

Vähäsalo Tuomo

**TÄRKKELYKSEN FLASH-KUIVAUS JA SÄÄSTÖJEN  
KARTOITUS**

# **TÄRKKELYKSEN FLASH-KUIVAUS JA SÄÄSTÖJEN KARTOITUS**

Tuomo Vähäsalo  
Opinnäytetyö  
Kevät 2019  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikka, suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä(t): Tuomo Vähäsalo  
Opinnäytetyön nimi: Tärkkelyksen flash-kuivaus ja säästöjen kartoitus  
Työn ohjaaja(t): Jukka Ylikunnari, Janne Vähämäki  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2019  
Sivumäärä: 38 + 1 liitettä

---

Työssä tutkitaan Chemigate Oy:n erään flash-tyyppisen kuivurin toimintaa ja sen energian käyttöä. Tavoitteena on analysoida kuivurin energiankäyttöä ja tutkia mahdollisia energiansäästöratkaisuja.

Työn alkuvaiheessa keskityttiin kuivaamisen yleiskatsaukseen. Tämän jälkeen haettiin tarvittavaa dataa mittausten ja tallenteiden avulla lopuksi suoritettavan teoreettisen analyysin vertailupohjaksi. Pohjatietoa kuivaukseen liittyen löytyi kirjallisuudesta ja laitokselta. Käytännön mittaukset kuivurilla suoritettiin siinä määrin mitä on mahdollista mitata. Tuloksia saatiin myös aiemmista suoritetuista mittauksista ja osa mitta-arvoista saatiin suoraan digitaalisesta arkistosta. Ajan ja resurssien puitteissa ei alettu tutkimaan mahdollisia korkean budjetin energiansäästöratkaisuja. Projektin etenemistä hidasti hieman eräiden mittatulojen huono saatavuus.

Lopputuloksista voidaan päätellä, että laitos toimii energiankäytön kannalta hyvin. Polttoainehäviöt ovat kahdenkymmenen prosentin luokkaa optimitilanteeseen verrattuna. Lämmöntalteenotto toimii ja sen tehokkuutta voidaan mahdollisesti parantaa puhdistamalla glykoli-vesikiertoputkistot. Lisäksi lämmöntalteenotto saattaa toimia aiemmin oletettua tehokkaammin.

---

Asiasanat: flash-kuivain, lämmönsiirto, nestekaasu

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Energy engineering, option

---

Author(s): Tuomo Vähäsalo

Title of thesis: Flash drying of starch and savings survey (headline translated)

Supervisor(s): Jukka Ylikunnari, Janne Vähämäki

Term and year when the thesis was submitted: autumn 2019

Pages: 38 + 1 appendices

---

The work investigates the operation of Chemigate Oy's flash-type dryer and its energy use. The goal is to analyse the energy usage of the dryer and to investigate potential energy saving methods.

At the start the main focus was the general overview of drying. After this the necessary data was collected by measuring and from the databanks available for the comparison of theoretical and practical results.

Basic information about drying was found in the literature and from the factory itself. Practical measurements about the dryer were made to the extent that could be done. Some data was also obtained from previously performed measurements and some of the measured values were obtained directly from the digital archive. Within the time window and resources, no exploration of possible high-budget energy-saving solutions were undertaken. The progress of the project was slowed down a bit by the difficulty of accessing some measurement results.

As a result, the plant performs quite well in terms of energy use. Fuel losses are in the order of twenty percent compared to the optimum. Heat recovery works and its efficiency can possibly be improved by cleaning glycol water circuits. In addition, heat recovery may work more efficiently than previously expected.

---

Keywords: flash dryer, heat transfer, liquid gas

## **ALKULAUSE**

Tämä opinnäytetyö on tehty Chemigate Oy:lle. Työn tilaajan edustajana toimi Harri Heikkinen, tilaajan puolesta ohjaavana henkilönä Janne Vähämäki, ohjaavana opettajana Jukka Ylikunnari ja kieltenohjaajana Pirjo Partanen. Kiitokset työn aiheen tarjoamisesta kuuluvat Chemigate Oy:lle, Harri Heikkiselle, Mika Vuokilalle ja työn valmistumisesta kaikille yllä mainituille henkilöille.

Oulussa 23.11.2019

Tuomo Vähäsalo

# SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ   | 3  |
| ABSTRACT  | 4  |
| SISÄLLYS  | 6  |
| 1 JOHDANTO  | 7  |
| 2 KUIVAUSPROSESSIN TEORIAA  | 9  |
| 2.1 Kuivausprosessi   | 9  |
| 2.2 Flash- kuivaus  | 10 |
| 2.3 Nestekaasun palaminen   | 11 |
| 2.4 Lämmönsiirrin   | 14 |
| 3 KUIVURI 1:N TUTKIMUS  | 15 |
| 3.1 Prosessimittaukset  | 16 |
| 3.2 Säästökohteiden kartoitus   | 18 |
| 3.3 Palamisprosessin ominaisuudet ja optimointi                       | 19 |
| 3.4 Leijuilma   | 21 |
| 3.5 Lämmöntalteenoton optimointi                                      | 21 |
| 3.6 Lämmönsiirtoputkiston puhdistus                                   | 22 |
| 3.7 Mittaukset  | 23 |
| 3.7.1 Ilmavirtaus   | 24 |
| 3.7.2 Nestekaasulinja   | 24 |
| 3.7.3 Prosessoitavan tuotteen mittaukset                              | 25 |
| 3.8 Larox-painesuodatuksen vaikutus                                   | 26 |
| 3.9 Sähkölaitteiden vaikutus  | 28 |
| 4 PROSESSILASKELMAT   | 29 |
| 4.1 Tarvittava polttoainemäärä ajon aikana                            | 29 |
| 4.2 Nestekaasun polton loppulämpötila                                 | 31 |
| 4.3 Nestekaasun massavirta  | 32 |
| 4.4 Lämmöntalteenoton laskelmat                                       | 33 |
| 4.5 Häviöiden arvio teoreettiseen polttoaineen kulutukseen verrattuna | 36 |
| 5 YHTEENVETO  | 37 |
| LÄHTEET   | 38 |

# 1 JOHDANTO

Tehtävänä oli tarkastella Chemigate Oy:n tärkkelyksenkäsittelylaitoksen märkäprosessin kuivuriin liittyvää energiankulutusta. Lisäksi tarkoituksena oli kehittää prosessiin energiansäästöratkaisuja, mikäli sellaiset olisivat realistisesti toteutettavissa. Kyseinen tehdas sijaitsee Lapualla, Etelä-Pohjanmaalla.

Tarkoituksena ei ollut etsiä korkeamman budjetin energiansäästöratkaisuja, vaan enneminkin selvittää, voiko joillakin varsin pienillä muutoksilla parantaa systeemin hyötysuhdetta ja taloudellista kannattavuutta. Mahdollisia energiansäästökohteita kuivausprosessissa ovat sähkön käyttöön liittyvät muutokset (leijuilman ja polttoilman puhaltimet), kuivurin lämmöntalteenottosysteemi sekä leijuilman lämmittämiseen käytettävän polttimen optimointi (nestekaasun määrä/ilmakerroin). On hyvä tarkastella myös systeemin eristystä tai sen puutteesta aiheutuvaa lämpöenergiähukkaa.

Lisäksi tehtävänä oli laatia prosessilaskutyökaluja, joita hyödynnettiin opinnäytetyön tutkimuksessa ja joita toimeksiantaja voi halutessaan hyödyntää myös jatkossa.

Chemigate Oy valmistaa muunneltuja tärkkelyksiä teknisiin sovelluksiin, sekä valmistaa ja myy tärkkelyspohjaisia kationisia liuospolymeerejä. Yhtiö on suomalainen ja muunneltujen tärkkelysten osalta markkina-alueena on Suomi, Ruotsi ja läntinen Venäjä. Muita tuotteita myydään myös Eurooppaan ja Aasiaan. (1, s. 5.)

Raisio Chemicals perusti vuonna 1979 Oy Kationi Ab:n Lapualle, jossa aloitettiin muunneltujen tärkkelyksien valmistus. Raisio Chemicals kehitti 1980-luvulla laajan valikoiman erilaisia tärkkelyspohjaisia tuotteita ja ratkaisuja. Kehitystyö oli voimakasta ja yhteistyö paperi- ja kartonkiteollisuuden kanssa oli hyvin tiivistä. (1, s. 5.)

Raisio Chemicalsin omistus on vaihtunut vuosien mittaan. Omistajia ovat olleet ensin Ciba ja tämän jälkeen BASF. BASF päätti lopettaa tärkkelysliiketoiminnan

vuonna 2009 ja Chemigate perustettiin vuonna 2010 silloisen johtoryhmän päätyessä ostamaan koko tärkkelyksen liiketoiminta-alueen. (1, s. 5.)



## 2 KUIVAUSPROSESSIN TEORIAA

Tässä työssä tarkastellaan tärkkelyksen flash-kuivausta. Tärkkelyksen kuivaus on oleellista, jotta tilaaja saa sopivan kosteuden omaavaa tärkkäkituotetta haluamaansa käyttötarkoitukseen. Tärkkäkituotteen haluttu laatu ja kuiva-ainepitoisuus vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Lisäksi muunneltuja tärkkelyksiä tuotetaan eri raaka-aineista mm. peruna ja ohra. Muunneltuja tärkkelyksiä käytetään esimerkiksi paperiteollisuudessa.

