

Jari T. J. Lappalainen

Paperin- ja kartonginvalmistus- prosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi

VTT PUBLICATIONS 518

Paperin- ja kartongin- valmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi

Jari T. J. Lappalainen
VTT Tuotteet ja tuotanto



ISBN 951-38-6267-4 (nid.)

ISSN 1235-0621 (nid.)

ISBN 951-38-6268-2 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0849 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2004

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Tuotteet ja tuotanto, Tekniikantie 12, PL 1301, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6752

VTT Industriella System, Teknikvägen 12, PB 1301, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6752

VTT Industrial Systems, Tekniikantie 12, P.O.Box 1301, FIN-02044 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6752

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2004

Lappalainen, Jari T. J. Paperin- ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi [Modelling and dynamic real-time simulation of paper and board making processes]. Espoo 2004. VTT Publications 518. 144 s.

Avainsanat pulp and paper, mathematical modelling, dynamic simulation, paper making, board making, grade change, Apros

Tiivistelmä

Tietokoneavusteinen dynaaminen simulointi tarjoaa matemaattisen testipenkin, jossa prosessin ja sen automaation käyttäytymistä voidaan tutkia kustannustehokkaasti ja ilman riskiä ihmisille, ympäristölle tai tuotantolaitteistolle. Tehtaanlaajuisten, laskentanopeudeltaan vähintään reaaliaikaisten dynaamisten simulointimallien hyödyntäminen yleistyy muun muassa prosessin ja automaation suunnittelussa ja kehitystyössä, automaation testauksessa ja operaattoreiden koulutuksessa.

Simulointiin tarvittavien matemaattisten mallien kehittäminen on paperinvalmistusprosessien tapauksessa moniulotteinen tehtävä. Paperin raaka-aineet, kuidut ja täyteaineet muodostavat veden kanssa epähomogeenisen seoksen, jonka käyttäytymistä on vaikea ennustaa tarkasti. Prosessissa on useita yksikköoperaatioita, esimerkiksi rainaus, joiden ilmiöitä pystytään vain osittain kuvaamaan teoreettisesti ja joista on hyvin vähän saatavilla mallinnukseen soveltuvaa mittausdataa. Eri osatekijöiden lisäksi prosessin ja sen automaation muodostama kokonaisuus on monimutkainen sisältäen paljon takaisinkytkentöjä ja ristikkäisvaikutuksia. Prosessin ilmiöiden aikajänne vaihtelee millisekunneista tunteihin.

Tämä tutkimus kokoaa mallinnuksen näkökulmasta keskeistä tietoa paperin- ja kartonginvalmistuksesta. Työssä tutustutaan simuloinnin taustaan, sovelluksiin sekä työkaluihin sellu- ja paperiteollisuudessa. Käytännön esimerkkinä kuvataan Apros Paper -simulointiympäristössä (APMS) toteutettu kolmikerroskartonkikoneen mallinnus: valitut mallit, käytetyt yksinkertaistukset sekä kokemuksia mallin rakentamisesta, validoinnista ja hyödyntämisestä. Kohdeprosessin mallinnus alkaa jauhatuksen syöttösäiliöiltä ja kattaa prosessin kuivatusosan ensimmäiselle mittaraamille asti. Mallinnuksessa on käytetty mahdollisimman pitkälle mekaniikkaa, fysiikkaa ja kemian peruslakeihin perustuvia malleja, joita on tarpeen

mukaan täydennetty kokeellisella tiedolla. Mittaustietoihin vertailu osoitti mallin vastaavan hyvin kohdekoneen dynaamista käyttäytymistä.

Työssä osoitetaan, että dynaamista simulointimallia, johon on yksityiskohtaisesti kuvattu prosessin ja automaation keskeiset osat, voidaan menestyksellisesti käyttää monimutkaisen dynaamisen järjestelmän tutkimiseen ja hallinnan kehittämiseen. Rakennettua kartonkikonemallia sovellettiin ensimmäisenä lajinvaihtojen kehittämiseen. Jo simulaattorin rakentamisvaihe oli hyödyllinen syventäen ymmärrystä eri tekijöiden vaikutuksesta lajinvaihdossa. Lisäksi lajinvaihtoautomaation mallia testattaessa havaittiin kaksi operaattoreiden virheellistä käytäntöä lajinvaihtoautomaation käyttämisessä. Tehtaalla tehtyjen simulointikokeiden avulla haettiin lajinvaihtoautomaation viritysparametreille uudet arvot, jotka otettiin käyttöön kohdekoneella. Muutosten ansiosta lajinvaihtoaikojen todettiin lyhentyneen noin 15 %. Toisessa sovellusesimerkissä simulointimallin kuivatusosaa muutettiin korvaamalla kuivatussylintereitä päällepuhalluskuivaimella. Simuloimalla selvitettiin muutosten vaikutusta kuivatuskapasiteettiin ja tutkittiin uuden kuivaimen hyödyntämistä kartongin kosteuden hallintaan.

Työn lopuksi arvioidaan käytettyä mallinnuksen ja simuloinnin lähestymistapaa sekä pohditaan mallin kehittämiskohteita saatujen tulosten valossa. Kehitetyle simulointimallille esitellään myös uusia mahdollisia käyttötapoja.

Lappalainen, Jari T. J. Paperin- ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi [Modelling and dynamic real-time simulation of paper and board making processes]. Espoo 2004. VTT Publications 518. 144 p.

