

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Harri Silvola

SHS-KUIIVAIMEN TULISTIMEN MITOITUSOHJE

Opinnäytetyö
Marraskuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2017
Kone- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
013 260 600

Tekijä(t)
Harri Silvola

Nimeke
SHS-Kuivaimen tulistimen mitoittamisohje

Toimeksiantaja
Coctio Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli valmistaa mitoitusohje SHS-kuivaimen tulistimen mitoittamiseen. Tavoitteena oli tehdä mitoitusohje, jota on helppo ja nopea käyttää kuivaimen suunnittelun aikana. Mitoitusohje on Excel-muodossa oleva laskentataulukko, joka laskee tulistimen putkien pituuden käyttäjän antamien lähtöarvojen perusteella.

Työssä käsitellään kuivumisprosessiin ja kuivaimen valintaan vaikuttavia muuttujia yleisellä tasolla, jonka jälkeen syvennyttään toimeksiantajan antamien rajoitusten perusteella juuri SHS-kuivaimen mitoittamiseen. Työssä käydään läpi mitoitusohjeen kannalta olennaiset laskentakaavat.

Työn tuloksena saatiin toimiva mitoitusohje, jolla saadaan nopeasti arvio tulistinputkien pituudesta. Tuotos ei ole aivan yhtä helppokäyttöinen kuin olisi toivottu, mutta asiaan perehtynyt henkilö pystyy käyttämään mitoitusohjetta. Opinnäytetyön lopussa on käsitelty eettisyyttä ja luotettavuutta, sekä mahdollisia jatkokehitysideoita. Työn perusteella voi saada hyvän yleiskuvan kuivaamisprosessista, sekä SHS-kuivaamisen eroista tavalliseen ilmakehitykseen.

Kieli
suomi

Sivuja 38

Asiasanat

SHS, Tulistettu höyry, Kuivaaminen, Mitoitusohje



THESIS
November 2017
Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering
Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
FINLAND
013 260 600

Author (s)
Harri Silvola

Title
Design Guide for the Superheater of SHS Dryer

Commissioned by
Coctio Ltd

Abstract

The aim of the thesis was to prepare a design guide for the superheater pipes of a SHS dryer. The idea was to make an Excel based calculation sheet that is easy and quick to use during the design process of the dryer. The design guide will calculate the length of the superheater's pipes based on the base values given by the designer.

This thesis deals with the drying process in general and the variables affecting the choosing process for the correct dryer are covered. After that the SHS-drying process is discussed based on the restrictions given by the client. In this thesis the critical calculations for the process are addressed.

As a result, a working calculation sheet was compiled. From the sheet the user can get a quick estimate on the length of the super heaters pipes. The design sheet isn't as easy to use as was hoped for, but a person who has a basic education on the subject can use the sheet. Ethicalness and reliability are discussed at the end of the thesis. Based on the work, you can get an overall picture of the drying process and an idea of the differences between SHS drying and air drying.

Language

Finnish

Pages 38

Keywords

SHS, drying, superheater, design guide

Sisältö

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 5 |
| 2 | Opinnäytetyön tarkoitus ja tehtävä..... | 5 |
| 3 | Kuivaamisen peruskäsitteitä | 6 |
| 3.1 | Kuivumiseen vaikuttavat ulkoiset muuttujat | 7 |
| 3.1.1 | Materiaalin ja ympäristön tasapaino | 7 |
| 3.1.2 | Kosteaa ilma | 8 |
| 3.1.3 | Kuivauskaasun lämpötila ja virtausnopeus | 9 |
| 3.2 | Kuivumiseen vaikuttavat sisäiset tekijät..... | 9 |
| 3.2.1 | Kosteaa huokoinen materiaali..... | 9 |
| 3.2.2 | Lämmön siirtyminen huokoisessa materiaalissa..... | 10 |
| 3.2.3 | Kosteuden siirtyminen huokoisessa materiaalissa..... | 10 |
| 3.3 | Kuivumisen vaiheet..... | 10 |
| 4 | Kuivaintyyppin valintaan vaikuttavat tekijät | 11 |
| 4.1 | Lämmönsiirtomenetelmä | 12 |
| 4.2 | Materiaalin liikkuminen kuivaimessa | 12 |
| 5 | SHS-kuivain | 13 |
| 6 | Kuivaimen mitoittamisperiaatteita | 14 |
| 6.1 | Toimeksiantajan tarvitsemat yksilöidyt muuttujat | 14 |
| 6.2 | Kosteuden siirtyminen kuivattavassa materiaalissa | 15 |
| 6.3 | Lämmön siirtyminen kuivattavassa kappaleessa | 16 |
| 6.4 | Kuivaimen massa- ja energiataseet..... | 20 |
| 6.5 | Tulistimen laskenta | 21 |
| 7 | Tuotoksena taulukkopohjainen mitoitusohje | 24 |
| 8 | Luotettavuus | 36 |
| 9 | Pohdinta..... | 36 |
| | Lähteet..... | 38 |

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli valmistaa mitoitusohje Coctio Oy:n SHS-kuivaimen tulistimen mitoittamiseen. Mitoitusohjeen tarkoituksena on helpottaa ja nopeuttaa tulistimen laskentaprosessia. Aiemmin yritys on käyttänyt ulkopuolista laskentapalvelua kuivaimen mitoittamiseen, mutta mitoitusohjan myötä on tarkoitus siirtää laskenta omalle suunnitteluosastolle ja tällä tavoin vähentää kuluja.

Kuivaamiseen liittyy useita eri muuttujia, jotka vaikuttavat prosessin kulkuun. Yrityksen aiempi kokemus ja tuotteet rajaavat joitain näistä muuttujista esimerkiksi kuivaimen päämitat, materiaalin siirtotapa ja materiaalin koostumus.

2 Opinnäytetyön tarkoitus ja tehtävä

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Coctio Oy. Toimeksiantajan toiveena oli saada yritykselle mitoitusohje tai -taulukko, jonka avulla yrityksen olisi helpompi lähteä suunnittelemaan SHS-kuivaimia. Opinnäytetyössä syvennyttään SHS-kuivaamisen perusteisiin sekä kuivattavan materiaalin tuomiin muuttujiin.

Olen muodostanut seuraavat tutkimuskysymykset:

Mihin muuttujiin SHS-kuivaimen mitoittaminen perustuu?

Mitä muuttujia voidaan pitää vakioina, jotta laskenta pysyy yksinkertaisena?

Toimeksiantajan mukaan olisi tärkeää, että laskentapohja olisi yhtenäinen ja suoraviivainen. Vaikka itse laskenta vaatii paljon eri fysikaalisten prosessien huomiointia, tapahtuisi laskenta muutaman lähtöarvon antamisella ja lopputulos antaisi suoraan tulistimen kriittiset mitat. Luonnollisesti tällaisia fysikaalisia ilmiöitä laskettaessa on pohjan käyttäjän oltava tietoinen laskennan etenemisestä, jotta hän voi arvioida tulosten luotettavuutta.

Opinnäytetyöni on samalla toiminnallinen, että tutkimuksellinen työ. Opinnäytetyö tuottaa tuotoksen, eli laskentataulukon. Laskentataulukon aikaansaamiseksi on käytetty tutkimuksellista työtä.

3 Kuivaamisen peruskäsitteitä

Kuivumisella tarkoitetaan haihtuvan aineen poistumista materiaalista, jolloin tuloksena on kuivaa, kiinteää ainetta. Yleensä haihtuvalla aineella tarkoitetaan kosteutta eli vettä. Vesi voi olla sitoutunut kuivattavaan aineeseen eri tavoin. Kuiva-aine voi olla liuenneena veteen tai vesi voi olla kuiva-aineen mikrorakenteessa. Vesi voi myös olla kuiva-aineen pinnalla. (Mujumdar 2015, 4.)

Useimmiten ainetta kuivatessa tapahtuu samanaikaisesti kaksi eri prosessia. Lämpöenergiaa siirtyy aineeseen haihduttaen pintakosteutta ja sisäinen kosteus alkaa siirtyä aineen ulkopinnoille, joka haihtuu tai höyrystyy. Kuivausnopeus riippuu täysin siitä, kuinka nopeasti nämä kaksi prosessia tapahtuvat. Prosessien nopeus riippuu useista eri muuttujista, kuten lämpötilasta, paineesta, fysikaalisista ominaisuuksista, virtausalueesta ja vapaasta pinta-alasta josta, haihtuminen tapahtuu. (Mujumdar 2015, 4.)

Kuivaaminen on yksi vanhimmista, monimuotoisimmista ja yleisimmistä kemiallisista teollisuusprosesseista. Kuivaaminen on myös yksi energiaa syövimmistä prosesseista teollisuudessa, mikä on suoraa seurasta höyrystymisen vaatimasta suuresta latenttilämmöstä sekä kuuman ilman heikosta uudelleenkäytöstä. Toisaalta kuivaamisella on myös useita etuja. Kuivatun materiaalin säilöminen, kuljettaminen ja säilyvyys paranevat, sekä joissain tapauksissa myös tuotteen laatu paranee. (Mujumdar 2015, 4.)

Kuivuminen on monimuotoinen prosessi. Lämpöenergiaa voi siirtää materiaaliin useilla eri tavoilla ja aineen sisällä tapahtuva kosteuden siirtyminen voi tapahtua hyvin eri tavoilla. Nämä muuttujat ovat vielä riippumattomia kuivattavasta materi-

aalista, jonka partikkelikoko, huokoisuus ja lämmönsiirtokertoimet voivat vaihdella laidasta laitaan. Myös prosessin muuttujat, kuten nopeus, kapasiteetti ja paine voivat vaihdella laidasta laitaan. Monista muuttujista johtuen on olemassa jopa 400 erityyppistä kuivainta. (Mujumdar 2015, 4.)

Kuivaaminen on monimutkainen prosessi laskennallisesti ajateltuna. Vaikka koko prosessin laskenta perustuu hyvin pitkälti massan-, lämmön- ja momentinsiirtoon ja materiaalien ominaisuuksien huomioimiseen, on prosessissa paljon muuttujia, jotka täytyy huomioida suunnittelussa. Materiaalin lämmitessä ja kosteuden poistuessa voivat materiaalin fysikaaliset ominaisuudet muuttua, minkä johdosta prosessi ei etene toivotulla tavalla. Tällaisia muutoksia ovat esimerkiksi lasittuminen, kutistuminen, pullistuminen ja kiteytyminen. (Mujumdar 2015, 4.)

3.1 Kuivumiseen vaikuttavat ulkoiset muuttujat

Kuivumisprosessiin kuuluu erinäisiä ulkoisia muuttujia, jotka vaikuttavat kuivumisprosessiin. Ulkoiset muuttujat ovat erityisen tärkeitä varsinkin kuivauksen alkuvaiheessa. Esimerkiksi liian kuuma kuivauskaasu tai liian matala ilmankosteus voivat aiheuttaa muutoksia materiaalissa, mikä taas osaltaan vaikeuttaa kuivaamisen myöhempiä vaiheita. (Mujumdar 2015, 5.)

