



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Konetekniikan koulutusohjelma

LOTTA AHLHOLM
SYLINTERIKUIVATUKSEN TEHOSTAMINEN
Diplomityö

Tarkastaja: professori Erno Keskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Konetekniikan osastoneuvoston
kokouksessa 17. tammikuuta 2007

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

AHLHOLM, LOTTA: Sylinterikuivatuksen tehostaminen

Diplomityö, 63 sivua

Toukokuu 2010

Pääaine: Koneensuunnittelu, painotuksena konstruktiotekniikka

Tarkastaja: professori Erno Keskinen

Avainsanat: kuivatussyylinteri, paperin kuivatus, kuivatusteho, lämmönsiirto

Pääasiallisin kuivatusmenetelmä paperinvalmistuksessa on sylinterikuivatus. Paineistetulla höyryllä lämmitettävät valurautaiset kuivatussyylinterit eivät kuitenkaan ole kuivatusteholtaan riittäviä nykyisien paperikoneiden nopeuksiin verrattuna. Tämän työn tavoitteena on selvittää menetelmiä, joilla sylinterikuivatusta saataisiin tehostettua.

Työssä perehdytään paperin kuivatuksen ja sylinterikuivatuksen lämmönsiirtoon. Sylinterikuivatuksessa höyrystä sylinterin sisälle tiivistyvä lauhde, sylinterin vaippa sekä sylinterin ja paperin välinen kontakti muodostavat lämpövastuksia, jotka aiheuttavat lämpöhäviöitä, eikä kaikkea höyryn luovuttamaa lämpöä saada hyödynnettyä paperin kuivatuksen. Lämmönsiirtotarkasteluissa tutkitaan, kuinka kukin näistä vastuksista muodostuu, niiden vaikutusta kokonaislämpövastukseen sekä mahdollisuuksia niiden pienentämiseksi. Nykyisiä kuivatusratkaisuja ja niiden rakenteita tarkastellaan ennen uusien rakenteiden esittelyä ja analysointia. Uusia, vielä paperikoneissa käyttämättömiä sylinterirakenteita, ovat erilaisin jäykistein varustetut ohutvaippaiset sylinterit sekä kanavarakenteiset sylinterit.

Työssä tutkitaan tarkemmin sisäpuolelta aksiaalisesti uritetun kuivatussyylinterin lämmönsiirtoa. Urasylinterille suoritettiin laskelmat, joissa tarkasteltiin urien lukumäärän, sylinterin ulkopinnan ja paperikoneen käyntinopeuden vaikutuksia lämmönsiirtoon höyrystä paperiin. Laskennallisessa osaa varten suoritettiin myös kuivatussimulointi, jossa kuvitteelliselle paperikoneelle vaihdettiin kuivatusteholtaan parempia sylintereitä perinteisten tilalle. Simuloinnin tuloksena saatiin selville uudistuksen mahdollistama konenopeuden kasvu. Nopeuden kautta saadaan selville tuoton kasvu, josta päästään edelleen käsiksi taloudelliseen puoleen.

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että sylinterikuivatuksen suurin tehostamispotentiaali saataisiin käyttöön maksimoimalla lämmönsiirto sekä lauhteessa että sylinterivaipassa. Nopeammin ja helpommin lämmönsiirtoa saataisiin kuitenkin tehostettua vaikuttamalla lauhteen lämmönsiirtoon, tämän todistavat myös urasylinterille suoritettavat laskelmat. Sylinterivaipan lämmönsiirron parantaminen vaatisi suuria konstruktio muutoksia ja sitä myöten pitkät tuotekehitys- ja testausprosessit.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

AHLHOLM, LOTTA: Enhancing cylinder drying

Master of Science Thesis, 63 pages

May 2010

Major: Machine design

Examiner: Professor Erno Keskinen

Keywords: drying cylinder, paper drying, drying efficiency, heat transfer

In papermaking the main method used for paper drying is cylinder drying. However the cylinders, made of cast iron and heated with pressurized steam, are not efficient enough for current paper machines. The purpose of this thesis is to explore methods, with which cylinder drying can be enhanced.

In this thesis paper drying and heat transfer in cylinder drying are looked deeper into. In cylinder drying the heat from the condensing steam must go through several thermal resistances, which are the condense layer, the cylinder shell and the contact layer between the cylinder surface and paper. Because of these resistances all the heat from the steam can not be used to drying paper. Heat transfer studies reveal how these resistances are formed, how they affect the total resistance and how they can be minimized. Current drying methods are examined before introducing and analyzing the new ones. The new structures, which are not yet being used in the industry, include thin shelled cylinders with different kind of stiffening structures and channel structures.

Heat transfer in axially grooved cylinder is studied more carefully. In the performed calculations was determined, how several variables affect the heat transfer of the cylinder. The variables are the number of the grooves, the outer surface temperature of the cylinder and the machine speed. Also a drying simulation was created for an imaginative paper machine, in which some traditional drying cylinders were replaced by the grooved cylinders. As a result of the simulation the increment in the machine speed was revealed. Through the increased speed also the economical aspect can be looked at.

All in all the biggest potential in enhancing cylinder drying could be taken advantage by maximizing heat transfer in both condensate layer and cylinder shell. Easier and faster the total heat transfer could be increased by interfering the condensate layer and its heat transfer properties. Also the results with the grooved cylinder speak on behalf of this aspect. Making the cylinder shell more effective demands big changes in construction and therefore time taking product development and testing processes.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Jyväskylän Rautpohjassa Metso Paper Oy:lle. Kiitokset ohjaajilleni TkT Kari Jupille ja fil.lis. Risto Taljalle sekä työni tarkastajalle prof. Erno Keskiselle hyvistä neuvoista ja kärsivällisyydestä.

Kiitokset myös läheisilleni tuesta ja kannustuksesta. Tässä se nyt viimein on, kirjoissa ja kansissa!

Iisalmessa 24.03.2010

Lotta Ahlholm

SISÄLLYS

Tiivistelmä	II
Abstract	III
Alkusanat	IV
SISÄLLYS	V
LYHENTEET JA MERKINNÄT	VII
1 PAPERIN KUIVATUKSEN TEHOKKUUS	1
2 PAPERINVALMISTUSPROSESSI.....	2
3 SYLINTERIKUIVATUS.....	4
3.1 Sylinterikuivatus	4
3.2 Vaiheet sylinterikuivatuksessa.....	5
3.3 Höyry ja lauhde.....	8
4 LÄMMÖN- JA MASSANSIIRTO SYLINTERIKUIVATUKSESSA	14
4.1 Lämmönsiirtomekanismit	14
4.2 Lämmön johtuminen.....	15
4.2.1 Johtuminen homogeenisessa väliaineessa.....	15
4.2.2 Kontaktilämmönsiirto	16
4.3 Konvektio.....	17
4.4 Lämmönsiirto höyrystä rainaan	19
4.4.1 Lauhdekerroksen lämmönsiirto.....	20
4.4.2 Lämmönjohtuminen sylinterivaipan läpi	21
4.4.3 Lämmönsiirto sylinterin ulkopinnasta paperin sisäpintaan.....	21
4.5 Lämmön- ja massansiirto rainassa.....	23
4.5.1 Lämmönsiirto	24
4.5.2 Massansiirto	26
4.5.3 Yhtäaikainen lämmön- ja massansiirto	27
4.6 Rainan lähiympäristön vaikutus.....	29
4.6.1 Kosteaa ilma.....	29
4.6.2 Massan siirtyminen rainasta ympäristöön.....	30
5 NYKYKONSTRUKTIOT JA NIIDEN ANALYYSI.....	32
5.1 Yleisesti käytössä oleva kuivatussylinteri	32
5.2 Jenkkisylinteri	33
5.3 Lämmönsiirtoa tehostavat menetelmät	35
5.3.1 Sifonit.....	35
5.3.2 Lämpölistat.....	38
6 SYLINTERIKUIVATUKSEN KEHITTÄMISVAIHTOEHTOJA.....	41
6.1 Lämmönsiirto höyrystä sylinteriseinään	41
6.2 Lämmönsiirto sylinterin seinässä.....	42
6.3 Lämmön tuonti ulkopuolelta.....	46
7 LÄMMÖNSIIRTOTARKASTELOT	47
7.1 Lämmönsiirto nykyisessä sylinterissä	47

7.2	Lämmönsiirto urasynterissä.....	49
7.2.1	Laskennan suoritus.....	50
7.2.2	Laskennan tulokset.....	51
7.3	Laskennan tulokset	51
7.4	Tulosten tarkastelu.....	55
8	KANNATTAVUUSTARKASTELUT	56
9	SYLINTERIKUIVATUKSEN TEHOSTAMISPOTENTIALI.....	59
	LÄHTEET.....	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala	[m ²]
c	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
d	sylinterin halkaisija	[mm]
D_v	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa	[m ² /s]
h	konvektiolämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
Δh_v	höyrystymisen latenttilämpö	[J/kg]
L	paksuus	[m]
m_{ev}	massavirta	[kg/s]
p	paine	[Pa, bar]
q	lämpövirta	[W/s]
q''_x	lämpövuoto	[W/m ²]
R_v	vesihöyryn kaasuvakio	[J/(kg K)]
T	lämpötila	[°C, K]
v	vertailunopeus	[m/s, m/min]
v_d	nopeus	[m/s, m/min]
x	ilmankosteus	[g H ₂ O/kg k.i.]

Kreikkalaiset:

α	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
δ	paksuus	[m]
ε	tilavuusosa	[-]
λ	lämmönjohtavuus	[W/m K]
ρ	tiheys	[kg/ m ³]
φ	kulma	[°]

Ala- ja yläindeksit:

-	keskimääräinen	k	kosketus
∞	väliaine	p	paperi
a	ympäristö	par	rinnankytketty
c	sylinteri, kontakti	po	pinta
cond	lauhde, johtuminen	s	höyry, kiinteä, lauhde, pinta
conv	konvektio	ser	sarjaankytketty
d	heat-pipe-efekti	shell	sylinterin vaippa
da	kuiva ilma	tot	kokonais
eff	tehollinen	v	vesihöyry
g	kaasu	w	vesi
in	sisään		

1 PAPERIN KUIVATUKSEN TEHOKKUUS

Paperikoneiden nopeudet lähestyvät tätä nykyä jo nopeutta 2000 m/min. Nopeuksien kasvuun ovat vaikuttaneet lähinnä paperikoneen viira- ja puristinosien kehittyminen. Paperinvalmistuksessa suurin tuotantoa rajoittava tekijä onkin nykyään kuivatusosa, jonka kehitys erityisesti perinteisten kuivatussylinterien osalta ei ole pysynyt muun kehityksen perässä. Käytetyin menetelmä paperin kuivatukseen on yhä sylinterikuivatus, joka on säilynyt likimain samanlaisena sylinterikuivatuksen alkuajoista lähtien. Perinteisen sylinterikuivatuksen ongelmaksi on muodostunut kuivatustehon riittämättömyys suurilla konenopeuksilla. Tästä johtuen kuivatusosan kuivatuskapasiteetti rajoittaa paperikoneen tuotantoa erityisesti koneusintojen yhteydessä. Tähän mennessä lähes ainoa tapa saada lisää kuivatuskapasiteettia on ollut kuivatussylinterien määrän lisääminen.

Kustannuspuolelta katsottuna kuivatuskapasiteetin lisääminen sylinterimäärää kasvattamalla kasvattaa paperikoneen perustamiskustannuksia huomattavasti muutenkin kuin vain sylinterien kustannuksia ajatellen. Kustannusten nousu johtuu pidemmän paperikoneen isommasta tilantarpeesta ja sitä myöten isommasta tehdashallista sekä runkorakenteiden määrän kasvusta.

Paperikoneuudistuksia tehtäessä tehdashalli on valmiina ja kuivatustehon lisäämistä ei näin ollen voida toteuttaa kuivatussylinterien määrää lisäämällä. Tästä syystä on kehitetty toisenlaisia kuivatusmenetelmiä sekä sylinterikuivatusta tehostavia menetelmiä, jotka perustuvat ilmapuhallukseen sekä lämpösäteilyyn.

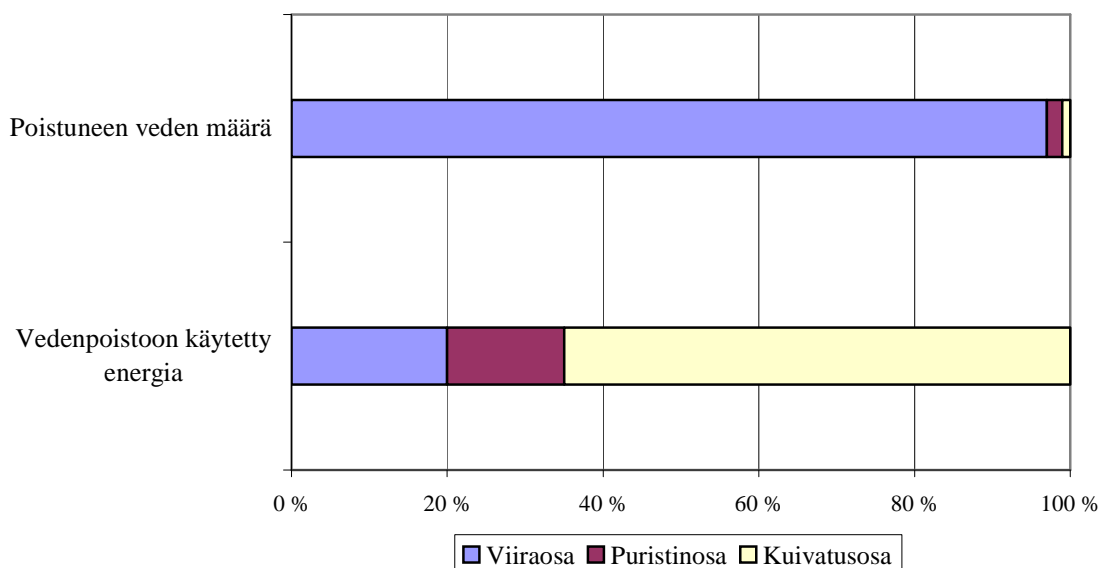
Sylinterikuivatuksen suosio perustuu menetelmän edullisuuteen sekä käytön että valmistuksen osalta. Tämän vuoksi sylinterin kuivatustehoa pyritään parantamaan. Nykyään kuivatusosan perustamiskustannukset ovat suurimmat verrattuna muihin paperikoneen osioihin. Kuivatusteholtaan parempi kuivatussylinteri mahdollistaisi lyhyemmän kuivatusosan, mikä puolestaan laskisi investoinnin kokonaiskustannuksia. Tämän työn tavoitteena on löytää uusia tehokkaampia konstruktioita kuivatussylinterille ja tarkastella niitä sekä rakenteellisesta että kustannustehokkuuden näkökulmasta.

Tässä diplomityössä luodaan ensin katsaus paperinvalmistukseen kokonaisprosessiin, jonka jälkeen käsitellään kuivatusprosessia perinteisen sylinterikuivatuksen kannalta sekä kuivatukseen liittyvää lämmönsiirtoa. Tämän jälkeen tarkastellaan kuivatussylinterin rakennetta ja olemassaolevia konstruktioita. Seuraavaksi tutkitaan uusien sylinterirakenteiden mahdollisuuksia ja suoritetaan lämmönsiirtotarkastelut eräälle sylinterirakenteelle. Lopuksi lasketaan sylinteriuudistuksen kannataavuutta ja tarkastellaan sylinterikuivatuksen yleistä tehostamispotentiaalia.

2 PAPERINVALMISTUSPROSESSI

Paperinvalmistusprosessia voidaan pitää yhtenä suurena vedenpoisto- ja kuivatustapahtumana. Prosessi alkaa massan valmistuksella. Tässä vaiheessa puusta erotellaan kuidut kemiallisesti keittämällä tai mekaanisesti hiertämällä tai hiomalla. Saatu massa jauhetaan ja laimennetaan sisältämään yhden prosentin verran kuituja. Massa levitetään perälaatikon avulla viiralle. Viiraosan tehtävänä on poistaa perälaatikon levittämästä massasuspensiosta vettä. Vesi poistuu sihtinä toimivan viiran läpi ja kuiduista alkaa suotautua paperiraina. Viiraosalla rainan kuiva-ainepitoisuus tulee saada riittävän korkeaksi, jotta se kestää siirron puristinosalle. Puristinosalla veden poistaminen rainasta jatkuu mekaanisella puristuksella. Lisäksi raina tiivistyy. Puristinosan jälkeen raina sisältää noin puolet vettä ja sen märkälujuus on riittävä, jotta se kestäisi siirtymisen kuivatusosalle.

Kuva 1 esittää poistuneen veden määrää ja siihen käytettyä energiaa kullakin paperikoneen osalla. Viiraosalla poistetaan suurin osa eli noin 99 % vedestä. Viiraosalta lähtiessä rainan kuiva-ainepitoisuus on 15–25 prosenttia. Puristinosalla kuiva-ainepitoisuus nousee noin 50 prosenttiin. Vaikka kuiva-ainepitoisuus nouseekin puristinosalla huomattavasti, puristinosan osuus kokonaisvedenpoistosta on vain noin kaksi prosenttia.



Kuva 1. Vedenpoisto ja siihen käytetty energia paperikoneen eri osilla. /1/

Sekä viira- että puristinosalla vedenpoisto on mekaanista. Kuivatusosalle siirryttäessä veden poistamismenetelmä muuttuu höyryttämiseksi. Höyryttäminen on huomattavasti mekaanisia menetelmiä kalliimpi tapa poistaa vettä. Tämä voidaan todeta kuvan 1 esittämistä vedenpoistoon käytetyistä energiämääristä: Kuivatusosalla poistetaan noin

prosentti kokonaisvesimäärästä, mutta siihen käytetään energiaa peräti 65 % kokonaisenergiämäärästä. Tämän vuoksi mahdollisimman suuri osa vedestä pyritään poistamaan paperirainasta mekaanisesti ennen kuivatusosaa. Kuivatusosan jälkeen paperin kuiva-ainepitoisuus on noin 91–96% paperilajista riippuen.

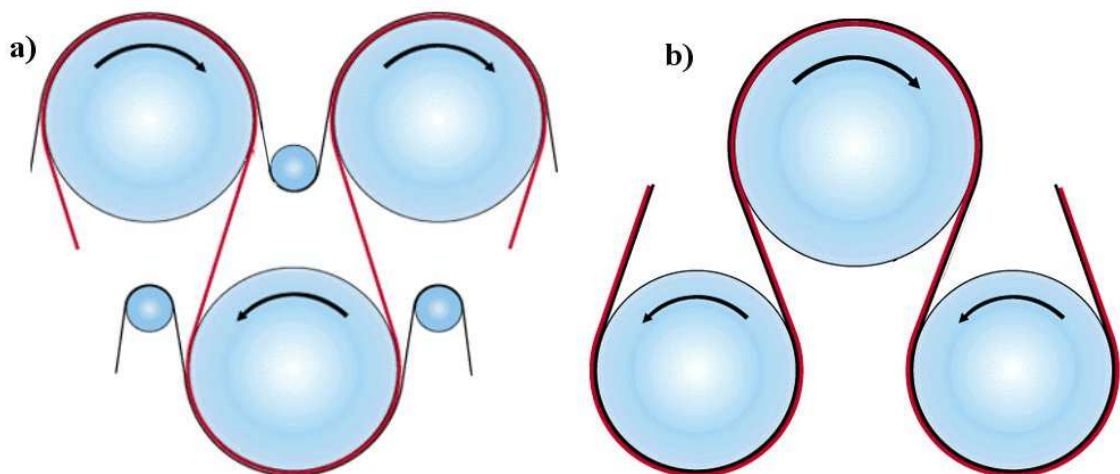
3 SYLINTERIKUIVATUS

Tässä luvussa perehdytään sylinterikuivatuksen tarkastelemalla ensin sylinterikuivatusosan perusominaisuuksia. Seuraavaksi luodaan katsaus kuivatuksen vaiheisiin ja lopuksi tarkastellaan lämmitykseen käytettävää höyryä sekä lauhteen käyttäytymistä sylinterin sisällä.

3.1 Sylinterikuivatus

Riippuen paperikoneen koosta ja tuotantomäärästä sylinterikuivatusosa koostuu 40–100 kuivatussylinteristä, jotka on jaettu 4 – 10 kuivatusryhmään. Kullakin ryhmällä on oma käyttömoottorinsa, minkä ansiosta ryhmien välille voidaan muodostaa nopeuseroja. Nopeuserojen avulla saadaan muodostettua riittävä ratakiireys rainaan, jolloin saadaan ehkäistä kuivumisesta aiheutuva rainan kutistuminen.

Sylinterikuivatuksessa käytetyt rainankuljetusmenetelmät ovat kuvassa 2 näkyvät kaksiviiravienti ja yksiviiravienti. Kaksiviiraviennissä sekä ylä- että alasyylinterit ovat lämmitettyjä ja molemmilla on omat kuivatusviiransa. Viirat painavat rainaa sylintereitä vasten, mutta siirtyminen yläsylintereiltä alasyylintereille tapahtuu tukemattomana. Sylintereiden väleihin muodostuu ilmavirtoja ja nämä ilmavirrat saavat rainan lepattamaan vapaassa välissä. Pahimmassa tapauksessa lepatukset voivat aiheuttaa katkoja. Kaksiviiravientiä käytetäänkin hitailla koneilla, koska raina kestää lepatuksen aiheuttamia rasituksia merkittävästi paremmin hitailla nopeuksilla. Myös nopeilla koneilla voidaan käyttää kaksiviiravientiä. Tällöin kaksiviiraviennin osuudet sijoittuvat kuivatusosan loppupäähän, jolloin raina on jo lujempi ja kestää lepatuksen aiheuttamat rasitukset kovassakin nopeudessa. /3/



Kuva 2. Paperin kulku a) kaksiviiraviennissä ja b) yksiviiraviennissä. /12/

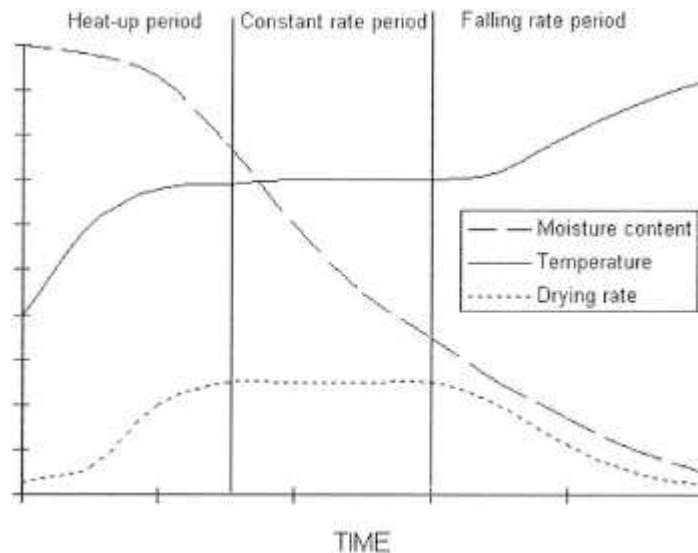
Yksiviiravienttiä käytetään nopeilla koneilla, koska siinä raina on tuettuna koko ajan. Tällöin raina kestää märkänäkin suurien nopeuksien aiheuttamia rasituksia. Yksiviiraviennissä vain yläsylinterit ovat lämmitettyjä ja alasyntereinä ovat joko urasynterit tai imutelat. Alateloiden tehtävänä on ehkäistä lepatuksia pitämällä raina paremmin kiinni viirassa alipaineen avulla.

Sylinterit lämmitetään kylläisellä höyryllä, jonka lämpötila on suoraan verrannollinen höyryn paineeseen. Riippuen sylinterin sijainnista kuivatusosalla höyrynpaine voi vaihdella alipaineisesta ylipaineiseen välillä $-35\text{...}690$ kPa, kartonkikoneilla höyrynpaine voi olla ylimmillään 1000 kPa. Höyryn lämpötila vaihtelee tällöin noin 90 asteesta 170 asteeseen. Kuivatusosan alkupäässä sylintereiden lämpötilat ovat matalimmat, koska märän rainan kuidut palavat helposti kiinni sylinterin pintaan sen ollessa liian kuuma. Rainan kuiva-ainepitoisuuden noustessa voidaan myös sylintereiden lämpötiloja nostaa.