Luvussa tarkastellaan tärkein kuivauksen pohjustavaa tietoa ja teoriaa. Aiheet käsittelevät prosessin eri osa-alueita.

### 2.1 Kuivausprosessi

Kuivaus on erittäin energiantensiivinen prosessi, jonka osuus teollisuusenergian kokonaiskäytöstä on 10–20 % useimmissa kehittyneissä maissa. Tämä johtuu suuresta energiantarpeesta, mikä tarvitaan haihtumiseen veden tai muun liuottimen poistamiseksi. Näin ollen on olemassa selkeitä kannustimia energiankulutuksen vähentämiseksi kuivausmenetelmissä: fossiilisten polttoaineiden luonnonvarojen säilyttäminen, hiilijalanjäljen vähentäminen ja ilmastonmuutoksen torjuminen sekä prosessien taloudellisen kehityksen parantaminen, mutta tämä on hankala toteuttaa todellisten termodynaamisten haasteiden edessä. (2, s. 1.)

Nykyisen energiankäytön tehokas analysointi on elintärkeä askel säästämissä mahdollisuuksien tunnistamisessa. Kuivurin energiantarpeen alaraja saadaan laskemalla poistettavan veden määrän tarvitsema haihtumisen energia (lisää aiheesta osiossa 5 Laskut). Tämä osoittaa, kuinka paljon energiaa luonnostaan tarvitaan, ja vertaamalla nykyiseen mitattuun energiankäyttöön, mitä mahdollisuuksia energiankulutuksen vähentämiseksi on. (2, s. 1.)

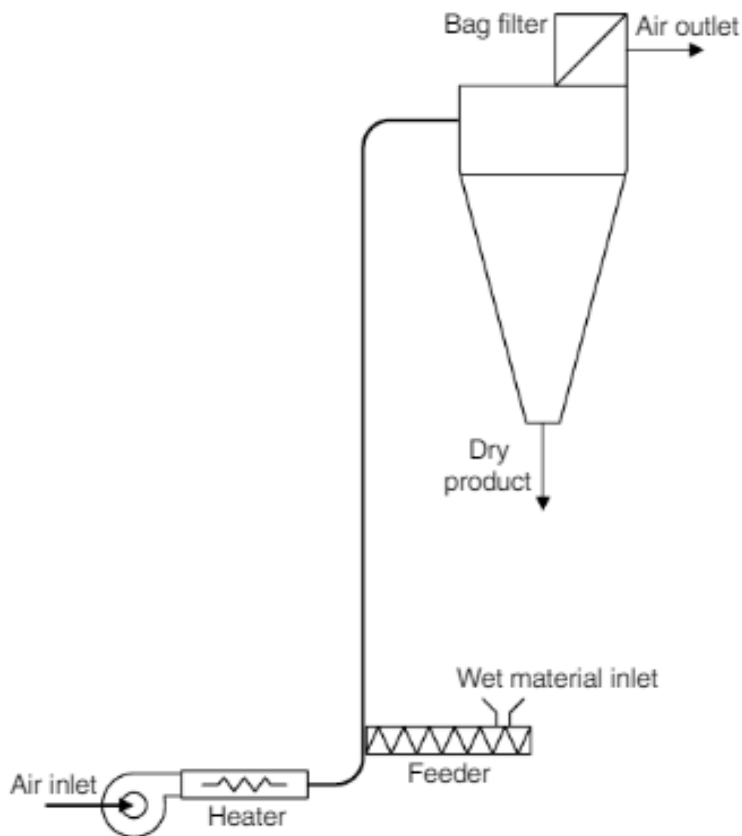
Mahdolliset toimenpiteet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- 1) vähentämällä haihdutuskuormaa - esimerkiksi poistamalla vettä prosessin il-mavirrasta kosteuden vähentämiseksi tai välttämällä ylikuivausta
- 2) lisäämällä kuivaimen tehokkuutta - esimerkiksi parantamalla systeemin eris-tystä ja täten vähentämällä lämpöhäviöitä, lämmön talteenotolla tai optimoimalla prosessia käyttöparametrien säädöillä
- 3) parantamalla energiantuottojärjestelmää - esimerkiksi lisäämällä kattilan te-hokkuutta tai käyttämällä yhdistettyä lämmön ja sähkön (CHP), lämpöpump-puta, jätteenpolttamista tai muita vaihtoehtoisia edullisia polttoaineita. (2, s. 1.)

## **2.2 Flash- kuivaus**

Kuivaus on energiatekninen prosessi. Siksi sitä voidaan tarkastella termodyna-miikan säännöin ja muodostaa energiataaseita. Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö toteaa, että energian määrä adiabaattisessa systeemissä säilyy va-kiona, vaikkakin se voi muuttaa muotoaan.

Flash-kuivaus on yksi yleisimmin käytetyistä kuivatusjärjestelmistä ja se tunne-taan myös nimellä pneumaattinen kuivaus. Flash-kuivurit ovat yleisimmin suo-ran kuivauksen yksiköitä, joissa kuivausprosessi perustuu konvektiiviseen läm-mönsiirtoon. Pneumaattiset- tai flash-kuivurit voidaan luokitella yhtä aikaa kaa-sua ja kiinteää ainetta kuljettaviksi järjestelmiksi, joille on tunnusomaista jatkuva konvektiivinen lämmön- ja massansiirtoprosessi. Kuuma ilma, joka on tuotettu epäsuoran lämmityksen tai suoraan liekin avulla, on yleisin kuivausväliaine näissä järjestelmissä. Suorassa flash-kuivurissa kaasuvirta kuljettaa kiinteät hiukkaset järjestelmän läpi ja se on välittömässä kosketuksessa kuivattavan materiaalin kanssa. Tämä kaasuvirta (kuivattava väliaine) toimittaa myös kui-vaamiseen tarvittavaa lämpöä ja kuljettaa pois haihtuneen kosteuden. Joissain tapauksissa väliaineena voidaan käyttää myös tulistettua höyryä, joka voi nos-taa systeemin hyötysuhdetta. (Kuva 1.) (3, s. 397.)



*KUVA 1 Yksinkertainen Flash-kuivaussysteemi (3, s. 398)*

Suuri lämmön- ja massansiirtopinta-ala sekä suuret konvektiiviset lämpö- ja massansiirtokertoimet mahdollistavat korkean kuivausnopeuden ja sen seurauksena tehokkaan kuivauksen. Kuivattavien hiukkasten koko on yleensä välillä 10–500  $\mu\text{m}$ . Yksi tämän tyyppisten kuivureiden ominaisuuksista on suhteellisen lyhyt kosketusaika kuumen ilman ja hiukkasmaisten materiaalien välillä (0,5-10 s). Tämän takia kuivattavan materiaalin lämpötila pysyy alhaisena kuivausprosessissa. (3, s. 397.)

### 2.3 Nestekaasun palaminen

Nestekaasuna käytetään kaasua, mikä sisältää 80 % propaania ja 20 % butaania. Se säilötään nestemuodossa säiliöön (kuva 2), josta se putkea pitkin tuodaan kaasun höyrystimelle. Höyrystimeltä kaasu siirtyy mittarin läpi polttimeen, jossa se palaa.



*KUVA 2 Maanalainen nestekaasusäiliö*

Lämpöarvolla tarkoitetaan energiamäärää, joka on sidonnaisena kemiallisessa muodossa polttoaineessa. Polttoaineen palaessa täydellisesti kyseinen kemiallinen energia vapautuu lämpönä.

Yleisistä lämpöarvostandardeista Euroopassa käytetään yleensä tehollista lämpöarvoa, josta on vähennetty syntyvän veden höyrystymiseen kuluva energia. Tätä höyrystymisenergiaa ei yleensä saada hyötykäyttöön, joten se jätetään pois lämpöarvosta.

