

6-linjan tuotekuivaimen energiankäytön optimointi

Henri Tiihonen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2017
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Tiihonen, Henri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2017
	Sivumäärä 48	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa Myönnetty
Työn nimi 6-linjan tuotekuivaimen energiankäytön optimointi		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen, Matti Siistonen		
Toimeksiantaja(t) Pekka Rönkä / CP Kelco Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkimuksen tarkoituksena oli optimoida CP Kelco Oy:n 6-linjan tuotekuivaimen energiankäyttö ja selvittää eri vaihtoehdot energian säästämiseksi. Taloudellisimmaksi vaihtoehdoksi nousi tuotteen loppukosteuden optimoiminen, johon ensisijaisesti tutkimuksessa painauduttiin. Muita tarkasteltavia vaihtoehtoja olivat kuivaimen ilmavirtauksen pienentäminen, tehtaan ylijäämälämmön tehokkaampi hyödyntäminen ja lämmönvaihdon hyötysuhteen parantaminen.</p> <p>Tuotteen loppukosteuden optimoinnilla on tarkoitus säästää kuivaamisessa käytettävää energiaa, valmistuksen raaka-aineita ja lisätä tuotantoa.</p> <p>Tutkimus suoritettiin ottamalla mittauksia kuivuriin liittyvistä virtauksista ja tekemällä esimerkkilaskelmat mittaushetken tuotteen kosteudesta. Tutkimus koostuu teoriaosuudesta, käytännön osuudesta ja investoinnin kannattavuuslaskelmasta.</p> <p>Tuotteen loppukosteuden mittaaminen onnistui jo pääosin olemassa olevalla mittalaitteistolla. Lisäksi tarvittiin kannettavat kosteusmittarit kuivaimen tulo- ja poistoilmakanavaan. Kosteus-, virtaus- ja lämpötilamittausten avulla laskettiin kuivaimessa haihdutettu vesi, jonka avulla määriteltiin tuotteen loppukosteus.</p> <p>Tehtyjen mittausten mukaan laskennallinen kosteus ei ollut aivan sitä mitä sen olisi pitänyt olla, mutta tutkimuksessa saatiin kuitenkin varmuus siitä, että tuotteen loppukosteuden määrittäminen ilmavirtoja mittaamalla on täysin toteutettavissa.</p> <p>Tutkimuksesta saadun tiedon perusteella CP Kelco Oy hankki kosteusmittarit kuivaimen tulo- ja poistoilmakanavaan, mitkä on tarkoitus liittää prosessinohjausjärjestelmään laskemaan tuotteen loppukosteutta.</p>		
<p>Avainsanat (asiasanat) energiankulutus, kuivuri, ominaislämpökapasiteetti, virtaus, paine, lämpötila kastepiste, kosteus, suhteellinen kosteus, absoluuttinen kosteus</p>		
Muut tiedot		

Author(s) Tiihonen, Henri	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2017
	Number of pages 48	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: Agreed
Title of publication 6-line product dryer energy usage optimization Possible subtitle		
Degree programme Degree Programme in Energy		
Supervisor(s) Kari Hytönen, Matti Siistonen		
Assigned by Pekka Rönkä / CP Kelco Oy		
<p>Description</p> <p>The aim of the thesis was to optimize the energy usage of a product dryer for line six at CP Kelco Ltd, and determine the various options to save energy. The most economical alternative was to optimize the moisture content of the final product, which was primarily focused in the study. The other considered options were reviewed in the dryer air flow reduction, more efficient use of plant surplus heat and improving the efficiency of heat exchange.</p> <p>The intention was to save energy used for drying, raw materials in manufacturing and increase the production by optimizing the moisture of the final product.</p> <p>The research was made by measuring the flows related to the dryer and making example calculations of the moisture content of the product at the time of measuring. The thesis consists of the theoretical framework, practical part and profitability calculation.</p> <p>The measurement of the final moisture of the product succeeded mainly using the current measuring equipment. In addition, portable humidity meters were needed for the incoming and outgoing channels in the dryer. Through moisture, flow-and temperature measurement the water evaporation of the dryer was calculated, which allowed defining the final moisture content of the product.</p> <p>In according to the measurements made the deferred humidity was not what it should have been. However, the research provided reassurance that determining the moisture of the final product by measuring the air flow is perfectly feasible.</p> <p>Based on the information gained from the research CP Kelco Ltd acquired a humidity meter for the incoming and outgoing channels in the dryer to be connected to the process control system to calculate the moisture content of the final product.</p>		
<p>Keywords (subjects)</p> <p>energy consumption, dryer, specific heat capacity, flow, pressure, temperature, dew point, moisture content, relative humidity, absolute humidity</p>		
Miscellaneous		

Sisältö

1 Johdanto	4
2 Merkistö.....	5
3 J.M. Huber & CP Kelco	6
4 Karboksimeetyliselluloosa (CMC)	6
4.1 CMC:n kemiallinen rakenne ja ominaisuudet	6
4.2 CMC:n käyttösovellukset	8
4.3 CMC:n raaka-aineet, liuottimet ja hyödykkeet	9
4.3.1 Raaka-aineet	9
4.3.2 Liuottimet	10
4.3.3 Hyödykkeet.....	10
4.4 CMC:n valmistusprosessi	11
4.4.1 Selluloosan jauhatus.....	12
4.4.2 Merserointi	12
4.4.3 Eetteröinti.....	13
4.4.4 Neutralointi.....	13
4.4.5 Pesu	13
4.4.6 Liuottimen talteenotto	14
4.4.7 Granulointi.....	15
4.4.8 Kuivaus.....	15
4.4.9 Seulonta ja jauhatus	15
4.4.10 Pakkaus	16
5 Kuivumisen teoria	16
5.1 Kuivaaminen teollisuusprosesseissa	18
6 Leijupeti vesikuivuri	19

	2
6.1 Virtaukset.....	19
6.2 Taseet	19
6.2.1 Massataseet.....	19
6.2.2 Energiataseet.....	20
6.3 Energian kulutuskohteet	20
6.3.1 Esilämmitys.....	20
6.3.2 Höyrylämmitys.....	21
6.4 Haihdutettu vesimäärä	22
6.4.1 Kuivaimen käyttämä energia per haihdutettu kilo vettä	22
7 Energialaskelma erälle 57453.....	23
7.1 Kastepiste optimoidulla energiankulutuksella	24
8 Energiankulutuksen optimointi	25
8.1 Mittalaitteisto	26
8.2 Tekninen toteutus	27
9 Tuotteen optimoitu kosteus	28
9.1 Tarvittavat mittatiedot	28
9.1.1 Ilmavirtauksen mittaustiedot	29
9.1.2 Tuotevirran mittaustiedot	31
9.2 Tuotteen loppukosteuden laskeminen	31
9.3 Kuivurista poistuvan CMC:n kosteus	32
9.4 Yhteenvedo loppukosteuden optimoinnista.....	33
10 Kuivurin ilmavirtauksen optimointi	34
11 Yhteenvedo ja pohdinta	41
12 Lähteet.....	43
13 Liitteet.....	46
Liite 1. mittauspöytäkirja 7.4.2016 CP Kelco	46

Kuviot

Kuvio 1. CMC:n rakennekaava (medicinescomplete).....	7
Kuvio 2. Yksinkertaistettu prosessikaavio (Etteplan teollisuuden energia-analyysi)	11
Kuvio 3. Lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus ajan funktiona.....	17
Kuvio 4. Leijukuivurin virtaukset	19
Kuvio 5. Vaisala Humicap HMT 360 kosteus- ja lämpötilälähetinsarja	27
Kuvio 6. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla.	38
Kuvio 7. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa.	40

Taulukot

Taulukko 1. Väli- ja matalapainehöyryn mittaustiedot	21
Taulukko 2. Yhteenveto energiankulutuksesta ja käyttökustannuksista	33
Taulukko 3. Yhteenveto tuotannon- ja myynnin kasvusta.....	33
Taulukko 4. Yhteenveto investoinnin kannattavuudesta.....	33
Taulukko 5. Poistoilman mittaustiedot	35
Taulukko 6. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla osa 1/2.....	36
Taulukko 7. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla osa 2/2.....	37
Taulukko 8. Poistoilman arvot 6,8kg/s massavirralla	38
Taulukko 9. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa osa 1/2.....	39
Taulukko 10. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa osa 2/2.....	40
Taulukko 11. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa ilman massavirralla 6,8 kg/s	41

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia CP Kelcon 6-linjan vesikuivurin energiatase ja optimoida sen energiankulutus. Työssä tarkastellaan erityisesti tuotteen loppukosteuden ja tuloilman virtauksen optimoinnilla saavutettavissa olevia säästöjä energian- ja raaka-aineiden kulutuksessa, sekä kosteuden optimoinnista saatavaa tuotannonlisäystä, ja näiden taloudellisia merkityksiä.

Opinnäytetyön esittämä ratkaisu tuotteen loppukosteuden optimoimiseksi ei tapahdu suoraan ottamalla näytteitä tuotteesta, vaan mittaamalla kuivurin lävitse kulkevien ilmapirtojen kosteutta, lämpötilaa ja virtausta. Näistä tiedoista lasketaan kuivurissa haihdutettu vesimäärä, jonka perusteella voidaan määrittää kuivurista poistuvan tuotteen kosteus.

Työn alussa esitellään Äänekosken tehdasta ja CMC:n valmistusprosessia, sekä käydään tuotteenkuivaus läpi energiatekniikkaan liittyvin osin. Työssä esitetään myös laskukaavat, joilla tuotteen loppukosteuteen ollaan päästy ja otetaan kantaa vaadittavien investointien kannattavuuteen, sekä lasketaan takaisinmaksuajat. Työn lopussa on laskelmat kuivaimen tuloilman massavirtauksen vaikutuksesta sen energiankulutukseen.

Kirjallisuustiedon lisäksi työn lähteinä on käytetty Cp Kelcolta saatua MetsoDNA dataa, käsintehtyjä mittauksia, internettiä, sekä suullisia keskusteluita.

