

Joona Saari

# PAPERIKONE 1:N HUUVAN OPTIMOINTI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Syyskuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Joona Saari: Paperikone 1:n huuvan optimointi  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Syyskuu 2019

---

Paperikoneella paperirata kuivataan mekaanisella puristuksella ja haihduttamalla. Haihdutukseen tarvittava lämpö välitetään paperiradalle paperin molemmille puolille: paperin alapintaan johtamalla höyryn tuomaa energiaa kuivaussylinterin lävitse ja paperin yläpintaan kuuman ilman muodossa. Mäntän tehtaalla on havaittu, että heidän paperikoneellaan ajoarvot ovat sellaiset, että poistoilman määrä on paljon suurempi kuin saapuvan palamisilman. Epätasapainon johdosta sali-ilmaa imetään poistoilmakanaviin, mikä taas laskee poistoilman lämpötilaa. Suuri osa poistoilmasta palautetaan takaisin polttimille, joten poistoilman tulee olla mahdollisimman kuumaa energiatehokkuuden näkökulmasta.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää puhaltimien ajoarvot valituille paperilaaduille siten, että huuvan paineisuus on optimaalinen. Lisäksi työn tavoitteena oli luoda optimointityökalu, jolla voidaan optimoida myös muut paperilajit.

Työssä perehdyttiin aineen- ja lämmönsiirron teoriaa kirjallisuuskatsauksella vaaditussa laajuudessa. Nykyiset ajoarvot selvitettiin mittaamalla ja laskemalla saaduista mittaustuloksista. Kirjallisuus selvityksessä saatujen rajoitusten avulla pystyttiin mittauksista löytämään erinäisiä virheitä kiinteissä antureissa ja huuvan ohjaimissa. Lisäksi kirjallisuus selvityksen perusteella pystyttiin osittain selittämään energiahäviöitä prosessissa.

Mittaustulosten perusteella laadittujen ajoarvojen avulla saatiin paperikoneen puhaltimille ajoarvot, joilla huuva on tasapainossa. Tällöin ylimääräistä ilmaa ei kulkeutunut poistoilmakanavaan sali-ilmasta, eikä kuuma ilma päässyt karkaamaan sali-ilmaan. Uusilla ajoarvoilla energian kulutusta polttimilla pystyttiin vähentämään 11 %. Optimoinnin jatkokehityksenä huomattiin, että optimointi voidaan jatkossa suorittaa automaattisesti, mikäli koneelle lisätään virtaus- ja lämpötila-anturi palamis- ja poistoilmakanavaan. Näiden lisäksi on otettava huomioon tuotannossa olevan paperin neliöpaino, jotta voidaan estimoida syntyvän vesihöyryn määrä.

Asetettuun tutkimuskysymykseen: onko mahdollista löytää puhaltimille tuotekohtaiset ajoarvot siten, että huuva on tasapainossa, vastattiin onnistuneesti. Valituille paperilaaduille saatiin selvitettyä puhaltimien optimaaliset ajoarvot. Lisäksi työn ohessa on luotu optimointi Excel-tiedostolla, jolla voidaan kokeellisesti optimoida myös muut paperilaadut. Optimointityökalun lisäksi havaittiin potentiaalinen mahdollisuus automaattiseen optimointiin mittariston avulla.

Avainsanat: paperikone, huuvan optimointi, ainetase, energiatase

Tämä julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Joona Saari: Optimization of paper machine 1 hood  
Master's Thesis,  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
September 2019

---

In a paper machine, the paper web is dried by mechanical pressing and evaporation. The heat required for evaporation is transmitted to the paper web on both sides of the paper, by conduction of the energy supplied by steam through the dryer cylinder, into the upper surface of the paper in the form of hot air. At the Mänttä mill, it has been found that the running values of their paper machine are such that the amount of exhaust air is much higher than the incoming combustion air. Due to the imbalance, the hall air is sucked into the exhaust air ducts, which in turn lowers the exhaust air temperature. Most of the exhaust air is returned to the burners, so the exhaust air should be as hot as possible from an energy efficiency point of view. The purpose of this work is to determine the driving values of the blowers for the selected paper types so that the hood pressure is optimal. In addition, the aim was to create an optimization tool that can be used to optimize other paper types.

The paper reviewed the literature review of mass and heat transfer theory to the required extent. The current running values were determined by measuring and calculating the results obtained. Based on the heat and mass transfer, various errors could be found in the measurements on fixed sensors and hood air guides. In addition, the literature study partially explained the energy losses in the process.

The run values based on the measurement results were used to determine the run values for the paper machine to control hood balance. In this case, excess air didn't enter the exhaust air duct from the hall air, and hot air couldn't escape into the hall air. The new running values were able to reduce the energy consumption of the burners by 11%. As a further development of the optimization, it was found that further optimization can be performed automatically if the flow and temperature sensors are added to the combustion and exhaust air ducts. In addition, the basis weight of the paper in production must be considered in order to estimate the amount of water vapor generated.

The research question posed: is it possible to find drive values for the fans so that the hood is balanced, was answered successfully. The optimal run values of the fans were determined for the selected paper grades. In addition to this, an optimization excel file has been created to experimentally optimize other paper grades. In addition to the optimization tool, a potential opportunity for automatic optimization through the instrument cluster was discovered.

Keywords: Paper machine, hood optimization, mass transfer, energy transfer

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu Metsä Tissue Mäntän pehmopaperikone 1:n huuvalle. Työssä käsitellään paperikone 1:n kuivatuksen optimointia energia- ja ainetaseen avulla. Lisäksi työn ohessa on laadittu Excel laskentatiedosto, joka laskee energia- ja ainetaseen mittaustulosten perusteella. Työ on tehty Mäntässä Metsä Tissue paperitehtaassa tammikuun 2019 ja elokuun 2019 välisenä aikana.

Haluan kiittää erityisesti Metsä Tissue:ta erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta työstä. Lisäksi haluan kiittää ohjaajiani, professori Jukka Konttista, Insinööri Jyrki Leppäahoa ja Risto Savonmäkeä. Jukka Konttinen toimi yliopiston puolelta työni ohjaajana ja antoi minulle erittäin hyvin ohjaavia neuvoja, jotta työ saadaan pidettyä tarpeeksi kompaktina. Lisäksi Jukka huolehti, että työ pysyy aikataulussa, vaikka työ tehdäänkin muun työn ohessa. Erityiskiitos myös Jyrki Leppäaholle, joka osasi valita haastavan ja erittäin mielenkiintoisen tutkimuksen. Aiheen esittelyn lisäksi Jyrki toimi tiiviissä yhteistyössä työn kanssa, osasi haastaa laatimiani oletuksia ja todensi saatuja tuloksia vuosittaisista energiakäyttöraporteista. Iso kiitos myös Risto Savonmäelle, joka toimi toisena ohjaajanani työssä yrityksen puolelta. Riston vankasta kokemuksesta paperi- ja höyrytekniikan saralla oli hyötyä tekniikan kehittymisen ja höyryjärjestelmän tarkasteluissa.

Usean vuoden opiskelun jälkeen olen erittäin onnellinen siitä, mitä kaikkea olen saanut kokea ja oppia näiden vuosien varrella. Olen todella kiitollinen myös perheelleni. Ilman vanhempieni antamaa kasvatusta, en luultavasti olisi pystynyt saattamaan työtä valmiiksi. Lopuksi haluan kiittää avopuolisoani Sonjaa, joka oli ymmärtäväinen ja tukenani koko työn ajan ja osasi motivoida minua työn loppuun saattamiseksi.

Tampereella, 30.9.2019

Joona Saari

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SUOMEN METSÄTEOLLISUUS .....	2
3. PAPERIN VALMISTUS .....	3
3.1 Massan käsittely .....	3
3.2 Paperikoneen toiminta .....	9
4. LÄMMÖNSIIRTO .....	14
4.1 Jenkkisylinterin lämmönsiirto .....	14
4.1.1 Lämmönsiirtovastukset .....	15
4.1.2 Kokonaislämmönsiirtokerroin .....	17
4.1.3 Sylinterin seinämän vahvuus .....	18
4.1.4 Lämpötilaero .....	20
4.2 Huuvan lämmönsiirto .....	21
4.2.1 Lämmönsiirtokerroin .....	22
4.2.2 Lämpötilaero .....	24
4.2.3 Lämmönsiirto säteilemällä .....	24
5. AINEENSIIRTO .....	26
5.1 Haihdutustehoon vaikuttavia tekijöitä .....	26
5.2 Paperiradan kuivatusvaiheet .....	27
5.3 Ominaishaihdutusnopeus .....	28
5.4 Aineensiirtokerroin .....	29
6. PAPERIKONE 1:N HUUVA .....	31
6.1 Huuvan muuttajat .....	31
6.2 Ainetase .....	33
6.3 Energiatase .....	34
6.4 Savukaasuanalyysi .....	37
6.5 Koneen huuvan ilmankierron optimiarvojen määrittäminen .....	39
6.6 Laskentatyökalu .....	41
7. PAPERIKONE 1:N MITTAUKSET .....	42
7.1 Mittauslaitteisto ja mittauspisteet .....	42
7.2 Psykometrinen mittaus .....	46
7.3 Nopeuden määrittäminen .....	50
7.4 Huomiot mittauksista .....	52
7.5 Herkkyystarkastelu .....	53
7.6 Laskentatyökalun parametrit .....	54
8. TULOKSET .....	56
8.1 Mittaustulosten tarkastelu .....	56
8.1.1 Vesitaseen tarkastelu .....	64

8.1.2 Kokonaisilmataseen tarkastelu.....	65
8.1.3 Energiataseen tarkastelu .....	68
8.2 Herkkyystarkastelu.....	71
8.3 Taloudellinen säästö optimiarvoilla ajettaessa.....	71
9. YHTEENVETO.....	73
LÄHTEET .....	75

Liite A: H-S piirros

Liite B: Paperilaatujen ajoarvot

Liite C: Savukaasuanalyysi

Liite D: Mittauspöytäkirjat

Liite E: Käytetty muuttuja x

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Kartiojauhin, muokattu lähteen mukaan (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003) .....	4
Kuva 2. Virtaukset lyhyessä kierrossa (KnowPap, lyhyt kierto) .....	7
Kuva 3. Ilmanpoiston prosessin kuva (KnowPap, ilman ja epäpuhtauksien poistaminen) .....	8
Kuva 4. Perälaatikon geometria estää painepulssien siirtymisen viiralle. (KnowPap, sakeus ja painepaihteluiden minimointi) .....	9
Kuva 5. Tasoviira (KnowPap, tasoviira) .....	10
Kuva 6. Kitaformerit (KnowPap, viiraosa) .....	11
Kuva 7. Puristinosa vedenpoisto (KnowPap, puristinosa) .....	12
Kuva 8. Jenkkisynterin poikkileikkaus (Convergence Training, 2012) .....	14
Kuva 9. Paperikoneilla mitattu kosteuspoitoisuuden suhde lämmönläpäisykertoimeen (muokattu Sundberg T, 1968) .....	16
Kuva 10. Paperiradassa veden ja höyryn liikesuunnat kuivatuksen aikana .....	16
Kuva 11. Paperin huokoisuuden vaikutus lämmönläpäisyyteen, muokattu lähteen mukaan (Janson-Herminge, 1969) .....	17
Kuva 12. Rajakerros paperiradan pinnalla (Karlsson, 2012, s. 58) .....	21
Kuva 13. Huuvan ilmakierto jenkkisynterä vasten .....	22
Kuva 14. Kosteusosuuden ja paperin lämpötilan kehitys kuivumisajan funktiona, muokattu lähteen mukaan (Karlsson, 2012, s. 47) .....	27
Kuva 15. Lämmöntalteenotossa palamisilma kuumennetaan poistoilmalla .....	32
Kuva 16. Paperikone 1:n ilmankiertoprosessikuva .....	33
Kuva 17. Pumpun tehon suhde tilavuusvirtaan .....	40
Kuva 18. Vasemmassa kuvassa esitetty U-putki manometri. Oikeassa kuvassa esillä mittauksissa käytetty Pitot-putki .....	42
Kuva 19. Mittauksissa käytetty painemittari .....	43
Kuva 20. Mittauksissa käytetty lämpötilamittari .....	44
Kuva 21. Märänpään palamisilman kanavan mittauspiste .....	45
Kuva 22. Mittauspisteet kanavassa .....	45
Kuva 23. Kanavan mittauspisteeseen kiinnitettävä korkki .....	46
Kuva 24. Pitot-putken rakenne (Ezzeddine, Schutz; & rezq, 2019, ss. 7-15) .....	51
Kuva 25. Osa käyttöliittymän näkymästä .....	54
Kuva 26. Massavirtaukset 23.3. mittauksissa x kertoimella ilmoitettuna .....	57
Kuva 27. Jenkkisynterin kierrosnopeuden ja polttimien sekä poistoilman lämpötilan muutos hetkellisen alasajon aikana .....	59
Kuva 28. Polttoaineen kulutuksen vaikutus polttimen lämpötilaan .....	61
Kuva 29. Märänpään polttimen lämpötilan vaikutus poistoilmapuhalttimeen ja poistoilman lämpötilaan .....	62
Kuva 30. Polttimen lämpötila ja jenkkisynterin paine katko tilanteessa .....	63
Kuva 31. 15.5 Mittaustulosten vesitase, jossa huuva imee vesihöyryä ilmasta. ....	64
Kuva 32. 6.6. Mittaustulosten vesitase, jossa sali-ilmaan karkaa vesihöyryä .....	65
Kuva 33. 27.3. Mittaustulos, jossa näkyy tyypillistä ilmatasetta .....	66
Kuva 34. 15.5. Mittaustulos, jossa näkyy alipaineinen huuvan kokonaisilmatase .....	67
Kuva 35. 6.6 Mittausten perusteella yksinkertaistettu energiatase tarkastelu .....	68
Kuva 36. Märän- ja kuivanpään polttimien energiatase .....	69
Kuva 37. Huuvajasyntemien energiatase .....	70
Kuva 38. Polttoaineen kulutus 15.5. ja 6.6. ....	72

# TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Butaanin koostumus.....</i>	<i>37</i>
<i>Taulukko 2. Savukaasuanalyysi butaanille.....</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 3. 27.3. Suoritettujen mittausten tulokset.....</i>	<i>58</i>



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$a_i$	kokeellisesti määritetty vakio
$A$	sylinterin kokonaispinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$A_h$	huuvan suuttimilla varustetun osan pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$A_k$	kanavan putken poikkipinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$B$	termodynaaminen arvo psykometriselle mittaukselle [(kg·Pa) / J]
$C_f$	rajakerroksen kitkakerroin
$c_p$	aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/(kg·K)]
$d$	sylinterin seinämän paksuus [m]
$d_{syl}$	sylinterin halkaisija [m]
$\varepsilon_p$	paperipinnan emissiivisyys
$\varepsilon_h$	huuvan pinnan emissiivisyys
$E_h$	huuvan mustan pinnan emissiviteettiteho
$E_p$	paperin mustan pinnan emissiviteettiteho
$F_{ph}$	näkyvyyskerroin paperin ja huuvan välillä
$\varphi$	suhteellinen kosteus
$g$	gravitaatiovakio [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$h_i$	valitun pisteen entalpia [kg/kJ]
$h_g$	höyrystymisen latenttilämpö [J/kg]
$h_{h-s}$	höyryn ja sylinterin välinen lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$h_{s-i}$	sylinterin ja ilman välinen lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$h_{s-p}$	sylinterin ja paperin välinen lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\dot{m}_{höyry}$	höyrystyvän vesihöyryn massavirta [kg/s]
$\dot{m}_i$	valitun pisteen massavirta [kg/s]
$m_{ilma}$	ilman massa [kg]
$m_{vesi}$	veden massa [kg]

$M_{ilma}$	ilman moolimassa [g/mol]
$M_{vesi}$	veden moolimassa [g/mol]
$\eta$	paineastian varmuuskerroin
$\lambda$	sylinterin lämmönjohtavuus [W/(m·K)]
$l$	sylinterin leveys [m]
$n$	sylintereiden lukumäärä
$n_i$	vakio
$L_{kr}$	virtauksen karakteristinen mitta [m]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti [Pa·s]
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti [m <sup>2</sup> /s]
$Nu$	Nusseltin luku
$p_{ilma}$	ilmanpaine [Pa]
$p_k$	kokonaispaine [Pa]
$p_{max}$	sylinterin suurin sallittu paine [Pa]
$p_{tod.sat}$	todellinen ilmaseoksen saturaatiopaine [Pa]
$p_{sat(kuiva)}$	kuivan kankaan lämpötilasta laskettu saturaatiopaine [Pa]
$p_{sat(märkä)}$	märän kankaan lämpötilalla laskettu saturaatiopaine [Pa]
$p_s$	staattinen paine [Pa]
$p_{vesi}$	veden paine [Pa]
$Pr$	Prandtin luku
$\dot{Q}$	kokonais lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_h$	höyryn siirtämä lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_{h-p}$	höyrystä paperiin siirtynyt lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_i$	ilmaan siirtyvä lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_k$	Konvektiivinen lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_p$	paperiin siirtyvä lämpöenergia [W]

$\dot{Q}_s$	siirtynyt lämpöenergia sylinterin yli [W]
$\dot{Q}_r$	säteilemällä välittyvä lämpöenergia [W]
$\dot{Q}_{ulos}$	sylinteristä poistuva lämpöenergia [W]
$R$	yleinen kaasuvakio [J/(K·mol)]
$Re$	Reynoldsin luku
$R_h$	huuvan resistiivisyys
$R_n$	näkyvyyskertoimen resistiivisyys
$R_p$	paperipinnan resistiivisyys
$R_r$	lämmönsiirto vastukset
$\rho$	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$St$	Stantonin luku
$St_m$	Stantonin luku massansiirrossa
$\tau$	seinämän leikkausjännitys [N/m <sup>2</sup> ]
$T_h$	höyryn lämpötila [K]
$T_I$	ilman lämpötila [K]
$T_i$	valitun pisteen lämpötila [°C]
$T_k$	kuivan kankaan lämpötila [°C]
$T_{kastepiste}$	kastepisteen lämpötila [°C]
$T_m$	märän kankaan lämpötila [°C]
$T_p$	paperiradan lämpötila [K]
$T_{ref}$	referenssi lämpötila [K]
$T_{sp}$	sylinterin sisäpinnan lämpötila [K]
$T_{seos}$	ilmaseoksen lämpötila [K]
$T_{up}$	sylinterin ulkopinnan lämpötila [K]
<b>TAPPI</b> -menetelmä	kuivausnopeuden määrittäminen menetelmä
$\theta$	paperiradan osuus sylinterin pinta-alasta
$\delta$	sylinterin seinämän jännitys [N/m <sup>2</sup> ]

$\sigma$	Stephan-Boltzmanin vakio
$U$	jenkkisynterin kokonaislämmösiirtokerroin [W/(m·K)]
$v_n$	virtauksen nopeus [m/s]
$V$	tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$W$	sekoitussuhde
$W1$	paperiradan kosteus osuus pisteessä 1
$W2$	paperiradan kosteus osuus pisteessä 2
$z_1$	korkeus pisteessä 1 [m]
$z_2$	korkeus pisteessä 2 [m]

# 1. JOHDANTO

Metsä Tissue Mäntän paperitehtaalla valmistetaan pehmopaperia kolmella koneella. Paperin valmistus vaatii suuren määrän energiaa, josta iso osa kuluu paperin kuivatukseen. Mäntän tehtaalla on havaittu, että paperikonetta ajetaan alipaineisena, jolloin energiaa kulutetaan kylmän ilman lämmittämiseen. Polttimien polttoaineena käytetty butaani tuo epäpuhtauksia prossiin, minkä johdosta optimointi täytyy suorittaa butaanin asettamin rajoituksin. Koneita on pyritty lähihistoriassa optimoimaan useiden henkilöiden toimesta, mutta tuloksena saadut ajoarvot eivät ole olleet ajokelpoisia.

Työn tavoitteena on löytää paperikone 1:n huuvan puhaltimille tuotekohtaiset ajoarvot, joilla huuvan tasapainossa. Tarkasteluna käytettiin aine- ja energiatasetta. Tutkimuskysymykseksi työlle laadittiin: onko mahdollista löytää puhaltimille tuotekohtaiset ajoarvot siten, että huuva on tasapainossa? Toisena tavoitteena työlle oli laatia laskentatyökalu, joka laskee aine- ja energiataseen jokaiselle paperilaadulle. Taseiden perusteella pystytään määrittämään kokeellisesti paperilaaduille optimiajoarvot.

Työssä keskitytään paperin kuivatusprosessiin, jossa optimointi keskittyy huuvan puhaltimien toimintaan. Jenkkisylinterin optimointia ei työssä tarkastella, sillä sylinterin rakenteelliset rajoitteet eivät salli suurempia kuormia. Ainetaseen optimoinnissa on huomioitu, että huuvan ainetase ei saa missään tilanteessa kääntyä negatiiviseksi. Tällöin huuva olisi alipaineinen ja altistaisi työntekijät polttavalle ilmalle jenkkisylinterin lähellä. Polttoaineen asettamat rajoitukset ovat butaanin tuomat raskashiilivedyt. Näiden poistaminen vaatii suurta yli-ilmaa, jonka seurauksena palamisilmakerrointa ei voida optimoida prosessille. Liian pienellä ilmakertoimella poltettu butaani muodostaa kuumia laavamaisia kerroksia polttimille, jotka tämän seurauksena lopulta tukkeutuvat. Yli-ilman hienosäätöä ei suoriteta, sillä polttoaine vaihtuu nestemäiseen maakaasuun kesäkuussa 2019.

## 2. SUOMEN METSÄTEOLLISUUS

Metsäteollisuuden vaikutus Suomen teollisuuden kehittämisessä on ollut merkittävä. Modernin metsäteollisuuden voidaan katsoa alkaneeksi 1860-luvulla, jolloin paperi alettiin valmistamaan Suomessa useissa eri kohteissa. Metsäteollisuudella tarkoitetaan puun muuttamista teollisuuden avulla kaupalliseksi tuotteeksi. 1940-luvun loppupäässä Suomen metsäteollisuudessa otettiin suuri harppaus eteenpäin, kun sotakorvausten vauhdittamana Suomi ryhtyi valmistamaan myös paperikoneita. (Metsäteollisuus, 2007)

Vuonna 2018 metsäteollisuus käytti raakapuuta 73,6 miljoonaa kuutiometriä, joka oli 6 % suurempi kuin vuoden 2017 kulutus (Luonnonvarakeskus, 2019). Metsäteollisuus on ollut viime aikoina osana poliittista vääntöä, sillä metsänhakkuut vähentävät Suomen hiilinieluja. Luonnonvarakeskus mukaan kestävän kehityksen hakkuurajaksi on määritetty 81 miljoonaa kuutiota vuosiksi 2011-2020. Puun käyttöä voidaankin tulevana vuosina vielä nostaa ilman, että se ylittäisi kestävän kehityksen rajaa. (Luonnonvarakeskus, 2015)

Suomen bruttokansantuotteesta vuonna 2016 metsäteollisuus oli toiseksi suurin teollisuuden aloista (Suorsa, 2017). Metsäteollisuuden osuus kaikista vientituotteista oli 20 %, joista 56 % oli paperi ja kartonki tuotteita (Luonnonvarakeskus, 2018). Paperin ja kartongin tuotanto määrä vuonna 2018 oli 10,5 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä paino- ja kirjoituspaperin osuus oli 52 %, kartongin osuus 36 % ja muun paperin, kuten pehmopaperin, osuus 12 % (Suorsa, Paperin ja kartongin tuotantokehitys, 2019). Hienopaperin kysyntä on kuitenkin ollut viime aikoina laskusuuntainen ja kartongin kysyntä on noussut, minkä johdosta Varkaudessa Stora Enso on muuntanut paperikoneen kartonkikoneeksi vuonna 2015. Lisäksi Stora Enso on aloittanut vastaavat muutostyöt Oulun paperitehtaalla vuonna 2019. (Valmet, 2019)

## 3. PAPERIN VALMISTUS

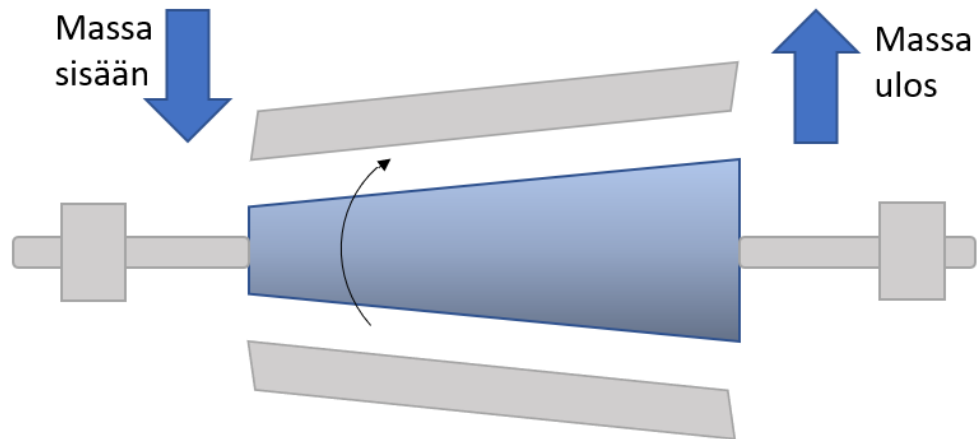
### 3.1 Massan käsittely

Paperikoneen toiminta lähtee liikkeelle kuitumassan käsittelystä paperikoneelle sopivaksi. Tyypillisesti massojen käsittely suoritetaan kolmelle eri massalle, joita ovat tuore sellumassa, hylkymassa ja uusiomassa. Massankäsittelyn tehtävinä on lisäaineiden anostelu ja mekaanisen ja kemiallisen massan jauhatus sekä hajotus. Kemiallisella massalla tarkoitetaan massaa, joka on valmistettu puusta kuiduttamalla kemikaalien avulla, kuten sellu. Mekaanisella massalla tarkoitetaan massaa, joka saadaan puusta hiertämällä tai hiomalla. Massa toimitetaan paperikoneille massan käsittelyyn joko paaleina tai massan ja veden seoksena putkistoa pitkin.

Paperikoneilla tuoremassa hajotetaan aluksi pulpperissa pieniksi kuitupaloiksi, jotka jatkokäsittellään kuiduttimella yksittäisiksi kuiduiksi. Massa saostetaan veteen pulppereissa siten, että sen massaosuus on tyypillisesti 4 – 6 %. Pulpperit ovat isoja säiliöitä, joiden tarkoituksena on rikkoa kuitusulput ja saostaa seos haluttuun massaosuuteen. Rikkominen tapahtuu suuren roottorin avulla, joka sijaitsee yleensä pulpperin pohjalla. Pulpperi ei kuitenkaan pysty rikkomaan jokaista kuitukimppua, joten massa tyypillisesti ajetaan vielä kuiduttimen läpi ennen jauhatusta. Kuiduttimessa on kaksi terää, joista toinen pyörii ja toinen pysyy paikallaan. Massan mennessä terien läpi, viimeisetkin kuidut irtoavat toisistaan.

Tuoremassan kuitujen sitoutumiskyky saadaan aktivoitua jauhatuksen avulla, jolloin paperin ominaisuudet riippuvat suuresti jauhatukseen käytetyn ajan pituudesta. Jauhatuksessa massa johdetaan kahden terän välistä, joista vain toinen pyörii. Jauhatuksen aikana kuiduissa tapahtuu sisäistä fibrillaatiota, jolloin kuidun sisäiset rakenteet löystyvät. Molekyylitasolla löystymisen aiheuttaa vesi, joka pääsee kuidun rakenteisiin, kun kuituun kohdistetaan puristusta ja taivutusta (Kerekes & Senger, 2006, s. 12). Vesi muodostaa sidoksen kuidun ketjumolekyylin kanssa, jolloin ketjumolekyylien väliset vetysidokset katkeavat. Ulkoisesti muutos näkyy kuidun turpoamisella, minkä seurauksena kuituverkoston sidostenmuodostuskyky paranee. (Niskanen, 1998, s. 62)

Mitä pitempään tuoremassaa jauhetaan, sitä paremmin kuitujen sitoutumiskyky aktivoituu. Mikäli jauhatus epäonnistuu, tulee paperista karheaa tai huokoista. Nykyisin uusista jauhimista yleisin on kartiojauhin. Kuvassa 1 on esitelty kartiojauhimen poikkileikkaus, missä massa tulee vasemmalta jauhimeen ja poistuu oikealta nuolien mukaisesti.



