

# **Viilunkuivaimen kuivausilman lämpötilan nostaminen**

Jarno Vepsäläinen

Opinnäytetyö

Lokakuu 2016

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Vepsäläinen, Jarno	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Lokakuu 2016
	Sivumäärä 42	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Viilunkuivaimen kuivausilman lämpötilan nostaminen</b>		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen, Harri Tuukkanen		
Toimeksiantaja(t) Metsä Wood Oy, Suolahden vaneritehdas		
Tiivistelmä <p>Selvitys viilunkuivaimen kuivausilman lämpötilan nostamisesta tehtiin Metsä Wood Oy:lle Suolahden vaneritehtaalle. Tarkastelun kohteena oli 1-viilunkuivaaja, joka kuivaa kaikkein kosteuspitoisimman viulun. Tavoitteena oli selvittää keinoja kuivausilman lämpötilan nostamiseksi. Kosteuspitoisinta viilua kuivatessa lämpötila kuivaajan sisällä ei saavuta haluttua arvoa ja tämä hidastaa kuivumista. Viulun kuivaus jarruttaa koko vanerin ja tehtaan tuotantoa. Kilpailukykyä ylläpitääkseen tehtaan tulee pyrkiä jatkuvasti parantamaan tuotantokapasiteettia ja – tehokkuutta.</p> <p>Työ toteutettiin tutustumalla ensin viilunkuivaajan toimintaan, ajotapoihin ja – arvoihin ja aiempiin selvityksiin aiheesta. Tietoperusta prosessista ja komponenteista etsittiin havu- vaneritehtaan omista arkistoista ja mittaus tiedot löytyivät tehtaan palvelimen tiedonkeruu- ohjelmistosta. Osa tiedoista saatiin haastatteleamalla työntekijöitä. Tämän jälkeen keskityttiin käsittelemään kuivausilman lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä.</p> <p>Prosessihöyryn kiertoa tutkittiin mittauspisteistä ja vertailtiin keskenään. Tarkoituksena oli etsiä mahdollisia vuotoja ja poikkeamia kierrosta. Lisäksi työssä laskettiin kuivaajan lämmönvaihtimen lämmönsiirtokapasiteetti, jonka avulla pyrittiin etsimään potentiaalisia parannuksia lämmönvaihtimen hyötysuhteeseen ja kuivausilman lämpötilan nostamiseen.</p> <p>Tutkimuksessa löydettiin tärkeimmät ilman lämpötilaan vaikuttavat tekijät ja niiden syy-seuraussuhteet. Parannusvaihtoehtoja prosessista löydettiin, mutta tärkeimmät kuivausilmaa parantavat tekijät kuten pattereiden lisääminen olisivat melko kustannustehottomia.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) vaneri, viilu, lämmönsiirto, lämmönvaihdin, kuivaus		
Muut tiedot		

Author(s) Vepsäläinen, Jarno	Type of publication Bachelor's thesis	Date October 2016 Language of publication: Finnish
	Number of pages 42	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Increasing the drying temperature in veneer dryer</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Nuutinen Marjukka, Tuukkanen Harri		
Assigned by Metsä Wood Oy, Suolahti Plywood Mill		
Abstract  <p>The report on increasing the drying air temperature in veneer dryers was assigned by Metsä Wood Oy, Suolahti plywood mill. The object of the inspection was veneer dryer number one, which dries the moistest veneer. The objective was to find ways to raise the temperature of the drying air. While drying the moistest veneer sheets, the temperature inside the dryer does not reach the desired value, which will slow down the speed of the dryer. Veneer drying delays the entire plywood and factory production. In order to maintain competitiveness, improving the production capacity and efficiency should be pursued on an ongoing basis.</p> <p>The work was started by getting acquainted with the functions, structure and control values of the veneer dryer, and searching previous studies on the subject. The information and data on the processes and components was found in archives at the plywood mill, while the measurement data were collected from the factory server, and some of the information was obtained by interviewing the workers. After data collection, the main focus was on the factors affecting the drying air temperature.</p> <p>The process steam cycle was inspected and values from the measure points were compared with each other. The aim was to search for potential leaks and anomalies in the cycle. Additionally, the heat transfer capacity of the heat exchanger in the dryer was calculated, which aimed to find potential improvements to increase the efficiency of the heat exchanger and increase the drying air temperature.</p> <p>The research found the most important factors affecting the temperature of the air and their causal connections. Alternatives for improvements in the process were discovered, but the most important factors to improve the drying air, such as insertion of extra heaters would prove quite cost-inefficient.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) plywood, veneer, heat transfer, heat exchanger, drying		
Miscellaneous		

## Sisältö

1	Johdanto.....	4
2	Vanerin tuotantoprosessi.....	5
3	Viilun kuivaus.....	6
	3.1 Puuaineen ominaisuuksia.....	6
	3.2 Kuivausmenetelmä.....	7
	3.3 Kuivauksen ongelmat.....	8
4	Viilunkuivaaja.....	8
	4.1 Rakenne.....	8
	4.2 Toimintaperiaate.....	10
	4.3 Kuivaajan lämmönsäätö.....	11
5	Lämmönsiirto.....	11
	5.1 Lämmön siirtyminen.....	11
	5.2 Lämmönsiirron mekanismit.....	12
	5.3 Putkivirtaus.....	12
	5.3.1 Reynoldsin luku.....	12
	5.3.2 Nusseltin luku.....	13
	5.4 Lämmönvaihdin.....	13
	5.5 Ripaputki.....	15
6	Tutkimuksen toteutus.....	17
	6.1 Prosessihöyryn kierto ja mitoitusarvot.....	18
	6.2 Lämmönvaihtimen mitoitus.....	18
	6.2.1 Mitoituksen lähtökohdat.....	18
	6.2.2 Lämpötehon laskenta.....	20
	6.2.3 Lämmönsiirtopinta-ala.....	21
	6.2.4 Logaritminen lämpötilaero.....	22
	6.2.5 Korjauskerroin.....	23
	6.2.6 Lämmönsiirtokertoimet.....	24

6.3	Höyryn massavirtauksen kuristaminen .....	26
7	Tutkimustulokset.....	26
7.1	Viilunkuivaajan mitoitusarvoja .....	26
7.2	Höyryverkon nykyinen kunto .....	28
7.3	Ripaputkipatterin laskennan tulokset .....	30
7.4	Höyryn massavirtauksen kuristamisen tulokset .....	31
8	Johtopäätökset.....	32
8.1	Käytetyn höyryn vaihtelun vähentäminen .....	32
8.2	Höyryverkon lämpötilan ja paineen muutokset.....	33
8.3	Pattereiden lisääminen .....	34
8.4	Tuloilman esilämmittäminen .....	35
9	Pohdinta .....	35
	Lähteet.....	38
	Liitteet .....	40
	Liite 1. Ilman ominaisuudet ilmanpaineessa.....	40
	Liite 2. Nusseltin luku pakotetussa konvektiossa eri geometrioiden yli.....	41
	Liite 3. Nusseltin luku ristivirtalämmönvaihtimissa .....	42

## Kuviot

Kuvio 1. Vanerin tuotantoprosessi.....	6
Kuvio 2. Viilunkuivaaja sivusta .....	9
Kuvio 3. Kuivaajan poikkileikkaus.....	10
kuvio 4. Lämpövirta ja -vastus putken seinämän läpi .....	14
kuvio 5. Fluidin lauhtuminen.....	14
Kuvio 6. Yleisimmät ripaputkityypit .....	16
Kuvio 7. Porrastettu putkijako .....	17
Kuvio 8. Ristivirtauksen periaate viilunkuivaajassa.....	19
Kuvio 9. Ellipsin puoliakselit .....	21
Kuvio 10. Taulukko ristivirtalämmönvaihtimen korjauskertoimelle.....	23
Kuvio 11. Virtaus poikittaisen putkijaon läpi.....	30

## Taulukot

Taulukko 1. Viilunkuivaimen toiminta-arvojen vertailu.....	27
Taulukko 2. Lämpötila eri mittauspisteissä .....	28
Taulukko 3. Paine eri mittauspisteissä .....	29

# 1 Johdanto

Suomen vaneriteollisuus on yksi Euroopan suurimpia ja kehittyneimpiä. Vaneri on säilyttänyt suosionsa huonekalujen valmistuksessa, rakentamisessa ja muissa käyttökohteissa, jotka vaativat materiaalilta rakenteellista lujuutta, kosteuden kestävyyttä ja halpaa hintaa. Korkealle jalostetun koivuvanerin lisäksi Suomessa valmistetaan myös vielä halvempaa, havupohjaista vaneria rakennusteollisuuden tarpeisiin (Vanerin kulutus n.d.).

Metsä Wood on osa Metsä Group-konsernia, jonka liiketoiminta-alueeseen puutuotteiden lisäksi kuuluvat sellu, kartonki, pehmo- ja ruoanlaittopaperi sekä puuhankinta ja metsäpalvelut. Metsä Groupin tärkeimpiä periaatteita on kestävä kehitys, joka toteutuu käyttämällä raaka-aineena uusiutuvaa luonnonvaraa: puuta. Metsä Woodilla on Suomessa kaksi vanerin tuotantoyksikköä, Suolahdessa ja Punkaharjulla. Suolahden vaneritehdas on valmistanut koivuvaneria jo vuodesta 1920, ja havuvaneria vuodesta 1995 (Liiketoiminta-alueet n.d.).

Opinnäytetyön tarkastelun kohteena on Suolahden havuvaneritehtaan 1-viilunkuivaaja, joka kuivaa pääasiassa kaikkein kosteuspitoisinta pintaviilua (kosteus max. 190 %, ks. luku 3.1). Ongelmana tällä kuivaajalla on hidas kuivuminen suuren kosteuspitoisuuden vuoksi. Opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella mahdollisuuksia ja eri tapoja nopeuttaa kuivausaikaa nostamalla kuivaajan sisällä kiertävän ilman lämpötilaa, sillä tämän hetkinen kuivausilman lämpötila ei saavuta edes asetusarvoaan.

Viilunkuivaus toimii koko vanerinvalmistuksen pullonkaulana, eli korkeamman lämpötilan mahdollistama nopeampi viilunkuivaus nopeuttaisi koko valmistusprosessia ja lisäisi tuotantokapasiteettia. Kilpailukykyä ylläpitääkseen tehtaan tulee pyrkiä parantamaan jatkuvasti tuotantokapasiteettia ja – tehokkuutta.

Opinnäytetyö on rajattu käsittelemään vain Suolahden havuvaneritehtaan 1-kuivaajaa ja siihen liittyviä komponentteja ja energiavirtoja voimalaitoksen jakotukilta havuvaneritehtaan lauhdesäiliölle asti. Kuivaajalle on tehty aiemminkin opinnäytetöitä tuotantokapasiteetin kasvattamiseksi, näistä viimeisin keskittyi ajoparametrien säätämiseen ja optimointiin.