2 Merkistö

x = absoluuttinen kosteus

x_{\max} = maksimikosteus

φ = suhteellinen kosteus

h = entalpia

E = teho

m = massavirta

V = tilavuusvirta

T = lämpötila

P = paine

C_p = ominaislämpökapasiteetti

ρ = tiheys

3 J.M. Huber & CP Kelco

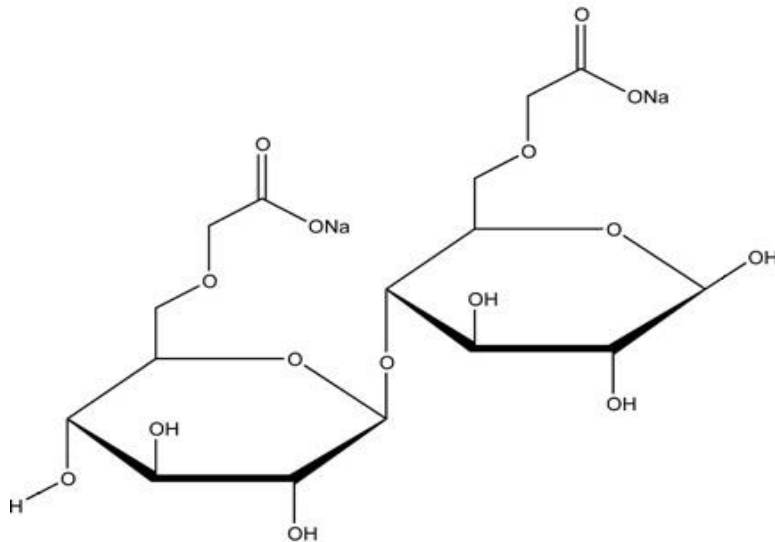
CP Kelco on maailman johtava hydrokolloidien tuottaja ja osa J.M. Huber organisaatiota, joka on 130-vuotias perheyriitys. J.M. Huber on globaali organisaatio, jolla on laaja portfolio. Huber omistaa 80 yksikköä 20 maassa ja sen myynti on yli 2 Miljardia euroa. Äänekosken tehdas päätyi Huber Corporation omistukseen, kun ruotsalainen sijoitusyhtiö myi Äänekosken Noviant Oy:n sisaryhtiöineen vuonna 2001. Noviant yhdistettiin lopullisesti CP Kelcoon vuonna 2004. (CP Kelco 2010, yleisesittely)

CP Kelcolla on yli 3000 asiakasta sadassa maassa ja sen Äänekosken tehdas on suurin yksittäinen karboksimeetyliselluloosa tehdas maailmassa. Tehdas sijaitsee Äänekosken tehdasintegraatissa osoitteessa Kuhnamentie 2, 40100 Äänekoski. Yhtiön liiketoimintaan kuuluu peruskemikaalien valmistus. Yhtiön kiinteistö on rakennettu vuonna 1940, jonka jälkeen siihen on tehty useita laajennuksia. Tuotantolaitoksen keskimääräinen vuosittainen käyttöaika on 330 vrk/a 24/7 ja työntekijöitä yrityksessä on noin 230 henkeä. (mt.)

4 Karboksimeetyliselluloosa (CMC)

4.1 CMC:n kemiallinen rakenne ja ominaisuudet

Karboksimeetyliselluloosa (CMC) on puolisynteettinen selluloosan ja monokloorietikkahapon muodostama eetteri. CMC koostuu β -anhydroglukoosiosasta, sekä karboksyyliiryhmästä. Rakenteeltaan se eroaa selluloosasta siten, että karboksyyliiryhmä on korvannut yhden tai useamman selluloosamolekyylin hydroksyyliiryhmän. Substituutioaste (DS) kertoo kuinka monta hydroksyyliiryhmää (OH) on korvautunut karboksyyliiryhmällä.



Kuvio 1. CMC:n rakennekaava (medicinescomplete)

CMC on hajuton, mauton, elintarviketurvallinen ja myrkytön luonnossa hajoava viskositeetin nostoon käytettävä tuote. Sen pääasialliset käyttökohteet ovat öljy-, maali-, tekstiili-, paperi- ja elintarviketeollisuudessa. CMC:n elintarvike koodi on E 466. (Davidson 1980, 4-1)

Karboksimetyyliselluloosan ominaisuuksia:

- valkoinen tai kellertävä, jauhe tai granulaatti
- ei sisällä terveydelle eikä ympäristölle vaarallisia aineita
- anioninen, vesiliukoinen polymeeri
- ei liukene orgaanisiin liuottimiin
- lievästi pölyräjähteinen
- palaa kytemällä
- hydroskooppinen, varastoitava kuivassa ja suljetussa tilassa
- liukenee sekä kylmään, että kuumaan veteen
- kastuessaan hyvin liukasta
- liuosviskositeetti on CMC:n tärkein ominaisuus, sillä perusteella määräytyvät eri tuotelaatujen käyttökohteet. (CMC-tuotekoulutus. N.d.)

Karboksimetyyliselluloosan ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät:

- substituutioaste, eli reaktion täydellisyys
- substituution tasaisuus
- polymerisaatioaste, eli glukoosirenkaiden määrä molekyylissä
- CMC pitoisuus
- epäpuhtaudet (suola ja roskat)
- ominaispaino (300-900 kg/m³)
- hiukkaskokojakauma
- väri
- pH (mt.)

4.2 CMC:n käyttösovellukset

- paperin ja kartongin valmistus
 - o käytetään päällystyksessä, pinta- ja massaliimauksessa
- pesuaineet
 - o CMC estää lian tarttumista takaisin pesun aikana
- öljynporaus
 - o voidaan säätää porausmudan viskositeettiä, stabiloida formaatiota, dispergoida partikkeleita ja minimoida nestehäviöt
- tekstiiliteollisuus
 - o loimilangan liistaus ja painovärien paksuntaminen
- kaivosteollisuus
 - o käytetään malminerotukseen vaahdotusprosessin osana
- elintarviketeollisuus
 - o käyttö perustuu CMC:n kykyyn sitoa, paksuntaa ja stabiloida nestemäisiä tuotteita, sekä estää kiteiden muodostumista ja parantaa varastoitavuutta
- lääketeollisuus
 - o nopeuttaa tai säätelee lääkkeiden hajoamista
- henkilöhygieniateollisuus
 - o toimii sitojana ja stabiloijana hammastahnoissa, hiustuotteissa yms.

- maalit ja liimat
- keramiikka
- hitsauspuikot (mt.)

4.3 CMC:n raaka-aineet, liuottimet ja hyödykkeet

4.3.1 Raaka-aineet

- selluloosa
 - o pääraaka-aine, pääosin kuivattua mänty- ja koivupohjaista markkinasellua
- natriumhydroksidi (NaOH)
 - o 50% vesiliuos, syövyttävä
 - o alkalointiaine
- monokloorietikkahappo (MCA)
 - o 80% vesiliuos, myrkyllinen ja erittäin syövyttävä
 - o reaktioaine, luovuttaa karboksimeetyyliryhmän
 - o sulamispiste +19°C
- suolahappo (HCL)
 - o 17,5% vesiliuos, syövyttävä
 - o pH:n säätökemikaali
- vetyperoksidi (H₂O₂)
 - o 21% vesiliuos
 - o itsesyttävä orgaanisten materiaalien kanssa
- kuparikloridi (CuCl₂)
 - o 0,5% vesiliuos
- typpi (N₂)
 - o joko nestemäistä tai puristettua PSA tyyppiä
 - o toimii suojakaasuna
 - o syrjäyttää hapen (CMC:n – valmistusvaiheet. N.d.)

4.3.2 Liuottimet

- isopropanoli (IPA)
 - pitoisuus 98%
 - reaktioliuotin
 - herkästi syttyvä, haihtuva
- etanoli (EtOH)
 - pitoisuus 98%
 - reaktioliuotin
 - herkästi syttyvä, haihtuva (mt.)

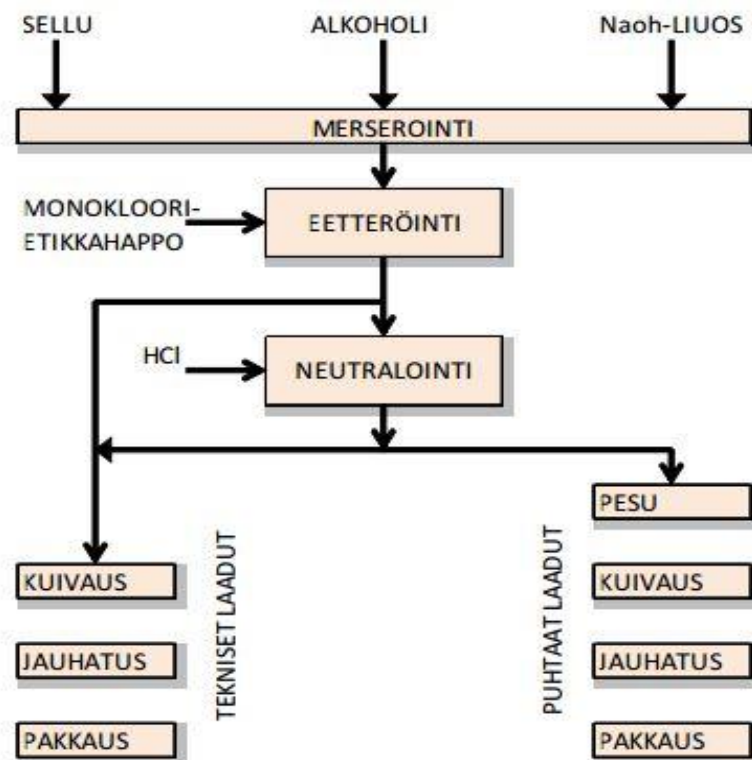
4.3.3 Hyödykkeet

- välipainehöyry
 - paine 10-12 bar
 - lämpötila 185°C
- matalapainehöyry
 - paine 3-4 bar
 - lämpötila 160°C
- vedet
 - paineistettu kuumavesi
 - pesuvesi
 - raakavesi
 - kylmenetty vesi
 - kemiallisesti puhdistettu vesi
 - ionivaihdettu vesi
- kylmäliuos
 - glykolia, suljetussa kierrossa
 - pitoisuus 35% (mt.)

4.4 CMC:n valmistusprosessi

CMC:n valmistusprosessi voidaan jakaa noin 10:een eri vaiheeseen.

1. Selluloosan jauhatus
2. Merserointi
3. Eetteröinti
4. Neutralointi
5. Pesu
6. Liuottimen talteenotto
7. Viskositeetin säätö
8. Kuivaus
9. Seulonta
10. Jauhatus
11. Pakkaus



Kuvio 2. Yksinkertaistettu prosessikaavio (Etteplan teollisuuden energia-analyysi)

4.4.1 Selluloosan jauhatus

Sellunkuljetusvaunu ajetaan jauhatusosaston sisään, jossa paalit siirtyvät automaattisesti kuljetusvaunusta sellukuljettimille. Kuljettimelta paalit siirtyvät siirtovaunun kautta automaattiseen langanpoistoon ja arkinsyöttötimeen, joka syöttää paalit arkki kerrallaan metallinilmaisimen läpi karkearepijään. Rullana tai paaleina toimitettavat erikoissellut siirretään kuljettimille trukkien avulla. Kuljettimet toimivat osaltaan myös selluvarastona, koska niihin mahtuu 140 tonnia sellua.