**Kuva 1. Kartiojauhin, muokattu lähteen mukaan (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003)**

Kartiojauhimesta on maksimoitu jauhatuspinta-ala, jolloin massa jauhaantuu paremmin kuin muilla jauhintyypeillä. Geometrian ja keskipakovoiman vaikutuksesta kuidut ajautuvat teräväleihin ja jauhaantuvat. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 113-116)

Hylkymassa käsitellään paperikoneen eri vaiheissa syntyvistä hyljistä. Viiraosan reunanauhat ovat hylkyä, kuten on myös pituusleikkauksessa ja uudelleen rullauksessa syntyvä reunanauha. Myös paperikoneen ratakatoissa syntyvä hylky voidaan hyödyntää hylkymassana. Edellä mainittujen lisäksi myös valmistuneet paperirullat, jotka syystä tai toisesta todetaan hylätyiksi, voidaan ottaa takaisin prosessiin hylkymassan muodossa. Riippuen mistä hylky on peräisin, hylkymassa voidaan jakaa kahteen osaan: märämpään hylkymassaan ja kuivanpään hylkymassaan. Märämpään hylkymassa voidaan käyttää suoraan takaisin prosessiin, mutta kuivanpään hylkymassa ei voida suoraa käyttää, sillä hyllyn on mahdollista päästä kosketuksiin epäpuhtauksien kanssa. Epäpuhtauksien vuoksi kuivanpään hylkymassa täytyy puhdistaa erinäisin menetelmin. Märämpään hylky voidaan ottaa suoraan takaisin prosessiin koneen pulpperin avulla, mutta kuivanpään hylky on otettava erillisen hylkypulpperin avulla takaisin prosessiin. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 116-118)



Uusiomassa käsitteenä pitää sisällään kaiken, mikä on aikaisemmin ollut kartonkia tai paperia. Kotitalouden keräyspaperi sopiikin erittäin hyvin uusiomassan raaka-aineeksi. Suomen keräyspaperista käytetään kuitenkin vain puolet uusiopaperin valmistukseen. Toinen puoli keräyspaperista käytetään muihin kohteisiin. 100 kg:sta keräyspaperia pystytään tuottamaan keskimäärin 85 kg uusiomassaa, koska keräyspaperi sisältää erilaisia epäpuhtauksia, kuten niittejä, muovikansia ja painovärejä. Nämä epäpuhtaudet tekevätkin uusiomassan valmistuksesta haastavan prosessin. (Seppälä & Klementti, 2001, s. 68)

Keräyspaperin epäpuhtauksien poistoprosessia kutsutaan siistaukseksi. Siistaus muodostuu keräyspaperin pulpperoinnista, esilajittelusta, vaahdotuksesta, jälkilajittelusta, sakeutuksesta, dispergoinnista eli massan muokkauksesta, jälkivaahdotuksesta, loppusakeutuksesta, varastoinnista sekä veden ja rejektin käsittelystä. Pulpperissa keräyspaperi hajotetaan ja saostetaan veteen siten, että massan sakeus on noin 13-15 %. Esilajittelussa prosessikierrosta poistetaan sinne kuulumattomat osat sihtien avulla. Sihtilevyt päästävät levyn läpi halutun kokoiset kappaleet, jolloin iso osa prosessiin kulkeutuneista rautalangoista, niiteistä ja muista suurista kappaleista jää sihtilevyihin rejektipuolelle.

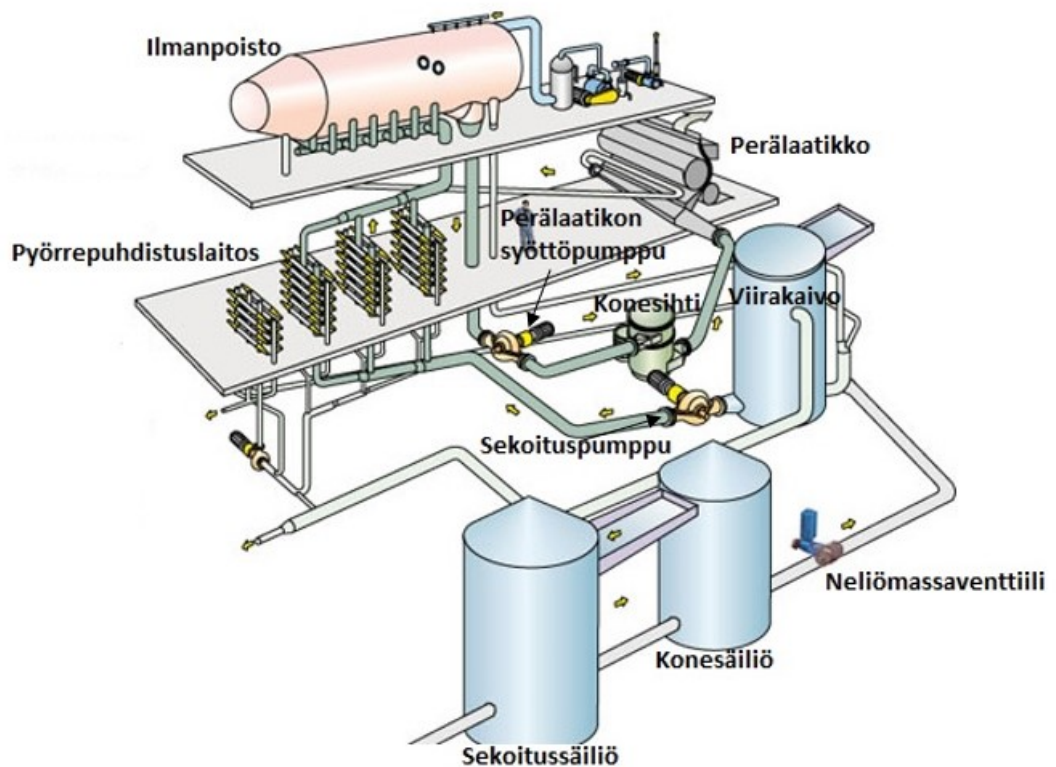
Esilajittelun jälkeen massa vaahdotetaan vaahdotuskennoilla tai vaahdotusaltaassa. Vaahdotusprosessissa massan sekaan lisätään vaahdotuskemikaalia. Kennoille ja altaaseen puhalletaan paineilma, jonka seurauksena massa alkaa kuplia. Massan sakeus tässä prosessivaiheessa on tyypillisesti vain 1 %. Painovärit tarttuvat kupliin ja nousevat pinnalle, josta vaahto poistuu ylijuoksujen välityksellä. Vaahdotuksen jälkeen massavirtaus ohjataan jälkikäsitteilyyn.

Jälkikäsitteily voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäinen on pyörrepuhdistus. Pyörrepuhdistimilla massasta poistetaan epäpuhtaudet, kuten puun palaset. Massavirtaus syötetään pyörrepuhdistukseen tangentialisesti, mikä aiheuttaa massavirtauksen pyörteen. Keskipakovoiman vaikutuksesta epäpuhtaudet kulkeutuvat puhdistimen seinämille. Jälkikäsitteilyn toisena vaiheena painelajittimilla poistetaan massan seasta epäpuhtauksia, kuten muovipalat, styroksi ja teipit. Kolmantena vaiheena jälkikäsitteilyssä on käänteinen pyörrepuhdistus, jolloin kevyet ainesosat massan joukosta eivät kulkeudu seinämille. Jälkikäsitteilyn jälkeen massa pumpataan sakeutukseen, jossa mas-

sasta poistetaan vettä kiekkosaostimilla ja puristimilla. Saostuksen jälkeen massa johdetaan dispergerille, missä massaa muokataan levyjauhimissa. Dispergerissä painovärijäänteet kulkeutuvat jauhinterien välissä, missä ne pilkkoontuvat näkymättömän pieniksi hiukkasiksi. Dispergerin jälkeen massalle suoritetaan jälkivaahdotus samalla menetelmällä kuin aikaisempi vaahdotus. Tavoitteena on saada poistettua loputkin epäpuhtaudet massan seasta. Vaahdotuksen aksepti loppu sakeutetaan tyypillisesti kiekkosaostimilla, josta massa pumpataan varastointisäiliöön noin 10 % sakeudessa. (Seppälä & Klementti, 2001, s. 68-71)

Massan esikäsitteilyn jälkeen massa pumpataan lyhyen kierron alueelle, jossa massalle tehdään useita käsittelyjä ennen massan ohjaamista perälaatikkoon. Lyhyt kierto on paperikoneiden toinen kierto-vesijärjestelmä, jonka tarkoituksena on kerätä talteen kierto-vesien mukana olevat kemikaalit, kuidut ja lämpöenergia sekä maksimoida näiden käyttö prosessissa. Lyhyen kierron laitteiston tehtäviin kuuluu ilman ja epäpuhtauksien poisto, massan laimentaminen haluttuun sakeuteen, paperiradan hiukkaskokojakauman optimointi, sakeus- ja painevaihteluiden minimointi, väriaineiden, kemikaalien ja täyteaineiden annostelu ja sekoitus. Lyhyen kierron aikana massaa puhdistetaan useita kertoja, jolloin mahdollisimman paljon epäpuhtauksia saadaan poistettua.

Puhtaasta massasta valmistettu paperi on epäpuhtaasta massasta valmistettua laadukkaampaa. Lisäksi paperin ajettavuus paperikoneella on parempi puhdistetuilla massoilla. Kuvassa 2 on esitelty lyhyen kierron kokonaiskuva ja nuolilla merkitty virtausten suuntaus.



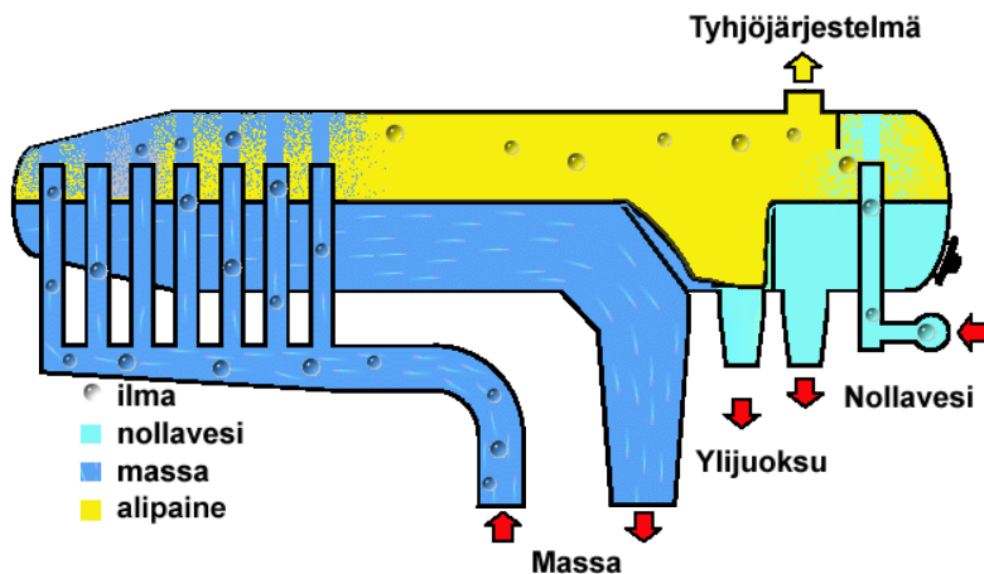
**Kuva 2. Virtaukset lyhyessä kierrossa (KnowPap, lyhyt kierto)**

Lyhyen kierron laitteita ovat sekoitussäiliö, konesäiliö, neliömassaventtiili, viirakaivo, sekoituspumppu, pyörrepuhdistimet, ilmanpoisto, perälaatikon syöttöpumppu, sihtijärjestelmä ja perälaatikko. Sekoitussäiliöön pumpataan erityyppisiä massoja, jossa massojen suhde määritetään halutun paperin ominaisuuksien avulla. Konesäiliöltä on ylivuoto takaisin sekoitussäiliöön, jolloin konesäiliöltä lähtevän virtauksen sakeudeksi saadaan noin 3 %. Ylivuoto mahdollistaa myös tasaisen paineen konesäiliöstä viirakaivolle. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 121-125)

Konesäiliön ja viirakaivon välissä on tyypillisesti neliömassaventtiili, joka ohjaa syötettävän massan määrää viirakaivolle. Viirakaivo on yleensä avoin säiliö, jonne viiralta tulevat vesivirtaukset ohjataan. Viirakaivo on avoin, jotta osa massaseoksen mukana olevasta ilmasta pääsisi poistumaan massan joukosta. Viirakaivon tarkoituksena on kerätä viiralta tuleva vesi, jota kutsutaan nollavedeksi. Lisäksi viirakaivo sekoittaa konesäiliön virtauksen nollaveden kanssa siten, että lähtävä virtaus olisi sakeudeltaan 1 %. Viirakaivon sisällä paineen tulee olla vakio, jotta sisään tulevat virtaukset tulisivat halutulla nopeudella. Säiliössä olevan ylivuotoputken avulla painetaso pystytään pitämään vakiona. Ylivuoto ohjataan pitkään kiertoon, joka on paperikoneen toinen kierto-vesijärjestelmä.

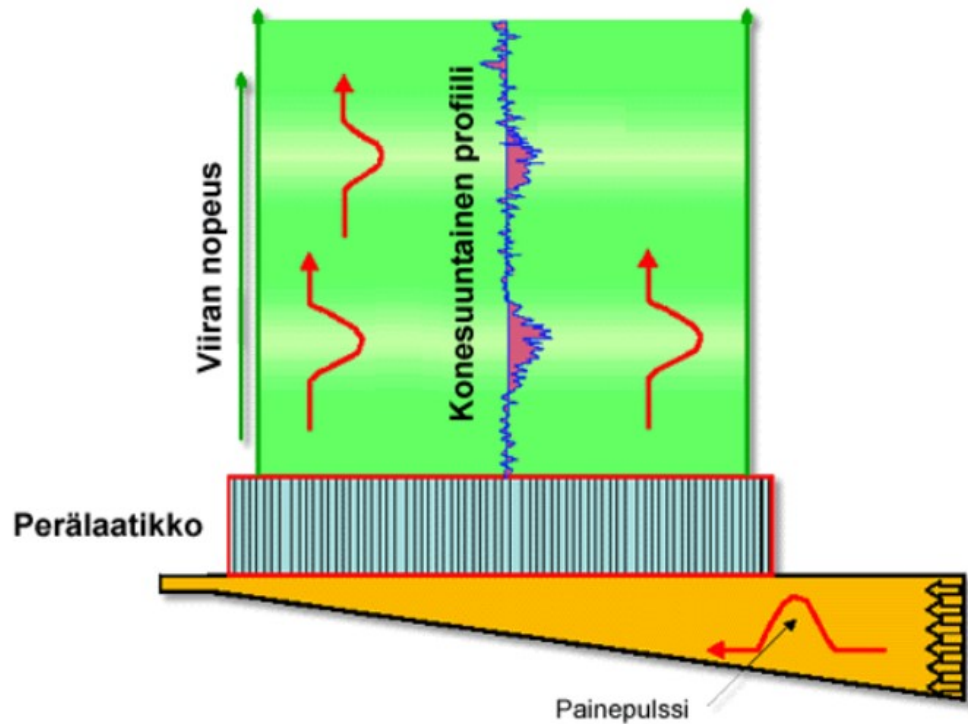
Koska kyseessä on ylivuoto, kiintoaine pääsee laskeutumaan ja puhtaampi vesi ohjautuu pitkään kiertoon. Pitkässä kierrossa vesi ohjataan kiertovesisäiliön kautta takaisin massan valmistukseen. Kiertovesisäiliön vettä käytetään myös muissa kohteissa, mutta suurin virtauksesta kulkeutuu juuri massan valmistukseen.

Massavirtaus viirakaivosta ajetaan sekoituspumpon avulla pyörrepuhdistuslaitokselle, jossa massaa puhdistetaan useamman sarjaan kytketyn pyörrepuhdistimen avulla. Pyörrepuhdistimien jälkeen massavirtaus ohjataan ilmanpoistoon, jossa alipaineistetussa säiliössä ilma ja kaasut poistetaan massan joukosta. Poisto tapahtuu pisaroinnin ja alipaineessa kiehumisen johdosta. Kuvassa 3 on esitetty ilmanpoistojärjestelmä.



**Kuva 3. Ilmanpoiston prosessin kuva (KnowPap, ilman ja epäpuhtauksien poistaminen)**

Ilmanpuhdistuksen jälkeen massavirtaus johdetaan perälaatikon syöttöpumpun avulla konesihtien lävitse perälaatikolle. Perälaatikon syöttöpumpun toimintavarmuus tulee olla hyvä ja on tärkeää, että pumppu toimii pulssittomasti. Massavirtaus ohjataan perälaatikoon suppeutuvan kanavan kautta, josta lopussa osa virtauksesta ohjataan takaisin ilmanpoistoon perälaatikon ylivuotona. Kuvassa 4 on esitettyä massavirtaus perälaatikoon.



**Kuva 4. Perälaatikon geometria estää painepulssien siirtymisen viiralle. (KnowPap, sakeus ja painepaihteluiden minimointi)**

Mikäli kuvan 4 painepulssi kulkeutuu viiraosalle, se aiheuttaa paperiin neliömassavaihtelua.

Konesihtien tarkoituksena on poistaa loput epäpuhtaudet massajoukosta. Tyypillisesti konesihtillä on rumpu, joka pyörii poistaen sihtiin jääneet epäpuhtaudet. Ilman rumpun toimintaa sihti voisi tukkeutua ja pysäyttää virtauksen perälaatikolle. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 122-125)

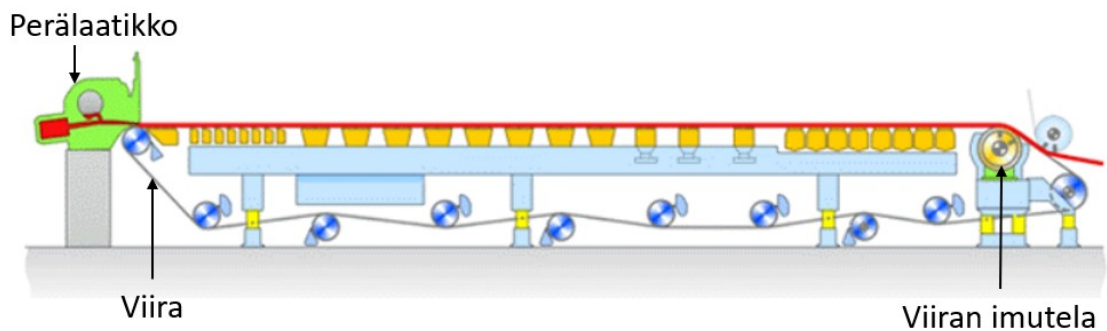
### 3.2 Paperikoneen toiminta

Paperikoneen toiminta konetasolla voidaan katsoa alkavaksi perälaatikolta. Perälaatikon tehtävänä on syöttää paperimassaa koko koneen leveydeltä viiralle mahdollisimman tasaisesti ja flokittomasti. Perälaatikon alussa virtaus muunnetaan turbulენტtiseksi, mutta perälaatikon huulella virtaus tasoitetaan takaisin laminaariseksi virtaukseksi. Massan seassa olevat viimeiset kuituflokot saadaan irrotettua toisistaan turbulენტtisessä virtauksessa. Turbulenssi luodaan virtaukseen virtauksen nopeuden muutoksella, virtauskanavan muotojen tai erillisten lamellien avulla. Flokit hajoavat turbulენტtisessä virtauksessa

leikkausvoimien johdosta. Nämä voimat taas syntyvät virtauksen kohdatessa virtauskanavan seinämiä tai lamelleja.

Tärkeimmät hallintasuureet perälaatikon massansyötön suhteen ovat suihkusuhde ja huuligeometria. Suihkusuhde tarkoittaa perälaatikon suihkun ja viiran nopeuden eroa. Suihkusuhteet voidaan jakaa kolmeen eri tasoon: tasaperä, yli-perä ja aliperä. Tasaperällä viiran ja perälaatikon suihkujen nopeudet ovat samat. On kuitenkin huomattu, että orientaatioprofiili, eli paperin kuitujen suuntaus, jää huonoksi, joten tasaperäisellä nopeudella ajo ei ole suositeltavaa. Yli-peräisen perälaatikon massan suihkunopeus on suurempi kuin viiran nopeus. Aliperäisessä taas nopeudet ovat vastakkaiset. Paperiradan paras formaatio saavutetaan ali- tai yli-peräisellä suhteella, mutta yli-peräinen on tällä hetkellä yleisempi toimintamalli. Huuligeometrialla tarkoitetaan perälaatikosta suihkuavan massan kulmaa viiraan. Kulman ollessa suuri, vesi poistuu paremmin paperirainasta, eli paperiradasta, joka sijaitsee viiralla. Paperiraina on paperiradan esiaste, joka sisältää vielä paljon vettä. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 132)

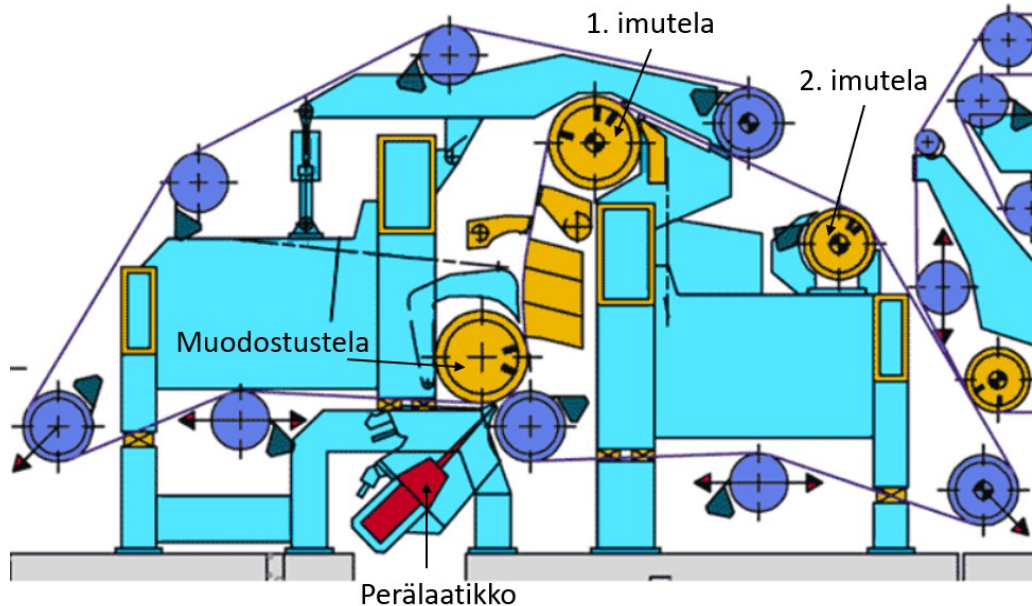
Viiraosalla määräytyvät suurin osa paperin ominaisuuksista, kuten neliömassavaihtelu ja orientaatio, täten viiraosan merkitys paperin valmistuksessa on erittäin suuri. Viiraosan tehtävänä on poistaa rainasta ylimääräinen kosteus, jotta paperiraina voidaan siirtää viiraosalta puristin osalle. Lisäksi viiraosan tulee luoda tasainen kuituorientaatio, jotta paperin ominaisuudet pysyvät vakiona. Rainan poistuessa viiraosalta se sisältää noin 20 % kuiva-ainetta. Viira osan tehokkuuden mittarina käytetään retentiota, joka kertoo kuinka paljon perälaatikosta syötetystä massasta jää paperirainaan. Viiraosia on käytössä tyypillisesti kahden tyyppisiä: tasoviira ja kitaformerit. Kuvassa 5 on esitetty tasoviira.



**Kuva 5. Tasoviira (KnowPap, tasoviira)**

Tasoviiralla vesi poistuu vain rainan alapuolelta. Veden poisto viiralla tapahtuu kolmella eri tavalla. Ensimmäisenä vedenpoistumisvaiheena on rainan sulautuminen, jolloin viiralle muodostuneen kuitukerroksen päälle on muodostunut laimeampi kuitukerros, josta vesi liikkuu hitaasti huokoisen aineen lävitse. Toisena vaiheena on tiivistyminen. Tiivistyminen tapahtuu, kun rainan päällä oleva sulppukerros pääsee kuivumaan ja alkaa painamaan allaan olevaa rainaa. Kolmantena vedenpoiston vaiheena on imeminen. (Hägglom-Ahner & Komulainen, 2003, s. 138)

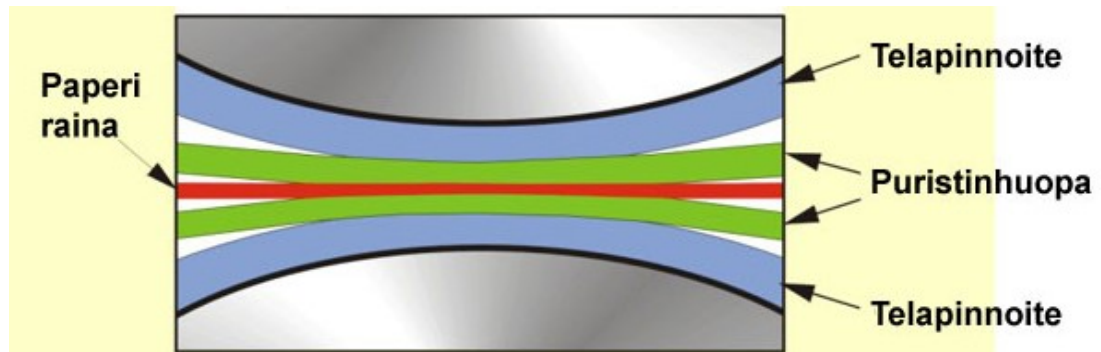
Kitaformerissa on kaksi viiraa sekä ylä- että alapuolella. Perälaatikosta massa syötetään kahden viiran väliin, jolloin veden poisto on erittäin tehokasta. Veden poisto tapahtuu viiran ylä- ja alapinnalta. Kuvassa 6 on esitetty kitaformerin.



**Kuva 6. Kitaformerin (KnowPap, viiraosa)**

Viiraosan jälkeen raina kulkeutuu puristinosaan, jossa kuiva-ainepitoisuus pyritään saamaan noin 50 % mekaanisella puristamisella. Puristinosa voidaan toteuttaa monella eri tavalla ja usein puristinosa on muokattu yksittäiselle paperikoneelle sopivaksi. Puristinosan tehtävänä on poistaa ylimääräinen kosteus rainasta ja tiivistää paperi haluttuun paksuuteen. (KnowPap, puristinosa)

Puristinosalla raina kulkee tyypillisesti kahden huovan välissä. Vesi poistuu rainasta nippien kohdalla huovan lävitse. Nipillä tarkoitetaan kahden telan välistä kosketuspinta-alaa. Kuvassa 7 on esitetty nipissä tapahtuva veden poistuminen.



**Kuva 7. Puristinosan vedenpoisto (KnowPap, puristinos)**

Nipin alkuosassa ilma puristuu huovan ja rainan välistä. Tämän jälkeen puristuminen kohdistuu rainaan, jolloin vettä poistuu rainasta ja kuidut puristuvat. Mitä enemmän nippejä on puristinosalla, sitä kuivempi raina.

Puristinosan jälkeen paperi siirtyy kuivatusvaiheeseen. Kuivatus tapahtuu tyypillisesti ison huuvan sisällä. Huuvan alueella paperirata kulkee kuuman sylinterin pintaa pitkin. Sylinteri on lämmitetty höyryllä, joka lauhtuu sylinterin sisällä vedeksi. Tämä vesi luovuttaa lämpöenergiaa pinnan välityksellä paperirataan. Lauhtunut höyry kerätään sifonien tai imupillien avulla sylinteristä ja siirretään lauhteen keräysjärjestelmään.

Kuivatus voidaan tehdä monisynterikuivatuksella, jolloin kuivaussylintereitä on monta peräkkäin. Vaihtoehtoisesti kuivatus voidaan tehdä myös jenkki-sylinterillä. Jenkkisynteri on paljon suurempi kuivatussynteri kuin monisynterikuivatussynterit. Lisäksi jenkkisyntereitä on vain yksi. Pehmopaperikonetta käytettäessä kuivatus suoritetaan yleensä jenkki-sylinterillä. Jenkkisynterin kuivatusteho ei kuitenkaan yksinään ole riittävä, joten sylinterin lisäksi paperirataa kuivatetaan kuumalla ilmalla. Kuuma ilma puhalletaan polttimilta huuvan alueelle, josta se kerätään talteen poistoilmapuhaltimen avulla. Poistuva ilma sisältää paljon kosteutta ja lämpöenergiaa. Tämä lämpöenergia kerätään talteen lämmöntalteenotossa ennen kuin kaasut päästetään pihalle.



Paperikone 1:n tilanteessa paperirainan kuiva-aineen osuus on noin 45% sen tullessa jenkkisyylinterille. Paperi tarttuu sylinterin pintaan ja irtoaa siitä vasta kreppikaavarilla. Sylinterin pintaan suihkutetaan suojakemikaalilla, joka tarkoitus on suojata sylinteriä mekaaniselta kulumiselta. Suojakemikaalin avulla paperirata tarttuu paremmin jenkkisyylinterin pintaan, mutta tartunta ei kuitenkaan ole kemikaalin varsinainen tarkoitus. Paperi irtoaa sylinteristä kreppikaavarin toimesta. Kreppikaavarin tarkoitus on muodostaa paperiin kreppausta. Kreppauksen määrä riippuu siitä, kulmassa kreppikaavari on jenkkisyylinteriin. Kaavarin terän kärki osuu päällystyskemikaaliin ja näin nostaa paperiradan jenkkisyylinteristä ja samalla poistaa osan päällystyskemikaalista. Tämän takia kemikaalia tulee ruiskuttaa jenkkisyylinterin pintaan jokaisella kierroksella. Eri tuotteille halutaan eri ominaisuuksia, joten kulman muutoksella pystytään vaikuttamaan tähän. (Karlsson, 2012, s. 165-172)

Kreppauksen sijasta paperille voidaan tehdä myös muita jälkikäsittelyjä ennen koneesta poistumista. Paperi voidaan kalanteroida, jolloin paperirata ajetaan kahden puristintelan lävitse. Kalanteroinnissa paperin muoto muuttuu taso- ja paksuussuunnassa, lisäksi kalanteroinnilla voidaan pinnoittaa paperi.

Jälkikäsittelyn jälkeen paperirata rullataan talteen rullaimella. Paperikone 1:n tilanteessa paperirata rullataan konerullaimella, joka on vanhin nykyisin käytössä olevista rullaintyypeistä. Konerullaimesta käytetään myös nimitystä Pope. Siinä telaa vastaan painetaan rullaussylinteri, jota pyöritetään käyttömootorilla. Popen jälkeen rullattu paperirulla toimitetaan jatkokäsittelyyn.