Keywords pulp and paper, mathematical modelling, dynamic simulation, paper making, board making, grade change, Apros

Abstract

This thesis focuses on the mathematical modelling and dynamic real-time simulation of paper and board making processes. The aim of dynamic simulator development is to obtain a mathematical test bench for process and automation studies, which is low-cost and risk free for people, the environment and equipment. Use of millwide dynamic simulators (real-time or faster), in process and control system design and development, control system testing and training of operators, is on the up rise.

There are many challenges in developing accurate simulation models for paper-making processes. The raw materials, fibers and fillers, are transported and processed together with water as a non-homogenous suspension, the behaviour of which is hard to predict. Theoretical descriptions and accurate measurements of some unit operations, such as web forming, are difficult to perform. Process and controls form together a complex integrated system with many interactions and recirculations. The time span of the process phenomena varies from milliseconds to hours.

This work presents fundamental information on the latest research results relevant to modelling paper and board making processes. Use of simulation in the pulp and paper industry is reviewed. A modelling case study of a three-ply board machine, making use of the Apros Paper simulation environment (APMS) is reported. The mechanistic modelling approach applied is described. The experiences gained with regard to model construction and validation are dealt with. The model starts from the chests before refining and ends to the first scanning gauge in the drying section. The model agrees well with measured data.

The modelling and validation phases increased the simulation team's understanding about the prevailing dynamics in grade changes. Additionally, it revealed weaknesses in operational practices for using the machine's automatic grade change program. The simulator was used in finetuning the automatic grade change program. As a result, the grade change times decreased by 15%. Moreover, use of a new type of dryer, an air-impingement unit, in the drying section was simulated. Potential to increase drying capacity and to improve board moisture control was investigated. Dynamic simulation using detailed and carefully verified process and automation models proved to be a powerful method to study and develop a complicated dynamic system.

The last part of the thesis evaluates the modelling and simulation approach that is used. Ideas for further development and future use of the board machine model are also discussed.

Alkusanat

Tämä tutkimus on tehty VTT Tuotteet ja tuotanto -yksikön systeemidynamiikan ryhmässä, jossa on vuodesta 1994 alkaen kehitetty dynaamista paperi- ja sellu-prosessien simulaattoria. Voimalaitosprosesseihin keskittyneen Apros-simulointiohjelman laajentaminen myös paperiteollisuuden työkaluksi on vaatinut pitkäjänteistä työtä, josta kiitos kuuluu koko Systeemidynamiikan ryhmälle. Ryhmäpäällikkö Kaj Juslin on ansiokkaasti ohjannut kehitystyötä. APMS, eli nykyiseltä nimeltään Apros Paper, on kehittynyt yhteistyöprojekteissa teollisuuden ja korkeakoulujen kanssa. Kiitän lämpimästi yhteistyökumppaneita hyvistä projekteista, sekä Tekesiä usean tutkimuksen taloudellisesta tukemisesta.

Tähän työhön on kerätty kokemuksia ja ajatuksia erityisesti Stora Enson Kaukopään tehtaiden kanssa tehtyihin mallinnus- ja simulointiprojekteihin liittyen. Kiitän lämpimästi kaikkia simulaattorin kehitystyössä ja soveltamisessa avustaneita Stora Enson henkilöitä, eritoten prosessi-insinööri Tommi Mylleriä.

Tämä tutkimus on hyväksytty lisensiaatintyönä Teknillisessä korkeakoulussa. Kiitän työn valvojaa, professori Sirkka-Liisa Jämsä-Jounelaa tuesta ja arvokkaista kommentteista, sekä professori Pentti Lautalaa Tampereen teknillisestä yliopistosta työn tarkastamisesta. Suomen Kulttuurirahastoa kiitän työn kirjoittamisvaiheen taloudellisesta tukemisesta.

Espoossa 11.2.2004

Jari Lappalainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat	7
Symboliluettelo	11
1. Johdanto	17
2. Dynaaminen simulointi sellu- ja paperiteollisuudessa	19
2.1 Prosessidynamiikka	19
2.2 Simulointitutkimukset tietokoneen avulla	20
2.3 Simulointityökalut	23
3. Paperinvalmistusprosessien matemaattinen mallinnus	25
3.1 Massasulpun koostumuksen kuvaaminen	25
3.2 Massasulpun virtausominaisuuksien laskenta	27
3.3 Massasäiliöt ja sekoittuminen	34
3.3.1 Sekoittuminen massasäiliöissä	34
3.3.2 Ylivuotovirtausten laskeminen	35
3.3.3 Sekoittuminen putkien yhdistymispisteissä	35
3.4 Jauhatuksen vaikutusten huomioiminen	36
3.5 Erotusoperaatioiden toiminnan kuvaaminen	37
3.5.1 Konesihtti	38
3.5.2 Pyörrepuhdistin	44
3.6 Perälaatikon mallinnus	48
3.7 Rainauksen ja vedenpoiston kuvaaminen	49
3.7.1 Retentio ja vedenpoisto tasoviiralla	49
3.7.2 Vedenpoiston mallintaminen Darcyn lakiin perustuen	51
3.7.3 Vedenpoiston mittaaminen laboratoriolaitteilla	55
3.8 Vedenpoiston ennustaminen paperin märkäpuristuksessa	59
3.9 Paperin kuivatuksen mallinnus	63
3.9.1 Yleistä kuivatuksesta ja kuivatussimulaattoreista	63
3.9.2 Lämmönsiirto sylinterikuivatuksessa	64
3.9.3 Veden poistuminen rainasta	69