3.1.1 Materiaalin ja ympäristön tasapaino

Olellainen osa kuivumisprosessia on eroavaisuudet materiaalin ja ympäristön ominaisuuksissa. Jos materiaalin ja ympäristön kosteus, lämpötila ja paine ovat täsmälleen samat, ei minkäänlaista kuivumista tapahdu. Tämän vuoksi on kriittistä, että kuivausympäristössä oleva ilma tai kaasu on tarpeeksi kuivaa ja lämmintä, jotta kuivumisprosessi saadaan tapahtumaan. Ilman on oltava tarpeeksi kuumaa, jotta materiaalissa oleva kosteus saadaan muutettua kaasuksi. Kuivauskaasu ei myöskään saa olla liian kostea, jotta kuivauskaasu pystyy sito-

maan materiaalista irtoavaa kosteutta. Ilman kuivuus on myös tärkeä tekijä kosteuden poistamisessa. Vaihtoehtoisesti myös kuivauskaasun ja materiaalin välinen paine-ero aiheuttaa kuivumista. (Mujumdar 2015, 5.)

3.1.2 Kosteaa ilmaa

Kosteaa ilmaa on vesihöyryn ja kuivan ilman muodostama seos. Kostean ilman tärkeimmät ominaisuudet ovat absoluuttinen kosteus ja kokonaispaine. Vesihöyryn ja kuivan ilman massojen suhdetta kutsutaan absoluuttiseksi kosteudeksi. Kostean ilman kokonaispaine muodostuu kuivan ilman ja vesihöyryn osapaineiden summasta. Osapaineiden avulla voidaan myös laskea ilman absoluuttinen kosteus. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 8.)

Tietyissä lämpötilassa kuiva ilma voi sitoa vain tietyn maksimimäärän vesihöyryä. Jos tämä määrä ylittyy, alkaa kosteutta tiivistyä ja tiivistyminen jatkuu niin kauan, kunnes suhde palaa takaisin maksimimäärään. Tässä maksimimäärässä olevan vesihöyryn osapainetta kutsutaan kylläisen höyryn paineeksi. Kylläisen höyryn paineet on taulukoitu eri lämpötiloissa ja nämä arvot löytyvät höyrytaulukoista tai vaihtoehtoisesti ne voidaan laskea. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 8–9.)

Kostean ilman entalpia määritellään kuivan ilman ja vesihöyryn entalpioiden summana. Entalpioita laskettaessa on tärkeää määritellä, missä lämpötilassa ja paineessa entalpia on 0. Kun tämä nollopiste on määritetty, voidaan entalpia laskea ominaislämpökapasiteetin, absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan avulla. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 9.)

3.1.3 Kuivauskaasun lämpötila ja virtausnopeus

Kuivaimissa, joissa lämmönsiirtäminen tapahtuu väliaineen välityksellä esimerkiksi ilman tai savukaasun avulla, on kuivauskaasun ominaisuuksilla huomattava merkitys prosessin nopeuteen ja tehokkuuteen. Konvektiivisessa lämmönsiirrossa yhdistyvät lämmön siirtyminen väliaineen ja lämmitettävän kappaleen välillä sekä väliaineen liike (Cengel 2002, 25).

3.2 Kuivumiseen vaikuttavat sisäiset tekijät

Prosessin edetessä sisäiset tekijät, eli kuivattavan materiaalin ominaisuudet, vaikuttavat enemmän prosessiin kuin ulkoiset tekijät. Kuivauskaasun ominaisuudet eivät enää nopeuta prosessia samalla tavalla kuin prosessin alussa. Tärkeämmäksi ominaisuudeksi muodostuu lämpöenergian siirtyminen kuivattavan materiaalin keskustaa kohti, joka osaltaan nopeuttaa kuivumista (Mujumdar 2015, 12–13.)

3.2.1 Kosteaa huokoinen materiaali

Kostean huokoisen materiaalin kosteus ilmoitetaan yleensä vesimassan ja kokonaisuuden suhteena. Vaihtoehtoisesti kosteus voidaan myös ilmoittaa vesimassan ja kuivamassan suhteena. Jos kosteus lasketaan kuivamassan suhteen, käytetään yleensä termiä kosteussuhde. Huokoisessa materiaalissa vettä esiintyy pääasiassa vapaana tai sidottuna. Sidotulla vedellä tarkoitetaan vetysidoksilla seinämiin kiinnittynyttä vettä. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 13–18.)

Kun kosteaa materiaalia asetetaan vakaaseen ympäristöön, muodostuu ympäristön ja materiaalin välille tasapainokosteus. Jos ympäristön suhteellinen kosteus pysyy samana tarpeeksi kauan, asettuu materiaalin höyrynpaine samaksi kuin materiaalinkin. Kun höyrynpaineet asettuvat yhtä suuriksi, loppuu kuivuminen ja prosessi pysähtyy. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 19–21.)

3.2.2 Lämmön siirtyminen huokoisessa materiaalissa

Kuivausmenetelmissä, joissa käytetään lämpöä, on lämmönsiirto nopeus sitä tärkeämpää, mitä pidemmälle prosessi etenee. Kuivauksen alussa pinnalla oleva kosteus voidaan haihduttaa tai höyrystää helposti, mutta kun pinta alkaa olla kuiva ja kosteuden pitää siirtyä koko ajan pidempi matka päästäkseen pintaan alkaa myös lämmön siirtyminen vaikuttaa prosessin nopeuteen. Erityisesti lämmön siirtyminen pintaan ja materiaalin lämmönjohtokyky ovat tärkeitä. (Mujumdar 2015, 17).

3.2.3 Kosteuden siirtyminen huokoisessa materiaalissa

Kosteus liikkuu huokoisessa aineessa useilla eri tavoilla. Näitä tapoja ovat esimerkiksi konsentraatioeroon perustuva diffuusio, kapillaarinen virtaus ja painegradientista johtuva virtaus, eli Darcyn laki. Kosteus voi myös liikkua usealla eri tavalla yhtäaikaisesti. Yleensä kuivumista laskettaessa oletetaan yhden siirtymismuodon olevan voimakkain ja muut huomioidaan erilaisia muuttujia lisäten. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 41.)

3.3 Kuivumisen vaiheet

Kuivumisprosessissa on kolme päävaihetta: alkulämpenemisen vaihe, vakiokuivumisvaihe ja hidastuvan kuivumisen vaihe. Alkulämpenemisvaiheessa tuote lämpenee kuivausympäristöä vastaavaan märkälämpötilaan. Märkälämpötila riippuu kuivausilman lämpötilasta, kosteudesta sekä paineesta. Ilmanpaineessa märkälämpötila voidaan määrittää Mollier-diagrammin avulla, mutta paineen ollessa jokin muu kuin ilmanpaine, joudutaan märkälämpötila määrittämään laskennallisesti. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 57–59.)

Vakiokuivumisvaiheessa kosteus alkaa haihtua materiaalin pinnalta, mutta materiaalin pinta pysyy kuitenkin kosteana kapillaari-ilmiön avulla. Vakiokuivumisvaiheessa pinnalle siirtyvän kosteuden määrä on suurempi kuin haihtumisnopeus. Vakiokuivumisvaiheessa kuivumista hidastaa ainoastaan ilman ja höyryn rajakerros. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 57–59.)

Hidastuvan kuivumisen vaiheessa kosteutta ei enää siirry materiaalin pinnalle tarpeeksi nopeasti ja materiaalin pinta alkaa lämmetä nopeasti. Hidastuvan kuivumisen vaiheessa haihtumista alkaa hidastaa materiaalin sisäiset ominaisuudet, kuten lämmönsiirtokerroin ja kosteuden siirtymiseen liittyvät kertoimet kuten permabiliteetti tai diffuusiokerroin. Kun aineen höyrynpaine on laskenut samaan ympäristön höyrynpaineen kanssa, kuivuminen loppuu. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 57–59.)

4 Kuivaintyyppin valintaan vaikuttavat tekijät

Oikean kuivaintyyppin valinta on monimutkainen prosessi. Kuivaimen valinnassa pitää huomioida, useita eri näkökulmia, jotta saavutetaan haluttu lopputulos. Kuivainta valittaessa tulee olla tiedossa tietyt minimivaatimukset ja lähtötiedot. Tärkeimpiä lähtötietoja ovat massavirta, sekä kuivattavan materiaalin fysikaaliset, kemialliset ja biokemialliset ominaisuudet. Valinnassa on myös tärkeää huomioida erinäiset turvallisuus-, ympäristö- ja laatuvaatimukset. Kun lähtötiedot on kerätty, voidaan lähteä suunnittelemaan kuivaimen lämmönsiirtoa, materiaalin siirtoa ja muita käytännön toimintoja. (Mujumdar 2015, 24–25.)

4.1 Lämmönsiirtomenetelmä

Lämmön siirtyminen jaetaan kolmeen pääryhmään: konvektio, johtuminen tai säteily. Konvektio on näistä kolmesta yleisin kuivaimissa käytetty lämmönsiirtomenetelmä. Konvektiossa lämpöenergia siirtyy aineen yli liikkuvan ilman tai kaasun mukana ja konvektoituu kuivattavaan aineeseen. Yleensä konvektiokuivauksessa käytetään väliaineena ilmaa, inerttiä kaasua, palokaasua tai tulistettua höyryä. (Mujumdar 2015, 20.)

Kuivaimessa, jossa lämmönsiirtoon käytetään johtumista, tuodaan lämpöenergia tuotteeseen käyttämällä lämmitettyä pintaa, joka on kosketuksissa kuivattavaan aineeseen. Lämmitetystä aineesta alkaa haihtua vettä, joka voidaan kuljettaa eteenpäin imemällä tai kaasuvirtauksen mukana. Usein voidaan myös käyttää näiden kahden yhdistelmää, jossa tuotetta lämmitetään kaasun avulla, sekä lämmitetyllä vaipalla tai vastusputkilla. (Mujumdar 2015, 20.)

Myös säteilyä voidaan käyttää lämmönsiirtoon. Säteilyenergialla kuivaamisprosessi tulee optimoida tarkasti ja sen onnistuessa tuotteesta voidaan poistaa lähes kaikki kosteus. Säteilyllä kuivaaminen vaatii huomattavan ison investoinnin ja myös käyttökustannukset ovat isommat kuin muilla lämmönsiirtomenetelmillä. (Mujumdar 2015, 20.)