Ilmakerroin tarkoittaa stökiometrisen palamisen ilmamäärän ja todellisen ilmamäärän välistä suhdetta. (Kaava 1.)

$$\lambda = \frac{n_i}{n_{ist}}$$

KAAVA 1

$\lambda$  = ilmakerroin

$n_i$  = todellinen ilmamäärä

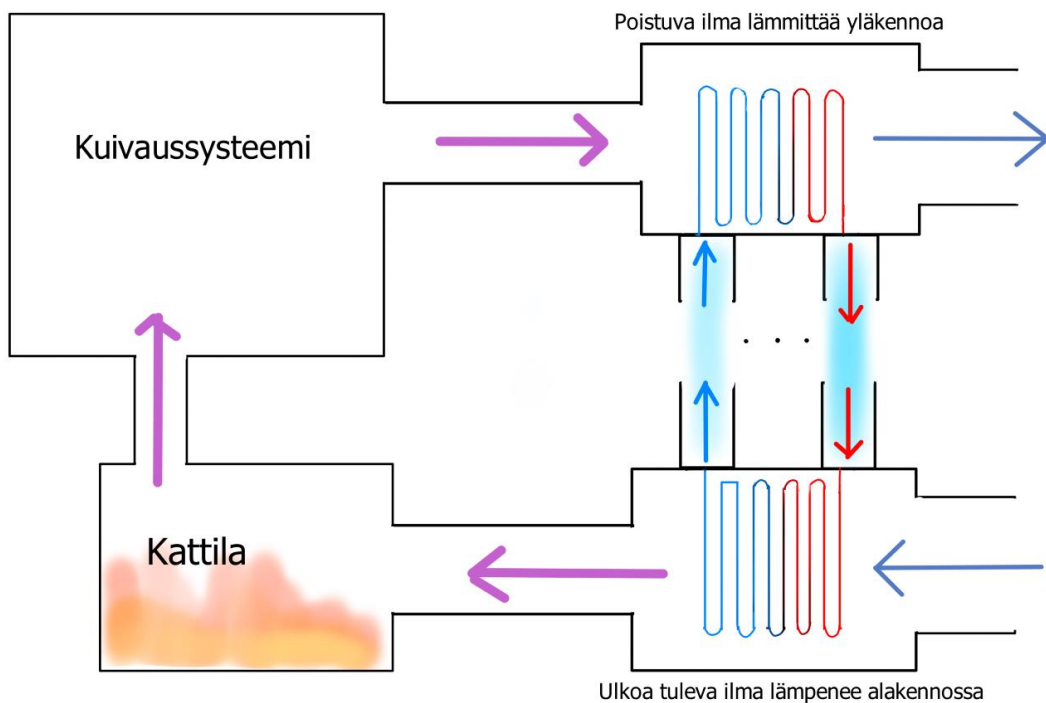
$n_{ist}$  = stökiometrinen ilmamäärä

Jos ilmakerroin on yksi, ilmaa on teoreettisesti sen verran, että kaikki kaasu palaa, mutta jäännöshappea ei jää savukaasuun. Todellisessa tilanteessa kuitenkin kaasujen kunnollisen sekoittumisen takia on tärkeää, että ilmakerroin on tarpeeksi paljon suurempi kuin yksi. Ilmakertoimen ollessa taas alle yksi kaikki polttoaine ei pala täydellisesti, koska happea ei ole riittävästi. Hiilimonoksidin muodostuminen on mahdollista.

Opinnäytetyön kuivurissa nestekaasun palaessa polttoilman kanssa siihen sekoittuu myös puhaltimilta tuleva kokonaisilmavirtaus. Lämpötila lasketaan matalammaksi stökiometrisen palamisen lämpötilasta. Tätä lämpötilaa kutsutaan kuivurin alalämpötilaksi.

## 2.4 Lämmönsiirrin

Poistuvasta ilmasta otetaan lämpöä talteen glykolikiertoisella lämmöntalteenotusysteemillä. Se on käytännössä lämmönsiirtokenno leijuilmakierron loppuosassa. Putkessa kiertävä vesi-glykoliseos sitoo itseensä lämpöenergiaa ja kuljettaa sen leijuilmakierron alkupäässä sijaitsevalle lämmönsiirtokennolle. Näin saadaan siirrettyä hukkaan menevää lämpöä prosessin lopusta alkuun ja vähennetään energiahävikkiä. (Kuva 3.)

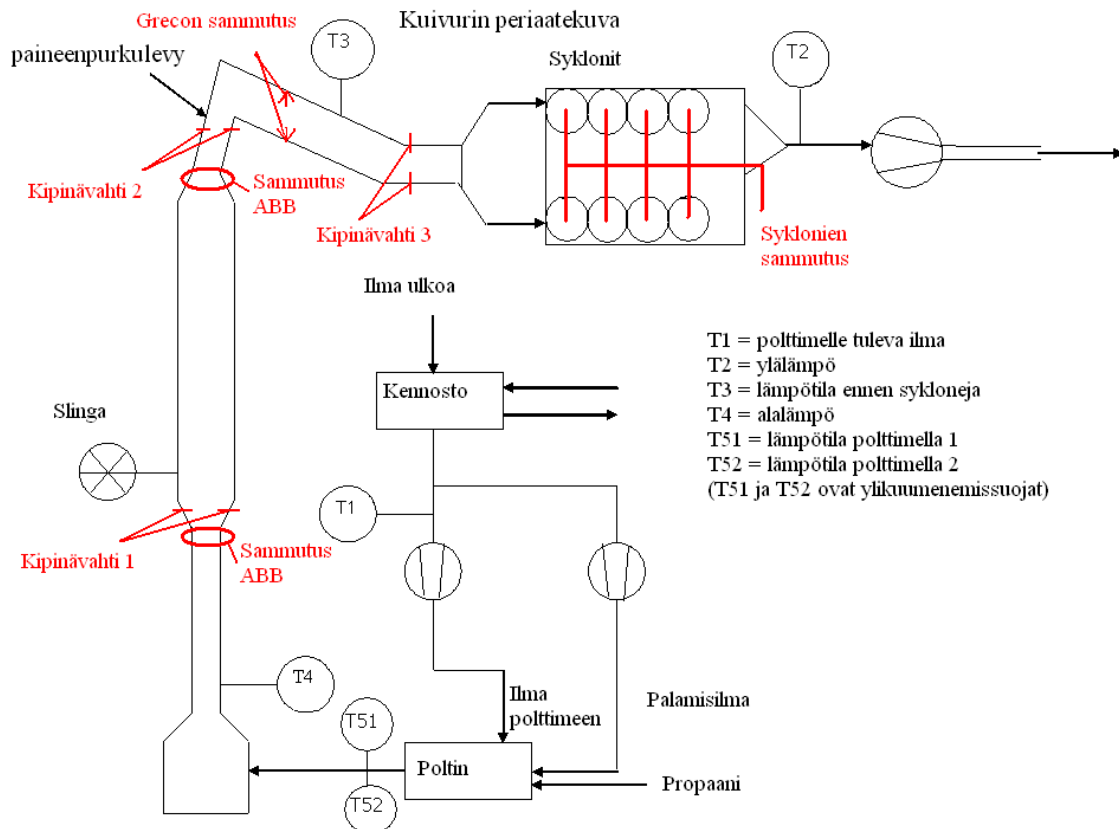


KUVA 3 Yksinkertaistettu kuva lämmöntalteenoton toiminnasta

Lämmönsiirron tehokkuus riippuu lämmönsiirrinaineen lämpötilasta, massavirrasta, ominaislämpökapasiteetista ja putkiston lämmönsiirron pinta-alasta. Putkiston kohdissa, joissa ei ole tarvetta lämmönsiirtoon, lämpöhäviöitä vähennetään eristyksellä. Lämpötilaeron eli asteisuuden kasvaessa lämmönsiirtimen alku- ja loppupäässä paranee myös lämmönsiirtimen tehokkuus.

### 3 KUIVURI 1:N TUTKIMUS

Seuraavassa osiossa käsitellään Kuivuri 1:n toimintaperiaatetta ja Kuivuri 1:llä tehtyjä mittauksia. Kuvassa 4 esitellään Kuivuri 1:n prosessi yksinkertaisesti.



KUVA 4 Kuivuri 1:n yksinkertainen prosessikuva (4, s. 14.)

Kuivuriin tuleva ilma imetään ulkoa sähkömoottoreilla toimivien puhaltimien avulla. Ensiksi tämä ilma liikkuu lämmönsiirron lämmityskennon läpi, missä se lämpenee parantaen systeemin hyötysuhdetta. Ilma haarautuu kahteen putkeen, joista toinen on palamisilman syöttö ja toisesta loput leijuilmasta liittyy virtaukseen. Polttimelle syötettävä nestekaasu palaa ilman sekoittuessa siihen, ja savukaasu virtaa eteenpäin putkea pitkin. Kuivattavan aineen syöttöjärjestelmä (slinga) syöttää märkää tärkkituotetta putkeen, jossa se sekoittuu savukaasun

kanssa ja liikkuu sen mukana ylöspäin kohti sykloneja. Tässä vaiheessa kuivatava aine kuivuu ja vettä siirtyy savukaasuvirtaukseen. Sykloneissa kuivattu aine erottuu savukaasuvirrasta. Kuivatava aine kerätään syklonien pohjalta ja savukaasu virtaa eteenpäin syklonien yläosasta. Systemin loppupäässä oleva puhallin puhalttaa savukaasun lämmöntalteenoton jäähdyttävän kennon läpi ja sen kautta ulos.

### **3.1 Prosessimittaukset**

Laskettaessa energiatasearviota täytyy saada tietää mahdollisimman paikkansa pitäviä arvoja kyseessä olevan systemin eri kohdista. Ne voidaan joutua mittaamaan manuaalisesti, mutta useimmiten arvot ovat saatavilla valvomon mittausjärjestelmästä.

Laitoksessa prosessin eri kohdissa on sijoitettuna mittareita ja muita laitteita. Ne mittaavat reaaliaikaisesti suureita prosessin eri kohdissa ja vievät informaation valvomoon. Suurin osa näistä tiedoista (mittariarvot yms.) tallentuu digitaalisena arkistoon. Tallennettuja tietoja on mahdollista tutkia millä tahansa aikavälillä mittalaitteiston ollessa toimintavalmiudessa. Systemissä on kuitenkin joitain tietoja, jotka eivät tallennu digitaalisesti. Niistä kerrotaan lisää kohdassa 4.6 Mittaukset.