Sellun jauhatus tapahtuu kaksivaiheisesti. Ensin on karkearevintä, jonka jälkeen selluloosa jauhetaan hienojauhimilla haluttuun hienousasteeseen. Hienousaste vaikuttaa lopputuotteen laatuun, sekä seuraavien prosessivaiheiden hyötysuhteeseen. Selluarkit syötetään tasaisesti karkearepijään, josta noin postimerkin kokoiset sellupalat siirretään pneumaattisesti kahteen karkeasellusiiloon. Karkea selluloosa siirretään ruuvikuljettimilla hienojauhimiin, joissa se jauhetaan haluttuun hienousasteeseen ja puhalletaan hienosellusiiloihin. Siilot ovat alhaalta purkavia, purkaimilla ja pölysuodattimilla varustettuja. (CMC valmistus 6-linjalla. N.d.)

4.4.2 Merserointi

Merseroinnin tarkoituksena on tehdä selluloosa reaktiiviseksi alkaliselluksi, jotta monokloorietikkahappo reagoisi mahdollisimman tehokkaasti muodostaen karboksimeetyliselluloosaa.

Reaktoriin tapahtuvan sellun annostelun aikana siihen sekoitetaan etanolia reaktion tasaisuuden varmistamiseksi, sellun kosteuttamiseksi ja pölyämisen estämiseksi. Varsinaiseen merserointiin käytetään natriumhydroksidia, jonka annetaan vaikuttaa selluloosan kanssa haluttu aika 20-30 celsiusasteen lämpötilassa. Reaktoria sekoitetaan ja sen happipitoisuutta mitataan jatkuvasti, jotta reaktoriin ei pääse muodostumaan räjähdysvaarallisia

olosuhteita, tarvittaessa happipitoisuutta lasketaan typen avulla. (CMC 2000 prosessin kuvaus. N.d.)

4.4.3 Eetteröinti

Eetteröinti on varsinainen reaktiovaihe, jossa osa alkaliselluloosan hydroksidiryhmistä korvautuu metyylikarboksyyliryhmillä muodostaen karboksimeetyliselluloosaa. Reaktion sivutuotteena NaOH ja MCA ylimäärä reagoivat synnyttäen ruokasuolaa.

Eetteröinti tapahtuu samassa reaktorissa merseroinnin kanssa. Reaktio alkaa lisäämällä haluttu määrä MCA:a, jota seuraa reaktoriseoksen lämmitys haluttuun lämpötilaan. Reaktiolle annetaan aikaa tapahtua täydellisesti. Tämän jälkeen seos jäähdytetään haluttuun lämpötilaan, jolloin reaktio saadaan keskeytymään ja reaktoriseos on valmis seuraavaan prosessivaiheeseen. (mt.)

4.4.4 Neutralointi

Reaktoriseoksen jäähdytysvaiheessa aloitetaan suolahapon annostelu, jonka tarkoituksena on neutraloida prosessin emäksinen NaOH ylijäämä. CMC:n pH säädetään neutraalille tasolle, jonka jälkeen seos pumpataan reaktorista tasaussäiliöön. Tasaussäiliön jälkeen prosessi etenee jatkuvatoimisena. Reaktorille voidaan tehdä vielä loppuhuuhdeltu, jonka jälkeen se on valmis uuteen panostukseen. (mt.)

4.4.5 Pesu

Pesun tarkoituksena on poistaa sivureaktiossa syntynyt suola. Pesu tapahtuu liuottimen ja veden seoksella, jossa vesi pesee suolan pois ja liuotin estää CMC:n liukenemisen veteen. Pesu on yleensä kaksivaiheinen, ensimmäisessä

vaiheessa slurry pumpataan pesusäiliöön, johon syötetään samaan aikaan pesuliuotinta. Liuoksen avulla säiliön sakeus pidetään vakiona ja suola saadaan liukenemaan veteen. Pesusäiliössä on pystysekoittaja, typpisuuttimet sekä jäähdytysvaippa, jolla slurryn lämpötila lasketaan 25-40 celsiusasteeseen. Pesusäiliöstä slurry syötetään tasosuotimelle seuraavaan pesuvaiheeseen. Slurry kulkee suotimella tasaisena mattona, jota huuhdellaan pesuliuottimella viiran yläpuoleisilla suuttimilla. Liuotin ja suolat imetään pois viiran alapuolen imulaatikoiden kautta. Pesu tehdään vastavirtaperiaatteella 5 vaiheessa. 5-vaiheen pesusuuttimille tulee puhdas liuotin, joka imetään imulaatikon kautta 4-vaiheen suuttimille, 1-vaiheen pesuliuotin on likaisinta. Tasosuotimen 1-vaiheen pesuliuottimella säädetään pesutankin pintaa, suoritetaan reaktoreiden huuhtelu ja jos liuottimesta jää ylimäärää syötetään se suoraan tislamolle regeneroitavaksi. Tasosuotimen happitaso säädetään typen avulla alle 7%, jottei pääse syntymään pesuliuottimen räjähdysvaaraa. Automaatiojärjestelmä pysäyttää prosessin mikäli happipitoisuus nousee räjähdysvaaralliselle tasolle yli 10%:iin. CMC poistuu tasosuotimelta 20-30% sakeudessa. (mt.)

4.4.6 Liuottimen talteenotto

Pesun jälkeen CMC:an jää vielä pesuliuotinta, jonka talteenotto tehdään heti tasosuotimen jälkeen. Talteenotto tapahtuu nk. stripperissä, joka on vaaka asennossa oleva hönkädoomilla varustettu putkisekoittaja. Stripperissä on matalapainehöyryllä lämmitettävä vaippa ja sekoituskuokat, jotka pyörivät vaakasuuntaisesti stripperin sisällä sekoittaen ja siirtäen tuotetta eteenpäin. Liuottimen talteenottoon käytetään suorasyöttö välipainehöyryä, joka sumutetaan sekoittajan alaosan suuttimien kautta CMC:an joukkoon. Liuotinhöngät imetään hönkäimurilla doomista lauhduttajien kautta omaan säiliöönsä. CMC kuivuu stripperissä noin 8% yksikköä. (mt.)

4.4.7 Granulointi

Strippauksen jälkeen suoritetaan CMC:n lopullinen viskositeetin säätö vetyperoksidilla, sekä granulointi kemiallisesti puhdistetun veden avulla. Granuloinnissa CMC:n raekoko saadaan halutun suuruisiksi lisäämällä siihen vettä, joka sitoo CMC:n halutun kokoiseksi rakeeksi. Granulaattori on saman tyyppinen putkisekoitin stripperin kanssa. Granulaattoria lämmitetään paineistetulla vedellä vaipan kautta ja tuotteesta haihtuvat loput liuotinhöngät, jotka otetaan myös doomien ja lauhduttajien kautta talteen. (mt.)

4.4.8 Kuivaus

Granuloinnin jälkeen tuote johdetaan viivekairalle, jossa vetyperoksidi saa riittävästi aikaa reagoida ja pilkkoutua CMC:n kanssa. Kuivauksen kannalta on tärkeää, että viskositeetin säätökemikaalit ovat reagoineet mahdollisimman hyvin tuotteen kanssa, jottei kuivurissa muodostuisi palo/räjähdyksivaaraa. Turvallisuuden vuoksi kuivuri on varustettu kipinävahdeilla ja sammutusjärjestelmällä. CMC:n kuivauksessa muodostunut pöly otetaan talteen poistoilman suodattimilla ja palautetaan takaisin tuotteen sekaan. CMC kuivataan lajista riippuen noin 8-10% loppukosteuteen. CMC:n loppukosteus vaikuttaa tuotteen liukenevuuteen, lopulliseen raekokoon, irtotiheyteen, käsiteltävyyteen, seulontaan ja jauhatukseen. (CMC valmistus 6-linjalla. N.d.)

4.4.9 Seulonta ja jauhatus

Kuivattu CMC siirretään kuljettimilla karkeajauhimelle ja sieltä seulomoon, jossa eri raekoot saadaan eroteltua toisistaan. Seulana käytetään tasoseulaa, jossa on kolme eri tiheyden sihtiä. Seulonnan hyväksytyt jakeet johdetaan eräsiiloon, ylisuuret jakeet taas palautetaan karkeajauhimelle, kunnes ne ovat saavuttaneet halutun hienousasteen. Lajista riippuen pölyt johdetaan joko

pöly- tai tuotesiiloon. Erikoishienoille lajeille käytetään lisäksi kahta conduxjauhinta, jotta päästään haluttuun hienousasteeseen. (mt.)

4.4.10 Pakkaus

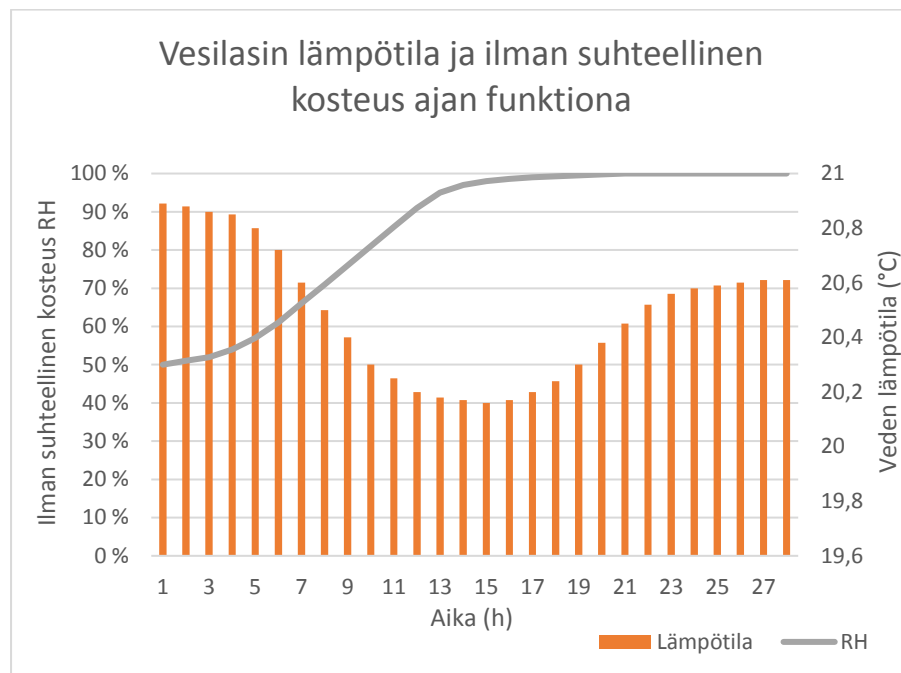
Eräsiiloista CMC siirretään sekoitussiiloihin tai tuotesiiloihin, joista se pakataan pien- tai suursäkkeihin. (mt.)

5 Kuivumisen teoria

Kuivuminen tarkoittaa nesteen poistumista jostain materiaalista. Yleisimmät kuivumisen tavat on kiehuminen ja haihtuminen. Molemmat tarkoittavat veden faasimuutosta nesteestä kaasuksi ja siirtymistä ympäröivään tilaan. Veden faasimuutos nesteestä kaasuksi vaatii aina energiaa.