4.2 Materiaalin liikkuminen kuivaimessa

Tuotetta voidaan kuljettaa kuivaimessa monilla eri tavoilla riippuen materiaalin olomuodosta, sekä siitä halutaanko kuivaimesta jatkuvatoiminen vai panostoiminen. Myös partikkelikoko vaikuttaa merkittävästi kuljettamismenetelmän valintaan. Useimmat kuljetusmenetelmät perustuvat erilaisiin mekaanisiin ratkaisuihin kuten hihna- tai ruuvikuljettimen käyttämiseen. Joidenkin aineiden kuivaamiseen voidaan myös käyttää leijupeti- tai sumutuskuivausta. Molemmissa on ideana tuoda aine sumuna tai jauheena kuivaimeen, jossa aine siirtyy eteenpäin ilmavirran mukana. (Mujumdar 2015, 21.)

5 SHS-kuivain

Tulistetulla höyryllä (engl. SHS tai Superheated steam) kuivaamisen konsepti tuotiin esille ensimmäisen kerran yli sata vuotta sitten ja ensimmäisiä versioita alettiin käyttää Saksassa jo 70 vuotta sitten. SHS-kuivaamisen potentiaali on huomattu todella vasta viime vuosikymmenien aikana. Käytännössä SHS-kuivaimen kuivauskaasuna toimii tulistettu höyry yleisempien vaihtoehtojen, kuten ilman, savukaasun tai palokaasun sijasta. (Mujumdar 2009, 89.)

Teoriassa mikä tahansa suoratoiminen kuivain, jossa lämmön- ja kosteudensiirto toteutetaan väliaineen avulla, voidaan muuttaa SHS-kuivaimeksi. Käytännössä kuitenkin SHS-kuivaimessa teknologia on monimutkaisempaa ja siksi suora muutos on vaikea. SHS-kuivaimen ei esimerkiksi sallita yhtään vuotoa. Myös poistohöyryn puhdistaminen, sekä siitä lämmön talteen ottaminen on haastavaa. (Mujumdar 2009, 89.)

SHS-kuivaaminen tuo kuivaamisprosessiin myös etuja. SHS-kuivaimessa hapettuminen ja palaminen ovat mahdotonta, jolloin tulipalo ja räjähdysriskit ovat olemattomat. Tulistetun höyryn paremmat lämpöominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti auttavat tekemään prosessista huomattavasti nopeamman kuin ilmakeivauksessa. Ilmakeivauksessa muodostuu toisinaan kuivattavan materiaalin pintaan kova ulkokuori mikä estää kosteuden poistumisen kappaleesta. Tätä ei tapahdu kuivattaessa tulistetulla höyryllä ja se on iso etu. (Mujumdar 2009, 89–90.)

Poistohöyryn hyödyntäminen on tärkeää, kun pyritään mahdollisimman tehokkaaseen prosessiin. Jos poistohöyryä ei hyödynnetä, on prosessin energiatehokkuus samalla tasolla ilmakeivauksen kanssa, mutta jos se hyödynnetään, voidaan päästä energiatehokkaisiin tuloksiin. Haastetta lämmöntalteenottoon tuo poistohöyryn likaisuus. Useimmista kuivattavista aineista jää kuivauskaasuun partikkeleita, jotka voivat heikentää lämmöntalteenottolaitteiston toimivuutta, tehokkuutta tai jopa hajottaa laitteiston. Tämän vuoksi tarvitaan kattava laitteisto

höyryn puhdistamiseen ennen kuin lämpö voidaan ottaa talteen. (Mujumdar 2009, 89–90.)

Käytännössä kuivausprosessi on hyvin samanlainen kuin missä tahansa suoratoimisessa kuivaimessa. Alkulämpenemisvaiheessa kuivattavan materiaalin sisäinen paine ja lämpötila nousevat kuivauskaasun paineeseen ja sisäinen kosteus höyrystyy. Vakiokuivumisen vaiheessa tulee ensimmäinen ero tavallisen kuivaimen ja SHS-kuivaimen välillä. Materiaali on vielä tasaisesti kostea, kuten aina, mutta SHS-kuivaimessa kuivumista hidastaa ainoastaan lämmön siirtyminen kappaleessa, sillä ilman puutteen vuoksi kappaleen pinnalle ei muodostu rajakerrosta. Hidastuvan kuivumisen vaiheessa on kappaleen pinta jo kuivunut, mutta sisällä on yhä kosteutta. Tämän seurauksena materiaalin lämpötila alkaa nousta ja sen mukana sisäinen paine alkaa nousta. Tässä vaiheessa painegradientti alkaa pakottaa kosteutta ulos kappaleesta. Hidastuvan kuivumisen vaiheessa kuivumista rajoittaa joko kappaleen permeabiliteetti tai lämmönsiirtokerroin. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 150–151.)

6 Kuivaimen mitoittamisperiaatteita

Aiemmissä luvuissa esiteltiin kuivumiseen vaikuttavia sisäisiä ja ulkoisia muuttujia. Seuraavissa luvuissa käydään läpi, kuinka laskenta suoritetaan käyttäen näitä muuttujia. Tarkoituksena ei ole käydä läpi kaikkia mahdollisia kuivaimen mitoittamisperiaatteita, vaan keskittyä niihin, joita käytetään opinnäytetyön tuotoksena olevassa mitoitusohjeessa.

6.1 Toimeksiantajan tarvitsemat yksilöidyt muuttujat

Kuivaaminen on monimutkainen prosessi, johon liittyy useita eri muuttujia ja menetelmiä niin materiaalien, lämmönsiirron kuin massansiirronkin kautta. Tämän vuoksi toimeksiantaja on rajannut joitain muuttujia, jotta laskentapohja olisi toimiva juuri heidän yritykselleen. Toimeksiantaja rajasi kuivaintyyppin SHS-

kuivaimeen ja sen mekaaniset ratkaisut suurelta osin, kuten myös kuivattavan materiaalin. Tämä tarkoittaa, että materiaaliin liittyvät muuttujat ovat tunnettuja, kuten myös suuri osa ympäristön muuttujista.

6.2 Kosteuden siirtyminen kuivattavassa materiaalissa

Mitoitusohjeessa käytetään Darcyn lakia aineensiirron määrittämisessä, koska höyryatmosfäärissä ei voi käyttää aineensiirron laskentaan diffuusiomalleihin perustuvia aineensiirtomalleja, sillä höyryatmosfäärissä ei ole ilman tai savukaasun aiheuttamia konsentraatioeroja tai diffuusiiovastusta. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 149.)

Painegradientista johtuvaa virtausta yleensä mallinnetaan Darcyn lailla. Darcyn laissa virtausta ajavana voimana toimii painegradientti eli paine-ero ympäristön ja kuivattavan kappaleen välillä. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 48-49.) Darcyn laki (kaava 1) on alun perin kokemuseräiseen tutkimukseen perustuva laskentamenetelmä ja se voidaan myös johtaa esim. Navier-Stokesin liikemääräyhtälöstä (Seppälä & Lampinen 2004, 139.)

$$m'' = -\frac{K}{\nu} * \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

Kaavassa 1 m'' tarkoittaa kaasun tai nesteen virtausta, eli kuivauksen yhteydessä se on sama kuin haihtumisnopeus. K on materiaalin permeabiliteetti, eli materiaalin läpäisevyyttä kuvaava luku. ν on virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti ja $\frac{\partial p}{\partial z}$ on painegradientti eli paine-eron ja niiden välissä olevan materiaalin paksuus. Darcyn laki on yksi monista menetelmistä, joilla esitetään nesteen tai kaasun virtausta huokoisessa kappaleessa. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 48-49.) Kaavassa 2 määritetään haihtumisnopeus keskimääräisestä kappaleesta. Kaava on yleinen massavirran kaava. Kaavassa 2 \dot{m}_v on veden massavirta prosessiin, A_{ave} on keskimääräisen kappaleen ulkopinta-ala, eli pinta-ala jonka läpi neste virtaa ja $t_{kuivaus}$ on haluttu kuivausaika.

$$m'' = \frac{\dot{m}_v}{A_{ave} * t_{kuivaus}} \quad (2)$$

6.3 Lämmön siirtyminen kuivattavassa kappaleessa

Mitoitusohjeessa arvioidaan lämmön siirtymistä kuivattavan kappaleen sisällä niin sanottua keskitetyn järjestelmän mallia (Lumped system model) apuna käyttäen. Tällä laskentamenetelmällä voidaan joissakin lämmönsiirron ongelmassa yksinkertaistaa laskentaa. Tässä laskentamenetelmässä valitaan keskimääräinen kappale kuvaamaan koko kuivattavaa massaa. Kyseisen kappaleen sisälämpötilan voidaan kuvitella olevan yhtenäinen koko lämmönsiirtoprosessin ajan, jolloin laskenta voidaan yksinkertaistaa ja lämmönsiirtymää voidaan arvioida puhtaasti ajan funktiona. (Cengel 2002, 210–211.)

Lämmönsiirtymisen käsittely aloitetaan mitoitusohjeessa laskemalla konvektiivisen lämmönsiirronkerroin h . Konvektiivisen lämmönsiirron kerroin määritellään lämpövirtana, pinta-alan yksikköä ja lämpötilaeron yksikköä kohden. Määritelmä kuulostaa melko yksinkertaiselta, mutta todellisuudessa sen arvo riippuu useista eri muuttujista. Yleensä virtauksen lämmönsiirtoa käsitellessä, käytetään erinäisiä yksiköttömiä muuttujia, kuten Reynoldsin, Prandltin ja Nusseltin lukuja. Nusseltin lukua käytetään konvektiivisen lämmönsiirto kertoimen määrittämisessä. Nusseltin numero kuvastaa lämmönsiirron paranemista, konvektion johdosta suhteessa pelkkään lämmönjohtumisen tuottamaan lämpövirtaan. (Cengel 2002, 334–336.)

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (3)$$

Kaavassa 3 Nu on Nusseltin luku, h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, L_c on lämmitettävän kappaleen pituus, k on lämmönjohtuvuuden kerroin. (Cengel 2002, 336.)

Prandltin luku on yksikötön muuttuja, jota käytetään laskettaessa kappaleen pinnalla olevan lämpökerroksen nopeutta ja paksuutta. Prandltin luku määritellään seuraavalla kaavalla (kaava 4). (Cengel 2002, 341–342.)

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4)$$

Prandltin luvun kaavassa (kaava 4) Pr , on Prandltin luku, μ on virtaavan aineen dynaaminen viskosteetti ja C_p on virtaavan aineen lämpökapasiteetti. (Cengel 2002, 341–342.)

Reynoldsin luku kuvaa virtaavan materiaalin virtaustapaa. Virtaus voi olla laminaaria, eli kulkea sulavasti ja suoraviivaisesti virtauksen suunnassa tai turbulentiä, eli kulkea kaoottisesti vaihtelevalla nopeudella eri pisteissä ja muutenkin hyvin epäjärjestelmällisesti. Reynoldsin luku kuvaa suhdetta inertiaivoimien ja viskoosivoimien välillä. Reynoldsin luku määritetään seuraavalla kaavalla (kaava 5). (Cengel 2002, 343.)

$$Re = \frac{VLc}{\nu} \quad (5)$$

Kaavassa 5 Re on Reynoldsin luku, V on virtaavan aineen nopeus, Lc on kappaleen pituus, jonka yli virtaus kulkee ja ν on virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti. (Cengel 2002, 343.)