Kuten mainittuna, ajodataa voi siis tarkastella halutulla aikavälillä. Ajolla tarkoitetaan ajanjaksoa ja siihen liittyviä tapahtumia prosessin käynnistyksen ja alasajon välillä. Yhden ajon kesto riippuu lähinnä kuivatavan aine-erän suuruudesta ja tuotteen kosteudesta kuivauksen alussa ja lopussa. Opinnäytetyön esimerkkilaskelmat on tehty yksittäisten ajojen perusteella, aikavälillä kun ajo alkaa ja kun se loppuu. Polttoaineen kulutuksen seuranta perustuu keskiarvoon eikä siitä ole saatavilla reaaliaikaista lukemaa.

Työn aikana laadittiin lomake, johon täytetään Kuivuri 1:n prosessin lukemia ajojen ajalta. Ylös otettavat lukemat ovat pääasiassa niitä, jotka eivät tallennu digitaalisesti vaan täytyy ottaa ylös manuaalisesti. Näitä lukemia käytetään laskelmien pohjatietona digitaalisen ajotietokannan lukemien lisäksi. (Taulukko 1.)



TAULUKKO 1 Ajotietolomakkeeseen täytettyjä lukemia ajokohtaisesti

|   | 1.       | 2.       | 3.            | 4.            | 5.       |
|---|----------|----------|---------------|---------------|----------|
| Tuote                                     | 145      | 135      | 145           | 23151         | 23151    |
| Larox- kap %                              | 60,8     |          | 61,2          |               |          |
| Lopputuotteen<br>kuiva-aine %             | 82,4     |          | 82,4          |               |          |
| Laroxilta tulevan aineen läm-<br>pötila   | 27,2     | 28,4     | 26,5          | 27,2          | 29       |
| Kuivurilta tulevan aineen<br>lämpötila    | 41,0     | 41,0     | 43,0          | 46            | 39       |
| Polttoainemittarin lukema<br>ajon alussa  | 456349,0 | 456726,3 | 457627,7      | 458321,6      | 458840,3 |
| Polttoainemittarin lukema<br>ajon lopussa | 456726,3 | 457627,7 | 458321,6      | 458653,3      |          |
| Erotus/kulunut<br>polttoaine              | 377,3    | 901,4    | 693,9         | 331,7         | 458840,3 |
| Aloituskellon-<br>aika/pvm.               | 15:28    | 7:05     | 17:20         | 22:21         |          |
| Lopetuskellon-<br>aika/pvm.               | 5:50     |          | 21:21         | 11:23:00      | 20:30    |
| Päivämäärä                                | 8.8-9.8  | 9.elo    | 12.8-<br>13.8 | 13.8-<br>14.8 | 14.elo   |

Oleellisimmat tiedot ovat kuiva-ainepitoisuudet ja polttoaineen kulutus. Polttoai-  
neen kulutuksen lukemaa käytetään keskimääräisesti ajon keston ajalta ener-  
giataseen muodostamiseen ja energiankäytön hahmottamiseen.

### 3.2 Säästökohteiden kartoitus

Opinnäytetyön alussa ja myöhemminkin mietittiin, missä ja miten säästöratkaisut löytyvät. Energiataseen tutkiminen on oleellista tässä. Kuivaustekniikan kirjoista oli apua. Sieltä löytyi esimerkkejä yleisimmistä kohteista, joissa energiahäviöitä tapahtuu.

Suurin osa lämpöhäviöistä näyttäisi tapahtuvan prosessin putkien läpi johtamalla. Tämä tietysti lämmittää tehdashallia, mutta esimerkiksi kesäaikaan voisi olettaa hallin lämmityksen olevan energiahukkaa.

Laitosrakennuksen seinämistä ulos johtuva lämpö on energiahukkaa. Tämän tutkiminen rajattiin pois opinnäytetyöstä.

Prosessin putket on eristetty melkein täysin prosessin loppupuolella sijaitseviin sykloneihin asti.

Lämpöenergiaa poistuu myös tietysti savukaasun mukana ulos ja tästä lämmöstä otetaan talteen se mitä lämmöntalteenotolla saadaan.

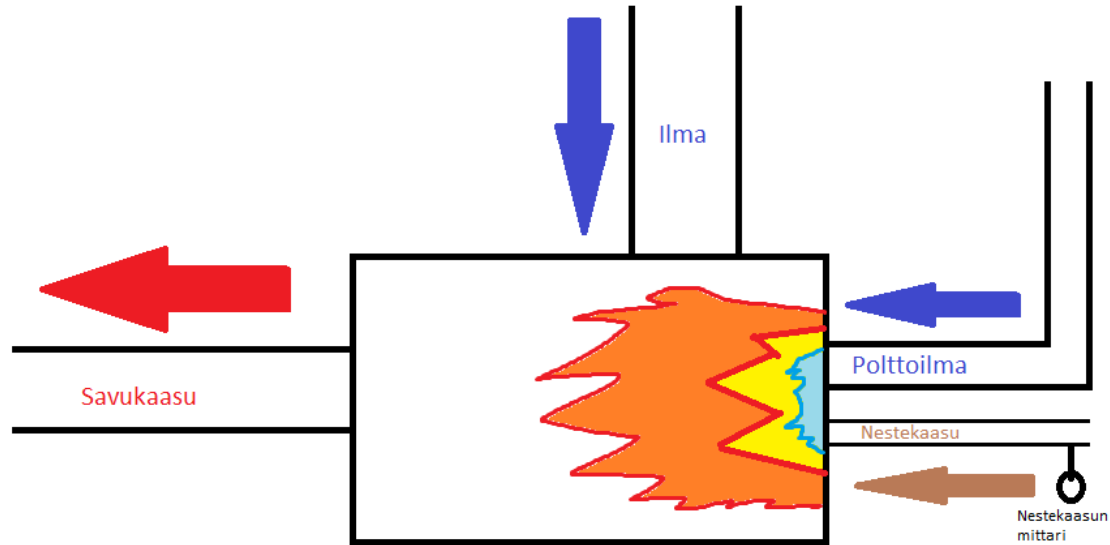
### 3.3 Palamisprosessin ominaisuudet ja optimointi

Kuivausprosessiin tarvittava lämpöenergia saadaan aikaiseksi kuivurissa neste-  
kaasupolttimella. Kuvassa 5 on Kuivuri 1:n kaasupoltin ja kattila ulkopuolelta.



KUVA 5 Kaasupoltin ja kattila

Nestekaasu tuodaan polttimelle nestekaasulinjaa pitkin. Nestekaasun kulutusta tarkkaillaan linjassa olevasta mekaanisesta mittarista ottamalla lukema ylös ennen käynnistystä ja ajon jälkeen. Mittari antaa lukeman muodossa kuutiometriä tunnissa. (Kuva 6.)



*KUVA 6 Yksinkertaistettu kuva nestekaasukattilasta*

Digitaalinen mittari Kuivuri 1:lla voisi olla eduksi; tällöin olisi saatavilla reaaliaikaista dataa kaasun kulutuksesta sähköisessä muodossa.

Laitoksessa on olemassa digitaalinen mittari, joka mittaa nestekaasun kokonaiskulutusta koko laitoksen alueella, mutta yksittäisen kuivurin kaasunkulutuksen seuraaminen kyseisellä mittarilla on hankalaa muiden prosessien kaasunkulutuksen takia.

Prosessin ilmakerroin on käytännössä erittäin suuri, koska kattilaan tuodaan lämmitettävä leijuilma palamisen silti ollessa käynnissä. Leijuilmavirtauksen suuruus on huomattavasti suurempi kuin polttoainevirta kattilaan. Suuren leijuilmavirtauksen avulla mitattava alalämpö säädetään tarpeeksi matalaksi.

Kuivurin korkein sallittu kuivauslämpötila on 150 °C. Alalämmön hälytysraja H1 on asetettu 155 °C:seen ja alasajolämpötila H2 160 °C:seen. Tämän lämpötilan ylittyessä automaatiojärjestelmä ajaa kuivurin hallitusti alas. (4, s. 1.)

Prosessin tehokkuuteen voidaan vaikuttaa ylä- ja alalämpötilaa säätämällä. Näitä säätöjä voidaan joutua tekemään myös eri tuotteiden ajo-ominaisuuksien poikkeavuuden takia.

### **3.4 Leijuilma**

Kuivaimeen ja sieltä ulos puhalletaan ilmaa kahden puhaltimen avulla. Ilmavirta on varsin suuri muihin prosessin virtoihin verrattuna. Tämä ulkoa tuleva leijuilma lämpenee ensin lämmöntalteenoton lämmityskennossa ja sieltä se etenee poltinkattilaan. Polttimessa pieni osa ilmasta puhalletaan suoraan liekkiin paloilmana ja loput liittyvät virtaukseen sen jälkeen. Voidaan todeta, että kaikki tuiloilma sekoittuu polttoainevirtaan.