Jos ulkoinen paine on pienempi kuin höyrynpaine eli nesteen lämpötila on kiehumispisteen alapuolella, tapahtuu haihtumista. Jos lämpötila taas on kiehumispisteessä, muuttuu neste kaasuksi missä paineessa tahansa. (The water cycle. N.d)

Jos esimerkiksi vesilasi laitetaan pieneen ilmalla täytettyyn adiabaattiseen laatikkoon, alkaa se jäähtyä haihtumisen vuoksi. Vesi luovuttaa energiaa haihtumiseen ja sitoo sitä vastaavasti ilmasta itseensä. Vettä haihtuu niin kauan, että laatikon sisällä oleva ilma on tullut vesihöyrystä kylläiseksi eikä haihtumista enää tapahdu. Lopuksi laatikon ja vesilasin lämpötilat tasoittuvat samaan tasoon. Laatikossa oleva vesilasi ja ilma ovat nyt tasapainotilassa keskenään, eikä haihtumista tai lämmönsiirtymistä enää tapahdu.



Kuvio 3. Lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus ajan funktiona

Atomitason näkökulmasta asia voidaan esittää seuraavasti:

Lämpöenergia on veden rakenneosien liike-energiaa, mitä korkeampi lämpötila on, sitä nopeampia ovat veden molekyylien ja atomien liikkeet. Tästä hiukkasten liikkeestä aiheutuu myös haihtuminen vesilasin pinnalta.

Vesilasin hiukkaset liikkuvat vapaasti nesteessä, mutta ovat kuitenkin toisten hiukkasten vetovoiman vaikutuskentässä. Vesilasin pinnalla osa suurienergisistä vesimolekyyleistä karkaa pois muiden molekyylien vetovoimasta, jolloin vesilasin lämpötila laskee ja kyseiset molekyylit ovat muuttuneet nesteestä kaasuksi, nyt ne ovat ns. vapaita molekyylejä. Vesimolekyylejä vapautuu niin kauan, että laatikon sisäinen ilma on vesihöyrystä kylläinen. Tällöin vesilasista karkaa yhtä paljon molekyylejä ilmaan, kuin joutuu takaisin haihdutettavalle pinnalle, laatikko on siis tasapainotilassa. Jos haihtumista haluttaisiin jatkaa, täytyisi molekyylien nopeutta kasvattaa, eli tuoda systeemiin lisää energiaa. Mikäli vesilasi ei olisi suljetussa tilassa, voisi haihtuminen jatkua ilman sekoittumisen vuoksi, eikä vesilasin pinnan läheinen ilma pääsisi kyllästymään vesihöyrystä. (Olomuodon muutokset. N.d.)

5.1 Kuivaaminen teollisuusprosesseissa

Teollisuudessa käytetään useita erilaisia kuivausmenetelmiä, joista tässä käsitellään lyhyesti leijukuivuria. Leijukuivuri on laite, jossa kuivaus tapahtuu kuuman ilmavirtauksen avulla. Kuivausilma puhalletaan kuivurin pohjassa olevien rakojen kautta tuotteen lävitse, samalla se leijuttaa tuotetta ja sitoo kosteutta itseensä.

Leijukuivurin kuivaustulokseen vaikuttavia tekijöitä:

- lämpötila kuivurissa
- kuivausilman kosteus
- kuivausilman virtaus
- kuivaimen lämmönsiirron pinta-ala
- tuotteen läpimenoaika
- tuotteen partikkelikoko
- tuotteen veden sitovuus / kapillaarisuus

Näistä säädettäviä tuotteen loppukosteuden määrääviä tekijöitä ovat kuivurin tuloilman lämpötila ja virtaus, muut tekijät riippuvat kuivurin ominaisuuksista, tuotevirrasta ja ulkoilman olosuhteista.

CMC:n kuivuminen leijukuivurissa perustuu pääosin haihtumiseen tuotteen pinnalta, sekä CMC partikkeleiden sisällä olevan veden höyrystymiseen. CMC partikkeleiden sisällä oleva kosteus siirtyy kapillaari-ilmiön mukana partikkelin huokoisia pitkin pintaan, joka osaltaan auttaa partikkeleiden tasaista kuivumista. CMC partikkelit jäävät kuitenkin väijäämättä kosteammiksi sisältä, sillä kosteus ei ehdi tasaantua kuivurin läpimenoajan sisällä, lopullisesti kosteus tasaantuu vasta myöhemmissä prosessivaiheissa.

6 Leijupeti vesikuivuri

6.1 Virtaukset

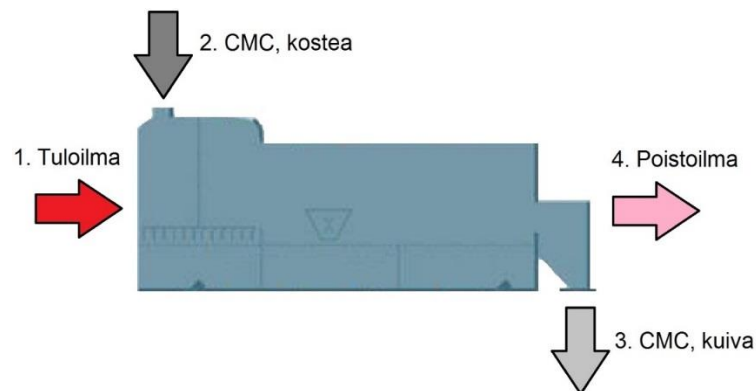
Virtaukset on jaettu seuraavasti:

1= tuloilma

2=CMC, kostea

3=CMC, kuiva

4= poistoilma



Kuvio 4. Leijukuivurin virtaukset

6.2 Taseet

6.2.1 Massataseet

Kokonaismassatase saadaan merkitsemällä kuivuriin tulevien massavirtojen summa yhtä suureksi, kuin sieltä poistuvien massavirtojen summa. Kuivurin massatase:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 = \frac{13,15kg}{s} + \frac{0,980kg}{s} = \frac{0,547kg}{s} + \frac{13,58kg}{s}$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \frac{13,15kg}{s} + \frac{0,980kg}{s} - \frac{0,547kg}{s} - \frac{13,58kg}{s}$$

$$= 0 \frac{kg}{s}$$

6.2.2 Energiataseet

Kokonaisenergiatase saadaan kertomalla massataseet niiden entalpioilla. Kuivurin energiataase:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$$

6.3 Energian kulutuskohteet

6.3.1 Esilämmitys

Esilämmitys saa energiansa tehtaalla syntyvistä kuumista vesistä, jotka ohjataan lämmittämään glykoliverkkoa lämmönvaihtimen 46W205 kautta.

Esilämmitysverkossa kiertää lämmönsiirtonesteenä elintarviketurvallinen propyleeniglykoli, koska lämmitettävä tuloilma on kosketuksissa elintarvike CMC:n kanssa, eikä tuotteen joukkoon saa päästä mitään myrkyllistä mahdollisen vuodon sattuessa. Glykoliverkko lämmittää lämmönvaihdinta 46W024B, jossa esilämmitetään kuivaimeen puhallettava tuloilma. Verkosta otetun näytteen glykoli-vesipitoisuus oli 35%, joten seoksen ominaislämpökapasiteetti on 3,82 kJ/kg*K

Esilämmityksen teho lasketaan kaavalla:

$$P = (\dot{m}_{Glykoli} * \dot{C}p_{Glykoli} * \Delta T_{Glykoli})$$

$$= 4,65 \frac{kg}{s} * 3,82 \frac{kJ}{kgK} * (36^{\circ}C - 24^{\circ}C)$$

$$= 213,26 \frac{kJ}{s}$$

6.3.2 Hörylämmitys

Esilämmityksen jälkeen kuivausilma lämmitetään haluttuun lämpötilaan hörylämmityksellä, jossa käytetään matalapaine-, sekä välipainehöyryä. Kuivausilma on jaettu kolmeen kuivuriin menevään kanavaan, joista kahden ensimmäisen lämmitykseen käytetään VP-höyryä, kolmanteen MP-höyryä.

Taulukko 1. Väli- ja matalapainehöyryn mittaustiedot

Kanava	1 VP	2 VP	3 MP	yhteensä	
m_höyry	0,215	0,215	0,170	0,600	kg/s
Paine_in	11,5	11,5	3,5	-	bar
T_in_höyry	185	185	155	-	°C
T_out_lauhde	100	100	100	-	°C
h_in	2781	2781	2752	-	kJ/kg*K
E_in	598	598	467,8	1664	kJ/s

Hörylämmityksen energiankulutus:

$$E_{höyry} = m_{höyry,VP} * h_{höyry,VP} + m_{höyry,MP} * h_{höyry,MP}$$

$$E_{höyry} = 0,43 \frac{kg}{s} * 2781 \frac{kJ}{kg} + 0,17 \frac{kg}{s} * 2752 \frac{kJ}{kg}$$

$$E_{höyry} = 1664 \frac{kJ}{s}$$

6.4 Haihdutettu vesimäärä

Lasketaan kuivurissa haihdutettu vesimäärä, eli tulevan ja poistuvan CMC:n sisältämän veden massavirran erotus:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{m}_{\text{vesi}} &= (\dot{m}_{\text{cmc, sisään}} * \text{kosteus}_{\text{abs}}) - (\dot{m}_{\text{cmc, ulos}} * \text{kosteus}_{\text{abs}}) \\
 &= \left(3,53 \frac{\text{t}}{\text{h}} * 50,4\% \right) - \left(1,97 \frac{\text{t}}{\text{h}} * 11,2\% \right) \\
 &= 1,78 \frac{\text{t}}{\text{h}} - 0,22064 \frac{\text{t}}{\text{h}} \\
 &= 0,4888 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0,06128888 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 &= 0,43248 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

6.4.1 Kuivaimen käyttämä energia per haihdutettu kilo vettä

CMC:n kuivaamiseen tarvittava energiamäärä massayksikköä kohden saadaan laskettua jakamalla haihdutetun veden määrä kuivaimen käyttämällä energialla.

$$\begin{aligned}
 \frac{\dot{E}_{\text{in}}}{\Delta \dot{m}_{\text{vesi}}} &= \frac{\text{tuloilman esilämmitys} + \text{tuloilman höyrylämmitys}}{\text{tulevan CMC:n vesi} - \text{lähtevän CMC:n vesi}} \\
 &= \frac{213,26 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 1663,81 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0,4888 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0,06128888 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \\
 &= \frac{1877,06 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0,43248 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 4340,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

7 Energialaskelma erälle 57453

Loppukosteuden optimoinnissa on käytetty erän 57453 näytteitä. Tuotteen laji on CK 30000 G.

Erän loppukosteus oli 8,8%, lajin maksimikosteus saa olla 10%.

Kuivurin jälkeen mitattu kosteus oli 11,2%, joten kyseinen laji kuivui vielä jauhatuksessa $11,2\% - 8,8\% = 2,4\%$.

Erä olisi siis voinut jäädä 1,2% kosteammaksi, jotta se olisi täyttänyt lajille asetetun kosteusrajan. Jos haluttaisiin jättää vielä varmuustoleranssia 0,4% olisi tuotteen loppukosteus saanut jäädä vielä 0,8% kosteammaksi, jolloin kuivurin jälkeinen kosteus olisi ollut 12% ja tuotteen loppukosteus 9,6%.