## 4. LÄMMÖNSIIRTO

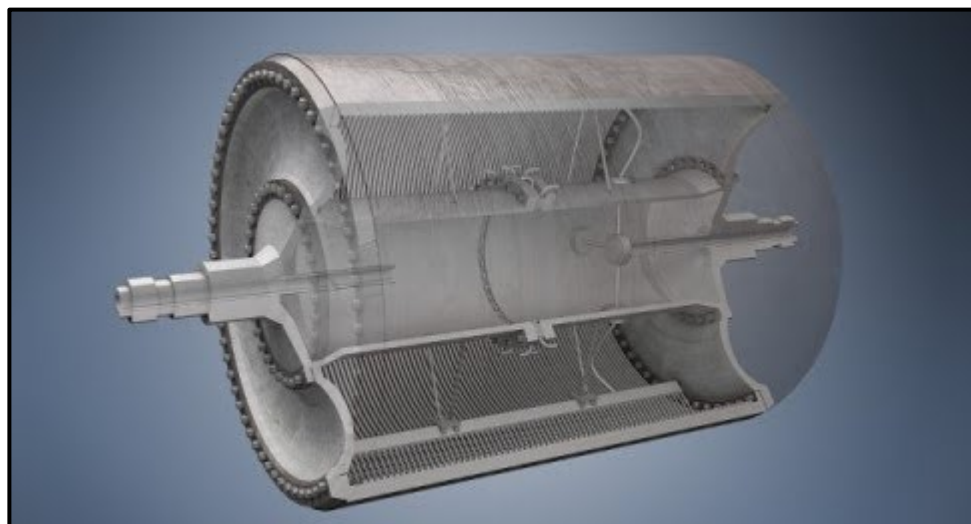
### 4.1 Jenkkisynterän lämmönsiirto

Jenkkisynterän lämmönsiirto perustuu konvektiiviseen ja johtumalla siirtyvään lämmönsiirtoon. Synterän lämmittämiseen käytetään kylläistä höyryä, joka siirtää lämpöenergian konvektiivisesti synterän pintaan yhtälön (1) mukaisesti,

$$\dot{Q}_h = h_{h-s} A (T_h - T_{sp}) , \quad (1)$$

missä  $\dot{Q}_h$  on siirtynyt lämpöenergia [W],  $h_{h-s}$  on höyryn synterän välinen lämmönsiirto-kerroin [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],  $A$  on synterän vaipan pinta-ala [ $m^2$ ],  $T_h$  on höyryn lämpötila [K] ja  $T_{sp}$  on synterän sisäpinnan lämpötila [K] (Karlsson, 2012, s. 166-167).

Höyryn tulessa synterän sisälle se lauhtuu ohueksi kerrokseksi synterän sisäpinnalle. Lauhtuminen tapahtuu, koska synterän sisäpinta on kylmempi kuin höyry. Kondensoitunut lämmin vesi toimii tällöin välittäjäaineena ja muodostaa hyvän lämmönjohtoparin veden ja valurautaisen jenkkisynterän välille. Synterän sisäpintaan on sorvattu urat, joilla maksimoidaan kondensoitumisen mahdollistava pinta-ala. Urat toimivat myös lauhteen poistossa kuljettamalla kondensoituneen vesikerroksen imupillien välityksellä lauhdesäiliöön (Savonmäki, 2019) Kuvassa 8 esitetty jenkkisynterän poikkileikkaus.



Kuva 8. Jenkkisynterän poikkileikkaus (Convergence Training, 2012)

Sisäpinnasta lämpö siirtyy pinnan ylitse paperiradalle johtumalla yhtälön (2) mukaisesti,

$$\dot{Q}_s = \frac{\lambda}{d} A (T_{sp} - T_{up}), \quad (2)$$

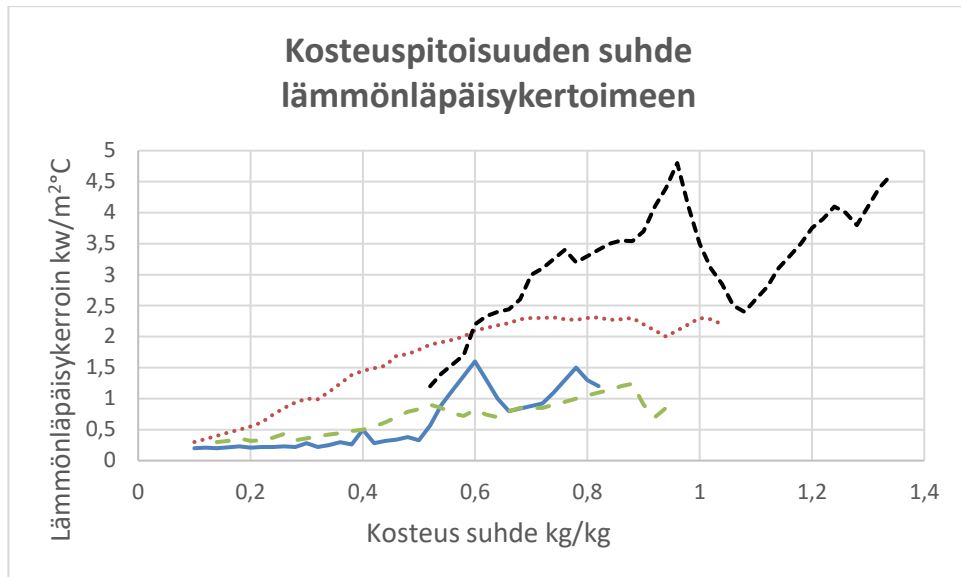
missä  $\dot{Q}_s$  on siirtynyt lämpöenergia sylinterin yli [W],  $\lambda$  on sylinterin lämmönjohtavuus [W/(m·K)],  $d$  on sylinterin seinämän paksuus [m] ja  $T_{up}$  on sylinterin ulkopinnan lämpötila [K]. Sylinterin ulkopinnasta lämpö siirtyy paperirataan ja ilmaan yhtälön (3) mukaan,

$$\dot{Q}_{ulos} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_i = h_{s-p} A (T_{up} - T_p) + h_{s-i} A (T_{up} - T_I) (1 - \theta), \quad (3)$$

missä  $\dot{Q}_{ulos}$  on sylinteristä poistuva lämpöenergia [W],  $\dot{Q}_p$  on paperiin siirtyvä lämpöenergia [W],  $\dot{Q}_i$  on ilmaan siirtyvä lämpöenergia [W],  $h_{s-p}$  on sylinterin ja paperin välinen lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)],  $T_p$  on paperiradan lämpötila [K],  $\theta$  on paperiradan osuus sylinterin pinta-alasta,  $h_{s-i}$  on sylinterin ja ilman välinen lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)] ja  $T_I$  on ilman lämpötila [K]. (Karlsson, 2012, s. 167)

#### 4.1.1 Lämmönsiirtovastukset

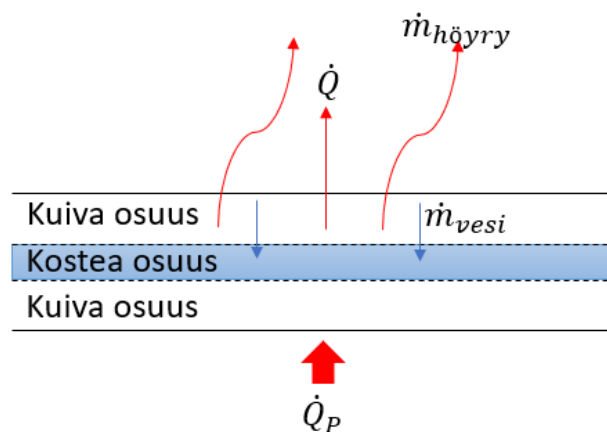
Jenkkisylinterin lämmönsiirtoa vastustaa kolme lämmönsiirtovastusta. Ensimmäisenä höyryn ja sylinterin välinen lämmönsiirtovastus  $\frac{1}{\dot{Q}_h}$ , joka riippuu lauhdekerroksen liiketilasta, lauhdekerroksen paksuudesta, lauhtumattomien kaasujen määrästä ja sylinteriseinämän korroosiosta. Toisena tekijänä on sylinterin seinämän lämmönsiirtovastus  $\frac{d}{\lambda}$ . Tämä taas riippuu seinämän materiaalista, pinnoituskemikaalin kerroksen paksuudesta ja seinämän vahvuudesta. Seinämän paksuus on kuitenkin riippuvainen seinämän hiontavarasta, sylinterissä käytetystä paineesta, jenkkisylinterin seinämämateriaalin vetolujuudesta sekä sylinterin halkaisijasta. Kolmantena tekijänä on paperin aiheuttamasta lämmönsiirtovastus  $\frac{1}{\dot{Q}_p}$ , joka taas riippuu paperin kosteuspitoisuudesta.



**Kuva 9. Paperikoneilla mitattu kosteuspitoisuuden suhde lämmönläpäisykertoimeen (muokattu Sundberg T, 1968)**

Kuvassa 9 on esitetty lämmönläpäisykertoimen riippuvuuden paperin kosteussuhteeseen. Eri käyrät kuvaavat eri koneilla saatuja tuloksia. Mittaustulosten tarkastelussa on huomioitava, että neliö paino ja paperilaji vaihtelevat eri koneilla. (Sundberg;Anderson;Löfgren;& österberg, 1968)

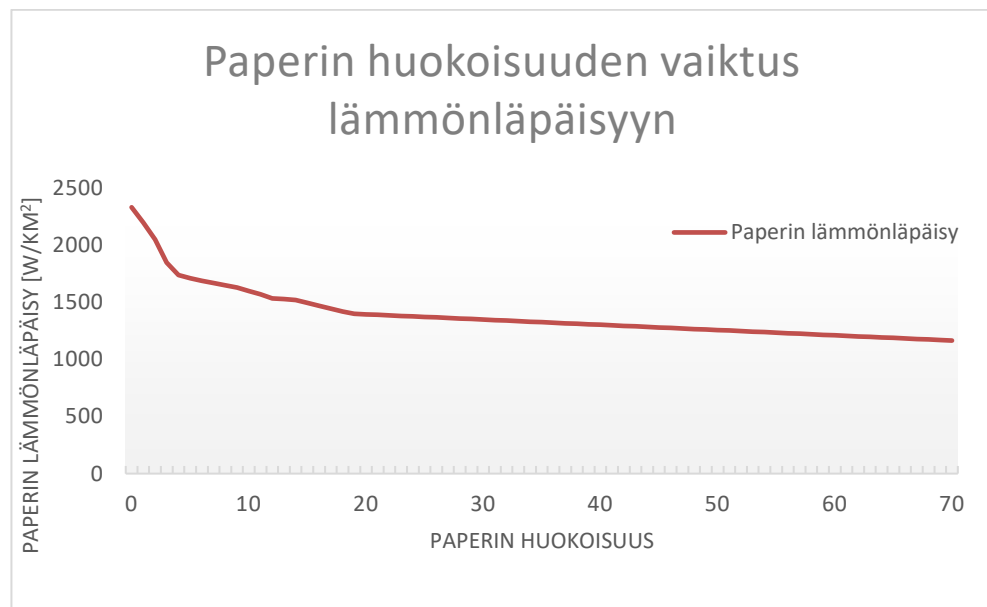
Kostean paperin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa veden ja vesihöyryn liikkuminen paperiradassa. Paperiradan sisällä tapahtuu samanaikaisesti veden höyrystymistä ja uudelleen tiivistymistä. Tällöin paperiradan sisälle pääsee muodostumaan kosteuseroja, joita kapilaarivoimat pyrkivät tasapainottamaan. Höyryn paineen vaikutuksesta höyry- ja lämpövirta suuntautuvat poispäin sylinterin pinnasta, kun taas vesivirtaus suuntautuu näille virtauksille vastakkaiseen suuntaan. Kuvassa 10 esillä visuaalisesti virtausten suunnat.



**Kuva 10. Paperiradassa veden ja höyryn liikesuunnat kuivatuksen aikana**

Lämmönsiirtovastus paperin ja sylinterin välillä yhdistetään yleensä paperin lämmönsiirtovastukseen. Jenkkisylinterin tilanteessa paperin ja sylinterin välille muodostuu hyvä kontakti, jolloin lämmönsiirtovastus jää merkitsemättömän pieneksi. Sylinterin ja paperiradan välille ei voida mitata lämpötilaeroa, mutta voidaan arvioida, että lämpötilat ovat lähes samat.

Paperin huokoisuus vaikuttaa myös paperin lämmönjohtavuuteen. Kuvassa 11 on esitettyä paperin huokoisuus suhteessa lämmönläpäisykertoimeen.



**Kuva 11. Paperin huokoisuuden vaikutus lämmönläpäisyyteen, muokattu lähteen mukaan (Janson-Herminge, 1969)**

#### 4.1.2 Kokonaislämmönsiirtokerroin

Jenkkisylinterin kokonaislämmönsiirtokerroin muodostuu sylinterin vastaanottamasta energiasta höyrystä (1), sylinterin konvektiivisesta lämmönsiirrosta (2) ja lämmönsiirtokertoimesta paperiradan ja sylinterin välillä (3). Siirtynyt lämpömäärä voidaan esittää yhtälön (4) mukaisesti,

$$\dot{Q} = UA(T_h - T_p) , \quad (4)$$

missä  $\dot{Q}$  on siirtynyt lämpöenergia [W] ja  $U$  on jenkkisylinterin kokonaislämmönsiirtokerroin [W/(m·K)]. Kokonaislämmönsiirtokerroin pystytään laskemaan yhtälöiden (1,2,3) avulla, mutta laskemista varten yhtälöitä joudutaan kuitenkin hieman muokkaamaan. Myös yleistyksiä joudutaan tekemään lämpötilojen suhteen. Stationaarisessa tilanteessa voidaan olettaa, että sylinterin sisäpinnan ja ulkopinnan välinen lämpötila on vakio (Karlsson, 2012). Lisäksi sylinterin peittämän pinta-alan voidaan olettaa olevan lähes yksi, jolloin siirtynyt lämpöenergia paperiin on paljon suurempi, kuin ilmaan siirtynyt lämpöenergia. Lisäksi ilmaan siirtynyt lämpöenergia on paljon pienempi kuin poistoilmakanavaan siirtynyt lämpöenergia. Yhtälö (3) voidaan kirjoittaa muotoon (5)

$$\dot{Q}_{ulos} = \dot{Q}_p = h_{s-p} A (T_{up} - T_p). \quad (5)$$

Näiden muokkausten jälkeen kokonaislämmönsiirtokerroimen laskeminen on mahdollista. Siirtynyt lämpöenergia höyrystä paperiin saadaan yhtälön (x3) avulla,

$$\dot{Q}_{h-p} = \frac{1}{\dot{Q}_h} + \frac{1}{\dot{Q}_s} + \frac{1}{\dot{Q}_p \theta} (T_{sp} - T_p) A = \frac{1}{U} (T_{sp} - T_p) \quad (6)$$

mistä voidaan laskea kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$  yhtälön (7) mukaisesti,

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{h-s}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_{s-p} \theta}}. \quad (7)$$

### 4.1.3 Sylinterin seinämän vahvuus

Jenkkisylinteriin mitoituksen suhteen on otettava huomioon käyntiolosuhteet. Höyryn paine aiheuttaa sylinteriin räsitystä sylinterin sisäpinnalta. Tämä räsitus on helposti mitattavissa ja suurin sallittu paine höyrylle voidaan lausua yhtälön (8) avulla.

$$p_{max} = \frac{d\delta}{\eta d_{syl}}, \quad (8)$$

missä  $p_{max}$  on sylinterin suurin sallittu paine [Pa],  $\delta$  on sylinterin seinämän jännitys [N/m<sup>2</sup>],  $\eta$  on paineastian varmuuskerroin ja  $d_{syl}$  on sylinterin halkaisija [m].

Toisena rasituksena sylinterille on sylinterin pinnan painuminen puristinnipissä. Tällöin sylinterin pintaan kohdistuu viivamainen kuorma, joka siirtyy sylinterin pyöriessä ja ai-

heuttaa sylinterin pinta-aineen väsymisen. Tyypillisesti viivakuorma on 80 kN/m. Suurimman rasituksen aiheuttaa lämpöjännitys sylinterin pinnassa. Tämä johtuu siitä, että jenkkisyylinterin pintalämpötila vaihtelee 30 °C:lla jokaisen kierroksen aikana. Tämä taas aiheuttaa jatkuvaa lämpölaajenemista ja kutistumista. Lisäksi sylinterissä vaikuttaa pysyvä jännitys, joka johtuu sylinterin lämpötilaerosta sisä- ja ulkopinnalla (Metsäteollisuuden työnantajaliitto, 1984, s. 23-25).

Sylinterin vahvuutta voidaan parantaa raaka-aine valinnalla. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa lämmönjohtavuuden heikkenemisen, sillä uuden raaka-aineen lämmönjohtavuus voi erota aikaisemmasta raaka-aineesta. Sylinterin seinämän paksuuden kasvattamisella pystytään vahvistamaan sylinterin kestävyttä. Tämä kuitenkin johtaa myös lämmönjohtavuuden heikkenemiseen, sillä tällöin lämpövirran tulee kulkea pidempi matka sylinterin pinnan lävitse.

Sylinterin pinta joutuu koneen pyöriessä kovaan kulutukseen ja sylinterin pintaa joudutaankin hiomaan lähes vuosittain. Sylinterin hionta suoritetaan normaaleissa käyntiolo-suhteissa, sillä höyrynpaine ja lämpölaajeneminen muodostavat sylinterin bombeerauksen. Mikäli hionta suoritettaisiin normaalista ajosta poikkeavissa olosuhteissa, jenkkisyylinterin bombeeruskäyrä muodostuisi eriksi, kuin mitä se olisi ajotilanteessa. Tämä taas aiheuttaa suuria ajo-ongelmia. Normaali ajosta poiketen hionnan aikana ei kuitenkaan puristimia käytetä. Hionnassa sylinterin pinnasta poistetaan 0,3 – 0,5 mm. 10 – 20 vuoden käytön ja hiontojen jälkeen sylinterinseinämä vahvuus on heikentynyt merkittävästi. Tällöin sylinteri tulee joko vaihtaa, sylinteri on pinnoitettava tai sylinterin paineluokitusta on alennettava. Mikäli paineluokitusta alennetaan, täytyy saapuvan höyryn painetta laskea, mikä johtaa huonompaan hyötysuhteeseen ja koneen maksimaalisen vauhdin pienentymiseen. (Metsäteollisuuden työnantajaliitto, 1984, s. 23-25)

On kuitenkin tiedossa tilanteita, joissa jenkkisyylinterin paineluokitusta on laskettu ja siitä huolimatta konetta on pystytty käyttämään täydellä kapasiteetilla. Paineluokituksen lasku on johtunut pinnan paksuuden pienentymisestä, mutta saman aikaisesti lämmönjohtavuus sylinterin pinnan ylitse on parantunut, vaikka maksimipainetta on jouduttu alentamaan. Tämä perustuu siihen, että lämpövirta joutuu kulkemaan nyt lyhyemmän matkan seinämän lävitse. (Savonmäki, 2019)

Jenkkisylinterin pinnoitus tapahtuu ruiskuttamalla noin 2 – 3 mm paksu kerros kovame-talliainetta, joka sorvataan ja hiotaan haluttuun vahvuuteen. Pinnoitus tehdään terässe-oksella, joka sisältää osittain kromia. Pinnoitetun sylinterin pinnankovuus on jopa kak-sinkertainen verrattuna alkuperäiseen valurautaiseen sylinteriin. Pinnoitteen kovuuden ansiosta jenkkisylinteri kestää paremmin kulutusta ja hionnatiheys putoaa (Metsäteollisuuden työnantajaliitto, 1984, s. 23-25). Markkinoiden uusimmat pinnoitteet ovat kehittyneet ja lopullinen pinnoitteen paksuus on jo alle 1 mm.

#### 4.1.4 Lämpötilaero

Lämmönsiirtopotentiaalienergia saadaan paperiradan ja höyryn lämpötilaerosta  $T_h - T_p$ . Sylinterissä käytetään kuivaa ja kylläistä höyryä, joka otetaan tyypillisesti turbiinista vä-liottona. Maksimaalisen lämpötilaeron saavuttaminen kuitenkin tuo rajoittavan tekijän sylinterin valintaan. Sylinterin kestävä suurin sallittu paine rajoittaa sisään syötettävän höyryn määrää. Suurin sallittu paine sylinterille on esitettyä yhtälössä x5. Sylinteriin vir-taavan höyryn lämpötila pystytään määrittämään vallitsevan paineen avulla, kun tiede-tään, että paine on vakio ja höyry on kyllästyskäyrällä. Tällöin lämpötila voidaan määrit-tää H-S piirroksen avulla. H-S piirros esiteltynä liitteessä A.

Optimaalisessa tilanteessa paperirataan sitoutunut vesimäärä rajoittaa lämpötilaeroa enemmän kuin höyryn lämpötila. Paperiradan sisältämä vesi voi alkaa kuplimaan, mikäli vettä on liikaa paperiradan mukana sen saapuessa jenkkisylinterille. Kupliminen johtuu veden kosteuden höyrystymisestä paperiradassa. Paperiradan alapuolella oleva kosteus ei pääse kulkeutumaan paperiradan läpi, vaan alkaa höyrystymään sylinterin ja paperi-radan välissä ja näin muodostuu kuplia paperin alapintaan. Tyypillisesti paperirata sisäl-tää 55 % vettä kokonaismassasta saapuessaan jenkkisylinterille. Tämä luku ei kuiten-kaan ole vakio, vaan riippuu voimakkaasti veden poiston onnistumisesta huovan osalla. Mikäli huovalla on ajettu paljon ja se on päässyt ikääntymään, voi huopa tukkeentua. Tällöin huovan vedenpoistokapasiteetti pienenee merkittävästi. On myös mahdollista, että puristintelojen vedenpoisto on vikaantunut, mikä johtaa myös korkeampaan vesi-määrään jenkkisylinterille saavuttaessa. Kupliminen jenkkisylinterin pinnalla aiheuttaa paperin irtoamisen sylinterin pinnalta ja estää näin kreppikaavaria luomasta paperiin ha-luttuja ominaisuuksia. Kuplimisen estämiseksi sylinterin pintalämpötilaa joudutaan las-kemaan, mikä tapahtuu paineen laskulla.

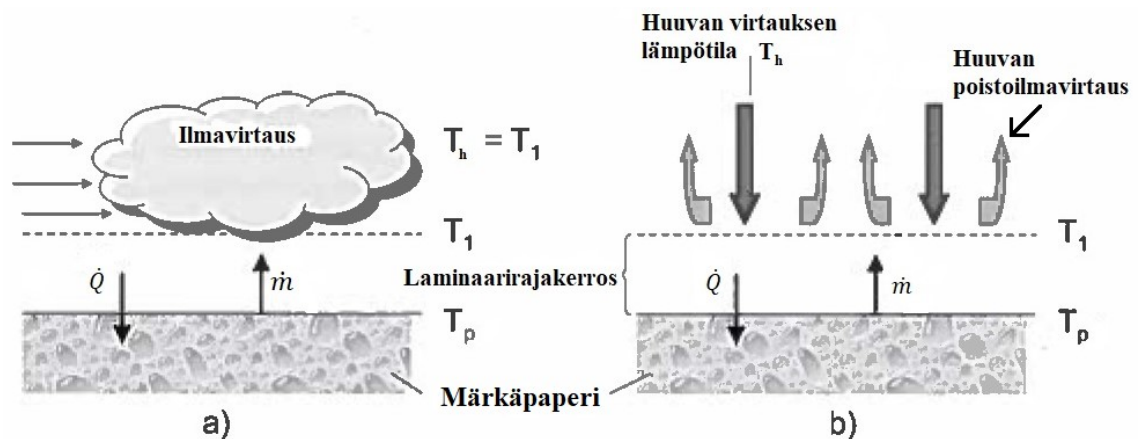


## 4.2 Huuvan lämmönsiirto

Huuvan lämmönsiirtotoiminta perustuu pakotettuun konvektioon ja säteilyyn. Kuuma ilma syötetään jenkkisynterinin ja huuvan väliin suuttimien kautta, jotka sijaitsevat huuvan rakenteessa. Puhallusilmasta paperiin siirtyvä konvektiivinen lämpövirta  $\dot{Q}_k$  voidaan esittää muodossa

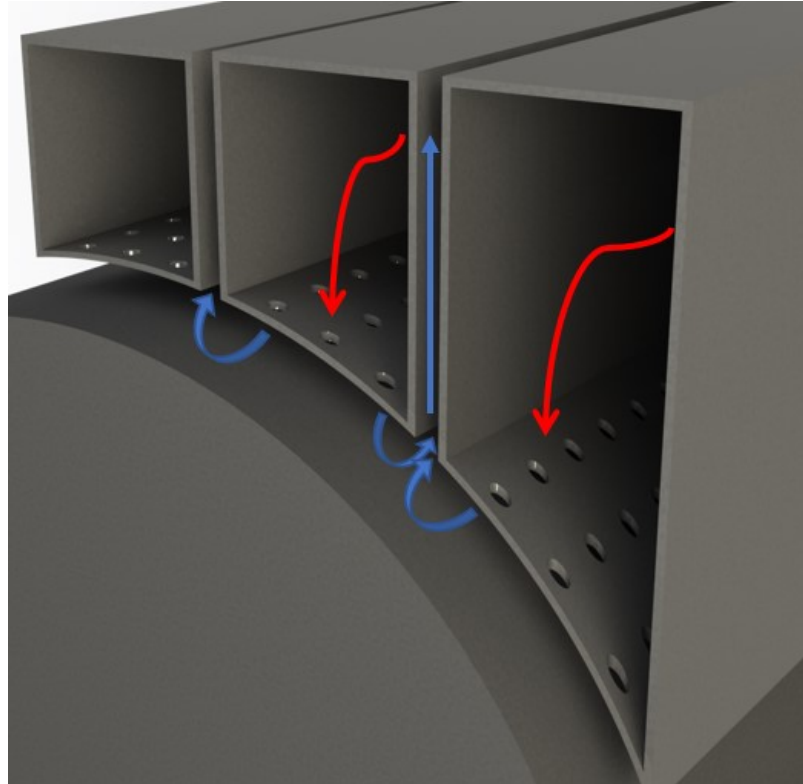
$$\dot{Q}_k = h(T_k - T_p)A_h, \quad (9)$$

missä  $h$  on lämmönsiirtokerroin puhallusilmasta paperiin [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],  $T_k$  on puhallusilman lämpötila [ $K$ ] ja  $A_h$  on huuvan suuttimilla varustetun osan pinta-ala [ $m^2$ ]. Puhallusilman konvektiivista lämmönsiirtoa vaikeuttaa laminaarinen kaasurajakkerros, joka muodostuu paperin pinnalle. Suurtehohuuvan tarkoituksena on rikkoa rajakerros ilmasuihkulla, mikä helpottaa lämmönsiirtoa ja haihdutusta. Kuvassa 12 on esitetty kuinka ilmavirtaus poistaa rajakerroksen ja tällöin huuvan lämmin ilma pääsee paremmin kosketukseen märän paperiradan kanssa. (Karlsson, 2012, s. 58)



**Kuva 12. Rajakerros paperiradan pinnalla (Karlsson, 2012, s. 58)**

Kuvassa 13 on poikkileikkaus huuvan ilmakierrosta. Kuvasta nähdään kuinka ilmavirta, joka on merkitty kuvaan punaisella, johdetaan huuvan kanavia pitkin reikien lävitse huuvan ja sylinterin väliin. Täällä ilmavirta liikkuu sylinterin pinnan mukaisesti samalla kuitaen paperirataa. Poistuessaan ilmavirta virtaa kanavien välistä, ja poistoilman kiertoa on tehostettu poistoilmapumpulla. Poistoilmapumpun toiminta on erittäin kriittistä huuvan lämmönsiirron toiminnalle ja paineisuudelle. Mikäli poistoilmapumpun toiminta ei ole riittävää, huuvan ja sylinterin välinen ilma kulkeutuu sali ilmaan ja näin menetetään lämpöenergiaa.



**Kuva 13. Huuvan ilmakierto jenkkisylinterä vasten**

Säteilyn mukana siirtyvä lämpövirta voidaan lausua yhtälön (10) avulla

$$\dot{Q}_R = \left( \frac{E_p - E_h}{\sum R_r} \right) A, \quad (10)$$

missä  $E_p$  on paperin mustan pinnan emissiviteettiteho,  $E_h$  on huuvan mustan pinnan emissiviteettiteho ja  $R_r$  on lämmönsiirtoa vastukset.

#### 4.2.1 Lämmönsiirtokerroin

Huuvan pakotetun konvektion tarkastelua voidaan laskea matemaattisesti dimensiotto-  
milla suureilla. Virtauksen suhteen tärkeimmät näistä ovat Prandtin-, Reynoldsin- ja  
Nusseltin luku. Prandtin luku  $Pr$  kuvaa liikemäärän suhdetta termiseen diffusiteettiin ja  
se on määritelty yhtälön (11) mukaisesti

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}, \quad (11)$$

missä  $c_p$  on aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)] ja  $\mu$  on dynaaminen viskositeetti [Pa·s]. Prandtin luku on ominainen aineelle ja on herkkä lämpötilan vaikutukselle. Kiuhan ilman tilanteessa lämpötilan muutos nostaa dynaamista viskositeettia ja lämmönjohdavuutta voimakkaasti. Näiden yhteisvaikutus jää kuitenkin pieneksi ja Prandtin luku on tyypillisesti 0,65 – 0,78 välillä.

Reynoldsin luku kuvaa kineettisten voimien suhdetta viskoosivoimiin. Viskoosivoimat pyrkivät pitämään virtauksen kasassa eli laminaarisena virtauksena. Mikäli kineettiset voimat kasvavat liian suureksi, muuttuu virtaus turbulenttiseksi. Reynoldsin luvun yhtälö voidaan lausua yhtälön (12) mukaisesti

$$Re = \frac{v_n L_{kr}}{\nu}, \quad (12)$$

missä  $v_n$  on virtauksen nopeus [m/s],  $L_{kr}$  on virtauksen karakteristinen mitta [m] ja  $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti [m<sup>2</sup>/s]. Reynoldsin luvun avulla voidaan määrittää virtauksen tyyppi. Kun kyseessä on sisäpuolinen virtaus ja Reynoldsin luku on alle 2000, virtaus on laminaarinen. Mikäli Reynoldsin luku on yli 2000, on virtaus turbulenttinen.