## 2 Vanerin tuotantoprosessi

Kaadetut puut katkaistaan sopiviin tukkipituuksiin ennen varsinaista tuotantoprosessia. Tämän jälkeen puuainesta pehmennetään hautomalla vedessä vuorokaudesta viikkoon. Haudonta-altaiden lämpötila olisi optimissaan noin 60 – 80 °C puulajista riippuen, mutta yleensä altaiden lämpötila on 30 – 50 °C ulkolämpötilasta riippuen.

Kuorinnan ja katkaisun jälkeen puutukit sorvataan viilumatoiksi, jotka lajitellaan kosteuden mukaan eri luokkiin. Puun sorvaamisen sijaan viilumatot voidaan myös leikata tai höylätä, jolloin raaka-ainehävikki on pienempi ja laatu parempi, mutta kustannukset kalliimmat.

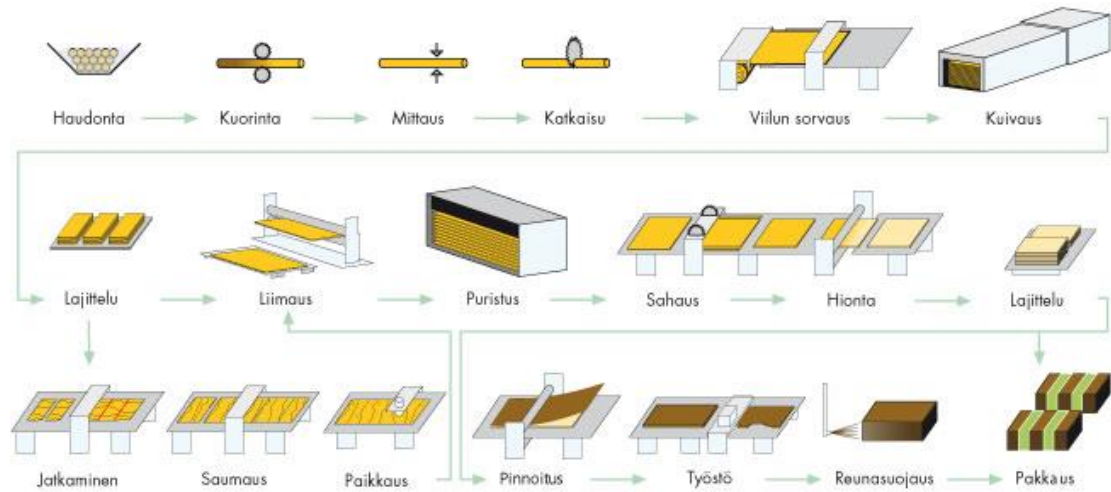
Viilumatot kuivataan alhaiseen loppukosteuteen ja lajitellaan eri laatuluokkiin, joista huonokuntoisimmat viiluarkit menevät mahdollisesti uudelleen kuivattavaksi, paikattavaksi, saumattavaksi tai jatkettavaksi.

Liimausvaiheessa viilut ladotaan toinen toisensa päälle ristikkäin siten, että joka toinen on liimaviilu ja joka toinen kuivaviilu. Viiluja ladotaan monta vanerilevyaihiota, jotka esipuristetaan nippuina. Esipuristus parantaa vanerin liimauslaatua ja helpottaa aihoiden käsittelyä kuumapuristuksen syöttövaiheessa. Kuumapuristuksessa viilukerrokset puristuvat ja liima kovettuu paineessa ja korkeassa lämpötilassa.

Vanerilevyt sahataan ja hiotaan toleranssien mukaisiin paksuuksiinsa, sen jälkeen vaneri joko lähtee jatkojalostukseen tai pakataan myytäväksi (Veistinen & Pennala 1997).

Kuviossa 1 esitetään vanerin valmistusprosessi yksinkertaistettuna kaaviona





Kuvio 1. Vanerin tuotantoprosessi (Vanerin tuotantoprosessi).

### 3 Viilun kuivaus

#### 3.1 Puuaineen ominaisuuksia

Puu on hygroskooppinen eli vettä imevä aine, jonka kosteuspitoisuus voidaan määrittellä veden painon suhteella puun kuivapainoon. Esimerkiksi jos 100 kg painoisessa puutukissa on vettä 50 kg, on puun kosteus tällöin 100 %. Pintapuulla on kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta ilman suhteellisen kosteuden mukaan, tästä johtuen puun tilavuus muuttuu kosteuden mukaan. Tasapainokosteus on kutakin ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta vastaava tila, johon puuaine pyrkii ja jossa puun kosteus pysyy vakiona (Viilun valmistus n.d.).

Puun rungon solukon tarkoitus on huolehtia veden kuljetuksesta ja varastoinnista. Kuivattaessa puun soluonteloissa oleva vapaa vesi poistuu ensimmäisenä. Hetkeä, jolloin soluonteloissa ei ole enää vettä ja soluseinämässä on enimmäismäärä vettä, kutsutaan puun kyllästymispisteeksi. Puun kosteuspitoisuuden mennessä noin alle 30 % soluseinämien vesi alkaa poistua, mikä aiheuttaa puun kutistumisen. Kutistuminen taas aiheuttaa puuhun sisäisiä jännityksiä, jotka näkyvät esimerkiksi vääntyminä tai kieroutumisena, kuivauksessa myös halkeiluna. Puun jäykkyys ja lujuus myös paranevat kutistumisen myötä (Isomäki & Koponen 2014).

Kemiallisesti sitoutunut vesi alkaa haihtua puun lämpötilan noustessa 100 °C-asteeseen. Puu syttyy palamaan noin 250 °C-asteessa, jos on liekki joka sytyttää (Paloteknisiä ominaisuuksia n.d.).

Kuivaajassa tulipalon vaaran viulun sijaan aiheuttaa esimerkiksi puupöly tai seinämiin kondensoitunut pihka, joka voi syttyä tuleen itsestään jo huomattavan alhaisissakin lämpötiloissa.

### 3.2 Kuivausmenetelmä

Viulun kuivauksen tavoitteena on päästä haluttuun loppukosteuteen niin, että jokaisen viiluarkin loppukosteus on sama ja kosteus arkissa tasainen. Viilunkuivauksessa tavallisin kuivausmenetelmä on konvektiokuivaus, jossa puun pinnalla olevan vesi kuljetetaan pois kiertoilman avulla.

Puun kuivumiseen vaikuttavat:

- ilman lämpötila
- ilman kosteus
- ilman nopeus puun pinnalla (suutinlaatikoiden ilman virtausnopeus)
- puun tiheys
- puun paksuus
- puun solurakenne
- puulaji
- puun kosteus.

Veden siirtyminen ilmaan on sitä nopeampaa, mitä korkeampi ilman lämpötila on ja mitä pienempi on ilman suhteellinen kosteus. Puun laadun kannalta suurella ilman kosteudella on puolestaan parantava vaikutus. Veden siirtyminen ilmaan puun pinnalta heikkenee, mutta veden siirtyminen puun sisäosista pintaa kohti paranee. Tämä pienentää kosteuseroja pinnan ja sisäosien välillä ja ehkäisee epätasaisen pinnan muodostumista. Lisäksi korkea ilman suhteellinen kosteus ehkäisee tulipalon vaaraa.

### 3.3 Kuivauksen ongelmat

Kuivauksen suurimpia ongelmia on kosteuden vaihtelu. Viilun loppukosteus ei saisi poiketa kuin 1-2 % tavoiteloppukosteudesta, jolle liimauksessa käytetyn liiman kuiva-ainepitoisuus on suhteutettu. Suurempi vaihtelu voi aiheuttaa liimauksen epäonnistumisen. Viilun loppukosteuteen ja kuivausvirheisiin vaikuttavat:

- puun runkojen kosteuden vaihtelu
- sorvatun viilun eri osien kosteuden vaihtelu
- kuivausilman kosteuden vaihtelu
- kuivaajan täyttöasteen vaihtelu
- kuivauslämpötilan vaihtelu
- kuivaajan pysähtyminen.

Loppukosteuden tasaamiseksi viiluarkit jaotellaan sorvauksen jälkeen useampaan, tässä tapauksessa kolmeen, eri kosteusluokkaan, joita ajetaan kuivaajaan vuorotellen. Jokaiselle kosteusluokalle on haettu ja optimoitu ajoarvot, joilla viilu kuivuu parhaiten.

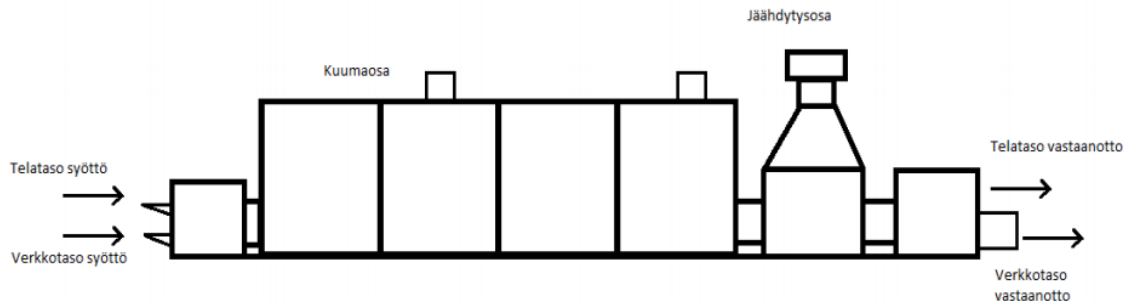
Kuivatun viilun tasapainokosteus on tehdasoloissa noin 7-8 %, joten ylikuivattu viilu pyrkii imemään kosteutta ilmasta lähemmäksi tasapainokosteuttaan. Ylikuivaus tosin aiheuttaa viilun halkeilun takia paljon kelvotonta ja haurasta haasketta, mikä lisää työn määrää. Ylikuivaus tekee myös viilun pinnasta karheamman ja aaltoilevan, mikä tekee liimaamisesta hankalaa ja lisää liiman kulutusta. Myös kuivaajaa operoivat työntekijät pyrkivät joskus ajamaan ylikuivunutta viilua, koska uudelleenkuivaus lisää heidän työmääräänsä.

## 4 Viilunkuivaaja

### 4.1 Rakenne

Suolahden vaneritehtaan 1-kuivaaja on suutinpuhalluksella varustettu telakuivaaja, jossa on erillinen kuivausosa (kuuma osa) ja jäähdytysosa. Kuivaus- ja jäähdytysosa koostuvat vielä erillisistä moduuleista, jotta asennustyö olisi helpompaa ja rakennusvaihe tapahtuisi hyvissä konepajaolosuhteissa.