Nykyisin sylinterikuivatusosat ovat katettuja ja rainasta poistuva vesi siirtyy höyrynä ympäröivään huuvaan. Huuvan avulla rainan kuivatusolosuhteet pysyvät tasaisina, ja sen avulla myös konosalin työskentelyolosuhteet ovat paremmat sekä lämpö- ja kosteus- että äänieristyksen ansiosta. Huuvan kosteasta ja lämpimästä ilmasta otetaan lisäksi talteen lämpöä, mikä parantaa kuivatusosan energiatehokkuutta.

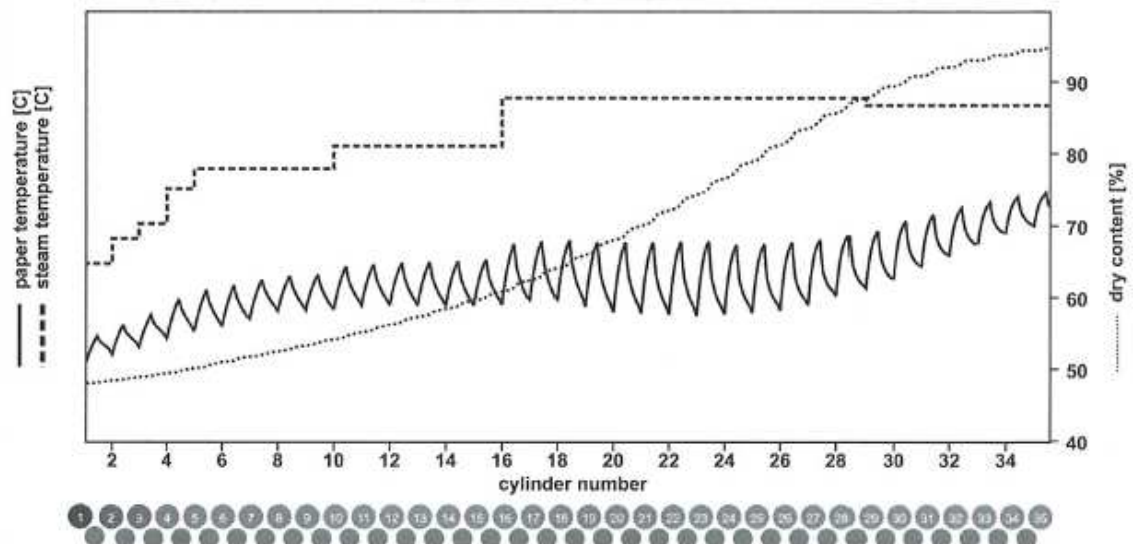
3.2 Vaiheet sylinterikuivatuksessa

Sylinterikuivatus voidaan jakaa karkeasti kolmeen vaiheeseen. Nämä vaiheet ovat kuvassa 3 esiintyvät lämmitysvaihe, tasaisen kuivumisnopeuden vaihe ja kuivumisnopeuden laskun vaihe. Lämmitysvaihe sijoittuu kuivatusosan ensimmäisille kuivatusryhmille. Tällöin rainan lämpötila kohoaa ja veden haihtuminen alkaa. Tämän jälkeen alkaa tasainen kuivuminen, joka sijoittuu kuivatusosan keskivaiheille. Tasaisen kuivumisen aikana paperin huokosissa oleva vapaa vesi haihtuu ja rainan kuiva-ainepitoisuus nousee voimakkaimmin. Laskevan kuivatusnopeuden vaihe alkaa lopussa, kun kriittinen kosteuspitoisuus on saavutettu. Tällöin raina ei sisällä enää yhtenäistä vesikerrosta ja sylinteriä vasten oleva pinta on osittain kuiva. Rainan osittaisen kuivumisen takia lämmönsiirtovastus rainan ja sylinterin välillä kasvaa. Samaan aikaan myös rainan lämmönjohtokyky pienenee ja sen lämpötila alkaa nousta. /9/



Kuva 3. Kosteuspitoisuus, lämpötila ja kuivumisnopeus ajan funktiona sylinterikuivatusprosessissa. /9/

Kriittisen kosteuspitoisuuden saavuttamisen jälkeen rainan sisältämä vesi on ei-vapaata vettä. Tämän veden höyrystäminen on hankalampaa kuin vapaan veden, sillä ei-vapaan veden höyrystyslämpö on suurempi kuin vapaan veden, joten lämpöenergiaa tarvitaan enemmän. Tämän takia kuivatusosan puolenvälin jälkeen sylintereiden lämpötilojen tulee olla huomattavasti korkeammat kuin alkupäässä, mikä näkyy myös kuvassa 4 esitetyssä höyryn lämpötilan kuvaajassa. /9, 15/



Kuva 4. Periaatekuva paperin ja lämmityshöyryn lämpötilan sekä kuiva-ainepitoisuuden käyttäytymisistä sylinterikuivatusosalla. /14/

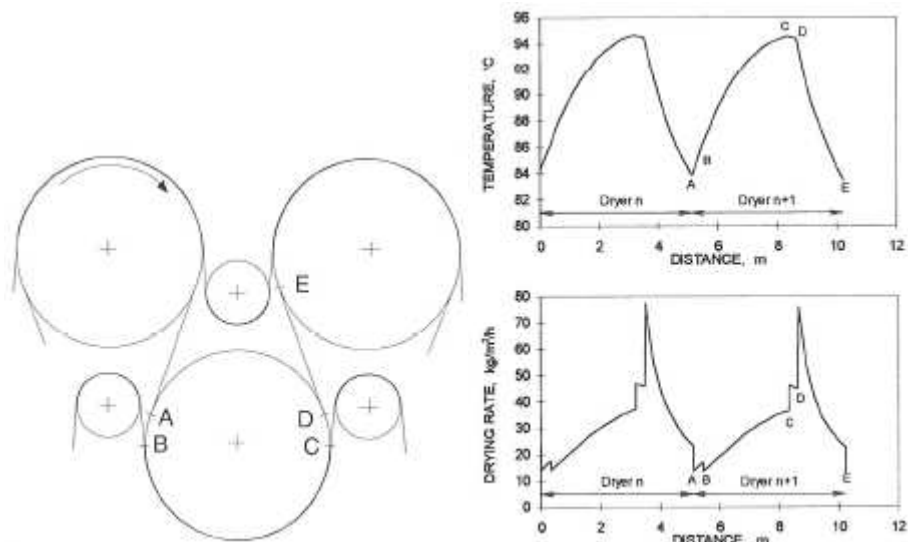
Kuvassa 4 on esitetty myös rainan lämpötilan kehittyminen kuivatusosalla. Kuten edellä jo todettiin, rainan lämpötila nousee kuivatusosan loppua kohden. Todellisuudessa lämpötila ei kuitenkaan nouse tasaisesti, mikä voidaan selkeästi havaita kuvaajan

piikikkyudesta. Kohtalaisen suuretkin, jopa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n, lämmönvaihtelut johtuvat rainan kulkemisesta vuorotellen kuivatussylinterien ja alipainetelojen yli. Edellä kuivatustapahtuma jaettiin kolmeen päävaiheeseen. Päävaiheiden lisäksi sylinterikuivatus voidaan jakaa pienemmässä mittakaavassa ajateltuna kuivatussykleihin, joita esittävät piikit rainan lämpötiläkäyrässä.

Syklin alussa raina saapuu sylinterille, sen lämpötilä alkaa nousta ja veden haihtuminen käynnistyy. Rainan irrottua sylinteristä se jäähtyy, mutta tällöin tehokkain haihdutus vasta alkaa. Sylinterikosketuksen välisessä vaiheessa vettä haihtuu molemmilta puolilta rainaa, mikä mahdollistaa tehokkaimman haihdutuksen syklissä. Yksiviiraviennissä haihtuminen tapahtuu kuitenkin pääasiassa rainan vapaalta puolelta.

Kaksiviiraviennissä tämä voimakkaan haihtumisen vaihe on siis vapaassa välissä ja ilmenee voimakkaampana kuin yksiviiraviennissä, koska vesihöyry pääsee vapaasti poistumaan rainan molemmilta puolilta. Yksiviiraviennissä höyryn täytyy kulkea kuivatusviiran läpi poistuaan toiselta puolelta.

Kuvassa 5 on esitetty rainan lämpötilä ja haihtumisnopeus kaksiviiraviennissä. Voimakkaimman haihdutuksen vaihe alkaa kohdassa D, jossa rainan lämpötilä on korkeimmillaan ja haihtumisnopeudessa näkyy piikki. Rainan palatessa sylinterikosketukseen kohdassa A (tai E) sen lämpötilä sekä haihtumisnopeus ovat matalimmillaan.

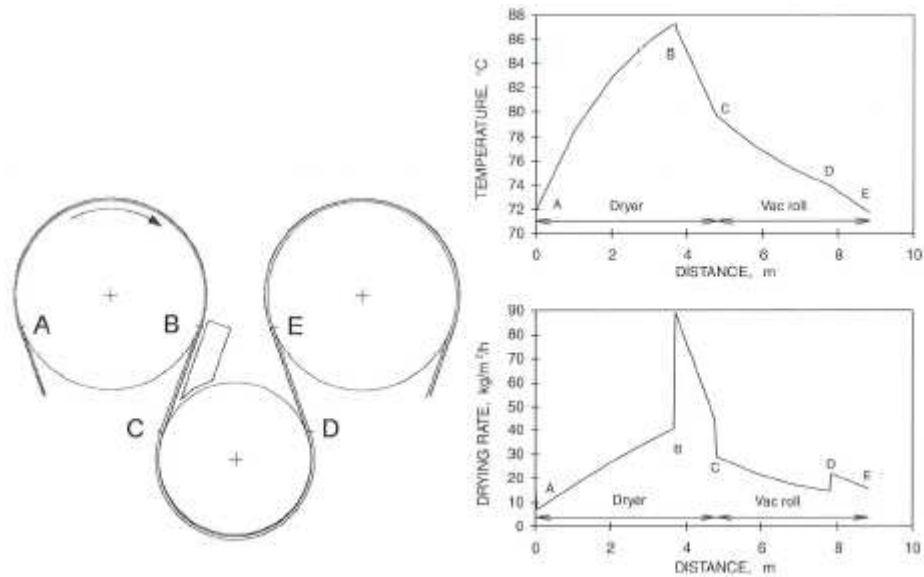


Kuva 5. Rainan lämpötilä (ylempi kuvaaja) ja haihtumisnopeus (alempi kuvaaja) kaksiviiraviennin eri vaiheissa. /4/

Kaksiviiraviennissä edellä selostetut syklit seuraavat toisiaan samanlaisina niin monta kertaa kuin kuivatussylintereitä on kuivatusosalla. Tämä havaittiin jo kuvan 5

kuvaajista, joissa ylä- ja alasyntereille muodostui samanlaiset käyrät. Yksiviiraviennissä sykliin tulee imuteloista johtuva toinen vaihe. Imutelalle tultaessa paperin lämpötila edelleen laskee, mutta haihdutus jatkuu kuitenkin voimakkaana. Heti imutelalta lähtemisen jälkeen haihdutus rainassa voimistuu hieman vapaamman virtauksen ansiosta.

Kuvan 6 lämpötila- ja haihtumisnopeuskuvaajissa lämmityssylinterin vaihe on välillä A-B. Tähän asti kyseiset kuvaajat noudattelevat kaksiviiraviennin vastaavien kuvaajien käyriä. Eroavaisuudet alkavat kohdasta C, jossa rainan kosketus imutelan kanssa alkaa.



Kuva 6. Rainan lämpötila (ylempi kuva) ja haihtumisnopeus (alempi kuva) yksiviiraviennin eri vaiheissa. /4/

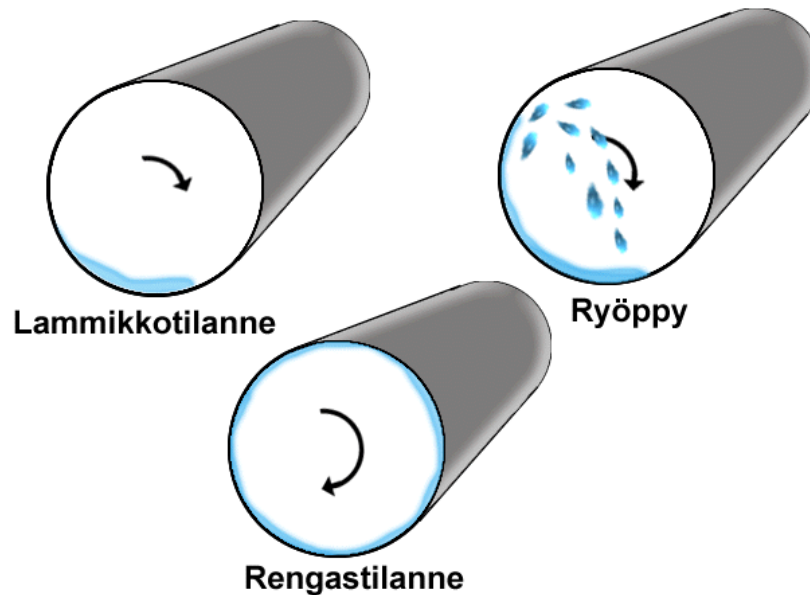
Kuivatusviirojen tulee olla hyvin höyryä läpäiseviä, jotta haihtumisnopeus olisi mahdollisimman suuri myös rainan sylinterikosketuksen aikana. Jos viira läpäisee huonosti vesihöyryä, sitä jää rainan ja viiran väliin, mikä huonontaa sylinterin ja paperin välistä kosketusta ja sitä myöten kuivumista. Viira ei kuitenkaan saa olla liian avoin, sillä se alkaa haitata ajettavuutta.

3.3 Höyry ja lauhde

Kuivatussyntereiden lämmittämiseen käytettävä kylläinen vesihöyry luovuttaa lämpönsä sylinterille ja lauhtuu vedeksi. Sylinterin sisällä olevaa lauhdetta poistetaan sifoneilla. Jatkuvasta poistamisesta huolimatta lauhdetta kuitenkin on sylinterin sisällä koko ajan.

Riippuen lauhteen määrästä ja koneen nopeudesta lauhde voi esiintyä kuvassa 7 nähtävissä kolmessa muodossa. Nopeuden ollessa pieni, alle 150 m/min, lauhde

muodostaa lammikon sylinterin pohjalle. Nopeuden kasvaessa lauhde lähtee nousemaan sylinterin mukana, mutta putoaa kuitenkin takaisin lammikkoon ennen lakikorkeutta. Lauhteesta muodostuu lauhderengas sylinterin sisäpinnalle nopeuksilla 300–425 m/min riippuen lauhteen määrästä ja sylinterin halkaisijasta. /4/



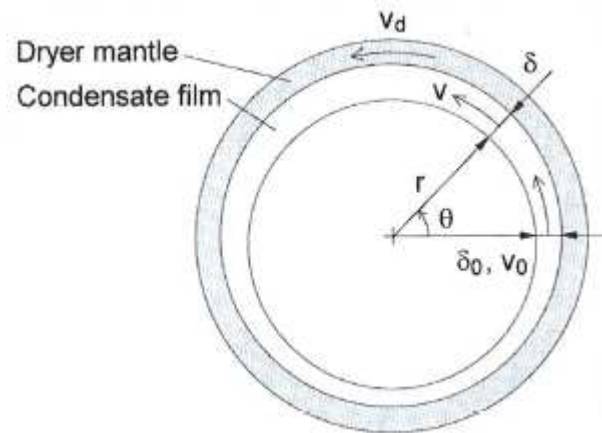
Kuva 7. Lauhteen käyttäytyminen sileäpintaisessa kuivatussyylinterissä. /12/

Edellä kuvatuista lauhteen käyttäytymismuodoista kaksi ensimmäistä esiintyvät paperikoneilla nykyään enää vain koneen alas- ja ylösajoissa. Ajotilanteessa nykkykoneiden nopeudet ovat jo niin suuria, että lauhde on aina kehäytyneenä. Kartonkikoneilla lauhde muodostaa lammikon sylinterin pohjalle myös tuotantovauhdissa.

Rengastilanteessa oleva lauhde aiheuttaa huomattavasti suuremman lämpöhäviön kuin lammikko- tai ryöppyvaihe. Lisäksi lämpöhäviö on sitä suurempi mitä paksumpi lauhdekerros on. Tämän takia maan vetovoiman vaikutus lauhderenkaaseen onkin mielenkiintoinen ilmiö. Lauhteen ja sylinterin pinnan välillä vallitsee nopeuseroja. Nämä nopeuserot johtuvat maan vetovoiman lauhteeseen aiheuttamista kiihdytyksistä ja hidastuksista. Kiihdytykset ja hidastukset synnyttävät lauhdekerrokseen turbulenssia, mikä parantaa lämmönsiirtoa vesikerroksen läpi. Seuraavaksi tarkastellaan nopeuserojen syntymistä.

Kuvan 8 sylinterin sisällä oleva lauhde on rengasmuodossa. Lauhteen nopeus on kutakuinkin sama kuin sylinterin nopeus kohdassa $\theta=0^\circ$. Maan vetovoiman vaikutuksesta lauhteen nopeus pienenee ja se saavuttaa pienimmän arvonsa lakikorkeudessa. Lakikorkeuden jälkeen lauhteen nopeus alkaa kiihtyä ja 180° kohdalla

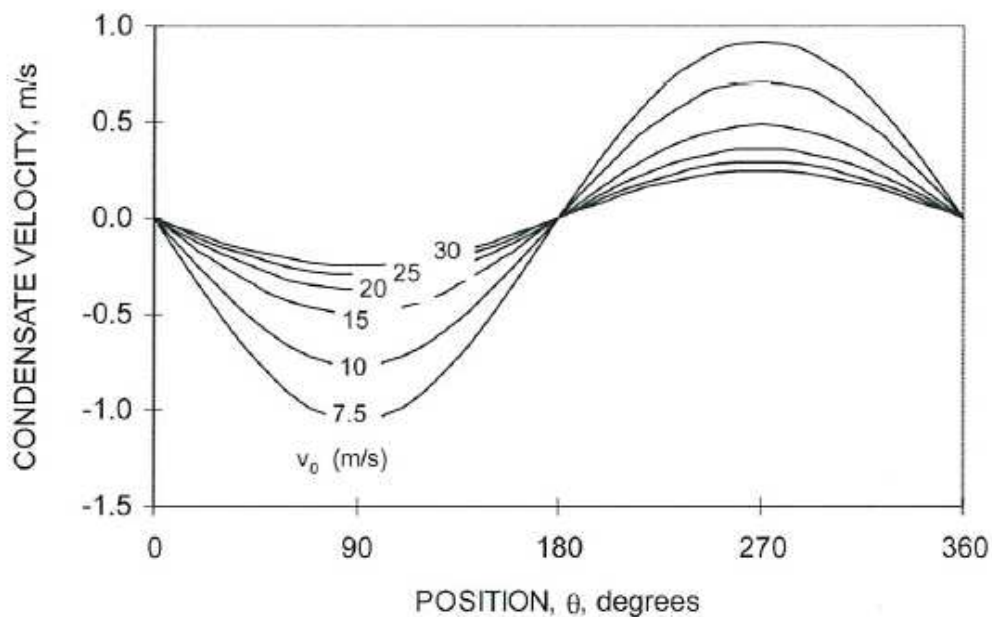
se on jälleen likimain sylinterin nopeuden kanssa yhtä suuri. Sylinterin pohjalla lauhteen nopeus on huipussaan.



Kuva 8. Lauhdekerroksen (condensate film) liikkuminen sylinterin (dryer mantle) sisällä. /4/

Nopeuserojen vaikutuksesta lauhdekerroksen paksuuskin vaihtelee sylinterin kehällä. Lakikorkeudessa nopeuden ollessa pienimmillään lauhdekerroksen paksuus on suurin ja vastaavasti sylinterin pohjalla lauhdekerros on ohuimmillaan suuren nopeuden vaikutuksesta. Lauhteen paksuuden vaihtelulla ei kuitenkaan ole niin suurta vaikutusta lämmönsiirtoon kuin nopeuserojen aiheuttamalla turbulenssilla. Turbulenttisuuden vaikutuksesta kerrotaan enemmän lämmönsiirtoa käsittelevässä kappaleessa.

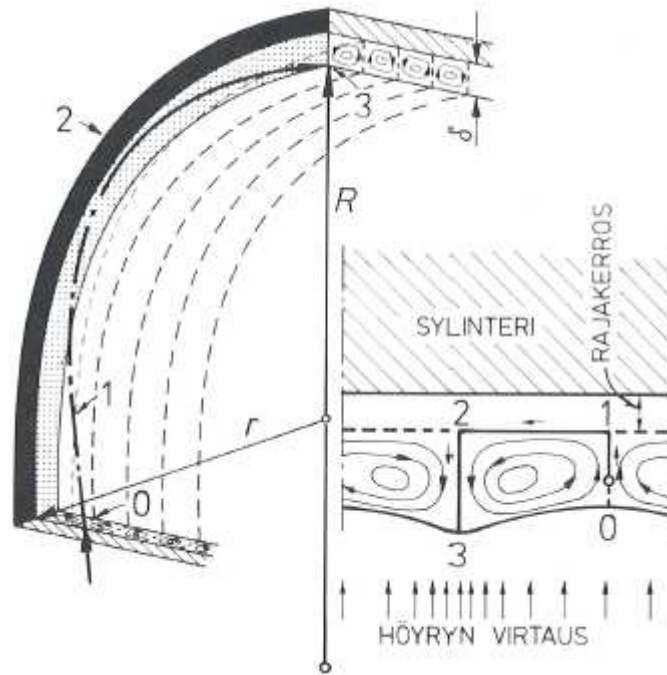
Koneen nopeuden kasvaessa lauhteen ja sylinterin väliset nopeuserot tasoittuvat. Tämä voidaan todeta kuvassa 9 olevista käyristä. Nopeuserojen tasoittumisen myötä myös turbulentsisuus lauhdekerroksessa pienenee ja sitä myöten lämmönsiirto lauhteessa huononee.