3.10	Laatusuureiden mallintaminen	74
4.	Apros-simulointiympäristö	76
4.1	Simulointiympäristön taustaa ja perusrakenne	76
4.2	Simulointimallien rakentaminen.....	78
4.3	Simulointimallien ratkaisuperiaatteet	79
4.3.1	Virtausverkon laskenta.....	79
4.3.2	Rainaosan laskenta	81
4.4	Toteutettuja simulointisovelluksia.....	82
5.	Kolmikerroskartonkikoneen malli	84
5.1	Kohdeprosessin kuvaus	84
5.2	Mallin rajausta	85
5.3	Säiliöiden ja virtausverkon mallinnus	86
5.4	Viira- ja puristinosa	89
5.4.1	Viiraosa	89
5.4.2	Puristinosa	93
5.5	Kuivatusosan mallinnus.....	95
5.5.1	Kuivatusosan laskennan perusrakenne.....	95
5.5.2	Lämmönsiirto	96
5.5.3	Veden poistuminen rainasta	99
5.5.4	Kuivatusosan mallin virittäminen	102
5.6	Automaation mallinnus	106
5.6.1	Mallinnuksen kattavuus	106
5.6.2	Mittaukset.....	106
5.6.3	Säätöpiirit	107
5.6.4	Lajinvaihtoautomaatio.....	108
5.7	Simulointimallin validointi.....	111
5.7.1	Prosessimittausten tarkkuus	111
5.7.2	Lajinvaihtosimuloinnit	113
6.	Kartonkikoneen mallin hyödyntäminen	118
6.1	Yleistä simulointimallin käyttämisestä.....	118
6.2	Lajinvaihtojen nopeuttaminen	119
6.3	Päällepuhalluskuivaimen lisääminen.....	123
6.4	Mallin hyödyntäminen tulevaisuudessa.....	125

7. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	127
Lähdeluettelo	131

Symboliluettelo

Pienet ja isot kirjaimet

a	kontaktilämmönsiirtokerroin, kun paperin/kartongin kosteus on nolla ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
A	pinta-ala (m^2)
A_s	ominaispermeabiliteetti (g/m)
b	kontaktilämmönsiirtokerroimen kosteusrippuvuuden kulmakerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{°C kg H}_2\text{O}/\text{kg k.a.})$)
c	sakeus (%)
c'	sakeus (kg/m^3)
c_a	sakeus sihtireiän akseptipuolella (%)
$c_{A,i}$	komponentin i osuus akseptivirrassa (%)
c_{ds}	kuivan paperin/kartongin ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ}/\text{kg°C}$)
c_F	syöttövirran sakeus (%)
$c_{F,i}$	komponentin i massaosuus syöttövirrassa (%)
$c_{p,c}$	kuivatussyylinterin seinämän ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ}/\text{kg°C}$)
c_R	rejektivirran sakeus (%)
c_u	sakeus sihtireiän ylävirran puolella (%)
c_w	veden ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ}/\text{kg°C}$)
C	vakio ($7,03\text{E}-04 \text{ kgH}_2\text{O°C}/\text{W}/\text{s}$)
C_1, C_2, C_3, C_4	paperin koostumuksesta riippuvia vakioita
D	putken sisähalkaisija (mm)
D_{eff}	vesihöyryn diffusiviteetti huokoisessa materiaalissa (m^2/s)
D_v	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa (m^2/s)
E_R	erottelutehokkuus
g	putoamiskiihtyvyyys (m/s^2)
h	korkeus (m)

h_{OF}	ylivuotokorkeuden ylittävä pinnankorkeus (m)
I	puristusimpulssi ((kN/m)/(m/s))
k	permeabiliteetti (m^2)
k_{con}	perälaatikon huulisuihkun kuroumakerroin
k_{E1}	paperista ilmaan tapahtuvan lämmön/aineensiirron viritysparametri
k_{E2}	kuivatusolosuhteista riippuva kerroin
k_{FLT}	kerroin, joka riippuu puristinnipin huopien lukumäärästä
k_{H1}	kuivatussylinterin ja paperin/kartongin välisen kontaktilämmönsiirron viritysparametri
k_{OF}	virtauskanavan dimensioista ja muodosta riippuva parametri
k_{cp}	kontaktilämmönsiirron laskennassa käytettävä kuivan kerroksen osuutta kuvaava viritysparametri
k_Y	paperin kuivan kerroksen paksuuteen vaikuttava viritysparametri
K	kuivan paperin/kartongin aiheuttama virtausvastus
K_1, K_2	massakohtaisia vakioita
L	pituus (m)
\dot{m}_A	akseptin massavirtaus (kg/s)
\dot{m}_{ev}	paperista/kartongista haihtuvan veden massavirta (kg/s)
\dot{m}_F	syötön massavirtaus (kg/s)
M	massakohtainen kompressibiliteettivakio
n	kompressibiliteettikerroin
N	massakohtainen kompressibiliteettivakio
p	paine (Pa)
p_0	vesihöyryn osapaine paperin pinnalla (Pa)
p_{LL}	puristinpaine (kN/m)
p_{tot}	huuvan ilmanpaine (Pa)
p_v	vesihöyryn osapaine haihdutuspinnalla (Pa)
p_{va}	vesihöyryn osapaine ilmassa (Pa)