Ratkaistaessa lopullista konvektiivista lämmönsiirtokerrointa on tärkeä huomioida useita eri muuttujia, kuten onko virtaus pakotettu vai vapaa ja onko virtaus turbulenti vai laminaari. Tärkeää on huomioida myös, onko virtaus sisäistä vai ulkoista ja onko virtaus yksi-, kaksi- vai kolmiulotteista. (Cengel 2002, 337-338.) Mitoitusohjeessa tarvitaan kahta eri konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämistä.

Ensimmäistä konvektiivista lämmönsiirtokerrointa tarvitaan laskettaessa lämmönsiirtoa kuivattavaan materiaaliin. Kyseisessä tapauksessa käytetään Churchillin ja Bernsteinin menetelmää (kaava 6), arvioitaessa lämmönsiirtokerrointa lieriön muotoisen kappaleen ympäri. (Cengel 2002, 385.)

$$Nu_{Cyl} = \frac{hD}{k} = \frac{0,3+0,62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (6)$$

Toista konvektiivista lämmönsiirtokerrointa tarvitsen laskettaessa lämmönsiirtoa tulistimessa. Kyseisessä tapauksessa käytetään Dittus-Boelterin korreltaatiota (kaava 7). Dittus-Boelterin korrelaatiota käytetään arvioitaessa lämmönsiirtokerrointa sileässä putkessa. (Cengel 2002, 441)

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} \quad (7)$$

Ennen kuin voidaan laskea lämmönsiirtymistä keskitetyn järjestelmän mallilla, täytyy laskea Biot-luku (kaava 8). Biot-luku kertoo kappaleen sisäisen lämpöenergian siirtymisen ja kappaleen ulkopintaan siirtyvän lämpöenergian suhteen. Biot-luvun tulisi olla mahdollisimman lähellä nollaa, jolloin kappaleen pintaan siirtyvä lämpö johtuu suoraan kappaleen keskiosaan asti. Jotta Biot-luku olisi nolla, tarvittaisiin kappale, joka ei vastusta lämmönsiirtymistä lainkaan. Todellisuudessa Biot-luvun tulisi olla $Bi < 0,1$, mutta Biot-luku voi olla suurempikin. Suuremmasta Biot-luvusta seuraa epätarkkuutta lämmönsiirron arviointiin. (Cengel 2002, 211–212.)

$$Bi = \frac{L_c/k}{1/h} \quad (8)$$

Biot-luvun tarkastelun jälkeen voidaan siirtyä itse lämmönsiirtymisen arviointiin. Cengel kuvaa, kuinka termodynamiikan ensimmäisestä pääsäännöstä, johdetaan kaava 12. Johtaminen alkaa kaavasta 9, jossa on käytännössä esitetty, kuinka järjestelmään tulevan energia määrän tulee vastata järjestelmän energiamäärän nousua. Kaavassa oletetaan, että kappaleen lähtölämpötila T on eri kuin ympäristön lämpötila T_∞ . Kaavassa 9 dt on aika väli ja dT on aika välissä tapahtuva lämpötilan muutos. Kaavassa 9 V on lämmitettävän kappaleen tilavuus, A lämmitettävän kappaleen ulko pinta-ala ja C_p on materiaalin ominaislämpökapasiteetti. (Cengel 2002, 210–211.)

$$hA(T_{\infty} - T)dt = mc_p(T - T_{\infty}) \quad (9)$$

Kun huomioidaan, että $m = \rho V$ ja $dT = d(T - T_{\infty})$. Koska T_{∞} on vakio, voidaan kaava 9 muotoilla kaavaksi 10. (Cengel 2002, 210–211).

$$\frac{d(T - T_{\infty})}{T - T_{\infty}} = -\frac{hA}{\rho V c_p} dt \quad (10)$$

Kun kaava 10 integroidaan ajan hetkestä $t=0$, haluttuun ajan hetkeen t saadaan kaava edelleen johdettua muotoon (kaava 11) (Cengel 2002, 210–211).

$$\ln \frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = -\frac{hA}{\rho V c_p} t \quad (11)$$

Kun kaavasta 11 otetaan eksponentti, saamme kaavan seuraavaan muotoon (kaava 12): (Cengel 2002, 210–211).

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-bt} \quad (12)$$

jossa muuttuja b määritellään seuraavasti (kaava 13) (Cengel 2002, 210–211).

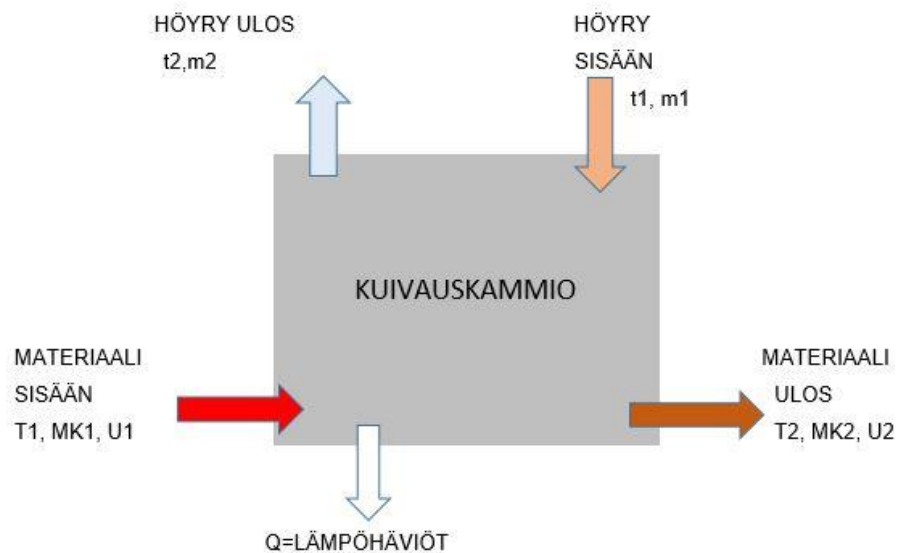
$$b = \frac{hA}{\rho V c_p} \quad (13)$$

Kaavasta 12 voidaan ratkaista kappaleen lämpötila tietyllä ajan hetkellä tai kauanko aikaa menee, jotta kappale lämpenee tiettyyn lämpötilaan. Kappaleen lämpötila nousee eksponentiaalisesti, eli aluksi lämpötila lähtee nousemaan nopeasti, mutta hidastuu ajan myötä. Kun kaavalla 12 saadaan ratkaistua lämpötila tietyllä ajan hetkellä, voidaan laskea konvektiivisen lämmönsiirron nopeus Newtonin jäähtymislakia käyttäen (kaava 14). Kaavassa 14 $\dot{Q}(t)$ on lämmönsiirron määrä ajan hetkestä 0 ajan hetkeen t . (Cengel 2002, 210–211.)

$$\dot{Q}(t) = hA_s [T(t) - T_{\infty}] \quad (14)$$

6.4 Kuivaimen massa- ja energiataseet

Massa- ja energiataseet ovat yhteen- ja vähennyslaskuja. Lasketaan yhteen prosessiin tulevat massat tai energiat ja niistä vähennetään poistuvat massat ja energiat. Lopputuloksena saadaan paljonko prosessiin jää energiaa tai massaa. Prosessiin jäänyttä osaa kutsutaan kertymäksi. Prosessin alussa ja lopussa kertymää tulisi muodostua, mutta jatkuvatoimimisissa prosesseissa kertymän tulisi olla nolla. (Mujumdar 2015, 52)



Kuva 1. Kuivauskammion massa- ja energia virrat

Kuivauskammioon tulevia virtoja merkitään positiivisilla luvuilla ja poistuvia virtoja negatiivisilla, näillä tiedoilla voidaan muodostaa seuraavat kaavat massa- ja energiataseelle. (Kaavat 15 ja 16.) (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 102.)

$$m_1 + M_{K1} = m_2 + M_{K2} \quad (15)$$

Kaavassa 15, m kuvaa sisään ja ulos kulkevaa höyryn määrää. M on kuivattavan materiaalin massavirta. Kuivattavan materiaalin massavirta sisältää myös kuivattavan materiaalin sisältämän kosteuden (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 102.)

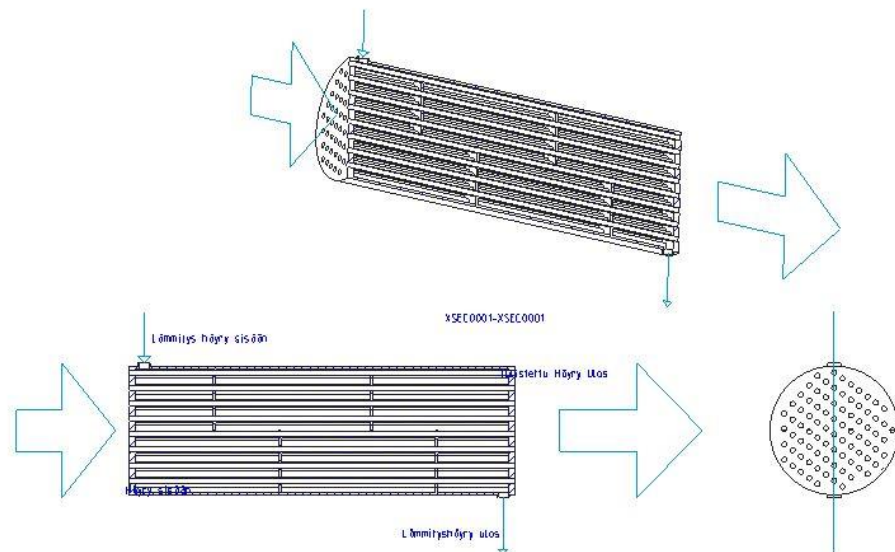
$$m_1 * h_1 + M_{K1} * i_{K1} = m_2 * h_2 + M_{K2} * i_{K2} + Q \quad (16)$$

Kaavassa 16 tarkastellaan kuivauskammion energiatasapainoa. Sisään tulevan energian tulee olla yhtä suuri kuin poistuvan energian. Kaavassa höyryn entalpia h pitää tarkistaa höyrytaulukoista ja kostean materiaalin entalpia i voidaan laskea kaavalla 17. (Holmberg & Ramm-Schmidt 2015, 102–103.)

$$i = c_{pk} * T + u * c_{pv} * T \quad (17)$$

6.5 Tulistimen laskenta

Toimeksiantajan valitsema tulistin malli toimii samalla tavalla kuin tavallinen putkilämmönsiirrin. Ensiöpuolella on huomattavasti kuumempaa höyryä, kuin kuivauskaasun puolella ja toisio puolella on kuivaushöyry. Kuivaushöyry kulkee putkia pitkin kuumemman höyryn läpi, jonka aikana lämpö siirtyy lämmityshöyrystä kuivaushöyryyn.