Kuva 9. Lauhteen nopeus sylinterin sisäpinnan suhteen eri konenopeuksilla. /4/

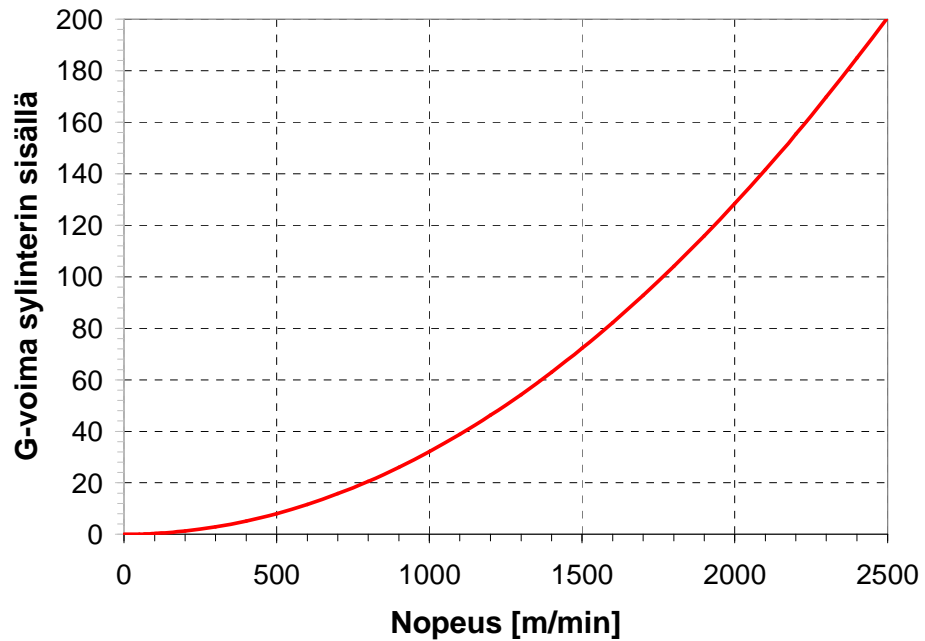
Konenopeuden vaikutusta voidaan selittää lauhdekerroksen ohenemisella. Pyörimisliikkeen lauhteeseen kohdistamat voimat kasvavat ja lauhde painuu tiiviimmin sylinterin pintaan. Tällöin lauhdekerros muodostuu laminaariseksi ja stabiiliksi. Kuitenkin myös laminaarisen lauhdekerroksen läpi siirtyy enemmän lämpöä kuin pelkästään johtamalla voisi siirtyä. Tämä voidaan selittää lauhdekerroksessa tapahtuvan toisiovirtauksen avulla. /27/

Periaatekuva toisiovirtauksesta eli Taylor-Götler-virtauksesta on kuvassa 10. Sylinteri jakautuu aksiaalissuunnassa osioihin, joissa vesikerroksessa esiintyy pyörteilyä. Vierekkäisissä osioissa pyörteily on vastakkaisuuntaista. Höyrystä siirtyy lämpöä lauhteen uloimpaan kerrokseen, josta se siirtyy pyörteen välityksellä sylinterin sisäpinnalle. Lauhteen liikettä voidaan tarkastella yksittäisen vesimolekyylin avulla. Vesimolekyyli kulkee pyörteen mukana edeten samalla myös sylinterin kehällä eli sen kulkema rata muodostaa ruuvikäyrän. /27, 28/



Kuva 10. Toisiovirtaus lauhdekerroksessa. /27/

Koneen nopeuden kasvaessa pyörimisliikkeestä lauhdekerrokseen aiheutuva keskeiskiihtyvyys kasvaa. Tämä voidaan todeta myös kuvan 11 perusteella. Kuvassa on esitetty lauhteen kiihtyvyys putoamiskiihtyvyyden kerrannaisina koneen ajonopeuden funktiona. Nykynopeuksilla tämä keskeiskiihtyvyydestä aiheutuva voima on jopa sata kertaa suurempi kuin maan vetovoima. Kun näin suuri keskipakoisvoima painaa lauhdekerrosta sylinterin pintaa vasten, kehätyneestä lauhteesta tulee stabiili, eikä se enää liiku suhteessa sylinterin sisäpintaan. Tässä tilanteessa lauhdekerros on jo niin ohut ja stabiili, että toisiovirtaustakaan ei enää esiinny. Tällöin lämmön voidaan ajatella siirtyvän ainoastaan johtamalla lauhdekerroksen läpi, mikä on erittäin huono lämmönsiirtotapa veden ollessa kyseessä. Veden lämmönjohtavuuskerroin on alle $1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, kun valuraudalla se on noin $50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. /27, 29/



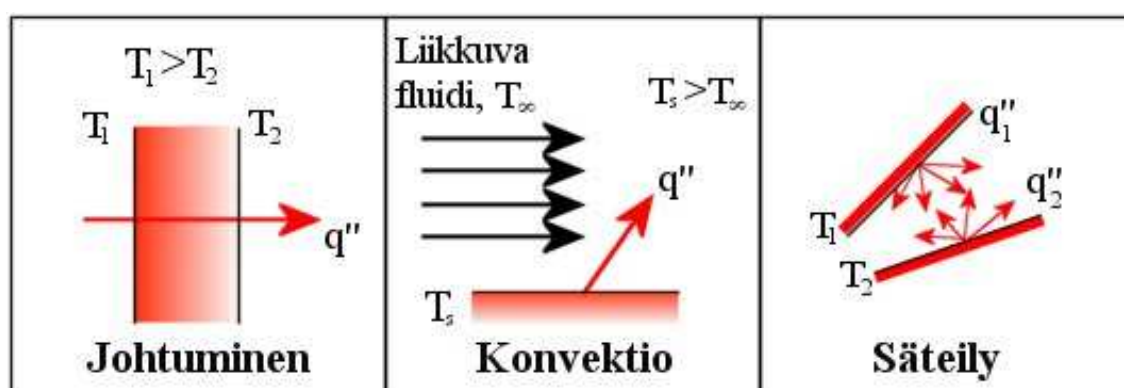
Kuva 11. Lauhteen keskeiskiihtyvyys sylinterin sisällä konenopeuden funktiona. /32/

Keskipakoisvoimat vähentävät myös lauhteen aksiaalissuuntaista liikettä. Tämän takia lämpötilaprofiili ei säily enää tasaisena koko koneen leveydeltä. /20/ Sylinterin epätasainen lämpötilaprofiili vaikuttaa paperin kuivamiseen ja ominaisuuksiin. Sylinterin reunoilla kosteus pääsee paremmin siirtymään pois rainasta ympäröivään ilmaan ja reunat kuivavat nopeammin. Tällöin paperin ominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, mistä kohdasta rainaa se on. Tämä vaikuttaa esimerkiksi paperin painatusominaisuuksiin ja painotalot tahtovat yleensä paperinsa samasta kohdasta rainaa.

4 LÄMMÖN- JA MASSANSIIRTO SYLINTERIKUIVATUKSESSA

4.1 Lämmönsiirtomekanismit

Lämmönsiirtoa tapahtuu aina, kun materian sisällä tai kahden materiaalin välillä vallitsee lämpötilaero. Näin on myös sylinterikuivatuksessa, jossa lämmönsiirron aikaansaavana voimana toimii lämpötilagradientti kylläisen lämmityshöyryn ja kuivattavan paperirainan välillä. Tässä kappaleessa käydään läpi lämmönsiirtomekanismit, joista lämmönsiirto paperin kuivatuksessakin koostuu. Kaavakuva näistä mekanismeista on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Lämmönsiirtomekanismit. /6/

Paikallaan pysyvän aineen, kiinteän tai fluidin, yli tapahtuva lämpötilaerojen tasoittuminen tapahtuu johtumalla. Johtuminen perustuu aineen atomien tai molekyylien aktiivisuuteen. Partikkelit ovat sitä aktiivisempia mitä korkeampi lämpötila on. Partikkeleiden vuorovaikutuksen kautta energiaa siirtyy korkeammasta potentiaalista matalampaan. Kiinteissä aineissa lämmönsiirto perustuu vapaiden elektronien liikkeeseen ja hilavärähtelyyn. Nesteillä ja kaasuilla lämpöenergia siirtyy partikkeleiden välisissä törmäyksissä. /6/ Koska partikkelien väliset etäisyydet ovat fluideilla huomattavasti suurempia kuin kiinteillä aineilla, myös partikkelien vuorovaikutus on vähäisempää. Tämän takia johtuminen on huonompi lämmönsiirtomekanismi fluideilla kuin kiinteillä aineilla.

Konvektiosta puhutaan, kun lämpöä siirtyy pinnan ja liikkuvan fluidin välillä. Edellytyksenä lämmönsiirrolle on lämpötilaero pinnan ja fluidin välillä. Tarkkaan ottaen konvektio koostuu kahdesta lämmönsiirtotavasta. Lämpöä siirtyy partikkelien satunnaisen liikkeen välityksellä sekä fluidin liikkuaessa kokonaisuudessaan. Jälkimmäistä tapausta yksinään sanotaan advektioksi. Edellä kuvatut menetelmät kuljettavat ns. vapaata lämpöenergiaa (*sensible heat*). Joihinkin konvektioprosesseihin

voi kuitenkin lisäksi liittyä latentin eli sitoutuneen lämmön kuljetusta. Latentin lämmön kuljetus liittyy aina fluidin faasimuutoksiin nesteen ja kaasun välillä. /6/

Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Pakotetusta konvektiosta puhutaan, kun fluidin virtaus on aiheutettu keinotekoisesti esimerkiksi pumpun tai puhaltimen avulla. Luonnollinen konvektio tapahtuu tiheyserojen aiheuttamien nostevoimien vaikuttaessa fluidiin. Konvektio on huomattavasti tehokkaampi lämmönsiirtomekanismi kuin johtuminen. /6, 16/

Kaikki pinnat lähettävät lämpösäteilyä, joka on sitä voimakkaampaa mitä korkeampi pinnan lämpötila on. Paitsi kiinteät aineet myös nesteet ja kaasut säteilevät lämpöä ympäristöönsä. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä eikä tarvitse mitään väliainetta edetäkseen. /6/

Paperin sylinterikuivatuksessa lämmönsiirtomekanismeina toimivat pääasiassa johtuminen ja konvektio. Höyrystä lauhdekerrokseen lämpö siirtyy konvektiolla, kuten myös lauhteesta sylinterin pintaan. Lauhdekerroksessa lämpöä siirtyy sekä johtumalla että advektiolla. Sylinterivaipan läpi lämpö kulkeutuu johtumalla. Paperin sisässä lämpö siirtyy johtumalla kuituja sekä vettä pitkin sekä myös konvektiolla kuten myöhemmin käy ilmi. Viimeiseksi paperista ympäristöön lämpö siirtyy konvektion avulla. Lämpösäteily ei ole merkittävä lämmönsiirtomekanismi perinteisessä sylinterikuivatuksessa, joten sitä ei käsitellä tarkemmin. Sen sijaan säteilyä käytetään hyväksi muun muassa paperin päällystysten kuivattamiseen infrapunakuivaimilla.

4.2 Lämmön johtuminen

4.2.1 Johtuminen homogeenisessa väliaineessa

Lämmönsiirtoa homogeenisessa väliaineessa kuvataan Fourier'n lailla (kaava 1). Tämä laki kuvaa materiaalin läpi kulkevaa lämpövirran tiheyttä eli lämpövuota q''_x yksiulotteisessa tapauksessa lämpöjakauman ollessa muotoa $T(x)$.

$$q''_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Kaavassa oleva kerroin λ on materiaalille ominainen lämmönjohtavuus.

Lämpövuosta q''_x saadaan lämpövirta q_x kertomalla se pinta-alalla A , jonka läpi lämpövuoto kulkee.

$$q_x = q''_x A = -\lambda \frac{dT}{dx} A \quad (2)$$

Vakiotilassa lämpöjakauma on lineaarinen lämmön etenemissuunnassa. Tällaisessa tapauksessa lämpövirran derivaatta yksinkertaistuu muotoon

$$q_x = \frac{\lambda A}{L}(T_{s1} - T_{s2}) \quad (3)$$

jossa L on lämmön kulkema matka ja T_{s1} sekä T_{s2} ovat väliaineen pintojen lämpötilat.

Lämmönsiirtoa homogeenisessa materiaalissa voidaan käsitellä myös lämpövastuksien avulla. Lämpövastuksen voidaan ajatella olevan kappaleen ominaisuus, joka vastustaa lämmönsiirtoa. Lämpövastus eli terminen resistanssi johtumisessa $R_{t,cond}$ muodostuu kaavan 3 alkuosasta käänteisenä.

$$R_{t,cond} = \frac{L}{\lambda A} \quad (4)$$

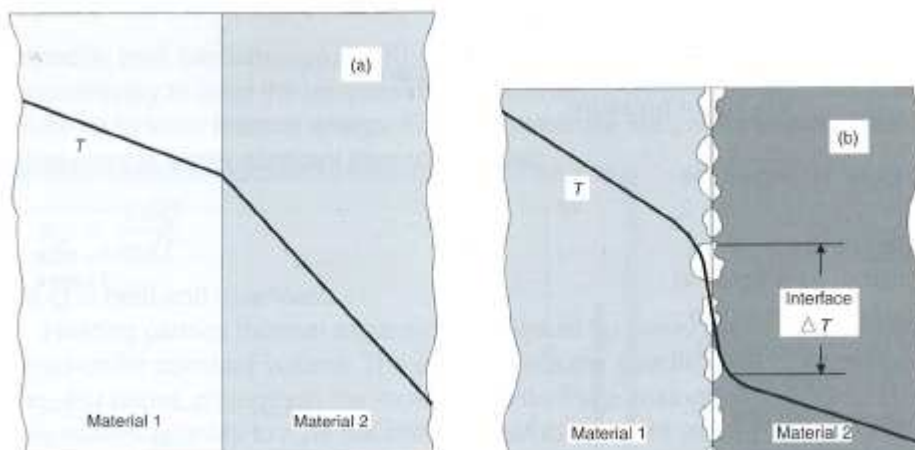
Lämmönjohtavuuden avulla voidaan määrittää materiaalille vielä yksi terminen ominaisuus, terminen diffusiviteetti α . Lämmönjohtavuuden lisäksi termiseen diffusiviteettiin vaikuttavat materiaalin ominaislämpö c_p sekä tiheys ρ .

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (5)$$

Terminen diffusiviteetti kertoo materiaalin kyvystä ja nopeudesta johtaa lämpöä. Kun sen arvo on suuri, materiaali siirtää lämpöä tehokkaammin johtamalla. Arvon ollessa pieni materiaali toimii enemmän lämpöenergian varastona. /6/

4.2.2 Kontaktilämmönsiirto

Kahden materiaalin rajapinnalla lämmönsiirto huononee huomattavasti. Tämä johtuu kosketuksen luonteesta. Ideaalitilanteessa kontakti on täydellinen kuten kuvan 13 kohdassa a eikä lämpöhäviöitä tapahdu. Todellisuudessa kontakti jää epätäydelliseksi kuten kuvan 13 kohdassa b, koska kosketuspinta-ala pienenee ja materiaalit koskettavat toisiaan vain pinnankarheushuipuista. Pinnankarheushuippujen väliin jää tyhjää tilaa, joka useimmiten täyttyy ilmalla. Lämpö siirtyy siis pääasiassa vain kontaktipintojen kautta johtamalla ja samalla hukataan lämpöä.



Kuva 13. Lämpötilajakauma kahden materiaalin kontaktilämmönsiirrossa a) täydellisessä kontaktissa ja b) epätäydellisessä kontaktissa. /16/

Rajapinnasta aiheutuva lämmönsiirtoa vastustava termien kontaktiresistanssi $R_{t,c}$ voidaan lausua kaavalla 6, jossa T_A , T_B ovat materiaalien lämpötilat, ja q_x rajapinnan yli kulkeva lämpövirta.

$$R_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{q_x} \quad (6)$$

Suurin lämmönsiirtoa alentava tekijä kontaktilämmönsiirrossa on kosketuspintojen väliin jäävät raot. Lämmönsiirtoa voidaan parantaa pienentämällä pinnankarheuksia tai kasvattamalla puristuspainetta.

Kontaktiresistanssi vastustaa lämmönsiirtoa paitsi kahden kiinteän kappaleen kosketuksessa myös kiinteän ja fluidin välisessä kosketuksessa.

4.3 Konvektio

Konvektion kuljettamaa lämpövuota q'' kuvataan kaavalla 7, joka tunnetaan Newtonin jäähtymislakina. Konvektioon vaikuttavat väliaineen T_∞ sekä pinnan lämpötilat T_s . Kaavassa h on paikallinen konvektiolämmönsiirtokerroin.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Kontaktilämmönsiirtokerroin on riippuvainen pinnan geometriasta ja fluidin virtausolosuhteista. Kokonaislämpövirta q saadaan integroimalla lämpövuoto koko tarkasteltavan pinnan A_s ylitse ja määrittämällä keskimääräinen lämmönsiirtokerroin \bar{h} kaavalla 8.

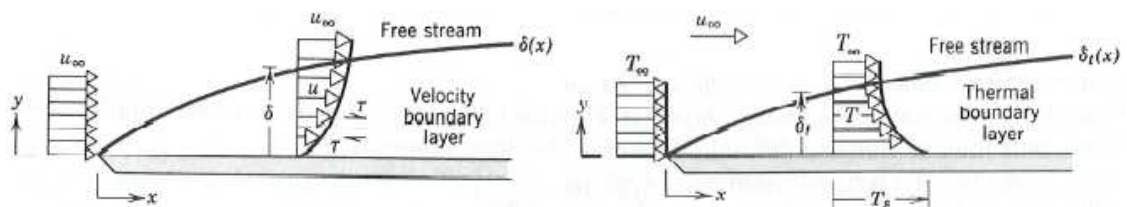
$$q = \int_{A_s} q'' dA_s = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA_s = \bar{h} A (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Myös konvektiolle voidaan määrittää terminen resistanssi $R_{t,conv}$.

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

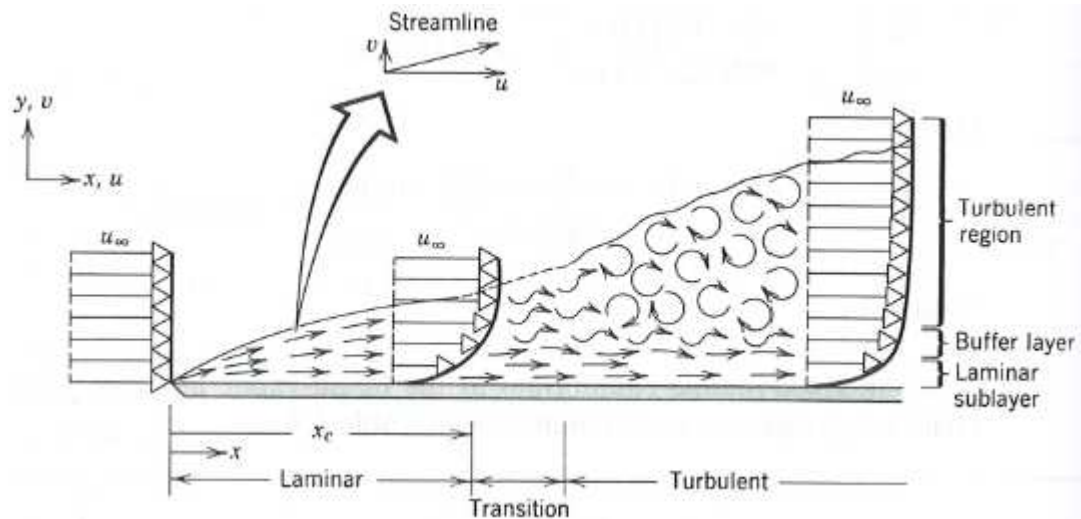
Fluidin virratessa pinnan lähellä virtausnopeus vaihtelee sen mukaan, kuinka etäällä pinnasta ollaan, kuten kuvassa 14 vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty. Aivan kappaleen pinnalla fluidin nopeus on nolla. Etäisyyden kasvaessa pinnasta nopeus kasvaa, kunnes tietyn etäisyyden jälkeen fluidin nopeus muuttuu vakioksi. Vakionopeuksisen fluidin ja pinnan väliin jäävää aluetta, jolla nopeuden arvo muuttuu, sanotaan nopeuden rajakerrokseksi /6/. Rajakerroksen yläpuolella virtaus on vapaata.

Samalla tavalla voidaan määrittää rajakerros lämpötilalle, kun fluidin ja pinnan välillä vallitsee lämpötilaero. Fluidin lämpötila kappaleen pinnalla on sama kuin kappaleen lämpötila. Rajakerroksessa lämpötila alenee, kunnes rajakerroksen yläpuolella se tasoittuu vakioksi. /6/



Kuva 14. Vasemmalla nopeuden ja oikealla lämpötilan rajakerroksen kuvaaja. /6/

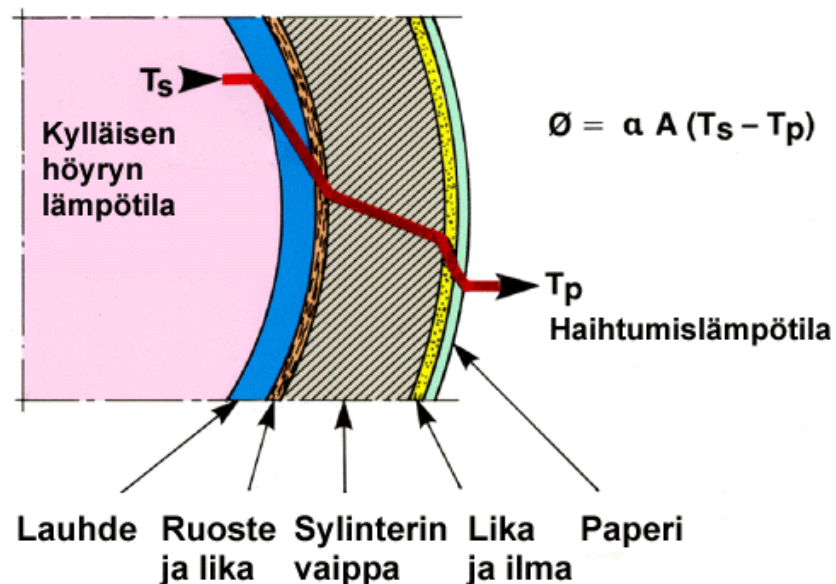
Konvektion lämmönsiirtoon vaikuttaa merkittävästi fluidin virtausmuoto rajakerroksessa. Mahdolliset virtausmuodot on esitetty kuvassa 15. Pienillä nopeuksilla väliaineeseen kohdistuu vain pieni virtausvastus ja se virtaa laminaarisesti. Tällöin virtaus on säännöllistä ja fluidin partikkelit noudattelevat samansuuntaisia virtausviivoja. Nopeuden tai virtausvastuksen kasvaessa virtaus muuttuu turbulenttiseksi. /6/ Virtausvastusta voi kasvattaa muun muassa pinnan epätasaisuudet. Turbulenttinen virtaus on hyvin epäsäännöllistä ja rajakerrokseen muodostuu pyörteitä. Pyörteisyys tekee rajakerroksesta paksumman kuin laminaarisessa virtauksessa, mutta lämmönsiirto on kuitenkin tehokkaampaa väliaineen voimakkaan sekoittumisen vuoksi. Tehokkainta lämmönsiirto on virtauksen ollessa täysin turbulenttinen. Laminaarisen ja turbulenttisen virtausmuodon väliin jää siirtymäalue, jonka aikana pyörteily alkaa kehittyä.



Kuva 15. Virtauksen rajakerroksen kehittyminen ja eri virtausalueet. /6/

4.4 Lämmönsiirto höyrystä rainaan

Sylinteriin johdettavasta höyrystä lämpö siirtyy paperirainaan. Tässä välissä on kuitenkin useita lämpövastuksia aiheuttamassa lämpöhäviöitä. Nämä vastukset muodostuvat kuvan 16 mukaisesti lauhteesta, epäpuhtauksista sylinterin sisä- ja ulkopinnoilla, sylinterivaipasta sekä sylinterin ja rainan välisestä rajapinnasta. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan lämmönsiirtoa kunkin lämpövastuksen yli.



Kuva 16. Lämmön siirtyminen höyrystä paperiin. /12/

Lämmönsiirtoa kunkin lämpövastuksen yli ajaa lämpötilaero. Jäljempänä esitetyissä kaavoissa käytetään sylinterin ja paperin pintalämpötiloja. Näiden lämpötilojen käyttö on kuitenkin osittain pulmallisia, sillä muun muassa sylinterin lämpötilat vaihtelevat sen mukaan, onko sylinterin pinta kosketuksissa paperiin vai paljas. Lisäksi näitä lämpötiloja on hankala mitata. Paperin lämpötilaa tarkasteltaessa tulee vastaan kysymys, miltä paksuudelta lämpötila otetaan.

4.4.1 Lauhdekerroksen lämmönsiirto

Siirtyäkseen sylinterin seinämään lämmön on ensin kuljettava lauhdekerroksen läpi. Veden muodostama vastus rajoittaa lämpövirtaa ja sylinterin pintaan siirtyvä lämpömäärä on pienempi kuin lauhdekerrokseen siirtynyt. Tarkkaan ottaen ensimmäinen lämpövastus aiheutuu höyryn sisältämästä reagoimattomasta kaasusta, joka yleensä on ilmaa. Höyry sisältää ilmaa noin prosentin verran. Ilmasta aiheutuvaa vastusta ei kuitenkaan oteta huomioon sen vähäisen vaikutuksen vuoksi. /15/

Lämpövirta höyrystä sylinterin sisäpintaan q_{in} voidaan esittää kaavalla 10. Kaavan mukaisesti siirtyvä lämpövirta on riippuvainen höyryn lämpötilasta T_s , sylinterin sisäpinnan lämpötilasta T_{cl} sekä sylinterin ulkopinta-alasta A_{cy} . Näiden lisäksi lauhteen lämmönsiirtokerroin α_s vaikuttaa siirtyvään lämpöön.

$$q_{in} = \alpha_s (T_s - T_{cl}) A_{cy} \quad (10)$$

Kaavassa 1 käytetään pinta-alana sylinterin ulkopinta-alaa, vaikka tarkkaan ottaen on kyse sisäpinnasta. Tästä aiheutuva virhe on kuitenkin pieni (alle 3%), koska sylinterivaipan paksuus on pieni verrattuna sylinterin halkaisijaan.