Haihdutettava vesimäärä voidaan optimoidulla CMC:n kosteudella:

Lasketaan kuinka paljon vähemmän vettä olisi tarvinnut haihduttaa, jotta tuote olisi jäänyt kuivurilla 0,8% kosteammaksi.

$$\Delta \dot{m}_{\text{vesi } 12\%} = \text{tulevan CMC:n vesi} - \text{lähtevän CMC:n vesi}$$

$$= \left(3,53 \frac{t}{h} * 50,4\% \right) - \left(1,97 \frac{t}{h} * 12\% \right)$$

$$= 1,78 \frac{t}{h} - 0,2364 \frac{t}{h}$$

$$= 0,4942 \frac{kg}{s} - 0,0657 \frac{kg}{s} = 0,4285 \frac{kg}{s}$$

Uusi energiankulutus lasketaan seuraavasti:

Kun tiedetään paljonko vesikilon haihduttaminen kuivurilla vie energiaa ja haihdutettava vesimäärä tuotteen 12% kosteuteen, voidaan laskea kuivurin uusi energiankulutus optimoidulla kosteudella. Energiankulutus on kuivaimen käyttämä energia per haihdutettavaa kilogrammaa vettä * 12 % kostean CMC:n haihdutettu vesimäärä.

$$\begin{aligned}
 P &= 4340,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \Delta \dot{m}_{\text{vesi } 12\%} \\
 &= 4340,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0,4285 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 &= 1859,93 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Vanha energiankulutus oli 1877kW, ja uusi 1860kW, joten höyrynkulutus pieneni 17kW. Tämä tarkoittaisi 8000 tunnin käytöllä vuosittaisia 137 MWh energiansäästöjä.

7.1 Kastepiste optimoidulla energiankulutuksella

Mittaushetkellä kuivaimen poistoilman arvot olivat:

$$P = 1013,3 \text{ hPa}$$

$$V = 9,1042 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Kosteus RH} = 41,9 \%$$

$$T = 47,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Poistuvan ilman lämpötila tunnetaan normaalitilanteessa, kun tiedetään myös ilman ominaislämpökapasiteetti ja kuivaukseen käytetty energia, voidaan uusi poistoilman lämpötila laskea kaavalla:

$$E_{\text{säästö}} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{E_{\text{säästö}}}{\dot{m} * C_p}$$

$$= \frac{38 \text{ kJ/s}}{13,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1,097 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}} = 2,69^\circ\text{C}$$

Uusi poistuvan ilman lämpötila on siis

$$T_{\text{out,optimoitu}} = T_{\text{out}} - \Delta T$$

$$= 47,8^\circ\text{C} - 2,69^\circ\text{C} = 45,1^\circ\text{C}$$

Uudet poistuvan ilman laskennalliset arvot optimoidulla loppukosteudella:

P 1013,1 hPa

Kosteus RH 48,1 %

T 45,1 °C

Kastepiste 31,53 °C

Poistoilma jää siis 13,6°C kastepisteen yläpuolelle, joten optimoidulla tuotteen loppukosteudellakaan ei synny ongelmia kosteuden tiivistymisestä.

8 Energiankulutuksen optimointi

Kuivaimen energiankulutuksen optimointiin oli kolme mahdollista lähestymistapaa, tehtaan ylijäämälämmön tehokkaampi hyödyntäminen, kuivaimen tuloilman virtauksen pienentäminen ja CMC:n loppukosteuden optimointi. Tehtaalla olisi paljon ylijäämälämpöä, jota osakseen jo käytetään kuivaimen tuloilman lämmittämiseen. Jos ylijäämälämpöä ja lauhteita haluttaisiin

hyödyntää tehokkaammin, olisi se vaatinut tuloilman esilämmönvaihtimen uusimisen, josta olisi tullut suuret investointikustannukset. Muita vaihtoehtoja esilämmityksen tehostamiseksi oli tislaamon lauhteiden hyödyntäminen glykoliverkon lämmitykseen, jolloin olisi saatu enemmän lämpötehoa nykyiseen esilämmittimeen, mutta se olisi vaatinut uudet suhteellisen pitkät putkitukset. Lisäksi tarkasteltiin toisen esilämmittimen asentamista sarjaan nykyisen lisäksi, mutta siitäkin olisi tullut suuret investointikustannukset ja tämän ratkaisun teho olisi myös kärsinyt siitä, että glykoliverkossa ei välttämättä riittäisi lämpötehoa nykyisellä konfiguraatiolla.

Edullisimmaksi ja parhaimmaksi vaihtoehdoksi jäivät kuivaimen ilmvirtauksen ja tuotteen loppukosteuden optimointi. Näillä ratkaisulla säästetään energiaa, jonka lisäksi kannattavuutta syntyy lisääntyneenä tuotantona. Markkinoilla on monenlaisia järjestelmiä tuotteen kosteuden mittaukseen, jotka perustuvat kosteusantureihin, näytteenottimiin, ja vaakoihin. Parhaiten toteutettavissa oleva ja mielenkiitoinen ratkaisu kosteuden mittaukseen oli ilmankosteusmittarit, joilla mitataan kuivuriin tulevaa ja sieltä poistuvaa ilmankosteutta. Kosteusmittareiden avulla lasketaan kuivurissa haihdutettu vesimäärä ja tuotteen loppukosteus, josta esimerkit myöhempanä.

8.1 Mittalaitteisto

Selvitystyön perusteella parhaimmaksi valinnaksi ilmankosteuden mittaukseen valikoitui Vaisala Humicap HMT 360 kosteus- ja lämpötilälähetinsarja. HMT 363 päällä varustettu mittari on suunniteltu kanava-asennuksiin tai ahtaisiin paikkoihin, ja sen voi asentaa myös räjähdysvaaralliseen EX-tilaan. Sen hinta on kohtuullinen, yhden lähetinsarjan hinta tarvittavalla konfiguraatiolla on 1500-3000€. Mittari perustuu kapasitiiviseen polymeerikalvomittaukseen. Vaisala ilmoittaa mittauksen kokonaistarkkuudeksi +-1% sisältäen mittavirheen, hystereesin, lähetyksen ja skaalauksen. (Users guide vaisala Humicap. N.d.)



Kuvio 5. Vaisala Humicap HMT 360 kosteus- ja lämpötilälähetinsarja

8.2 Tekninen toteutus

Vaisala mittarit sijoitetaan kuivurin tulo- ja poistoilmakanavaan, jossa ne mittaavat ilman suhteellista ilman kosteutta. Suhteellisen kosteuden avulla saadaan määritettyä ilman absoluuttinen kosteus, jonka avulla päästään laskemaan tulo- ja poistoilmakanavassa kulkevan veden massavirta ja tuotteesta haihdutettu vesimäärä. Kun tiedetään kuivurin läpi kulkevat veden massavirrat, voidaan laskea kuivurista poistuvan CMC:n kosteus. Kuivurista poistuvan tuotteen kosteutta säädellään ilmavirtausta säätämällä, lämpötila pidetään vakiona.

Lisäksi tehdään laskennallinen virtausmittaus ilmalle, joka onnistuu nykyisellä mittalaitteistolla lämpötilojen ja höyrynkulutuksen mittatietoja hyödyntämällä. Virtausmittaus tehdään höyrylämmönvaihtimen yli.

Lisäksi lämpötilalle ja virtaukselle haetaan optimaalinen suhde, jossa ilmavirran sisältämästä lämpöenergiasta mahdollisimman suuri osa saadaan hyödynnettyä veden haihduttamiseen ja kuivuminen mahdollisimman tehokkaaksi.

9 Tuotteen optimoitu kosteus

9.1 Tarvittavat mittatiedot

Kuivurista poistuvan tuotteen kosteuden määrittämiseen käytetään kuivurin läpi kulkevien massavirtojen sisältämän veden massatasetta:

$$x_1 m_1 + x_2 m_2 = x_3 m_3 + x_4 m_4$$

Josta taas voidaan johtaa tuotevirran x_3 sisältämän veden massa kuivurin jälkeen:

$$x_3 = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 - x_4 m_4}{m_3}$$

Massataseen määrittämiseen tarvittavat mittaustiedot:

Ilmavirtauksen mittaustiedot:

-Ilman massavirta

-Absoluuttinen kosteus tulo- ja poistoilmakanavasta, jonka määrittämiseen tarvitaan:

-Suhteellinen kosteus tulo- ja poistoilmakanavasta

-Lämpötila tulo- ja poistoilmakanavasta

-Ilmanpaine tulo- ja poistoilmakanavasta

Tuotevirran mittaustiedot:

-Kuivuriin tulevan tuotteen kosteus

-Tuotteen massavirta

9.1.1 Ilmavirtauksen mittaustiedot

Ilman massavirta

Ilmavirtaukselle ei ole valmiina mittausta kuivurin ilmakehässä, mutta massavirta on mahdollista laskea prosessista valmiiksi löytyvän mittalaitteiston avulla. Kuivausilmakanavan puhaltimet ovat valmiiksi taajuusmuuttaja ohjattuja, joten ilmavirtauksen säätö on toteutettavissa helposti.

Kuivurin tuloilmapuolella on lämpötilamittaukset ennen ja jälkeen höyrylämmönvaihdinta, lisäksi tiedetään lämmönvaihtimen käyttämän höyryn massavirta ja entalpia, jotka pysyvät vakioina. Näiden tietojen avulla saadaan määritettyä ilmavirtauksen lämpötilamuutos lämmönvaihtimen yli ja lämmönvaihtimen käyttämä energia.

Ilman lämpötilanmuutoksen määrittämisessä lämmönvaihtimen yli käytetään esilämmityksen jälkeistä tuloilman lämpötilaa, ja höyrylämmönvaihtimen jälkeisen kolmen kanavan aritmeettista keskiarvoa. Höyrylämmönvaihtimen jälkeinen lämpötila on:

$$T_{ilma} = \frac{(149 + 127 + 124)^{\circ}\text{C}}{3} = 133,3^{\circ}\text{C}$$

Laskennallinen ilmavirtaus lasketaan kaavalla:

$$m_{ilma} = \frac{P_{höyry}}{\Delta T_{ilma} * C_{p_{ilma}}}$$

$$m_{ilma} = \frac{1664 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{(133,3^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}) * 1,097 \text{ kJ/kg} * \text{K}}$$

$$m_{ilma} = 13,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

9.2.2 Ilman absoluuttinen kosteus

Ilman absoluuttinen kosteus lasketaan kaavalla:

$$x = \varphi * x_{max}$$

missä:

φ = ilman suhteellinen kosteus

x_{max} = maksimikosteus, eli vesihöyryn suurin mahdollinen massa tilavuusyksikköä kohden. Maksimikosteus riippuu lämpötilasta.