Prosessi vaatii tarpeeksi suuren ilman virtauksen toimiakseen, jotta kaikki kuivattava aine saadaan puhallettua sykloneille asti ilman tukoksia ja että virtaus on riittävä tehokkaaseen kuivaukseen. Tästä syystä ilmavirtausta ei voi laskea kovin paljoa oletusarvosta. Ilmanvirtausta on säädelty iirisventtiilin avulla. Tämä on voinut aiheuttaa prosessin putkien tukkiutumista ja pientä energiahävikkiä. Ilmavirtauksen säätö, mikäli tarpeen, olisi parempi suorittaa käyttämällä taajuusmuuttajaa leijuilmapuhaltimien yhteydessä. Tällä voisi tehokkaammin säädellä ilmavirtauksen määrää puhaltimien kierrosnopeutta säätämällä.

Kattilassa leijuilma lämmitetään yleensä noin 140 celsiusasteeseen, riippuen kuivattavan tuotteen lämpötilavaatimuksista. Ilma sekoittuu pian sen jälkeen kuivattavan materiaalin kanssa muodostaen leijukuivausvirtauksen.

### **3.5 Lämmöntalteenoton optimointi**

Kuivuri 1:ssä on lämmönsiirrin, joka lämmittää prosessin sisään tulevaa ilmaa poistoilmasta saatavalla hukkalämpöenergialla. Lämmönsiirrin sisältää propyleeniiglykoli-vesiseosta, jossa on 29 % glykolia ja loput vettä. Kierro toimii 5,5 ki-lowatin pumpulla.

Työssä tarkastellaan lämmönsiirtimen aikaansaamaa tehosäästöä, joka on siis käytännössä lämmönsiirtimestä saatava leijuilmaa lämmittävä teho.

Tehtiin Excelillä laskuri, joka laskee energiavirtoja/tehoja lämmönsiirtimen eri lämpötilamuutosten kohdilta. Näiden avulla saadaan arvio lämmönsiirtimen tehosta. (Kohta 5.4 Lämmöntalteenoton laskelmat) Kuvassa 7 on Kuivuri 1:n lämmöntalteenoton alakenno ulkoa.



*KUVA 7 Lämmönsiirtimen alakenno lämmittää ulkoa imettävää ilmaa.*

Lämmöntalteenoton toiminnasta on aiemmin tehty tutkimus, jota käytettiin vertailukohteenä opinnäytetyön tutkimukselle.

### **3.6 Lämmönsiirtoputkiston puhdistus**

Lämmönsiirtoa voidaan tehostaa pitämällä glykoliputket puhtaina ja pesemällä niitä tarvittaessa. Jos lämmönsiirtimen käytössä syntyvä sakkauma on liian suurta, puhdistus voi olla välttämätöntä, että tarvittava lämmönsiirto on ylipäänsä mahdollista.

Voimalaitokset ja kemialliset laitokset ovat riippuvaisia puhtaista lämmönvaihtimista tehokkaan laitoksen toiminnan ylläpitämiseksi. Ajan kuluessa vaihtimen putkistoihin voi muodostua sakkaa sekä putken sisä-, että ulkopinnalle. Suunniteltaessa putkistoa pyritään mitoittamaan lämmönvaihtoputket siten, että putkien läpi kulkevat virtausnopeudet maksimoidaan. Tällä voidaan pidentää aikaa, ennen kuin sakkautuminen alkaa hidastaa virtausta. Lopulta sakkautuminen on väistämätöntä todellisuutta lämmönvaihtimien käytössä. Likaantumisen lisääntyessä lämmönsiirto vaarantuu ja tehokkuus heikkenee, mikä vähentää läpimenoaikaa ja lisää energiatarvetta. Esimerkiksi, kun esilämmönsiirtimet likaantuvat, Kuivuri 1 tapauksessa lämmitettävän tuloilman lämpötila laskee ja alalämmön tarvittavan lämpötilan saavuttamiseksi tarvitaan lisäpolttoainetta. (5, s. 139.)

Pääpiirteittäin on olemassa kaksi eri lämmönsiirtimien puhdistustapaa: paineistetulla vedellä puhdistaminen ja kemiallinen puhdistaminen. (5, s. 140.)

### **3.7 Mittaukset**

Mittaustulokset ovat pohjimmiltaan osa opinnäytetyön tutkimusta. Niiden avulla voidaan laskea ja hahmottaa kokonaisuutta, ja ne luovat pohjan myös teoreettiselle analyysille.

Monet mittariarvot ovat saatavilla suoraan tehtaan valvomosta reaaliaikaisina. Mittausepävarmuutta voi tuki esiintyä, mutta alustavien laskelmien tekeminen onnistuu varsin hyvin valvomon arvojen avulla. Arvot perustuvat eri suureiden antureilta tuleviin lukemiin prosessin eri kohdissa. Esimerkiksi energiahäviöitä voi hyvin arvioida lämpötilojen muutosten avulla massavirtojen ollessa selvillä.

Työn aikana suoritettiin useita mittauksia myös manuaalisesti.

### **3.7.1 Ilmavirtaus**

Suoritettaessa ensimmäisiä leijuilman virtausmittauksia huomattiin, että kyseinen valvomoon tuleva virtausanturin lukema on väärä varsinkin puhaltimien ollessa pois päältä. Mittarin kalibroinnin jälkeen lukema oli edelleen väärä.

Ilmavirta mitattiin myöhemmin uudestaan samasta paikasta, ja huomattiin että mittauskohda on hieman liian lähellä haarautuvaa putkea ja seuraavaa mutkaa päälinjassa.

Rambollin jo vuonna 2015 tekemän tutkimuksen pohjalta oli todettavissa, että ilman todellinen massavirtaus on huomattavasti pienempi. Myös tehdyt energiataselaskelmat vahvistivat tämän.

Ramboll mittasi ilman virtauksen uudestaan syksyllä 2019 ja ilman virtaukselle saatiin uusi paremmin paikkansa pitävä arvo. Mittaus suoritettiin paikasta syklo-nien jälkeen. Kyseistä arvoa käytetään analyysilaskelmissa.

### **3.7.2 Nestekaasulinja**

Nestekaasun kulutus täytyy lukea ja laskea manuaalisesti, koska Kuivuri 1:n syöttölinjassa ei ole digitaalista mittaria.

Kattilan polttimen kaasulinjassa on kuutiometrimitari, josta voidaan ottaa lukema ylös ajon alussa ja lopussa. (Kuva 8)

Nestekaasulinjassa on myös painemittari, jonka avulla selviää kaasu paine. Mittarin antaessa mittaripainearvoja painelukemaan täytyy lisätä ilman paineen määrä selvitetäessä absoluuttipainetta, jota käytetään laskelmissa.





*KUVA 8 Kattilaan menevän nestekaasun syöttöputkessa on kulutusta mittaava kuutiometrimittari (aivan vasemmalla) ja painemittari (viisarimittari oikealle mentäessä).*

Kaasun lämpötila saadaan lähtökohtaisesti kaasun höyrystinhuoneessa sijaitsevasta lämpömittarista. Lämpötila linjan alkupäässä on noin 40 astetta Celsiusta. Linjan saapuessa kattilahuoneeseen lämpötila laskee hieman. Putken pinnalta tehtyjen lämpötilamittausten perusteella voidaan arvioida sen oleva noin 30 celsiusastetta.

### **3.7.3 Prosessoitavan tuotteen mittaukset**

Tärkein kuiva-aine pitoisuus on syytä mitata Laroxin jälkeen ja Kuivuri 1:n lopputuotteesta. Kuiva-ainepitoisuudet mitataan ottamalla näyte kummastakin kohdasta prosessilinjassa sijaitsevasta näytteenottoreiästä. Työkalu, jolla näyte otetaan, muistuttaa pitkää kauhaa. (Kuva 9.)



*KUVA 9 Laroxilta tulevan tuotteen näytteenottoaika ja siihen käytettävä työkalu*

Näytteestä voidaan mitata lämpötila ja tehtaassa laboratorioissa määritetään sen kuiva-ainepitoisuus.

### **3.8 Larox-painesuodatuksen vaikutus**

Ennen leijuilma-kuivausta prosessissa poistetaan nestettä puristamalla sitä pois tärkkelyslietteestä Larox-painesuodattimella. (Kuva 10.)





*KUVA 10 Eräs Laxox-painesuodatin (6)*

Laroxin toiminta perustuu sähkökäyttöiseen prässäykseen, jossa moottorisoidut pakat puristavat tärkkelyksestä nestettä pois. Larox poistaa nestettä lähes saman verran kuin leijukuivaus ja sen tehtävänä on vähentää kokonaiskustannuksia ja parantaa koko systeemin tehokkuutta. Tosin prässäyksen jakson aika kasvaa sitä suuremmaksi mitä pienemmäksi nesteprosentti saadaan puristamalla. Tämä hidastaa Kuivuri 1:n kokonaistuotantonopeutta.

Larox-puristuksen loppupisteessä vallitseva kuiva-aineprosenttiosuus täytyy tietää laskettaessa energiataselaskuja. Siitä otetaan näyte, josta mitataan veden ja kuiva-aineen pitoisuus. Yleensä kuiva-ainetta on noin 62 % Laroxin läpiajon jälkeen.