Lauhteen lämmönsiirtokerroimeen puolestaan vaikuttaa lauhdekerroksen paksuus δ_{cond} ja koneen nopeus v . Lämmönsiirtovastus voidaan laskea kaavalla 11. Kaava ottaa huomioon myös lauhteen käyttäytymisen sylinterissä eli sillä voidaan laskea lauhteen lämmönsiirtokerroin lammikko-, ryöppy- sekä rengastilanteessa.

$$\left(\frac{\alpha_s}{W/m^2 \cdot ^\circ C} \right) = \frac{685}{\left(\frac{\delta_{cond}}{mm} \right)} + \frac{10^6}{275 + 0,675 \left(\frac{v}{m/s} \right)^{2,79} + 0,0486 \left(\frac{\delta_{cond}}{mm} \right) \left(\frac{v}{m/s} \right)^{3,39}} \quad (11)$$

Kaavalla 4 saadaan lauhteen lämmönsiirtokerroin sylinterille, jonka halkaisija on 1,5 metriä. Sylintereille, joilla on eri halkaisija, kaavan 11 nopeustermiä korjataan kaavan 12 avulla, jossa v_d on d -halkaisijaisen sylinterin nopeus.

$$v = v_d \frac{1500mm}{d} \quad (12)$$

4.4.2 Lämmönjohtuminen sylinterivaipan läpi

Sylinterin läpi lämpö siirtyy johtumalla. Tätä kuvataan kaavan 13 avulla. Suureeseen vaikuttaa sylinterin lämmönsiirtokertoimen α_c lisäksi sylinterin sisä- ja ulkopintojen lämpötilat T_{c1} , T_{c2} sekä lämmönsiirtopinta-ala. Pinta-alana käytetään sylinterin ulkopintaa.

$$q_{shell} = \alpha_c (T_{c1} - T_{c2}) A_{cy} \quad (13)$$

Sylinterivaipan lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavat vaipan materiaali ja paksuus δ_c . Vaipan materiaalin perusteella määräytyy sen lämmönjohtavuus λ_c . Sylinterit valmistetaan valuraudasta. Monesti joudutaan tekemään kompromissi valuraudan lämmönjohtavuuden ja kestävyuden välillä, sillä kestävämpi valurauta johtaa huonommin lämpöä. Sylinterin lämmönsiirtokerroin saadaan kaavalla 14.

$$\alpha_c = \frac{\lambda_c}{\delta_c} \quad (14)$$

Sylinterivaipan läpi siirtyvää lämpöä laskettaessa oletetaan sylinterin pintojen lämpötilajakautumien olevan tasaisia. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, vaan sylinterin ulkopinnan lämpötila vaihtelee ± 1 °C yhden kierroksen aikana. Lämpövaihtelua esiintyy, koska yhdessä kohtaa sylinteri on kosketuksissa viileän, märän paperin kanssa ja toisessa kohdassa se irtoaa kuumasta, kuivasta paperista. Toisaalla sylinterin ulkopinta taas on paljaana. Sisäpintaan lämpötilan vaihteluita aiheuttaa lauhde ja sen käyttäytyminen. Lauhdekerros ei ole aivan tasainen johtuen maan vetovoimasta, joten sen läpi siirtyvä lämpö ei ole vakio sylinterin kehällä. Verrattuna sylinterin pintalämpötiloihin lämpötilan muutos yhden kierroksen aikana on kuitenkin niin pieni, sisäpinnalla vielä ulkopinnan vaihteluakin pienempi, että pintojen lämpötiloja voidaan pitää vakioina. /15/

4.4.3 Lämmönsiirto sylinterin ulkopinnasta paperin sisäpintaan

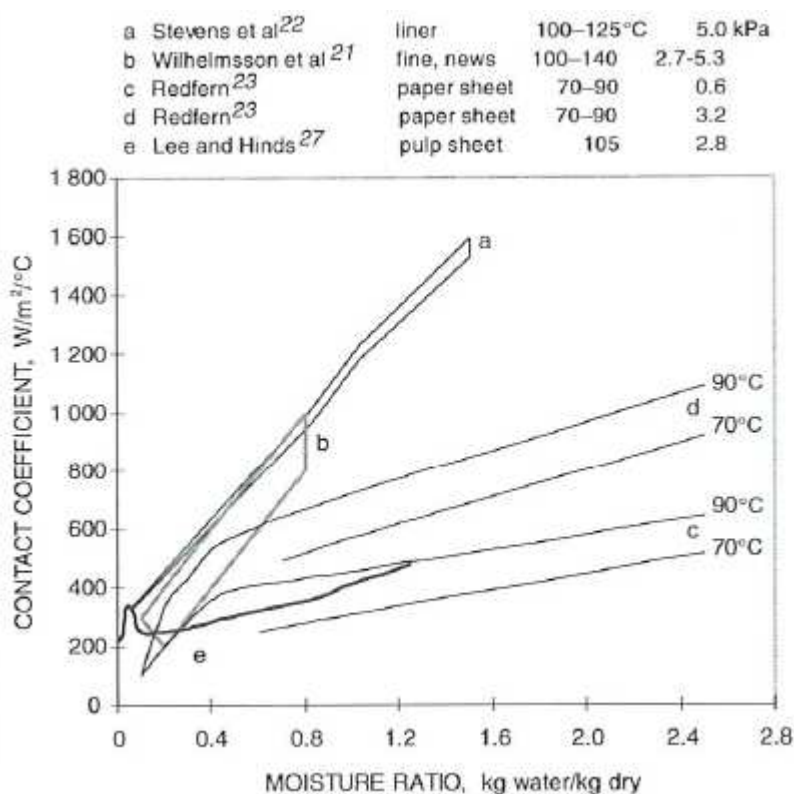
Sylinterin ulkopinnasta paperiin siirtyvää lämpöä q_p esittää kaava 15. Merkittävin tekijä tässä lämmönsiirrossa on sylinterin ja paperin välinen kosketus ja siitä muodostuva lämmönsiirtokerroin α_k . Lisäksi siirtyvään lämpövirtaan vaikuttavat sylinterin ulkopinnan ja paperin lämpötilat T_{c2} , T_p . Koska paperi ei peitä sylinteriä kokonaan, on siirtyvän lämmön laskemisessa otettu huomioon myös paperin kietoutumiskulma φ_p , jonka avulla saadaan todellinen kosketuspinta-ala.

$$q_p = \alpha_k (T_{c2} - T_p) A_{cy} \varphi_p \quad (15)$$

Lämmönsiirtokertoimeen sylinteristä paperiin vaikuttavat paperin kosteus ja lämmönjohtavuus sekä kontaktiin vaikuttavat tekijät, joita ovat muun muassa

kuivatusviiran kireys, ilma tai höyry sylinterin ja paperin välissä, epäpuhtaudet sylinterin pinnassa.

Kuvassa 17 on esitetty sylinterin ja paperin välinen kontaktilämmönsiirtokerroin. Kuvaajissa on otettu huomioon paperilaji, kuuman pinnan lämpötila sekä viiran kireyden aiheuttama puristuskuorma. Kuvassa ylimmäksi kohoavalla käyrällä a on suurin puristusaine ja alimmaksi jäävällä käyrällä c pienin. Voidaan siis todeta, että paperiin kohdistuva paine kasvattaa kontaktikerrointa, kun taas paperin kosteuden aleneminen pienentää sitä.



Kuva 17. Kontaktikerroin paperin kosteuden funktiona. Mittaukset suoritettu staattisella kuumalla levyllä tai hitaasti pyörivällä laboratoriokuivatussylinterillä. /4/

Paineen suurentava vaikutus kontaktikerroimeen voidaan selittää kosketuspinta-alan avulla. Koska paperin rakenne on huokoinen ja epätasainen, se ei välttämättä kosketa sylinterin pintaa joka kohdasta. Mitä suuremmalla kuormalla paperia painetaan sylinterin pintaa vasten, sitä tiiviimmin paperi painautuu sylinterin pintaan ja sitä suuremmalta alalta ne koskettavat toisiaan. Tällöin myös tehollinen lämmönsiirtopinta-ala kasvaa. Paperin kosteuden vaikutus puolestaan selittyy paperin lämmönjohtavuudella. Mitä kosteampi paperi on sitä paremmin se johtaa lämpöä.

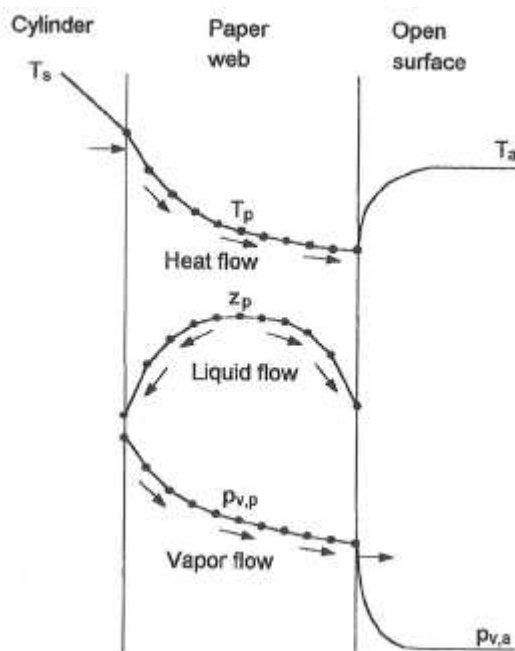
Viiran kireyden nostaminen parantaa lämmönsiirtoa parantamalla sylinterin ja rainan välistä kontaktia. Kireyden noustessa yli arvon 4 kN/m lämmönsiirto paranee edelleen, mutta huomattavasti hitaammin.

Sylinteri-paperi-kontaktissa termisesti parempi vastinpinta kuumalle sylinterille olisi vesi. Kuitenkin osa kuiduista on aluksi suorassa kontaktissa sylinterin kanssa, kunnes puristuksen vaikutuksesta rainan sisäosista tulee vettä kosketuspintaan. Pinnassa oleva vapaa vesi höyrystyy nopeasti ja kuitujen lämpötila alkaa nousta. /15/ Kuivatuksen edetessä lämmönsiirtokerroin sylinterin ja rainan välillä huononeekin arvosta 1500 W/m²K arvoon 500 W/m²K.

Pyörivät sylinterit ja raina kuljettavat mukanaan ilmakerrosta. Tämä kerros on sitä paksumpi, mitä suurempi ajonopeus on. Ilmakerros jää rainan ja sylinterin väliin sulkeutuvassa nipissä. Tämä ilma voi koitua ongelmaksi etenkin kuivatusosan määrässä päässä, kun paperin huokoset ovat vielä täynnä vettä eikä ilma pääse poistumaan rainan läpi. Jos ilma jää rainaan lähelle kuumaa pintaa, tehokkain rainan sisäinen lämmönsiirtoilmiö, heat-pipe-efekti, hidastuu huomattavasti. /15/ Tätä heat-pipe-ilmiötä käsitellään tarkemmin yhtäaikaisen lämmön- ja massansiirron yhteydessä.

4.5 Lämmön- ja massansiirto rainassa

Kuva 18 esittää lämmön ja massan kulkeutumista rainan sisällä. Sylinterin pinnasta lämpö siirtyy paperiin ja paperin läpi ympäröivään ilmaan. Vettä siirtyy rainan sisäosista molemmille pinnoille puristuksen vaikutuksesta. Vesi höyrystyy lähellä kuumaa sylinterin pintaa ja tunkeutuu rainan sisäosiin ja edelleen ympäröivään ilmatilaan. /4/



Kuva 18. Lämmön- ja aineensiirto paperissa sylinterikuivatuksen aikana. /4/

Rainan huokosissa vaikuttavat kapillaarivoimat ajavat lisää vettä höyrystyneen tilalle kohti kuumaa sylinterin pintaa tiettyyn rajaan asti. Tämä raja saavutetaan, kun vesifaasi ei enää ole jatkuva vaan jakautuu osiin rainan sisällä. Tämän jälkeen höyrystymisrintama siirtyy rainan sisään. /3, 4/ Seuraavaksi käsitellään tarkemmin lämmön- ja massansiirron mekanismeja rainassa.

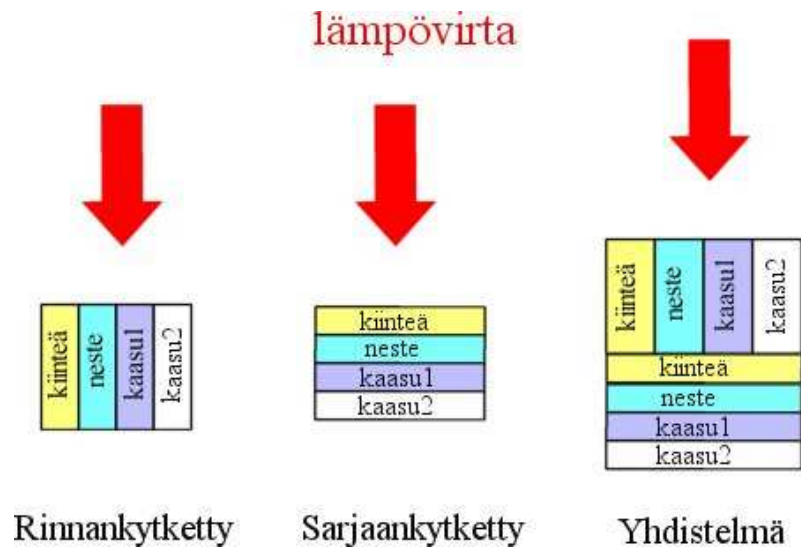
4.5.1 Lämmönsiirto

Raina koostuu kuituverkostosta, jonka huokokset voivat sisältää vettä, vesihöyryä tai ilmaa. Rakenteen huokoisuuden ja useamman faasin läsnäolon takia rainan sisällä lämmönsiirtoa tapahtuu useilla menetelmillä. Lämpö voi siirtyä rainassa johtumalla, konvektiolla sekä säteilemällä. Säteily kuitenkin on merkityksetöntä sylinterikuivatuksessa vallitsevilla lämpötiloilla.

Lämmönjohtumista rainassa voidaan kuvata mallilla, jossa rainan kokonaislämmönjohtavuus muodostuu eri faasien rinnan- tai sarjaankytketyistä lämmönjohtavuuksista sekä niiden yhdistelmästä. /3/ Rinnankytketyissä mallissa faasien muodostamat tilavuudet ovat yhdensuuntaisia ja samansuuntaisia lämpövirran kanssa, kun taas sarjaankytketyn mallin faasitilavuudet ovat kohtisuorassa lämpövirtaa vastaan. Yhdistelmämalli koostuu näiden yhdistelmästä.

Kuvassa 19 on esitetty yksinkertaistetut mallit rainan lämmönjohtumisen muodostumisesta. Mallissa esitetty raina koostuu kiinteästä osasta (s), sitä ympäröivästä

vesifaasista (w) sekä kaasutäytteisistä huokosista (g). Kaasufaasille on malliin varattu kaksi muotoa, sillä ne kuljettavat lämpöä eri tavoilla.



Kuva 19. Lämmönjohtumismallit.

Jokaisella faasilla on oma tilavuusosansa (ε_s , ε_w , ε_g) sekä lämmönjohtavuutensa (λ_s , λ_w , λ_g , λ_d). Kaasutäytteisillä huokosilla on kaksi lämmönjohtavuuserrointa, koska niissä lämpö siirtyy kahdella tavalla: kaasua pitkin johtumalla sekä höyrystymis-lauhtumis-ilmiön avulla. Jälkimmäinen menetelmä ei varsinaisesti ole johtumista vaan konvektiota, mutta mallissa sen lämmönsiirtokyky ilmaistaan lämmönjohtavuudella.

Huokokset, joissa kuitujen kyllästymispiste on ylitetty, lämmönsiirtoa tapahtuu sekä johtumalla kaasufaasia pitkin että höyrystymisen ja lauhtumisen kautta (λ_g ja λ_d). Huokokset, joiden kuidut jäävät kyllästymispisteen alapuolelle, johtavat lämpöä ainoastaan kaasua pitkin (vain λ_g). /3/

Jos malli koostuu pelkästään rinnankytketyistä faaseista, rainan lämmönjohtavuus λ_{par} saadaan kaavalla 16.

$$\lambda_{par} = \lambda_s \varepsilon_s + \lambda_w \varepsilon_w + b(\lambda_g + \lambda_d) \varepsilon_g + (1-b) \lambda_g \varepsilon_g \quad (16)$$

Sarjaankytkettyjen faasien lämmönjohtavuus λ_{ser} lasketaan puolestaan kaavalla 17.

$$\lambda_{ser} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_w}{\lambda_w} + \frac{b \varepsilon_s}{\lambda_g + \lambda_d} + \frac{(1-b) \varepsilon_g}{\lambda_g}} \quad (17)$$

Kaavoissa 16 ja 17 käytetty parametri b on kosteuspitoisuuden funktio. Tietyllä kosteuspitoisuudella parametrin arvo on lähellä yhtä. Kosteuspitoisuuden pienentyessä parametrin arvo pienenee lähelle nollaa, jolloin höyrystymis-lauhtumis-ilmiö pysähtyy kaasutäytteisissä huokosissa ja lämpö johtuu niissä enää vain kaasua pitkin.

Tehollinen lämmönjohtavuus λ_{eff} muodostuu kahden edellisen kaavan avulla seuraavasti:

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{\frac{1-a}{\lambda_{par}} + \frac{a}{\lambda_{ser}}} \quad (18)$$

Tehollista lämmönjohtavuuden kaavassa parametri a määrittää sarjaankytkettyjen faasien osuutta kokonaisjohtavuuteen ja parametri $1-a$ rinnankytkettyjen faasien osuutta. /Heikkilä1/ Parametrin a ollessa pieni johtuminen tapahtuu pääasiassa rinnankytkettyjä faaseja pitkin. a :n kasvaessa lämpö alkaa johtua sarjaankytkettyjä faaseja pitkin. Tällöin lämmönsiirrossa tulee vastaan useita rajapintoja ja sen myötä lämpöhäviöitä.

Edellä käsitelty malli antaa hyvän käsityksen lämmönjohtumisesta huokoisessa, määrässä rainassa. Mallin käyttökelpoisuus käytännön laskelmissa on kuitenkin vaikeaa, sillä käytettyjen parametrien a ja b määrittämiseksi tarvittaisiin tarkkaa kokeellista tietoa rainan rakenteesta ja faasien ominaisuuksista. /3/

4.5.2 Massansiirto

Kuivatuksen aikana paperirainassa esiintyy useammanlaista massansiirtoa. Nämä ovat kapillaarivirtaus, viskoottinen virtaus sekä diffuusio. Kun lämmönsiirrossa ajavana voimana toimii lämpötilagradientti, massansiirtomenetelmiä vauhdittavat konsentraatiogradientti sekä painegradientti.

Kuivatuksen alussa ensimmäinen vaikuttava massansiirtotapa on viskoottinen virtaus. Tämä virtaustyyppi on tavallinen paine-eron aiheuttama fluidivirtaus. Kuivatusviiran rainaan aiheuttama paine-ero saa vapaan veden liikkeelle rainan sisältä pinnoille päin. Sylinterin pinnalle kulkeutuva vesi höyrystyy ja höyry kulkeutuu rainan läpi ympäristöön.

Seuraavaksi vettä rupeaa liikuttamaan kapillaarivirtaus. Rainan sylinteriä vasten olevalta pinnalta on haihtunut vettä eli veden konsentraatio on siellä matalampi kuin rainan sisäosissa. Konsentraatiogradientti saa aikaan rainan ohuissa kapillaarihuokosissa kapillaaripaineen, joka ”imee” kosteutta alempaan konsentraatioon. Kapillaarivirtaus jatkaa veden tuontia sylinterin lähelle, kunnes rainan kosteuspitoisuus alittaa kuitujen kyllästyspisteen. Tämän rajan jälkeen vesifaasi ei enää ole jatkuva vaan pirstoutuu osiin rainan sisällä. /3/

Kuitujen kyllästyspisteen saavuttamisen jälkeen kaikki rainassa jäljellä oleva vesi on absorboituneena kuitujen seinämiin. Absorboitunutkin vesi pystyy liikkumaan rainassa. Massansiirtomenetelmänä toimii tällöin diffuusio ja ajavana voimana on rainan

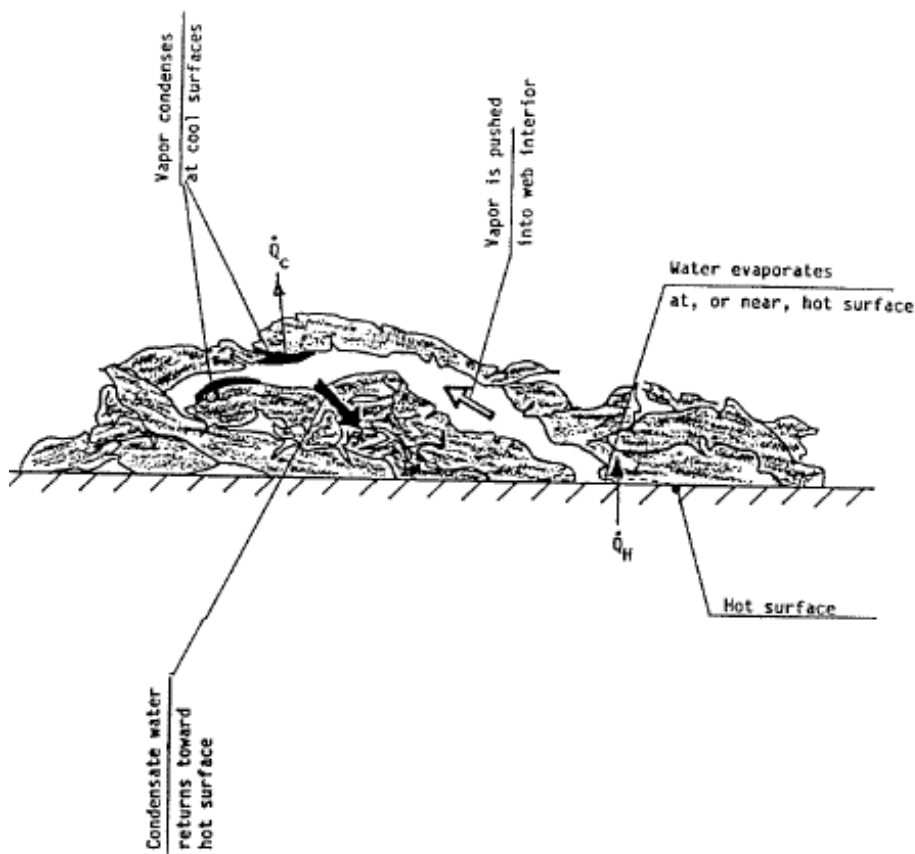
kosteusgradientti. Ei-vapaan veden diffuusio on kuitenkin heikompi kosteuden kuljettaja kuin vapaan veden kapillaarinen virtaus. /4/

Kaasumaisessa olomuodossa olevan veden liikkuminen tapahtuu diffuusiolla tai laminaarisena virtauksena. Laminaarista virtausta ilmenee, kun rainassa olevan höyryn ja ympäröivän ilman välillä vallitsee kokonaispaine-ero. Tällainen tapaus on kyseessä esimerkiksi silloin, kun höyrystymisrintama on rainan sisällä. Diffuusiota sen sijaan tapahtuu koko ajan, myös silloin, kun rainan sisältämän kaasun paine on sama kuin ympäröivän ilman. /3, 15/

4.5.3 Yhtäaikainen lämmön- ja massansiirto

Paperirainan kuivuessa veden höyrystymistä ja tiivistymistä tapahtuu koko ajan. Veden höyrystymislämpö on suuri, joten se myös luovuttaa paljon lämpöä lauhtuessaan. Heat-pipe on rainassa esiintyvä lämmön- ja massansiirtoilmiö, jossa lämpö siirtyy haihtumis-lauhtumis-prosesseilla.

Rainan huokokset muodostavat kuvan 20 kaltaisia lämmönsiirtokanavia. Kanavan alkupää on lähellä kuumaa sylinterin pintaa, jossa vettä höyrystyy. Lämpöenergian sisältävä höyry kulkeutuu kanavaa pitkin rainan sisäosiin ja lauhtuu viileämpien alueiden vaikutuksesta. Lauhtuessaan höyry luovuttaa lämpöä rainaan ja lauhtunut vesi palautuu lähelle kuumaa pintaa höyrystyäkseen uudelleen.