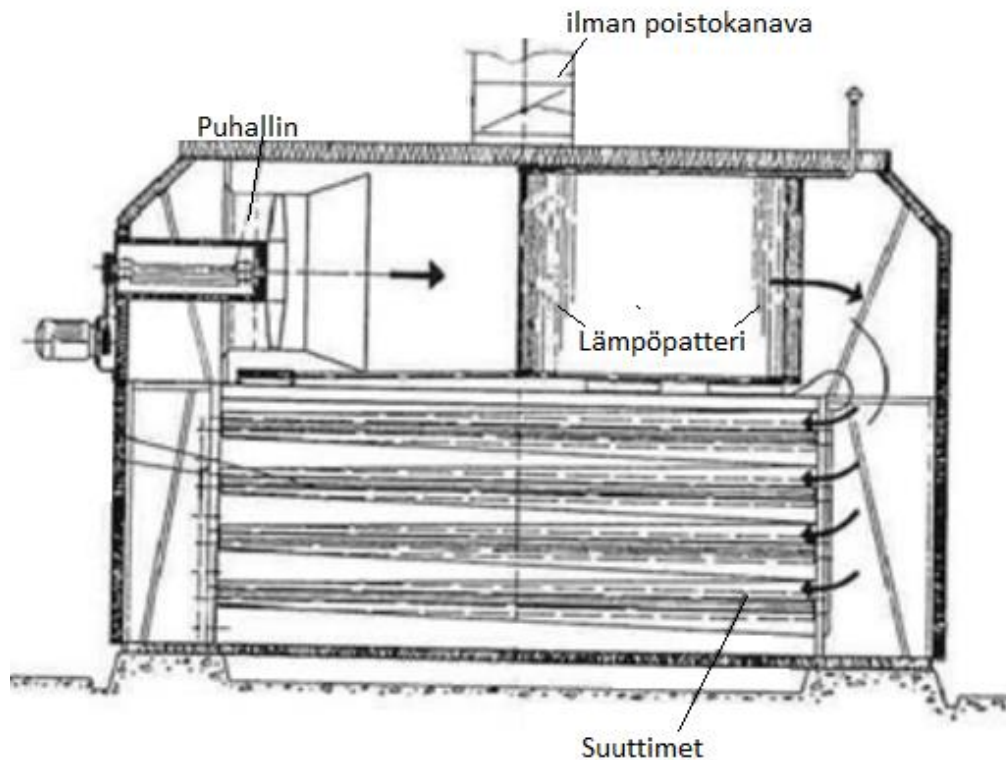
Kuivaajan kuivausosassa on vierekkäin 23 kennoa, joihin jokaiseen kuuluu alaosamoduuli ja yläosamoduuli. Alaosamoduuliin kuuluvat telaparit, suutinlaatikot, huolto-ovet ja muut varusteet. Yläosaan kuuluvat puhallin, patterit ja muut varusteet. Kuviossa 2 on esitetty viilunkuivaaja, jossa on kuvattu neljä kuuman osan moduulia ja yksi jäähdytysosan moduuli.



Kuvio 2. Viilunkuivaaja sivusta (Kauttonen 2014, 16)

Kuivausosan pituus on 46 metriä ja jäähdytysosan pituus on 6 metriä. Kuivauskerroksia on 4 kpl päällekkäin ja viiluja voi syöttää 3 kpl rivissä kuivaajaan. Moduulit hitsataan kiinni toisiinsa ja putkisto rakennetaan esikootuista osista asennusvaiheessa. Kuivaajan seinämät, katto ja lattia on eristetty vuorivillalla. Oviin on lisätty tiiviste, joka on suojattu niin, ettei kuuma ja kostea ilma pääse kosketuksiin sen kanssa. Jäähdytysosa koostuu kolmesta moduulista, joista jokaisessa on 2 kpl aksiaalipuhaltimia ja suutinlaatikko (Toimintaselostus 1995).

Kuviossa 3 näkyy poikkileikkaus kuivaajan kennosta. Nuolet osoittavat ilmavirran suunnan. Vasemmalla ylhäällä näkyy radiaalipuhallin, oikealla ylhäällä ripaputkipatteri ja alhaalla suuttimet.



Kuvio 3. Kuivaajan poikkileikkaus

## 4.2 Toimintaperiaate

Viiluarkit syötetään puun syiden suunnassa telaparien välissä kuivausosan ja tämän perässä olevan jäähdytysosan läpi. Viilu kuivuu pääasiassa kiertävän kuuman ilman vaikutuksesta. Kiertoilmaa lämmitetään höyrypattereilla, jotka on valmistettu toisiinsa hitsatuista ripaputkiriveistä. Kuivaajan sisällä on höyrytukki, joka jakaa höyryn jokaiseen kennoon. Palaava lauhde johdetaan kennokohtaisiin lauhteenpoistimiin ja lauhdetukkiin.

Kuumaa ilmaa kierrätetään radiaalipuhaltimilla, joita on 1 kpl/kenno. Ilmaa puhalletaan suutinlaatikoihin, joista se suurella nopeudella purkautuu suutinreikien läpi kohtisuoraan viilun pinnalle. Suutinlaatikoiden ja telojen välistä ilma palaa puhaltimille. Osa kosteasta ilmasta johdetaan pois kolmea ilmanpoistoaukkoa pitkin, jotka yhdistyvät katolla yhdeksi poistokanavaksi. Poistoaukoissa on säätöpellit, joita ohjaa ilman kosteus. Korvausilma tulee pääasiassa viilujen syöttöpäästä.

Jäähdytysosassa viiluarkit jäähdytetään ilmalla, joka otetaan ulkoa. Samoin kuin kuivausosassa, aksiaalipuhaltimet kierrättävät ilmaa suutinlaatikoiden läpi viilun pinnalle (Toimintaselostus 1995).

### 4.3 Kuivaajan lämmönsäätö

Kuivaajan kuivausilman lämpötilaa voi säätää käsin tai automaattisesti. Automaattisäätöä käytetään aina normalisäätönä. Säätöelimenä toimii höyryventtiili, jossa on sähköisen asennon mittaus. Valvomosta näkee höyryventtiilin asennon, lämpötilan asetusarvon ja lämpötilan oloarvon (Toimintaselostus 1995).

Mittaus tapahtuu keskeltä kuivaajaa Pt-100-anturilla, joka perustuu vastusmittausperiaatteeseen. Vastuksen materiaalina on platina, ja vastuksen arvo on 100 ohmia lämpötilan ollessa 0 °C. Vastus kasvaa lämpötilan noustessa lineaarisesti (Vastusmittausperiaate n.d.).

## 5 Lämmönsiirto

### 5.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö voidaan määritellä energiamuodoksi, jota voidaan siirtää systeemistä toiseen ja joka johtaa lämpötilaeroon systeemien välillä. Lämmönsiirron nopeus on riippuvainen lämpötilaeron suuruudesta ja suunta on termodynamiikan toisen pääsäännön mukainen eli korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmönsiirto loppuu, kun lämpötilaeroa ei ole ja tasapainotila on saavutettu.

Pelkästään termodynaamisella tutkimuksella voidaan selvittää tarvittavan lämmönsiirron määrä, mutta se ei riitä analysoimaan lämmönsiirron nopeutta. Termodynamiikan pääsäännöt antavat pohjan lämmönsiirron tutkimiselle, joita hyödynnetään teollisuudessa esimerkiksi lämmönvaihtimien, kattiloiden, lauhduttimien ja jääkaappien mitoittamiseen (Cengel & Ghajar 2015, 2-5).

## 5.2 Lämmönsiirron mekanismit

Lämpöä voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtamalla, säteilemällä ja kuljettamalla (konvektio). Virtaavaa väliainetta kutsutaan termodynamiikassa fluidiksi.

Lämmön johtuminen nesteissä ja kaasuissa tapahtuu molekyylien törmätessä toisiinsa ja diffuusion vaikutuksesta ilman aineen siirtoa. Diffuusiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa ilmiötä, jossa molekyylit pyrkivät tasoittumaan johtuen entropian kasvusta. Kiinteissä aineissa johtuminen tapahtuu molekyylien värähtelystä hilarakenteessa ja vapaiden elektronien energian kuljetuksesta (Cengel & Ghajar 2015, 17–18).

Lämpö siirtyy konvektion avulla fluidin liikkeestä nesteessä, kaasussa ja kiinteään aineen pintaan. Nopeampi fluidin liike parantaa lämmön siirtoa konvektion avulla. Pakotettu konvektio tarkoittaa virtauksen aiheutumista ulkoisista syistä, kuten pumpun tai tuulen vaikutuksesta. Luonnollinen konvektio taas aiheutuu nostovoimasta, jossa esimerkiksi kiinteän aineen pinnalla lämpimämpi ja kevyempi ilma nousee, ja kylmä ja raskaampi ilma tulee tilalle (Cengel & Ghajar 2015, 25–26).

Lämpösäteily välittyy elektromagneettisten aaltojen muodossa aineesta, ja tämän seurauksena atomien tai molekyylien elektroninen rakenne muuttuu. Lämpösäteily ei vaadi väliainetta siirtyäkseen ja se on nopein lämmönsiirron muoto (Cengel & Ghajar 2015, 27; Rahkola 2014, 8).

## 5.3 Putkivirtaus

### 5.3.1 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on dimensioton luku, joka kuvaa virtauksen hitausvoimien suhdetta viskoottisiin voimiin (ks. kaava 1). Hitausvoimat syntyvät virtauksen nopeudesta ( $V$ ), aineen tiheydestä ( $\rho$ ) ja geometrian karakterisesta pituudesta ( $L_c$ ). Viskoottiset voimat taas dynaamisesta viskositeetista ( $\mu$ ), joka kuvaa aineen kitkaominaisuuksia.

$$Re = \frac{\text{Hitausvoimat}}{\text{Viskoottiset voimat}} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (1)$$

Tämän suhteen avulla voidaan selvittää, onko putkivirtaus laminaarinen vai turbulентtinen. Laminaarinen putkivirtaus on yleensä harvinainen teollisuuden sovelluksissa, sillä turbulентtisella virtauksella on paremmat lämmönsiirto-ominaisuudet. Tämä johtuu siitä, ettei virtauksen pintaan synny lämpövastuksena toimivaa kerrosta pienen virtausnopeuden takia, vaan virtaava aine pyörteilee ja sekoittuu (Rahkola 2014, 6-7).

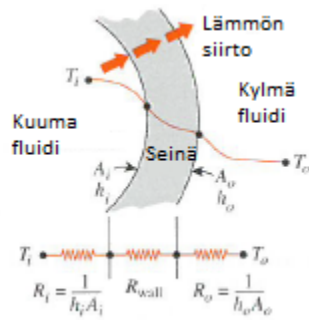
### 5.3.2 Nusseltin luku

Nusseltin luku on myös dimensioton luku, joka kuvaa aineen konvektiolla siirtyvän lämmön suhdetta vain johtumalla tapahtuvaan lämmönsiirtoon fluidikerroksen ollessa vakio. Mitä suurempi luku on, sitä tehokkaampi on konvektion vaikutus lämmön siirrossa. Nusseltin luvun ollessa ( $Nu = 1$ ) lämpö siirtyisi vain johtumalla eikä pinnalla tapahdu liikettä.

## 5.4 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihtimessa lämpö siirtyy kahden virtauksen välillä, joita erottaa kiinteä seinämä. Näin ollen lämpö siirtyy ensin kuumasta fluidista konvektiolla seinämään, seinämän läpi johtumalla ja seinämästä taas kylmään fluidiin konvektiolla. Kuviossa 4 esitetään lämmön siirtyminen seinämän läpi ja jokaisen vaiheen lämpövastus, joka noudattaa vastusverkko-analogiaa.