### **3.9 Sähkölaitteiden vaikutus**

Prosessiin kuuluu useampi sähkölaite. Suurin osa sähköstä kuluu leijuilmapuhaltimissa ja lisäksi muissa pienemmissä laitteissa.

Puhaltimien käynnistyksessä moottorit ottavat suuren sähköenergiapiikin. Tosin sähköenergian laskutusmallin takia pehmokäynnistin ei saa suurta säästöä aikaiseksi.

On mahdollista, että taajuusmuuttajan käyttö puhaltimien yhteydessä voi vähentää kustannuksia pitkällä aikavälillä, mikäli leijuilman määrää voidaan säätää.

## 4 PROSESSILASKELMAT

Opinnäytetyössä tehtäväksi tuli laatia laskutyökaluja, mistä toimeksiantaja voisi hyötyä nyt ja tulevaisuudessa, mikäli uusia investointeja energiankäyttöön liittyen harkitaan. Laadittujen prosessilaskureiden tehtävänä oli hahmottaa energiankulutusta teoreettisessa optimitilanteessa. Tämän myötä laskutuloksia voidaan vertailla todellisiin mittauksiin ja saada käsitys laitoksen hyötysuhteista prosessin eri osissa.

### 4.1 Tarvittava polttoainemäärä ajon aikana

Kuivaus Flash-kuivaimella perustuu konvektiolämmönsiirtoon kuuman ilmavirtauksen avulla. Ideana on haihduttaa vettä kuivattavasta materiaalista. Haihtumiseen tarvittava lämpöenergia on varsin suuri.

Tehtiin laskuri, joka perustuu alla olevaan yhtälöön (kaava 2) (2, s. 4.).

$$Q_{heater} = \frac{(T_{g.in} - T_{g.a})}{(T_{g.in} - T_{g.out})} [W_{sX} \Delta H_v + Q_{s.sens} + Q_{loss}] \quad \text{KAAVA 2}$$

$Q_{heater}$  = kuivaukseen tarvittava energiamäärä (kJ)

$T_{g.in}$  = savukaasun loppulämpötila kuivauksen alkupisteessä (°C)

$T_{g.a}$  = polttoilman lämpötila (°C)

$T_{g.out}$  = systeemistä poistuvan savukaasun lämpötila (°C)

$W_{sX}$  = haihdutettavan veden määrä (kg)

$\Delta H_v$  = tarvittava haihtumisenergia (kJ)

$Q_{s.sens}$  = kuiva-aineen lämpenemiseen kuluva energia (kJ)

$Q_{loss}$  = mahdollisesti huomioitavat energiahäviöt (kJ)

Tällä laskulla saatiin kuluva energiamäärä kilojouleina, josta voidaan polttoaineen tehollisen lämpöarvon avulla laskea kuluva polttoaineen määrä (taulukko 2).

Lasku on teoreettinen, mutta varsin hyvin suuntaa antava arvio polttoaineen kulutuksesta. Tosin tarkkojen häviömäärien selvittäminen on varsin haasteellista projektin rajojen puitteissa. Kohdassa 4.5 Häviöiden arvio teoreettiseen polttoaineen kulutukseen verrattuna käydään läpi polttoainehäviöitä.

**TAULUKKO 2 Tarvittavan polttoainemäärän laskutyökalu. Laskutyökalu on Excel-tiedostossa.**

| Syötä arvot                             | Täytä | solut       |                           |   |
|---|-------|-------------|---------------------------|---|
| Laroxille menevä erä                    |       | 9,9 t       |                           | $Q_{heater} = \frac{(T_{g,in} - T_{g,a})}{(T_{g,in} - T_{g,out})} [W_s(X_{in} - X_{out})\Delta H_v + Q_{s,sens} + Q_{oss}]$ |
| Erän kuiva-aine prosentti               |       | 40 %        |                           |   |
| Kuiva-aine prosentti Laroxin jälkeen    |       | 65 %        |                           |   |
| Kuiva-aineen määrä                      |       | 3,96 t      |                           |   |
| Veden määrä ennen Laroxia               |       | 5,94 t      |                           |   |
| Veden määrä Laroxin jälkeen             |       | 2,132308 t  | kuiva-aineen cp           | 1,5   |
| Kokonaismassa Laroxin jälkeen           |       | 6,092308 t  |                           |   |
| Kuivaimen tulevan materiaalin lämpötila |       | 30 C        | evaporation load (n. 25C) | 2400 kJ/kg  |
| Nestekaasun terminen lämpöarvo          |       | 46280 kJ/kg |                           |   |
| Tulolämpötila                           |       | 30 C        |                           |   |
| Alalämpötila                            |       | 140 C       |                           |   |
| Ylälämpötila (lämpötila ULOS)           |       | 30 C        |                           |   |
| Kuiva-aineen loppulämpötila             | arvio | 48          |                           |   |
| Lopputuotteen kuiva-aine prosentti      |       | 88 %        | häviöt (kJ)               | 0   |
| Veden määrä kuivurin jälkeen            |       | 0,54 t      |                           |   |
| Lopputuotteen määrä                     |       | 4,5 t       |                           |   |
| Tarvittava energian määrä               |       | 3928458 kJ  |                           |   |
| Tarvittava nestekaasumäärä              |       | 84,88458 kg |                           |   |
| - kiloa tonnia kohden                   |       | 18,86324    |                           |   |

## 4.2 Nestekaasun polton loppulämpötila

Kuivaimessa lämpötila ennen leijuilmavirtauksen sekoittumista kuivattavaan aineeseen on syytä tietää tarkasti. Alalämpötila muodostuu, kun puhallettava leijuilmavirtaus lämmitetään nestekaasulla.

Tehtiin laskuri, jolla voidaan laskea teoreettinen alalämpötila. Laskuri perustuu termodynamiikan sääntöihin, massataseeseen ja on sisällöltään tavanomainen energiataselasku. Viittaa kaavoihin 3 ja 4

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad \text{KAAVA 3}$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_2 + \dot{m}_2 H_u \quad \text{KAAVA 4}$$

$\dot{m}$  = massavirta (kg/s)

$h$  = entalpia (kJ/kg)

Laskurilla saadaan selville savukaasun entalpia polttimen jälkeen. Koska ilma-kerroin on hyvin suuri ja lämpötilat tarpeeksi suuria voidaan olettaa, että palaminen on lähestulkoon täydellistä.

Savukaasun entalpiasta voidaan taas ilman ominaislämpökapasiteetin avulla laskea kyseisen kohdan lämpötila. Tämä lämpötila vastaa alalämpötilaa häviöttömässä tilanteessa. (Taulukko 3.)

TAULUKKO 3 Alalämpötilan energiatasetelaskutyökalu. Kuva on laskutyökalusta, joka on Excel-tiedostossa.

|  |  |                            |  |                   |  |
|--|--|----------------------------|--|-------------------|--|
| polttoaineen tiheys mittarilla (tarkista paine ja lämpötila) |  | 4,489128 kg/m <sup>3</sup> |  | [IDEAALIKAASU]    |  |
| ilma / polttoaine suhde kyseisessä laskussa                  |  |                            |  |                   |  |
| 910,137  |  | Kelvin                     |  | 273,15            |  |
|  |  | tuloilman keskiarvo        |  | 10,4 C            |  |
|  |  | tilavirta h                |  | 38353 tilavirta s |  |
|  |  | oletus m_i                 |  | 13,28825          |  |
|  |  |                            |  | 10,65341 38352,28 |  |
| m_sk   |  | 13,3026                    |  | m_pa              |  |
| T_sk   |  | 87,35339                   |  | h_u               |  |
| h_sk   |  | 360,5034                   |  | H_u               |  |
| q_h_sk   |  | 4795,632                   |  | q_h_pa            |  |
|  |  | m_pa                       |  | 0,0146            |  |
|  |  | H_u                        |  | 46280             |  |
|  |  | q_h_pa                     |  | 675,688           |  |
|  |  | gross v.                   |  | 50020             |  |
|  |  | m_i                        |  | 13,288            |  |
|  |  | h_i                        |  | 310,05            |  |
|  |  | q_h_i                      |  | 4119,944          |  |
|  |  | T_sk                       |  | 36,9              |  |

Laskutyökaluun syötetään tunnettu ilman massavirta ja lämpötila. Polttoaineen massavirta on myös syytä tietää.

Laskurilla voidaan hyvin vertailla käytännön mitattujen arvojen ja teoreettisen laskun avulla saatujen arvojen yhtenäisyyttä. Lisäksi laskemalla teoreettisesti voidaan myös arvioida mittareiden epävarmuutta ja mahdollisten häviöiden suuruutta.

### 4.3 Nestekaasun massavirta

Nestekaasulle voidaan laskea keskimääräinen massavirta. Ensin täytyy selvittää kaasun keskikulutus kuutioina halutulla aikavälillä. Lukeman saa kohdassa 4.6.2 Nestekaasulinja mainitusta mittarista.