Nusseltin luvun avulla pystytään määrittämään huuhan lämmönsiirtokerroin  $h$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]. Nusseltin luvun ratkaisuun on taulukoita useita yhtälöitä eri virtaustyypeille ja riippuen Reynoldsin luvusta voidaan määrittää oikea yhtälö. Yleisessä muodossa Nusseltin luvun yhtälö (13) voidaan kirjoittaa muodossa

$$Nu = a_1 * Re^{a_2} * Pr^{a_3} + a_4, \quad (13)$$

missä  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  ja  $a_4$  ovat kokeellisesti määritetty vakioita (Mills, 2014, s. 269). Ratkaistun Nusseltin luvun avulla pystytään määrittämään lämmönsiirtokerroin yhtälöstä (14)

$$Nu = \frac{hL_{kr}}{\lambda}. \quad (14)$$

Rakenteellisia vaikuttavia tekijöitä huuhan lämmönsiirtokerroimeen on käytännössä viisi: Suuttimen koko, suuttimien etäisyys paperiradasta, reiättömän pinta-alan osuus koko-

naispinta-alasta huuvan alueella, suuttimien muoto sekä suuttimien ja poistoilma aukkojen sijoittelu. Näitä tekijöitä ei ole kuitenkaan tarkoitus lähteä muuttamaan optimointitilanteessa.

## 4.2.2 Lämpötilaero

Paperin lämpötilaan vaikuttaa jenkkisyylinterin pinnan välittämä lämpö ja huuvan puhallusilma. Koska huuvalta saapuva lämpöenergia ei ole yhtä suuri kuin jenkkisyylinterin pinnalta välittyvä lämpöenergia, eroavat paperin lämpötilat jenkkisyylinterin ja huuvan puolilla toisistaan. Lämpötilaeron suuruus riippuu paperin lämmönjohtavuudesta ja paperiradan paksuudesta. Puhallusilman lämpötila on tärkein säädettävissä oleva parametri kuivatuksen hallinnassa. Puhallusilman lämpötilan nosto lisää paperin lämpötilaa, mikä lisää höyrynpainetta ja haihdutuspotentiaalia. Lämpötilaa nostettaessa on huomioitava, että myös huuvan ilmankiertoa on tehostettava, sillä suurempi lämpötila haihduttaa kostetta nopeammin. Höyrystynyt vesi jää huuvan ja jenkkisyylinterin välille ja voi ruveta kondensoitumaan. On myös mahdollista, että ylimääräinen vesihöyry karkaa huuvan poistoilmakanavien ohi halliin, jolloin menetetään lämpöenergiaa. Lisäksi kuumempi puhallusilma voi altistaa paperiradan liialle kuumuudelle, jolloin paperirata voi syttyä palamaan.

## 4.2.3 Lämmönsiirto säteilemällä

Pieni osa lämmönsiirrosta tapahtuu säteilemällä. Säteilyn osuus kuitenkin kasvaa merkittäväksi suurilla lämpötiloilla. Lämpövirta, joka siirtyy säteilyn mukana, on esitetty yhtälössä (10). Yhtälössä (10) esitetty mustan pinnan emissiviteettiteho voidaan ratkaista yhtälön (15) mukaisesti

$$E_p = \sigma T_p^4, \quad (15)$$

missä  $\sigma$  on Stephan-Boltzmanin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ). Vastaavasti voidaan kirjoittaa huuvan pinnan emissiviteettiteho  $E_H$  (16)

$$E_H = \sigma T_h^4. \quad (16)$$

Paperin ja huuvan pinnan emissiviteetit ja näkyvyyskerroin  $F_{pH}$  vastustavat lämmönsiirtoa pintojen välillä. Emissiviteetillä tarkoitetaan sitä, paljonko pinta lähettää säteilyä verrattuna mustaan pintaan. Paperipinnan resistiivisyys  $R_p$  voidaan kirjoittaa (17)

$$R_p = \frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p}, \quad (17)$$

missä  $\varepsilon_p$  on paperipinnan emissiivisyys. Vastaavasti huuvan resistiivisyys  $R_h$  voidaan kirjoittaa (18) mukaisesti

$$R_h = \frac{1-\varepsilon_h}{\varepsilon_h}, \quad (18)$$

missä  $\varepsilon_h$  on huuvan pinnan emissiivisyys.

Näkyvyyskerroimen huomiointi resistiivisyydessä  $R_n$  tapahtuu yhtälön (19) mukaisesti

$$R_n = \frac{1}{F_{ph}}, \quad (19)$$

missä  $F_{ph}$  on näkyvyyskerroin paperiradan ja huuvan pinnan välillä. Paperiradan ja huuvan tilanteessa arvoksi tulee 1, joten  $R_n$  saa arvon 1 (Mills, 2014, s. 533-539). Säteilylämpöenergia (10) voidaan nyt kirjoittaa auki muotoon

$$\dot{Q}_r = \left( \frac{\sigma(T_h^4 - T_p^4)}{\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p} + \frac{1-\varepsilon_h}{\varepsilon_h} + 1} \right) A. \quad (20)$$

## 5. AINEENSIIRTO

### 5.1 Haihdutustehoon vaikuttavia tekijöitä

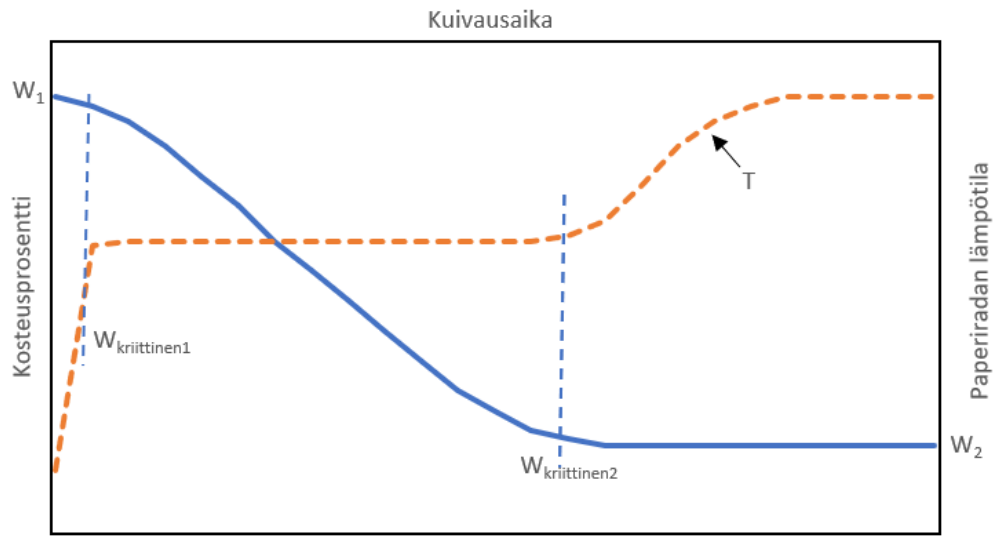
Kun neliöpaino, paperilaji, alku- ja loppukosteusasteet sekä puristusolosuhteet saadaan pidettyä vakioina, voidaan todeta, että haihdutus riippuu seitsemästä tekijästä. Huuvan alueella suurin vaikuttava tekijä on lämmönsiirron tehokkuus. Paperin osalta haihdutukseen vaikuttaa paperin halutut ominaisuudet ja paperin lämpötila sen saapuessa jenkkisylinterille. Lisäksi puhallusilman lämpötila, nopeus ja kosteus vaikuttavat haihdutustehoon. Myös rakenteelliset tekijät, kuten suuttimien geometria vaikuttavat osaltaan kokonaihaihdutustehon arvoon.

Lämmönsiirron tehokkuus on määriteltävissä paperiin siirtyvän lämpöenergian avulla. Mitä enemmän lämpöenergiaa pystytään toimittamaan paperiin, sitä suurempi on haihdutusteho. Paperin lämpötilan vaikutus on kaksiosainen. Toisaalta korkeampi paperin lämpötila tehostaa haihtumista, mutta tällöin se myös pienentää siirtyvää kokonaislämpöenergiaa  $\dot{Q}$  sylinterillä. Tämä johtuu siitä, että huuvan ja paperin välinen lämpötila laskee. Paperin ominaisuudet, kuten huokoisuus ja paksuus, vaikeuttavat lämmönsiirtoa paperissa ja näin vaikuttavat haihdutustehoon. Paperin paksuus vaikuttaa paperiradan kosteusprofiiliin, sillä lämmitystä tapahtuu kummaltakin pinnalta ja paperissa tapahtuvat höyrystymis-tiivistymisvaiheet ovat tällöin paperiradan keskiosassa. Tällöin paperiradan kostein kohta löytyy paperin keskiosasta.

Puhallusilman nopeus vaikuttaa suoraan lämmönsiirtokertoimeen, sillä aineensiirto ja lämmönsiirto ovat riippuvat toisistaan. Ilman nopeus vaikuttaa myös aineensiirtokertoimeen. Puhallusilman kosteusosuus vaikuttaa puhallusilman haihdutuspotentiaaliin. Kosteuksen kasvaessa potentiaaliero puhallusilman ja maksimikosteuden välillä laskee eikä vettä pystytä haihduttamaan halutulla tehokkuudella. Suuttimien geometria ja sijoittelu vaikuttavat myös aineensiirtokertoimeen. Itse geometrialla voidaan vaikuttaa virtaustyyppiin ja sijoittelulla voidaan tehostaa ilmavirtauksen suuntautumista poistoilmakanaviin. Hyvän sijoittelun ansiosta pystytään vähentämään halliin karkaavaa lämmintä ilmaa.

## 5.2 Paperiradan kuivatusvaiheet

Paperinkuivatusprosessi voidaan jakaa mekaanisen kuivaamisen lisäksi kolmeen osaan: lämmitysvaiheeseen, jatkuvaan höyrystymiseen ja laskevaan höyrystysvaiheeseen. Tämä kuitenkin toteutuu vain, jos kuivausolosuhteet pysyvät vakiona. Todellisuudessa olosuhteet pääsevät kuitenkin hieman vaihtelevaan, jolloin vaihteita ei pystytä täsmällisesti määrittämään. Kuvassa 14 on esitetty kosteuden osuuden ja paperin lämpötilan kehitys kuivumisajan funktiona. Kuvasta voidaan nähdä kuivumisprosessin kolme osaa.



**Kuva 14. Kosteusosuuden ja paperin lämpötilan kehitys kuivumisajan funktiona, muokattu lähteen mukaan (Karlsson, 2012, s. 47)**

Paperin lämpötila on kuvattu kuvassa 14 katkoviivalla. Kuvassa  $W_1$  on alkukosteus ja  $W_2$  on loppukosteus. Kuivatusprosessin kolme osaa voidaan katsoa muuttuviksi kriittisissä pisteissä. Ensimmäinen kriittinen piste sijaitsee lämmitysvaiheen ja jatkuvan höyrystymisvaiheen välissä. Toinen kriittinen piste sijaitsee jatkuvan höyrystymisvaiheen ja laskevan höyrystymisvaiheen välissä. Paperiradan saapuessa kuivatusosalle paperirata on viileä ja sisältää paljon vettä. Kuvasta nähdään, että kuivatusvaiheen alussa paperin lämpötila nousee nopeasti. Tätä osaa kutsutaan lämmitysvaiheeksi. Tämän jälkeen lämpötila vakiintuu, jona aikana paperiradan kosteusprosentti laskee huomattavasti. Tällöin kaikki lämpöenergia kuluu veden höyrystämiseen paperista. Höyrystyminen on tällöin mahdollista paperiradan pinnalta, mutta myös paperiradan sisältä, mikäli paperin huokoisuus tämän mahdollistaa. Kun kosteusprosentti saavuttaa alhaisen tason, se ei enää luovuta kosteutta paperista. Alhaisessa kosteusprosentissa paperiin kohdistuva lämpöenergia ei enää poista kosteutta paperista, vaan lämpöenergia kuluu paperin lämpötilan nostamiseen. Kuivumisnopeuden laskuun vaikuttaa monta tekijää, jotka osaltaan vaikut-

tavat lämpötilan nousuun. Paperikuitujen hygroskooppisten ominaisuuksien johdosta vesihöyryn paine laskee, mikä tiivistää jäljellä olevan vesimäärän syvälle paperirataan. Tämä taas nostaa paperiradan diffuusion ja lämpöenergian vastustusta. Jäljellä olevan kosteuden poistamiseen tuleekin käyttää enemmän energiaa, mikä johtaa paperiradan lämpenemiseen.

Jatkuvan höyrystymisvaiheen ja laskevan höyrystymisvaiheen välistä pistettä kutsutaan kriittiseksi kosteusosuudeksi (critical moisture content, CMC). Kuivausteorian mukaan aineella on kaksi kriittistä pistettä, jotka näkyvät kuvassa 14. Testeissä kuitenkin pystytään tyypillisestä määrittämään vain ensimmäinen kriittinen kosteusosuuspiste. Kriittisen kosteusosuuden paikan määrittämiseen suurin vaikuttava tekijä on neliöpaino, eli paperiradan paino neliöitä kohti. Mitä suurempi neliöpaino, sitä suurempi paksuus. Tällöin massan- ja lämmönsiirron vaikutukset radan sisällä kasvavat ja nopeuttavat kuivausprosessia. Tällöin myös kriittinen kosteusosuuspiste saavutetaan nopeammin. (Karlsson, 2012, s. 47-48)

### 5.3 Ominashaihdutusnopeus

Kuivaussyylintereille käytetään tyypillisesti TAPPI menetelmä kuivausnopeutta, kun määritetään ominashaihdutusnopeutta (21)

$$TAPPI = \frac{\dot{m}_{höyry}}{A}, \quad (21)$$

missä  $\dot{m}_{höyry}$  on höyrystyvän vesihöyryn massavirta [kg/s] (Karlsson, 2012, s. 47). Yhtälö (21) on laskettu yksittäiselle kuivaussyylinterille, kuten jenkkisyylinteri. TAPPI menetelmällä on kuitenkin mahdollista laskea kuivausnopeus myös koneille, joilla on useita kuivaussyylintereitä. Tällöin kuivausnopeuden määrittämiseen käytetään yhtälöä (22)

$$TAPPI = \frac{\dot{m}_{höyry}}{n_{syl} d_{syl} \pi l}, \quad (22)$$

missä  $n_{syl}$  on sylintereiden lukumäärä ja  $l$  on sylinterin leveys [m]. Määritetty ominashaihdutusnopeus ei kuitenkaan ole vakio prosessille, sillä hetkellinen haihdutusmäärä vaihtelee. Tämä johtuu siitä, että jenkkisyylinterin ja paperin välinen lämmönsiirto-kerroin ei pysy vakiona. Myöskään paperin lämpötila ei pysy vakiona prosessin aikana. Näin ollen hetkellistä arvoa ei pystytä määrittämään tarkasti.



## 5.4 Aineensiirtokerroin

Aineensiirtokertoimen määrittelyyn voidaan käyttää lämmönsiirtokerrointa Reynoldsin analogian avulla. Reynoldsin analogia ilmaisee liikemäärän ja lämmönsiirron yhteyden turbulentsissa sekoittumisessa. Analogian perustana oletetaan rajakerroksen lämmönsiirtokerroin ja liikemäärä yhtä suuriksi (Atkins & Escudier, 2013). Reynoldsin analogian avulla saadaan yhteys kitkan ja lämmönsiirron välille yhtälön (23) mukaisesti

$$\frac{C_f}{2} = StPr^{0,6}, \quad (23)$$

missä  $C_f$  on rajakerroksen kitkakerroin ja  $St$  on Stantonin luku lämmönsiirtoon. (Mills, 2014, s. 276) Rajakerroksen kitkakerroin on dimensioton kerroin liikemäärälle seinämän läheisyydessä. Rajakerros kitkakerroin on määritetty yhtälön (24) mukaan

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho v_n^2}, \quad (24)$$

missä  $\tau$  on seinämän leikkausjännitys [ $\text{N/m}^2$ ],  $\rho$  on tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ] (Mills, 2014, s. 252).

Chilton-Culburn analogia, joka tunnetaan myös nimellä j-factor, on laajasti käytetty yhtälö lämmönsiirtokertoimen, aineensiirtokertoimen ja liikemäärän laskentaan. Analogia on nimetty sen kehittäneiden insinöörien Thomas H. Chiltonin ja Allan P. Colburnin mukaan. Analogian tarkoituksena on ratkaista tuntemattomat kertoimet, kun yksi tunnetaan (Schaschke, 2014). Chilton-Culburn analogian avulla liikemäärä, lämmönsiirtomäärä ja aineensiirtomäärä oletetaan yhtä suuriksi. Yhtälö (23) voidaan nyt lausua yleisessä muodossa

$$\frac{C_f}{2} = Stpr^{n_v} = St_m Sc^{n_v}, \quad (25)$$

missä  $St_m$  on Stantonin luku massasiirrossa ja  $n_v$  on vakio.  $n_v$  arvo riippuu virtauksen tyypistä, turbulentsille virtaukselle se saa arvon 0,66 ja laminaarille virtaukselle 0,6. (Volchkov; Terekhov; & Terekhov, 2004, s. 1478)

Stantonin luku on määritetty erikseen lämmönsiirtoon ja massan siirtoon. Lämmönsiirrossa Stantonin luku saadaan yhtälön (26) avulla

$$St = \frac{h}{\rho v_n c_p} . \quad (26)$$

Saatu luku on yksikötön kuten kaikki Stantonin luvut (Mills, 2014, s. 256). Stantonin luku massan siirron suhteen saadaan yhtälön (27) mukaisesti

$$St_m = \frac{k}{v_n} , \quad (27)$$

missä  $k$  on aineensiirtokerroin (Tsilingiris, 2010, s. 309). Kun Stantonin yhtälöt on määritetty lämmönsiirrolle ja aineensiirrolle, voidaan ratkaista aineensiirtokerroin Chilton-Culburn analogian avulla (25). Turbulenttisessa tilanteessa aineensiirtokerroin saadaan ratkaistua yhtälön (28) mukaisesti

$$k = \frac{h}{\rho c_p} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0,6} . \quad (28)$$

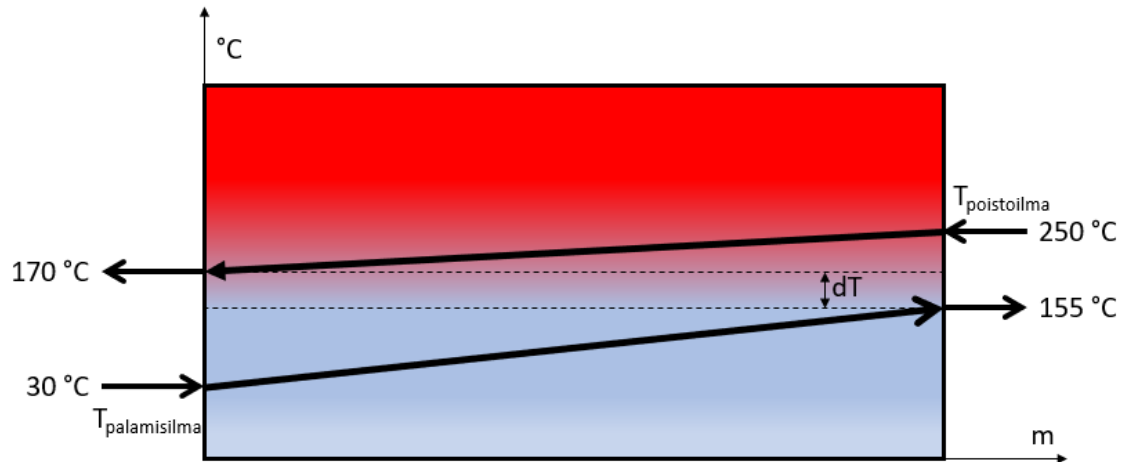
## 6. PAPERIKONE 1:N HUUVA

### 6.1 Huuvan muuttujat

Huuvan optimoinnin suhteen on tarkasteltava koko kuivausprosessia, jotta voidaan määrittää merkitykselliset muuttujat. Tutkitun paperin ominaisuuksien osalta vaikuttavia tekijöitä ovat neliömassa, kreppaussuhde ja paperiradan leveys. Näistä arvoista paperiradan leveys pyritään pitämään aina maksimiarvossaan. Kreppaussuhteen vaikutus tulee ilmi jenkki sylinterille saavuttaessa. Mitä korkeampi on kreppaussuhde, sitä enemmän paperi on krepattu. Haluttu neliöpaino asettaa rajoituksia kuivaustehokkuuteen. Mikäli neliöpaino on erityisen suuri, voidaan jenkki sylinterin painetta joutua laskemaan ja huuvan osuutta kuivatuksesta tehostamaan. Huuvan osuuden nostaminen onnistuu tehostamalla kuuman ilman kiertoa. Tällöin kuitenkin on myös lisättävä ilmanpoiston tehokkuutta, jotta ylimääräinen kuivausilma ei pääse karkaamaan halliin.

Korkean neliöpainon lajeilla vettä tulee paperiradan mukana jenkki sylinterille enemmän kuin kevyemmällä lajeilla. Tällöin huuvan tuottama maksimaalinen kuivauskapasiteetti ei välttämättä riitä kuivaamaan paperia haluttuun kosteusprosenttiin. Tällöin joudutaan rajoittamaan paperikoneen ajonopeutta, jotta paperirata saadaan haluttuun kosteuteen ennen kreppauskaavaria. Nykyisten paperilaatujen ajoarvot ovat esiteltyinä liitteessä B.

Huuvan ilmakertoimen suhteen muuttujia ovat polttoaineen valinta, polttoaineen syöttömäärä, kierrätysilman lämpötila, palamisilman lämpötila, huuvan lohkojen painepuolen puhaltimen tehokkuus ja imupuolen puhaltimen tehokkuus. Mitoituksen kannalta puhaltimien tehokkuuden tulisi olla mahdollisimman lähellä maksimia vakioajotilanteessa. Mikäli puhaltimia ajetaan täydellä vauhdilla pienemmällä kuin täydellä kapasiteetilla, on puhaltimet mitoitettu koneelle väärin. Väärin mitoitettu kone tuottaa ylimääräisiä kuluja sähkökulutuksen kautta ja prosessin energiatehokkuus laskee. Palamisilmaan vaikuttaa lämmönvaihtimen asteisuus ja lämmönvaihtimen toiminta. Optimitilanteessa palamisilma poistuu lämmönvaihtimesta muutaman asteen viileämpänä, kuin mitä savukaasu on poistuessaan lämmönvaihtimesta. Kuvassa 15 on esitetty lämmönvaihtimen asteisuudesta, jota kuvaa arvo  $dT$ .

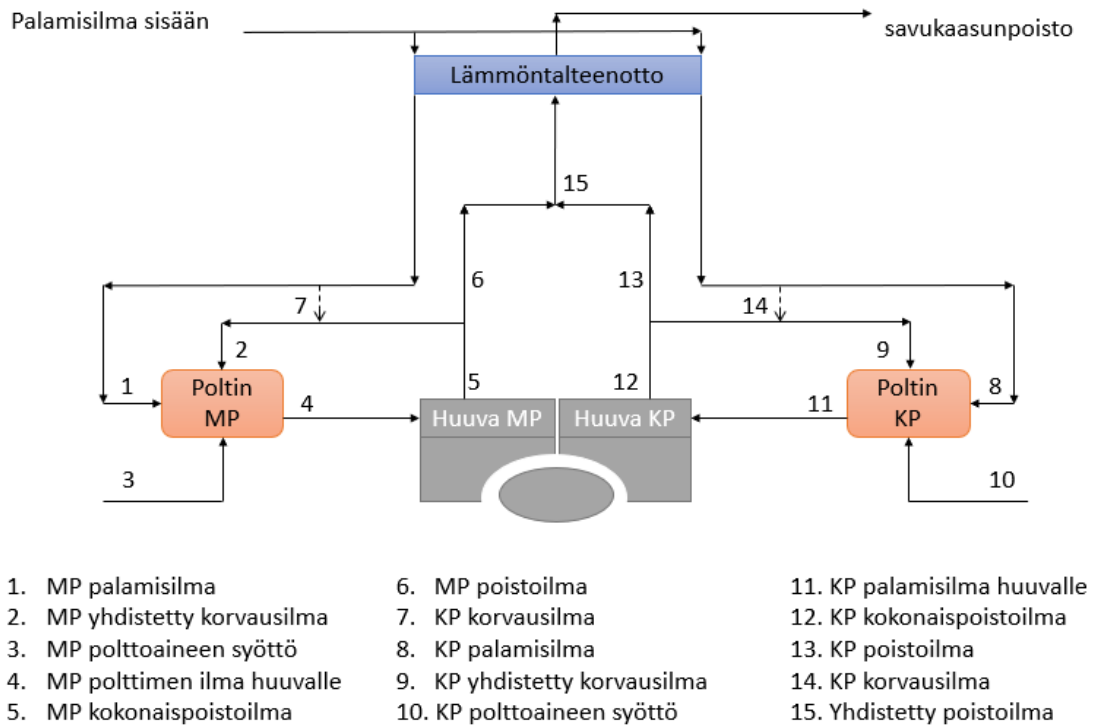


**Kuva 15. Lämmöntalteenotossa palamisilma kuumennetaan poistoilmalla**

Lämmönvaihtimessa poistoilma jäähtyy luovuttaessaan lämpöenergiaa palamisilmalle. Korkeampi palamisilma vähentää polttoaineen syöttömäärää, sillä ilmaseoksen tavoitelämpötilaan pääsemiseksi tarvitaan vähemmän lämpöenergiaa.

Osa savukaasuista palaa takaisin poltinhuoneeseen ja sieltä takaisin huuvin sisälle kuivattamaan paperirataa. Mitä lämpimämpää kierrätysilma on tullessaan poltinhuoneelle, sitä vähemmän sen lämmittämiseen joudutaan käyttämään energiaa. Polttoaineen valinnalla ja sen syöttömäärällä pystytään vaikuttamaan kemiallisesti vapautuvan energian määrään. Korkeammalla syöttömäärällä saadaan korkeampi lämpötila huuvalle lähtevään ilmaseokseen tai sen nopeutta voidaan nostaa. Korkea lämpötila nostaa paperiradan kuivumisnopeutta, mutta tällöin on mahdollista, että paperin lämpötila nousee liian suureksi ja paperi leimahtaa.

Paperikone 1:n prosessin ilmankierto on esitettyä kuvassa 16.



**Kuva 16. Paperikone 1:n ilmankiertoprosessikuva**

Kuvassa 16 paperi saapuu huuvan alueelle vasemmalta puolelta. Pisteet 6 ja 13 ovat poistoilmakanavien mittauspisteitä, jotka yhdistyvät yhdeksi poistoilmakanavaksi pisteessä 15. Tätä poistoilmaa käytetään lämmittämään palamisilmoja 1 ja 8. Tällä menetelmällä minimoidaan ilman lämmitys polttimilla. Yhdistettyjen korvausilmojen lämpötilat ja kosteudet ovat käytännössä samat kuin poistoilmakanavien pisteillä, sillä korvausilmat 7 ja 14 olivat kiinni jokaisessa mittauksessa.

## 6.2 Ainetase

Paperikone 1:n tilanteessa ainetase on laskettu kokonaisilmalle ja vedelle. Ainetaseilla on tarkasteltu sekä huuvan paineisuutta, että huuvan ohi sali-ilmaan karkaavan vesihöyryn määrää. Huuvaa tarkastellaan yksinkertaistettuna mustana laatikkona, jolloin sisään menevän virtauksen määrän täytyy olla yhtä suuri kuin poistuvan. Mahdollinen ero tulkitaan ohivirtaukseksi tai imuksi. Huuvan ollessa alipaineinen on mahdollista, että huuvan poistoilmapuhallin imee poistoilmakanavan kautta kylmää ilmaa salista. Tämä kuitenkin vaatii sen, että huuvan alipaine on suhteellisen suuri.

Kun suoritetaan huuvan alueelle vesikierron ainetase, huomataan, että vettä virtaa prosessiin sisään kolmesta lähteestä. Suurin osa vedestä virtaa nestemäisenä vetenä paperiradan mukana huuvalle ja jenkkisyylinterille. Osa kosteudesta tulee märän ja kuivan pään polttimilta ilmaseoksen mukana vesihöyrynä. Veden poistumiseen tarkastelualueesta vaikuttaa kaksi virtauskanavaa: huuvan poistoilma ja poistuva paperirata. Näiden lisäksi tarkastelualueella on yksi muuttuva tekijä, ohivirtaus. Ohivirtaus voi olla joko huuvalta karkaavaa vesihöyryä halliin tai hallista imettävää kosteutta poistoilmakanavaan. Laskennassa ohivirtaus on laskettu positiiviseksi, eli oletuksena on, että osa paperiradan mukana tulleesta vedestä höyrystyy, mutta se pääsee karkaamaan huuvan poistoilmakanavilta sali-ilmaan. Mikäli huuva on alipaineinen, muuttuu ohivirtausarvo negatiiviseksi, eli tällöin huuva imee kosteutta hallin ilmasta poistoilmakanavaan.

Paperiradan kuiva-aineisuus jenkkisyylinterille saavuttaessa on noin 45 %, jolloin paperiradan mukana saapuvan veden määrä voidaan laskea. Paperiradan poistuessa sen kuiva-aineisuus on noin 88 %, jolloin radan mukana poistuva vesimäärä on myös laskettavissa. Psykometristen mittausten perusteella saadaan selville veden ja ilmaseoksen sekoitussuhde polttimille virtaavissa kanavissa ja poistoilmakanavassa. Paperikone 1:n tilanteessa ei ollut mahdollista mitata kosteusosuutta polttimen jälkeen, mutta koska aineen määrä pysyy vakiona, voidaan todeta, että polttimeen virtaavien virtausten veden ainemäärä pysyy vakiona. Tällöin veden määrä polttimen jälkeen on polttimeen tulevien virtausten vesiosuuksien summa.