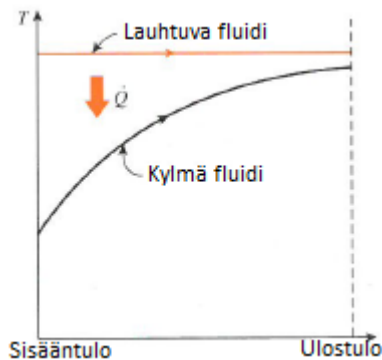




kuvio 4. Lämpövirta ja -vastus putken seinämän läpi (Cengel & Ghajar 2015, 652).

Lämmönvaihtimille annetaan tarkentavia nimiä perustuen niiden käyttötarkoitukseen. Esimerkiksi lauhdutin on lämmönvaihdin, jossa toista fluidia pyritään jäähdyttämään ja lauhduttamaan. Höyrykattila taas on lämmönvaihdin, jossa toista fluidia pyritään kuumentamaan ja höyryttämään (Cengel & Ghajar 2015, 651-652).

Faasimuutoksessa voidaan sitoa tai vapauttaa suuria määriä lämpöenergiaa. Kuviossa 5 on esitetty, miten lauhtuva fluidi vapauttaa lämpöenergiaa  $Q$  lämpötilan  $T$  pysyessä vakiona, ja kylmän fluidin lämpötila nousee.



kuvio 5. Fluidin lauhtuminen (Cengel & Ghajar 2015, 660).

Lämmönsiirron nopeus lämmönvaihtimessa voidaan laskea Newtonin jäähtymislakiin perustuvalla kaavalla 2.

$$\dot{Q} = UA_s F \Delta T_{lm} \quad (2)$$

jossa  $\dot{Q}$  = lämpöteho

$U$  = kokonaislämmönsiirtokerroin

$A_S$  = lämmönsiirtopinta-ala

$F$  = korjauskerroin

$\Delta T_{lm}$  = logaritminen lämpötilaero

Kuviossa 4 sisäpuolisen ja ulkopuolisen lämmönsiirtokertoimen tilalla on käytetty merkkiä  $h$ , joka on konvektiolämmönsiirtokerroin, mutta vastaa tässä tapauksessa samaa kokonaislämmönsiirtokerrointa  $U$ . Lämpövastuksia laskettaessa joudutaan käyttämään kahta lämmönsiirtokerrointa, koska sisäpuolinen ja ulkopuolinen lämmönsiirtopinta-ala ovat yleensä eri suuria.

Kokonaislämmönsiirtokerrointa dominoi näistä pienempi konvektiolämmönsiirtokerroin. Jos esimerkiksi sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin olisi paljon pienempi kuin ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin, synnyttäisi pienempi arvo pullonkaulan lämmönsiirron nopeudelle.

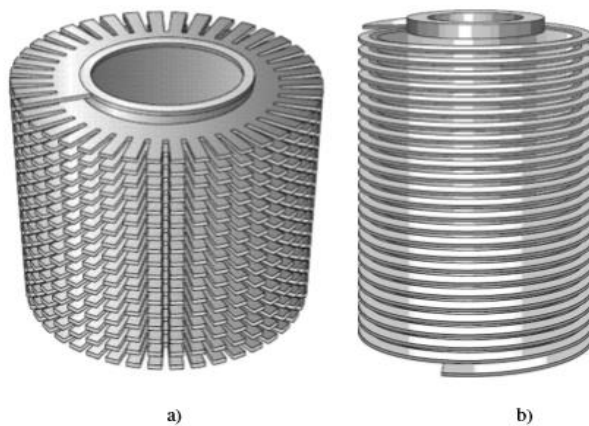
Lämmönsiirtoa voidaan parantaa lisäämällä lämmönsiirtopinta-alaa puolella, jolla lämmönsiirtokerroin on paljon pienempi. Lämmönsiirtokerroin on merkityksetön, ellei aluetta, johon se perustuu ole määritetty. Lämmönsiirtoon vaikuttaa siis lämmönsiirtokertoimen ja lämmönsiirtopinta-alan tulo  $UA$  (Cengel & Ghajar 2015, 652-653).

## 5.5 Ripaputki

Rivoitetun putken tarkoitus on kasvattaa lämmönsiirron pinta-alaa. Lämmönsiirto on paljon heikompaa kaasulla kuin nesteellä, joten ripaputkea käytetään yleensä kaasupuolella parantamaan lämmönsiirtoa (kuten esimerkiksi kuivausilman lämmityksessä

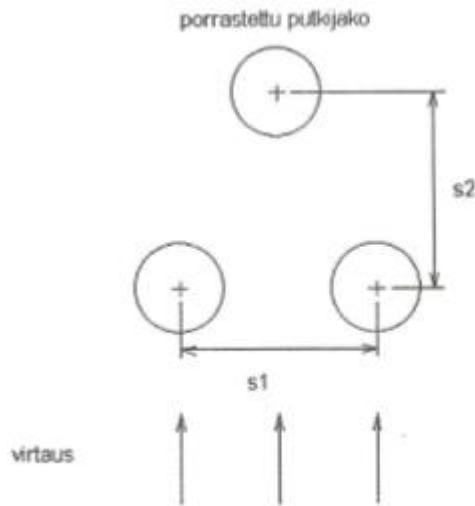
tai ekonomaisereissa). Ripaputkien ongelmana on yleensä ollut painehäviöt kaasupuolella ja herkempi likaantuminen.

Lämmöntalteenotossa yleisimpiä ovat segmentoidut spiraaliripaputket ja spiraaliripaputket (kuvio 6). Segmentoidun spiraaliripaputken (a) etuja ovat suurempi lämmönsiirtopinta-ala pituuden ollessa vakio, keveys ja pienempi painehäviö. Spiraaliripaputki (b) taas ei kerää likaa pintoihinsa yhtä helposti ja on helpompi puhdistaa (Neuvonen 2011, 23).



Kuvio 6. Yleisimmät ripaputkityypit (Neuvonen 2011, 24)

Kuviossa 7 on esitetty edellä mainitun viilunkuivaajan putkirivien jako. Porrastetulla putkijaolla on yleensä paremmat lämmönsiirto ominaisuudet, mutta painehäviö kasvaa suoraan putkijakoon nähden. Ilmapuolen painehäviöllä ei tosin ole suurta merkitystä kuivaajan hyötysuhteen kannalta (Neuvonen 2011, 22)



Kuvio 7. Porrastettu putkijako (Neuvonen 2011, 23)

## 6 Tutkimuksen toteutus

Tutkimustyö aloitettiin tutustumalla voimalaitoksen ja havuvaneritehtaan PI-kaavioihin ja keräämällä tietoa prosessin kiertokulusta, prosessiin liittyvistä komponenteista ja mitoitusarvoista. Vasta tämän jälkeen opinnäytetyö saatiin rajattua käsittelemään vain kuivausilman lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä.

Tietoperusta löytyi pääasiassa havuvaneritehtaan omista arkistoista, joista löytyi komponenttien CAD-piirustuksia ja selvityksiä koko prosessin kiertokulusta ennen havuvaneritehtaan rakentamista. Tietoja rakentamisen jälkeen tehdyistä muutoksista prosessiin ja sen komponentteihin löytyi vähän. Nämä tiedot saatiin haastatteleamalla työntekijöitä. Lisäksi ripaputkipattereiden tietoja ei löytynyt havuvaneritehtaalta eikä saksalaiselta valmistajalta myönnetty lupaa antaa tietoja, joten mitoitukseen tarvittavat tiedot jouduttiin itse mittaamaan kuivaajan sisältä tai arvioimaan mahdollisimman tarkasti.

Lämpötiloja, paineita ja muita höyryn ja ilman oloarvoja kerättiin myös eri mittauspisteistä voimalaitoksen höyrynjakotukilta havuvaneritehtaan lauhdesäiliölle asti. Näillä tiedoilla pyrittiin etsimään mahdollisia kierron vuotoja ja poikkeamia, joihin pystyttäisiin tekemään toimenpiteitä lämmönsiirron tehostamiseksi.

## 6.1 Prosessihöyryn kierto ja mitoitusarvot

Tuorehöyry (220 °C, 15,5 bar) tulee voimalaitokselta havutehtaan jakotukille, josta höyry jaetaan 1-kuivaajalle ja 2-kuivaajalle. Voimalaitoksen jakotukin mitoitettu käyttölämpötila on 250 °C ja käyttöpaine 16 bar. Jakotukkia on kuitenkin jouduttu laajentamaan kahteen kertaan, joten todellinen paineen ja lämpötilan kesto on voimalaitoksen työntekijöiden mukaan heikompi. Nykyiset asetusarvot ovat siis lähempänä todellisia maksimikäyttöarvoja. Havutehtaan jakotukin mitoitettu käyttöpaine on 17 bar ja käyttölämpötila 230 °C.

Havutehtaan jakotukilta höyryä menee 1-kuivaajalle keskimäärin 12 tn/h, eli noin 3,34 kg/s. Ennen kuivaajaa höyryn lämpötila on noin 217,5 °C ja paine noin 15 bar, eli höyry on tulistettua. Kuivaajan höyryputkisto on mitoitettu käytettäväksi alle 14 tn/h höyryn massavirralla, kestäämään 17 bar:in paine ja 230 °C lämpötila.

Kuivaajassa tulistettu vesihöyry luovuttaa lämpöenergiaa ja muuttuu lauhdevedeksi ja osittain myös paisuntahöyryksi. Lauhteenpoistimien jälkeen vesi kulkeutuu Lauhdesäiliöön. Lauhteen painetta kuivaajan jälkeen ei tarkasti tiedetä, sillä ainoa paikallismittari on rikki. Lauhdesäiliö on mitoitettu käytettäväksi 160 °C lämpötilassa ja 6 bar:in käyttöpaineessa.

Lauhdesäiliön jälkeen lämpöenergiaa käytetään hyödyksi vielä vanerin puristuksessa ja Suolahden kaukolämpöverkossa ennen kattilakiertoon palautumista.

## 6.2 Lämmönvaihtimen mitoitus

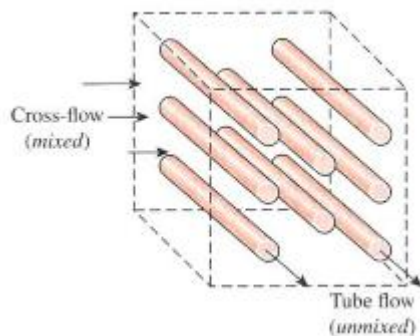
### 6.2.1 Mitoituksen lähtökohdat

Mitoituksen tarkoituksena on selvittää, onko kokonaislämmönsiirtokerroin riippuvainen höyryn vai ilman kierron lämmönsiirtokapasiteetista lämmönvaihtimessa. Kappaleessa 5.4 käsiteltiin lämmönsiirron nopeuden riippuvan putken sisäpuolisen ja ulko-

puolisen lämmönsiirtokertoimen ja lämmönsiirtopinta-alan (UA) tulosta. Jos nämä arvot ovat eri suuret, on mahdollista tehostaa lämmönsiirtoa nostamalla pienempää UA-tulon arvoa.