Δp	paine-ero (Pa)
$\Delta p/L$	painehäviö (m vesipatsasta / 100 m putkea)
P	läpäisysuhde
q_{in}	lämpövuoto sylinteristä paperiin (W/m^2)
Δq_{conv}	konvektiivinen lämpöhäviö (W/m^2)
Δq_{out}	paperista/kartongista ilmaan siirtyvä lämpövuoto (W/m^2)
Δq_p	paperin/kartongin sisään jäävä nettoteho (W/m^2)
Q_s	laitekohtainen sihdin erottelutehokkuutta kuvaava parametri
Δr_a	sorptiolämpö (kJ/kg)
Δr_z	höyrystymislämpö (kJ/kg)
R	suotautumisvastus ($1/m^2$)
RR_m	massarejektisuhde
RR_v	tilavuusrejektisuhde
RTF	rejektin sakeutumiskerroin
R_v	vesihöyryn kaasuvakio ($J/kgH_2O/K$)
$S_{A,i}$	aineen i erotuskerroin akseptivirtaan
S_0	kuitujen ominaispinta-ala (m^2/m^3)
t	aika (s)
Δt	aika-askeleen pituus (s)
T_c	kuivatussylinterin seinämän lämpötila ($^{\circ}C$)
T_p	paperin/kartongin lämpötila ($^{\circ}C$)
T'_p	paperin/kartongin lämpötila (K)
ΔT_p	paperin/kartongin lämpötilan muutos ($^{\circ}C$)
u	virtausnopeus, koneen nopeus (m/s)
u_{max}	maksimivirtausnopeus (m/s)
u_{min}	minimivirtausnopeus (m/s)
u_{teor}	teoreettinen virtausnopeus (m/s)
u_{tod}	todellinen virtausnopeus (m/s)

U	sisäenergia (J)
v_s	ominaistilavuus (m^3/kg)
\dot{V}	tilavuusvirtaus kerroksen läpi (m^3/s)
\dot{V}_F	syöttövirran tilavuusvirtaus (l/s)
\dot{V}_{OF}	ylivuotovirtaus (l/s)
\dot{V}_R	rejektivirran tilavuusvirtaus (l/s)
W	kuivaneliöpaino (kg/m^2)
y_c	kuivatussylinderin vaipan paksuussuuntainen koordinaatti (m)
Δy	paperin/kartongin kuivan kerroksen paksuus (m)
Y	paperin/kartongin paksuus (m)
z	rainan kosteus ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg k.a.}$)
z_0	rainan kosteus ennen puristinnippiä ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg k.a.}$)
z_{crit}	rainan kriittinen kosteus ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg k.a.}$)

Kreikkalaiset kirjaimet

α	massakohtainen vakio
α_{cp}	kontaktilämmönsiirtokerroin kuivatussylinderin pinnasta paperiin/kartonkiin ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
α_F	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin paperista/kartongista ilmaan ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
β	massakohtainen vakio
ϕ	aukko-osuus
γ	massakohtainen vakio
η	viskositeetti (Pa s)
φ	sorttioisotermistä saatava korjauskerroin
κ	Kozenyn vakio
λ_c	kuivatussylinderin seinämän lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
λ_p	paperin/kartongin efektiivinen lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

μ	dynaaminen viskositeetti (Pa s)
ν	veden kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)
ρ	tiheys (kg/m^3)
ρ_c	kuivatussyylinterin seinämän tiheys (kg/m^3)
ρ_{dp}	kuivan paperin/kartongin tiheys (kg/m^3)
ρ_w	veden tiheys (kg/m^3)

Lyhenteet

ACL	Aprosin ja muun ohjelman väliseen kommunikointiin tarkoitettu dynaaminen kirjasto (Apros Communication Library)
APMS	(Advanced Paper Mill Simulator) ks. Apros Paper
Apros Paper	Ohjelmisto teollisuusprosessien mallintamiseen ja dynamiseen simulointiin, entinen nimi APMS
Apros	Ohjelmisto teollisuusprosessien mallintamiseen ja dynamiseen simulointiin (Advanced PROcess Simulator)
CSF	Massan permeabiliteetin mittaustapa (Canadian Standard Free-ness)
CTMP	Kemihierre, kemikuumahierre (Chemi-ThermoMechanical Pulp)
EM	Mekanismi, jolla Aproxseen voidaan liittää käyttäjän omia laskentamalleja (External Model)
KA1	Stora Enso Oyj:n Kaukopään tehtaiden kartonkikone numero 1
KA2	Stora Enso Oyj:n Kaukopään tehtaiden kartonkikone numero 2
LWC	Kevyesti päällystetty painopaperi (Light Weight Coated)
OPC	Tiedonsiirtorajapinnan määrittelyspesifikaatio (OLE for Process Control)
SR	Massan permeabiliteetin mittaustapa (Schopper-Riegler)
TMP	Termomekaaninen massa, kuumahierre (ThermoMechanical Pulp)
WRV	Massan vedenpoistovastusta kuvaava suure (Water Resistance Value)

1. Johdanto

Simulointi tarkoittaa jonkin asian jäljittelemistä. Esimerkiksi tehdasprosessin olosuhteita voidaan simuloida laboratoriossa pienemmällä ja yksinkertaisemmalla laitteistolla. Tässä työssä tarkastellaan yksinomaan tietokonesimulointia, eli matemaattisten mallien ratkaisemista numeerisesti tietokoneen avulla. Prosessien matemaattisessa mallintamisessa prosessin ohjaus- ja ulostulosuureiden välinen yhteys pyritään kuvaamaan matemaattisesti. Dynaamisessa simuloinnissa kiinnostavien tilasuureiden arvot ratkaistaan ajan funktiona, eli edellinen tila vaikuttaa seuraavaan.