Ilmataseen tarkastelussa, ilmaa virtaa huuvan alueelle kahdesta lähteestä: märän ja kuivanpään polttimilta. Ilman on tarkoitus poistua huuvalta vain poistoilmakanavaan. Mikäli huuva on kuitenkin ylipaineinen, poistoilmakanava ei jaksa imeä kaikkea virtausta sisään, vaan osa virtauksesta pääsee halliin. Vastaavasti alipaineisena poistoilmakanava imee liikaa, jolloin osa poistoilmakanavan virtauksesta on hallin ilmaa. Laskennassa ohivirtaus on oletettu positiiviseksi, eli huuvesta pääsisi hieman ilmaa karkaamaan sali-ilmaan.

### 6.3 Energiatase

Paperikoneen jenkkisyylinterin ja huuvan alueelle suoritettussa energiataaseessa tarkasteltiin virtausten sisältämää energiaa. Osa virtauksista on nestemäisiä ja osa kaasumaisia.

Lisäksi osa kaasusta sisälsi kosteutta ja osa taas tulkittiin kuivaksi ilmaksi. Systeemiin tuotu ja viety energiasisältö pystyttiin määrittämään yhtälön (29) mukaan.

$$\dot{Q} = \sum \dot{m}_i h_i, \quad (29)$$

missä  $h_i$  on valitun pisteen entalpia [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]. Ilmaseos koostuu tulistetusta vesi-höyrystä ja ilmasta. Näiden osat kuitenkin tiedetään psykometrisen mittauksen perusteella, joten osuuksien massavirtaukset pystytään selvittämään erillään. Entalpiat on määritetty erikseen jokaisessa pisteessä paineen ja lämpötilan funktiona. Vesi osuuksien entalpiat on määritetty H-S piirroksen avulla. Ilman osuuksien entalpia on määritetty ilmanlämpötilan ja ominaislämpökapasiteetin avulla. Ominaislämpökapasiteetti on riippuvainen lämpötilasta, joten se täytyy huomioida laskennassa. Energiataseen tavoitteena oli saada mahdollisimman hyvä kuva paperikoneen energiakulutuksesta ja päästä mahdollisimman lähelle kuukauden keskimääräistä energian kulutusta. Energiataseen tarkastelussa tarkastetaan myös paperikoneen tarvitseman energian määrää veden lämmittämiseen, höyryttämiseen ja tulistamiseen. Lämpöenergiaa kuivausprosessiin saadaan vain polttimilta ja jenkkisyliinteriltä.

Vapautuva kemiallinen energia saadaan laskettua, kun tiedetään, että butaanin lämpöenergia on 49 MJ/kg. Kemiallinen energia sitoutuu polttimien läpi virtaavaan ilmaan ja kulkeutuu siitä huuvalle. Jenkkisyliinterin luovuttama energia pystytään määrittämään sylinteriin virtaavan höyryn määrästä, kun tiedetään höyrynpaine. Jenkkisyliinterin vastaanottama energia höyrystä on höyryn lauhtumisessa vapautuva energia.

Paperin kuivatukseen tarvittavan energian määrä voidaan laskea veden lämmittämiseen, veden höyryttämiseen ja höyryn tulistamiseen käytettyjen energioiden summasta. Veden lämmittämiseen ja höyryn tulistamiseen kuluva energia voidaan laskea yhtälön 30 avulla,

$$\dot{Q} = c_p \dot{m} (T_i - T_{ref}), \quad (30)$$

missä  $T_{ref}$  on veden referenssilämpötila [K], joka on sovittu tarkastelussa 298 K. Veden lähtölämpötila on 25 °C ja höyryn referenssilämpötila 373 K. Veden höyrystämiseen kuuluva energia saadaan laskettua, kun tiedetään höyrystyvän veden massavirta ja veden höyrystymisenergia on 2260 kJ/kg.

Energiataseen määrittämisessä lähdettiin liikkeelle siitä, että polttimien virtausten energiasäilytys laskettiin. Laskennassa oletettiin, että kanavien lämpöeristys ei ole erityisen hyvä, jolloin prosessiin hukkuvan energian määrä saattaa olla suuri. Sisään kuivaussysteemiin virtasi energiaa, märän- ja kuivanpään kanavien kautta, paperiradan mukana sekä jenkkiylinterin vaikutuksesta. Energiaa poistui systeemistä poistoilmakanavan, paperiradan ja halliin karkaavan ilman mukana. Oletuksena siis pidettiin, että huuva olisi tasapainossa, mutta hyväksyttiin, että osa vesihöyrystä karkaa huuvan alueelta. Lisäksi putkistohäviöt ja lämmön karkaaminen huuvan ulkopuolelle on mahdollista. Märänpään kanavien energiasäilytys oletettiin muodostuvan huuvalta palaavasta virtauksesta, polttinilmasta ja savukaasuista. Sama oletus tehtiin myös kuivanpään kanavan suhteen. Sisään- ja ulosvirtaukset pystyttiin laskemaan psykometristen mittausten perusteella melko tarkasti. Jenkkiylinterin tuoma energia pystyttiin määrittämään, sillä oletuksella että sisään virtaava höyry on kyllästyskäyrällä. Tällöin jenkkiylinterin seinämän yli johdettava energia on veden lauhtumisessa vapautuvaa energiaa.

Saadut tulokset eivät kuitenkaan vastanneet kuukauden keskimääräistä energiakulutusta. Tämän perusteella jouduttiin toteamaan, että joku lähtöoletuksista on väärin. Herkkyyštarkastelun perusteella huomattiin, että polttimen lämpötilan muutos ei aiheuttanut suurta muutosta huuvalle puhallettavaan ilman energiasäilytykseen. Tässä vaiheessa huomattiin, että polttoaineen palamisessa vapautuvaa kemiallisen energian osuutta ei oltu huomioitu energiataseessa. Laadittiin uusi oletus huuvalle energiataseesta. Virtausmäärät polttimelle saadaan kuten edellisessä hypoteesissa, mutta nyt kaikkien lämpöenergioiden määrittämisessä oletettiin lämpötila polttimen lämpötilaksi. Saatua tulosta vastaa hyvin kuukausiraportin ilmoittamaa energiankulutusta huuvan ja jenkkiylinterin osalta, joten voidaan hyväksyä tehdyt oletukset.

Energiataseen laskennassa kanaviston kosteusosuudet saatiin laskettua psykometrisen laskennan perusteella. Tämän perusteella pystyttiin määrittämään kanavistossa virtaavan veden ja ilman massavirrat. Putkessa kokonaislämpöenergia saatiin, kun laskettiin yhteen kanavan kuivan virtauksen lämpöenergia ja kostean virtauksen lämpöenergia.



Polttimien kohdalla jouduttiin olettamaan palamisilman ja korvausilman olevan täysin kuivia. Tämän oletuksen pohjalta pystyttiin määrittämään uudet kosteusosuudet polttimien kokonaisvirtaukselle.

Energiataseen selvityksessä pyrittiin myös löytämään mahdollisia kohteita, joilla voidaan säästää energiaa jatkuvassa prosessissa. Tarkastelussa suurin tekijä oli huuvan paineisuus. Huuvan ollessa alipaineinen, huuva imee poistokanavaan enemmän ilmaa, kuin mitä huuvaan puhalletaan. Tällöin polttimilta tuleva kuuma ilmaseos sekoittuu imettävän sali-ilman kanssa. Hallin ilman lämpötila on noin 30 – 40 °C, kun taas huuvalle puhallettava ilma on yli 400 °C. Koska lämpötilaero on näinkin suuri, jo pieni määrä kylmää ilmaa laskee poistoilmakanavassa virtaavan ilmaseoksen lämpötilaa. Laskenut lämpötila taas vaikuttaa lämmönvaihtimen toimintaan ja laskee tämän välityksellä poltinilman lämpötilaa. Madaltuneen poistoilman lämpötila vaikuttaa myös huuvan kiertoilmakanavan virtauksen lämpötilaan. Kiertoilma otetaan suoraan poistoilmakanavasta, jolloin ilmaseoksen lämpötila on sama kuin poistoilman. Matalampi kiertoilman lämpötila lisää energian tarvetta polttimella, jolloin joudutaan käyttämään enemmän polttoainetta, jotta polttimelta poistuva ilmaseos sisältää halutun määrän energiaa.

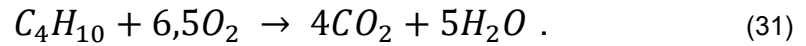
## 6.4 Savukaasuanalyysi

Polttoaineena paperikoneen polttimille käytetään butaania, joka sisältää pieniä määriä epäpuhtauksia. Taulukossa 1 on esitettyä Neste Oil:in ilmoittama polttoaineen koostumus.

**Taulukko 1. Butaanin koostumus**

<i>Aine</i>	<i>Molekyylikaava</i>	<i>Prosentuaalinen osuus</i>
<i>Butaani</i>	$C_4H_{10}$	98,84 %
<i>1,3-Butadieeni</i>	$C_4H_6$	0,06 %
<i>Pentaani</i>	$C_5H_{12}$	1 %
<i>Rikki</i>	S	0,0005%
<i>Heksaani</i>	$C_6H_{14}$	0,1%

Polttoaineen koostumuksesta pystytään määrittämään jokaiselle yhdisteelle ainemäärä aineen moolimassan avulla. Tarkastelu määräksi on valittu 1 kg polttoainetta. Ainemäärän perusteella voidaan laskea alkuaineiden määrät, reaktioyhtälön (31) mukaisesti



Aineensiiirroissa ainemäärä yhtälön molemmin puolin pysyy vakiona. Tällöin yhdestä moolista butaania muodostuu neljä moolia hiiltä ja kymmenen moolia vetyä. Tämän perusteella voidaan laskea kaikkien alkuaineiden osalta ainemäärät savukaasuanalyysiä varten. Saadun ainemäärän pohjalta voidaan määrittää polttoaineen sisältämien alkuaineiden massat.

Savukaasun muodostukseen tarvittava happi saadaan palamisilmasta, joka johdetaan suoraan polttimelle. Taulukossa 2 on suoritettu savukaasuanalyysi butaanille. Esitysteknillisistä syistä taulukon arvot on pyöristetty, mutta liitteessä C on esitetty tarkoilla arvoilla laskettu savukaasuanalyysi. Laskenta on suoritettu ilmakertoimella 1, jotta saadaan selvitettyä pienin määrä muodostuvia savukaasuja. Palamisilmassa saapuvan kosteuden osuus on oletettu erittäin pieneksi, minkä seurauksena se on jätetty pois tarkastelusta.

**Taulukko 2. Savukaasuanalyysi butaanille**

Savukaasuanalyysi Butaanille									
	M	m <sub>pa</sub>	n <sub>pa</sub>	O <sub>2</sub> tarve	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>
C	12,01	826,67	68,83	68,83	68,83				
H <sub>2</sub>	2,016	173,33	85,98	42,99				85,98	
O <sub>2</sub>	32	0	0	0					
N <sub>2</sub>	28,01	0	0	0			0		
S	32,06	0,005	0,00	0,00016		0,00016			
H <sub>2</sub> O	18,02	0	0	0				0	
tuhkaa									
yht		1000	154,81	111,82	68,83	0,00016	0	85,98	0
Hapen tarve				111,82					
Ilmakerroin				1					
Happea yhteensä				111,82					
Typeä ilmassa				421,56			421,56		
Happea savukaasuissa				0					0
Kosteutta palamisilmassa				0					
yht					68,83	0,00016	421,56	85,98	0

Savukaasu sisältää 68,83 mol hiilidioksidia, 0,00016 mol rikkidioksidia, 421,56 mol typpeä ja 85,98 mol vettä. Aineiden osuudet kokonaissavukaasusta ovat hiilidioksidi 11,9 %, rikkidioksidi 0,000027 %, typpeä 73,1%, vettä 14,9 %.

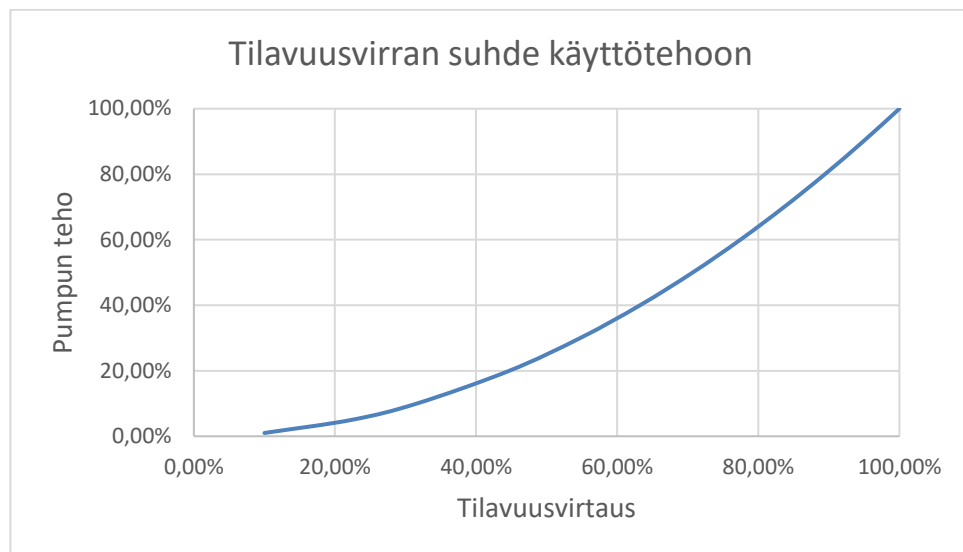
Muodostunut savukaasu sekoittuu polttimen alueella huuvan yhdistettyyn korvausilma-kiertoon ja ylimääräiseen palamisilmaan. Tämän perusteella pystytään määrittämään tarkka massavirta polttimelta huuvalle. Tällöin on kuitenkin huomioitava että, palamisilman määrästä on vähentynyt 15,45 kg ilmaa polttoainekilogrammaa kohden.

## 6.5 Koneen huuvan ilmankierron optimiarvojen määrittäminen

Paperikone 1:n tuotanto koostuu 50 eri tuotteesta, joiden koostumus ja neliöpaino vaihtelevat suuresti. Paperikoneen laajan tuotevalikoiman johdosta sille ei pystytä määrittämään optimiarvoa, joka olisi toimiva kaikille tuotteille. Optimiarvo voidaan laskea kyllä eniten rajoittavan tuotteen tilanteelle, mutta tällöin menetetään energiaa tuotannossa.

Huuvan ilmankierron optimiarvojen määrittämisessä lähdetään liikkeelle saatujen tuote-kohtaisten mittaustulosten perusteella. Mittaustulosten pohjalta nostetaan tai rajoitetaan poistoilmapuhaltimen toimintaa. Päätös toiminnan muutoksesta saadaan huuvan aine-taseen perusteella. Mikäli huuva on alipaineinen, rajoitetaan huuvan puhaltimen imutehoa. Ylipaineisessa tilanteessa poistoilmapuhaltimen tehoa on nostettava tai huuvalle puhallettavan kuuman ilman määrää rajoitettava. Paperikone 1:n tilanteessa huuvalle puhaltavat puhaltimet toimivat matalimmalla mahdollisella tasolla, jotta kuivatuskapasiteetti riittää kuivattamaan paperin.

Paperikone 1:llä poistoilmapuhaltimen tehoa ohjataan poistoilmalle halutun kosteusprosentin perusteella. Poistoilmapuhallin on varustettu taajuusmuuntajalla, joka ohjaa puhaltimen tehoa poistoilmakanavaan kytketyn kosteusmittarin perusteella. Puhaltimen kuljettaman tilavuusvirtauksen osuus maksimaalisesta tilavuusvirtauksesta saadaan tehon säädön neliöstä. Tällöin maksimaalisessa virtauksessa pumpun tehon 80 % säädöllä virtausta kulkee 89,4 % maksimaalisesta virtauksesta. Kuvassa 17 on esitettyä tehonsäädön ja tilavuusvirtauksen suhde.



**Kuva 17. Pumpun tehon suhde tilavuusvirtaan**

Tilavuusvirran perusteella ei kuitenkaan voida määrittää ilmankierron vaatimaa optimaalista tehoa, sillä tiheys virtauksessa ei pysy vakiona pumpun tehon muuttuessa (Sihvo, 1969, s. 514). Ilmaseoksen tiheyden vaikuttaa vesihöyryn määrä ilmaseoksessa ja seoksen lämpötila. Lämpötila ilmaseoksessa muuttuu, mikäli huuva on alipaineisessa tilanteessa. Tällöin hallin kylmä ilma pääsee sekoittumaan huuvalle puhallettavan ilman kanssa ja laskemaan ilmaseoksen lämpötilaa. Ilmaseoksen painetaso laskee sen kulkiessa putkistossa. Tämä johtuu putkiston painehäviöstä, joka on tapauksessa spesifi tietyille putkistolle. Häviöt pystytään tarvittaessa mittaamaan, mutta ne kuitenkin nostavat epätarkkuutta laskennallisesti optimaalisen tehon laskemisessa.

Imupuhaltimen kierrosluku pystytään parhaiten määrittämään kokeellisesti, jolloin hienosäädöllä etsitään huuvan tasapainotila. Paperikone 1:n tilanteessa kuitenkin pyritään pitämään työskentely huuvan alueella turvallisena. Tämä onnistuu, kun hyväksytään, että huuva on normaalitilanteessa pienessä alipaineessa, vaikka optimiarvo olisi vallitsevissa olosuhteissa mahdollinen saavuttaa. Tällöin hallissa vallitsevan ilmanpaineen muutos ei vaikuta työturvallisuuteen eikä paperikoneen ajettavuuteen.

## 6.6 Laskentatyökalu

Laskentatyökalun toiminta perustuu aine- ja energiataseeseen. Laskentatyökalu tarvitsee syötteenä mittauspisteiltä kanavan määrän ja kuivan kankaan lämpötilan sekä kanavassa vallitsevan paineen eron vallitsevaan ilmanpaineeseen. Lisäksi laskentatyökalu tarvitsee kanavassa mitatun staattisen ja dynaamisen paineen eron. Tämä mittaus otetaan viidestä kohdasta putkesta luvun 6.1 mukaisesti. Mittaustuloksena saatujen syötteiden avulla lasketaan psykometrinen laskenta tuloksille, jolloin saadaan tietoon kanavan virtauksen tiheys ja tämän avulla massavirta.

Laskentatyökalussa on laskettu savukaasuanalyysi butaanille, jonka perusteella määritetään muodostuvan savukaasun määrä ja osuudet polttimelta poistuvaan virtaukseen. Laskentatyökalu olettaa koko virtauksen olevan polttimen lämpötilassa ja että häviöt ovat minimaalisia ennen huuvalle saapumista.

Konenopeuden ja halutun neliöpainon perusteella pystytään määrittämään paperirainan mukana saapuvan veden määrä. Laskenta olettaa kuiva-aineosuuden olevan 45 % sen saapuessa jenkkisylinterille. Poistuessa jenkkisylinteriltä paperiradan kuiva-aineosuus on 88 %. Kun tiedetään paljonko vettä saapuu systeemiin paperiradan mukana, voidaan laskea systeemin vesitase. Veden ainetaseen perusteella pystytään määrittämään karkaavan vesihöyryn määrä ja ilmataseen perusteella koko huuvan tasapaino. Lopuksi laskenta vertailee virtausten energiasisällön ja arvioi tämän perusteella paljonko lämpöenergiaa katoaa laskennasta häviöiksi.

Laskenta antaa mittausten syöttösivulle oman tulosteen, joka kertoo huuvasysteemin paineisuuden, karkaavan veden määrän ja lämpöenergia häviöt. Lisäksi tulossivu ilmoittaa määrän- ja kuivanpään poistoilmakanavien kosteusosuuden. Kyseisen tieto näkyy mittauksen livetiedossa, joten tämän perusteella voidaan tarkastella tuloksen oikeellisuutta. Tulosten ilmoitus on tehty siten, että tulokset näkyvät huomiovärein, mikäli huuva on alipaineinen tai energiahäviöt ovat suuremmat kuin 1,1 MW.

## 7. PAPERIKONE 1:N MITTAUKSET

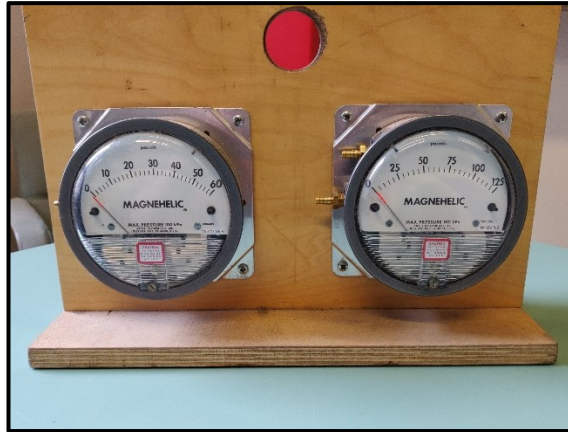
### 7.1 Mittauslaitteisto ja mittauspisteet

Paperikone 1:llä suoritetuissa mittauksissa pyrittiin selvittämään kanavissa virtaavan kaasun nopeus, ilman kosteus, kaasun lämpötila ja kaasun tiheys. Kaasun nopeus pystyttiin määrittämään Pitot-putkien ja U-putkimanometrin avulla saatavasta paine-erosta. Pitot-putket esiteltynä kuvassa 18 vasemmalla ja U-putkimanometri esitelty kuvassa oikealla.



***Kuva 18. Vasemmassa kuvassa esitetty U-putki manometri. Oikeassa kuvassa esillä mittauksissa käytetty Pitot-putki***

U-putki manometrilla pystytään mittaamaan mittanauhalla kanavan paine-ero ilmanpaineen ja kanavan paineen välille. 1 mm erotus vastaa 10 Pascalin eroa 1 metrin korkeudessa U-putki manometrissa. Yli- ja alipaine määritettiin tarkastamalla u-putkimanometrissa olevan vesipatsaan kohonnutta puolta. Mikäli vesipatsas nousi kanavan puoleisessa putkessa, tämä johtui alipaineesta kanavassa. Vastaavasti ylipaineen tapauksessa vesipatsas nousi putkessa, johon ei oltu kytketty letkua. Tarkempi mittaustulos kanavan paine-erosta saatiin painemittarilla. Kyseisen mittarin asteikko ei kuitenkaan riittänyt suurimmilla virtausnopeuksilla, sillä paine ero oli suurimmillaan yli 1 000 Pascalia. Kuvassa 19 on käytetty painemittari.



**Kuva 19. Mittauksissa käytetty painemittari**

Kosteuden määrä pystyttiin laskemaan psykometrisen mittauksen avulla. Mitattavina arvoina olivat märän- ja kuivan kankaan lämpötilat. Kaasun tiheys pystyttiin laskemaan psykometristen mittauksen tuloksista. Märän kankaan lämpötilan määrittämiseksi käytettiin kuumaa vettä, jonka lämpötila oli noin 90 °C. Kangaspäällysteinen mittari kasteltiin kuumassa vedessä, jonka jälkeen se laskettiin kanavaan. Lämpötila alkoi aluksi laskemaan ja lopulta tasaantui märän kankaan lämpötilaksi. Tämä lämpötila kuitenkin lähti nousemaan takaisin ylös, mikäli mittalaite oli liian pitkään kanavassa. Epätarkkuutta mitaustuloksen suhteen ilmeni, kun kanavassa virtaavan virtauksen lämpötila oli suuri. Tällöin märän kankaan lämpötila ei päässyt rauhassa tasaantumaan märän kankaan optimaalilämpötilaan, vaan lämpötila putosi vauhdilla, jonka jälkeen se lähti heti nousemaan.

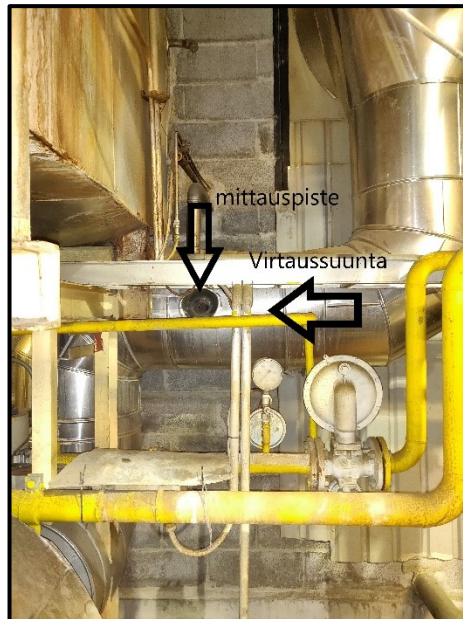
Lämpötilan määrittämiseen käytettiin kuvan 20 mukaista mittaria. Märän kankaan lämpötilan määrittämisessä mittarin anturi päällystettiin kankaalla. Mittaus otettiin mittauspisteillä noin 15 cm etäisyydeltä kanavan seinämästä



**Kuva 20. Mittauksissa käytetty lämpötilamittari**

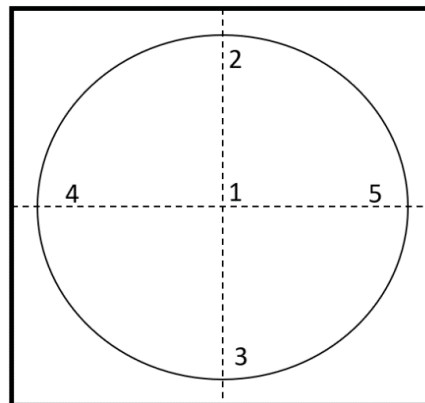
Mittauksia suoritettiin mittaussuunnitelman mukaisesti yhdeksässä kohteessa. Näistä neljä suoritettiin paperikoneen kuivassa päässä palamis-, korvaus- ja poistoilmakanavassa sekä yhdistetyssä korvausilmakanavassa. Yhdistetyssä ilmakanaavassa virtasi huuvalta palaava kaasuvirtaus ja korvausilmakanavasta saapuva virtaus. Toiset neljä mittausta suoritettiin vastaavasti märämpään palamis-, korvaus-, poistoilmakanavassa ja yhdistetyn ilmakanaavassa. Viimeinen mittaus suoritettiin yhdistetyssä poistoilmakanavassa, jossa märämpään ja kuivanpään poistoilmakanavat ovat yhdistyneet. Kuvassa 21 on esiteltyä märämpään palamisilmakanavan mittauspiste.





**Kuva 21. Märänpään palamisilman kanavan mittauspiste**

Jokaisessa kanavassa suoritettiin viisi mittausta kuvan 22 mukaisissa mittauspisteissä.



**Kuva 22. Mittauspisteet kanavassa**

Pisteet valittiin siten, että saatiin mahdollisimman hyvä kokonaisotanta virtauksesta. Jokainen piste sijaitsee sellaisella etäisyydellä putken seinämästä, joka on noin 10 % putken halkaisijasta putken keskipisteeseen päin. Näin vältetään mahdolliselta mittausvirheeltä, sillä seinämän vierellä virtausnopeus laskee. Samassa mittauskohteessa yksittäisten mittauspisteiden välillä oli jopa moninkertainen paine-ero. Tämä vaikuttaa mitaustulosten herkkyystarkasteluun ja tätä tarkastellaan tarkemmin mitaustulosten herkkyystarkastelussa luvussa 6.5.

Mittauspisteiden kohdilla kanavissa on kierteelliset korkit pitämässä virtaus kanavassa. Mittaushetkellä umpinainen korkki vaihdettiin kuvan 23 mukaiseen korkkiin, jotta mittauksen aiheuttama häiriö virtaukseen olisi mahdollisimman pieni. Tällöin mittausvirheen vaikutus jää mahdollisimman pieneksi.



*Kuva 23. Kanavan mittauspisteeseen kiinnitettävä korkki*

## 7.2 Psykometrinen mittaus

Paperikoneen kanavien virtaukset pyritään saamaan laskettua massavirtana tilavuusvirtauksen sijaan. Kanavissa virtaavien ilmaseoksien tiheydet muuttuvat lämpötilan vaikutuksesta ja lisääntynyt kosteusosuus ilmaseoksessa muuttaa tiheyttä merkittävästi. Psykometrisellä mittauksella pystytään määrittämään vesihöyryn ja ilman seoksen ominaisuudet. Laskentaa varten tarvitaan ilmaseoksesta kokonaispaine ja kaksi arvoa seuraavista tiedoista: märällä kankaalla päällystetyn lämpömittarin lämpötila, kuivalla kankaalla päällystetyn lämpötilamittarin lämpötila, kastepiste, suhteellinen kosteus, vesihöyryn massaosuus tai sekoitussuhde. Kun näistä arvoista kaksi pystytään mittaamaan, voidaan muut arvot ratkaista laskemalla. Lisäksi näiden arvojen avulla pystytään ratkaisemaan seoksen entalpia, tiheys, ominaistilavuus ja vesihöyryn ainemääräosuus. (Mills, 2014, s. 800)

Paperikoneen mittauksissa ilmaseoksen kokonaispaine oli paperikoneen salissa vallitseva ilmanpaine ja mittausteknisesti järkevin ratkaisu oli mitata kuivan ja märän kankaan lämpötilat. Näiden avulla voitiin ratkaista puuttuvat muuttujat. Mittausten haasteena olivat ilmavirtausten korkeat lämpötilat, sillä ratkaisukaavoja ja kaavioita ei ole määritetty näin suuriin lämpötiloihin. On siis mahdollista, että laskennassa esiintyy pieniä virheitä.

Virheen minimoimiseksi saturaatiopaineen laskenta on suoritettu kolmella eri menetelmällä, Maailman meteorologiorganisaation (WMO) suosittamalla Goff-Gratch yhtälöllä, Magnus-yhtälöllä ja 5-asteen polynomisovitteella Goff-Gratch yhtälölle. WMO:n suosittama yhtälö raja-arvoina lämpötilalle kuitenkin on  $-100\text{ °C} - 100\text{ °C}$  (Chien & Yu-Jen, 2017, s. 88).