Analyysi tehdään logaritmiseen lämpötilaeroon (LMTD) perustuvalla menetelmällä. LMTD-analyysiä käytetään yleensä lämmönvaihtimeen koon selvittämiseen sitä hankittaessa. Tiedossa pitää olla ainakin toisen fluidin massavirta sekä kuuman ja kylmän fluidin sisään menevien ja ulos tulevien päiden lämpötila.

Kuivaajassa lämmönvaihtimena käytetty ripaputkipatteri on ristivirtalämmönvaihdin, joka siirtää tuorehöyryn lämpöenergiaa kuivausilmaan. Kuviossa 8 on esitetty kyseisen lämmönvaihtimen rakenne. Tuorehöyry johdetaan pieniin ulkopuolelta rivoitettuihin putkiin (tube flow), joissa höyry lauhtuu vedeksi suljetussa kierrossa, kuivausilma taas pystyy liikkumaan myös poikittain, joten virtaus on sekoittuva (cross-flow).



Kuvio 8. Ristivirtauksen periaate viilunkuivaajassa (Cengel & Ghajar 2015, 649)

Laskennassa tehdään seuraavat oletukset:

- Höyryn kulutus on tasainen ja vakio
- Lämmönvaihdin on hyvin eristetty.
- Putkien pinnat ovat puhtaat.
- Fluidien virtausten kineettiset ja potentiaaliset energianmuutokset ovat mitättömiä.

Kuten kappaleessa 5 käsiteltiin, lämpö siirtyy lämmönvaihtimissa pääasiassa konvektiolla ja johtumalla seinämän läpi. Putken materiaalia ja paksuutta ei tiedetä, joten tietojen puutteesta ja laskennan helpottamiseksi putken seinämän paksuuden oletetaan olevan hyvin pieni ja lämmönjohtavuuden suuri, joten seinämän aiheuttama lämpövastus on merkityksetön ( $R_{wall} \approx 0$ ).

Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin  $U_i$  voidaan laskea kaavasta 2 (kappale 5.4) kun ensin on laskettu tuntemattomat tekijät.

Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin  $U_o$  voidaan laskea, kun tiedetään kuivaajan kuluttama lämpöteho.

### 6.2.2 Lämpötehon laskenta

Tulistettu höyry lauhtuu lämmönvaihtimessa lauhteeksi ja osittain myös kylläiseksi höyryksi. Paisuntahöyrylle ei ole omaa mittausta, joten sen määrä arvioidaan karkeasti olevan 20 % lauhteesta. Lämpöteho voidaan laskea kaavalla 3.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \quad (3)$$

jossa 
$$\Delta h = h_{g,in} - (0,8 \times h_{f,out}) + (0,2 \times h_{g,out}) \quad (4)$$

$\dot{m}_s$  = höyryn massavirta

$h_{g, in} = 2843,7$  kJ/kg, joka on tulistetun höyryn entalpia arvoilla 15 bar ja 217,5 °C.

$h_{f, out} = 732,3$  kJ/kg, joka on palaavan lauhteen entalpia 173 °C lämpötilassa.

$h_{g, out} = 2770,8$  kJ/kg, joka on kylläisen höyryn entalpia 173 °C lämpötilassa.

Näillä arvoilla 1-kuivaimeen siirretty lämpöteho on 5690,36 kW.

### 6.2.3 Lämmönsiirtopinta-ala

#### 6.2.3.1 Sisäpuolinen lämmönsiirtopinta-ala

Lähtötietojen puutteesta johtuen putkien paksuuden arvioidaan olevan 2,5 mm. Putket ovat ellipsin muotoisia (35x15mm) ja 1,5m pitkiä, Jokaisessa kennossa on putkiriivejä sama määrä, mutta putkirivien määrä vaihtelee ja joka toinen rivi on porrastettu (kuvio 7). Putkien määrä yhteensä on 5302 kpl.

Sisäpinta-ala lasketaan kaavalla 5.

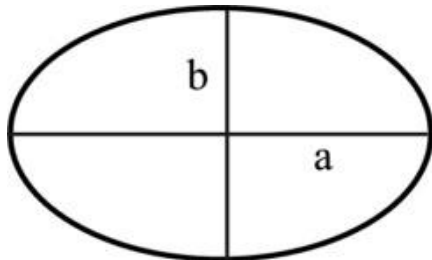
$$A_s = nL\pi ab \quad (5)$$

jossa,  $A_s$  = sisäpinta-ala

$n$  = putkien määrä

$L$  = putkien pituus

$a$  ja  $b$  = ellipsin puoliakseleita (kuvio 9)



Kuvio 9. Ellipsin puoliakselit (Taulukot.com)

Annetuilla arvoilla lämmönsiirtopinta-alaksi saadaan  $A_s = 7,5 \text{ m}^2$ .

#### 6.2.3.2 Ulkopuolinen lämmönsiirtopinta-ala

Ulkopuolinen lämmönsiirtopinta-ala koostuu putkista ja putkiin rivoitetuista levyistä (50x30x0,5mm). Ripaväli vaihtelee kennoissa ja on joko 6mm tai 3,5mm. Ulkopuolinen lämmönsiirtopinta-ala lasketaan kaavalla 6.



$$A_u = A_r + A_p = n_1(0,05 \times 0,03 \times 2 - \pi \times 0,035 \times 0,015) + n_2(1,5 \times \pi \times 0,035 \times 0,015) \quad (6)$$

missä  $A_r$  = ripojen pinta-ala

$A_p$  = putkien ulkopinta-ala

$n_1$  = ripojen lukumäärä (1 931 060 kpl)

$n_2$  = putkien lukumäärä (5302 kpl)

Ulkopuoliseksi lämmönsiirtopinta-alaksi saadaan 2621,3 m<sup>2</sup>.

#### 6.2.4 Logaritminen lämpötilaero

Lämmönvaihtimia analysoidessa käytetään logaritmista lämpötilaeroa ilmaisemaan keskimääräistä lämpötilaeroa, joka lasketaan kaavalla 6. Lämmönsiirto hidastuu lämpötilaeron pienentyessä, joten laskennassa ei voi käyttää aritmeettista laskutapaa.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (6)$$

jossa  $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$

$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$

$T_{h,in}$  = sisään tuleva kuuma fluidi (tulistettu vesihöyry 217,5 °C).

$T_{c,in}$  = sisään tuleva kylmä fluidi (ilma 20 °C).

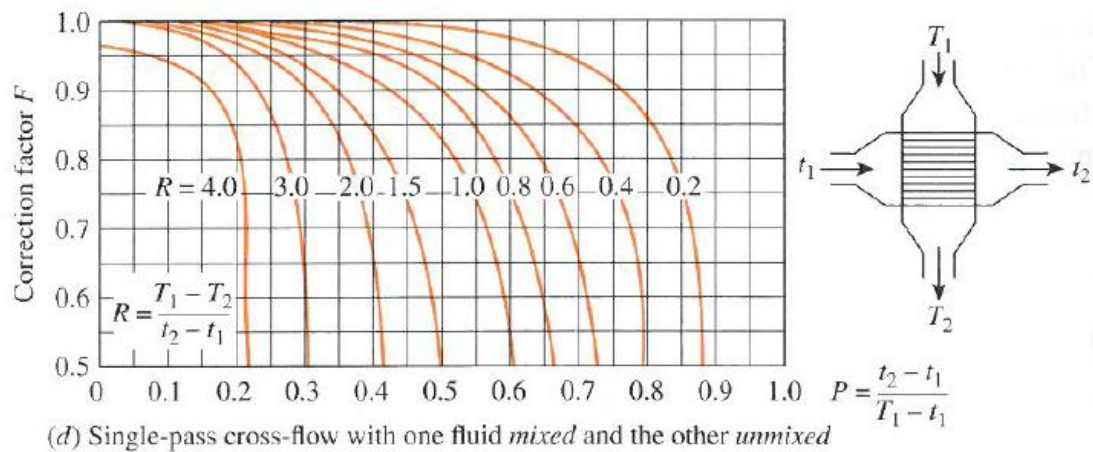
$T_{h,out}$  = ulos menevä kuuma fluidi (lauhdevesi 170 °C).

$T_{c,out}$  = ulos menevä kylmä fluidi (ilma 185 °C).

Näillä arvoilla logaritmiseksi lämpötilaeroksi tulee  $\Delta T_{lm} = 76,83 \text{ }^\circ\text{C}$

### 6.2.5 Korjauskerroin

Kyseisen lämmönvaihtimen ollessa ristivirtalämmönvaihdin joudutaan käyttämään korjauskerrointa  $F$ , joka on riippuvainen lämmönvaihtimen geometriasta. Korjauskerroin kyseisessä lämmönvaihtimessa katsotaan kahden lämpötilasuhteen ( $P$  ja  $R$ ) avulla taulukosta (kuvio 10).



Kuvio 10. Taulukko ristivirtalämmönvaihtimen korjauskertoimelle (Cengel & Ghajar 2015, 664)

jossa  $T_1$  = tulevan ilman lämpötila ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$T_2$  = lähtevän ilman lämpötila ( $185 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$t_1$  = tulevan tulistetun vesihöyryn lämpötila ( $217,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$t_2$  = lähtevän lauhdeveden lämpötila ( $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Näillä arvoilla  $P$ :n arvoksi tulee 0,24 ja  $R$ :n arvoksi 3,48. Taulukosta katsomalla korjauskertoimeksi  $F$  saadaan n. 0,75.

## 6.2.6 Lämmönsiirtokertoimet

### Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin

Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin  $U_i$  saadaan ratkaistua suoraan kaavasta 2, kun muut arvot tiedetään. Sisäpuoliseksi lämmönsiirtokertoimeksi saadaan:

$$U_i = \frac{5690358 \text{ W}}{7,5 \text{ m}^2 \times 0,75 \times 76,83 \text{ }^\circ\text{C}} = 13167,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin

Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin voidaan laskea, kun tiedetään kuivaajan kuluttama lämpöteho. Laskennassa tehtiin olettaus, että kuivaaja on hyvin tiivistetty, joten ilman massavirran laskemiseen oletetaan kaiken höyryn luovuttaman lämpöenergian siirtyvän kuivausilmaan. Laskennassa tarvitaan seuraavat kuivaajan sisällä vallitsevat ilman ominaisuudet (liite 1):

- ilman tiheys ( $\rho$ )
- ilman lämmönjohtavuus ( $k$ )
- Prandtin luku ( $Pr$ )
- kinemaattinen viskositeetti ( $\nu$ )
- ominaislämpökapasiteetti ( $c_p$ ).

Ilman ominaisuudet laskuissa ovat ilman keskimääräisen lämpötilan (100 °C) mukaan.

Ilman massavirta lasketaan kaavalla 8.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}}{c_p(T_{c,in} - T_{c,out})} \quad (8)$$

Ilman massavirraksi ( $\dot{m}_a$ ) saadaan 34,18 kg/s.

Ilman virtausnopeus voidaan laskea kaavalla 9.

$$V = \frac{\dot{m}_a}{\rho A_c} \quad (9)$$

Jossa  $A_c$  = lämmönsiirtopinta-ala

Virtausnopeudeksi saadaan n. 0,49 m/s.