Kuva 20. Heat-pipe-kanavan toiminta rainan sisällä. /15/

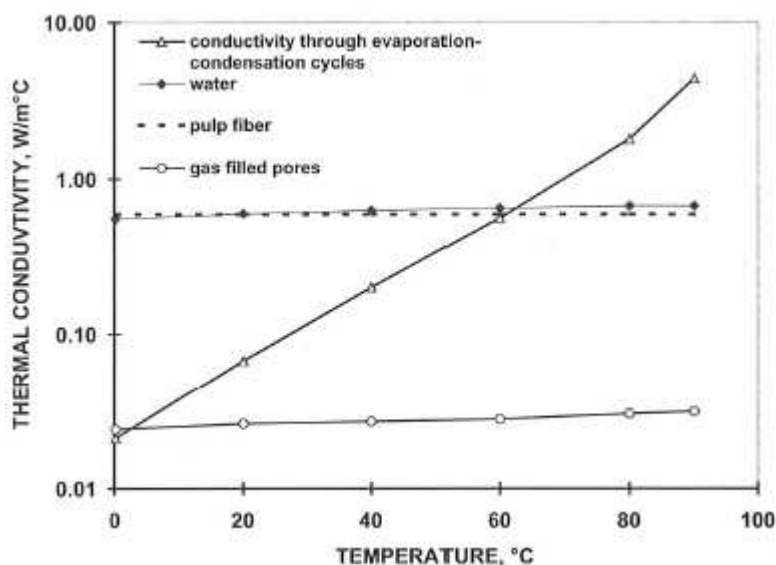
Kanavia pitkin kulkeva höyry voi kuljettaa lämpöä pitkiäkin matkoja sekä rainan paksuus- että tasosuunnassa. Jos rainan ja sylinterin väliin jää ilmaa, se ajautuu kanavan viileään päähän, jolloin höyry ei enää pääse kanavan päähän asti. Näin kanavan tehollinen lauhdutuspinna-ala pienenee ja lämmönsiirto huononee. /15/

Kappaleessa 4.5.1 käsiteltiin lämmönsiirtoa rainassa ja esitettiin rainan kokonaislämmönjohtavuus. Kokonaislämmönjohtavuutta määriteltäessä esitettiin myös heat-pipe-ilmion lämmönsiirto-ominaisuus johtumisena λ_d . Tämä voidaan laskea kaavassa 19 esiintyvällä Stephanin diffuusioyhtälöllä. Laskemiseen tarvitaan vallitsevan paineen p_{tot} , lämpötilan T ja kaasuvakion R_v lisäksi vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa D_v , höyrystymisen latenttilämpö Δh_v , vesihöyryn osapaine p_v sekä osapaineen muutos.

$$\lambda_d = \frac{D_v \Delta h_v}{R_v T} \frac{p_{tot}}{p_{tot} - p_v} \frac{dp_v}{dy} \quad (19)$$

Vertailtaessa rainan faasien lämmönsiirtokykyjä myös heat-pipe-ilmio voidaan lukea lämmönjohtimeksi muiden faasien ohessa. Eikä kyseisen ilmiön osallistuminen rainan sisäiseen lämmönsiirtoon suinkaan ole merkityksetön. Kuvasta 21 nähdään, että lämpötilan kasvaessa heat-pipe-ilmion lämmönjohtavuus kasvaa jopa

kymmenkertaiseksi verrattuna kuitu- ja vesifaasien lämmönjohtavuuteen. Kuvan perusteella voidaan myös todeta kaasutäytteisten huokosten johtavan huonosti lämpöä.



Kuva 21. Eri faasien lämmönjohtavuus. (Kuidun lämmönjohtavuus on 0,60 W/m°C) /3/

4.6 Rainan lähiympäristön vaikutus

Rainan lähiympäristöllä on suuri vaikutus kuivatustapahtumaan. Paperiraina luovuttaa haihdutetun kosteuden ympäröivään ilmatilaan. Tämän takia ympäröivän ilman ominaisuudet vaikuttavat kuivatukseen. Jotta ymmärrettäisiin veden siirtyminen paperista ilmaan ja siihen vaikuttavat tekijät, tarkastellaan seuraavaksi kostean ilman ominaisuuksia.

4.6.1 Kosteaa ilmaa

Ilman kosteus ilmoitetaan yksikössä kg vettä/kg kuivaa ilmaa. Ilma voi sisältää vettä sen kaikissa olomuodoissa eli kiinteänä, nesteinä ja kaasuna. Paperin kuivatusta ajatellen ja sen olosuhteet huomioon ottaen jään osuus voidaan jättää pois. Oletetaan myös että ilma ei sisällä vettä nesteinä. Tällöin ilmankosteus x_v muodostuu ainoastaan vesihöyrystä ja se voidaan laskea kaavalla 20. Kaavassa kaasuvakioiden suhde R_a/R_v saa arvon 0,62197 kg höyryä/kg kuivaa ilmaa, p_v on vesihöyryn osapaine ilmassa ja p ilman kokonaispaine.

$$x_v = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p - p_v} \quad (20)$$

Ilma voi tietyssä lämpötilassa sisältää vain tietyn määrän vettä. Jos vesihöyryn määrä ilmassa ylittää tämän rajan, höyry alkaa tiivistyä taas vedeksi. Paperikoneen kuivatusosalla veden tiivistyminen ei ole suotavaa, sillä se kerääntyy huuvan rakenteisiin ja tippuu paperiradan päälle. Ilman sisältämän veden suurimman määrän laskemisessa käytetään vesihöyryn kyllästymispainetta.

Kiehumispistettä matalammalla lämpötilalla on tietyssä paineessa vesihöyryn osapaine, joka on vesihöyryn kyllästymispaine. Tämä tarkoittaa sitä, että ilman sisältämän vesihöyryn osapaine tietyssä lämpötilassa ei voi olla suurempi kuin kyllästymispaine p'_v . Tällä perusteella voidaan määrittää ilman sisältämän vesihöyryn suurin mahdollinen määrä tietyssä lämpötilassa x'_v . Kyseinen arvo voidaan laskea kaavalla 21.

$$x'_v = \frac{R_a}{R_v} \frac{p'_v}{p - p'_v} \quad (21)$$

Kun ilma sisältää tämän maksimimäärän vesihöyryä, se muuttuu kylläiseksi. Kyllästymisen rajaa sanotaan kastepisteeksi. Kylläisen ilman suhteellinen kosteus on 100 %.

Koska ilman sisältämän vesihöyryn maksimimäärä riippuu lämpötilasta, lämpötilan aleneminen aiheuttaa kondensoitumista. Tästä johtuen alemmassa lämpötilassa olevat huuvan rakenteet aiheuttavat vesihöyryn kondensoitumista.

4.6.2 Massan siirtyminen rainasta ympäristöön

Rainasta ympäristöön siirtyvän höyryn määrä \dot{m}_{ev} voidaan laskea kaavalla 22. Massavirtaan vaikuttavat siirtokerroin α , kuivan ilman ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetit c_{da} , c_v sekä ilman kosteus rainan pinnalla x_{p0} sekä ympäristössä x_a .

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{\alpha}{c_{da} + x_{p0}c_v} (x_{p0} - x_a) \quad (22)$$

Paperista poistuva kosteus siirtyy ympäröivän huuvan ilmaan. Sylintereiden väliin muodostuu ilmataskuja sylintereiden asettelun ja kuivatusviiran kulun takia. Näissä ilmataskuissa ilman kosteus on suurempi kuin muualla huuvasa. Kosteuden vähentämiseksi taskuihin on järjestetty tuuletus, jotta haihtumisnopeus ei laskisi niissä.

Tuuletusta tarvitaan erityisesti sylinteritaskuissa, mutta myös koko huuvasa. Kaikki kuivatusosalla höyrystyvä vesi siirtyy rainasta huuvaan. Huuvasta täytyy siis koko ajan poistaa vesihöyryä ilmastoinnin avulla, jotta vesi ei tiivistyisi rakenteisiin.

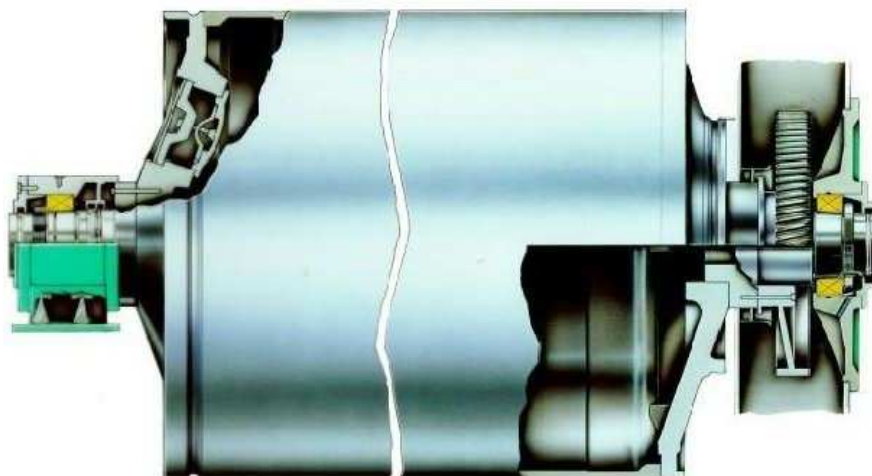
Huuvasta poistettavan ilman kosteuspitoisuus on välillä 0,12–0,18 kg H₂O/kg k.i. (kilogrammaa vettä/kilogrammaa kuivaa ilmaa). Huuvaan tulevan korvausilman kosteuspitoisuus on noin kymmenesosa poistoilman kosteuspitoisuudesta eli luokkaa 0,02 kg H₂O/kg k.i. Riippuen huuvan tiivyydestä yhden vesikilogramman poistamiseen huuvan ilmasta tarvitaan 6-10 kg k.i./s. /31/

Esimerkiksi keskituottoisen paperikoneen kuivatusosalla höyrystyy 35 tonnia vettä tunnissa. /Kuhasalo/ Tämän vesimäärän poistamiseksi huuvasta tarvitaan vajaat 300 tonnia korvausilmaa. Kuutioiksi muutettuna korvausilman määrä on 230 tuhatta kuutiota. Volyyminä tämä määrä vastaisi kuutiota, jonka sivu on reilut 60 metriä. Eli veden poistamiseksi tarvittavan tuuletusilman määrä on huomattava.

5 NYKYKONSTRUKTIOT JA NIIDEN ANALYYSI

5.1 Yleisesti käytössä oleva kuivatussylinteri

Nykyisin paperikoneilla käytettävä kuivatussylinteri on perusrakenteeltaan varsin yksinkertainen. Sylinteri koostuu valurautaisesta vaipasta sekä valurautaisista päädyistä. Näiden lisäksi kuvassa 22 on nähtävissä muut tarvittavat komponentit kuten laakerit ja hammaspyörät. Halkaisijaltaan suurin osa sylintereistä on 1,8 metriä ja pituutta niillä voi olla yli kymmenen metriä.



Kuva 22. Kuivatussylinterin rakenne. /12/

Kuivatussylinterit valmistetaan valamalla yleensä joko suomugrafiittivaluraudasta tai pallografiittivaluraudasta. Näistä pallografiittivalurauta on lujempaa, mutta lujuuden myötä menetetään lämmönsiirtotehoa, sillä pallografiittivaluraudan lämmönjohtavuus on huonompi. Lisäksi pallografiittivalurauta on vaikeammin valettavissa. /27/

Sylintereissä voidaan käyttää myös pinnoitteita. Erityisesti kuivatusosan alkupään sylintereillä pinnoitteesta on hyötyä, sillä se vähentää märän rainan tarttumista sylinterin pintaan kiinni.

Kuivatussylinterit lämmitetään paineistetulla höyryllä, joten niiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon paineestialainsäädäntö. Kulloinkin käytettävä lainsäädäntö riippuu sylinterin kohdemaasta. Laeissa on annettu säädökset muun muassa sylinterin vaipan vahvuudelle tietyllä paineella. Vaipan paksuus vaihtelee tyypillisesti välillä 25–38 mm.

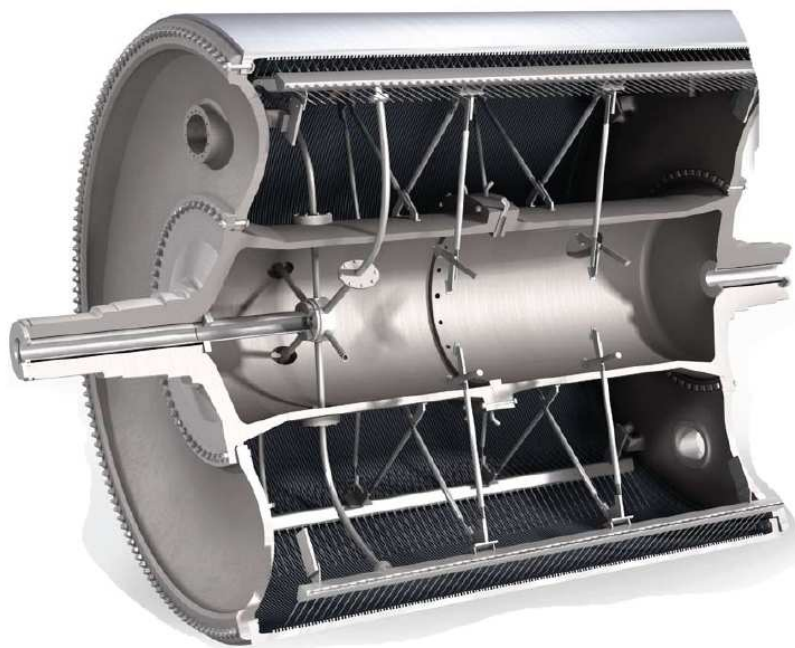
Suurin yksittäinen haitta sylinterikuivatuksessa on menetelmän tehottomuus koneuusintojen yhteydessä. Kuitenkaan paperikonelinjaa suunniteltaessa ei ole mitään järkeä tehdä kuivatusosasta ylimitoitettua suunniteltuun nopeuteen nähden. Uusintojen yhteydessä tapahtuvan nopeuden nousun myötä perinteisen sylinterikuivatusosan kuivatuskapasiteetti jää puutteelliseksi. Kuivatuskapasiteetin lisäämiseksi sylinterimäärää kasvattamatta kuivatusosille on kehitelty muita kuivatusta tehostavia menetelmiä, kuten päällepuhallus.

Koska muodostuva raina ei ole yhtä leveä kuin sylinteri, lämmönsiirtyminen on erilaista rainan reuna-alueilla. Sylinterin päissä ei ole rainasta muodostuvaa lämmönsiirtovastusta, joten lämpöä siirtyy sylinterivaipan läpi enemmän reunoilla. Tämä kuivattaa rainan reunoja joskus jopa liikaa, mistä taas aiheutuu kosteusprofiilin vaihteluita ja epätasalaatuista paperia.

Perinteisen sylinterikuivatuksen eduiksi voidaan laskea menetelmän tuttuus. Vuosien saatossa kertynyt ammattitaito on vahva ja sen myötä kuivatusosan käyttäytyminen ja säätäminen hallitaan hyvin. Sylinterikuivatus on myös käyttökustannuksiltaan edullinen kuivatusmenetelmä, sillä lämmittämiseen käytettävä höyry voidaan tuottaa osittain paperin- ja sellunvalmistuksen sivutuotteista. Paperitehtaalla höyryn tuottamiseen käytetään mm. puun kuorta ja muuta puujätettä, kierrätyspaperin puhdistuksen sivutuotteita, paperi- ja kartonkijätettä sekä sellun keitossa syntyvää mustalipeää /12/.

5.2 Jenkkisylinteri

Toinen yleisesti käytössä oleva kuivatussylinterityyppi on kuvassa 23 oleva jenkkisylinteri. Tätä sylinterityyppiä käytetään pääasiassa kartongin ja pehmopapereiden valmistuksessa. Jenkkisylinteri on halkaisijaltaan suuri, yleensä 4 – 7 m, ja sisäpuolelta radiaalisesti uritettu. Höyry johdetaan sisään toisesta päästä ja lauhde kerätään pillistöillä urista.



Kuva 23. Jenkkisylinterin rakenne. /17/

Lauhteen poistamiseksi uritetusta sylinteristä tarvitaan kuvassa 24 näkyviä pillistöjä. Nämä lauhteenpoistoelimet koostuvat pilleistä sekä lähellä sylinterin pintaa olevasta kokoojaputkesta. Pillejä ei ole jokaisessa urassa vaan niiden määrä vaihtelee. Pillien välimatka vaihtelee joka toisesta joka neljanteen uraan. Lauhde imetään pilleillä kokoojaputkeen, josta se matkaa nousuputkia pitkin sylinterin akselilla olevaan lauhteenkeräysputkeen. /11/



Kuva 24. Uritetun jenkkisylinterin tyypillinen imupillistö. /17/

Jenkkisylinterin toimintaperiaate on erilainen kuin tavallisen kuivatussylinterin. Jenkkisylinteriä käytettäessä päätavoite on kiillon saaminen rainan pintaan. Raina painetaan jenkkisylinterin pintaan kumipinnoitetulla vastatelalla. Raina tarttuu sylinterin

korkeakiiltoiseen pintaan kiinni ja irtoaa vasta, kun sen kuiva-ainepitoisuus on riittävän suuri, noin 68 - 70 %. Sylinterin pinta ei saa olla liian kuuma, koska tällöin rainassa oleva vesi höyrystyy ja jää rainan ja sylinterin väliin, jolloin raina ei tartu koko pinnaltaan sylinteriin kiinni. Tästä aiheutuu kiillottumattomia kohtia rainaan. /5/

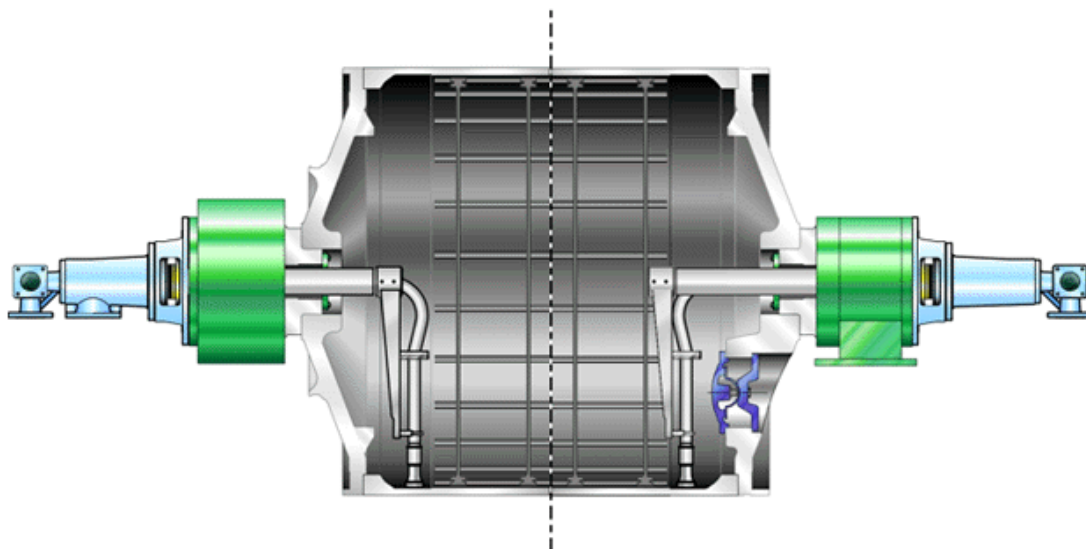
5.3 Lämmönsiirtoa tehostavat menetelmät

Tässä luvussa käsitellään sylinterikuivatusta tehostavia menetelmiä, jotka ovat jo yleisesti käytössä tuotantokoneilla. Menetelmistä ovat tässä työssä kiinnostavia vain ne, jotka vaikuttavat lämmönsiirtoon sylinterin sisässä. Tästä syystä muun muassa päällepuhalluslaitteet ja muut ulkopuolisesti vaikuttavat menetelmät on jätetty huomioimatta.

5.3.1 Sifonit

Ennen lauhteenpoistoon käytettiin erilaisia kauharatkaisuja. Ne lappoivat lauhdetta sylinterin pohjalta pois sylinterin pyörimisliikkeen avulla. Niiden käyttö loppui, kun konenopeudet kasvoivat niin suuriksi, että lauhde muodostui renkaaksi sylinterin kehälle.

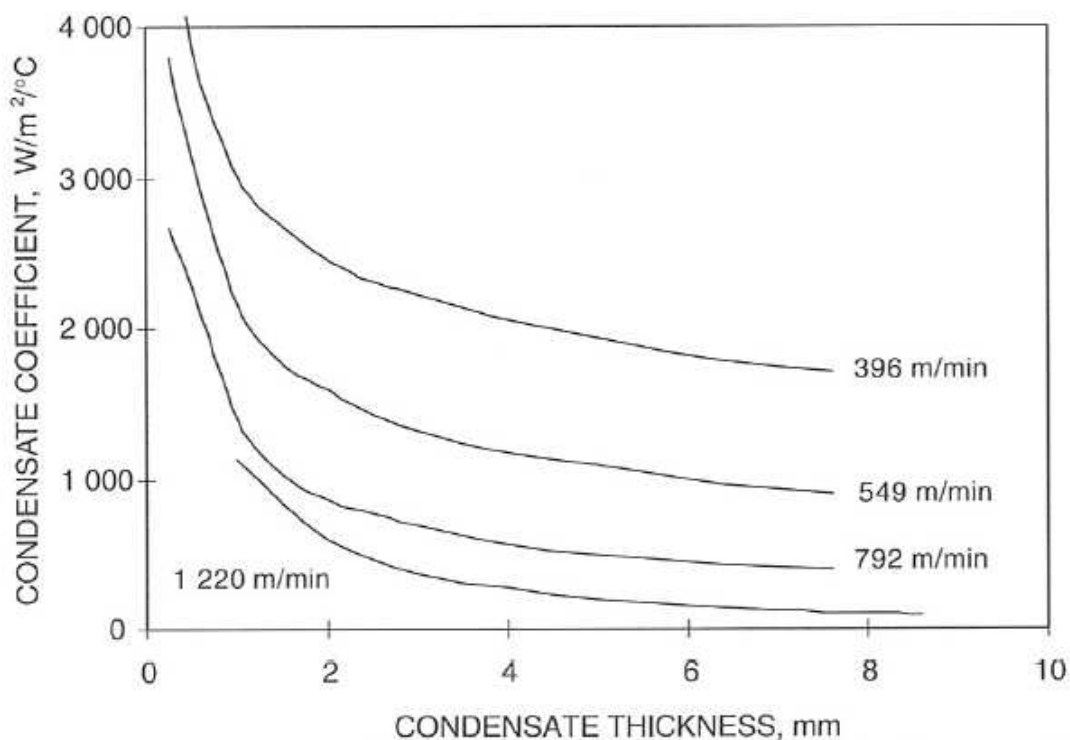
Nykyään lauhde poistetaan sylinteristä sifonien avulla. Sifonin suuaukko sijaitsee lähellä sylinterin sisäpintaa osittain lauhdekerroksen alapuolella. Sifoneja on kahdenlaisia: seisovia ja pyöriviä. Seisovat sifonit soveltuvat nopeille koneille ja pyöriviä sifoneita käytetään hitaissa koneissa. Lauhdetta voidaan poistaa joko sylinterin molemmista päistä tai vain toisesta päästä. Leveimmillä yli 7,5 metrisillä koneilla käytetään molemminpuolisia sifoneita riittävän lauhteenpoiston turvaamiseksi. Kuvassa 25 on nähtävissä seisovat sifonit kuivatussyylinterin molemmissa päissä sekä höyrynsyöttölaitteisto vasemmassa päässä.



Kuva 25. Kaksipuolinen lauhtenpoisto. /12/

Sifonit tarvitsevat toimiakseen höyrynsyöttöputkiston ja lauhtenpoistoputkiston välillä vallitsevan paine-eron. Tämä paine-ero on 10–70 kPa riippuen sifonista. /Pudas/ Paine-eron takia osa sylinteriin syötettävästä lämmityshöyrystä poistuu suoraan sifonin kautta luovuttamatta lämpöä. Tätä höyryä sanotaan läpipuhallushöyryksi. Läpipuhallushöyryn mukana poistuu paitsi lauhdetta myös sylinterissä olevaa ilmaa ja lauhtumattomia kaasuja, jotka haittaavat lämmönsiirtoa.

Kuvassa 26 on esitetty lauhteen lämmönsiirtokertoimen käyttäytyminen lauhdekerroksen paksuuden ja konenopeuden mukaan sileälle sylinterille. Kuvasta huomataan, että lauhdekerroksen pitäminen mahdollisimman ohuena on tärkeää lämmönsiirtokertoimen maksimoimiseksi ja sitä myöten parhaimman kuivatustehon saamiseksi.



Kuva 26. Lauhteen lämmönsiirtokerroin sylinterin nopeuden ja lauhdekerroksen paksuuden funktiona. /4/

Seisovan sifonin lauhteenpoisto käyttää hyväkseen pyörimisliikkeen lauhteeseen luomaa liike-energiaa. Tämä liike-energia on suurempi kuin lauhteen hydrostaattinen paine, ja lauhde nousee sifoniputkeen. Teoriassa lauhteenpoistoon ei siis tarvittaisi läpipuhallushöyryä, mutta käytännössä sitä tarvitaan ilman ja lauhdemattomien kaasujen poistamiseksi. Lisäksi läpipuhallushöyryä tarvitaan lauhteenpoistoon, kun lauhde ei ole renkaana sylinterin kehällä.