Goff-Gratch yhtälön avulla saadaan laskettua märän ja kuivan ilman saturaatiopaineet ( $p_{sat}$ ) [Pa]

$$\log\left(\frac{p_{sat}}{p_{atm}}\right) = -7,90298(T_i - 1) + 5,02808 * \log(T_i) - 1,3816 * 10^{-7} \left[ 10^{11,344(1-\frac{1}{T_i} - 1)} + 8,1328 * 10^{-3} [10^{-3,49149(T_i-1)} - 1] \right], \quad (32)$$

missä  $p_{atm}$  on ilmanpaine [Pa] ja  $T_i$  on joko märän tai kuivan kankaan lämpötila [°C]. Tämä valitaan laskettavan saturaatiopaineen mukaan.

Märän ja kuivan ilmaseoksen saturaatiopaineet pystytään laskemaan myös Magnus-yhtälö muotoa (33)

$$p_{sat} = 610,78 * e^{\frac{17,269 * T_i}{237,3 + T_i}}. \quad (33)$$

Magnus yhtälö on kuitenkin määritetty paloittain, jolloin yhtälön (33) lämpötila on sallittu välille  $0\text{ °C} - 63\text{ °C}$ . Mikäli lämpötila nousee yli raja-arvon, käytetään Magnus-yhtälöstä muotoa (34)

$$p_{sat} = 610,78 * e^{\frac{17,269 * T_i}{236,3 + 1,01585 T_i}}. \quad (34)$$

Yhtälö lämpötilojen raja-arvoiksi määritetty  $63\text{ °C} - 110\text{ °C}$ . (Singh; Singh; Singh; & Sawhney, 2002, s. 416)

Saturaatiopaineiden laskemiseen kolmas menetelmä on 5-asteen polynomisovite, joka on laskettu Goff-Gratch yhtälön avulla ottaen vertailu arvot lämpötiloista  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $19^{\circ}\text{C}$ ,  $31^{\circ}\text{C}$ ,  $43^{\circ}\text{C}$  ja  $55^{\circ}\text{C}$ . Vertailuarvojen perusteella pystytään muodostamaan approksimaatio saturaatiopaineelle.

$$p_{sat} = 6,109 + 0,444T_i + 1,424 * 10^{-2} * T_i^2 + 2,715 * 10^{-4}T_i^3 + 2,697 * 10^{-6}T_i^4 + 2,785 * 10^{-8}T_i^5. \quad (35)$$

Polynomisovite on määritetty tässä tilanteessa toimimaan  $-5^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Polynomisovitetta käytetään käytännön syistä, sillä Goff-Gratch yhtälön käyttö on haastavaa käytännön sovellutuksissa. (Chien & Yu-Jen, 2017, s. 88)

Todellinen ilmaseoksen saturaatiopaine  $p_{TOD.SAT}$  [Pa] pystytään ratkaisemaan yhtälön (36) mukaisesti

$$p_{tod.sat} = p_{sat(märkä)} - B(T_k - T_m), \quad (36)$$

missä  $p_{sat(märkä)}$  on märän kankaan lämpötilalla laskettu saturaatiopaine, B on termodynaaminen arvo psykometriselle mittaukselle [(kg·Pa)/J], joka määritetään yhtälössä (36),  $T_k$  on kuivan kankaan lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ] ja  $T_m$  on märän kankaan lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]. (Singh;Singh;Singh;& Sawhney, 2002, s. 417) Termodynaaminen arvo psykometriselle mittaukselle on määritetty seuraavasti

$$B = \frac{1006,925(p_{ilma} - p_{sat(märkä)})(1 + \frac{0,155557}{P_{atm}} * p_{tod.sat})}{0,62194h_g}, \quad (37)$$

missä  $h_g$  on höyrystymisen latenttilämpö [J/kg] (Singh;Singh;Singh;& Sawhney, 2002, s. 417). Todellisen ilmaseoksen saturaatiopaine ja termodynaaminen arvo psykometriselle mittaukselle riippuvat toisistaan, joten yksinkertainen ratkaisu ei ole mahdollinen. Arvot voidaan kuitenkin ratkaista iteroimalla.

Höyrystymisen latenttilämpö  $h_g$  määrittämiseen tarvitaan määrän kankaan lämpötila, jolloin voidaan ratkaista yhtälö (38)

$$h_g = [3161,36 - 2,406(T_M + 273,16)]1000 . \quad (38)$$

Kun todellinen saturaatiopaine on pystytty ratkaisemaan, pystytään laskemaan muut tuntemattomat seoksesta. (Singh;Singh;Singh;& Sawhney, 2002, s. 416)

Kastepisteen ratkaisemiseksi muokataan saturaatiopisteiden yhtälöitä siten, että niistä saadaan ratkaistua lämpötila, kun saturaatiopaine on tiedossa. Magnuksen yhtälöstä (B3) muokattuna kastepisteen lämpötila  $T_{kastepiste}$  [°C] voidaan ratkaista yhtälön (38) mukaisesti

$$T_{kastepiste} = \frac{237 * \log\left(\frac{p_{tod.sat}}{610,78}\right)}{17,269 - \log\left(\frac{p_{tod.sat}}{610,78}\right)} . \quad (39)$$

Suhteellisen kosteuden  $\varphi$  laskeminen seokselle onnistuu yhtälön (40) avulla

$$\varphi = \frac{p_{tod.sat}}{p_{sat(kuiva)}} , \quad (40)$$

missä  $p_{sat(kuiva)}$  on kuivan kankaan lämpötilasta laskettu saturaatiopaine. Veden ja ilman sekoitussuhde  $W$ , eli vesihöyryn massan suhde kuivan ilman massaan.

$$W = \frac{m_{vesi}}{m_{ilma}} = \frac{p_{vesi}V/M_{vesi}RT_{seos}}{p_{ilma}V/M_{ilma}RT_{seos}} , \quad (41)$$

missä  $m_{vesi}$  on veden massa [kg],  $m_{ilma}$  on ilman massa [kg],  $p_{vesi}$  on veden paine [Pa],  $V$  on tilavuus [m<sup>3</sup>],  $M_{vesi}$  on veden moolimassa [g/mol],  $R$  on yleinen kaasuvakio [J/(K·mol)],  $T_{seos}$  on ilmaseoksen lämpötila [K],  $p_{ilma}$  on ilman paine [pa] ja  $M_{ilma}$  on ilman moolimassa [g/mol] (Singh;Singh;Singh;& Sawhney, 2002, s. 416). Koska kyseessä on yhteinen tilavuus, ja seos on tasapainossa, on tilavuudet ja lämpötilat vedellä

ja ilmalla samat. Lisäksi yleinen kaasuvakio voidaan supistaa pois jakajasta ja nimittäjästä. Ilman moolimassan suhde veden moolimassaan on 0,62198, jolloin yksinkertaistettu yhtälö ilman sekoitussuhteesta on

$$W = \frac{p_{vesi} * M_{ilma}}{p_{ilma} * M_{vesi}} = \frac{\frac{M_{ilma}}{M_{vesi}} * p_{sat(märkä)}}{p_{atm} - p_{sat(märkä)}} = \frac{0,62198 * p_{sat(märkä)}}{p_{atm} - p_{sat(märkä)}}. \quad (42)$$

Sekoitus suhteen avulla voidaan laskea ilman massa, kun kokonaismassa on laskettu virtauksen ja tiheyden perusteella. Tiheyden määrittämiseen seokselle, täytyy ensin selvittää seoksen ominaistilavuus

$$v = \frac{V}{m_{ilma}} = \frac{R(T_{kuiva} + 273,16)}{p_{sat(kuiva)}} = \frac{287,05(T_{kuiva} + 273,16)}{p_{atm} - p_{sat.tod}}, \quad (43)$$

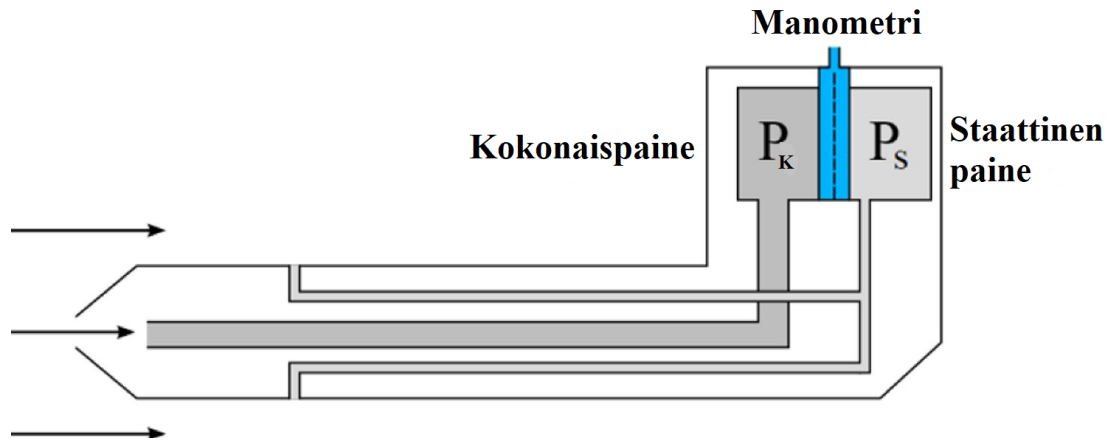
Ilmanseoksen tiheys  $\rho$  pystytään nyt laskemaan yhtälön (44) mukaisesti.

$$\rho = \frac{1}{v}. \quad (44)$$

Ilmaseoksen tiheyden määrittäminen on kriittinen osa laskentaa, jotta massavirtaus putkistossa saadaan lasketuksi ja näin selvitettyä ainetaseen toimivuus. Paperikone 1:n mittauspöytäkirjat esitelty liitteessä D. Samassa liitteessä laskettu kanavien muuttujat kyseisillä mittauskerroilla.

### 7.3 Nopeuden määrittäminen

Putkiston virtausnopeuden määrittäminen onnistuu Pitot-putken avulla. Pitot-putken toiminta perustuu kokonaispaineen ja staattisen paineen erotukseen. Tätä paine-eroa kutsutaan myös dynaamiseksi paineeksi. Kuvassa 24 on esitettyä, kuinka kokonaispaine ja staattinen paine saadaan putken avulla määritettyä. (Ezzeddine;Schutz;& rezq, 2019, ss. 7-15)



Kuva 24. Pitot-putken rakenne (Ezzeddine; Schutz; & rezq, 2019, ss. 7-15)

Kuvassa (24)  $P_k$  on kokonaispaine ja  $P_s$  on staattinen paine. Pitot-putken laskenta perustuu Bernoulin yhtälöön (45), jolloin virtausnopeus suurenee ja paine pienenee, kun putki kapenee.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2, \quad (45)$$

missä  $v_1$  on nopeus pisteessä 1 [m/s],  $v_2$  on nopeus kohdassa 2 [m/s],  $g$  on gravitaatiovakio [m/s<sup>2</sup>],  $z_1$  on korkeus pisteessä 1 [m] ja  $z_2$  on korkeus pisteessä 2 [m] (Chanson, 2004, s. 21). Koska staattisen ja kokonaispaineen pisteen mittauspisteillä ei ole korkeuseroa, voidaan  $z_i$  arvot määrittää nollassi ja supistaa yhtälöstä. Lisäksi voidaan olettaa putken päässä (kohdassa 2) virtausnopeuden ollessa 0. Tällöin yhtälö voidaan muokata muotoon

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 \Rightarrow p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2, \quad (46)$$

Tästä ratkaistuna alkuperäinen nopeus on

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}. \quad (47)$$

Saadun nopeuden perusteella voidaan laskea kanavan massavirta

$$\dot{m} = \rho v A_k , \quad (48)$$

missä  $A_k$  on kanavan putken poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>].

## 7.4 Huomiot mittauksista

27.3.2019 suoritetuissa mittauksissa siniselle teollisuuspaperille havaittiin virtauskanavien lämpötilojen olevan tutkimuksen alhaisimpia. Tämä johtunee siitä, että kyseisenä aamuna paperikone jouduttiin pysäyttämään komponentin vikaantumisen johdosta ja poistoilmakanavien lämpötila pääsi laskemaan. Kiertoilmakanavien lämpötilaan paperikoneen pysähtyminen ei kuitenkaan vaikuttanut suuresti, sillä kaikki huuvalle puhallettu ilma pyrittiin kierrättämään takaisin polttimelle. Koneen käynnistyttyä huuven poistoilma toimi lämmönvälittäjänä poistoilmakanaville, jonka seurauksena poistoilmavirtaus sisälsi mittauspisteellä vähemmän energiaa, kuin normaalissa tuotantotilanteessa.

Samoissa mittauksissa havaittiin paine-ero huuven kuivan puolen korvausilmakanavassa, vaikka kyseisessä tilanteessa kanavan ohjauspellit olivat kiinni. On siis perusteltua olettaa, että ilmavirtausta säätelevät ohjainpellit eivät olleet täysin ilmatiiviitä. Toisaalta on myös mahdollista, että kanavaan asennetut ohjainpellit ovat päässeet liikkumaan ja vääntymään. Tällöin automaatioventtiili olettaa kanavan ohjainpeltien olevan täysin kiinni, vaikka näin todellisuudessa ei olisi.

15.5.2019 tehdyissä mittauksissa paperikone 1:n keltaiselle käsipyypaperille havaittiin, että koneen ilmankierto oli erittäin suuri. Yhdistyneen poistoilmakanavan mittaustulokset olivat niin suuria, että mitta-asteikko ei riittänyt tuloksiin, joten suuren nopeuden määrittämiseen käytettiin U-putki manometria.

Mittaustuloksia tarkastellessa huomattiin, että märänpään ja kuivanpään poistoilmakanavien summa ei vastannut yhdistynyttä poistoilmakanavan virtausmäärää. Myös märänpään poistoilman sekoitussuhde oli paljon pienempi kuin koneen mittareiden ilmoittama arvo. Lisäksi polttimeen palaavan yhdistetyn kiertoilman ja poistoilmakanavan virtausten lämpötiloissa havaittiin suurta eroavaisuutta. Näiden epäkohtien vuoksi mittaukset uusittiin kaikkiin poistoilmakanaviin.



Uusintamittaukset suoritettiin noin kaksi tuntia ensimmäisten mittausten jälkeen, jolloin mitausolosuhteet ei olleet päässeet muuttumaan. Uusintamittauksessa havaittiin, että märnpään poistoilmakanavan lämpötilan määrittäminen mittalaitteistolla on erittäin haastavaa. Märkä kangas kastettiin kuumaan lauhteeseen, jolloin kangas saavutti 90 °C asteen lämpötilan. Tämän jälkeen anturi asennettiin kanavaan, jossa tyypillisesti lämpötila lähtee laskuun ja saavuttaa märän kankaan lämpötilan. Lämpötila tasaantuu hetkeksi märän kankaan lämpötilaan ja tämän jälkeen lähtee nousemaan. Ongelmaksi muodostui märän kankaan lämpötilan määrittämisessä se, että kanavan märkäkankaan lämpötila oli erittäin lähellä 90 °C astetta. Tällöin märän kankaan lämpötila ei päässyt tasaantumaan, vaan lähti saman tien nousemaan, eikä eksaktia lämpötilaa voitu määrittää. Mittaustuloksen saamiseksi käytettiin kuumempaa lauhdetta, jolloin märän kankaan lämpötilaksi saatiin lähes 100 °C astetta, ennen kuin se asennettiin kanavaan.

6.6.2019 suoritettut mittaukset suoritettiin uudelleen keltaiselle käsipyyhepaperille. Mittaus suoritettiin koneen pesupäivän jälkeisenä päivänä. Pesun jälkeen paperikoneen puristinosan vedenpoistokyvyn tulisi olla optimikunnossa.

13.6.2019 suoritettiin mittaukset paperikone 1:n toiseksi yleisimmälle tuotteelle. Tuote vastaa ominaisuuksien puolesta erittäin läheisesti yleisintä tuotetta. Poikkeuksia tuotteiden välillä oli kuitenkin kreppaussuhteessa ja tavoiteneliöpainossa. Mittaus oli tarkoitus suorittaa kahteen kertaan, mutta voimalaitoksen tuotanto-ongelmien johdosta toisesta mittauskerrasta jouduttiin luopumaan. Mittauksen aikana poistoilmapuhaltimen luona havaittiin, että poistoilma pääsi lauhtumaan voimakkaasti lämmöntalteenotossa. Tämä havaittiin lämpimän veden ulosvuotona säiliön saumoista.

## **7.5 Herkkyystarkastelu**

Herkkyystarkastelu paperikone 1:n tuloksille on suoritettu siten, että jokaista mitattavaa parametria on yksittäin muutettu ja tarkasteltu tämän vaikutusta tuloksiin. Alustava herkkyystarkastelu suoritettiin kaikille mittauksille heti mittausten jälkeen. 15.5. suoritetuille mittauksille suoritettua alustavassa herkkyystarkastelussa, havaittiin epätarkkuutta, jonka johdosta mittaukset uusittiin.

Muodostuvalle savukaasulle ei tehdä herkkyytarkastelu. Vaikka polttoaineen sisältö muuttuisi hieman, muodostuvan savukaasun määrän suhteellinen muutos ei vaikuta virtauksen ominaislämpökapasiteettiin tai massavirran suuruuteen. Mikäli polttoaine vaihdetaan tai polttoaineen syöttömäärä muuttuu suuresti, olisi syytä tarkastella tämän vaikutusta polttimelta virtaavan kaasun entalpiaan.

## 7.6 Laskentatyökalun parametrit

Paperikone 1:n mittausten pohjalle on luotu Excel-tiedosto, joka sisältää käyttöliittymän. Käyttöliittymän tarkoituksena on nopeuttaa tulosten tulkintaan mittauksen jälkeen. Kuvassa 25 on esitelty osa käyttöliittymän näkymästä.

<b>Märnpään palamisilma</b>			<b>Kuivanpään palamisilma</b>		
Kanavassa yli/alipaine		pa	Kanavassa yli/alipaine		pa
Kuivan mittarin lämpötila		C	Kuivan mittarin lämpötila		C
Märän mittarin lämpötila		C	Märän mittarin lämpötila		C
mittaus 1		pa	mittaus 1		pa
mittaus 2		pa	mittaus 2		pa
mittaus 3		pa	mittaus 3		pa
mittaus 4		pa	mittaus 4		pa
mittaus 5		pa	mittaus 5		pa
<b>Märnpään korvausilma</b>			<b>Kuivanpään korvausilma</b>		
Kanavassa yli/alipaine		pa	Kanavassa yli/alipaine		pa
Kuivan mittarin lämpötila		C	Kuivan mittarin lämpötila		C
Märän mittarin lämpötila		C	Märän mittarin lämpötila		C
mittaus 1		pa	mittaus 1		pa
mittaus 2		pa	mittaus 2		pa
mittaus 3		pa	mittaus 3		pa
mittaus 4		pa	mittaus 4		pa
mittaus 5		pa	mittaus 5		pa
<b>Märnpään poistoilma</b>			<b>Kuivanpään poistoilma</b>		
Kanavassa yli/alipaine		pa	Kanavassa yli/alipaine		pa
Kuivan mittarin lämpötila		C	Kuivan mittarin lämpötila		C
Märän mittarin lämpötila		C	Märän mittarin lämpötila		C
mittaus 1		pa	mittaus 1		pa
mittaus 2		pa	mittaus 2		pa
mittaus 3		pa	mittaus 3		pa
mittaus 4		pa	mittaus 4		pa
mittaus 5		pa	mittaus 5		pa

Kuva 25. Osa käyttöliittymän näkymästä

Huuvan mittausten osalta laskentatyökalu tarvitsee toimiakseen mittauspisteistä seuraavat tiedot: kanavan paine-eron ilmanpaineeseen, märän kankaan lämpötilan, kuivan kankaan lämpötilan sekä kanavan dynaamisen ja staattisen paine-eron Pitot-putkella. Näiden tietojen lisäksi ohjelma tarvitsee koneelta seuraavat tiedot: kreppaussuhde, polttimien polttoaineen syöttö, haluttu neliöpaino ja jenkkisynterin nopeus.

Kanavan painaisuus huomioidaan kokonaispaineessa. Vallitseva ilman paine ilmoitetaan myös ohjelmalle, mutta virtauksen paineen laskentaa varten on huomioitava kanavan paine ero. Virtauksen kokonaispaineen avulla voidaan laskea termodynaaminen arvo (37), sekoitussuhde (42) ja ominaistilavuus (43).

Laskennassa Kuivan ja märän mittarin lämpötiloilla tarkoitetaan märän ja kuivan kankaan lämpötiloja. Kuivan kankaan lämpötilalla lasketaan kuiva saturaatiopaine (34) ja ominaistilavuus (43). Märän kankaan lämpötilalla saadaan selvitettyä märkä saturaatiopaine (43), seoksen todellinen saturaatiopaine (36) ja höyrystymisen latenttilämpö (38). Saatujen arvojen avulla pystytään määrittämään seoksen kastelämpötila (39) ja seoksen tiheys (44).

Mittaukset 1 – mittaus 5 arvoilla saadaan selvitettyä virtauksen nopeus (47). Mittauksia tehtiin 5 kohtaa putkea, jotta tulosten keskiarvo edustaisi mahdollisimman hyvin virtauksen todellista nopeutta. Tällöin yksittäinen hajatulos ei pääse vaikuttamaan suuresti kokonaisnopeuteen. Virtauksen massavirtaus saadaan saatujen tulosten avulla (48).

## 8. TULOKSET

### 8.1 Mittaustulosten tarkastelu

27.3.2019 suoritetuissa mittauksissa tarkasteltiin sinistä teollisuuspaperia, joka oli neliöpainon osalta kevein valituista tuotteista. Mittauspäivän aamuna paperikone oli ajettu alas tuotannolta teknisen ongelman takia. Mittaus suoritettiin 2 tuntia koneen ylösajon jälkeen. Paperikone oli alhaalla tuotannosta noin 3 tuntia, jonka aikana polttimelta saapuva kuuma ilma ohjattiin suoraan poistoilmakanavaan. Samanaikaisesti myös ohjainpelti polttimelta huuvalle oli suljettuna, jotta jenkkisylinteri ja sen läheisyydessä olevat telat eivät joutuisi korkealämmön vaikutuksen alaisiksi ilman kosteaa paperirataa.

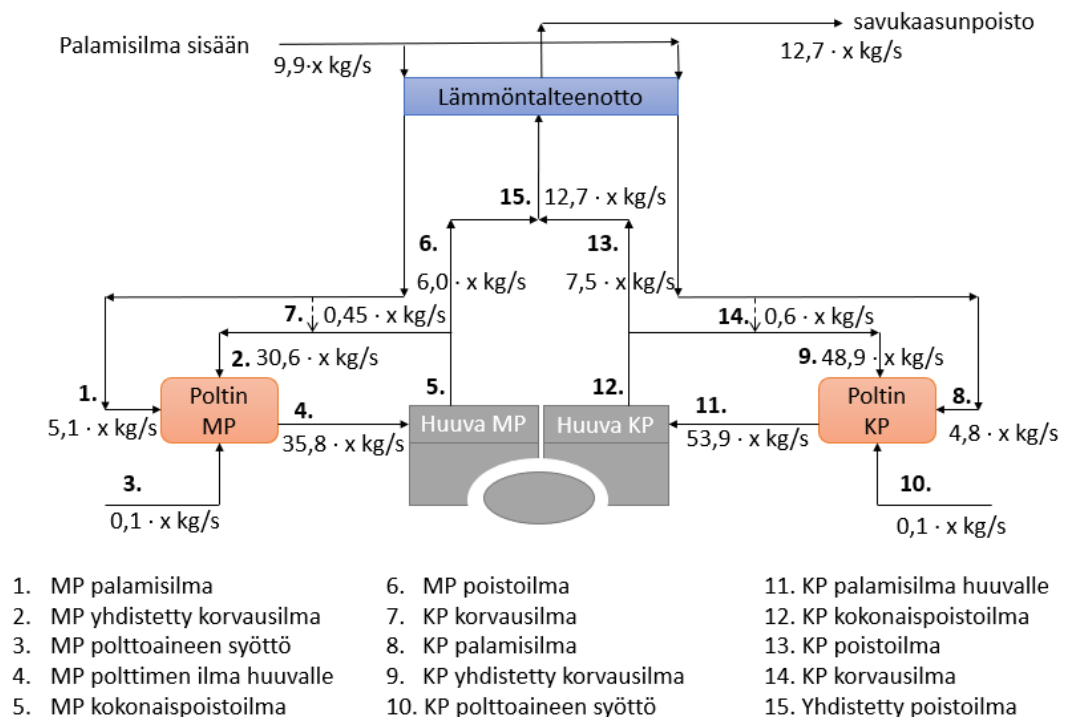
Kun tarkastellaan poistoilmakanavien ja yhdistettyjen kiertoilmakanavien virtauslämpötiloja, huomataan että märämpään poistoilman virtaus lämpötilat olivat muutaman asteen alhaisempia, kuin mitä märämpään yhdistetyn kiertoilmakanavan virtaus. Lämpötilaero on muutaman asteen ja perustuu todennäköisesti ilman suhteelliseen kosteuteen. Psykometrinen mittauksen perusteella märämpään yhdistetty korvausilmakierron suhteellinen kosteus oli 19,4 % suurempi kuin poistoilman kosteus. Vesihöyry sitoo itseensä enemmän lämpöenergiaa kuin kuiva ilma, sillä veden ominaislämpökapasiteetti on nelinkertainen verrattuna ilman ominaislämpökapasiteettiin. Näin ollen kosteamman virtauksen lämpötilan tulisi olla pienempi. Tämä ei kuitenkaan toteudu märämpään virtauksen tilanteessa. Yksiselitteistä syytä tälle ei kuitenkaan löytynyt.

On myös mahdollista, että mittaustuloksen ero perustuu mittaushetkeen. Poistoilmakanavan lämpötilat mitattiin ennen yhdistetyn kierron lämpötilaa. Ajallinen ero mittauksilla oli noin 30 min. Kuivassa päässä oli havaittavissa myös parin asteen ero poistoilman ja yhdistetyn kiertoilman kanavassa. Kuivanpään mittauksessa havaittiin virtausta korvausilmakanavassa, vaikka ohjainpelti oli kiinni. Tällöin yhdistettyyn kiertoilmakanavaan pääsi sekaan kylmempää ilmaa, joka laski kanavassa virtaavan ilman lämpötilaa.

Sinisellä teollisuuspaperilla virtausten lämpötilat olivat alhaisempia, kuin muilla mitatuilla tuotteilla. Tämä ei kuitenkaan johdu tuotannon käynnistysongelmista tai viilentyneistä kanavista, vaan syynä on mitattavan tuotteen neliöpaino. Alhaisen neliöpainon mukana saapuvan veden määrä jenkkisylinterille on pienempi, kuin suuren neliöpainon tuotteilla.

Pienempi vesimäärä taas tarkoittaa, että jenkki sylinterin osalla on vähemmän vettä kuivatettavana. Pienemmän kuivatuskapasiteetin tarpeen vuoksi jenkki sylinterin nopeutta voidaan nostaa, jolloin myös maksimaalista tuotantokapasiteettia saadaan nostettua. Mitatuista tuotteista sininen teollisuuspaperi olikin nopein. Pienemmän kuivatuskapasiteetin tarpeen takia sylinterin nopeuden lisäksi voidaan huuvan ja jenkki sylinterin tuomaa lämpöenergiaa rajoittaa. Mittaustuloksissa nähdäänkin, että polttoaineen syöttömäärät ja polttimilta poistuvan virtauksen lämpötila olivat pienempiä, kuin muilla vertailutuotteilla. Lisäksi jenkki sylinterin paine tuotteen ajossa on ollut pienempi, kuin vertailutuotteilla. Matalampaan paineeseen syynä on paperin ajo-ominaisuuksien heikentyminen. Korkealla paineella siirtyvä lämpöenergia on suurempi, jolloin paperiradassa oleva kosteus kiehahtaa ja irroittaa paperin jenkki sylinterin pinnasta.

Kuvassa 26 on esitetty paperikone 1:n prosessikuva 27.3. tehtyjen mittausten pohjalta. Kuvaan merkitty kanavan massavirtausnopeudet kertoimella  $x$ . Kerroin  $x$  on määritetty liitteessä F.



**Kuva 26. Massavirtaukset 23.3. mittauksissa  $x$  kertoimella ilmoitettuna**

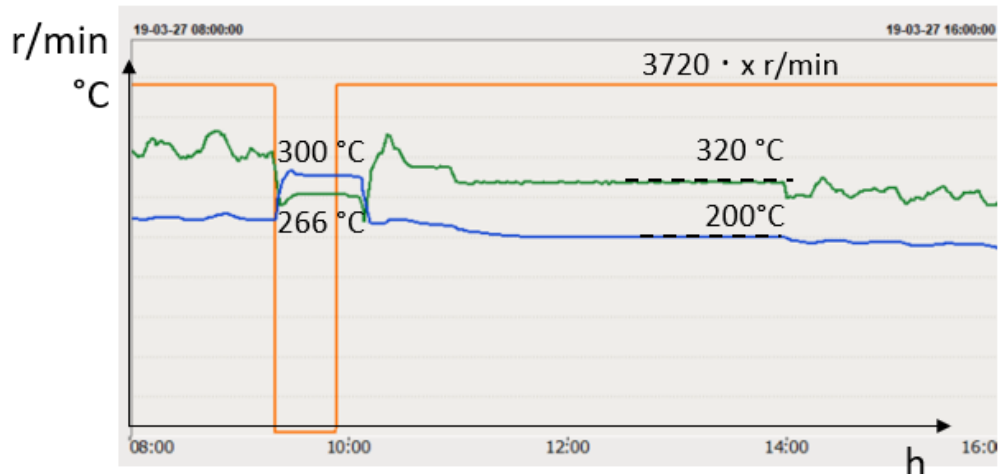
Kuvan 26 lisäksi on laadittu taulukko 3, joka pitää sisällään prosessin oleellisimpien arvojen tiedot. Tiedot myös taulukossa kerrottu muuttujalla x. Sisään ja ulosvirtausten erot johtuvat paperinkuivatuksessa vapautuvasta vesihöyrystä ja huuvan sali-ilman imusta.