Lasketaan tiheys nestekaasulle muunnetun ideaalikaasun yhtälön avulla (kaava 5). Lähde tänne

$$\rho = \frac{m_M p}{RT}$$

KAAVA 5 (7)



$\rho$  = kaasun tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$m_M$  = molekyylinen massa (g/mol)

$p$  = paine (bar)

$R$  = yleinen kaasuvakio (0,0821 L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

$T$  = lämpötila (°C)

#### 4.4 Lämmöntalteenoton laskelmat

Lämmöntalteenoton tehon määrää tutkittaessa helpoimmaksi tavaksi todettiin virtaavan ilman entalpiavirran muutos. Ilman lämpötila otetaan ylös sen mennessä lämmityskennolle, ja tämän jälkeen otetaan taas lämpötila ylös sen poistuessa sieltä. Lämmittävän tehon suuruus voidaan laskea lämpötilojen erotuksen, ilman ominaislämpökapasiteetin ja ilman massavirran avulla (kaava 6):

$$\Phi_{lt} = c_{p_{ilma}}(T_2 - T_1)\dot{m} \quad \text{KAAVA 6}$$

$\Phi_{lt}$  = lämmityskennon teho (kW)

$c_{p_{ilma}}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

$T_1$  = ulkoilman lämpötila (°C)

$T_2$  = lämmitetyn ilman lämpötila kennon jälkeen (°C)

$\dot{m}$  = ilman massavirta (kg/s)

Kaavan 6 avulla laskettiin tehot tunneittain vuoden ajan. Tehot laskettiin sekä yläkennolle että alakennolle. Lämpötila-arvot halutulle ajalle saatiin Chemigate

Oy:n arkistosta. Huomattiin että ylä- ja alakennon tehojen arvot poikkesivat toisistaan huomattavasti. Tähän voi olla syynä esimerkiksi kondensoituvan veden siirtämä energia, joka ei näy suoraan ilman lämpötilan muutoksessa, lämpötilamittareiden keho positio tai lämpötilamittareiden lukemien virheellisyys. Todellisuudessa tämä voi johtua useamman yllä mainitun syyn summasta. Yläkennolle tiivistyvän veden luovuttaman energian määrää arvioitiin laskemalla (kaava 7) ja siitä tehtiin myös mittaus. Laskennassa apuna käytettiin Molliertyyppistä veden kuvaajaa (liite 1). Mittapisteinä kuvaajassa käytetään keskimääräisiä lämpötiloja vuoden ajalta ennen yläkennoa ja sen jälkeen.

$$m_{k.vesi} \dot{=} m_{ilma} * \Delta\omega$$

KAAVA 7

$m_{k.vesi}$  = tiivistyvän kondenssiveden massavirta (kg/s)

$m_{ilma}$  = kuivan ilman massavirta (kg/s)

$\Delta\omega$  = tiivistyvän nesteen määrä per kiloa ilmaa

Tiivistyvän kondenssiveden luovuttama energia tehollisesti saadaan kaavalla 8:

$$\phi_L = m_{k.vesi} \dot{=} \Delta h_{vesi}$$

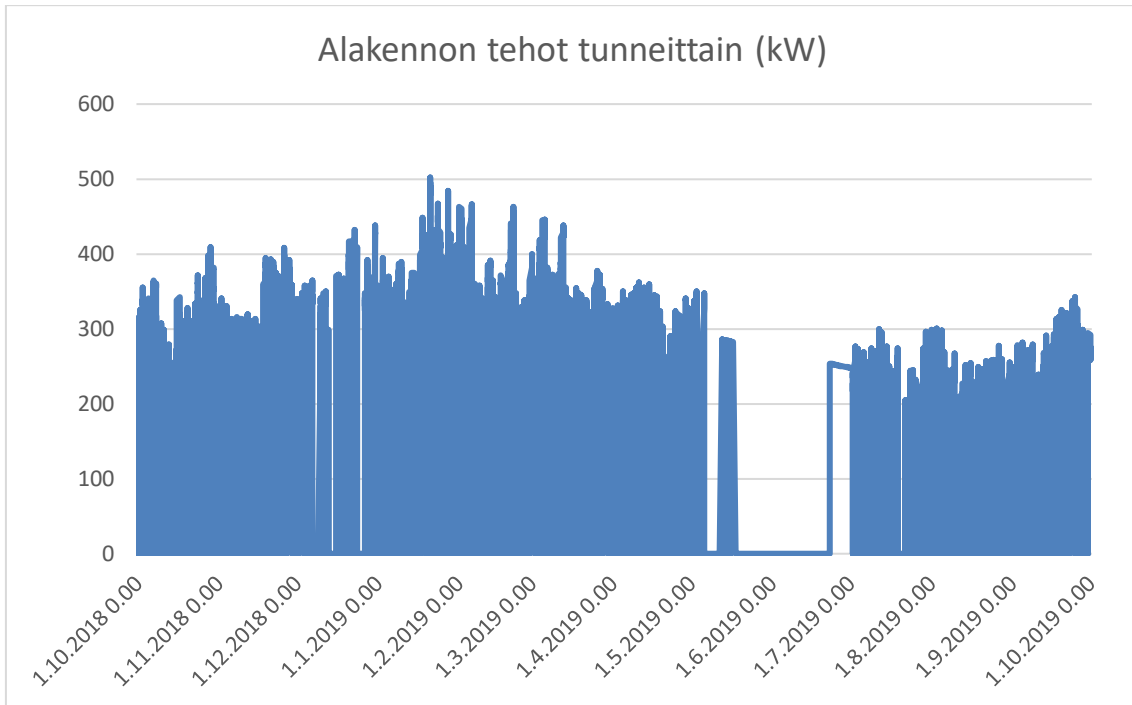
KAAVA 8

$\phi_L$  = lauhtumis- teho (kW)

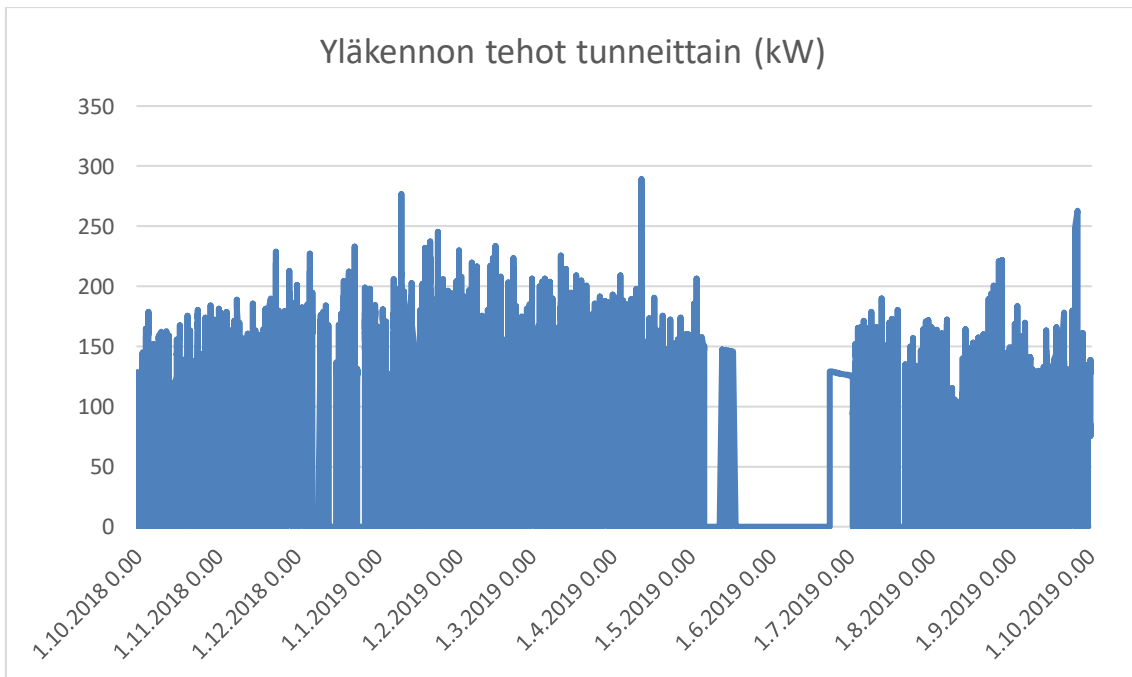
$\Delta h_{vesi}$  = veden entalpiian muutos tiivistyessä (kJ/kg)

Voidaan myös todeta, että laitoksen lämpötilamittauksen digitaalinen arkistointi tai mittaus ei ole ollut kunnossa kesän aikana, koska arvot ovat vääristyneet.

Tältä ajanjaksolta tulokset eivät ole analyysikelpoisia. Kuvat 11 ja 12 hahmottavat kennojen tehoja.



