasti tarpeisiin.



Kuva 5 PI-kaavio

## 6 PROJEKTIN HYÖDYT

### 6.1 Energian säästömahdollisuudet

Suurimmat energian säästöt saadaan talvisaikaan, kun jokivesi on kylmää. Silloin tehdasvesi on myös kylmää ja kylmentää samalla prosessissa tuotetta. Kylmät viirasuihkut kylmentävät myös tehdashallia, jolloin joudutaan varautumaan kaukolämpöön. Myös massavarastoa täytyy lämmitellä talvisin.

Lämmitetyllä tehdasvedelle voidaan säästää kaukolämmön tarpeessa sekä maakaasun käytössä, kun tehdashallia, sideaineen valmistuksen lämminvesisäiliöitä, pulpperia ja massavarastoa ei tarvitse lämmitellä välttämättä yhtään. Tämä säästää pitkällä aikavälillä suuria summia rahaa.

### 6.2 Projektin hinta ja takaisinmaksuaika

Projektissa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon aineistoa, joita tehtaalta löytyy. Tällä tavoin pyritään saamaan projektin investointihinta pienemmäksi.

Taulukko 3 Projektin kustannukset

Kohde	Hinta (€)
LTO-patteri	n. 50000
Putkityöt	n. 20000
Pellit	n. 3000
Kanavatyöt	n. 15000
Sähkötyöt	n. 7000
Automaatio	n. 3000
Muut	n. 2000
<b>Yhteensä</b>	<b>n. 100000</b>

Suurin kustannuserä on itse LTO-patteri, jonka hinta on noin 50 000 euroa. Energia-kustannuksissa pystytään säästämään kunnossapitopäällikkö Janne Auvisen mukaan noin 30 000 euroa vuodessa.

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{100000\text{€}}{30000 \text{ €/v}} = 3,33v \sim 1215 \text{ päivää}$$

### 6.3 Hyödyt prosessissa

Kylmät viirasuihkut viilentävät formeriosaa talvisin, jolloin prosessia joudutaan säätämään ja korjaamaan. Kun tehdasveden lämpötila on sama koko vuoden, voidaan prosessia ajaa samoilla arvoilla ilman ylimääräistä säätämistä. Tuote menee talvisinkin lämpöisenä kuivaimen ja prosessi on stabiili läpi vuoden. Tämä parantaa tuotantoa ja tuo lisätuloja yhtiölle energiansäästönä. Hyödyt prosessissa voivat olla odotettua suuremmat, mikä tekisi projektista huomattavasti kannattavamman ja takaisinmaksuaika olisi huomattavasti lyhyempi.

### 6.4 Muita lämmityksen säästömahdollisuuksia

Lasihuopakoneen kuivaimissa on yhteensä viisi poistokanavaa. Jäljelle jäävät neljä poistokanavaa voisi käyttää hyväksi tehtaan lämmittämiseen. Leiju 1:lle on suunniteltu tulevaisuudessa lämmöntalteenottoa tehtaan lämmittämiseen. Poisto 1:n savukaasujen maksimaalisen hyödyntämisen kannalta voisi tehtaan lämmitysverkkoa lämmittää ennen tehdasvettä. Tämä voisi olla tuottoisa vaihtoehto energiansäästämässä.

## 7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä havainnollistettiin kuinka hukkaan menevistä savukaasuista voidaan saada energiaa takaisin tehtaan käyttöön. Näiden savukaasujen mukana menee suuri määrä energiaa taivaalle. Tehtaan mittakaavassa pienillä investoinneilla saadaan pitkällä aikajänteellä säästettyä energiankulutuksessa paljon. Myös hyödyt prosessissa ovat suuret. Projektin takaisinmaksuaika ja kustannukset eivät ole mittavat, sillä tehtaalta löytyvää laitteistoa voidaan käyttää hyödyksi.

Hyötyjen määrä ja laajuus saadaan selville laitteiston käyttöönoton jälkeen. Tuloksia voidaan vertailla jo vuoden käytön jälkeen. Lisähyötyjä voidaan saada investoimalla lämmöntalteenottoon myös muissa poistoilmojen kohdalla. Haasteena voidaan pitää LTO-patterin puhtaus, sillä savukaasu pitää sisällään sideainetta ja kiintoainepartikkeleita.

Opinnäytetyön vaativin osuus oli laskutoimitukset, jotka olivat iso osa työtä. Näissä laskuissa koulussa opitut taidot ja opettajien neuvot olivat tarpeen. Prosessin kokonaisuuden ymmärtämistä auttoi oma työkokemus teollisuuden alalta sekä kunnossapito-



päällikkö Janne Auvinen. Opin paljon uutta tehdasprosessin laajuudesta sekä lämmön talteenottamisesta savukaasuista. Uskon, että tämä työ antoi minulle paljon hyödyllistä näkemystä ja tietoa lämmöntalteenotosta ja tehdasprosesseista, jotka ovat tärkeitä tulevaisuudessa ammatissani.