**Taulukko 3. 27.3. Suoritettujen mittausten tulokset**

	MASSAVIRTA	LÄMPÖENERGIA	LÄMPÖTILA
	kg/s	kJ/s	°C
1	5,1·x	568,8·x	136
2	30,6·x	6 861·x	221
3	0,1·x	44,0·x	394
4	35,8·x	2 031·x	394
5	36,2·x	11 200·x	216
6	6,0·x	1 308·x	216
7	0,45·x	45·x	136
8	4,8·x	640·x	136
9	48,9·x	9 392·x	192
10	0,1·x	30,6·x	394
11	53,9·x	25 480·x	394
12	56·x	14 900·x	194
13	7,5·x	1 449·x	194
14	0,6·x	67·x	136
15	12,7·x	2 790·x	215

Taulukosta 3 nähdään, että eniten lämpöenergia on sitoutunut yhdistettyyn kiertoilma kanavan virtauksiin. Tämä johtuu siitä, että massavirtaukset olivat suurimmat näissä kohdissa.

Kuvassa 27 on esitelty määränpään polttimen lämpötilan suhdetta jenkkiylinterin nopeuteen katkohetkellä. Lisäksi kuvassa on näkyvissä yhdistetyn poistoilman lämpötila.



**Kuva 27. Jenkkisynterin kierrosnopeuden ja polttimien sekä poistoilman lämpötilan muutos hetkellisen alasajon aikana.**

Kuvasta 27 jenkkisynteri on esitetty tasaisesti muuttuvalla oranssilla viivalla. Kuvan tilanteessa nopeus on laskettu nopeasti alas ja vastaavasti käynnistyksessä nostettu nopeasti. Hetki, jolloin jenkkisynteri on ollut pysäytetty, on kun sylinterin kierrokset ovat nollassa. Se on esitetty kuvan alareunassa. Samalla hetkellä, kun jenkkisynteri on pysäytetty, poistoilman lämpötila nousee. Poistoilman lämpötilaa kuvassa 27 esittää sininen käyrä. Lämpötilan nousuun on syynä polttimien tuottama kuuma ilma. Pysäytystilanteessa kuuma ilma johdetaan suoraan poistoilmakanavaan, jolloin kuuma ilma pysyy kuumana, sillä ilma ei pääse kosketukseen paperiradan ja veden kanssa. Märänpään polttimen lämpötila on esitetty jatkuvasti muuttuvalla vihreällä funktiolla. Tuotannon alasajotilanteessa polttoaineen kulutusta rajoitetaan voimakkaasti. Tämä näkyy suoraan polttimen lämpötilassa. Tuotannon ylösajovaiheessa polttoaineen kulutus nousee hetkellisesti suureksi, mikä näkyy piikkinä myös polttimen lämpötilassa. Lämpötila kuitenkin tasaantuu ajan kanssa lähes vakioksi. Kuvassa 27 polttimen lämpötila ei nouse samanaikaisesti sylinterin kierrosten mukana, sillä sylinteriä pyöritettiin alkuun ilman paperia, jotta teknisen ongelman poistuminen voitiin todeta.

Putkistossa palamisilmakanavissa vallitsi ylipaine. Pitot-putkien antamat paine-erot olivat poikkeukselliset muihin mittauksiin, sillä märänpään arvot olivat vain 2 kertaa suuremmat kuin kuivanpään arvot. Muissa mittauksissa palamisilmojen välinen suhde oli huomattavasti suurempi. Muissa kanavissa vallitsi alipaine. Alipaineiden arvot olivat kaikissa kanavissa keskimäärin puolet ylipaineisista arvoista.

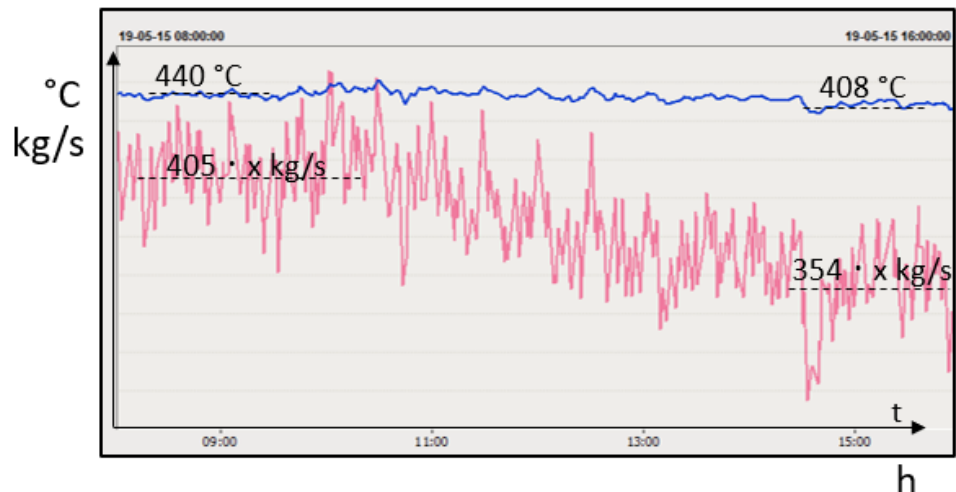
15.5.2019 suoritettut mittaukset kohdistuivat keltaiselle käsipyyhepaperille, joka on eniten tuotannossa paperikone 1:llä. Tuotteen neliöpaino on erittäin lähellä valkoisen käsipyyhepaperin neliöpainoa, joka on painavin mitatuista tuotteista. Jenkkisyylinterin vauhti on myös sama kuin valkoisella käsipyyhepaperilla, mutta tuotantomäärä kuitenkin eroaa, sillä tuotteilla on eri kreppaussuhde.

Poistoilmakanavien ja yhdistettyjen korvausilmakanavien virtausten lämpötilat olivat korkeita. Virtauksissa ei kuitenkaan havaittu samaa ilmiötä kuin 27.3. tehdyissä mittauksissa, joissa märänpään poistovirtaus oli alhaisempi kuin yhdistetty märänpään kiertovirtaus. Kummatkin poistovirtaukset olivat pari astetta kuumempia kuin yhdistyneiden korvausilmojen virtaukset. Viilentyminen johtuu todennäköisesti siitä, että korvausilmakanavista pääsee pieni virtaus sekoittumaan huuvalta palaavaan virtaukseen.

Palamisilmakanavien virtaukset olivat mittauksissa kuumempia kuin muilla mittauksilla. Tämä johtui siitä, että polttimen lämpötila oli korkeampi kuin muilla mittauskerroilla. Poistoilman ja yhdistettyjen kiertoilmakanavien lämpötilat eivät kuitenkaan olleet nousseet yhtä paljon, kuin polttimen lämpötila. Syyksi poistoilmojen ja yhdistyneiden kiertoilmavirtausten matalampaan lämpötilanousuun voidaan epäillä, että huuva on epätasapainossa ja imee poistoilmakanavaan sali-ilmaa. Sali-ilma on tyypillisesti 30 – 40 °C välillä, joten sen lämpötila on huomattavasti matalampi kuin huuvalle saapuva ilma polttimilta. Korkeamman poltinlämmön syyksi voidaan epäillä, ettei paperi kuivunut alemmalla lämmöllä halutuksi arvoksi. Korkeampi käyttöaste polttimelle lisäsi luonnollisesti myös polttoaineen syöttömäärää. Polttoaineen syöttömäärä 15.5. mittauskerralla oli suurin, mitä mittauskerroilla tavattiin.

Kuvassa 28 on esitelty 15.5 kuivanpään polttoaineenkulutus ja polttimen lämpötila.





**Kuva 28. Polttoaineen kulutuksen vaikutus polttimen lämpötilaan**

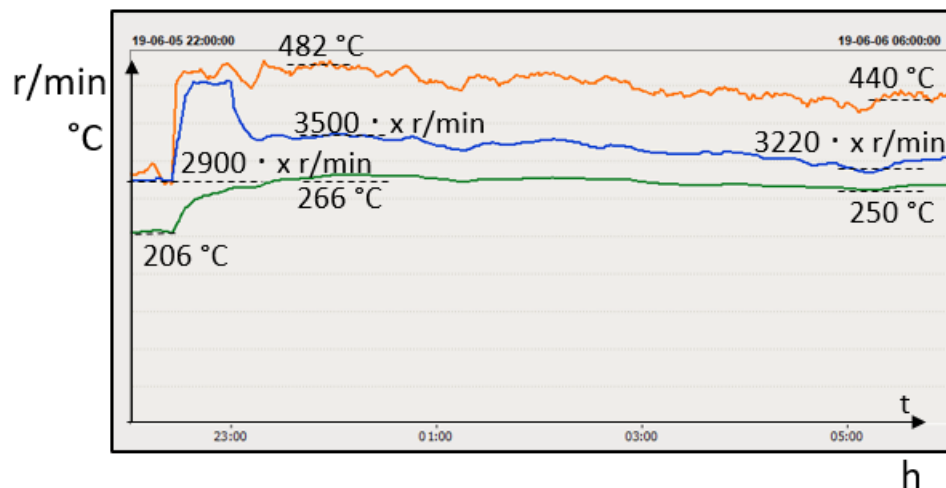
Kuvassa 28 on esitetty pinkillä viivalla polttoaineen kulutus. Polttoaineen kulutuksen vaihtelu on 25 kg:n sisällä, vaikka kuvassa vaihtelu näyttää huomattavasti suuremmalta. Sininen tasaisesti laskeva viiva on polttimen lämpötila. Kuvasta havaitaan, että polttoaineen syöttömäärän vähentyessä myös polttimen lämpötila laskee.

Pitot-putkilla saadut mittaustulokset poistoilmakanavassa olivat paljon suurempia, kuin muilla mittauksilla. Tämän perusteella siis virtausmäärä kanavassa on ollut siis suurempi kuin muilla mittauskerroilla. Myös yhdistettyjen korvausilmakanavien mittaustulokset olivat suurempia kuin muilla mittauskohteilla. Tämä on myös nähtävissä poistoilmapuhaltimen kierrosluvusta, joka oli 30 % suurempi verrattuna muihin mittauskertoihin.

6.6.2019 suoritetuissa mittauksissa toistettiin mittaukset keltaiselle käsipyyhepaperille. Mittaukset suoritettiin paperikoneen pesupäivän jälkeisenä päivänä, jolloin mekaaninen vedenpoistokyky on parhaimmillaan.

Mittauksissa poistoilmakanavien ja yhdistetyn korvausilmakanavien virtaukset olivat saman lämpöisiä kuin 15.5. mitatut virtaukset kyseisissä kanavissa. Pitot-putkien tulokset poikkeavat kuitenkin suuresti mittausten välillä. Märänpään poistoilmakanavan mittaustulokset olivat lähes 8 kertaa pienemmät kuin edellisessä mittauksessa. Kuivanpään poistoilman mittaustulokset eroavat vielä suuremmin mittaustulosten välillä. Ero oli jopa

10-kertainen. Yhdistetyn korvausilman kanavassa ero ei ole näin suuri, mutta kuivanpään mittaustulokset eroavat keskimäärin 10 % 15.5. mittauksesta. Märänpään mittaus yhdistetyn korvausilman kanavassa eroaa muista, sillä mittausravot olivat keskimäärin 15 % suurempia kuin aikaisemmassa mittauksessa. Jälkimmäisessä mittaustilanteessa kuivan- ja märänpään arvot ovat paljon lähempänä toisiaan, jolloin ilmavirtaus jakaantuu tasaisemmin huuvan märän- ja kuivanpään polttimille. Syynä Pitot-putkimittausten tulosten eroavaisuuteen oli poistoilmapuhaltimen kierrosnopeus. Kuvassa 29 on esitetty märänpään polttimen lämpötila, kiertoilmapuhaltimen pyörimisnopeus ja yhdistyneeseen poistoilman lämpötilaan.



**Kuva 29. Märänpään polttimen lämpötilan vaikutus poistoilmapuhaltimeen ja poistoilman lämpötilaan**

Kuvassa 29 on esitetty sinisellä viivalla poistoilmapuhaltimen pyörimisnopeus, vihreällä viivalla kuvataan yhdistyneen poistoilman lämpötilaa ja oranssilla viivalla on ilmaistu märänpään polttimen lämpötila. Kuvasta nähdään, että poistoilman lämpötila seuraa polttimen lämpötilaa. Toisaalta polttolämpötila on myös suorassa vaikutuksessa poistoilmapuhaltimen pyörimisnopeuteen.

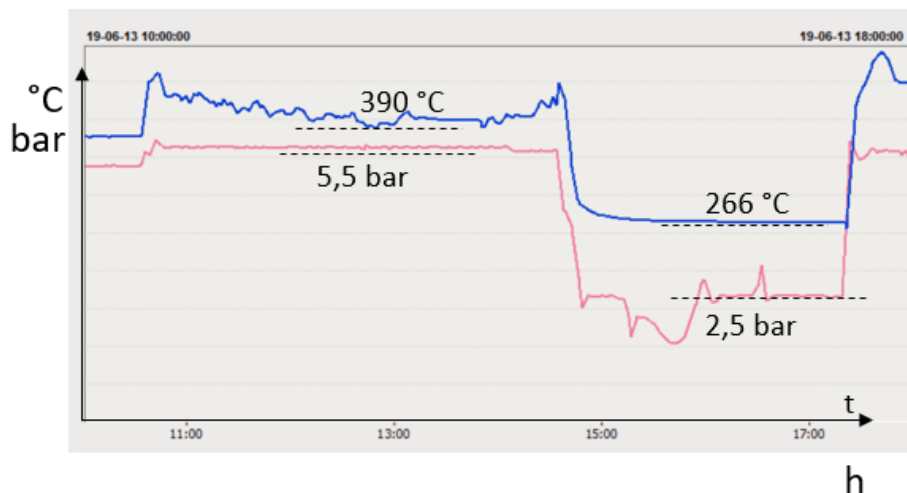
Polttimien lämpötilat olivat 40 °C astetta matalampia, kuin aikaisemmalla mittauksella. Tästä syystä polttoaineen syöttömäärät olivat 13,5 % pienempiä jälkimmäisellä mittauksella. Polttimien matalampien lämpötilojen vuoksi palamisilmatkanavien ja yhdistyneiden korvausilmakanavien virtaukset olivat mittauksissa 20 °C astetta pienempiä kuin 15.5 mittauksissa saadut tulokset. Ero polttimien ja poistoilmakanavien ja yhdistyneiden

kanavien lämpötilan välillä johtuu luultavasti huuvan epätasapainosta 15.5. mittauskerralla.

13.6.2019 mittaukset suoritettiin valkoiselle käsipyyhepaperille. Jenkkisylinterin vauhti tuotteella on sama kuin keltaisella käsipyyhepaperilla. Mittauskerralla poistoilman kosteus oli erittäin suuri, sillä se kondensoitui lämmöntalteenottajassa seinämille. Polttimen palamisilma pysyi vakiona mittauksen ajan, mutta heti mittauksen jälkeen kone jouduttiin ajamaan alas tuotannolta teknisen ongelman seurauksena.

Yhdistyneiden korvausilmojen ja palamisilmojen virtausten lämpötilat olivat erittäin lähellä 6.6 tehtyjen mittauksen kanssa. Poikkeuksena muihin mittauksiin oli Pitot-putkilla saadut kuivanpään palamisilman erittäin pienet paine-erot. Kanavassa vallitsevat paine-ero ilmanpaineen kanssa oli linjassa myös aikaisempien mittauksen kanssa. Pitot-putkilla saadut tulokset poistoilmakanavassa olivat kuitenkin keskimäärin 3 kertaa suuremmat kuin 6.6 tehdyissä mittauksissa. Todennäköisenä syynä tälle on 5 % suurempi pyörimisnopeus poistoilmapuhaltimella.

Kuvassa 30 on näkyvissä jenkin paine ja polttimen lämpötila.



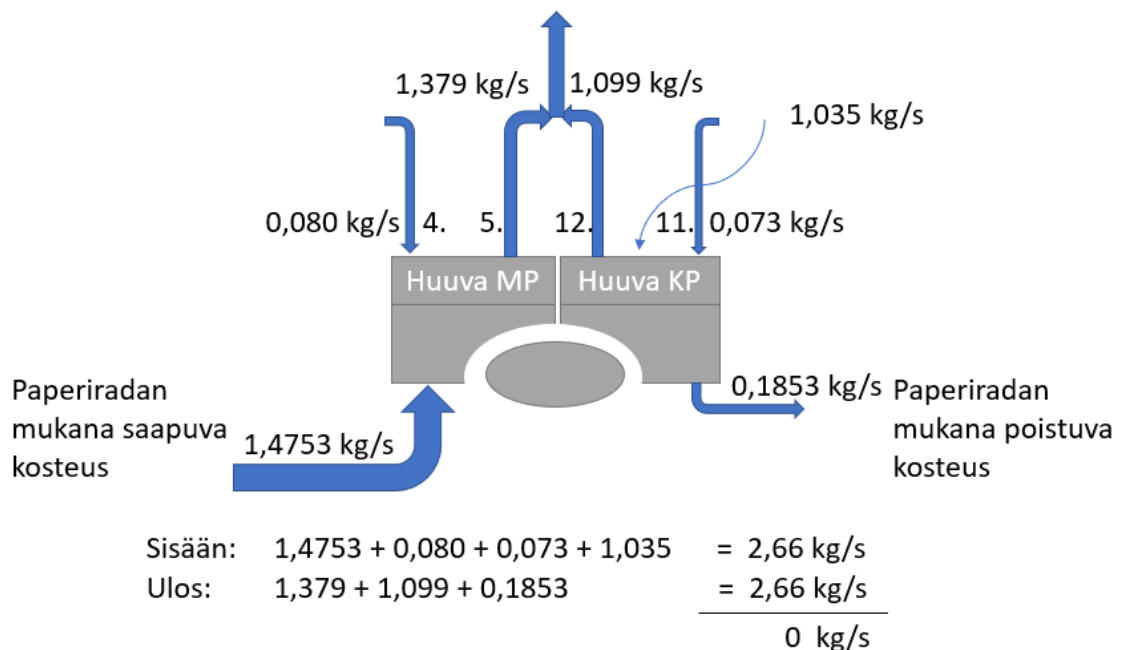
**Kuva 30. Polttimen lämpötila ja jenkkisylinterin paine katko tilanteessa**

Kuvassa 30 on pinkillä värillä esitetty jenkkisylinterin paine. Hetkellisessä tuotannon alasajotilanteessa jenkkisylinteri ajetaan katkopaineelle. Katkopainetilanteessa sylinteri

pitää matalamman paineen avulla lämpötilan halutussa tasossa. Pitämällä lämpötila tarpeeksi korkealla sylinterin sisällä, sylinteriä ei tarvitse erikseen lämmittää tuotannolle siirryttäessä. Kuvassa 30 sinisellä on merkitty kuivanpään polttimen lämpötila. Tuotannon alasajotilanteessa lämpötilaa lasketaan reilusti ja se lasketaan vakiolämpötilaan. Takaisin tuotannolleajotilanteessa polttimen lämpötila nousee yli ajoarvon, jotta jäähtyneet pinnat saadaan mahdollisimman nopeasti takaisin ajolämpötilaan.

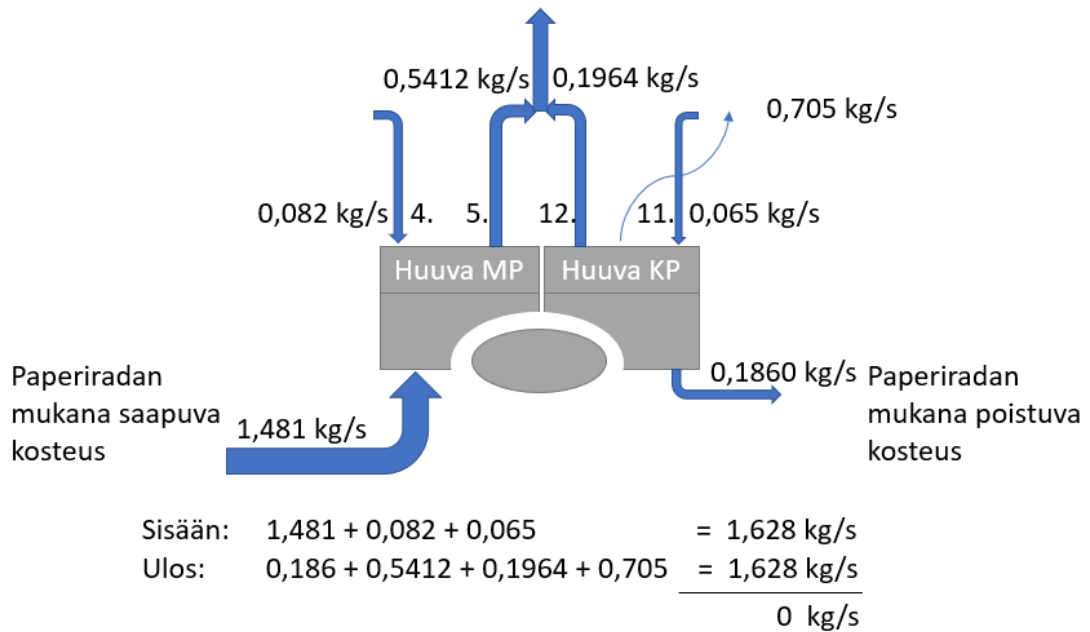
### 8.1.1 Vesitaseen tarkastelu

Tulosten tarkastelussa suoritettiin tarkastelu jokaiselle mittaukselle ainetaseen osalta. Veden osalta tarkastelussa pystyttiin määrittämään sisään- ja ulosvirtaukset mittausten ja arvioiden perusteella. Veden kokonaismääräprosessiin tulisi olla nolla, jotta ainetase olisi tasapainossa. Huuvan ohi virtaavan ja salista imettävän veden määrä on laskettu vesitaseen perusteella ja arvioitu että puuttuva vesimäärä täytyy johtua imusta tai huuvan ohi karkaavasta vedestä. Keltaiselle paperille suoritetuissa mittauksissa 15.5. ja 6.6. mittaustulosten vesitase on esitetty kuvissa 31 ja 32.



**Kuva 31. 15.5 Mittaustulosten vesitase, jossa huuva imee vesihöyryä ilmasta.**

Kapealla viivalla on esitetty huuvan ohi sali-ilmaan karkaavan tai sali-ilmasta imettävän veden määrä.



**Kuva 32. 6.6. Mittaustulosten vesitase, jossa sali-ilmaan karkaa vesihöyryä**

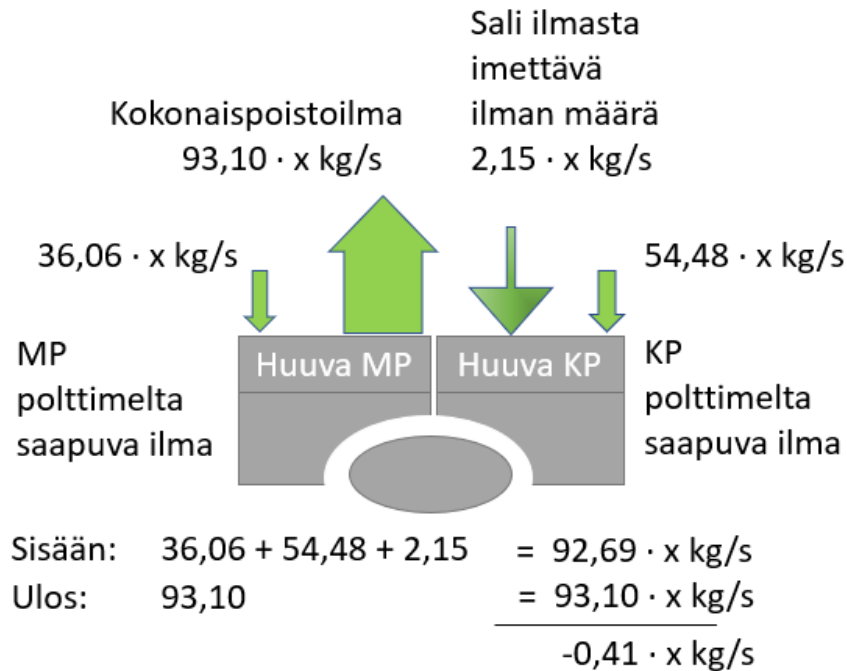
Vesitaseista nähdään, että veden virtausmäärät paperin mukana pysyvät vakioina. Samoin polttimilta tulevan virtauksen vesimäärä. Suuri ero havaitaan kuitenkin sali-ilmasta saapuvaan vesimäärään. 15.5. mittauksissa huuva imi vettä yli 1 kg/s sali-ilmasta, jonka seurauksena poistoilmakanavan vesimäärät olivat myös suurempia kuin vertailu mittauksella. 6.6. mittauksissa huuvaan ohi pääsi virtaamaan 705 gramman vesihöyryä. On täysin luonnollista, että osa vedestä pääsee karkaamaan huuvaan rakenteen ohi, sillä huuva ei ole ilmatiivis. Vesitaseen perusteella näyttäisi, että huuva olisi alipaineinen 15.5. mittauksissa ja 6.6. mittauksissa ylipaineinen. Tämä kuitenkin täytyy varmistaa kokonaisasetukseen perusteella.

27.3. vesitaseen perusteella huuvaan ohi karkasi 734 grammaa joka sekunti. 13.6. mitausten perusteella laaditun vesitaseen perusteella huuva oli erittäin lähellä optimivesitasetta, jolloin vettä imettiin 55 grammaa sali-ilmasta joka sekunti. Kyseinen tasetarkastelu pääsi vesitaseen osalta lähimmäksi nollaa.

### 8.1.2 Kokonaisilmataseen tarkastelu

Ilmataseen tarkastelussa tarkastellaan huuvaan alueelle puhallettavan ja poistoilmakanavien kautta imettävän ilman suhdetta. Mittausta ei voitu suorittaa kokonaispoiston

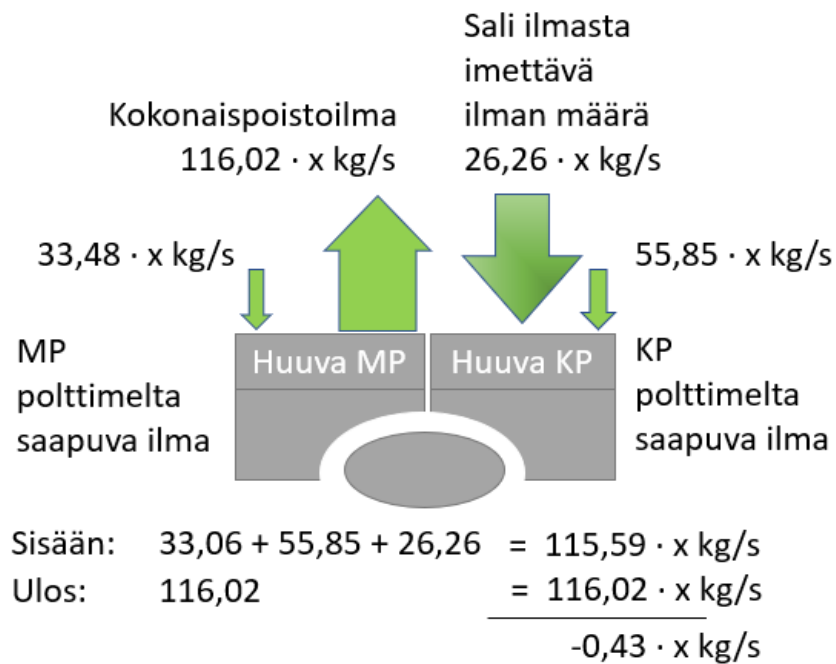
osalta, joten on jouduttu oletamaan, että huuvalta palaava ilma polttimelle on vakio. Ilmantasapaino saavutetaan, kun ilmatase saa arvokseen nollan. Nollasta poikkeava luku tulkitaan saliin puhallukseksi tai sali-ilmasta imuksi, riippuen siitä onko tase negatiivinen vai positiivinen. Taseen ollessa negatiivinen huuva on alipaineinen. Vastaavasti positiivinen tase tarkoittaa, että huuva on ylipaineinen. Kuvassa 33 on esitetty 27.3. mittausten pohjalta laadittu kokonaisilmatase.



**Kuva 33. 27.3. Mittaustulos, jossa näkyy tyypillistä ilmatasetta**

Kokonaisilmataseesta huomataan, että sali-ilmaa imetään huuvan poistoilmakanavaan yli  $2,1 \cdot x$  kilogrammaa joka sekunti. Vesitaseen perusteella vaikutti siltä, että huuva olisi ylipaineinen, kun yli 700 grammaa vesihöyryä pääsi karkaamaan huuvan ohi sali-ilmaan. Kokonaisilmataseesta kuitenkin huomataan, että kyseinen oletus oli väärä ja huuva on ollut mittauksen aikana todellisuudessa alipaineinen.

15.5. mittausten perusteella vesitaseen perusteella vettä imettiin ilmasta yli kilogramma sekunnissa. Sali-ilma ei sisällä kosteutta erityisen paljon, joten on epäiltävissä, että huuva on ollut erittäin suuressa alipaineessa. Kuvassa 34 on esitetty 15.5 mittausten kokonaisilmatase.



**Kuva 34. 15.5. Mittaustulos, jossa näkyy alipaineinen huuven kokonaisilmataase**

Kuvasta (34) huomataan, että huuva on erittäin vahvasti alipaineinen. Ilmaa imetään saliilmasta jopa kolme kertaa enemmän kuin mitä polttimilta huuven sisälle puhalletaan. Todennäköisin syy tälle alipaineelle on huuven ohjauksen automaatio.