Tämän jälkeen lasketaan Reynoldsin luku kaavalla 10.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (10)$$

jossa  $D$  = karakteristinen pituus (15 mm)

$V$  = virtausnopeus

Karakteristinen pituus määräytyy putken ellipsimuodon pienemmästä halkaisijasta (liite 2).

Reynoldsin luvuksi saadaan 318,2, joka tarkoittaa, että virtaus on laminaarinen. Nusseltin luku voidaan laskea kaavalla 10 (liite 2).

$$Nu = 0,197Re^{0,612}Pr^{1/3} \quad (10)$$

Nusseltin luvuksi saadaan 9,27, jonka avulla voidaan laskea ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin  $U_o$  kaavalla 11.

$$U_o = Nu \frac{k}{D} \quad (11)$$

Ulkopuoliseksi konvektiolämmönsiirtokertoimeksi saadaan  $19,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Laskennan tuloksia pohditaan kappaleessa 7.3.

### 6.3 Höyryn massavirtauksen kuristaminen

Opinnäytetyössä kokeiltiin myös kuristaa höyryn massavirtaa kuivaajan läpi. Hypoteesina oli, että höyryn virratessa liian nopeasti kuivaajan läpi, se ei ehdi luovuttaa kaikkea potentiaalista lämpöenergiaansa. Näin ollen jos virtausta kuristetaan, pitäisi lauhteen lämpötilan laskea.

Massavirtaa kuristettiin höyryventtiilin asentoa muuttamalla valvomosta. Normaalissa käytössä höyryventtiili on asetettu toimimaan automaattisesti kuivaajan sisällä vallitsevan lämpötilan mukaan, joten höyryventtiili oli käytännössä koko ajan 100 % auki, koska lämpötila ei saavuta asetusarvoa ( $195 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Höyryvirtausta kuristettiin 5-10 % aina 10 minuutin välein, jotta kuristuksen vaikutuksen ehtisi näkemään lauhteessa asti. Kokeilua jatkettiin noin kaksi tuntia.

Höyryn massavirtauksen kuristamisen tuloksia käsitellään kappaleessa 7.4.

## 7 Tutkimustulokset

### 7.1 Viilunkuivaajan mitoitusarvoja

1-viilunkuivaajalle on tehty alustavat hetkellisen kapasiteetin ja haihdutus- ja lämpöenergian kulutuslaskelmat ennen kuivaajan rakentamista. Alkuperäisten laskelmien ja nykyisten arvojen vertailua on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Viilunkuivaimen toiminta-arvojen vertailu

	Alustavat laskelmat	Nykyiset arvot/kulutus
Viilun alkukosteus (keskimääräinen)	140 %	140 %
Viilun loppukosteus	5 %	n. 2 %
Kuivaajan täyttösuhde	85 %	100 - 120 %
Höyryn paine	17 bar	15,5 bar
Höyryn lämpötila kuivaajalla	207 °C	217,5 °C
Höyryn kulutus	11,77 tn/h	9-14 tn/h
Hetkellinen kapasiteetti	11,74 m <sup>3</sup> /h	12,4 m <sup>3</sup> /h *
<b>*hetkellinen kapasiteetti III-viilun normiajossa tunnin ajalta (6.9.2016 klo 9:35 – 10:35).</b>		

Kuivaajan täyttösuhdetta pidetään paljon korkeampana kuin on suunniteltu, joten myös viilun kuivaamiseen vaadittu energia on suurempi. Kuivaajan täyttöaste kertoo kuivaajan sisällä olevien viilujen määrän, joka vaihtelee 100 – 120 % välillä. Viilut pinoetaan hieman päällekkäin täyttöasteen nostamiseksi yli maksimikapasiteetin.

Höyryn painetta on tiputettu 1,5 bar, mutta höyryn lämpötilaa nostettu 10,5 °C. Höyryn paineen laskeminen ja lämpötilan nostaminen on nostanut tuorehöyryn entalpian arvoa, joka taas on parantanut lämmönvaihtimen hyötysuhdetta.

Höyryn alustavan kulutuksen on laskettu olevan 11,74 tn/h, mutta korkeammalla täyttösuhteella kulutus on suurempi.

Myös hetkellinen kapasiteetti on hieman suurempi kuin laskettu arvo. Hetkellinen kapasiteetti on riippuvainen kuivauslämpötilasta, viilun alku- ja loppukosteudesta, viilun paksuudesta ja kuivaajan täyttösuhteesta.

Alustavassa laskennassa viilun syöttönopeus on rajattu 5,4 m/min, mutta nykyinen keskimääräinen ajonopeus on 4,3 – 5 m/min lukuun ottamatta tapahtuvia pysähdyksiä. Ajonopeus riippuu kuivainta operoivasta työntekijästä. Viilun loppukosteus on

paljon pienempi, vaikka 5 % loppukosteuskin riittäisi. Näin ollen kuivaajaa saisi ajaa nopeammin.

Alustavassa laskennassa ei tosin ole huomioitu pysähdyksiä, joita tapahtuu kuljettimen ruuhkautuessa, joten hetkellinen kapasiteetti saattaa joskus jäädä jopa alle 2 m<sup>3</sup>/h. Taulukossa 1. hetkellinen kapasiteetti on ajalta, jolloin käyttöaste on ollut 100 %.

## 7.2 Höyryverkon nykyinen kunto

Höyryn kierron lämpötilan ja paineen arvoja tarkkailtiin ja vertailtiin toisiinsa kuudessa (6) eri ajanjaksolla. Näillä tiedoilla pyrittiin löytämään mahdollisia vikoja ja poikkeuksia höyrylinjasta ja mitta-antureista. Jokaisella ajanjaksolla 1-kuivaajassa ajettiin kosteuspitoisinta viilua. Tiedot koottiin kahteen taulukkoon, joista toisessa on lämpötilaerot (Taulukko 2) ja toisessa paine-erot (Taulukko 3).

Taulukko 2. Lämpötila eri mittauspisteissä

Lämpötila (°C)	Voimalaitoksen jakotukki			Havutetaan ja jakotukki (TIA-101)	Kuivaaja 1 Höyry (TICA-103)	Kuivaaja 1 Ilma	Lauhesäiliö
	Ajanjakso	Pyrokattila	Arinakattila				
9.5.2016 klo 10	226,1	216,8	226	221	217,4	181	170
9.5.2016 klo 16	224,7	202,9*	225	221	217,5	190	175
10.5.2016 klo 8	221,4	201,8*	223	212	207,5	181	174
11.5.2016 klo 8	218,0	202,4*	226	201	197,6	182	171
11.5.2016 klo 15	220,0	220,9	226	209	205,4	183	166
<b>*venttiili kiinni mittauskohdassa</b>							





### 7.3 Ripaputkipatterin laskennan tulokset

Sisäpuolinen ja ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin eroavat toisistaan hyvin paljon, koska lämmönsiirtopinta-aloissa on myös suuria eroja. Laskennassa käytetyillä arvoilla sisäpuoliseksi tulon UA arvoksi saadaan noin 98755 W/K ja ulkopuoliseksi tulon UA arvoksi 50120 W/K. Näin ollen ulkopuolinen lämmönsiirtokapasiteetti jarruttaisi lämmönsiirtoa. Mittauksessa on tosin puutteita.

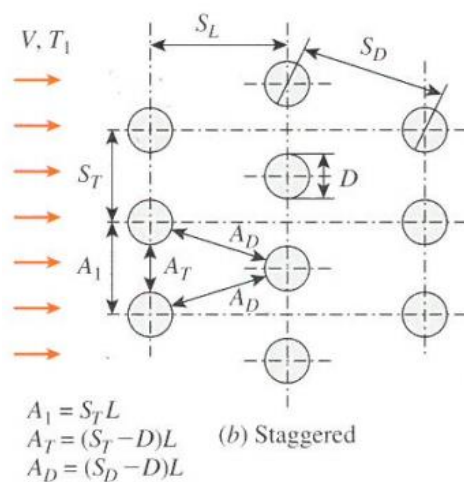
Jos karakteristisena mittana ( $D$ ) olisi käytetty putken halkaisijan sijaan rivoituksen pituutta (50mm) niin Reynoldsin luvuksi olisi tullut 1060 (edelleen laminaarinen virtaus) ja täten Nusseltin luku olisi laskettu kaavalla 13 (liite 3).

$$Nu = 0,35(S_T/S_L)^{0,2} Re^{0,6} Pr^{0,36} (Pr/Pr_s)^{0,25} \quad (13)$$

jossa  $S_T$  = putkien poikittainen taso (kuvio 11)

$S_L$  = putkien pitkittäinen taso (kuvio 11)

$Pr_s$  = ulostulevan ilman (200 °C) Prandtin luku (liite 1)



Kuvio 11. Virtaus poikittaisen putkijaon läpi

Nusseltin luvuksi saadaan 18,35 ja ulkopuoliseksi konvektiolämmönsiirtokertoimeksi 11,36 W/m<sup>2</sup>K. Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokapasiteetti on tällöin pienempi, jolloin myös UA tulon arvo olisi pienempi.

Jos taas käytettäisiin putken ja rivoituksen yhteenlaskettua ulkopuolista konvektiolämmönsiirtokerrointa (30,5 W/m<sup>2</sup>K), olisi tulo UA noin 79910 W/K. Tämä olisi lähempänä sisäpuolista lämmönsiirron kapasiteettia (98755 W/K).

Laskennassa on myös jätetty ripahyötysuhde pois kokonaan, koska kyseiselle riparakenteelle ei löytynyt vastaavaa profiilia tai tarvittavaa lämmönjohtavuutta. Ripahyötysuhde määritellään ripapinnasta todellisuudessa siirtyvän lämpövirran suhteella teoriassa mahdolliseen lämpövirtaan. Yleensä teollisuudessa ripahyötysuhteet ovat noin 70 – 90 %. Jos laskennassa olisi käytetty arvioitua ripahyötysuhdetta (n. 85 %), jäisi ulkopuolinen lämmönsiirtokapasiteetti vielä pienemmäksi.

#### 7.4 Höyryn massavirtauksen kuristamisen tulokset

Höyryn massavirtauksen kuristamista kokeiltiin kaksi tuntia, jonka aikana ei saavutettu haluttuja tuloksia. Kokeilun aikana seurattiin voimalaitoksen jakotukin lämpötilaa, lauhteen lämpötilaa ja painetta, kuivausilman lämpötilaa, höyryventtiilin asentoa sekä höyryn massavirtaa.

Minkään mittauspisteen arvot eivät muuttuneet oletetusti normaalia heiluntaa lukuun ottamatta. Lauhteen lämpötila laski hieman, mutta tämän oletettiin pääasiassa johtuvan eri viilulaadun ajosta kuivaajaan kesken kokeilun. Myöskään massavirta ei muuttunut näytöltä seurattaessa, vaikka höyryventtiiliä kuristettiin jopa 70 %. Myös mittauspisteiden seuranta osoittautui hankalaksi, sillä kaikkia mittauksia ei näe valvomosta, vaan erikseen paikallismittauksina kuivaajan luota.