Tuloilma x_1

$$\varphi_1 = 43\%$$

$x_{max} = 9,407 \text{ g/m}^3$ (Appendix taulukosta 10°C lämpötilassa)

$$x_1 = 0,43 * 9,407 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$x_1 = 4,05 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Poistoilma x_4

$$\varphi_4 = 41,9\%$$

$x_{max} = 83,153 \text{ g/m}^3$ (Appendix taulukosta 50°C lämpötilassa)

$$x_4 = 0,419 * 83,153 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$x_4 = 34,84 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

9.1.2 Tuotevirran mittaustiedot

Kuivuriin tulevan tuotteen kosteus on määritetty erillisillä laboratorionäytteillä, pysyy vakiona 50,4%:ssa. Tuotteen massavirrasta löytyy valmiiksi mittaustieto prosessinohjausjärjestelmästä.

9.2 Tuotteen loppukosteuden laskeminen

Lasketaan kuivurin läpi kulkevien virtauksien sisältämän veden massavirrat, josta saadaan veden massatase ja selvitetään kuivurista poistuvan tuotteen sisältämä vesimäärä.

Tuloilma:

$$\begin{aligned}
 m_{vesi_1} &= x * \left(\frac{m}{p}\right) \\
 &= 0,004045 \frac{kg}{m^3} * \frac{13,15 \frac{kg}{s}}{1,293 \frac{kg}{m^3}} \\
 &= 0,041138 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

CMC märkä:

$$\begin{aligned}
 m_{vesi_2} &= m * x \\
 &= 0,964506 \frac{kg}{s} * 50,4\% \\
 &= 0,486111 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

Poistoilma:

$$m_{vesi_4} = x * \left(\frac{m}{p}\right)$$

$$= 0,034841 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{13,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$= 0,354339 \text{ kg/s}$$

CMC kuiva:

$$m_{\text{vesi}_3} = m_{\text{vesi}_1} + m_{\text{vesi}_2} - m_{\text{vesi}_4}$$

$$= 0,041138 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0,486111 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0,354339 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 0,17291 \text{ kg/s}$$

9.3 Kuivurista poistuvan CMC:n kosteus

Kun tiedetään kuivurin läpi kulkevan veden massataseet ja CMC:n massavirta niin voidaan laskea kuivurista poistuvan tuotteen kosteus:

$$x_3 = \frac{m_{\text{vesi}_3}}{m_{\text{CMC}_{\text{kuiva}}}} * 100\%$$

$$= \frac{0,17291 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,547222 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} * 100\%$$

$$= 31,6\%$$

Kuivurista poistuvan CMC:n laskennallinen kosteus ei näyttänyt samaa arvoa laboratoriomittauksen kanssa, joka oli 11,2%. Ero johtuu todennäköisesti mittavirheistä ja siitä, että tuloilman esilämmitys oli kytkeytynyt pois päältä kesken mittausten. Laskennasta kuitenkin selvisi, että tuotteen kosteutta voidaan mitata ilmankosteuden avulla, joten uusia käsimittauksia ja laskentaa ei lähdetty suorittamaan.

9.4 Yhteenveto loppukosteuden optimoinnista

Alla on esitetty yhteenvetona taulukot loppukosteuden optimoimisen vaikutuksesta energiankulutukseen, käyttökustannuksiin ja tuotannonlisäykseen. Yhteenvedot on tehty sillä olettamalla, että tuote jäisi pitkällä tarkasteluvälillä 0,4% nykyistä kosteammaksi.

Taulukko 2. Yhteenveto energiankulutuksesta ja käyttökustannuksista

	Vanha	Uusi	Muutos	Yksikkö
Energiankulutus	1877	1860	-17	kW
Käyttöaika	8000	8000	-	h/a
Haihduettava vesi	12442	12355	-86	m ³ /a
Energiankulutus	15017	14879	-138	MWh/a
Höyryn hinta	24,4	24,4	-	€/MWh
Käyttökustannus	366403	363057	-3346	€/a

Taulukko 3. Yhteenveto tuotannon- ja myynnin kasvusta

	Vanha	Uusi	Muutos	Yksikkö
Tuotannonlisäys	-	0,4	0,4	%
Käyttöaika	8000	8000	-	h/a
6-l tuotanto	14000	14056	56	t/a
CMC:n hinta	3000	3000	-	€/t
Myynti	42000000	42168000	168000	€/a

Taulukko 4. Yhteenveto investoinnin kannattavuudesta

	Määrä	Yksikkö
Investointikustannus	10000	€
Mahd. energiatuki	30	%
Mahd. energiatuki	3000	€
Netto investointikustannus	7000	€
Energiansäästö	3346	€/a
Myynnin kasvu	168000	€/a
Nettotuotto	171346	€/a
Takaisinmaksuaika	15	d

Työssä osoitettiin, että 0,4% kosteuden nosto tuo kohtuullisen 136MWh vuotuisen energiansäästön, joka tarkoittaa myös yli 3000€ säästöjä käyttökustannuksissa. Tutkimuksessa tuli todistettua myös, että loppukosteuden optimoinnilla on suuret taloudelliset vaikutukset lisääntyneen tuotannon kautta (168000€). Tuotteen kosteuden määrittäminen ilmavirtauksien kosteuksia mittaamalla

on tässä vaiheessa vielä hieman epätarkkaa. Uskon kuitenkin, että kuivurin ilmavirtauksien kosteusmittausten ja laskennallisesti haihdutetun veden määrällä saadaan optimoitua tuotteen loppukosteutta. Mittareiden kalibroinnilla ja online-mittauksella saa varmasti tarkempia arvoja loppukosteudesta, jotka ovat toistettavissa ja kertovat mihin suuntaan kosteus on muuttumassa. Lopullisen tuloksen näkee kuitenkin pidemmän käyttökokemuksen perusteella.

10 Kuivurin ilmavirtauksen optimointi

Ilmavirtauksen pienentämisellä on tarkoitus parantaa lämmönsiirtymistä tuloilmasta kuivattavaan tuotteeseen ja vähentää kuivaimen energiankulutusta. Optimoidulla virtauksella ilma on kauemmin kosketuksissa kuivattavan tuotteen kanssa, jolloin lämmönjohtuminen tapahtuu tehokkaammin ja kuivausilma luovuttaa enemmän siihen varastoidusta energiasta veden haihduttamiseen. Pienemmällä virtausnopeudella poistoilma on siis viileämpää ja näin ollen sen mukana karkaa vähemmän energiaa pois prosessista.

Suurin säästö saadaan, kun ilmavirtaus säädetään niin, että poistoilman lämpötila on 5-10 °C päässä kastepisteestä ja suhteellinen kosteus mahdollisimman suuri. Suhteellista kosteutta nostettaessa on huomioitava, että poistoilman lämpötila laskee vielä poistoilmakanavassa, jolloin sen suhteellinen kosteus nousee. Jos lämpötila laskee kastepisteeseen, alkaa vesi tiivistyä takaisin nesteeksi tukkien poistoilmakanavan suodattimia.

Lähdettäessä etsimään optimaalista suhdetta virtaukselle ja poistoilman suhteelliselle kosteudelle, aloitettiin laskenta siitä oletuksesta, että kuivaimessa täytyy haihduttaa yhä sama vesimäärä, jotta tuotteen kosteus pysyy samana. Toisena oletuksena laskennassa käytettiin sitä, että poistoilman lämpötila pidetään vakiona.

Vaisalan kosteuskäytävällä laskettiin mitatun suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja paineen avulla kastepiste lähtötilanteessa, joka oli 31,5 °C. Ilman lämpötila oli siis lähtötilanteessa 16,27 °C päässä kastepisteestä. Muut ilman arvot lähtötilanteessa olivat:

Taulukko 5. Poistoilman mittaustiedot

Poistuva RH	41,9	%
Poistuva P	1013,3	hPa
Poistuva V	13,15	kg/s
Poistuva T	47,8	°C
Poistuva kastepiste	31,529	°C
Poistuva x	31,367	g/kg
Poistuva h	125,47	kJ/kg

Seuraavaksi laskettiin poistoilman absoluuttinen kosteus pienemmällä ilman massavirralla:

$$x_{poistoilma} = \frac{\text{kuivaimessa haihdutettu vesimäärä}}{\text{ilman massavirta}} + x_{tuloilma}$$

Kun tiedettiin absoluuttisen kosteuden ja ilman massavirran suhde toisiinsa, voitiin muut ilman arvot hakea taulukoista poistoilman lämpötilan ja paineen avulla. Lopuksi piti enää hakea absoluuttisen kosteuden piste, jossa poistoilman lämpötila on viiden asteen päässä kastepisteestä.

Alla on taulukko poistoilman arvoista suhteessa absoluuttiseen kosteuteen.

Taulukon lyhenteet ovat:

m = ilman massavirta (kg/s)

x = ilman absoluuttinen kosteus (g/kg)

T = poistoilman lämpötila (°C)

T_d = kastepiste (°C)

RH = ilman suhteellinen kosteus (%)

h = ilman entalpia (kJ/kg)

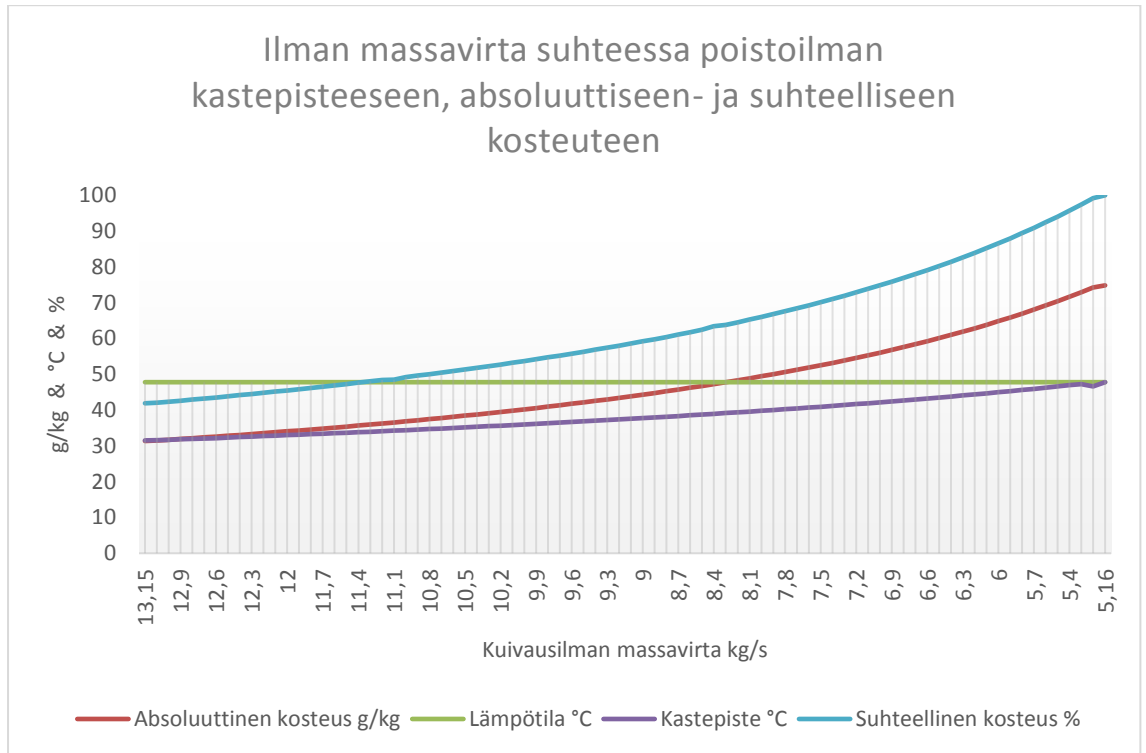
ΔT = ilman lämpötilaero kastepisteeseen (°C)