Simulointia käytetään tyypillisesti silloin, kun tarvittavia kokeita ei voida suorittaa oikealla prosessilla. Simuloimalla voidaan välttyä kalliilta tai vaarallisilta tehdaskokeilta, kun esimerkiksi suunnitellaan uudenlaista säätöstrategiaa tai ajotapaa. Joskus simuloimalla saadaan prosessista sellaista tietoa, jota ei edes voida mitata. Simuloimalla voidaan saavuttaa suuret kustannussäästöt prosessi- ja automaatio suunnittelussa. Staattinen simulointi yhdistää prosessin virtauskaavion suunnittelun ja taselaskennan. Erityisesti uusien prosessikonseptien suunnittelua voidaan nopeuttaa dynaamisella simuloinnilla merkittävästi, kun prosessi- ja säätöratkaisuiden toimivuus voidaan testata integroidusti. Uuden automaatio sovelluksen toiminnallisuus voidaan testata simulaattoria vastaan ennen järjestelmän liittämistä prosessiin. Perinteinen dynaamisen simulaattorin hyödyntämistapa on käyttöhenkilöstön koulutus ennen uuden tehtaan käynnistymistä. Simulointimallia voidaan käyttää myös tehtaalla apuna ongelmanratkaisussa tai päätöksenteon tukena.

Kymmenen viime vuoden aikana tietämys prosessisimuloinnista on selvästi lisääntynyt ja samalla sovellusten määrä sellu- ja paperiteollisuudessa on kasvanut. Monet seikat ovat vaikuttaneet simuloinnin yleistymiseen. Asiakslähtöisyyden korostuminen on johtanut pyrkimykseen kohti joustavampaa tuotantoa. Esimerkiksi paperikoneen lyhyeen kiertoon on suunniteltu aikaisempaa yksinkertaisempia prosessiratkaisuja. Ympäristönsuojelunäkökohdat ovat johtaneet tehtaiden vesi- ja kemikaalikiertojen asteittaiseen sulkemiseen. Näissä kehityspyrkimyksissä simulointi on tarjonnut edullisen tavan analysoida uusia ratkaisuja. Yritysten kansainvälistyminen ja sähköinen tiedonvälitys ovat parantaneet tiedonkulkua. Toisaalta simulointiin liittyvien työkalujen tarjonta on parantunut, simulointiohjelmistojen mallikirjastot ovat laajentuneet ja tarkentuneet sekä

graafiset käyttöliittymät kehittyneet. Tietokoneiden laskentakapasiteetti on kasvanut, ja ohjelmistojen kehitysympäristöt ovat parantuneet. Ohjelmistot ovat avoimempia, ja niiden liitettävyyden on parantunut.

Vaikka simuloinnin hyödyntäminen ei paperiteollisuudessa ole ollut yhtä aktiivista kuin esimerkiksi voimalaitosteollisuudessa, on markkinoilla useita kaupallisia simulointiohjelmistoja ja aiheesta on julkaistu paljon tutkimustietoa. Tämän tutkimuksen tavoitteena on koota kirjallisuudessa esitettyä tietoa paperiprosessien mallintamisesta ja simuloinnista. Luvussa 2 tutustutaan yleisellä tasolla dynaamisen simuloinnin taustaan, sovelluksiin ja työkaluihin sellu- ja paperiteollisuudessa. Luvussa 3 esitellään kirjallisuustietoa paperinvalmistuksen eri alueista ja ilmiöistä mallinnuksen näkökulmasta. Luvussa käsitellään massasulpun koostumuksen kuvaamista, virtausominaisuuksia, sekoittumista, jauhatusta ja puhdistusta sekä vedenpoistoa paperikoneen viiraosalla, märkäpuristuksessa ja kuivatusosalla. Myös laatusuureiden simulointia käsitellään lyhyesti. Käsiteltävä paperiteknikan alue rajautuu työn kokeellisessa osassa mallinnettavan kohdeprosessin laitteisiin, operaatioihin ja ilmiöihin.

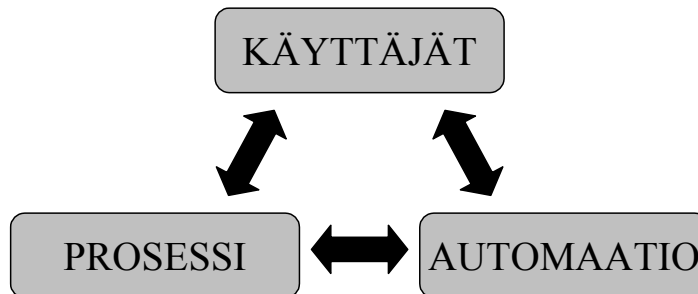
Kokeellisessa osassa esitellään kokemuksia laajan prosessialueen kattavan dynaamisen mallin rakentamisesta. Esimerkkinä olevan kolmikerroksisen kartonkikoneen mallinnus alkaa jauhatuksen syöttösäiliöiltä ja kattaa prosessin kuivatusosan ensimmäiselle mittaraamille asti. Mallin laajuudesta huolimatta simuloinnille on asetettu vaatimus vähintään reaaliaikaisesta laskentanopeudesta. Työssä rajoitutaankin tarkastelemaan paikan suhteen yhteen suuntaan diskretoituja malleja.