Tarkempien tuloksien saamiseksi koe pitäisi uusida ja varmistaa kosteimman viilulaadun riittävyys koeajanjaksolle. Lisäksi syytä massavirtauksen säilymiseen höyryventtiiliä kuristaessa pitäisi selvittää.

## 8 Johtopäätökset

### 8.1 Käytetyn höyryn vaihtelun vähentäminen

Käytetyn höyryn tasainen kulutus mahdollistaisi prosessin tarkemman seuraamisen ja mittaamisen. Kuivaajan pysähtyessä lämpötila saattaa nousta nopeasti ja käynnistyessä taas laskea paljon, jolloin tuloksena syntyy paljon hukkaviilua ja uudelleen kuivattavaa. Tasainen kulutus on kuitenkin haastavaa jo pelkästään viilujen eri kosteuspitoisuuksien vuoksi, mutta myös monet muut tekijät vaikuttavat suuresti.

Kuivaajan täyttöaste kertoo kuivaajan sisällä olevien viilujen määrän, joka vaihtelee 100 – 120 % välillä. Viilut pinotaan hieman päällekkäin täyttöasteen nostamiseksi yli maksimikapasiteetin. Enemmän kosteaa viilua kuivaajassa tarvitsee enemmän lämpöenergiaa kuivuakseen. Täyttöasteen pitäminen tasaisena ehkäisee höyryn kulutuksen vaihtelua.

Kuivaajan käyttöaste vaihtelee keskimääräisesti normiajossa 70 – 80 % välillä. Käyttöaste on riippuvainen kuivaajan pysähdyksistä, kuten esimerkiksi ruuhkista kuljettimilla.

Kuivaajan puhtaanapito ja kunnossapito on tärkeää käyttöasteen pitämiseksi korkeana. Kunnossapidossa pitää huomioida etenkin suutinlaatikoiden puhtaanapito, putkistojen vuodot ja ripaputkipattereiden puhtaus.

Myös voimalaitos hyötyy tasaisesta höyryn kulutuksesta. Polttoainekattilat eivät pysy mukana höyryn tarpeen äkillisissä nousuissa ja laskuissa, jotka voivat aiheuttaa esimerkiksi päästöpiikkejä ja epätäydellistä palamista.

Höyryn käytön ollessa matalalla kattiloiden paineet voivat nousta ja höyryä joudutaan ajamaan varoventtiilin kautta pois. Myös lämmitettyä vettä voi mennä hukkaan. Suurella höyrynkäytöllä joudutaan ottamaan käyttöön öljykattila, jolla tuotetun lämmön hinta on paljon korkeampi kuin puulla tuotetun.

Myös höyryn käytön noustessa nopeasti joudutaan ottamaan käyttöön öljykattila, jolla tuotetun höyryn polttoainekustannus on huomattavasti kalliimpi kuin puulla tuotetun.

Voimalaitokselle ratkaisuna voisi ajaa ylimääräistä höyryä esimerkiksi puun haudonta-altaille, jossa varsinkin talvella hautomisvesi on liian viileää. Nykyisessä järjestelmässä haudonta-altaita lämmitetään vain voimalaitoksen savukaasuilla ja viilun-kuivaajien poistoilmalla.

## 8.2 Höyryverkon lämpötilan ja paineen muutokset

Kappaleessa 5.4 kerrottiin faasimuutoksessa vapautuvan paljon lämpöenergiaa ja kappaleessa 6.1 todettiin lauhteen mukana poistuvan myös paisuntahöyryä. Höyryprosessin hyötysuhteeseen voidaan suuresti vaikuttaa höyryn paineella.

Pelkän höyryn paineen nostaminen aiheuttaisi lauhtumislämpötilan kasvamisen, jolloin lauhteen mukana tulisi enemmän paisuntahöyryä ja lämpöä siirtyisi vähemmän. Pelkän lämpötilan nostaminen taas nostaisi palaavan lauhteen lämpötilaa.

Höyryn paineen laskeminen taas aiheuttaa lauhtumislämpötilan pienenemisen, jolloin paisuntahöyryä syntyisi vähemmän ja lämpöä siirtyisi kuivausilmaan enemmän. Tässä tapauksessa myös lauhteen vastapaine putoaisi, joka johtaisi paisuntahöyryn määrän kasvuun. Jos painehäviöitä saataisiin vähennettyä, olisi höyryn paineen laskeminen kannattavaa. Painehäviöihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi erilaisella lauhteenpoistin ratkaisulla.

Paras ja helpoin vaihtoehto ilman lämpötilan kannalta olisi nostaa höyryverkon painetta ja lämpötilaa, jolloin kuivausilman lämpötila nousisi. Tässä tapauksessa myös lauhteen lämpötila ja paine nousisivat tasolle, jota lauhdeputkisto ja –säiliö eivät kestäisi.

Taulukosta 3 huomattiin lauhdesäiliön paineen olevan aina alle 8 bar, jolloin veden kiehumispiste on vähän yli 170 °C. Taulukossa 2 höyryn lämpötila on korkeimmillaan 175 °C, jolloin lauhdesäiliön paineen pitäisi olla n. 9 bar pysyäkseen nestemäisenä. Toisaalta jos lauhdevesi olisi mitoitusarvojen (160 °C, 6 bar) mukainen, olisi lauhteessa silti mukana paisuntahöyryä.

Lauhteen putkilinjojen paine on mitoitettu 9 bar:iin ja lauhdesäiliön maksimipaine 10 bar:iin, joten nykyiset komponentit eivät kestäisi tai eivät ainakaan olisi rajoitusten

mukaisia. Myös voimalaitoksen jakotukki on kantokykynsä rajoilla. Uusien komponenttien hankinnasta ja asentamisesta syntyisi ylimääräisiä kustannuksia.

Lisää ongelmia aiheuttaisi ylimääräinen lämpöenergia, jolle pitäisi löytää lisää kulu- tuskohteita. Nykyinen järjestelmä käyttää ylimääräistä lämpöä puristimilla ja syöttää sitä kaukolämpöverkkoon, mutta voimalaitokselle palaava lauhde on silti jo nyt liian kuumaa. Varsinkin kesähelteillä ylimääräistä lämpöä jäähdytetään voimalaitoksen ka- tolla olevilla tuulettimilla.

Ratkaisuna ongelmaan on, kuten kappaleessa 8.1, ylimääräisen lämmön ajaminen haudonta-altaille, joihin lämpöä saadaan varastoitua suuria määriä.

Paisuntahöyryn määrää on vaikea rajoittaa, jos siitä ei ole mittausta ja sen tarkkaa määrää ei edes tiedetä. Tarkalla paisuntahöyryn mittausjärjestelmällä voitaisiin tutkia ja etsiä optimoidut paineen ja lämpötilan arvot, jolloin paisuntahöyryä syntyisi vä- hemmän.

### 8.3 Pattereiden lisääminen

Ripaputkipatterin laskennassa tultiin tulokseen, että ulkopuolinen lämmönsiirtokapa- siteetti rajoittaa lämmönsiirtoa. Kasvattamalla lämmönsiirron pinta-alaa, eli ripaput- kipattereiden määrää kasvatettaisiin myös lämmönsiirtoa. Optimaalisena lopputulok- sena kiertävän ilman lämpötila kasvaisi ja palaavan lauhteen lämpötila putoaisi.

Jotta ulkopuolinen lämmönsiirtokapasiteetti saataisiin samalle tasolle, kuin sisäpuoli- nen lämmönsiirtokapasiteetti, pitäisi lämmönsiirtopinta-alaa lisätä noin 615 m<sup>2</sup>.

Tämä tarkoittaisi noin 5 – 6 uutta kennoa.

Ilman lämpötilan nostamiseen kymmenellä asteella riittäisi kuitenkin noin 200 m<sup>2</sup> li- sää lämmönsiirtopinta-alaa. Tällöin ilman lämpötila saavuttaisi 195 °C lämpötilan.

Laskelmien alussa tehtiin seuraavat oletukset:

- Höyryn kulutus on tasainen ja vakio
- Lämmönvaihdin on hyvin eristetty.
- Putkien pinnat ovat puhtaat.
- Fluidien virtausten kineettiset ja potentiaaliset energianmuutokset ovat mitättömiä.

Todellisessa tilanteessa nämä eivät pidä paikkaansa. Höyryn kulutus vaihtelee paljon ja lämmönvaihtimen pinnat likaantuvat helposti. Putkien pinnat tosin tarkastetaan kerran viikossa ja puhdistetaan ainakin kerran kuukaudessa.

Kuivaaja on myös eristetty, mutta sen laatua ja eristeen nykyistä määrää on vaikea arvioida.

## 8.4 Tuloilman esilämmittäminen

Kuivaajan ottaman tuloilman lämpötilan nostaminen voisi parhaimmillaan nostaa kuivausilman lämpötilaa hieman, mutta samalla lauhteen lämpötila nousisi ja lämmönsiirto hidastuisi hieman lämpötilaeron pienentyessä.

Kuivaajan otetun ilman hallittu sisäänajo olisi kuitenkin haastavaa. Kuivausilma menee kuivaajaan pääasiassa syöttöpäästä, jonka rakenteen vuoksi on vaikea asentaa minkäänlaista esilämmitintä. Vähintäänkin esilämmittimelle tulisi paljon kustannuksia, jos sellainen pitäisi vielä erikseen suunnitella.

Jos tuloilmaa kuitenkin johdettaisiin esimerkiksi poistoilmasta takaisin kuivaajaan, saataisiin lämmön lisäksi talteen kosteuspitoinen ilma, johon on jo valmiiksi sitoutunut paljon lämpöenergiaa. Tässä ratkaisussa ei syntyisi paljoa kustannuksia, mutta ylimääräinen kosteus saattaisi nostaa ilman kosteuden tasolle, jossa viilu kuivuisi heikommin.

## 9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, millä eri keinoilla kuivausilman lämpötilaa saataisiin nostettua paremman kuivaustehon saamiseksi. Kappaleessa 8. on esitelty potentiaalisimmat mahdollisuudet lämpötilan nostamiseen.

Käytetyn höyryn vaihtelun vähentäminen ei suoraan vaikuta kuivausilman lämpötilan nostamiseen, mutta parantaisi koko muun prosessin laatua, joka epäsuorasti vaikuttaisi kuivausilman lämpötilaan.

Prosessin tutkiminen olisi myös nopeampaa ja helpompaa, jos mittauspisteitä olisi enemmän ja niiden kunnossapito toimisi, esimerkkinä paisuntahöyryn mittaus, lauhteen vastapaineen mittaus ja lämpötilan mittaus kuivaajan alku- ja loppupäässä.

Mitta-antureiden toimivuudesta ei ollut täyttä varmuutta, osa mittareista oli tarkistettu kaksi kuukautta ennen mittausten suorittamista, mutta niidenkään toimivuudesta ei oltu varmoja. Mittaustuloksilla on suuri vaikutus esimerkiksi lämmönvaihtimen laskennan tuloksiin ja virheelliset tulokset voivat vaikuttaa koko johtopäätöksiin.