Taulukko 6. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla osa 1/2

m	x	T	Td	RH	h	ΔT
13,15	31,37	47,8	31,53	41,90	125,47	16,27
13,1	31,47	47,8	31,59	42,04	125,74	16,21
13	31,69	47,8	31,71	42,33	126,30	16,09
12,9	31,91	47,8	31,83	42,63	126,87	15,97
12,8	32,13	47,8	31,96	42,93	127,45	15,84
12,7	32,36	47,8	32,08	43,23	128,04	15,72
12,6	32,59	47,8	32,17	43,45	128,48	15,63
12,5	32,83	47,8	32,33	43,85	129,25	15,47
12,4	33,06	47,8	32,46	44,17	129,87	15,34
12,3	33,31	47,8	32,59	44,49	130,50	15,21
12,2	33,55	47,8	32,72	44,82	131,14	15,08
12,1	33,80	47,8	32,85	45,15	131,79	14,95
12	34,06	47,8	32,99	45,49	132,45	14,81
11,9	34,32	47,8	33,12	45,84	133,13	14,68
11,8	34,58	47,8	33,26	46,19	133,81	14,54
11,7	34,85	47,8	33,40	46,55	134,51	14,40
11,6	35,12	47,8	33,54	46,91	135,22	14,27
11,5	35,39	47,8	33,68	47,28	135,95	14,12
11,4	35,68	47,8	33,82	47,66	136,68	13,98
11,3	35,96	47,8	33,96	48,04	137,43	13,84
11,2	36,25	47,8	34,11	48,43	138,20	13,69
11,1	36,55	47,8	34,25	48,83	138,98	13,55
11	36,85	47,8	34,40	49,23	139,77	13,40
10,9	37,16	47,8	34,55	49,64	140,58	13,25
10,8	37,48	47,8	34,70	50,06	141,41	13,10
10,7	37,79	47,8	34,86	50,49	142,25	12,94
10,6	38,12	47,8	35,01	50,92	143,11	12,79
10,5	38,45	47,8	35,17	51,36	143,99	12,63
10,4	38,79	47,8	35,33	51,82	144,88	12,47
10,3	39,13	47,8	35,49	52,28	145,79	12,31
10,2	39,49	47,8	35,65	52,75	146,72	12,15
10,1	39,84	47,8	35,81	53,23	147,68	11,99
10	40,21	47,8	35,98	53,71	148,65	11,82
9,9	40,58	47,8	36,15	54,21	149,64	11,65
9,8	40,96	47,8	36,32	54,72	150,65	11,48
9,7	41,35	47,8	36,49	55,24	151,68	11,31
9,6	41,75	47,8	36,66	55,77	152,74	11,14
9,5	42,15	47,8	36,84	56,31	153,82	10,96
9,4	42,57	47,8	37,02	56,86	154,93	10,78
9,3	42,99	47,8	37,20	57,43	156,06	10,60
9,2	43,42	47,8	37,39	58,00	157,22	10,41

Taulukko 7. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla osa 2/2

m	x	T	Td	RH	h	ΔT
9,1	43,86	47,8	37,57	58,59	158,40	10,23
9	44,31	47,8	37,76	59,19	159,61	10,04
8,9	44,77	47,8	37,95	59,81	160,86	9,85
8,8	45,24	47,8	38,15	60,44	162,13	9,65
8,7	45,73	47,8	38,34	61,08	163,43	9,46
8,6	46,22	47,8	38,54	61,74	164,76	9,26
8,5	46,73	47,8	38,74	62,42	166,13	9,06
8,4	47,24	47,8	38,95	63,41	167,54	8,85
8,3	47,77	47,8	39,16	63,81	168,98	8,64
8,2	48,31	47,8	39,37	64,54	170,45	8,43
8,1	48,87	47,8	39,58	65,28	171,97	8,22
8	49,44	47,8	39,80	66,04	173,53	8,00
7,9	50,02	47,8	40,02	66,82	175,12	7,78
7,8	50,62	47,8	40,24	67,62	176,77	7,56
7,7	51,24	47,8	40,47	68,44	178,46	7,33
7,6	51,87	47,8	40,70	69,29	180,19	7,10
7,5	52,52	47,8	40,93	70,15	181,98	6,87
7,4	53,18	47,8	41,17	71,04	183,82	6,63
7,3	53,86	47,8	41,41	71,95	185,71	6,39
7,2	54,57	47,8	41,66	72,89	187,66	6,14
7,1	55,29	47,8	41,91	73,86	189,67	5,89
7	56,03	47,8	42,16	74,85	191,74	5,64
6,9	56,80	47,8	42,42	75,87	193,88	5,38
6,8	57,58	47,8	42,69	76,92	196,09	5,11
6,7	58,39	47,8	42,95	78,00	198,36	4,85
6,6	59,23	47,8	43,23	79,12	200,72	4,57
6,5	60,09	47,8	43,50	80,27	203,15	4,30
6,4	60,98	47,8	43,79	81,45	205,66	4,01
6,3	61,89	47,8	44,07	82,68	208,26	3,73
6,2	62,84	47,8	44,37	83,94	210,96	3,43
6,1	63,81	47,8	44,67	85,24	213,75	3,13
6	64,82	47,8	44,97	86,59	216,64	2,83
5,9	65,87	47,8	45,28	87,98	219,64	2,52
5,8	66,94	47,8	45,60	89,42	222,75	2,20
5,7	68,06	47,8	45,92	90,92	225,99	1,88
5,6	69,22	47,8	46,25	92,46	229,35	1,55
5,5	70,42	47,8	46,59	94,06	232,85	1,21
5,4	71,66	47,8	46,94	95,72	236,50	0,86
5,3	72,95	47,8	47,29	97,45	240,29	0,51
5,2	74,29	47,8	46,65	99,24	244,25	1,15
5,16	74,84	47,8	47,80	100,00	245,95	0,00



Kuvio 6. Poistoilman arvot pienemmällä ilman massavirralla.

Taulukosta nähdään, että poistoilman lämpötila on 5 °C päässä kastepisteestä 6,8 kg/s ilman massavirtauksella. Tällä virtauksella muut ilman arvot ovat:

Taulukko 8. Poistoilman arvot 6,8kg/s massavirralla

Optimoitu poistuva RH	76,92	%
Optimoitu poistuva P	1013,3	hPa
Optimoitu poistuva V	6,8	kg/s
Optimoitu poistuva T	47,8	°C
Optimoitu kastepiste	42,69	°C
Optimoitu poistuva x	57,58	g/kg
Optimoitu poistuva h	196,1	kJ/kg

Ilmavirtausta voisi pienentää 6,35 kg/s ennen kuin poistoilman lämpötila olisi 5 °C päässä kastepisteestä. Tämä vaatii huomattavaa tuloilman lämpötilan nostoa, ja vasta kokeilemalla näkee, kuinka kuivuri tulee käyttäytymään tällaisissa olosuhteissa.

Seuraavaksi laskettiin, paljonko vähemmän kuivaimen poistoilman mukana karkaa energiaa pois prosessista pienemmällä ilman massavirralla, eli paljonko kuivaimen energiankulutus pienenee. Laskennassa käytettiin hyväksi ilman entalpiaa ja ilman massavirtaa kaavalla:

$$P = (\dot{m}_{ilma} * h_{ilma}) - (\dot{m}_{ilma,optimoitu} * h_{ilma,optimoitu})$$

Kun tiedettiin, paljonko kuivaimen energiankulutus alenee virtausta pienentämällä, voitiin laskea vuosittaiset säästöt energiankulutuksessa ja siitä seuraavat säästöt käyttökustannuksissa. Laskennassa käytettiin vuosittaisena käyttöaikana 330 vuorokautta ja höyryn hintana 24,4 €/MWh. Taulukon lyhenteet ovat:

m = massavirta (kg/s)

P = säästö energiankulutuksessa (kJ/s)

E = säästö vuotuisessa energiankulutuksessa (MWh/a)

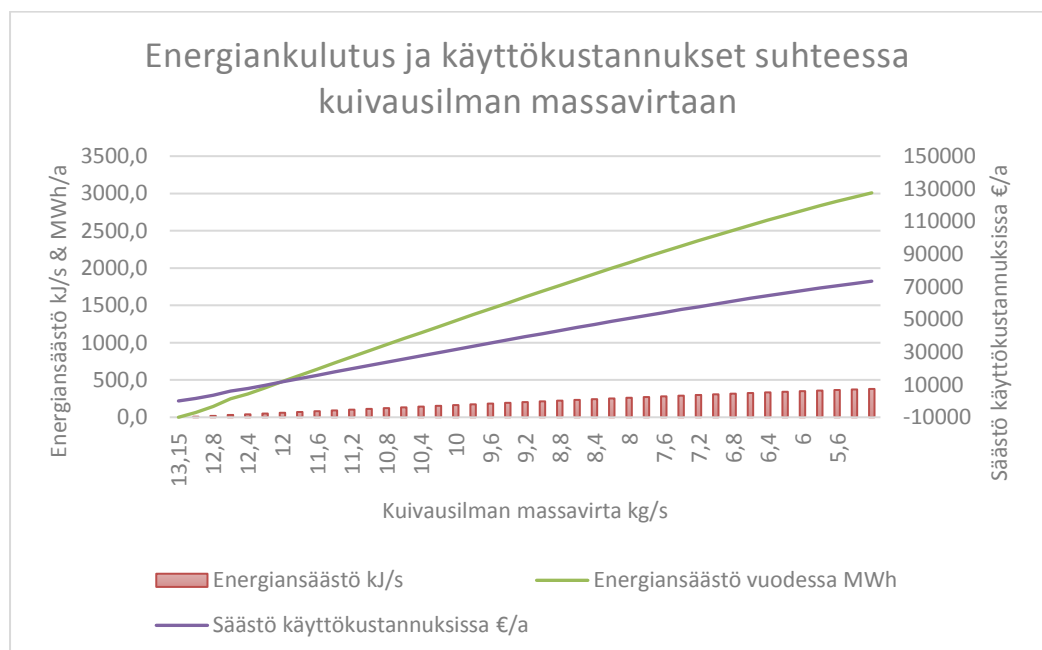
€ = säästö vuotuisissa käyttökustannuksissa (€/a)