Lauhteen liike-energiaa ei voida käyttää hyväksi pyörivän sifonin yhteydessä, sillä sifoni pyörii lauhteen mukana. Pyörivä sifoni tarvitsee lauhteenpoistoon siis paine-eron sekä läpipuhallushöyryä. Lisäksi paine-eron tulee olla suurempi kuin seisovaa sifonia käytettäessä.

Sifonien huonona puolena on kuluminen. Koska välys sifonin suuaukon ja sylinterin pinnan välillä on pieni, sifoni voi ottaa kiinni sylinteriin ja kulua nopeasti. Tämän lisäksi erityisesti seisoviin sifoneihin kohdistuu huomattava kuormitus lauhteen liikkeestä. Sifoni on tuettu ainoastaan sylinterin ulkopuolelta liikkumattomista osista, joten sylinterin sisäpuolinen osa altistuu suurelle rasitukselle. Rasituksesta johtuen sifoniputki voi katketa.

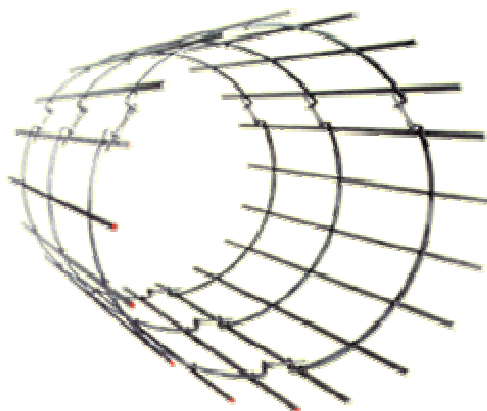
Konetta ei kuitenkaan välttämättä pysäytetä sifonin korjausta varten, vaan sylinteri suljetaan eikä sinne johdeta enää höyryä. Tällöin sylinteriä käytetään vesilastissa.

Tietyissä tapauksissa sylinterin käyttöteho ei enää riitä pyörittämään vesilastissa olevaa sylinteriä. /7/ Tällainen tilanne voi syntyä, kun lauhde ei ole enää renkaana sylinterin kehällä vaan lammikkomuodossa, jolloin sylinterin pyörittämiseen tarvitaan huomattavasti suurempi käyttöteho.

5.3.2 Lämpölistat

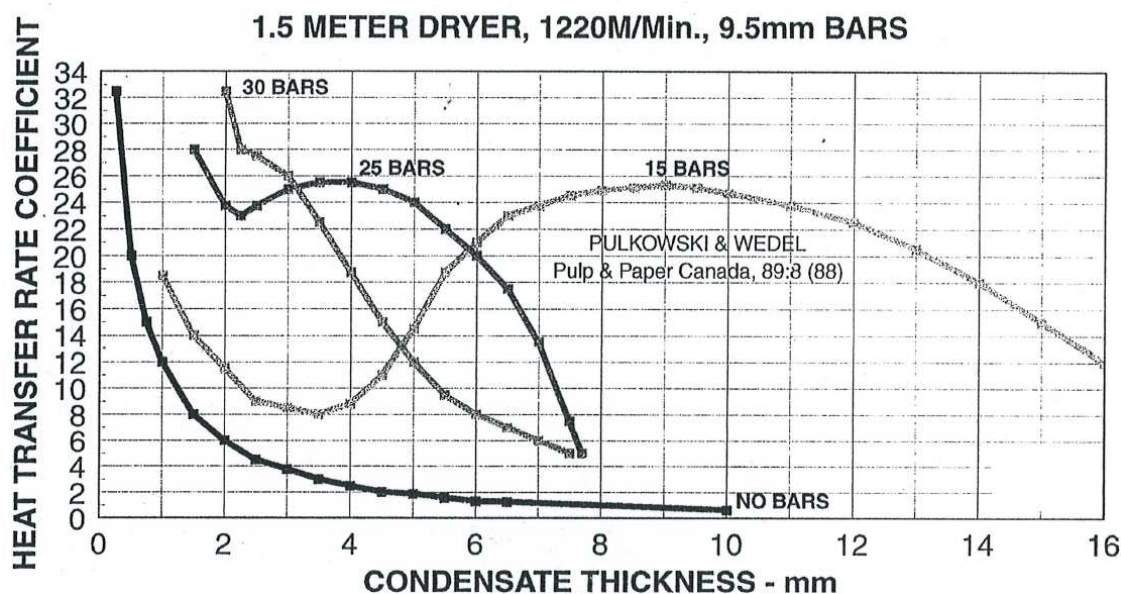
Paperikoneiden nopeuden kasvun myötä on tullut tarve tehostaa lämmönsiirtoa sylinterikuivatuksessa. 1970-luvulla esiteltiin tähän tarkoitukseen kehitellyt lämpölistat, jotka asennetaan sylinterin sisäpinnalle. Kiinteästi asennetut listat aiheuttavat sylinterin pyöriessä lauhteeseen turbulenssia, joka tehostaa lämmön siirtymistä höyrystä sylinterivaippaan.

Kuvassa 27 nähdään lämpölistarakenne sellaisena, kun se on koottuna sylinterin sisässä. Listat ovat suorakaiteen muotoisia ja ne on tuettu sylinterin sisäpintaa vasten radiaalisilla vanteilla, joissa on lukitusmekanismissa jousi. Jousien tehtävänä on pitää listat tiukasti sylinterin pinnassa kiinni lämpölaajenemisesta huolimatta.



Kuva 27. Lämpölistat. /8/

Kuvassa 28 on esitetty lauhdekerroksen paksuuden ja lämpölistojen lukumäärän vaikutus lämmönsiirtokertoimeen. Kuvan perusteella voidaan todeta, että kullekin lämpölistayhdistelmälle on olemassa tietty toiminta-alue, jolla lämpölistat parantavat lämmönsiirtoa. Vääränlaisissa olosuhteissa käytettynä lämpölistoista on enemmänkin haittaa, koska niiden käyttö kasvattaa sylinterin pyörittämiseen tarvittavaa tehoa.



Kuva 28. Lämmönsiirtokerroin lauhteenpaksuuden funktiona eri lämpölistayhdistelmille. /26/

Lisäksi kuvasta 28 havaitaan, että lauhdekerroksen paksuudella ei ole niin suurta merkitystä lämpölistoin varustellulle sylinterille. Sileäpintaisella sylinterillä pyritään lauhteen määrä minimoimaan, kun taas lämpölistojen kanssa operoitaessa voidaan lauhdekerroksen paksuutta joutua jopa kasvattamaan lämmönsiirron maksimoimiseksi.

Taulukkoon 1 on listattu kuivatuskapasiteetin kasvu eri konenopeuksilla lämpölistoja käytettäessä. Vertailukohtana on sileäpintainen kuivatussylinteri. Taulukon perusteella voidaan todeta, että nykynopeuksilla lämpölistoja käytettäessä kuivatuskapasiteetti on jopa viidesosan parempi kuin sileäpintaisella sylinterillä.

Taulukko 1. Lämpölistojen käytön vaikutus kuivatuskapasiteettiin eri konenopeuksilla. /4/

Konenopeus [m/min]	Kuivatuskapasiteetin kasvu [%]
150-365	0
365-460	0-5
460-610	3-10
610-760	5-12
760-915	10-15
>915	12-20

Lämpölistojen hyvänä puolena on lämmönsiirron parantamisen lisäksi kuivatusprofiilin tasoittuminen. Huonoja puoliakin lämpölistojen käytöllä on. Ne kasvattavat sylintereiden pyörytykseen käytettävää tehoa huomattavasti ennen kuin saavutetaan lauhderengastilanne.

6 SYLINTERIKUIVATUKSEN KEHITTÄMISVAIHTOEHTOJA

Sylinterikuivatuksen tehostamiseksi on kehitelty paljon erilaisia menetelmiä. Seuraavaksi tarkastellaan näitä menetelmiä, niiden hyviä ominaisuuksia sekä kehitysmahdollisuuksia. Viimeisenä tutkitaan lähemmin urasyylinteriä.

6.1 *Lämmönsiirto höyrystä sylinteriseinään*

Lämmönsiirtoa höyrystä sylinterin seinään on koetettu parantaa monin keksinnöin. Toiset näistä keksinnöistä on käyttökelpoisempia kuin toiset. Nämä keksinnöt voidaan jakaa neljään osa-alueeseen vaikutusmenetelmien perusteella. Lämmön siirtymistä sylinteriseinään voidaan parantaa tehostamalla höyryn syöttöä. Toinen menetelmä on lisätä sylinterin kontaktipintaa. Kolmas keino perustuu lauhteen turbulenssin lisäämiseen ja neljäs vaihtoehto on tehostaa lauhteenpoistoa.

Höyryn syötön lämmönsiirtoa tehostava vaikutus perustuu lauhdekerroksen rikkomiseen. Kun höyryä syötetään lähelle sylinterin sisäpintaa, lauhdekerros rikkoontuu ja lämpö siirtyy suoraan höyrystä sylinteriseinämään. Näin ollen lauhteesta aiheutuva lämpövastus jää kokonaan pois.

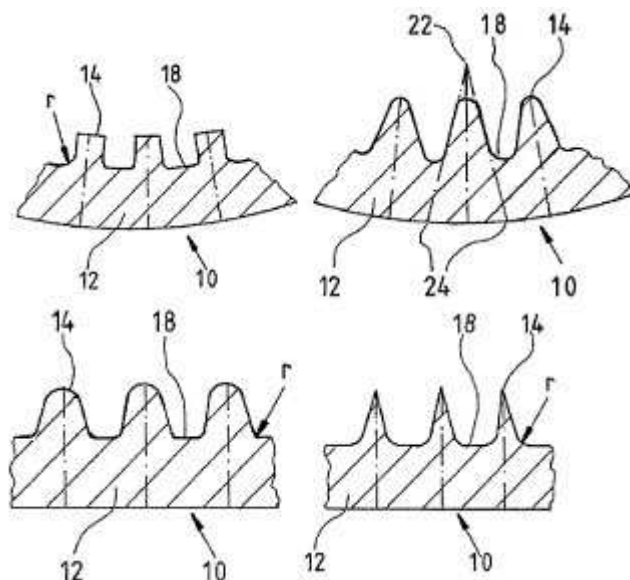
Höyryn syöttö suoraan sylinterin sisäpinnalle voi kuitenkin olla vaikea toteuttaa. Sylinterin sisään pitäisi tehdä paikallaan pysyvä rakenne höyrynsyötön suuttimelle. Rakenteen tukeminen on vaikeaa pyörivässä sylinterissä. Nykyisin seisovat sifonit tuetaan sylinterin ulkopuolelta ja sisäpuoliseen osaan kohdistuu huomattavia rasituksia.

Kontaktipinnan lisääminen vaikuttaa lämmönsiirtoon kahdella tavalla. Suora vaikutus johtuu suuremmasta lämpöä vastaanottavasta pinta-alasta. Lisäksi kontaktipinnan lisäys muuttaa lauhteen käyttäytymistä turbulenttisemmaksi. Kontaktipinnan kasvattaminen voitaisiin toteuttaa lisäämällä sylinterin sisäpintaan erilaisia hyvin lämpöä johtavia muotoja, esimerkiksi harjanteita tai yksittäisiä kohoumia. Ongelmana kuitenkin on näiden muotojen kiinnittäminen sylinterin pintaan siten, että ne pysyisivät kiinni lauhteen aiheuttaman rasituksen alaisina.

Lauhteen lämmönsiirron paranemiseen voidaan vaikuttaa kahdella viimeisellä menetelmällä. Turbulenssin lisääminen lauhdekerroksessa mahdollistaa suuremman lämpömäärän siirtymisen lauhteen läpi. Lauhteenpoisto taas pienentää veden määrää ja sitä myöten siitä aiheutuvaa lämpövastusta. Erilaiset sylinterin sisäpintaan kiinnitettävät listat ja koneistettavat urat lisäävät turbulenssia lauhteessa sekä ohjaavat lauhteen paremmin poistettavaksi. Koko sisäpinta voidaan muotoilla kartiomalliseksi siten, että lauhdekerros esimerkiksi ajautuu toiseen tai molempiin päihin poistettavaksi. Lauhteen

päihin ohjaamisen myötä lauhdekerros ohenee tai osa pinnasta voi paljastua kokonaan, ja lämpö voi siirtyä suoraan höyrystä sylinterivaippaan.

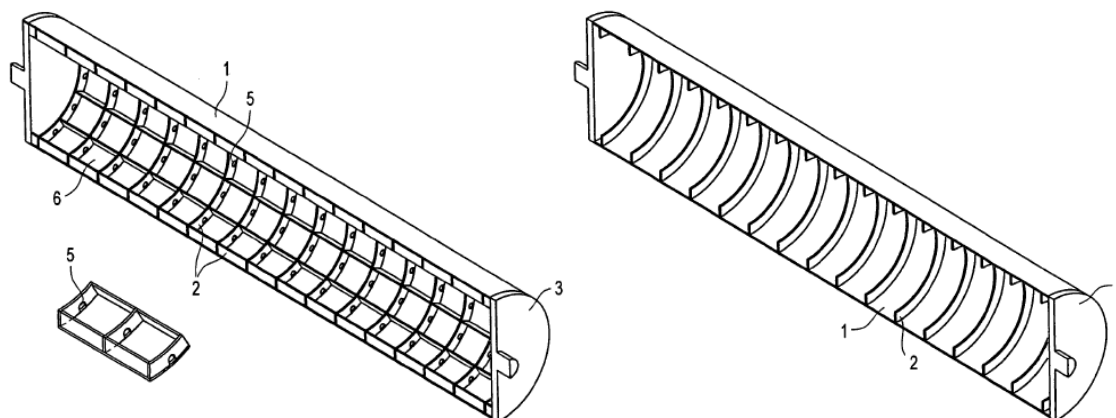
Kuvassa 29 on esitetty erilaisia uravaihtoehtoja turbulenssin lisäämiseksi lauhteessa. Näiden urien ongelmana on valmistettavuus: Koneistettaisiinko urat valmiiseen valettuun sylinteriin vai olisiko mahdollista koota sylinteri uritetuista segmenteistä.



Kuva 29. Erilaisia urituksia aksiaali- ja radiaalisuunnissa. /24/

6.2 Lämmönsiirto sylinterin seinässä

Sylinterin vaipasta aiheutuvaa lämmönsiirtovastusta voidaan pienentää ohentamalla vaippaa tai materiaalivalinnoilla. Sylinterin vaippaa ohentamalla höyry saadaan lähemmäs paperia, jolloin lämmönsiirtomatka ja sitä myöten myös vaipasta aiheutuva lämpövastus pienenevät. Vaipan ohentamisessa tulee kuitenkin ensimmäisenä vastaan paineastialainsäädännön sanelema raja. Nykyisin käytössä olevien sylintereiden vaipat alkavat olla jo niin ohuita kuin mahdollista. Tämän takia on kehitelty ohuen kuoren mahdollistavia jäykisterakenteita. Sylinterin sisäpintaan kiinnitettävät jäykisteet tekevät sylinteristä riittävän jäykän ja paineastialainsäädännön hyväksymän rakenteen. Kuvassa 30 on esitetty kaksi erilaista jäykisterakennetta. Jäykisteitä voi olla kuvan mukaisesti sekä radiaali- että aksiaalisuunnissa.



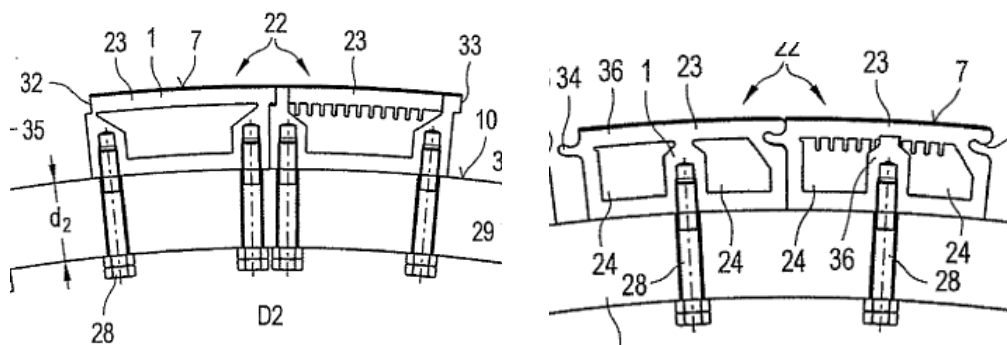
Kuva 30. Ohutvaipaiset sylinterit jäykisteillä varustettuna. /21/

Jäykisteillä tuetun ohutseinämäisen sylinterin haittana kuitenkin on epätasainen lämpöjakauma. Jäykisteiden kohdat ovat lämpimämpiä, koska niiden kohdalla sylinterin sisällä on enemmän lämmönsiirtopintaa kuin tasaisissa väleissä. Myös kiinteiden jäykisteiden kiinnittäminen voi tuottaa vaikeuksia lämpölaajenemisen vuoksi.

Lämmönsiirtopotentiaalia ajatellen sylinterin seinämällä olisi suuret parannusmahdollisuudet. Nykyisellä valurautaisella ainevahvuudeltaan noin 30 mm sylinterillä lämmönsiirtokerroin on $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jos ainevahvuutta saataisiin pienennettyä 10 millimetriin, lämmönsiirtokerroin kolminkertaistuisi arvoon $4500 \text{ W/m}^2\text{K}$.

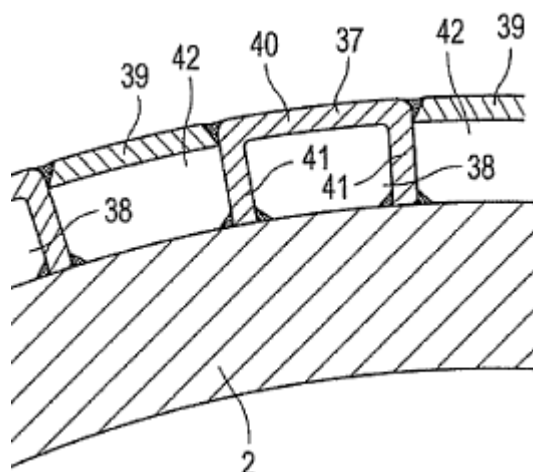
Toinen konstruktiiivinen keino saada höyry lähemmäs paperia on ohjata höyry lähellä sylinterin ulkopintaa kulkeviin kanaviin. Kanavien avulla saadaan paineastiasäädöksen määräämä seinämänpaksuus ohuemmaksi, sillä paine vaikuttaa pienempään pinta-alaan kuin perinteisessä sylinterissä.

Kanavarakenteita on patentoitu monenlaisia. Kuvassa 31 olevassa rakenteessa kanavat on muodostettu sylinterin ulkopintaan pulteilla kiinnitettävistä moduuleista. Tämän rakenteen huonona puolena on kuitenkin sen valmistettavuuden ja kokoonpanon hankaluus sekä kalleus.



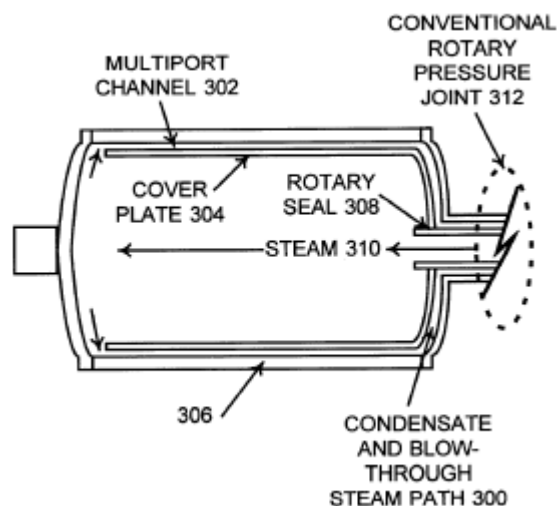
Kuva 31. Moduuleista koottuja kanavarakenteita. /23/

Kanavarakenne voidaan toteuttaa myös hitsaamalla. Kuvassa 32 esiintyvässä konstruktiossa sylinterin ulkopintaan on kiinnitetty metallisia u-listoja hitsaamalla. Höyrykanavat on muodostettu hitsaamalla u-listojen väleihin metallilistat. Kyseisen rakenteen hyvä puoli on sen yksinkertaisuus, mutta kuvassa esiintyvällä tavalla suoritettava u-listojen sisäpuolinen hitsaus on hankala ja jopa lähes mahdoton työvaihe.



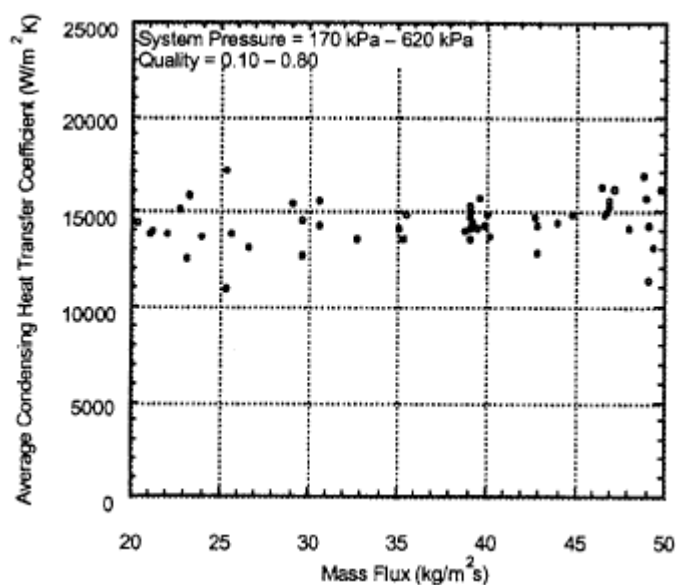
Kuva 32. Hitsaamalla muodostettu kanavarakenne sylinterin pinnassa. /23/

Eräänlainen kanavaratkaisu on myös kuvassa 33 näkyvä multiport-sylinteri. Kanavat muodostetaan sylinterivaipan ja sisäseinän väliin. Höyry johdetaan tavallisesti koko sylinterin sisäpuolelle, josta se kulkeutuu kanaviin. Höyry lauhtuu kanavissa ja poistuu niitä pitkin.



Kuva 33. Multiport-sylinterin periaatekuva. /22/

Kuvassa 34 on esitetty multiport-sylinterillä saavutettava lämmönsiirto. Tavallisella sylinterillä lämmönsiirto on luokkaa $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$, joten multiport-sylinterissä lauhdesta aiheutuva vastus olisi vain kymmenesosa perinteisen sylinterin vastuksesta.



Kuva 34. Kokeellisia lauhteen lämmönsiirtokertoimen arvoja multiport-sylinterissä. /18/

Kanavarakenteiden ongelmana on höyryn johtaminen kanaviin sekä lauhteen poistaminen niistä. Tehtäisiinkö se erityisillä päädyillä, joiden rakenteessa olisi höyry- ja lauhdekanavat. Lisäksi lauhteen liikkumista kanavien sisällä ei tunneta.

Materiaalivalinnoilla saadaan parannettua lämmönjohtavuutta sylinterissä. Paremmiin lämpöä johtavalla materiaalilla voidaan pinnoittaa sisäpinta tai ulkopinta. Materiaalina

voidaan käyttää myös huonommin lämpöä johtavaa materiaalia. Tällöin pinnoitetaan sylinterin ulkopinta vain osittain reunoista, millä tavoitellaan liiallisen reunakuivatuksen ehkäisemistä ja sitä myöten kuivatusprofiilin tasoittumista.

Sylinteri voidaan tehdä myös kaksikerrosrakenteena, jolloin joko sisä- tai ulkokerros on paremmin lämpöä johtavaa materiaalia. Tästä kaksikerrosrakenteesta tulisi kuitenkin materiaalien rajapinnan aiheuttama lisävastus lämmönsiirtoon. Myöskään ei tiedetä, kummalla puolella johtavampi materiaali toimisi paremmin. Kaksikerrosrakenteisen sylinterin lämpölaajeneminenkin voi tuottaa ongelmia, mikä on kokoonpano- ja käyttölämpötilojen erojen vaikutus sylinteriin.

6.3 Lämmön tuonti ulkopuolelta

Kun sylinteri lämmitettäisiin ulkopuolelta, se ei olisi enää paineastia, jolloin se voisi olla rakenteeltaan paljon nykyistä kevyempi. Tällöin materiaaliksi voitaisiin valita lämmönsiirron kannalta paras vaihtoehto, eikä kestävyys olisi enää ratkaiseva tekijä. Ulkopuolinen kuivatussylinterin lämmitys poistaisi myös lauhteesta ja sylinteriseinämästä aiheutuvat lämpövastukset.