Kuva 2: Tulistimen toiminta

Kuvassa oleva lämmönsiirrin voidaan luokitella rekuperatiiviseksi putkilämmönsiirtimeksi, jossa on ristivirtaus. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 4.) Kuvassa kuivaimessa kulkeva höyry saapuu tulistimeen vasemmalta ja poistuu oikealta takaisin kuivauskammioon. Kuivaus höyry kulkee suoraa vaakaputkia pitkin tulistimen läpi. Tulistimen vaipassa on korkeapaineista kuumaa höyryä, joka siirtää lämpöenergiansa tulistinputkien kautta kuivaushöyryyn. Tärkeää huomioitavaa kyseisessä mallissa on se, että höyry kulkee koko ajan lähes kohtisuorassa tulistinputkiin nähden ja ohjauslevyt edesauttavat sitä, että lämmityshöyry on turbulenttia, jolloin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on korkeampi. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 4–8).

Jotta yhteys aineiden lämpötilojen, virtauksen, väli pinta-alojen ja lämmönsiirtymisen välille voidaan muodostaa, tarvitaan kaksi eri yhtälöä. Kaava 18 kuvaa energian säilymistä tulistimen lävitse riippumatta virtausolosuhteista. Kaava 19 kuvaa lämmönsiirtoa tulistimen kaasujen välillä. (Thulukkanam 2013, 39).

$$q = (\dot{m} * c_p)_h * (t_{h,i} - t_{h,o}) = (\dot{m} * c_p)_c * (t_{c,i} - t_{c,o}) \quad (18)$$

$$q = UA * \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{lm}}{R_0} \quad (19)$$

Kaavassa 18 kerrotaan massavirran ja lämpökapasiteetin tulo, kaasun sisään- ja ulostulo lämpötilojen erotuksella. Ala-indeksit h ja c viittaavat kylmään ja lämpimään puoleen eli kylmä puoli on kuivaushöyryyn puoli ja kuuma lämmin puoli on tulistin höyryyn puoli. Kaavassa 19 muuttuja ΔT_{lm} on logaritminen keskilämpötilaero (kaava 22). Kaavassa 19, muuttuja UA on lämmönläpäisyyluku, joka riippuu useista eri tekijöistä. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 9–10.) Lämmönläpäisyyluku UA lasketaan kaavalla 20.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(hA)_c} + \frac{R_{f,c}''}{A_c} + \frac{1}{(hA)_h} + \frac{R_{f,h}''}{A_h} + R_w \quad (20)$$

Lämmönläpäisyyluku on tärkeä muuttuja lämmönsiirtimien mitoittamisessa. Lämmönläpäisyyluku riippuu konvektiivisesta lämmönsiirtokertoimesta, kaasujen väli-

sen aineen materiaalista (kaava 21) (R_w), likaantumisesta (R_f), mahdollisesta riipojen käytöstä sekä tietenkin pinta-alasta. Likaantumistekijä voidaan katsoa taulukoista, joissa on määritelty likaantumistekijöitä riippuen virtaavasta aineesta. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 10–11).

$$R_w = \frac{\ln\left(\frac{D_h}{D_c}\right)}{2\pi k L} \quad (21)$$

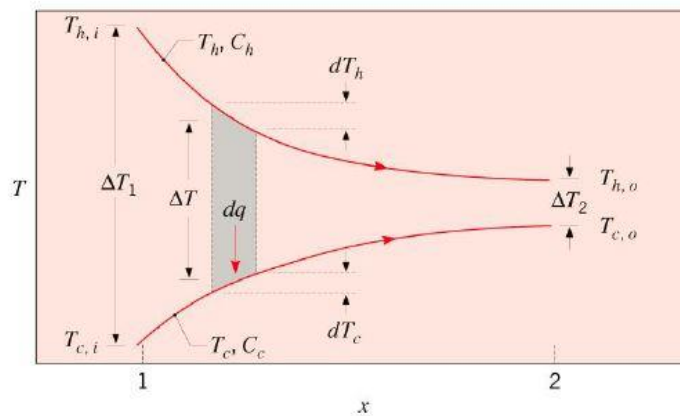
Kaavalla 21 lasketaan kaasut erottavan seinämän lämpöresistanssi. Kaava 21 on ympyrän muotoiselle väliseinälle, eli putkelle. Kaavassa on tärkeää huomioida, että käytetään putkimateriaalin lämmönjohtavuutta. (Thulukunam 2013, 39–40).

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (22)$$

Kaavalla 22 lasketaan logaritminen keskilämpötilaero. Kyseinen kaava on juuri lämmönsiirtimille, joissa lämmityskaasu ja lämmitettävä kaasu virtaavat samaan suuntaan, eli myötävirtaan. Muuttujat ΔT_1 ja ΔT_2 ovat lämpötilaerot (kuva 3), jotka määritellään seuraavasti. (kaavat 23 ja 24) (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014, 18–19.)

$$\Delta T_1 = \Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,i} \quad (23)$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,o} \quad (24)$$



Kuva 3: Keskilämpötila erojen kuvaaja (Lappeenrannan teknillinen yliopisto)

7 Tuotoksena taulukkopohjainen mitoitusohje

Alkuperäinen ajatus oli muodostaa niin yksinkertainen ohje, että lähes kuka tahansa voisi mitoittaa tulistimen putket sen avulla. Käytännössä, laskentaan liittyy niin monia muuttujia ja erilaista laskentaa, että käyttäjän on tunnettava mitoitusperiaatteet, sekä tiedettävä mitä muuttujia taulukossa pitää muuttaa tilanteiden muuttuessa. Toisaalta asiansa tunteva käyttäjä voi saada pohjasta vastauksen yhdellä läpikäynnillä ja säästää useita tunteja tai jopa päiviä laskennasta.

Excelin toiminta on helpoin tarkastella esimerkin avulla. Esimerkissä käytetyt arvot on saatu toimeksiantajalta ja ovat vain esittely tarkoitukseen. Normaalisti laskentapohjaa käytettäessä, tulee käyttäjän tarkastella arvoja kriittisesti ja joitain arvoja tulee mahdollisesti määrittää kokeellisesti.

Excel taulukko koostuu kahdestatoista sivusta:

1. Aloitus
2. Lähtöarvot
3. Kosteuden siirtyminen
4. Lämpeneminen 1
5. Lämpeneminen 2
6. Kuivaushöyryn määrä
7. Kuivaushöyryn lämpötilat
8. Energiatase
9. Massatase
10. Tulistimen mitoitus
11. SHS
12. Höyrystymislämpötilat

| | | |
|--|----------|--|
| Anna massavirta: | 1 | kg/h |
| Tulistin putken pituus: | 1 | m |
| Tarkistus: | -70,0814 | Tulistimen laskennallisen pinta-alan ja toteutuvan pinta-alan erotus. Muuta tulistin putken pituutta, kunnes erotus on mahdollisimman lähellä arvoa 0 |
| Käyttö: | | |
| 1. Aseta haluttu massavirta ja aseta arvio tulistinputken pituudesta | | |
| 2. Siirry sivulle "lähtöarvot" ja tarkista solujen arvot. Lähtöarvot vaihtelevat prosessin muuttujista ja materiaalista riippuen (Tarkistettavat arvot oranssilla pohjalla) | | |
| 3. Kosteuden siirtyminen sivulla tarkastellaan, kuinka kuumaksi kuivattava tuote tulee lämmitettäväksi, jotta saavutetaan haluttu kuivausnopeus | | |
| 4. Lämpeneminen 1 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee saapumislämpötilasta höyrystymislämpötilaan | | |
| 5. Lämpeneminen 2 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee höyrystymislämpötilasta "Kosteuden siirtyminen" sivulla määritettyyn lämpötilaan | | |
| 6. Kuivaushöyryn määrä sivulla tarkastellaan tarvittava kuivaushöyryn määrä lämmönsiirron ja tarvittavan lämpöenergian määrän perusteella. | | |
| 7. Kuivaushöyryn lämpötilat sivulla tarkastellaan kuivaushöyryn lämpötilaa ennen ja jälkeen tulistimen. | | |
| 8. Energiatase sivulla tarkastellaan prosessin energiatase | | |
| 9. Massatase sivulla tarkastellaan prosessin massatase | | |
| 10. Tulistimen mitoitus sivulla tarkastellaan, tulistin putkien pituutta lämmönsiirron ja lämpötilojen perusteella | | |
| 11. SHS sivulla on luetteloitu tulistetun höyryn ominaisuuksia 0.98 bar(a) paineessa | | |
| 12. Höyrystymislämpötilat sivulla on luetteloitu höyryn ominaisuuksia eri paineissa | | |

Kuva 4: Aloitus-sivu ilman arvoja

Aloitus-sivulla on kaksi tarkoitusta. Prosessin alussa mitoitusohjeen käyttäjä asettaa Aloitus-sivulle (kuva 4) halutun kuivattavan materiaalin massavirran. Myöhemmin käyttäjä palaa tälle sivulle arvioimaan tulistinputkien pituuden, mutta ensin tulee käydä läpi muut sivut. Aloitus-sivulla on myös lyhyt kuvaus laskenta-pohjan toiminnasta ja käytämisestä.

| | | |
|--|----------|--|
| Anna massavirta: | 2800 | kg/h |
| Tulistin putken pituus: | 1 | m |
| Tarkistus: | 67,14372 | Tulistimen laskennallisen pinta-alan ja toteutuvan pinta-alan erotus. Muuta tulistin putken pituutta, kunnes erotus on mahdollisimman lähellä arvoa 0 |
| Käyttö: | | |
| 1. Aseta haluttu massavirta ja aseta arvio tulistinputken pituudesta | | |
| 2. Siirry sivulle "lähtöarvot" ja tarkista solujen arvot. Lähtöarvot vaihtelevat prosessin muuttujista ja materiaalista riippuen (Tarkistettavat arvot oranssilla pohjalla) | | |
| 3. Kosteuden siirtyminen sivulla tarkastellaan, kuinka kuumaksi kuivattava tuote tulee lämmitettäväksi, jotta saavutetaan haluttu kuivausnopeus | | |
| 4. Lämpeneminen 1 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee saapumislämpötilasta höyrystymislämpötilaan | | |
| 5. Lämpeneminen 2 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee höyrystymislämpötilasta "Kosteuden siirtyminen" sivulla määritettyyn lämpötilaan | | |
| 6. Kuivaushöyryn määrä sivulla tarkastellaan tarvittava kuivaushöyryn määrä lämmönsiirron ja tarvittavan lämpöenergian määrän perusteella. | | |
| 7. Kuivaushöyryn lämpötilat sivulla tarkastellaan kuivaushöyryn lämpötilaa ennen ja jälkeen tulistimen. | | |
| 8. Energiatase sivulla tarkastellaan prosessin energiatase | | |
| 9. Massatase sivulla tarkastellaan prosessin massatase | | |
| 10. Tulistimen mitoitus sivulla tarkastellaan, tulistin putkien pituutta lämmönsiirron ja lämpötilojen perusteella | | |
| 11. SHS sivulla on luetteloitu tulistetun höyryn ominaisuuksia 0.98 bar(a) paineessa | | |
| 12. Höyrystymislämpötilat sivulla on luetteloitu höyryn ominaisuuksia eri paineissa | | |