Höyryverkon lämpötilan ja paineen muutosten todettiin vaikuttavan merkittävästi kuivaajan hyötysuhteeseen. Hyötysuhteen parantamiseksi pitäisi kuitenkin tehdä suuria investointeja laitteiston uusimiseksi. Nykyiset lämpötilan ja paineen arvot havutehtaan jakotukilla (220 °C, 15,5 bar) ovat optimoituja toimimaan hyvällä kuivaajan hyötysuhteella niin, että nykyinen laitteisto sen kestää.

Lämmönvaihtimen mitoituksessa tultiin tuloksiin, joissa ulkopuolista pinta-alaa lisäämällä voitaisiin parantaa lämmönsiirron määrää. Laskennan lämmönsiirtokertoimet riippuvat kuitenkin hyvin monesta tekijästä, kuten kuivaajan sisällä tai höyryputkiston sisällä vallitsevista olosuhteista. Lämmönsiirtokertoimelle on hyvin vaikea antaa yhtä oikeaa arvoa, sillä siihen vaikuttaa monta muuttuvaa tekijää.

Karkeista olettamuksista huolimatta erot lämmönsiirrossa sisä- ja ulkopuolella olivat suuria. Pattereiden lisäämistä kannattaisi tutkia empiirisesti eli esimerkiksi asentamalla vain yhden patterimoduuliin ja havainnoida ja mitata mahdollisia vaikutuksia.

Tuloilman esilämmittäminen olisi mahdollista, mutta tarvitsee tarkemman selvityksen sen potentiaalisista säästöistä ja kustannuksista, sekä vaikutuksista viulun kuivaukseen. Tässä opinnäytetyössä myös tutkimus höyryn massavirran kuristamisesta jäi vajaaksi ja sitä pitäisi tutkia ja kokeilla tarkemmin säädetyissä olosuhteissa.

Joka tapauksessa viilunkuivaajan lämmönvaihdin on valmistuessaan ollut hyötysuhteeltaan erinomainen käyttötarkoitukseensa nähden. Kuivaajan suuren kokoluokan ja energiankulutuksen vuoksi kuitenkin pienikin parannus toisi säästöjä. Pitää myös muistaa, että kyseinen kuivaaja on otettu käyttöön vuonna 1998, ja alkaa olla jo elinkaarensa lopussa. Lisäksi kuivaajaa ei ole suunniteltu kuivaamaan yhtä kosteuspi-toista viilua kuin tällä hetkellä kuivataan.

Tästä johtuen kuivausilman lämpötilan nostamiseksi ei myöskään kannata tehdä suuria investointeja, jotka eivät maksaisi itseään takaisin. Näin ollen halvimmat ratkaisut tulisivat tuorehöyryn lämpötilan, paineen ja massavirran muutoksista.

Pelkkä lämpötila ei yksinään vaikuta paljoa tuotantokapasiteettiin ja kokonaisuuteen vaikuttaa monia muitakin muuttujia. Lämpötilaa nostaessa pitää myös huomioida mahdolliset vaikutukset muuhun prosessiin, kuten esimerkiksi tarvittavat kulutuskohteet ylimääräiselle lämmölle tai mahdolliset muutokset ilman kosteudessa kuivaajan sisällä.

Opinnäytetyössä onnistuttiin kartoittamaan tärkeimmät kuivausilman lämpötilaan vaikuttavat tekijät ja löytämään useampia ratkaisuja lämpötilan nostamiseksi. Ratkaisut eivät välttämättä ole kustannustehokkaita tällä hetkellä tai edes yhtä toimivia käytännössä kuin teoriassa, mutta tulevaisuudessa esimerkiksi uutta viilunkuivaajaa hankittaessa on hyvä tiedostaa lämpötilaan vaikuttavat tekijät ja jo selvitettyt energia- tehokkuutta parantavat ratkaisut.

Viilunkuivaajan tuotantokapasiteetin kasvattamisesta ja potentiaalisista säästöistä on tehty lukuisia opinnäytetöitä, mutta lämmönsiirron näkökulmasta ei löytynyt ainkaan julkisia opinnäytetöitä aiheesta. Tämän opinnäytetyön tuloksia voidaan toivottavasti hyödyntää myös tulevissa opinnäytetöissä, jotka liittyvät viilun kuivaamiseen, kuivausilman lämmittämiseen tai vain lämmönsiirtoon.

Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen ja toteutus haasteellinen. Jatkokehittämisideana voisi selvittää ratkaisujen taloudellinen kannattavuus. Tässä opinnäytetyössä annetaan vain karkea arvio taloudellisesta kannattavuudesta tarkempien tuotantokustannuksien ja saatujen tulojen puutteessa. Lisäksi aiemmin mainitut tuloilman esilämmitys ja höyryn massavirtauksen kuristaminen kaipaavat jatkotutkimuksia.



## Lähteet

Cengel Y. & Ghajar A. 2015. Heat and Mass Transfer. Fundamentals & Applications. Fifth ed. in SI units. New York: Mcgraw-Hill Education.

Isomäki O. & Koponen H. 2004. Edu-oppimateriaalit. Opetushallitus. Viitattu 22.7.2016. [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/puutuoteteollisuus/raaka-aineet/vesi\\_ja\\_puuaines/index.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/puutuoteteollisuus/raaka-aineet/vesi_ja_puuaines/index.html)

Kauttonen A. 2014. Viilunkuivaajan kuivausprosessin optimointi. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Puutekniikan koulutusohjelma. Viitattu 4.10.2016. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73630/Kauttonen\\_Antti.pdf.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73630/Kauttonen_Antti.pdf.pdf?sequence=1)

Kestävä kehitys. n.d. Metsa Group Oy. Viitattu 7.7.2016. <http://www.metsagroup.com/fi/kestava-kehitys/Pages/default.aspx>

Kosteusteknisiä ominaisuuksia. n.d. Puuinfo. Puuinfo Oy. Viitattu 6.6.2016. <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Liiketoiminta-alueet. n.d. Metsa Group Oy. Viitattu 7.7.2016. <http://www.metsagroup.com/fi/liiketoiminta-alueet/Pages/default.aspx>

Neuvonen J. 2011. Lämmöntalteenottokattilan lämpötekniinen mitoitus. Kandidaatin-työ. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 11.8.2016. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/71955/nbnfi-fe201109275590.pdf?sequence=3>

Paloteknisiä ominaisuuksia. n.d. Puuinfo. Puuinfo Oy. Viitattu 8.6.2016. <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/paloteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Puutavaran kosteus. n.d. Puuinfo. Puuinfo Oy. Viitattu 6.6.2016. <http://www.puuinfo.fi/node/1503>

Puun kosteuskäyttäytyminen. 2011. Puuinfo. Tekninen tiedote. Viitattu 8.6.2016. [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksia-ja-vastauksia/puun\\_kosteuskayttaytyminen\\_lattia.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksia-ja-vastauksia/puun_kosteuskayttaytyminen_lattia.pdf)

Rahkola V. 2014. Ekonomaiserin suunnittelu ja mitoitus. Opinnäytetyö. Centria Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 1.9.2016. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75294/rahkola\\_ville.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75294/rahkola_ville.pdf?sequence=1)

Taulukot.com. n.d. WordPress. Viitattu 11.8.2016. <http://www.taulukot.com/matematiikka/geometria/>

Toimintaselustus. 1995. Tekninen asiakirja. Raute Oy:n sisäinen materiaali. Viitattu 18.6.2016.

Vanerin kulutus. n.d. Raute Oy. Viitattu 7.7.2016. <http://www.raute.fi/fi/vanerin-kulutus-ja-tuotanto>

Vanerin tuotantoprosessi.2014. UPM. Viitattu 6.6.2016.

<http://www.wisaplywood.com/fi/vaneri-ja-viilu/vaneri/vanerin-tuotantoprosessi/Pages/default.aspx>

Vastusmittausperiaate. n.d. SKS Sensors Oy. Viitattu 3.10.2016. <http://www.skssensors.fi/fag/miten-pt100-anturi-toimii/>

Veistinen J. & Pennala E. 1997. Vanerikäsikirja. Finnforest Oy. Viitattu 7.6.2016.

Viilun valmistus. n.d. Puuproffa. Propuu-yhdistyksen palvelu. Viitattu 6.6.2016. [http://www.puuproffa.fi/PuuProffa\\_2012/7/puujalosteet/viilun-valmistus](http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/7/puujalosteet/viilun-valmistus)

## Liitteet

Liite 1. Ilman ominaisuudet ilmanpaineessa (Cengel & Ghajar 2015, 924).

**TABLE A-15**

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

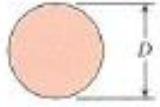
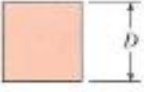
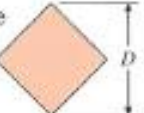
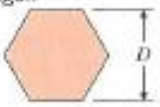
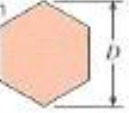

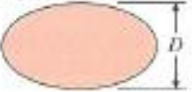
Note: For ideal gases, the properties  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ , and Pr are independent of pressure. The properties  $\rho$ ,  $\nu$ , and  $\alpha$  at a pressure  $P$  (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of  $\rho$  at the given temperature by  $P$  and by dividing  $\nu$  and  $\alpha$  by  $P$ .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306057020-8.

Liite 2. Nusseltin luku pakotetussa konvektiossa eri geometrioiden yli (Cengel & Ghajar 2015, 441).

**TABLE 7-1**

Empirical correlations for the average Nusselt number for forced convection over circular and noncircular cylinders in cross flow (from Zukauskas, 1972, Jakob 1949, and Sparrow et al., 2004)

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
Circle 	Gas or liquid	0.4–4 4–40 40–4000 4000–40,000 40,000–400,000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.465} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Square 	Gas	3900–79,000	$Nu = 0.094Re^{0.675} Pr^{1/3}$
Square (tilted 45°) 	Gas	5600–111,000	$Nu = 0.258Re^{0.588} Pr^{1/3}$
Hexagon 	Gas	4500–90,700	$Nu = 0.148Re^{0.638} Pr^{1/3}$
Hexagon (tilted 45°) 	Gas	5200–20,400 20,400–105,000	$Nu = 0.162Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.039Re^{0.782} Pr^{1/3}$
Vertical plate 	Gas	6300–23,600	$Nu = 0.257Re^{0.731} Pr^{1/3}$
Ellipse 	Gas	1400–8200	$Nu = 0.197Re^{0.612} Pr^{1/3}$

## Liite 3. Nusseltin luku ristivirtalämmönvaihtimissa (Cengel &amp; Ghajar 2015, 446).

**TABLE 7-2**

Nusselt number correlations for cross flow over tube banks for  $N_L > 16$  and  $0.7 < Pr < 500$  (from Zukauskas, 1987)\*

Arrangement	Range of $Re_D$	Correlation
In-line	0–100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100–1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000– $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ – $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Staggered	0–500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500–1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000– $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ – $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*All properties except  $Pr_s$  are to be evaluated at the arithmetic mean of the inlet and outlet temperatures of the fluid ( $Pr_s$  is to be evaluated at  $T_s$ ).