Kokeellisen osan aluksi, luvussa 4, esitellään työssä käytettyä Aprosimulointiympäristöä. Luvussa 5 kuvataan kohdekoneen mallinnuksessa käytettyjä menetelmiä, yhtälöitä ja lähtötietoja sekä verrataan simulointituloksia mittaus-tuloksiin. Luvussa 6 esitellään simulointimallin hyödyntämistä lajinvaihtoauto-maation virittämiseen sekä uudentyyppisen kuivaimen lisäämisen tutkimiseen. Työn lopuksi, Luvussa 7 tehdään yhteenveto, arvioidaan mallinnuksessa käytettyä lähestymistapaa ja pohditaan tulevaisuuden kehittämismahdollisuuksia ja sovelluskohteita.

2. Dynaaminen simulointi sellu- ja paperiteollisuudessa

2.1 Prosessidynamiikka

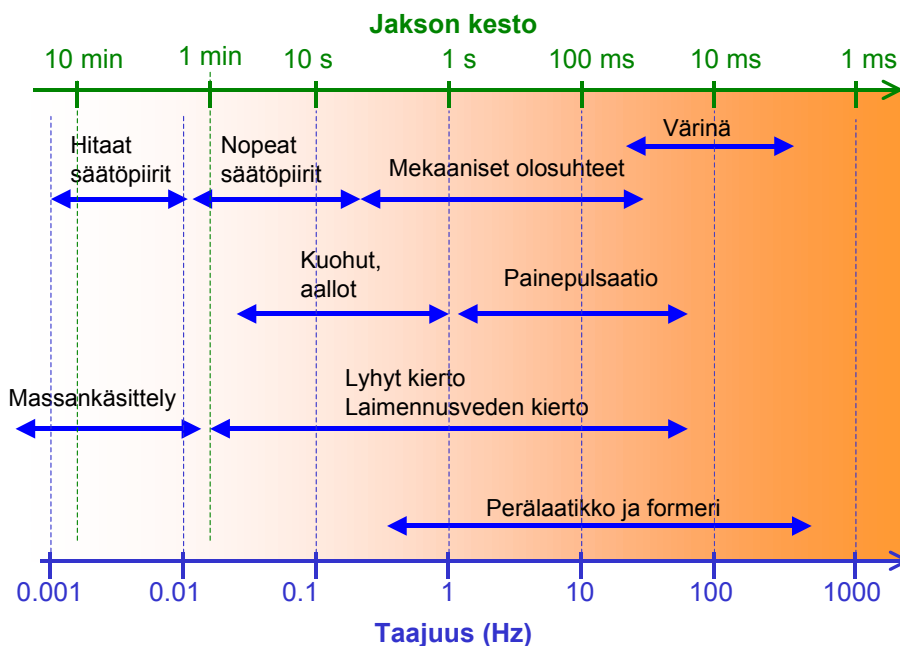
Prosessin dynaamiseen kokonaiskäyttäytymiseen vaikuttavat monet tekijät kuvan 1 mukaisesti. Tuotantolaitteisto määrää perusaikavakiot, eli sen, miten nopeasti muutokset prosessissa voivat tapahtua, mutta myös automaatiolla on merkittävä osuus dynaamisessa käyttäytymisessä. Esimerkiksi lajinvaihtoon kuluva aika riippuu paitsi prosessilaitteiston fyysisistä mitoista myös siitä, kuinka hyvin automaatio on viritetty hoitamaan omat osatehtävänsä. Nykyaikaisissa pitkälle automatisoiduissa tehtaissakin on lisäksi käsin tehtäviä ohjaustoimenpiteitä, kuten monet keskeiset tuotantoon ja laatuun liittyvät ohjaukset. Myös käyttäjät ovat siten olennainen osa tuotantoprosessin kokonaiskäyttäytymisessä.



Kuva 1. Tuotantoprosessin dynaaminen kokonaiskäyttäytyminen muodostuu prosessin, automaation ja käyttöhenkilöstön yhteistoiminnan tuloksena.

Paperinvalmistusprosessin dynamiikan moninaisuutta havainnollistaa oheinen kuva 2, jossa Cutshall (1997) on eritellyt paperin neliöpainosta mitattuja eritaajuisia häiriöitä ja niiden aiheuttajia. Nopeimmat värähtelyt, joiden jakson kesto on luokkaa 10 ms, aiheutuvat mekaanisista värähtelyistä perälaatikon lähestymisjärjestelmän putkistoissa ja laitteissa sekä hydraulisesta pulsaatiosta perälaatikossa ja formerissa. Hitaimmat värähtelyt ovat jakson kestoiltaan minuuttien tai jopa kymmenien minuuttien pituisia. Hidasta värähtelyä syntyy esimerkiksi peräkkäisten sakeussäätöpiirien ja säiliöiden yhteisvaikutuksesta.