Kuva 5: Aloitus-sivu esimerkki arvoilla

Käyttäjät aloittaa asettamalla massavirran aloitus-sivulle, esimerkissä käytetään massavirtana 2800 kg/h. Käyttäjät asettaa myös arvion tulistinputken pituudesta, joka ei vielä kerro todellista putken pituutta. (kuva 5)

| Materiaali | | | |
|--|--|-------------|--------------------|
| Kuivattava Materiaali | | | |
| Symboli | Ominaisuus | Arvo | Yksikkö |
| k | Permeabiliteetti | 1,1E-13 | m ² |
| ρ_a | Tiheys (Alussa) | 1762 | kg/m ³ |
| ρ_l | Tiheys (Lopussa) | 1893,4 | kg/m ³ |
| λ | Lämmönjohtavuus | 0,55 | W/mK |
| T_a | Lämpötila (Saavuttaessa kuivaus kammioon) | 333,15 | K |
| η | (sisäisen kosteuden) Dynaaminen viskositeetti | 1,22365E-05 | Pa * s |
| ν | (sisäisen kosteuden) Kinemaattinen viskositeetti | 2,37602E-05 | m ² / s |
| $Q_{h,v}$ | Veden höyrystymislämpö | 2257000 | J/kg |
| Keskimääräisen kappaleen mekaaniset ominaisuudet | | | |
| D | Halkaisija | 0,08 | m |
| s | Kuivan kuori-osan paksuus | 0,01 | m |
| V | Tilavuus | 0,000402124 | m ³ |
| m | Paino | 0,708542241 | kg |
| A_{sis} | Kostean sisä-osan pinta-ala | 0,0169646 | m ² |
| A_{ulk} | Kuivan ulkokuoren pinta-ala | 0,030159289 | m ² |
| A_{kesk} | Kuivan ja kostean keskim. pinta-ala | 0,023561945 | m ² |
| V_v | Sisäisen veden tilavuus | 8,04248E-05 | m ³ |
| V_{ka} | Kuiva-aineen tilavuus | 0,000321699 | m ³ |
| m_v | Veden paino | 0,141708448 | kg |
| m_{ka} | Kuiva-aineen paino | 0,566833793 | kg |
| t | Kuivaus-aika | 600 | s |
| G | Kappale virta | 1,097715469 | kpl/s |
| G/h | Kappaletta tunnissa | 3951,775687 | kpl/h |
| Kuivattavan materiaalin lämpöominaisuudet | | | |
| \dot{m}_a | Massavirta sisään | 0,777777778 | kg/s |
| W_a | Kosteus (Alussa) | 20 % | MwMka |
| W_l | Kosteus (Lopussa) | 2 % | MwMka |
| C_v | Lämpökapasiteetti (Vesi) | 4186 | J/(kg*K) |
| C_{ka} | Lämpökapasiteetti (Kuiva-aine) | 2270 | J/(kg*K) |
| $C_{p,a}$ | Lämpökapasiteetti (Alussa) | 2653,2 | J/(kg*K) |
| $C_{p,h}$ | Lämpökapasiteetti (Ympäristön lämpötilassa) | 2214,438 | J/(kg*K) |
| $C_{p,l}$ | Lämpökapasiteetti (Lopussa) | 2308,32 | J/(kg*K) |
| $\dot{m}_{v,s}$ | Veden massavirta sisään | 0,155555556 | kg/s |
| $\dot{m}_{k,s}$ | Kuiva-aineen massavirta sisään | 0,622222222 | kg/s |
| $\dot{m}_{v,u}$ | Veden massavirta ulos | 0,015555556 | kg/s |
| $\dot{m}_{k,u}$ | Kuiva-aineen massavirta ulos | 0,622222222 | kg/s |
| \dot{m}_u | Massavirta ulos | 0,637777778 | kg/s |

Kuva 7: Lähtöarvot-sivun materiaalin tiedot esitetyttynä

Kuvassa 7 on esitelty laskentaesimerkin materiaali tiedot. Ylemmässä osiossa näkyy kuivattavan materiaalin ominaisuudet ja keskimääräisessä on keskimääräisen kappaleen mekaaniset ominaisuudet. keskimääräisessä osiossa on myös kuivaus-aika, jonka avulla määritetään kuivausnopeus kappaleelle. Alimmassa osiossa käsitellään kuivattavan materiaalin lämpöominaisuudet.

| Prosessi | | | |
|---------------|--|-------------|--------------------|
| Kuivauskaasu | | | |
| Symboli | Ominaisuus | Arvo | Yksikkö |
| ρ | Paine | 98000 | Pa |
| T_p | Painetta vastaava kiehumislämpötila | 372,2285 | K |
| η | Dynaaminen viskositeetti | 1,28346E-05 | Pa * s |
| ρ | Tiheys | 0,515 | kg/m ³ |
| ν | Kinemaattinen viskositeetti | 2,49216E-05 | m ² /s |
| C_p | Lämpökapasiteetti | 1992,19 | J/(kg*K) |
| λ | Lämmönjohtavuus | 0,0188 | W/mK |
| T_h | Lämpötila (tulistimen jälkeen) | 438,16 | K |
| T_c | Lämpötila (ennen tulistinta) | 378,16 | K |
| T_{ave} | Lämpötila (keskimääräinen lämpötila) | 405 | K |
| ν | Ominaisilavuus | 1,80554 | m ³ /kg |
| $E_{s,h}$ | Ominaisentalpia (tulistimen jälkeen) | 2805970,092 | J/kg |
| $E_{s,c}$ | Ominaisentalpia (ennen tulistinta) | 2690253,272 | J/kg |
| E_{ave} | Ominaisentalpia (keskimääräinen) | 2736540 | J/kg |
| | | 2748111,682 | |
| Kuivauskammio | | | |
| D_{kk} | Halkaisija | 2,523132522 | m |
| L_{kk} | Pituus | 7,5 | m |
| A_{kk} | Pinta-ala (materiaalin kulkusuunnassa) | 4 | m ² |
| V_{kk} | Tilavuus | 30 | m ³ |

Kuva 8: Lähtöarvot-sivun prosessin tiedot esitetytynä

Kuvassa 8 on esitelty prosessiin liittyvät lähtöarvot. Ylemmässä osiossa käsitellään kuivauskaasun ominaisuuksia ja alemmassa kappaleessa on kuivauskammion mitat.

| Tulistin | | | |
|------------------------------------|---|---------|----------------|
| Tulistimen mekaaniset ominaisuudet | | | |
| Symboli | Ominaisuus | Arvo | Yksikkö |
| D_{tp} | Ulko-halkaisija (Tulistin putken) | 0,036 | m |
| L_{tp} | Pituus (Tulistin putken) | 2,1 | m |
| S_{tp} | Seinämän paksuus (Tulistin putken) | 0,0012 | m |
| n_{tp} | Lukumäärä (tulistin putkien) | 620 | kpl |
| A_{tp} | Tulistin putkien pinta-ala höyryn suunnassa | 0,63108 | m ² |
| $A_{tp,c1}$ | Vaipan pinta-ala alkuarvoilla | 147,253 | m ² |
| $A_{tp,c2}$ | Vaipan pinta-ala laskennallisesti | 137,264 | m ² |
| dA | Pinta-alan erotus | -9,9887 | m ² |
| λ | Lämmönjohtavuus | 17 | W/mK |
| Tulistin höyry | | | |
| Symboli | Ominaisuus | Arvo | Yksikkö |
| ρ_{tu} | Paine (tulistin höyry) | 120000 | Pa |
| T_{tu} | Lämpötila (tulistin höyry) | 465,16 | K |

Kuva 9: Lähtöarvot-sivun tulistimen tiedot esitetytynä

Kuvassa 9 esitellään tulistimen lähtötiedot. Ylemmässä osiossa on tulistimen mekaaniset ominaisuudet. Ylemmässä osiossa näkyy myös vaipan pinta-ala alkuarvoilla, sekä laskennallisesti tarvittava pinta-ala. Näiden arvojen avulla tulistinputkien pituus määritetään. Alemmassa kappaleessa on tulistin höyryn, eli kuuman puolen höyryn ominaisuudet.

| Määritetään kosteuden siirtymiseen vaadittava kappaleen lämpötila | | | |
|--|--|-------------------------|----------------------|
| k | Permeabiliteetti | 1,1E-13 | m ² |
| m'' | Haihtumisnopeus | 0,010023822 | kg/m ² *s |
| v | (sisäisen kosteuden) Kinemaattinen viskositeetti | 2,37602E-05 | m ² / s |
| L | Säde | 0,04 | m |
| dp | Paineen muutos | -86606,53177 | Pa |
| p_1 | Paine kuivaamisen alussa | 98000 | Pa |
| p_2 | Tarvittava paine | 184606,5318 | Pa |
| $T_{kuivaus}$ | Painetta vastaava höyryn lämpötila | 390,09 | K |
| | | | |
| | Tulos voidaan tarkistaa nettilaskurilla | Laskuri | |

Kuva 10: Kosteuden siirtyminen

Kosteuden siirtyminen sivulla lasketaan Darcyn lain (kaava 2) mukaan vaadittu paine-ero kappaleen ja ympäristön välille. Paine-eron perusteella saadaan määritettyä tarvittava sisälämpötila kappaleelle. Sivulla oleva lämpötila solu hakee painetta vastaavan höyrystymislämpötilan "Höyrystymislämpötilat" sivulta. Tällä sivulla käyttäjän tulee tarkistaa, että lämpötila on alle, kuivaushöyryn lämpötilan, sekä että se on yli kiehumislämpötilan. Kuvasta 10 nähdään, että mitoituspohja on hakenut laskentaan tarvittavat arvot lähtöarvot, sivulta ja laskenut tarvittavan paine-eron kappaleen ja ympäristön välille. Viimeinen solu on hakenut tarvittavan lämpötilan kappaleen sisälle.