Taulukko 9. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa osa 1/2

m	P	E	€
13,15	0	0	0
13	-8,0	-63,6	-1552
12,8	-18,6	-147,1	-3589
12,6	-31,1	-246,2	-6007
12,4	-39,5	-313,2	-7642
12,2	-50,0	-396,2	-9667
12	-60,5	-479,4	-11697
11,8	-71,0	-562,1	-13715
11,6	-81,4	-644,5	-15726
11,4	-91,8	-726,9	-17736
11,2	-102,1	-808,6	-19729
11	-112,5	-890,7	-21733
10,8	-122,7	-971,8	-23712
10,6	-133,0	-1053,1	-25695
10,4	-143,2	-1134,0	-27669

Taulukko 10. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa osa 2/2

m	P	E	€
10,2	-153,4	-1214,8	-29642
10	-163,4	-1294,4	-31583
9,8	-173,6	-1374,6	-33540
9,6	-183,6	-1454,3	-35485
9,4	-193,6	-1533,2	-37411
9,2	-203,5	-1611,8	-39327
9	-213,4	-1690,4	-41247
8,8	-223,2	-1767,6	-43130
8,6	-233,0	-1845,3	-45026
8,4	-242,6	-1921,3	-46881
8,2	-252,2	-1997,7	-48745
8	-261,7	-2072,6	-50571
7,8	-271,1	-2147,3	-52394
7,6	-280,5	-2221,5	-54203
7,4	-289,7	-2294,1	-55977
7,2	-298,8	-2366,3	-57738
7	-307,8	-2437,4	-59472
6,8	-316,5	-2506,8	-61167
6,6	-325,2	-2575,4	-62840
6,4	-333,7	-2643,0	-64488
6,2	-342,0	-2708,5	-66087
6	-350,1	2772,7	-67654
5,8	-358,0	-2835,2	-69179
5,6	-365,6	-2895,3	-70646
5,4	-372,8	-2952,8	-72049
5,2	-379,8	-3008,3	-73401



Kuvio 7. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa.

Taulukosta nähdään, että 6,8 kg/s ilman massavirtauksella säästöt vuotuisessa energiankulutuksessa ovat 2506,8 MWh/a, jonka ansiosta käyttökustannukset laskevat 61167€.

Taulukko 11. Säästöt kuivaimen energiankulutuksessa ja käyttökustannuksissa ilman massavirralla 6,8 kg/s

Energiankulutus	-316,5	kJ/s
Energiankulutus vuodessa	-2506,8	MWh
Höyryn hinta	24,4	€/MWh
Käyttökustannukset vuodessa	-61167	€/a

Kuivaimen ilmavirtausta on mahdollista pienentää suhteellisen suuri määrä (48%), ennen kuin poistoilman kastepiste tulee vastaan. Jos kuivaimen ilmavirtausta pienennettäisiin tähän saakka, saataisiin siitä jopa 61 000€ vuotuiset säästöt, mutta jo maltillisella esimerkiksi jo kahden kilon ilmavirtauksen pienentämisellä saavutettaisiin myös 20 000€ vuotuiset säästöt energiankulutuksessa ilman riskiä, että tämä tulisi aiheuttamaan ongelmia poistoilmasuodattimien tai kuivaimen muun toiminnan kannalta. Työ osoittaa, että pienentämällä tuloilman massavirtaa saadaan noin 10 000€:n säästö jokaista pienennettyä ilmakiloa kohden. Kuivaimen tuloilmapuhaltimet ovat valmiiksi varustettu taajuusmuuttajilla, joten ilmavirtausta pystytään säätämään ilman uusia investointeja.

11 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli optimoida CP-Kelcon 6-linjan tuotekuivaimen energiankulutus, jossa mielestäni onnistuttiin. Työssä tutkittiin tuotteen loppukosteuden optimointia, jolla on positiivinen vaikutus kuivaimen energiankulutukseen, sekä linjan tuotantoon. Toisena ratkaisuna työssä tutkittiin kuivaimen ilmavirtauksen vaikutusta sen energiankulutukseen. Työ osoitti, että

kuivaimen ilmavirtausta pienentämällä sen energiatalous paranee ja tämä pienentää merkittävästi kuivaimen energiankulutusta.

Työssä tutkitut ratkaisut säästävät vuositasolla laskennallisesti 2644,8 MWh energiaa, josta saadaan 64513€ säästöt käyttökustannuksissa. Työn pohjalta kävi myös esiin, että optimoimalla tuotteen loppukosteus saadaan linjalle 56 tonnia lisää tuotantokapasiteettia, mikä lisää yrityksen myyntiä 168 000€ vuodessa. Investointeja ehdotukset vaativat noin 10 000€.

Teknisiä rajoituksia työssä ei suoranaisesti kohdattu, vaan työn ehdotukset ovat täysin toteutettavissa ja kuivaimen on jo hankittu Vaisala kosteusmittarit. Jatkokehittämistä opinnäytetyössä jäi lähinnä automaatiojärjestelmiin. Kuivaimelle pitäisi kehittää säätöpiirit ohjaamaan sen toimintaa automaattisesti energiatehokkaampaan suuntaan.

Opinnäytetyön aihe oli haastava ja paljon laskentaa sisältävä, mutta olen siihen tyytyväinen. Sain oppia ja kokemusta omaan alaani läheisesti liittyvästä työstä, sekä paljon uusia näkökulmia. Kokonaisuutena pidin työtä mielekkäänä, se tarjosi sopivasti haastetta ja mahdollisuuden realististen kehitysideoiden etsimiseen.

12 Lähteet

Appendix 1 property tables and charts (SI units). 2005. Taulukko. Viitattu 22.5.2016.

https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1206/CENGEL_%20PROPERTY%20Tables%206%20NEW-Slappendix1.pdf

A 27.12.2012/1063. Valtioneuvoston asetus energiatuen myöntämisen yleisistä ehdoista. Viitattu 4.11.2016. Valtion säädöstietopankki Finlex.

<http://www.finlex.fi>, ajantasainen lainsäädäntö

CMC 2000 prosessin kuvaus. 1999. koulutusmateriaali. Metsä Specialty Minerals Oy

CMC-tuotekoulutus. N.d. koulutusmateriaali. CP Kelco arkisto

CMC:n valmistusvaiheet. N.d. koulutusmateriaali. CP Kelco arkisto

CMC valmistus 6-linjalla. N.d. Diaesitys. CP Kelco arkisto

CP Kelco 2010. Yleisesittely. Tervetuloa Äänekosken tehtaalle. PDF. CP Kelco

Davidson, R. 1980. Handbook of water-soluble gums and resins. New York: McGraw-Hill

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen S. 2013. Voimalaitostekniikka 2. tarkastettu painos. Tampere: Opetushallitus

Karboksimetyyliselluloosan valmistus 6-linjalla. N.d. CP Kelco. Koulutusmateriaali. Asiakirja CP Kelcon arkistossa

Mäkinen, M., Siltanen, H. Selluloosajohdannaisten rakenteen ja

substituutioasteen tutkiminen. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän Yliopisto, Kemian laitos. Viitattu 22.12.2016.

<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/51450/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201609244202.pdf?sequence=1>

Olomuodon muutokset. N.d. Opetusmateriaali Kouvolan kaupungin sivustolla. Viitattu 28.1.2016.

<https://peda.net/kouvola/koulut/eskolanmaenkoulu/oppiaineet/fysiikka/tl/markun-fysiikka2/markun-9-luokat/energia/olomuodon-muutokset>

Propylene Glycol based Heat-Transfer Fluids. N.d. Taulukko The engineering toolboxin sivustolla. Viitattu 20.6.2016.

http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html

Propyleeniglykoli. 1997. Taulukko. Viitattu 20.6.2016.

<http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0321.htm>

Rönkä, P. 2016. Toimihenkilö. CP Kelco Oy. Keskustelu t ja sähköpostit 17.2.2016-18.8.2016

Teollisuuden energia-analyysi CP Kelco oy. 2015. Työ- ja elinkeinoministeriön tukema energiakatselmus. Etteplan

The Water Cycle: Evaporation. N.d. Artikkelit vettä tieteellisesti käsittelevällä sivustolla. Viitattu 4.1.2016.

<https://water.usgs.gov/edu/watercycleevaporation.html>

Tiihonen, I. 2016. Toimihenkilö. CP Kelco Oy. Keskustelut ja sähköpostit 10.2.2016-20.8.2016

USER'S GUIDE Vaisala HUMICAP® Humidity and Temperature Transmitter Series HMT360. N.d. Käyttöohje. Viitattu 10.10.2016.

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/HMT360%20User's%20Guide%20in%20English.pdf>

13 Liitteet

Liite 1. mittauspöytäkirja 7.4.2016 CP Kelco

Lämmönvaihdin 26W205:

Propyleeniglykoli

V_glykoli	4,6	l/s
T_in_glykoli	24	°C
T_out_glykoli	36	°C
Tiheys glykoli 35%	1010,1	kg/m ³
m_glykoli	4,64646	kg/s
Glykoli_suhde	35	%
Cp_glykoli	3,82	kJ/kg*K

Vesi

V_vesi	0,8	l/s
T_in_vesi	83	°C
T_out_vesi	28	°C
Tiheys_vesi 80°C	971,8	kg/m ³
m_vesi	0,77744	kg/s
Cp	4,18	kJ/kg*K

Lämmönvaihdin 46W024B:

Ilma

m_ilma_laskennallinen	13,15	kg/s
T_in_ilma	10	°C
T_out_ilma	18	°C

Höyrylämmitys:

höyry	VP	MP
-------	----	----

m_höyry	0,215	0,170	kg/s
Paine_in	11,5	3,5	bar
T_in_höyry	185	155	°C
T_out_lauhde	100	100	°C
h_in	2781	2752	kJ/kg*K
h_out	419	419	kJ/kg*K

CMC märkä:

m_in_cmc_kostea		3,53	t/h
T_in_cmc_kostea		55	°C
m_in_cmc_abs.kuiva		1,75	t/h
m_in_vesi		1,78	t/h
Abs. kosteus		50,4	%
Cp		2,93504	kJ/kg*K

CMC kuiva:

m_out_cmc_kuiva		1,97	t/h
T_out_cmc_kuiva		56	°C
m_out_cmc_abs.kuiva		1,75	t/h
m_out_vesi		0,22064	t/h
Kosteus_kuiv_jälk		11,2	%
Kosteus_valm_tuot		8,25	%
Cp_abs.kuiva		1,67	kJ/kg*K
Cp_kuiva		1,95	kJ/kg*K

Tuloilma (ITL)

Ulkolämpötila = 10,1 °C

Kosteus RH = 43%

Paine = 1013,3 hPa

Poistoilma:

P= 1013,3 hPa

Kosteus RH = 41,9

$T = 47,8\text{ }^{\circ}\text{C}$