Simuloinnin kannalta kiinnostavin taajuusalue on yleensä prosessin ohjauksessa käytetty alue. Tämän alueen ulkopuolella jää korkeataajuisia dynaamisia ilmiöitä, kuten mekaanista värähtelyä sekä hyvin hitaita ilmiöitä, kuten kulumista ja korroosiota. On muistettava, että jos dynaamisessa järjestelmässä on eripituisia aikavakioita, joudutaan simuloinnin aika-askel valitsemaan malliin sisällytetyistä ilmiöistä nopeimman mukaan. Toisaalta dynaamisessa simuloinnissa voidaan käyttää myös staattisia malleja osana kokonaisuutta, jos kuvattava tapahtuma on niin nopea, että sen dynamiikalla ei ole kokonaisuutta käyttötarkoituksen kannalta merkitystä.



Kuva 2. Paperinvalmistusprosessille ominaisia taajuuksia (Cutshall 1997).

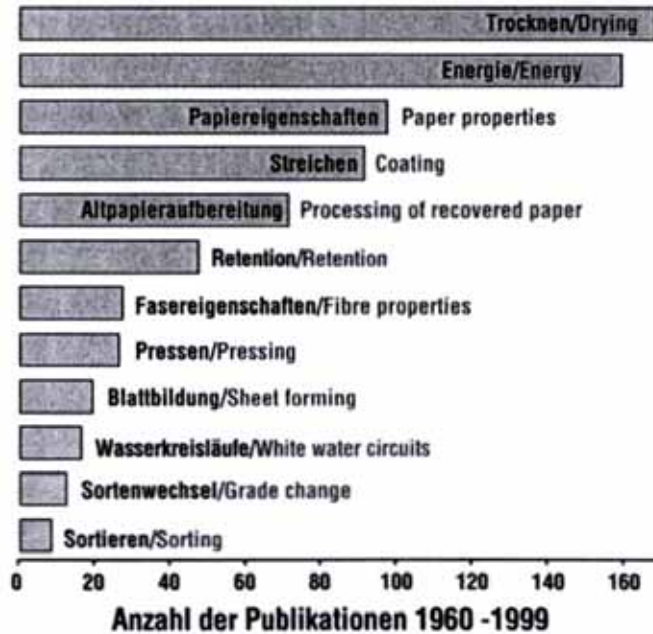
2.2 Simulointitutkimukset tietokoneen avulla

Tietokonesimulointia on tutkittu ja sovellettu siitä lähtien, kun tietokoneista tuli laskennan apuvälineitä. Tietokoneiden tehon kasvu ja yleistymisen hintojen halpenemisen myötä kasvattivat myös simuloinnin käyttöä. Julkaistujen simulointitutkimusten perusteella voidaan sanoa, että sellu- ja paperiteollisuudessa kiinnostus simulointia kohtaan kasvoi erityisesti 1980-luvulla.

Katsaus Kanadassa vuonna 1988 pidettyyn sellu- ja paperiteollisuuden simulointikonferenssiin antaa hyvän yleiskuvan tilanteesta 15 vuotta sitten: Kaupallisia simulointityökaluja oli tarjolla ja niiden kehittäminen oli aktiivista. Kaikki nykyiset simuloinnin käyttökohteet oli tiedostettu. Koulutussimulaattoreista oltiin hyvin kiinnostuneita. Petersin (1988) mukaan sellu- ja paperiteollisuuden koulutussimulaattoreita oli tuolloin yli 30 kappaletta Pohjois-Amerikassa. Domtar oli yksi ensimmäisistä sellu- tai paperitehtaista, jotka kouluttivat henkilöstöään digitaalisessa tietokoneessa toimivalla simulaattorilla. Vuonna 1986 käyttöön otettu simulaattori kattoi laajan prosessialueen: Kamyrr-keittimen, valkaisu-laitoksen, haihduttamon, soodakattilan, kaustisoinnin, meesauunin ja paperikoneen märän ja kuivan pään (Peters 1988). Yhtenä syynä koulutussimulaattoreista kiinnostumiseen oli siirtyminen analogisista automaatiojärjestelmistä digitaalisiin. Simulaattorikoulutus nähtiin hyväksi tavaksi selviytyä tästä suuresta muutoksesta.

Wasik (2002) raportoi Kanadassa tehdystä kartoituksesta, jossa selvitettiin simuloinnin käyttöä sellu- ja paperiteollisuudessa. Otoksena oli 65 simulointiprojektia neljän vuoden ajalta. Kaksi kolmasosaa projekteista tehtiin konsulttien toimesta ja kolmannes teollisuusyritysten omin voimin. Dynaamista simulointia käytettiin 17 % projekteista. Lisäksi aineisto oli jaettu energian käytön tehostamista tutkiviin ja toisaalta muuta prosessia tutkiviin projekteihin, jolloin prosenttiluvut olivat vastaavasti 37 ja 63. Wasik ennusti, että paperitehtaiden vähenyneen insinöörikunnan vuoksi konsulttityön osuus tulee pysymään korkealla. Dynaamisen simuloinnin osuuden hän arvioi nousevan, samoin kuin energiasovellusten, joissa simulointiin sijoitetun investoinnin on todettu kannattavan erityisen hyvin.

Kuvassa 3 on esitetty PIRA- ja PTS Paperitech -tietokantojen perusteella laadittu jakauma siitä, miltä aihealueilta paperiteknikassa on julkaistu simulointiartikkeleita (Kappen 2002). Kuivatusta ja muuta energiavirtojen simulointia käsittelevät tutkimukset ovat olleet selvästi yleisimpiä.