**KUVA 11** Lämmönsiirtimen teho alakennolla. Häiriöstä johtuen kesän ajalta mittarit näyttävät nollaa.



**KUVA 12** Lämmönsiirtimen teho yläkennolla

#### 4.5 Häviöiden arvio teoreettiseen polttoaineen kulutukseen verrattuna

Verrataan kahden ajon ja teoreettisesti lasketun polttoaineenkulutuksen eroavaisuutta toisiinsa ja saadaan arvio polttoainehäviöistä. (taulukko 4)

$$\eta_{po} = \frac{m_{po_{teoreettinen}}}{m_{po}} \quad \text{KAAVA 9}$$

$\eta_{po}$  = polttoainehyötysuhde

$m_{po_{teoreettinen}}$  = teoreettisesti laskettu polttoaineenkulutus (kg)

$m_{po}$  = esimerkkiajon mitattu polttoaineenkulutus (kg)

$$\text{häviöt} = (1 - \eta_{po}) * 100 \% \quad \text{KAAVA 10}$$

*TAULUKKO 4 12.8 suoritettujen ajon polttoaineenkulutuksen vertailu teoreettiseen polttoaineen kulutukseen. Kuva on laskutyökalusta, joka on Excel-tiedostossa.*

|                                     |          |    |
|-------------------------------------|----------|----|
| Tarvittava energian määrä           | 1,12E+08 | kJ |
| Tarvittava nestekaasumäärä          | 2412,829 | kg |
| - kiloa tonnia kohden               | 18,14259 |    |
| Käytännön polttoaineen kulutus (m3) | 693,9    | m3 |
| Käytännön polttoaineen kulutus (kg) | 3115,006 | kg |
| Hyötysuhde verrattuna teoreettiseen | 77,45826 | %  |
| - häviöt                            | 22,54174 | %  |

## 5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella Chemigate Oy:n tärkkelyksenkäsittelylaitoksen märkäprosessin kuivuriin liittyvää energiankulutusta. Lisäksi tarkoituksena oli tutkia energiansäästöratkaisuja ja kehittää tutkimukseen liittyen prosessilaskutyökaluja.

Työn aikana huomattiin, että helppoja energiansäästöratkaisuja on toteutettavissa hyvin vähän. Tämän takia työn fokus siirtyi enemmän yleisen tutkimuksen ja laskentatyökalujen kehittelyn puolelle.

Yksi potentiaalinen energiansäästöratkaisu on lämmöntalteenoton glykoliputkien puhdistus. Putkien puhdistus voisi kasvattaa lämmönsiirtokerrointa ja täten tehostaa lämmönsiirtoa ja säästää hieman enemmän energiaa.

Nestekaasun tiheydeksi saadaan laskettua  $1,2473 \text{ kg/m}^3$ .

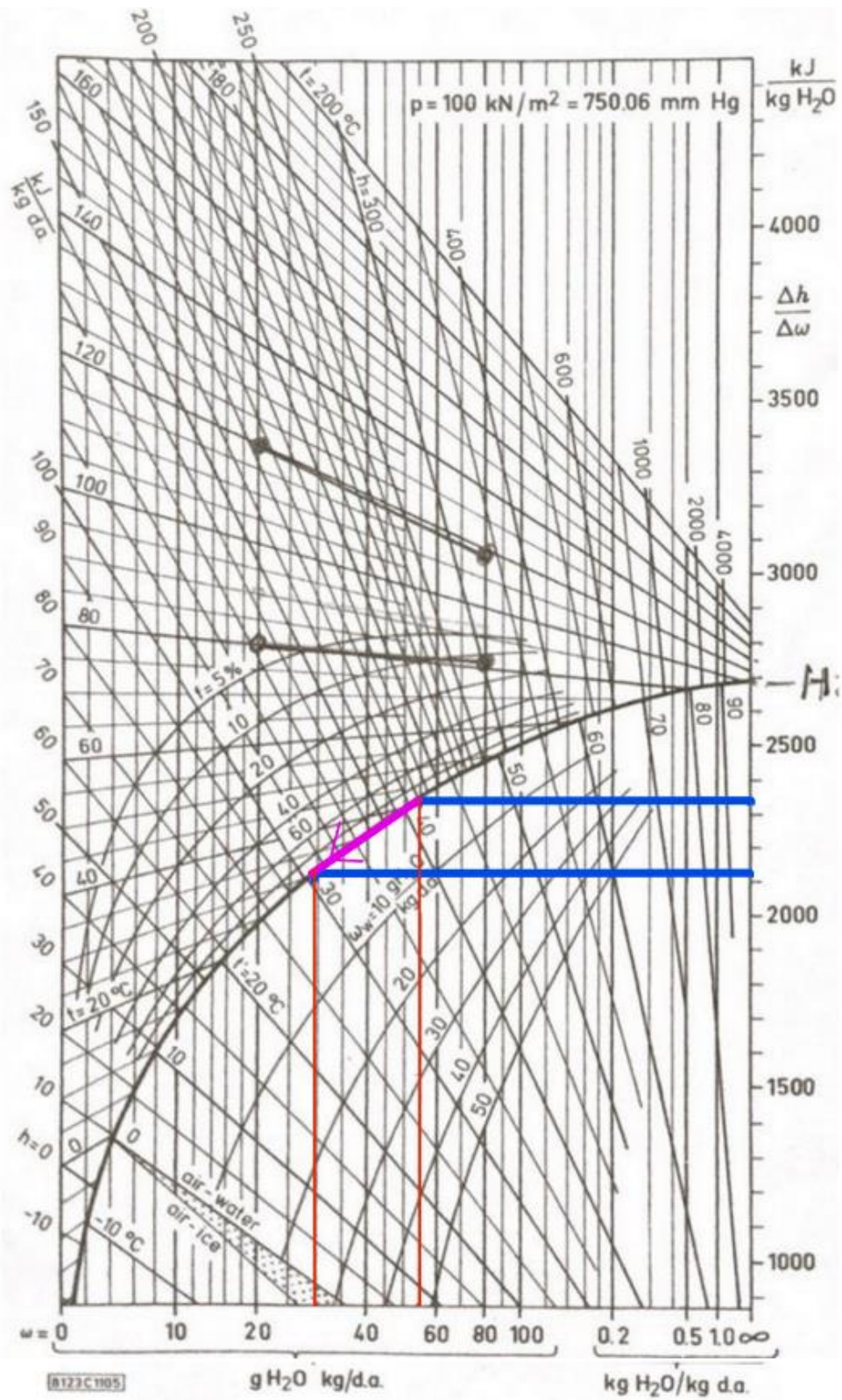
Aiempaan tutkimukseen verrattuna on mahdollista, että lämmöntalteenotto toimii suuremmalla teholla kuin on oletettu. Alakennon ulkoilmaa lämmittävä teho ylittää keskimäärin tasaisesti 300 kW tehon. Yläkennon teho taas on oletettua suurempi, mikäli huomioidaan poistuvasta savukaasusta tiivistyvän veden luovuttama energia. Tiivistyvän veden luovuttamaksi tehoksi saatiin suuntaa antavalla mittauksella noin 80 kW ja laskuilla 65,2 kW.

Kuivurin häviöistä tehtiin analyysi kahdesta ajosta teoreettisesti lasketun optimi-tilanteen ja käytännön polttoainekulutuksen välillä. Laskelmien mukaan ensimmäisessä 8.8.2019 suoritettussa ajossa häviöitä polttoaineen suhteen syntyi 18,85 % ja toisessa 12.8.2019 suoritettussa ajossa häviöitä syntyi 22,54 %.

Työ onnistui kokonaisuudessaan hyvin, vaikka sen fokus siirtyi hieman resursien puitteissa. Tutkimusta energiansäästön suhteen tehtiin ja ideat esitettiin. Mittauksia tehtäessä oli hieman vastoin käymisiä, mutta loppujen lopuksi saatiin tarpeeksi luotettavaa mittausdataa. Laaditut teoreettiset laskutyökalut voivat olla apuna hahmottamassa laitoksen toimintaa, mikäli halutaan optimoida nykyistä prosessia, tai suorittaa jatkotutkimuksia energiankäytöstä.

## LÄHTEET

1. Ranta, Taimo 2013. Kirjallinen tehtävä. Sedu Aikuiskoulutus. Seinäjoki.
2. Tsotsas, Evangelos – Mujumdar, Arun S. 2011. Energy Savings. Modern Drying Technology series. John Wiley & Sons
3. Borde, Irene – Levy, Avi 2006. Pneumatic and Flash Drying. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/264893081\\_6\\_Pneumatic\\_and\\_Flash\\_Drying#pf1](https://www.researchgate.net/publication/264893081_6_Pneumatic_and_Flash_Drying#pf1) Hakupäivä 24.11.2019.
4. Kuivureiden turvallisuusmuutokset. 2011. Raportti. Chemigate Oy
5. Rossiter, Alan P. – Jones, Beth P. 2015. Energy Management and Efficiency for the Process Industries. American Institute of Chemical Engineers.
6. Nelson Machinery & Equipment Ltd. 2019. Valokuva. Saatavissa: <http://www.nelsonmachinery.com/filters/pressure-filters/larox-pf-22-b2-automatic-pressure-filter-1593> Hakupäivä 4.12.2019.
7. Helmenstine, Todd 2019. How to Calculate the Density of a Gas. ThoughtCo. Saatavissa: <https://www.thoughtco.com/calculate-density-of-a-gas-607553> Hakupäivä 4.12.2019.
8. Salin, J-G 2019. Mollier-diagrammi. Saatavissa: <https://saunologia.fi/loyly-ja-lampotila/2019-hakkarainen-100c/#gref> Hakupäivä 4.12.2019.



Diagrammi: TL J-G Salin

(8)