Lämmön tuonti ulkopuolelta voidaan toteuttaa esimerkiksi sähkön avulla induktiokuumenuksella. Huonona puolena kuitenkin on nykyisien sylinterikuivatusosien ahtaus. Lämmityslaitteisto pitäisi sijoittaa kuivatussylinterin paljaalle puolelle eli sinne, missä kuivatusviira ja paperi eivät ole kosketuksissa sylinterin kanssa. Ulkopuolista lämmönlähdettä on kuitenkin vaikea sijoittaa kyseiseen paikkaan, sillä nykykokoonpanoissa erilaiset ajettavuuskomponentit, kuten imulaatikot, täyttävät sylintereiden välit.

7 LÄMMÖNSIIRTOTARKASTELOT

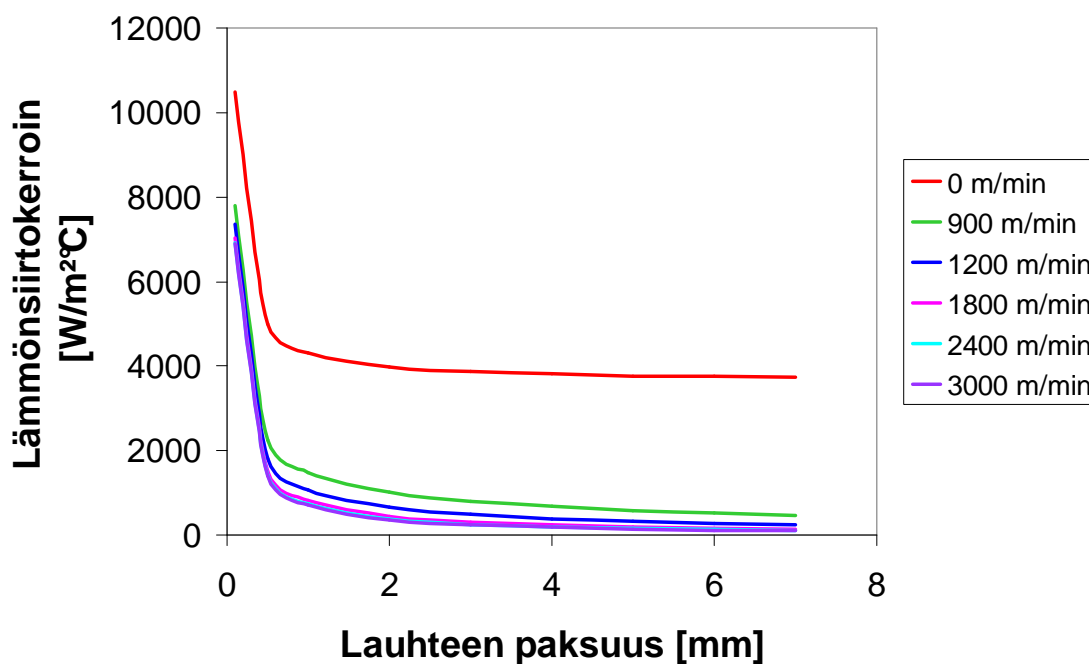
7.1 Lämmönsiirto nykyisessä sylinterissä

Nykyisellään sylinterikuivatuksessa lauhteesta, sylinterivaipasta ja rainan kosketuksesta johtuvat lämmönsiirtovastukset ovat likimain yhtäsuuria. Tämän työn puitteissa on rajoitettu tarkastelemaan lauhteen ja sylinterivaipan vastuksien pienentämispotentiaaleja. Potentiaalisemmaksi tutkimisen kohteeksi arvioitiin lauhteesta aiheutuva vastus ja sen pienentäminen.

Nykykoneilla käytettäessä lämpölistoja lauhteen lämmönsiirtokerroina pidetään yleisesti $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vastaavasti käytössä olevien sylinterien lämmönsiirtokerroin on vaipan paksuudesta riippuen $1100\text{--}1800 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sylinteri-paperi-kontaktissa lämmönsiirto on $500\text{--}1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ riippuen sylinterin sijainnista kuivatusosalla, paperin kuivuessa lämmönsiirtokerroin pienenee. Lämmönsiirtokerroimia voidaan laskea yhteen sarjaankytkennän periaatteella. Tällöin sylinterin kokonaislämmönsiirtokerroin höyrystä paperiin on välillä $280\text{--}530 \text{ W/m}^2\text{K}$.

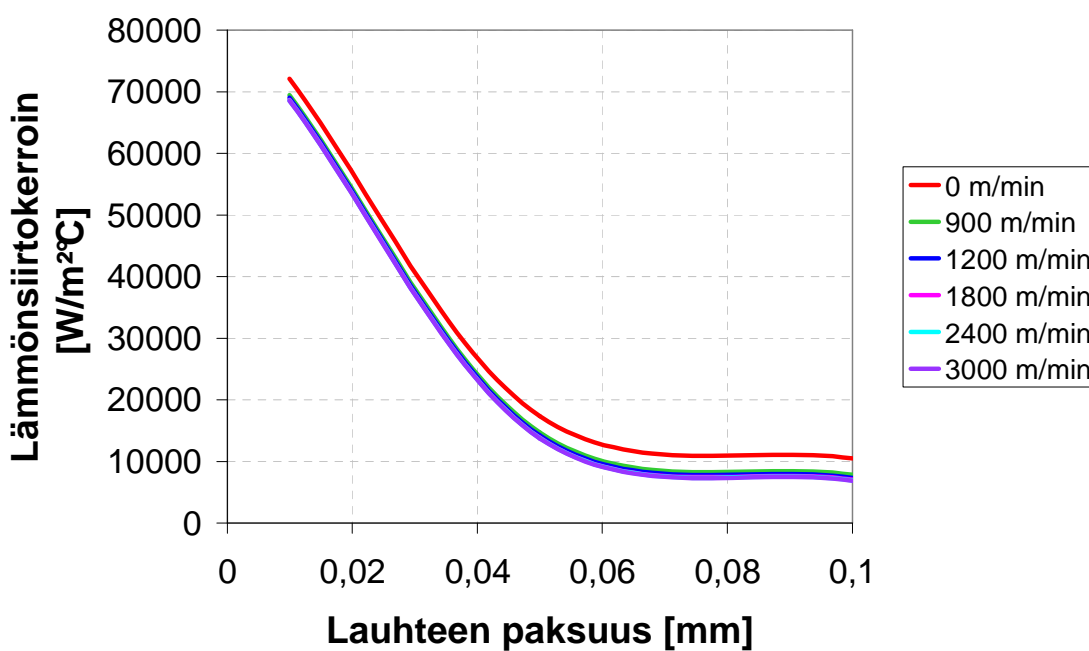
Nykyisen sylinterin lauhdekerroksen lämmönsiirtoa tarkasteltiin luvussa 4.4.1. Luvussa esiteltiin kaavat, joiden avulla lämmönsiirtokerroin saadaan laskettua. Käsitellyistä lämmönsiirtokerroimista tässä tarkastellaan lähemmin lauhteen ja sylinterivaipan lämmönsiirtokerroimia, joista on piirretty kuvaajia aikaisemmin esitettyjen kaavojen mukaan.

Kuvassa 35 on esitetty luvussa 4.4 esitetyillä kaavoilla laskettu lämmönsiirtokerroin eri konenopeuksilla sylinterille, jonka halkaisija on 1830 mm ja vaipanpaksuus 33 mm . Kuvasta havaitaan, että konenopeus ei juuri vaikuta lämmönsiirtokerroimeen, paitsi koneen ollessa pysähdyksissä. Nollanopeus ei kuitenkaan paperin kuivatuksen kannalta ole järkevä tarkasteltava, vaan se on mukana kuvissa vain vertailun vuoksi. Lauhteenpaksuus puolestaan näyttäisi vaikuttavan suurestikin lämmönsiirtokerroimeen. Lauhteenpaksuuden mennessä alle yhden millimetrin lämmönsiirtokerroin alkaa jyrkästi nousta.



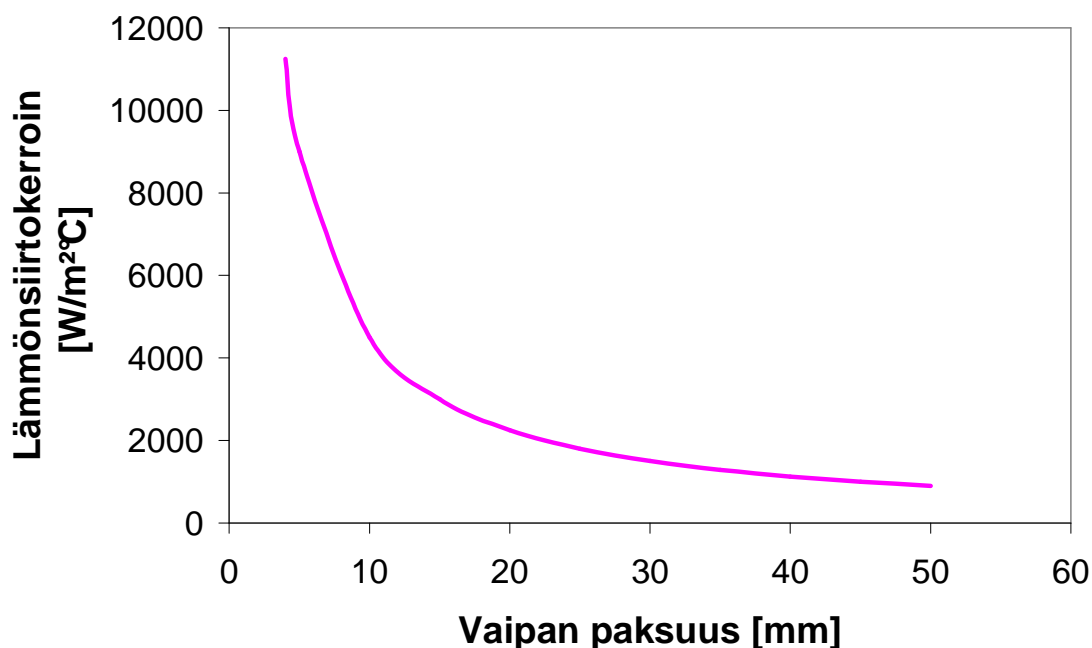
Kuva 35. Lämmönsiirtokerroin lauhteenpaksuuden funktiona eri konenopeuksilla.

Kuvaan 36 on otettu tarkempi kuvaus lauhteenpaksuuden pienillä arvoilla. Kuvan käyrät loppuvat siihen kohtaan, mistä ne kuvassa 35 alkavat. Käyrät osoittavat, että hyvin ohuilla lauhdekerroksen paksuuksilla lauhteen lämmönsiirtokerroin saadaan moninkertaistettua.



Kuva 36. Lämmönsiirtokerroin lauhteenpaksuuden funktiona eri konenopeuksilla.

Kuvassa 37 on esitetty sylinterivaipan paksuuden vaikutus vaipan lämmönsiirtokerroimeen. Käyrän perusteella voidaan todeta, että vaipan paksuuden tulee olla alle 10 mm, jotta se merkittävästi vaikuttaisi lämmönsiirtokerroimen paranemiseen.



Kuva 37. Sylinterivaipan lämmönsiirtokerroin vaipan paksuuden funktiona.

Sekä sylinterivaipalla että lauhteella on molemmilla potentiaalia lämmönsiirron parantamiseksi. Edellä esitettyjen kuvaajien perusteella lauhdekerroksen ohentamisella saavutettaisiin kuitenkin nopeammin suurempia parannuksia kuin sylinterin ohentamisella.

7.2 Lämmönsiirto urasynterissä

Lauhteen käyttäytymistä ja siitä aiheutuvaa lämpövastusta päätettiin tutkia aksiaalisesti uritetussa sylinterissä. Tämä tapahtui numeerisella mallinnuksella. Itse laskennan suoritusta ei käsitellä kovin tarkasti, sillä lämpötarkastelut ostettiin numeerisen mallinnuksen asiantuntijoilta.

7.2.1 Laskennan suoritus

Suoritetuissa lämpötarkasteluissa muuttujina olivat sylinterin sisäpuolisten urien lukumäärä n , sylinterin ulkopinnan lämpötila T ja konenopeus v . Taulukossa 2 on esitetty muuttujina käytettyjen suureiden arvot. Taulukkoon on merkitty punaisella värillä arvot, jotka ovat olleet vakioita laskennassa. Esimerkiksi urien määrän vaikutusta laskettaessa on käytetty vakiolämpötilaa 85 °C ja vakionopeutta 30 m/s . Jäljempänä esitetyissä tuloksissa käyrät $n24$, $T85$ ja $v30$ siis vastaavat toisiaan.

Taulukko 2. Laskennassa käytettyjen muuttujien arvot.

n [kpl]	T [°C]	v [m/s]
12	80	15
24	85	20
47	90	30
222	95	40
		50

Laskelmat suoritettiin halkaisijaltaan 1830 millimetriselle sylinterille, jonka pituus on 10 metriä ja vaipanpaksuus 33 mm. Uraleveydeksi kiinnitettiin 2 mm. Kannaksen leveys vaihteli urien määrästä riippuen taulukon 3 mukaan.

Taulukko 3. Kannaksen leveydet eri uramäärillä.

n [kpl]	kannaksen leveys [m]
12	0,46
24	0,23
47	0,12
222	0,02

Laskenta suoritettiin vain puolikkaan kannaksen mitalle, kuten kuvassa 38, sillä tulokset ovat symmetrisiä kannaksen leveyden suhteen. Laskennassa kannas mallinnettiin suorana tasona, vaikka todellisuudessa kannas on hieman kaareva.



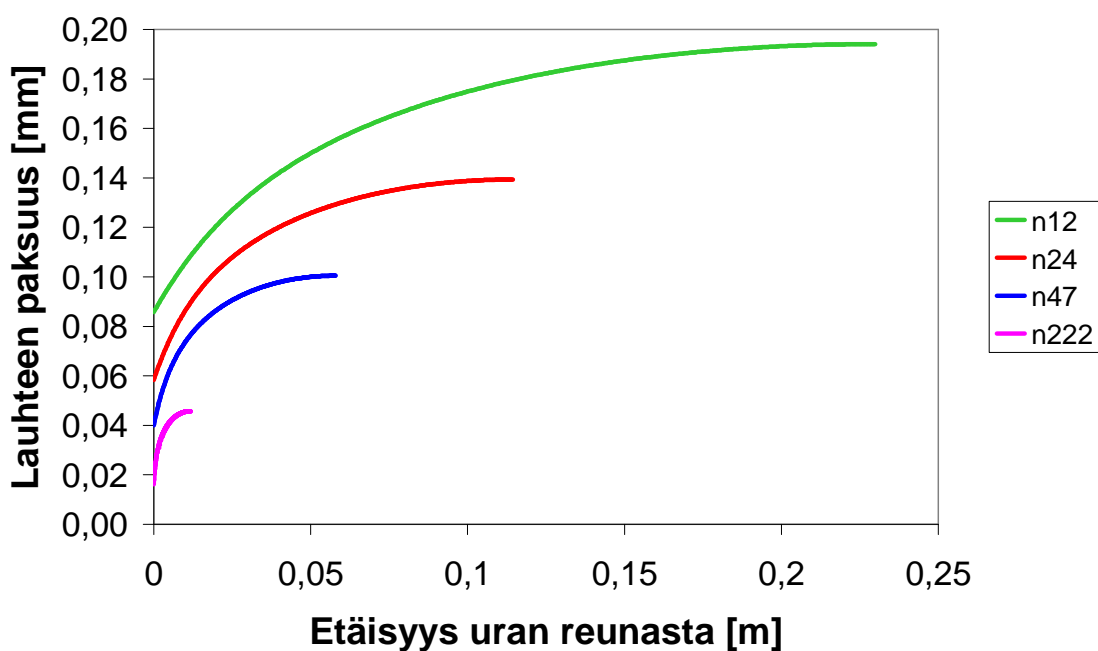
Kuva 38. Periaatekuva laskennassa käytetystä urituksesta.

7.2.2 Laskennan tulokset

Lämpötarkastelun tuloksina saatiin lauhdekerroksen paksuus, virtausnopeus lauhdekerroksen pinnalla, lämpötila sylinterin sisäpinnassa, lauhteen lämmönsiirtokerroin, lauhtumisnopeus ja lämpövuoto. Näistä tuloksista tässä käsitellään lähinnä lauhdekerroksen paksuutta sekä lämmönsiirtokerrointa, jotka ovat sylinterin lämmönsiirron kannalta tuloksista kiinnostavimmat suureet.

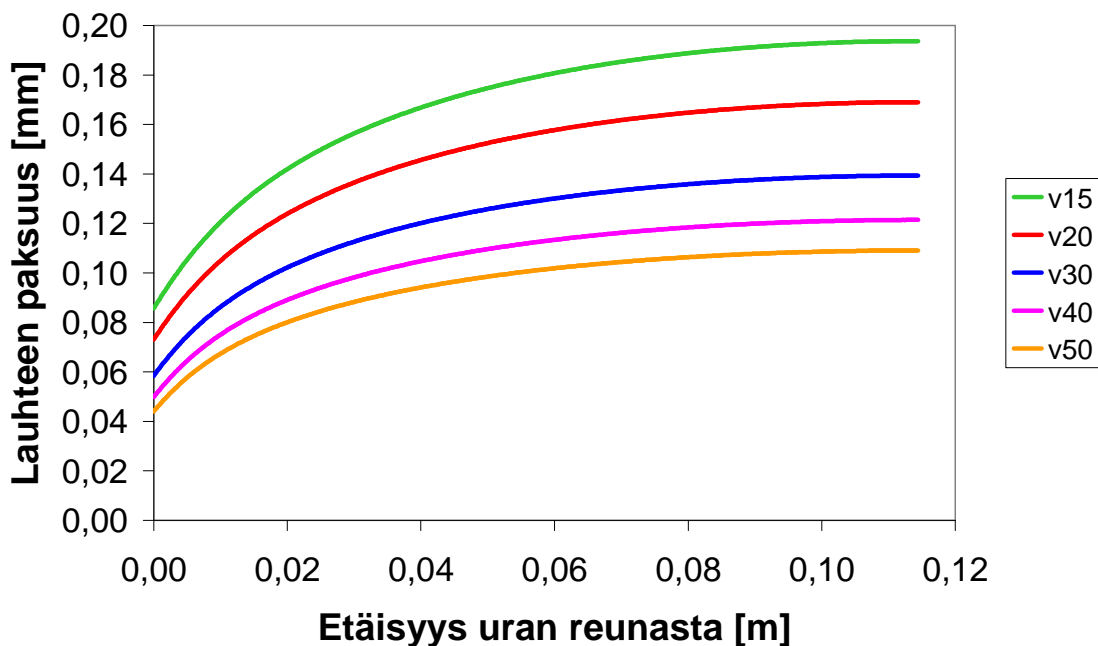
7.3 Laskennan tulokset

Urien lukumäärä sylinterin kehällä vaikuttaa paljon lauhteenpaksuuteen urien välissä olevalla kannaksella. Kuvassa 39 on esitetty lauhteenpaksuus kannaksen puolikkaalla eri uramäärillä. Käyristä havaitaan, että mitä enemmän uria sylinterissä on, sitä ohuemmaksi lauhdekerros muodostuu. Lisäksi käyristä on luettavissa se, että lauhdekerros on paksuimmillaan kannaksen keskikohdassa. Erityisen mielenkiintoista on huomata, että paksuimmillaankin lauhdekerros on vain noin 0,2 mm, mikä on kymmenesosa nykyisten lauhdekerroksien paksuuksista.



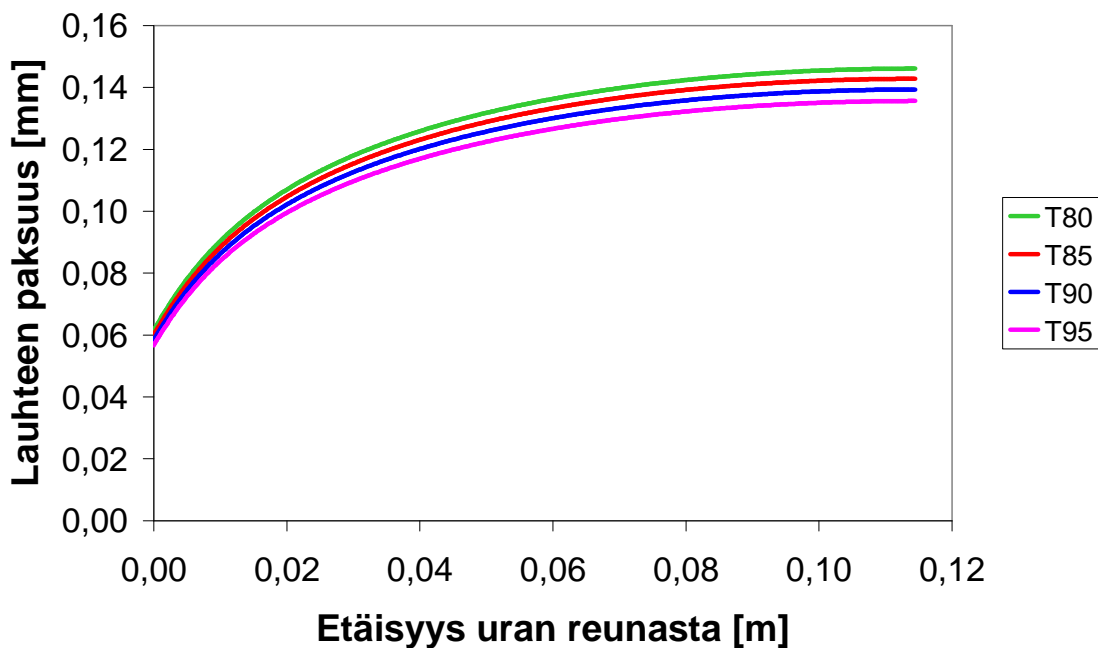
Kuva 39. Lauhteen paksuus urasynterissä urien eri lukumäärillä.

Nopeuden vaikutusta lauhdekerroksen paksuuteen käsiteltiin jo aikaisemmin luvussa 3.3. Kuvan 40 käyrien perusteella voidaan todeta laskentatulosten noudattavan aiempaa käsitystä nopeuden vaikutuksesta. Koneenopeuden kasvaessa arvosta 15 m/s eli 900 m/min arvoon 50 m/s eli 3000 m/min lauhdekerroksen paksuus puolittuu.



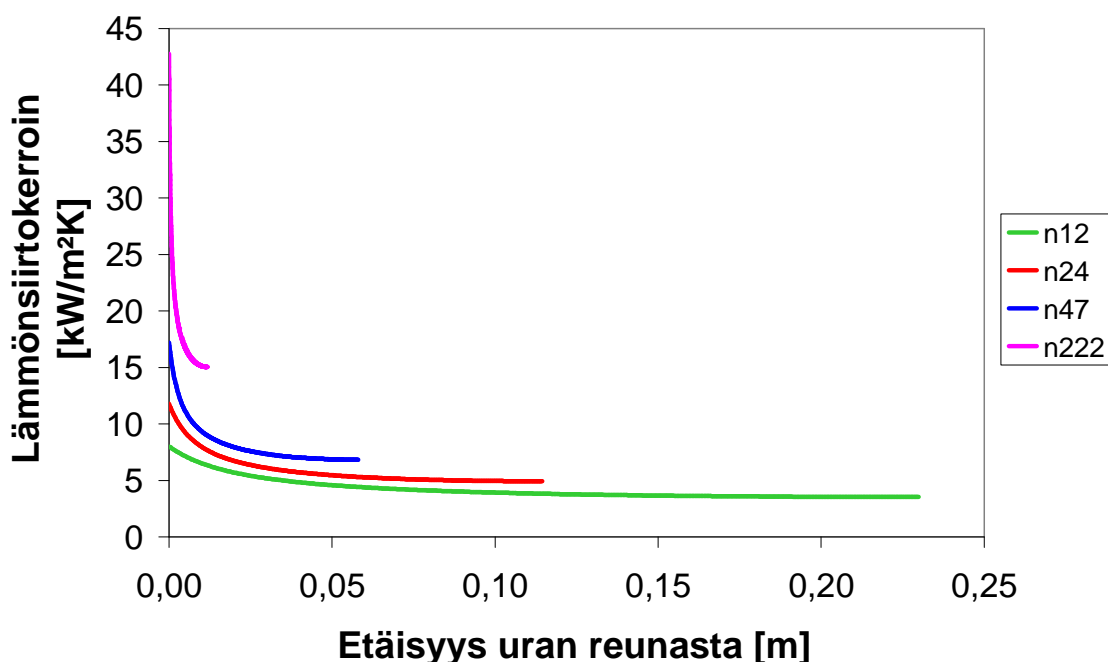
Kuva 40. Lauhteen paksuus urasynterissä eri konenopeuksilla.