| Määritetään ensin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin kuivattavalle kappaleelle, jonka jälkeen lasketaan kokonaislämmönsiirron määrä | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| Re | Reynoldsin luku | 253107,469 |
| Pr | Prandltin luku | 1,360051158 |
| | Churchill & Bernstein korrelaatio | 534,7437215 |
| h | Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin | 534,7437215 w/m ² K |
| | | |
| b | Lämmönsiirron aikavakio | 0,006702257 1/s |
| t | Lämmönsiirron aika | 109,8147986 s |
| T_{∞} | Ympäristön lämpötila | 408,16 K |
| T_i | Kappaleen alkulämpötila | 333,15 K |
| $T(t)$ | Kappaleen lämpötila ajanhetkellä t | 372,2285 K |
| $T_{s,ave}$ | Kappaleen keskimääräinen lämpötila | 352,68925 K |
| $T(t)-T_{\infty} / T_i-T_{\infty}$ | Lämpötilaero | 0,479022797 K |
| Luonnollinen logaritmi $(T(t)-T_{\infty} / T_i-T_{\infty})$ | Lämpötilaeron luonnollinen log | -0,73600709 K |
| $\ln(T_{\dots})=-bt$ | Ratkaise yhtälö | -5,60225E-08 |
| | | |
| $Q_{heat1} = m * C_p(T(t) - T_i)$ | Kokonaislämmönsiirto | 80642,3926 J/s |

Kuva 11: Lämpeneminen 1 -sivu

Kuvasta 11 voidaan nähdä, että tällä sivulla lasketaan ensimmäisenä Reynoldsin (kaava 4) ja Prandltin (kaava 5) luvut. Näiden avulla määritetään konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (kaava 6). Näiden määrittämisen jälkeen lasketaan kokonaislämmönsiirron määrä käyttämällä kaavaa 14. Tällä sivulla myös lasketaan keskitetyn järjestelmän menetelmällä tarvittava lämmitysaika keskimääräiselle kappaleelle käyttämällä kaavoja 12 ja 13, sekä hyödyntämällä Excelin ratkaisin toimintoa. Tällä sivulla lämpötilan muutos lasketaan vasta kammioon saapumislämpötilasta kammion painetta vastaavaan veden kiehumislämpötilaan.

| Määritetään ensin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin kuivattavalle kappaleelle, jonka jälkeen lasketaan kokonaislämmönsiirron määrä | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| Re | Reynoldsin luku | 253107,469 |
| Pr | Prandltin luku | 1,511777976 |
| | Churchill & Bernstein korrelaatio | 556,8586358 |
| h | Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin | 556,8586358 w/m ² K |
| | | |
| b | Lämmönsiirron aikavakio | 0,006979436 1/s |
| t | Lämmönsiirron aika | 99,11864249 s |
| T_{∞} | Ympäristön lämpötila | 408,16 K |
| T_i | Kappaleen alkulämpötila | 372,2285 K |
| $T(t)$ | Kappaleen lämpötila ajanhetkellä t | 390,09 K |
| $T_{s,ave}$ | Kappaleen keskimääräinen lämpötila | 381,15925 K |
| $T(t)-T_{\infty} / T_i-T_{\infty}$ | Lämpötilaero | 0,502901354 K |
| Luonnollinen logaritmi $(T(t)-T_{\infty} / T_i-T_{\infty})$ | Lämpötilaeron luonnollinen log | -0,687361243 K |
| $\ln(T_{\dots})=-bt$ | Ratkaise yhtälö | 0,004431027 |
| | | |
| $Q_{heat2} = m * C_p(T(t) - T_i)$ | Kokonaislämmönsiirto | 36858,9914 J/s |

Kuva 12: Lämpeneminen 2 -sivu

”Lämpeneminen 2” sivulla lasketaan edellisessä kappaleessa mainitulla tavalla lämmitysaika, sille kun kappale lämpenee veden kiehumislämpötilasta tarvittavaan sisälämpötilaan, mikä laskettiin sivulla ”Kosteuden siirtyminen” Samalla saadaan laskettua kokonaislämmönsiirron määrä, sille kun kappale lämmitetään. Sivulla käytetään samoja laskentakaavoja kuin sivulla ”lämpeneminen 1”. Kuvasta 12 voi nähdä, että sivu on lähes samanlainen kuin edellinen.

| Lasketaan tarvittava höyryn virtaus lämmöntarpeen perusteella | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--|
| \dot{m}_{sv} | Haihdutettavan veden massavirta | 0,07778 kg/s | |
| Q_{heat1} | Lämpeneminen 1 | 80642,4 J/s | |
| Q_{heat2} | Lämpeneminen 2 | 36859 J/s | |
| Q_{vap} | Haihduttamiseen tarvittava energia | 175544 J/s | |
| Q_{tot} | Kokonais lämmöntarve | 293046 J/s | |
| $\dot{m}_{höyry}$ | Höyryn massavirta | 2,53244 kg/s | |
| $\dot{V}_{höyry}$ | Höyryn tilavuusvirta | 4,57242 m ³ /s | Tarvittu tilavuusvirta voi olla pienempi, kuin haluttu massavirta |
| $\dot{V}_{höyry2}$ | Asetettu höyryn tilavuusvirta | 10 m ³ /s | Liian pieni tilavuusvirta johtaa liian hitaaseen höyryn nopeuteen, |
| V_{kammio} | Höyryn nopeus kammiossa | 2,5 m/s | mikä hidastaa prosessia |
| $V_{tulistin}$ | Höyryn nopeus tulistimessa | 15,8458 m/s | |

Kuva 13: Kuivaushöyryn määrä -sivu

”Kuivaushöyryn määrä” sivulla laskemme, kuinka suuren massavirran höyryä tarvitsemme, jotta saavutamme halutun lämpenemisnopeuden, sekä halutun kuivausnopeuden. Kuvasta 13 näkee kuinka, laskenta etenee tällä sivulla. Sivulla aloitetaan laskenta laskemalla yhteen aiemmilla sivuilla laskettu kokonaislämmönsiirron määrä, sekä haihtumiseen tarvittava lämpöenergia. Tämä jälkeen lasketaan höyrynmassavirta kokonaislämmöntarpeen ja höyryn ominaisentalpian muutoksen perusteella. Tämä jälkeen saadaan laskettua myös höyryn tilavuusvirta massavirran ja ominaistilavuuden perusteella.

| Lasketaan höyryn lämpötila ennen tulistinta ja tulistimen jälkeen | | |
|--|--|-------------------------------|
| Aiempien sivujen laskuissa on käytetty keskimääräistä höyryn lämpötilaa, mutta tulistimen mitoittamista varten tarvitsemme höyryn lämpötilat ennen ja jälkeen tulistimen | | |
| h | Keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerron | 545,801179 W/m ² K |
| A_s | Lämpöä vastaanottava pinta-ala kammiossa | 23,8365494 m ² |
| $T_{s,ave}$ | Kuivattavan materiaalin keskimääräinen lämpötila (alusta tarvittavaan lämpötilaan) | 361,62 K |
| T_{∞} | Ympäristön keskimääräinen lämpötila | 405 K |
| $Q_{s,ave}$ | Keskimääräinen lämpöteho | -564374,53 J/s |
| v | Höyryn nopeus kammiossa | 2,5 m/s |
| L_{kk} | Kammion pituus | 7,5 m |
| t | Höyryn viipymä kammiossa | 3 s |
| V_{kk-mat} | Kammion tilavuus - Materiaalin tilavuus | 28,4108967 m ³ |
| ρ | Höyryn tiheys | 0,515 kg/m ³ |
| m_s | Höyryn massa kammiossa | 14,6316118 kg |
| E_{ave} | Keskimääräinen ominaisentalpia | 2736540 J/kg |
| Q_s | Höyryn lämpöenergian määrä kammiossa | 40039991 J |
| Q_{take} | Lämpöteho * viipymä -> paljonko energiaa höyrystä poistuu | -1693123,6 J |
| $Q_{s,out}$ | Höyryn lämpöenergian määrä poistuttaessa kammioista | 38346867,4 J |
| $E_{ave,out}$ | Keskimääräinen ominaisentalpia kammion jälkeen | 2620823,18 J/kg |
| E_{kk} | Entalpiän muutos | 115716,819 J/kg |
| $E_{in,est}$ | Arvioitu sisään tulo entalpia | 2805970,09 J/kg |
| $T_{in,est}$ | Vastaava lämpötila | 438,16 K |
| $E_{out,est}$ | Arvioitu poistumis entalpia | 2690253,27 J/kg |
| $T_{out,est}$ | Vastaava lämpötila | 378,16 K |

Kuva 14: Kuivaushöyryn lämpötilat

”Kuivaushöyryn lämpötilat” sivulla laskemme missä lämpötilassa kuivaushöyry saapuu kuivauskammioon ja missä lämpötilassa se poistuu sieltä. Tämä perustuu aiemmin ratkaistuihin arvoihin ja samalla vaikuttaa samoihin arvoihin, siksi tässä vaiheessa on tärkeää, että käyttäjä tekee iteratiivista prosessointia luvuille ja hakee optimaaliset arvot höyryn lämpötiloille, sekä mahdollisesti muuttaa aiempien sivujen arvoja tarpeen mukaan. Laskenta perustuu arvioon siitä paljonko höyryä kuivauskammiossa ja kuinka pitkä viipymä tällä höyry määrällä on. Tälle höyryn määrälle lasketaan kokonaisenergia määrä. Tämän jälkeen viipymän ja konvektiivisen lämmönsiirtokeroimen (kaava 6) perusteella arvioidaan, paljonko energiaa massata siirtyy kuivattavan materiaaliin. Tämän perusteella voidaan arvioida mikä höyryn lämpötilan täytyy olla sen saapuessa kammioon ja paljonko höyryn lämpötila on sen poistuessa kammioista. Kuvasta 14 voidaan nähdä, kuinka höyryn lämpötila muuttuu kammion läpimenon aikana.

| | | | |
|----------------|---|-----------------|--|
| Energia sisään | | | |
| m_1 | Höyryn massavirta kammioon | 2,53243937 kg/s | |
| h_1 | Kammioon tulevan höyryn ominaisentalpia | 2805970,09 J/kg | |
| M_{k1} | Kuivattavan aineen massavirta | 0,77777778 kg/s | |
| i_{k1} | Kuivattavan aineen ominaisentalpia | 883913,58 J/kg | |
| | Energia sisään | 7793437,46 J/s | |
| Energia ulos | | | |
| m_2 | Höyryn massavirta kammioista | 2,67243937 kg/s | |
| h_2 | Kammioista poistuvan höyryn ominaisentalpia | 2690253,27 J/kg | |
| M_{k2} | Kuivattavan aineen massavirta kammioista | 0,63777778 kg/s | |
| i_{k2} | Kuivattavan aineen ominaisentalpia | 1011413,49 J/kg | |
| | Energia ulos | 7793437,46 J/s | |
| | energia sisään - energia ulos | 0 J/s | |

Kuva 15: Energiatase

Kuvassa 15 olevalla energiataase sivulla lasketaan prosessin energioiden summat. Tällä tavoin varmistetaan, että prosessiin tuleva energia myös poistuu sieltä. Energiämäärät lasketaan kaavalla 16.

| | | | |
|--------------|--|----------|--|
| Massa sisään | | | |
| m_1 | Höyryn massavirta kammioon | 2,532439 | |
| M_{k1} | Kuivattavan aineen massavirta | 0,777778 | |
| | Massa sisään | 3,310217 | |
| Massa ulos | | | |
| m_2 | Höyryn massavirta kammioista | 2,672439 | |
| M_{k2} | Kuivattavan aineen massavirta kammioista | 0,637778 | |
| | Massa ulos | 3,310217 | |
| | Massa sisään - Massa ulos | 0 | |