Poistoilmapuhaltimen ohjausta ohjaa poistoilmakanavan kosteusosuus. Mikäli kosteusosuus ilmassa on liian suuri, ohjainyksikkö antaa ohjeistuksen tehon nostamisesta poistoilmapuhaltimelle. Nyt tehostuneen ilmanpoiston seurauksena huuvalta tuleva kuuma ilma imetään suoraan huuven sisääntulon läheisyydestä siten, että valtaosa puhallusilmasta ei pääse kosketukseen paperin kanssa. Tämän seurauksena paperi ei kuivu haluttuun kuivuuteen. Automaatio ohjaa tällöin polttimien lämpötilan nostoon. Lämpötilan nosto taas saadaan aikaiseksi polttoaineen syöttömäärän lisäyksellä.

6.6. mittauksissa ilmatase oli erittäin lähellä optimia. Huuvasysteemin imu sali-ilmasta oli  $700 \cdot x$  grammaa sekunnissa. Kyseisellä mittauksella päästiin lähimmäksi optimikokonaissilmatasetta, mitä millään mittauskerroilla. Tuloksissa huomattiin, että kuivanpään polttimelta tuleva ilman määrä oli jopa yhden kilogramman pienempi kuin aikaisemmissa mittauksissa. Sama ilmiö havaittiin 13.6. suoritetuissa mittauksissa. 13.6. mittauksissa

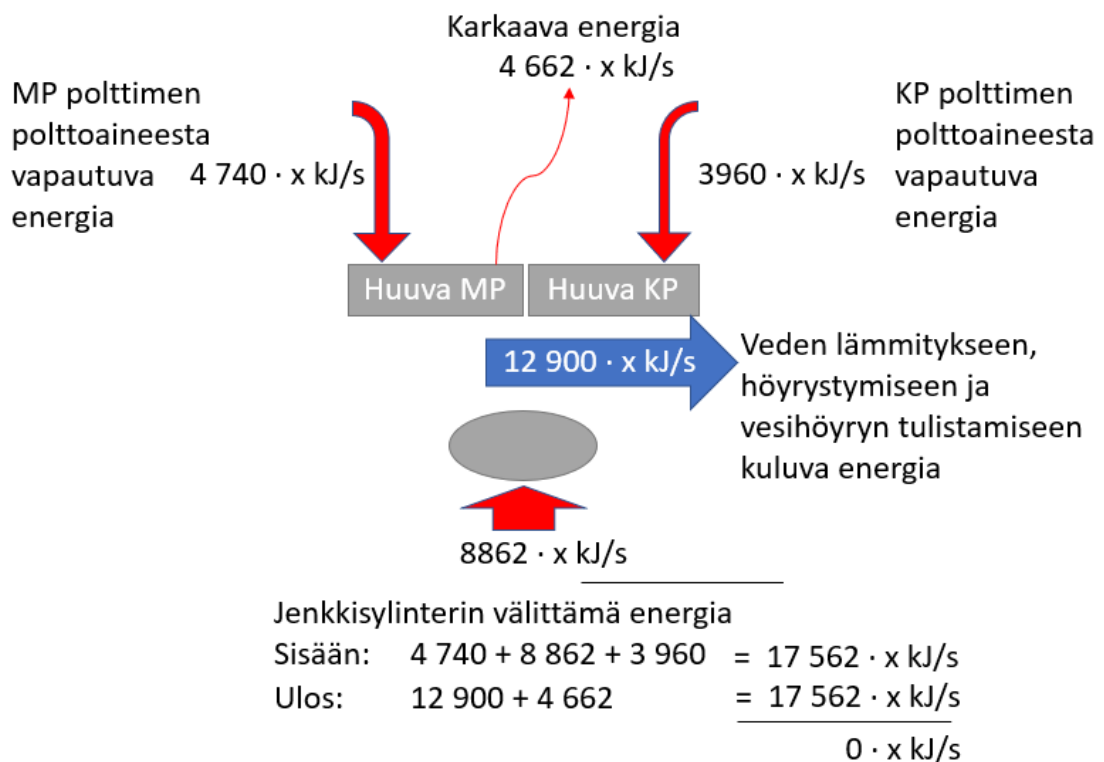
huuva oli alipaineinen, kun ilmaa imettiin huuvasysteemiin sali-ilmasta jopa 9,6·x kilogrammaa sekunnissa.

### 8.1.3 Energiataseen tarkastelu

Energiatarkastelussa tarkasteltiin huuvasysteemiin tulevia energioita ja näiden tasapainoa. Laskenta aloitettiin määrittämällä saapuvan veden tarvitsema energia. Veden lähtöarvona oli 30 °C ja loppuarvona tulistetun höyryn lämpötila oli sama kuin poistoilmakanavan lämpötila. Huuvalle tulevan veden määrä saatiin selville ainetaseen perusteella.

Huuvan alueelle tuotu lämpö tulee polttimilta kuumana ilmaa ja jenkkisylinterin lävitse johtumalla. Polttimilla kuumaan ilmaan siirtyy butaanin poltosta vapautuva lämpöenergia. Jenkkisylinterin lävitse virtaava höyryn lämpötila on hieman kyllästyskäyrän yläpuolella, jolloin jenkkisylinterin välittämä lämpöenergia on sama kuin höyryn lauhtumisessa vapautuva energia.

Kuvassa 35 on esitetty 6.6. mittausten perusteella laadittu veden höyrystämisen energia tarkastelu.

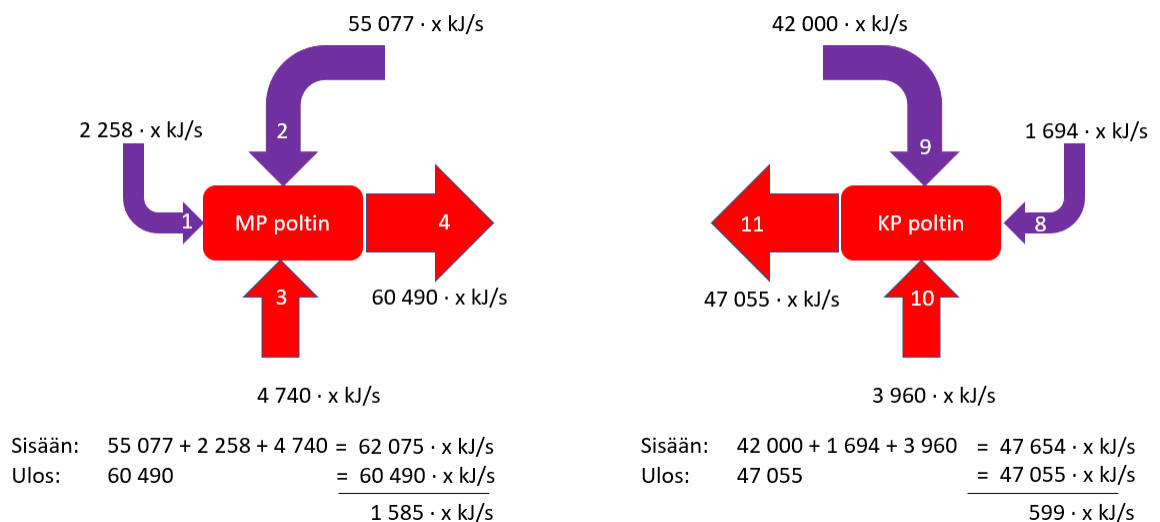


**Kuva 35. 6.6 Mittausten perusteella yksinkertaistettu energiatase tarkastelu**



Energiataseen perusteella erinäisiin häviöihin kuluu  $4662 \cdot x$  kJ/s. Luku vaikuttaa alustavasti suurelta, mutta on huomioitava, että huuvan alue ei ole erityisen tiivis ja myös putkistossa esiintyy häviöitä. Sisään tulevat virtaukset ovat polttimilta polttoaineen poltosta vapautuva energia. Sinisellä nuolella on kuvattu veden lämmittämiseen, höyrystämiseen ja tulistamiseen kuluvan energian määrä. Kuvan alareunassa on jenkkisyylinterin välittämä lämpöenergia.

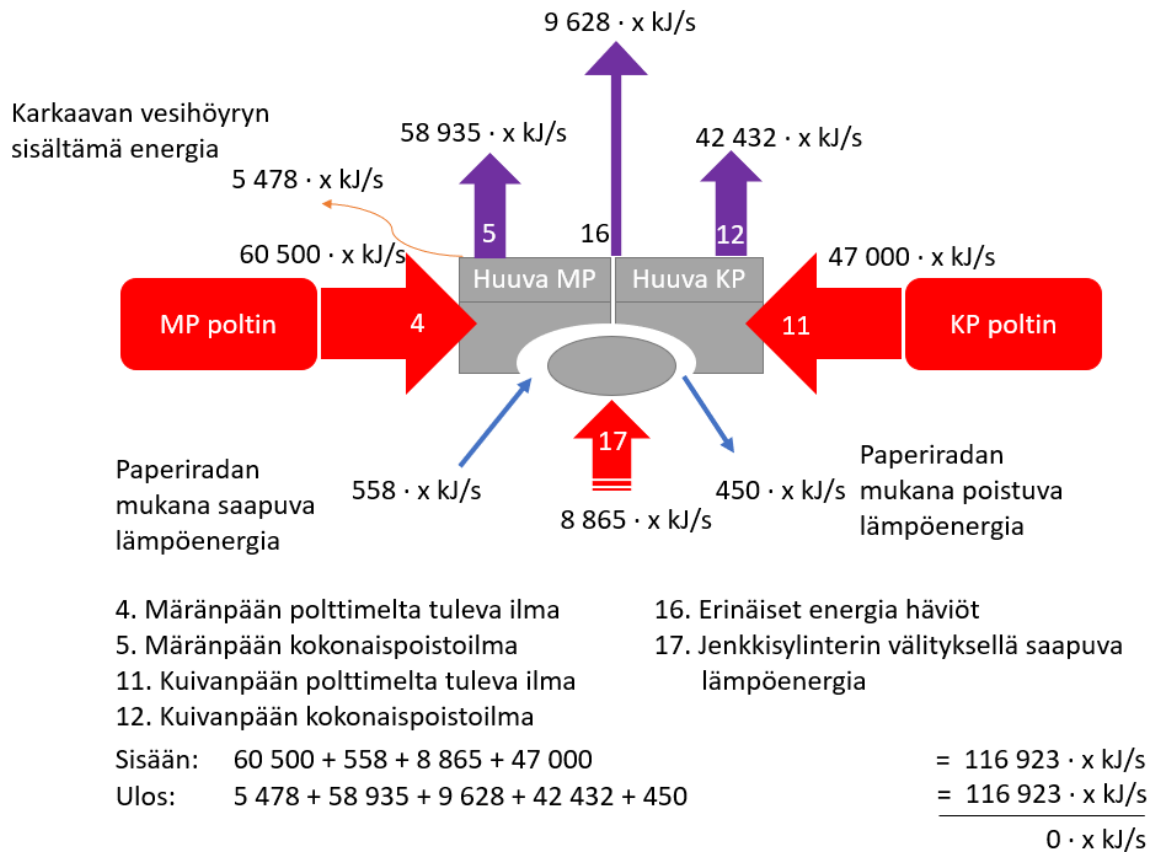
Energiataseen tarkastelu tehdään myös huuvan alueelle virtaavien virtausten energia sisällön perusteella. Tarkastelu aloitetaan polttimien energiasisältö tarkastelusta. Kuvassa 36 on tarkasteltu 6.6. mittausten perusteella märän ja kuivanpään virtausten energiasisältöä.



**Kuva 36. Märän- ja kuivanpään polttimien energiatase**

Kuvasta huomataan, että sisään virtaavat energia määrät ovat lähellä ulos virtaavia. Pientä epätasapainoa on havaittavissa märänpään polttimella, jossa ulosvirtaavan virtauksen energia on hieman pienempi, kuin sisään virtaavien virtausten summa. Eroavaisuus johtuu todennäköisesti polttimien lämpötilasta. Koska entalpia todetaan paineen ja lämpötilan funktiona, lämpötilan muutos muuttaa virtauksen entalpiaa. Lämpötila on mitattu anturilla, joka mittaa lämpötilan poltin huoneesta. Mitattu arvo ei kuitenkaan välttämättä anna kanavan virtauksen todellista lämpötilaa.

Huuvajärjestelmän tarkastelu kuitenkin antureiden ilmoittamilla lämmöillä. Kuvassa 37 on esitetty huuvajärjestelmän energiatase.



**Kuva 37. Huuvajärjestelmän energiatase**

Tase on laadittu siten, että se huomioi kaikki sisään- ja ulosvirtaukset. Jenkkisynterin tuoma energia on laskettu höyrystä faasimuutoksen avulla vapautuvan energian avulla. Tähän lukuun ei olla huomioitu lämmönsiirrossa esiintyviä häviöitä. Energiataseen tarkastelussa havaitaan, että kuivausprosessi ei ole erityisen tiivis ja että energiahäviöt ovat suhteellisen suuret. Tuntemattomiin kohteisiin energiaa häviää kokonaisuudesta 8,2 %. Osa kokonaishäviöstä on peräisin jenkkisynterin lämmönsiirron häviöistä, mutta tarkan arvon määrittäminen ei ole kuitenkaan mahdollista. Loput energiahäviöistä ovat hyvin mahdollisia, kun otetaan huomioon, että koneen läheisyydessä tuntee koneen lähettämän kuumuuden ja poltin huoneessa on jatkuvasti yli 50 °C. Prosessin kokonaishäviöksi tulee lopulta 13 %, mikä täysin realistinen kohteeseen.

Märänpään polttimilta poistuva lämpöenergia on suurempi kuin kuivan pään, sillä märänpään poistoilma sisältää paljon enemmän kosteutta kuin kuivanpään poistoilma. Karkaavan vesihöyryn energia on suhteellisen suuri, mutta alipaineisena vesihöyrystä saatava energia menetettäisiin poistoilman lämmityksessä moninkertaisesti.

## 8.2 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelussa suoritettiin kaikille mitattavilla parametreille. Herkkyystarkastelun tuloksina havaittiin, että kanavassa vallitsevan paineen vaikutus mittaustuloksiin oli mitättömän pieni.

herkkyystarkastelussa Kuivanpään lämpötilan kahdenkymmenen asteen muutos vaikutti massavirtaan vain 1,6 % eron. Tämän suuruinen ero virtauksessa ei aiheuta syytä tarkastella tuloksen oikeellisuutta. Märän kankaan lämpötilan mittausten tilanteessa yhden asteen muutos aiheutti 0,6 % eron massavirrassa ja 10 asteen vaikutus on jo 4,2 % massavirtauksessa.

Palamisilmakanavissa yksittäisen mittauksen 10 Pascalin ero aiheuttaa jopa 5 % eron palamisilmakanavan massavirtaan. Virtausnopeuden herkkyys paineelle oli jo lähtötietona tiedossa, mistä syystä virtausnopeuden määrittämisessä otettiin 5 mittausta. Virtausnopeusten keskiarvo laskennalla pystyttiin minimoimaan yksittäisen mittavirheen vaikutus kokonaisvirtaukseen. Palamisilman massavirran ero muuttaa kuitenkin kokonaisuudessaan massavirtaa vain 0,7%. Korvausilmakanavassa virtauksen määrä oli erittäin pientä. Kanavan virtauksessa 10 Pascalin paine-ero aiheuttaa kuitenkin 0,8 % eron polttimen kokonaisuudessaan massavirrassa. Huuvalta palaavan virtauksen mittaustuloksissa yksittäisen mittauspisteessä 10 Pascalin ero vaikuttaa 0,2 % kokonaisvirtauksen määrään. Poistoilman kanavissa 10 Pascalin ero aiheutti virtaukseen 1,2 % eron kokonaisuudessaan massavirtauksessa.

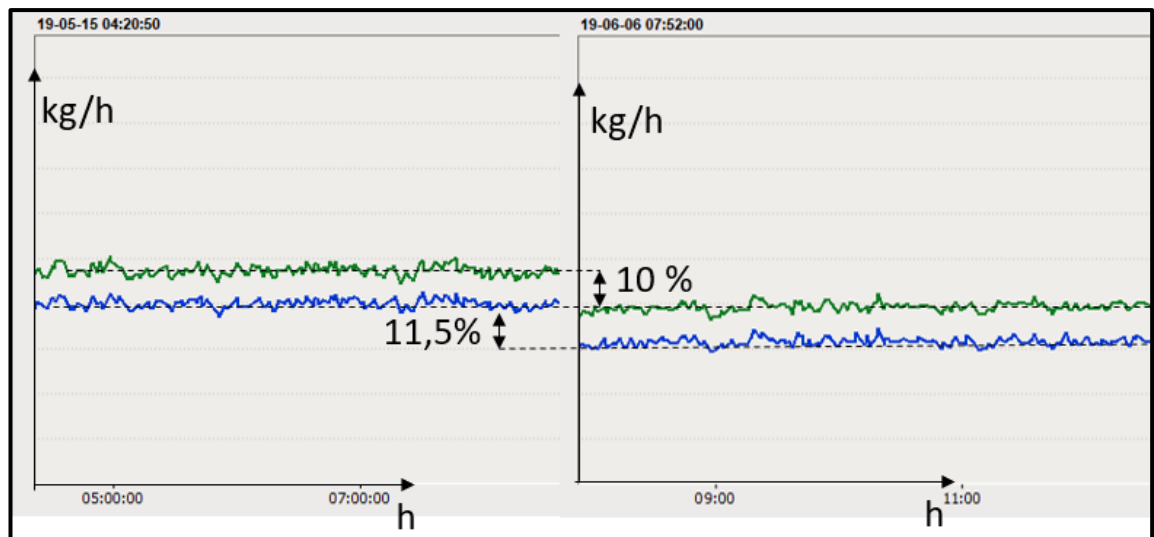
Saatujen tulosten perusteella huomataan, että yksittäisen mittauksen tarkkuuden vaikutus kokonaisvirtaukseen on suhteellisen pieni. Epätarkkuus on kuitenkin huomioitava, sillä psykometrinen sovitte ei ole määritetty polttimen lämpötiloille. Saadut tulokset kuitenkin vastaavat hyvin kuukausittaista kulutusta, joten ei ole syytä olettaa, etteikö psykometrinen mittaus antaisi tarpeeksi tarkkaa tulosta tässä tilanteessa.

## 8.3 Taloudellinen säästö optimiarvoilla ajettaessa

Taloudellinen potentiaalinen säästö saadaan polttoaineen syötön määrästä. Kun huuvan ilmakierto saadaan tasapainoon, kylmä ilma ei pääse laskemaan poistoilman ja kiertävän ilman lämpötilaa. Tällöin polttimella ilman lämmittämiseen tarvittava energiamäärä on pienempi kuin kylmemmän kiertoilman. Pienemmän energian tuottamiseen polttimen

lämpötila laskee. Matalampi polttimen tavoitelämpötila taas vähentää polttoaineen syöttömäärää.

15.5. ja 6.6. mittaukset tehtiin keltaiselle käsipyyhepaperille. 6.6. mittaustulokset ovat optimaaliset ainetaseen puolesta ja 15.5. taas ainetaseen puolesta ei ollut optimissa. Kuvassa 38 on esitetty paperikoneen polttoaineen syöttömäärät. Vasemmalla kuvassa on 15.5 mittauspäivän polttoaineen kulutus ja oikealla 6.6 polttoaineenkulutus.



**Kuva 38. Polttoaineen kulutus 15.5. ja 6.6.**

Kuvassa 38 vihreällä on esitetty märänpään polttoaineen kulutus ja sinisellä kuivanpään polttoaineen kulutus. Keskimäärin kokonaispolttoaineen kulutus on 11 % pienempi, kun ajo suoritetaan optimaalisessa tilanteessa.

## 9. YHTEENVETO

Mäntän tehtaalla oli havaittu, että paperikone 1:n huuva oli alipaineinen useilla eri paperilajeilla. Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää paperikone 1:lle puhaltimille, sellaiset ajoarvot, että huuva on tasapainossa valituilla tuotteilla. Toisena tavoitteena oli luoda laskenta ohjelma tulevaisuuden optimointeja varten. Optimaalisessa tilanteessa kylmä sali-ilma ei pääse poistoilmakanavaan ja näin jäähdytää koneessa kiertävää ilmaa. Työssä kuitenkin hyväksyttiin pieni ilman sisäänotto, sillä vaihtoehtoista kuumaa ilman puhallusta ei saanut tapahtua optimoinnin johdosta. Työlle esitettiin tutkimuskysymys: onko mahdollista löytää puhaltimelle tuotekohtaiset ajoarvot siten, että huuva on tasapainossa?

Tällä hetkellä paperikonetta operoidaan siten, että operaattori tarkistaa ajoarvot historiasta ja asettaa ne aikaisempiin ajoarvoihin. Operaattori tekee tarvittavia korjauksia, mikäli koneen toiminta tätä vaatii. Jatkotavoitteena on, että kaikkien paperilaatujen optimaaliset ajoarvot olisivat operaattorin lähtöoletuksena, joita muokataan koneen toiminnan mukaan.

Kirjallisuusselvityksen perusteella pystyttiin määrittämään erinäisiä lämmönsiirto ja aineensiirtovastuksia. Osa tuntemattomista kokonaisenergiähäviöistä olettaa johtuvan jenkki sylinterin johtumisessa esiintyvistä energiahäviöistä. Laskennassa nämä häviöt olttiin jätetty huomiotta, sillä näiden häviöiden määrän määrittäminen ei mahdollista.

Paperikoneelle suoritettiin mittauksia, joilla selvitettiin virtauksen ominaisuudet. Mittauksien aikana havaittiin poikkeuksia antureiden ja mittaustulosten välillä ja vuotoja kanavistossa, joita pystyttiin korjaamaan seuraavissa seisakeissa. Mittaustulosten muuttaminen aine- ja energiataseiden tarkasteluun hyödylliseen muotoon tapahtui psykometrisen laskennan ja Bernoulin yhtälön avulla. Saatuja energiatase arvoja vertailtiin kuukausiraportin ilmoittamiin energiamäärään, jolla voitiin varmistaa, että taseet olivat oikein. Tulosten perusteella pystyttiin määrittämään puhaltimien optimaaliset ajoarvot valituille tuotteille ja luomaan toimiva optimointiohjelma, jonka perusteella voidaan kokeellisesti selvittää optimaaliset arvot jokaiselle paperilaadulle.

Saaduille mittausarvoille on suoritettu herkkyystarkastelu, jonka tuloksena saatiin, että lämpötilojen 10 % virhe aiheuttaa vain 2 % virheen kokonaismassavirtauksen laskennassa. Kanavan nopeuden määrittämisessä yksittäisen mittausvirheen vaikutusta pystyttiin pienentämään ottamalla 5 mittausta eri kohdista kanavaa ja laskemalla näiden virtausten keskiarvon kanavan virtausnopeudeksi.

Taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltuna huuven optimaalisella ajotavalla pystyttiin pienentämään todellista polttoaineen kulutusta 11 %. Optimointi voidaan koneen kohdalla myös automatisoida tulevaisuudessa kahdella mittarilla ja puhaltimien automaatio ohjauksella. Mittarit tulisi asettaa yhdistyneeseen palamisilmakanavaan ja yhdistyneeseen poistoilmakanavaan. Poistuvan ilmavirtauksen massavirtauksen tulee olla sama kuin saapuvan palamisilman ja paperiradan mukana saapuvan veden massavirrat.

Optimointi laskentaohjelma on laadittu butaanille, mutta polttoaine muuttui kesän 2019 aikana nestemäiseen maakaasuun. Polttoaineen muutoksen johdosta optimointi ohjelmaa tulee jatkokehittää maakaasulla toimivaksi. Mäntän tehtaan muihin paperikoneisiin optimointi ohjelmaa voidaan soveltaa pienin muutoksin.

Tässä diplomityössä asetettuun tutkimuskysymykseen, vastattiin onnistuneesti. Nykyisten ajoarvojen rinnalle löydettiin sellaiset ajoarvot, jotka optimoivat huuven ainetaseen. Lisäksi työssä havaittiin, että kuivatusprosessissa löytyy yhä kehittämiskohteita, sillä 8 % energiahäviöistä ovat sellaisia, joita ei pystytä tunnistamaan. Osa tästä energiahäviöstä on peräisin jenkkisylinterin johtumisesta häviämästä energiasta, mutta tarkkaa arvoa ei pystytä määrittämään.

Huuven optimaalisten ajoarvojen toimivuutta ei työssä pystytty määrittämään jokaiselle paperikoneella ajettavalle tuotteelle, mutta laskentaohjelman perusteella nämä voidaan selvittää. Mittausten suorittamiseen laaditaan työn jatkokehityksenä mittausohjekirja, jonka perusteella kuka tahansa voi optimoida paperikoneen huuven paineisuuden. Lisäksi optimoinnin automatisointi suunnitelmat on aloitettu.

# LÄHTEET

Atkins, T.;& Escudier, M. (2013). *A Dictionary of mechanical engineering*. Oxford: Oxford University Press, s. 1.

Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow*. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann. Toinen painos, s. 588. Saatavissa (10.5.2019): <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=8b714e8a-e70b-4b5e-8c1e-ac75be5d3d9d%40sessionmgr4010&bdata=JkF1dGhUeXBIPWNvb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3d#AN=189585&db=nlebk>

Chien, L.;& Yu-Jen, W. (2017). Psychrometer based on a contactless infrared thermometer with a predictive model for water evaporation. *Biosystems Engineering*. vol. 160, s. 84-94. Saatavissa (8.5.2019): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S153751101630335X>

Ezzeddine, W.;Schutz, j.;& rezq, n. (2019). Pitot Sensor air flow measurement accuracy: Sausal modelling and failure risk analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*. vol. 65, s. 7-15. Saatavissa (10.5.2019): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0955598618300712>

Hägglom-Ahner, u.;& Komulainen, p. (2003). *Paperin ja kartongin valmistus*. Helsinki: Opetushallitus. Toinen painos. s. 290.

Janson-Herminge, L. (1969). Värmetekniska aspekter på yankeetorkning. *Svensk Papperstidning*. vol. 63(2), 15-23.

Karlsson, M. (2012). *Paparmaking science and technology: Book 9, papermaking: part 2, drying*. Porvoo: Finnish Paper Engineers' Association. Toinen painos s. 634.

Kerekes, R. J.;& Senger, J. J. (2006). Characterizing refining action in low- consistency refiners by forces on fibres. *Journal of pulp and paper science*. vol 32, s. 1-8.

KnowPap. (2005). KnowPap-Paperitekniiikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Saatavissa (2.8.2019): <http://www.knowpap.com/>

Luonnonvarakeskus. (2015). *Hakkuumahdollisuudet*. Saatavissa (30.9.2019): <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsavarat-ja-metsasuunnittelu/hakkuumahdollisuusarviot/>

Luonnonvarakeskus. (4.10.2018). *Paperi edelleen metsäteollisuuden tärkein vientituote*. Saatavissa (30.9.2019): <https://www.luke.fi/uutiset/paperi-edelleen-metsateollisuuden-tarkein-vientituote/>

Luonnonvarakeskus. (25.4.2019). *Metsäteollisuuden puunkäyttö 2018*. Saatavissa (30.9.2019): <https://stat.luke.fi/metsateollisuuden-puun-kaytto>

Metsäteollisuuden työnantajaliitto. (1984). *Puusta paperiin M-505*, Lappeenranta: Suomen paperi- ja puutavara-lehti oy, toinen painos. s.49.

Mills, A. F. (2014). *Basic heat and mass transfer*. Prentice Hall. Toinen painos, s. 1000.

Niskanen, K. (1998). *Papermaking Science and Technolog*. Helsinki: Fapet. s. 324.

Savonmäki, R. (2. maaliskuu 2019). infrastructure specialist.

- Schaschke, C. (2014). *Chilton-Colburn analogy*. Oxford: Oxford University Press. ensimmäinen painos. Saatavissa (5.27.2019): <https://www-oxfordreference-com.libproxy.tuni.fi/view/10.1093/acref/9780199651450.001.0001/acref-9780199651450-e-534>
- Seppälä, M.;& Klementti, U. (2001). *Paperimassan valmistus*. Helsinki: Opetushallitus. Toinen painos. s. 196.
- Sihvo, L. (1969). *Tekniikan käsikirja*. Jyväskylä: K.L Gummerus Osakeyhtiön kirjapaino 8. painos. osa 4. s. 712.
- Singh, A.;Singh, S.;Singh, H.;& Sawhney, R. (2002). *Building and Environment*. vol. 37(4), s. 415-419. Saatavissa (8.5.2019): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360132301000324#EQ2>
- Sundberg, T.;Anderson, N.;Löfgren, K.;& österberg, L. (1968). *Heat transfer in MG Drying*. Svensk Papperstidn.
- Suorsa, J. (3.10.2017). *Metsäteollisuus on yksi suurimmista teollisuuden aloista Suomessa*. Saatavissa(30.9.2019): <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/metsateollisuus/>
- Suorsa, J. (8.2.2019). *Paperin ja kartongin tuotantokehitys*. Saatavissa (30.9.2019): <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/massa-ja-paperiteollisuus/>
- Tsilingiris, P. (2010). Modeling heat and mass transport phenomena at higher temperatures in solar distillation systems – The Chilton–Colburn analogy. *Solar Energy*. vol. 84(2), s. 308-317. Saatavissa (28.5.2019): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0038092X09002783>
- Valmet. (18.6.2019). *Valmet toimittaa laajan paperikoneen lajinvaihtouudistuksen Stora Ensolle Suomeen*. Saatavissa (30.9.2019): <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/lehdistotiedotteet/2019/valmet-toimittaa-laajan-paperikoneen-lajinvaihtouudistuksen-stora-ensolle-suomeen/>
- Volchkov, E.;Terekhov, V.;& Terekhov, V. (2004). A numerical study of boundary-layer heat and mass transfer in a forced flow of humid air with surface steam condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 47(6), s. 1473-1481. saatavissa (27.5.2019): <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S001793100300543X>