Kuva 41 esittää sylinterin ulkolämpötilan vaikutusta lauhdekerroksen paksuuteen kannaksella. Aikaisemmissa kuvissa havaittiin selkeät erot lauhteenpaksuuden kehittämisessä muuttujan muutoksen suhteen. Lämpötila sen sijaan ei näyttäisi paljon vaikuttavan lauhdekerroksen paksuuteen. 15 asteen lämpötilan vaihtelu aiheuttaa ainoastaan 0,02 millimetrin vaihtelun lauhteen paksuuteen kannaksen keskiosassa.



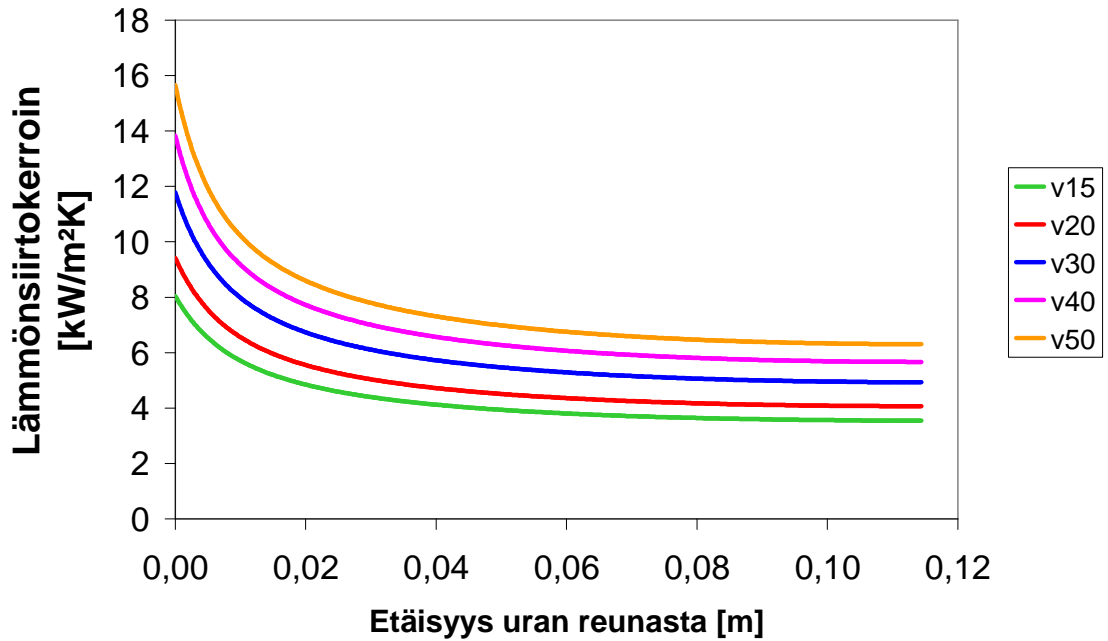
Kuva 41. Lauhteen paksuus urasynterissä ulkopinnan eri lämpötiloilla.

Urien määrä vaikuttaa huomattavasti lämmönsiirtokerroimeen. Tätä laskentatulosten selvittämää riippuvuutta on kuvattu kuvassa 42. Urat vaikuttavat paitsi lämmönsiirtokerroimen suuruuteen kokonaisuudessaan myös kertoimen vaihteluun kannaksella. Pienimmällä uramäärällä lämmönsiirtokerroin ei juuri muutu kannaksen leveyden suunnassa. Suurimmalla uramäärällä vaihtelu on melkein 30 kW/m²K siirryttäessä kannaksen keskikohdasta uran reunalle.



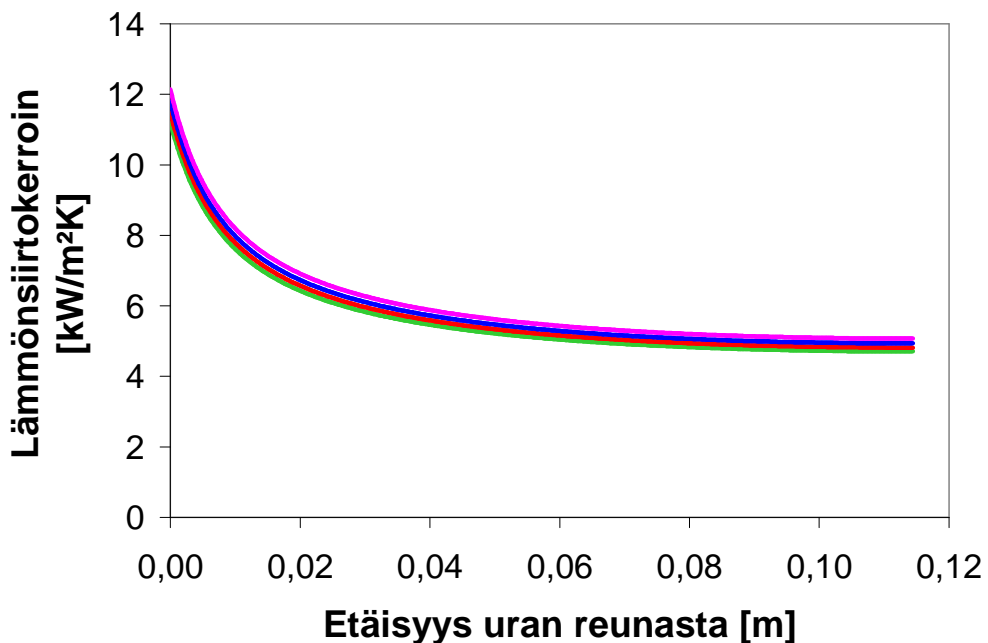
Kuva 42. Lämmönsiirtokerroin urasynterissä eri uramäärillä.

Nopeus vaikuttaa kohtalaisesti lämmönsiirtoon urasynterissä. Kuvaan 43 on piirretty lämmönsiirtokerroimen muuttuminen kannaksella eri konenopeuksilla. Kuvasta havaitaan, että lämmönsiirtokerroimen vaihtelut jäävät pienemmiksi nopeuden vaikutuksesta verrattuna uramäärän vaikutukseen. Pienimmän ja suurimman nopeuden välinen ero lämmönsiirtokerroimessa on 8 kW/m²K, eli se jää alle kolmasosaan uramuutoksien aiheuttamasta vaihtelusta. Lämmönsiirtokerroimen vaihteluprofiili kannaksella pysyy likimain muuttumattomana nopeuden kasvaessa.



Kuva 43. Lämmönsiirtokerroin urasynterissä eri konenopeuksilla.

Verrattuna kahden edellisen muuttujan, uramäärän ja konenopeuden, aiheuttamiin muutoksiin lämmönsiirtokertoimessa sylinterin ulkopinnan lämpötilan vaihtelu ei näyttäisi vaikuttavan kertoimeen juuri lainkaan. Tämä voidaan nähdä kuvasta 44, jossa kaikki käyrät asettuvat melkein samaan kohtaan. Kaikkien lämpötilojen lämmönsiirtokertoimien vaihtelut pysyvät yhden yksikön sisällä. Myöskään profiilissa ei ole muutoksia lämpötilan suhteen.



Kuva 44. Lämmönsiirtokerroin urasynterissä ulkopinnan eri lämpötiloilla.

7.4 Tulosten tarkastelu

Luvun alussa esitettyjen lauhteen ja sylinterivaipan lämmönsiirtokertoimien kuvaajien perusteella voidaan todeta, että kuivatussyylinterin kokonaislämmönsiirtoon olisi helpompi vaikuttaa lauhteen kautta. Lauhdekerroksen ohentamisella tai poistamisella kokonaan saadaan huomattavasti nopeammin parannuksia lämmönsiirtokertoimeen. Tietysti paras tulos saavutettaisiin, jos sekä lauhteen että vaipan lämmönsiirto maksimoitaisiin.

Laskennassa sylinteri oikaistiin suoraksi tasoksi. Tämä aiheuttaa laskentaan virhettä, mutta tulokset ovat kuitenkin riittävässä määrin suuntaa-antavia, eli niiden perusteella voidaan tarkastella lämmönsiirtokertoimen käyttäytymistä urasyylinterissä.

Lauhdekerroksen oheneminen uramäärän kasvaessa voidaan selittää virtausmatkan avulla. Suuremmalla uramäärällä ja kapeammalla kannaksella veden kulkema matka kannakselta uraan on lyhyempi.

Lauhdekerros on paksuimmillaan kannaksen keskikohdassa, sillä vesi tarvitsee ”alamäen” virratakseen uraan. Koska kannas on mallinnettu tasaiseksi, tarvittava korkeusero muodostuu vedestä.

Sylinterin läpi menevän lämpövuon perusteella voidaan selittää sylinterin ulkopinnan lämpötilan vaikutusta lauhteeseen ja lämmönsiirtoon. Lämpövuoto pysyy vakiona, joten lauhdekerroksen lämmönsiirtokertoimen täytyy olla suurempi, jotta sylinterin sisäpinnan ja sen vaikutuksesta myös ulkopinnan lämpötila kasvaisi.

8 KANNATTAVUUSTARKASTELUT

Kuivatussylintereiden uusiminen tehokkaammiksi mahdollistaa paperikoneen nopeuden lisäämisen. Nopeuden lisääminen puolestaan kasvattaa tuotantoa ja sitä myöten tuotannosta saatavaa taloudellista tuottoa. Sylintereiden vaihtaminen aiheuttaa kuitenkin kustannuksia sekä suoraan että välillisesti. Suoria kustannuksia ovat itse sylintereistä ja vaihtotyöstä aiheutuva kustannukset. Välilliset kustannukset tulevat seisokin aikaisien tuotantomenojen kautta.

Suoritetuissa kannattavuuslaskelmissa on laskettu, kuinka paljon uusista sylintereistä aiheutuvat kustannukset saavat enintään olla, kun takaisinmaksuajaksi sallitaan enintään kaksi vuotta. Laskelmissa käytetty tuotannon lisäys on laskettu simulointimallilla, jossa tavallisen sanomalehtipaperikoneen kuivatussylintereitä on korvattu tehokkaammilla sylintereillä. Laskelmat tehtiin kuvitteelliselle paperikoneen kuivatusosalle ja tarkastelutilanteissa tehokkaammat sylinterit olivat vuorollaan jokaisessa kuudessa kuivatusryhmässä. Simulointi suoritettiin neliöpainoltaan 42 grammaisella sanomalehtipaperilla, koneen ajonopeus pyrittiin saamaan lähelle nopeutta 1600 m/min, joka on melko yleinen sanomalehtipaperikoneilla. Koneen leveydeksi valittiin 10 m.

Taulukkoon 4 on kerätty ne laskentojen tulokset, jotka tässä yhteydessä ovat mielenkiintoisimmat. Perusnopeudeksi laskennoissa muodostui noin 1500 m/min laskentaohjelman tarvitsemista määreistä johtuen.

Taulukko 4. Tehokkaampien sylintereiden sijainnin vaikutus nopeuteen.

TAPAUS	perus	1. ryhmä	2. ryhmä	3. ryhmä	4. ryhmä	5. ryhmä	6. ryhmä	3. & 4. ryhmät
nopeus (m/min)	1507,5	1520,6	1530,2	1531,9	1539,2	1536,5	1536,7	1563,8
nopeuden kasvu (%)		0,9	1,5	1,6	2,1	1,9	1,9	3,7

Tuloksista huomataan, että suurin vaikutus nopeuteen saavutetaan, kun neljännen kuivatusryhmän kuivatussylinterit vaihdetaan tehokkaammiksi. Vertailun vuoksi taulukkoon on otettu mukaan myös tapaus, jossa sekä kolmannen että neljännen ryhmän sylinterit uusitaan.

Paras vaikutus saadaan neljännessä ryhmästä, koska siinä vaiheessa paperin kuivuminen on normaalistikin tehokkainta, ja kun kuivuminen tehostuu entisestään, myös nopeutta voidaan kasvattaa eniten.

Vaikka nopeudet nousivatkin uusien sylintereiden myötä, kasvut jäivät odotettuja pienemmiksi. Osasy tähän voi olla simulointimallissa, joka vaati monenlaisia

parametreja sekä korjauskertoimia niille, jotta lähtöarvot saatiin oikeiksi. Suurempien nopeuksien nousujen jäätyä toteutumatta oli syytä tarkastella uudelleen kokonaislämmönsiirtokertoimen muodostumista. Nämä tulokset löytyvät taulukosta 5, johon on laskettu kokonaislämmönsiirtokertoimia eri lauhteenpaksuuksilla. Kuten luvuista huomataan, lauhteen lämmönsiirtokertoimen kuusinkertaistuminen ei paranna kokonaislämmönsiirtokerrointa kuin neljäsosan.

Taulukko 5. Lauhteen lämmönsiirtokertoimen vaikutus kokonaislämmönsiirtokertoimeen.

d_lauhde	0,3	0,08	0,055	mm
alpha_lauhde	2546	8848	12743	W/(m2K)
alpha_vaippa	1500	1500	1500	W/(m2K)
alpha_kontakti	1960	1960	1960	W/(m2K)
alpha_kokonais	637	775	797	W/(m2K)
alpha_kokonais kasvu		22	25	%

Seuraavassa on tehty laskelmia tätä investoinnin taloudellista puolta varten. Paperikoneen vuosittainen keskimääräinen ajoaika on noin 8000 tuntia. Tämän lisäksi laskennassa käytettiin luvun alussa kerrottuja paperin neliömassaa sekä koneen leveyttä. Sanomalehtipaperin hintana oli 537 euroa per tonni /2/. Nopeudet saatiin simulointituloksista. Taulukkoon 6 on koottu saadut tulokset kussakin simuloinnissa käsitellyissä tapauksessa. Massana ilmoitetut tuotot ovat ilmoitettu tonneina ja rahana ilmoitetut tuhansina euroina.

Taulukko 6. Nopeuden kasvusta tulevat tuoton lisäykset.

TAPAUS	perus	1. ryhmä	2. ryhmä	3. ryhmä	4. ryhmä	5. ryhmä	6. ryhmä	3. & 4. ryhmät
nopeus (m/min)	1 507,50	1 520,60	1 530,20	1 531,90	1 539,20	1 536,50	1 536,70	1 563,80
tuotto (t)	607 824	613 106	616 977	617 662	620 605	619 517	619 597	630 524
tuoton lisä (t)		5 282	9 153	9 838	12 781	11 693	11 773	22 700
tuoton lisä (teur)		2 838	4 917	5 285	6 866	6 281	6 325	12 195

Kuten taulukosta nähdään, kahden vuoden aikana uusilla sylintereillä saadut rahalliset tuotannon kasvut vaihtelevat vajaasta kolmesta miljoonasta reiluun 12:een miljoonaan. Tässä on siis rajat uudistusinvestoinnista aiheutuville suorille ja välillisille kuluille. Näihin kuluihin ei kuitenkaan tämän työn puitteissa perehdytä.

Laskelmien mukaan tehokkaammalla sylinterillä saatiin siis nostettua kuvitteellisen paperikoneen nopeutta ja sitä myöten taloudellista tuottoa, mutta mietittäväksi jää, onko tuo kasvu riittävä uusinnan kustannuksiin nähden.

9 SYLINTERIKUIVATUKSEN TEHOSTAMISPOTENTIAALI

Lämmönsiirron maksimoimiseksi kuivatussyylinterissä tulisi sekä lauhteen että vaipan lämmönsiirtokertoimet saada mahdollisimman suuriksi. Vaipan lämmönsiirtokertoimeen voidaan vaikuttaa vain höyryn ja paperin välimatkaa pienentämällä. Tämä voidaan toteuttaa ainoastaan ohentamalla sylinterin vaippaa tai jonkinlaisella kanavaratkaisulla, eli sylinterin konstruktio muuttuisi täysin. Lauhdekerroksesta aiheutuvan lämpövastuksen minimoimiseen paras tapa olisi poistaa lauhdekerros kokonaan. Eräs tapa tähän voisi olla aikaisemmin tarkasteltu urasyylinteri.

Vaipan ohentaminen tulee kuitenkin olemaan suurempi operaatio kuin lauhdekerroksen ohentaminen. Jos sylinteristä halutaan ohutseinämäinen, tulee sen konstruktio muuttumaan täysin. Tällainen uuden konstruktion kehittäminen on pitkä ja vaativa prosessi. Lauhdekerrosta puolestaan voidaan ohentaa tietyin konstruktiiivisin keinoin myös nykyisen kaltaisissa sylintereissä kohtalaisen pieninkin muutoksilla. Nämä muutokset pystyttäisiin ehkä toteuttamaan huomattavasti nopeammin kuin koko konstruktion uudelleensuunnittelu.

Erityisen paljon huomiota kiinnitti lauhdekerroksen paksuuden vaikutus lämmönsiirtoon sylinterissä. Jos lauhdekerros saataisiin äärettömän ohueksi, sylinterin kokonaislämmönsiirto paranisi huomattavasti. Jatkokehitystarpeita ovat ehdottomasti sellaisten konstruktioiden ja lauhteenpoistomenetelmien hakeminen, joilla lauhdekerros sylintereiden sisällä saadaan mahdollisimman ohueksi.

Urasyylinterille tehtyjen lämmönsiirtotarkasteluiden tulokset näyttävät erittäin lupaavilta. Erityisesti lämmönsiirtokertoimen huima parantuminen vain pienillä muutoksilla nykyiseen sylinteriin oli suurempi yllätys kuin odotettiin. Lisätutkiminen on urasyylinterin parissa tarpeen. Laskenta suoritettiin vain yhdenkokoisella uralla, joten jatkotutkimuksissa voisi tarkastella ainakin uran koon vaikutusta. Urille tulisi myös löytää optimi lukumäärä lämmönsiirtokertoimen maksimoimiseksi sylinterin kestävyuden kuitenkaan kärsimättä. Tarkasteluissa oli kohteena sylinteri poikkisuunnassaan, joten urasyylinterille tulisi suorittaa myös aksiaalissuuntainen tarkastelu lauhteen käyttäytymisestä.

Urasyylinterin lisäksi ohutseinämäisen sylinterin kehittämisessä on potentiaalia. Ratkaistava pääongelma on lämpötilan epätasainen jakautuminen johtuen sisäisistä jäykisteistä. Liittyen menetelmään, jossa seinämän ohentaminen tehdään kanavaratkaisujen avulla, tulisi tutkia lauhteen käyttäytymistä kanavissa: Liikkuuko lauhde oletetulla tavalla ja poistuuko se kanavista höyryn avustuksella höyryn kulkusuuntaan.

Kustannustarkasteluja tehtäessä tarvittiin kuivatussimuloinnilla saatavia tuloksia. Hankaluudeksi muodostui oikeanlaisen simulointiohjelman löytäminen. Olemassa olevista ohjelmista ei meinannut löytyä sellaista, jossa olisi mahdollisuus muuttaa sylinterin lämmönsiirtokertoimia. Tarvittava ohjelma kuitenkin löytyi ja tulokset saatiin laskettua. Ohjelman käyttö kuitenkin vaati erinäisiä kertoimien korjauskertoimia, ja epäselväksi jäi, miten saadut tulokset todella muodostuvat. Tämän diplomityön aiheen ulkopuolisena jatkokehitystarpeena olisikin kuivatussimuloinnin selkeyttäminen.

Koko tämän selvitystyön taustalla on osaltaan kustannusten säästäminen, kuten nykyään monissa projekteissa. Tämän takia olisi hyvä löytää myös parannusvaihtoehto, jolla voitaisiin hyödyntää vanhoja sylintereitä, jolloin kuivatuksen tehostaminen voitaisiin tehdä mahdollisimman edullisesti. Olisikin syytä tutkia myös tehokkaampien sylinterirakenteiden valmistettavuutta ja niiden kustannuksia.

LÄHTEET

1. Evolution im Bereich der Trockensiebe. Wochenblatt für papierfabrikation. (2006)14–15, pp. 834–838.
2. FOEX Indexes Ltd. Latest PIX values with comments [WWW]. [Viitattu 29.3.2007]. Saatavissa: <http://www.foex.fi/default.asp?navigate=home2.asp>.
3. Heikkilä, P., Paltakari, J. Fundamentals of paper drying. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 54–83.
4. Heikkilä, P., Timofeev, O., Kiiskinen, H. Multicylinder drying. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 84-125.
5. Häggblom-Ahnger, U., Komulainen, P. Paperin ja kartongin valmistus. Helsinki 2000, Opetushallitus. 280 s.
6. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. Second edition. New York 1985, John Wiley & Sons, Inc. 802 p.
7. Juppi, K., Komulainen, A. Suullinen tiedonanto. 19.3.2007.
8. Kadant Johnson. Turbulator Tube Bars, pdf-tiedosto [WWW]. [Viitattu 29.3.2007] Saatavissa: http://www.kadantjohnson.com/data/pdf/bulletins_flyers/TTB_1000.pdf.
9. Kiiskinen, H., Paltakari, J., Pakarinen, P. Drying and paper quality. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 332-368.
10. Kiviranta, A., Lehtinen, J., Talja, R., Retulainen, E. Drying of paper board and packaging grades. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 186-207.
11. Klerelid, I. Drying of tissue. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 145-185.
12. KnowPap 8.0. Paperitekniiikan ja automatiikan oppimisympäristö.
13. Krischer, O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag. Berlin, 1956. 400 s.

14. Kuhasalo, A., Niskanen, J., Paltakari, J., Karlsson, M. Introduction to paper drying and principles and structure of a dryer section. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 14-53.
15. Lehtinen, J. Paper machine drying: A continuing demand for improvements in web properties, runnability and energy usage causes efforts for basic studies, simulations, and experiments. Finland 1990, Tampella Ltd. Julkaisematon. 61 s.
16. Leskelä, M., Simula, S. Transport phenomena. In: Niskanen, K. (ed.). Paper Physics. pp. 285-315.
17. Metso Paper. The Metso Yankee Dryer and Advantage™ AirCap™. Brochure. 2006.
18. Multiport 1. Design and demonstration of multiport cylinder dryers.
19. Multiport 2. Revolutionary retrofit design can boost production by 20% to 50%. Argonne National Laboratory.
20. Nelson, M. Drying section upgrade cuts steam/energy use. PaperAge 118(2002)7, pp. 26-29.
21. Pat. DE 202005020589U. Beheizter Zylinder. Voith Paper Patent GmbH, Heidenheim. Hak.nro DE 200520020589U, 13.05.2005. (20.04.2006). 7 s.
22. Pat. US 6397489 B1. Multiport cylinder dryer with low thermal resistance and high heat transfer. The University of Chigago, Chigago. Hak.nro US 20000648693, 25.08.2000. (04.06.2002).
23. Pat. WO 2006072508. Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung und/oder Veredelung einer Faserstoffbahn. Voith Paper Patent GmbH, Heidenheim. Hak.nro WO 2005EP56166, 23.11.2005. (13.07.2006).
24. Pat. WO 2006120121A2. Trockenzyylinder. Voith Paper Patent GmbH, Heidenheim. Hak.nro WO2006EP61868, 27.04.2006. (16.11.2006).
25. Pudas, J. Steam and condensate systems. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 233–292.
26. Pulkowski, J. H., Wedel, G. L. Effect of spoiler bars on dryer heat transfer. Pulp & Paper Canada. 89(1988)8, pp. 258–263.

27. Soininen, M. Paperikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmät. Teoksessa: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus Osa 2. Toinen painos. Turku 1983, Suomen Paperi-insinöörien yhdistys r.y. s. 811–829.
28. Soininen, M. Paperirainan kuivatus. Teoksessa: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus III Osa 1. Toinen painos. Turku 1983, Suomen Paperi-insinöörien yhdistys r.y. s. 641–703.
29. Stenström, S., Ingvarsson, D. Turbulens och värmeöverföring I kondensat I torkcylindrar vid högä g-krafter. Fas 1. Stockholm 2005, Värmeforsk Service AB. 64 s. + bilagor 29 s.
30. Sundqvist, H., Kiiskinen, H. Air impingement drying. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 126–144.
31. Sundqvist, H. Dryer section ventilation and heat recovery. In: Karlsson, M. (ed.). Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä 2000, Fapet Oy. pp. 293–331.
32. Talja, R. Julkaisematon materiaali. 2007.