Kuva 16: Massatase

Kuvassa 16 olevalla massatase sivulla lasketaan prosessin massojen summat. Tällä tavoin varmistetaan, että prosessiin tuleva massa myös poistuu sieltä. massataseet lasketaan kaavalla 15.

| Lasketaan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin tulistinputkelle, jonka jälkeen määritetään putken sisäpuolelle tarvittava pinta-ala käyttäen logaritmista lämpötilaeroa | | | |
|--|------|------------------------------------|--------------------------------|
| | Re | Reynoldsin luku | 22889,74 |
| | Pr | Prandtin luku | 1,360051 |
| h_c | | Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin | 41,75591 w/m ² K |
| q | | Lämpöteho | 293045,8 W (J/s) |
| U_c | | Lämmönläpäisykerroin | 41,6332 W/(m ² * K) |
| \bar{T} | | Logaritminen lämpötilaero | 51,27893 K |
| A_c | | Kylmän puolen pinta-ala | 137,2641 m ² |

Kuva 17: Tulistimen mitoitus

"Tulistimen mitoitus" sivulla (kuva 17) päästään itse tulistimen mitoittamiseen. Käyttäen aiemmillä sivuilla laskettuja kuivaushöyryn lämpötiloja, sekä kuivaushöyryn massavirtoja voimme arvioida tulistinputkien pituutta. Käytännössä "läh-
töarvot" sivulla on annettu jo putkien lukumäärä, sekä halkaisija, jolloin tällä si-
vulla lasketaan tulistinputkien tarvittavaa pinta-alaa ja samalla siitä ratkaistaan
putkien pituutta. (kaavat 19,20,21,22,23,24) Kuvasta 17, voidaan nähdä, että las-
kenta pohja on laskenut pinta-alan tulistinputkille. Kun käyttäjä on käynyt läpi
kaikki sivut tänne asti ja mitoituspohja on laskenut pinta-alan, tulee käyttäjän pa-
lata aloitus sivulle.

| | | |
|---|----------|---|
| Anna massavirta: | 2800 | kg/h |
| Tulistin putken pituus: | 2,1 | m |
| Tarkistus: | -9,98867 | Tulistimen laskennallisen pinta-alan ja toteutuvan pinta-alan erotus. |
| | | Muuta tulistin putken pituutta, kunnes erotus on mahdollisimman lähellä arvoa 0 |
| Käyttö: | | |
| 1. Aseta haluttu massavirta ja aseta arvio tulistinputken pituudesta | | |
| 2. Siirry sivulle "lähtöarvot" ja tarkista solujen arvot. Lähtöarvot vaihtelevat prosessin muuttujista ja materiaalista riippuen (Tarkistettavat arvot oranssilla pohjalla) | | |
| 3. Kosteuden siirtyminen sivulla tarkastellaan, kuinka kuumaksi kuivattava tuote tulee lämmitettäväksi, jotta saavutetaan haluttu kuivausnopeus | | |
| 4. Lämpeneminen 1 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee saapumislämpötilasta höyrystyslämpötilaan | | |
| 5. Lämpeneminen 2 sivulla tarkastellaan lämmönsiirron määrää, kun tuotteen lämpötila nousee höyrystyslämpötilasta "Kosteuden siirtyminen" sivulla määritetyn lämpötilaan | | |
| 6. Kuivaushöyryn määrä sivulla tarkastellaan tarvittava kuivaushöyryn määrä lämmönsiirron ja tarvittavan lämpöenergian määrien perusteella. | | |
| 7. Kuivaushöyryn lämpötilat sivulla tarkastellaan kuivaushöyryn lämpötilaa ennen ja jälkeen tulistimen. | | |
| 8. Energiatase sivulla tarkastellaan prosessin energiatase | | |
| 9. Massatase sivulla tarkastellaan prosessin massatase | | |
| 10. Tulistimen mitoitus sivulla tarkastellaan, tulistin putkien pituutta lämmönsiirron ja lämpötilojen perusteella | | |
| 11. SHS sivulla on luetteloitu tulistetun höyryn ominaisuuksia 0.98 bar(a) paineessa | | |
| 12. Höyrystyslämpötilat sivulla on luetteloitu höyryn ominaisuuksia eri paineissa | | |

Kuva 18: Aloitus-sivu laskennan lopussa

Kuvasta 18 voidaan nähdä, että esimerkin lopuksi on haettava sopiva tulistinputken pituus. Käyttäjä muuttaa putken pituutta, kunnes tarkistus solu antaa arvon, joka on mahdollisimman lähellä arvoa 0, mutta mielellään negatiivisen puolella. Esimerkin tulistinputken pituudeksi tuli 2,1 m ja tällä arvolla tarkistus ruutu antaa arvon -9,98667. Tämä arvo tarkoittaa, että tällä tulistinputken pituudella tulistimen pinta-ala on 9,98667 m² suurempi kuin laskennallisesti vaadittu pinta-ala tulistimelle.

Mitoitusohjeen sivut 11 ja 12 ovat arvojen luettelointia varten. SHS- sivulla on luetteloitu tulistetun höyryn ominaisuuksia. Tämän sivun arvot ovat tulistetulle höyrylle 0,98 absoluuttisessa paineessa, joten se pätee käyttämämme laskenta esimerkkiin. Sivulla 12 on höyrystyslämpötilat, eri paineissa sekä näiden höyryn ominaisuuksia.

Mitoitusohjeen käyttäminen on iteratiivinen prosessi, eli käyttäjän tulee muuttaa arvoja sitä mukaa kun seuraavia ratkaistaan. Tämän vuoksi on hyvin tärkeää, että käyttäjä tuntee mitä arvoja voidaan muuttaa ja tulee muuttaa. Käyttäjän on myös tärkeä seurata lopputuloksen todenmukaisuutta aiempaan kokemukseen pohjautuen

8 Luotettavuus

Opinnäytetyön luotettavuutta arvioitaessa tulee huomioida, että kuivaimen mitoituspohja on monimutkainen prosessi. Laskenta koostuu useista eri kaavoista, jotka on poimittu eri lähteistä. Useimmista lähteistä löytyivät samat peruskaavat eri kohtien laskentaan ja siksi niiden laskennan uskon olevan luotettavaa, mutta tulosten yhdistäminen ja vieminen toisiin kaavoihin voi mahdollisesti aiheuttaa epätarkkuutta lopputuloksiin. Osassa arvoista on myös tärkeä huomioida, että matemaattinen mallintaminen ja todellinen tapahtuma voivat poiketa toisistaan huomattavastikin. Tämä johtuu useimmissa kohdissa siitä, että virtauksien arviointi puhtaasti laskennallisesti on todella haastavaa ja siksi näissä osissa saattaa tulla helposti virheitä. Verrattaessa mitoituspohjan antamia tuloksia toimeksiantajan aiempien projektin mitoitukseen erot olivat pieniä. Asetettaessa samat lähtöarvot, joita edellisen projektin mitoitukseen käytettiin, eroa tulistinputkien pituuksiin tuli 0,1 m ja tulistimen lämmönsiirto pinta-alojen ero oli noin 7 %, eli ero ei ole merkittävä. Ero voi johtua muutamista eri muuttujista materiaaleissa, kuten lämmönjohtokyvystä tai likaisuustekijästä.

Mitoitusohjeen tekemisessä haastavaa oli lähdemateriaalien vähäisyys. On huomioitavaa, että SHS-kuivaaminen on vasta viime vuosina lähtenyt lisääntymään ja aiheesta ei ole kovin paljon kirjallisuutta tarjolla. Lähteenä käyttämäni professori Mujumdarin tutkimus on palkittu teos, joka on kattava perusteos aiheesta.

9 Pohdinta

Mitoitusohje käsittelee kuivaimen mitoitamisen perusteita melko kattavasti, mutta opinnäytetyö herätti myös useita jatkotutkimusideoita. Useimmat jatkotutkimusideat koskevat mitoituspohjan jatkamista. Jatkotutkimuksen mahdollisuuksia olisivat esimerkiksi SHS-kuivaimen yleiset suunnitteluperiaatteet, sekä lauhteen hyödyntäminen. Kumpikin aihe vaatii perehtymistä SHS-kuivaimen toimintaan ja niiden tarkka suunnittelu on oleellista kuivaimen toiminnan kannalta.

Molempiin aiheisiin liittyy myös muuttujia, joita ei yleensä tarvitse huomioida tavallisen kuivaimen suunnittelussa ja niistä on siksi melko vähän tietoa.

Opinnäytetyön tekeminen SHS-kuivaamisesta oli todella mielenkiintoista. Yritys ehdotti aihetta minulle ja pikaisen perehtymisen jälkeen päätin tehdä opinnäytetyön. Aiheesta oli yllättävän vähän tietoa, mutta muutamia kattavia teoksia löytyi. Niiden kautta pääsi myös hyödyntämään jo olemassa olevaa tietoa liittyen muihin kuivausmenetelmiin.

Yritys, joka laskentataulukon opinnäytetyönä tilasi, valmistaa luuliemilinjastoja. Niiden suunnittelussa tarvitaan tarkkaa mitoitus -ja suunnitteluohjetta tulistimen mitoitukseen. Opinnäytetyönäni tekemän laskentataulukon avulla yritys voi arvioida tulistimen putkien mitoitusta. Taulukkoa voi käyttää linjastoja suunnittelevat suunnittelijat, joilla on olemassa perustiedot ja osaaminen kuivaimen toiminnasta ja siihen liittyvästä laskennasta. Tähän saakka yritys on käyttänyt laskennassa ulkopuolista laskijaa, joten opinnäytetyön tuotos eli mitoitusohje mahdollistaa yrityksen omavaraisuuden tulistimien mitoituksessa. Merkitys yritykselle on siis suuri.

Lähteet

- Cengel Y. 2002. Heat Transfer: a Practical Approach. New York: McGraw-Hill Education.
- Holmberg H.& Ramm-Schmidt L. 2015. ENE-59.4130, Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. Aalto-yliopisto. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa opintojakson opetusmateriaali. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/118088/mod_resource/content/1/Ene59.4140%20moniste%202015.pdf. 17.9.2017
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2014. Lämmönsiirtimet: Lämmönsiirron perusteet. BH20A0300 Lämmönsiirron perusteet opintojakson opetusmateriaali.
- Mujumdar A. 2009. Advanced Drying Technologies. Boca Raton: CRC Press.
- Mujumdar A. 2015. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton: CRC Press
- Seppälä A., Lampinen M. J. 2004. Aineensiirto-oppi. Helsinki: Otatieto
- Thulukkanam K. 2013. Heat Exchanger Design Handbook Second Edition. Boca Raton: CRC Press.