## LÄHTEET

1. Ahlstrom history since 1851. 2009. Ahlstrom Corp. Saatavissa: <http://www.ahlstrom.com/Static/flash/history/> [viitattu 9.12.2014]
2. Hovin historia. 2007. Next Hotels Finland Oy. Saatavissa: <http://www.nexthotels.fi/kartanomme/karhulanhovi/faktat/historia/> [viitattu 9.12.2014]
3. Oksanen H., 2007. Karhulan teollistuminen. Töölöstä Oy/Mediacenter Oy. Saatavissa: <http://www.karhulanteollistuminen.fi/>, 1914-1938 [viitattu 9.12.2014]
4. Alava, P. 1988. Sunila, metsäjättien yhtiö. Sunila Oy 1938–1988, s. 53–57. Gummerus 1988
5. Oksanen H., 2007. Karhulan teollistuminen. Töölöstä Oy/Mediacenter Oy. Saatavissa: <http://www.karhulanteollistuminen.fi/>, 1953-1969 [viitattu 9.12.2014]
6. Oksanen H., 2007. Karhulan teollistuminen. Töölöstä Oy/Mediacenter Oy. Saatavissa: <http://www.karhulanteollistuminen.fi/>, 1970-2007 [viitattu 9.12.2014]
7. 4m lasihuopalinja. 2007. PowerPoint-tiedosto. Ahlstrom Glassfibre Oy [vain sisäiseen käyttöön]
8. Plate heat exchangers for energy conservation. 2013. Engineer Live. Saatavissa: <http://www.engineerlive.com/content/22778> [viitattu 9.12.2014]
9. Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H. 2000. Höyrykattilateknikka. 5., uusittu painos, s. 201–208. Edita. Helsinki.
10. Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet. 2014. ViFlow Finland Oy. Saatavissa: <http://www.viflow.fi/uploads/tiivisteelliset.pdf> [viitattu 9.12.2014]

11. Effectively Desing Shell-and-Tube Heat Exchangers. 1998. Chemical Engineering Progress. Saatavissa: <http://www-unix.ecs.umass.edu/~rlaurenc/Courses/che333/Reference/exchanger.pdf> [viitattu 9.12.2014]
12. Alfa Laval spiral heat exchangers. 2010. Alfa Laval. Saatavissa: [http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/spiral-heat-exchanger/\\_layouts/horizon/document.aspx?lid=6a5b2444-87c2-4189-9ed6-3e3760de0629&iid={104CBD15-EE6B-4D4D-8D74-4BFBF9AB0A18}&fid=c29e077d-f466-4d8e-8bbe-72b66c5f205c](http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/spiral-heat-exchanger/_layouts/horizon/document.aspx?lid=6a5b2444-87c2-4189-9ed6-3e3760de0629&iid={104CBD15-EE6B-4D4D-8D74-4BFBF9AB0A18}&fid=c29e077d-f466-4d8e-8bbe-72b66c5f205c) [viitattu 9.12.2014]
13. EV Heat Recovery. 2014. Paperiesite. EV-Group Oy.
14. Bergman T., DeWitt D., Incropera F., Lavine A. 2007. Fundamentals of Heat and Mass transfer, s. 941–945. John Wiley & Sons. New York.
15. Kaukolämpöjohdoissa käytettävät teräsputket ja teräskäyrät. 2003. Suomen Kaukolämpö ry. Saatavissa: <http://www.planora.fi/tiedostot/L7.pdf>, Taulukko 1 [viitattu 8.1.2015]

## Kyamkin päästömittausraportti 28.8.2013 s.6

Ahlstrom Glassfibre Oy  
PL 18  
48601 KARHULA

Päästömittausraportti  
28.8.2013  
2513A

Sivu 6/7

Selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopiointista on saatava kirjallinen lupa testauslaboratoriolta.

## 8.1 SAVUKAASUVIRTA

Kaasuvirtamittaus suoritettiin kiintoainemittausten yhteydessä. Kaasun keskimääräinen dynaaminen paine, mitattu nopeus sekä savukaasuvirta ilmenevät seuraavasta taulukosta.

Taulukko 6. Poistokaasun kosteus mittaustulokset huopakoneelta

Kohde	Poistokaasun lämpötila °C	Poistokaasun kosteus %	Poistokaasun keskimääräinen nopeus m/s	Poistokaasuvirtaus (kuiva) m <sup>3</sup> (n)/s	Poistokaasuvirtaus (kosteaa) m <sup>3</sup> /s
Poisto 1	109,0	11,2	16,5	3,7	5,1
Poisto 2	147,5	9,2	11,1	2,2	3,4
Kuivain 2	145,0	4,3	5,5	0,9	1,3
Leiju 1	155,9	4,4	17,8	4,4	6,8
Leiju 2	195,9	4,3	13,1	2,3	3,9
Käryn poisto	81,8	4,3	17,1	1,1	1,4

## 9. MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

Mittauksia voidaan pitää onnistuneena

## 9.1 MITTAUKSIEN AIKANA ESIINTYNEITÄ ONGELMIA

Mittauskohteissa ei esiintynyt mitään tuloksiin vaikuttavia ongelmia.

## 9.2 MITTAUSEPÄVARMUUS

Mittauksen kokonaisepävarmuus lasketaan tarkoitukseen laadituilla ja valitoiduilla Excel-työkirjoilla. Virhetarkastelu suoritetaan todennäköisyyslaskentaan perustuen. Päästöjen laskennassa käytettävät kaavat on linearisoitu, jotta virheet, jotka oletetaan riippumattomiksi satunnaismuuttujiksi, voidaan yhdistää. Kaikki käytettävät virheet edustavat 95 %:n luottamusväliä.

Mittausepävarmuuden laskennassa on huomioitu

- näytteenoton virhe (näytteen edustavuus)
- kalibrointikaasujen epätarkkuus
- analysaattorien epätarkkuus
- savukaasun kosteuden määrittelyn epävarmuus
- savukaasun tiheyden määrittelyn epävarmuus