Kuva 3. Paperiteknikan alueelta julkaistujen (PIRA- ja PTS Papertech) simulointi-aiheisten tutkimusten jakautuminen eri aihealueille (Kappen 2002).

Simulointiteknikan kaupallisten markkinoiden voidaan todeta olevan suhteellisen pienet. Kappenin (2002) mukaan asiantuntijoiden (ARC Advisory Group) esittämä arvio liikevaihdosta vuonna 2000 oli 8,8 miljoonaa USA:n dollaria. Paperiteollisuuden osuus tästä oli vain 2,5 %. Toisaalta simulointiteknikan markkinoiden kasvuennuste oli paperiteknikassa korkeampi (16 %) kuin muilla teollisuuden aloilla.

Tekesin julkaisemassa matemaattisen mallintamisen ja simuloinnin teknologia-katsauksessa (Klemola ja Turunen 2001) arvioidaan erilaisten simulointityökalujen käytön yleisyyttä Suomessa. Yleisesti mainitaan, että prosessiteollisuus, yliopistot ja tutkimuslaitokset käyttävät dynaamisia simulaattoreita laajasti, ja että sellu- ja paperiteollisuudessa näitä työkaluja käytetään paljon. Toisaalta mainitaan, että mallinnusta ja simulointia ei hyödynnetä niin laajasti kuin mitä voitaisiin.

Suomessa sellu- ja paperiprosessien dynaamista mallinnusta ja simulointia on tutkittu ja kehitetty lähinnä yliopisto- ja tutkimuslaitosympäristössä. Tässä työs-

sä käytetyn Apros Paper -ohjelman (aiemmin APMS) kehitystyön lisäksi aiheeseen on panostettu merkittävästi ainakin Tampereen teknillisessä yliopistossa ja KCL:ssä. Tampereella Kaunonen (1983) kehitti diplomityössään lyhyen kierron simulaattorin (Kaunonen 1983) ja työtä jatkettiin PAHAPA-projektissa (TTKK 1988). KCL:ssä on pitkät perinteet prosessianalyysien tekemisestä ja tarkoitukseen on kehitetty KCL-WEDGE-ohjelmisto (Klemola ja Turunen 2001), jonka yhteyteen on kehitetty dynaaminen simulaattori (Piipponen 1996).

2.3 Simulointityökalut

Tietokonesimuloinnin käyttöönoton alkuaajoista lähtien modulaaristen simulointiohjelmistojen kehitys on nähty keskeiseksi tavoitteeksi. Toinen simulointiohjelmien tarjoajien tavoite on 1980-luvulta lähtien ollut entistä helppokäyttöisempien graafisten käyttöliittymien kehittäminen. Sekä ohjelmien modulaarisuus että helppokäyttöisyys ovat alentaneet merkittävästi simulaattoreiden rakentamis- ja hyödyntämiskustannuksia ja edesauttaneet simulointitekniikan yleistä käyttöönottoa.

Merkillepantavaa simulointityökalujen kehityksessä on kuitenkin se, että kymmenen vuotta sitten markkinoilla olleesta noin kahdestakymmenestä simulaattorista (Rantakokko 1993) lähes kaikki ovat poistuneet markkinoilta. Aikoinaan yleistyneimmistä mutta nykyään käytöstä poistuneista ohjelmista voidaan esimerkkeinä mainita ohjelmat FlowCalc, MAPPS ja MASSBAL (Wasik 2002). Toisaalta ohjelmia on sulautettu toisiinsa, ja ne ovat muuttaneet nimeä, kuten GEMS, joka tunnetaan nykyään nimellä WinGEMS.

Wasik (2002) mainitsee seuraavat tällä hetkellä saatavissa olevat sellu- ja paperiprosessien simulointiin soveltuvat ohjelmat: WinGEMS, Flowmac, PulpSim, APMS, IDEAS ja CADSIM Plus™. APMS eli Apros Paper esitellään tarkemmin luvussa 4. PulpSim on suomalainen, erityisesti selluprosessien simulointiin erikoistunut staattinen simulaattori (Klemola ja Turunen 2001). Myös VTT:llä kehitetty Balas on suomalainen paperi- ja selluprosessien simulointiin soveltuva staattinen simulaattori.

IDEAS on amerikkalainen simulointiohjelmisto, joka tarjoaa käyttäjälle eri tarkkuustasoja riippuen simulointisovelluksen luonteesta: taselaskenta, tankki- ja

viivedynamiikka tai paine-virtaus-ratkaisu (IDEAS 2003). IDEAS-simulaattoria on käytetty erityisesti laajojen koulutussimulaattoreiden rakentamiseen. IDEAS Kodiak on erillinen simulaattoriversio, joka mahdollistaa raaka-ainekomponentteihin liitettävien ominaisuuksien kuljettamisen virtausverkossa (Shirt ja Manness 1999).

Kanadalaisen Aurel Systemsin kehittämä CADSIM Plus™ on sekventiaaliseen laskentaan perustuva simulaattori, jossa on mahdollisuus tarvittaessa ratkaista virtaukset myös paineiden perusteella. Simulaattori mahdollistaa myös taselaskennan. Mallikomponentit on toteutettu dynaamisesti linkattuina kirjastoina ja lähdekoodi on avointa käyttäjille (CADSIM 2003).

Amerikkalainen Pacific Simulation edustaa WinGEMS-simulaattoria, joka on yrityksen omien verkkosivujen mukaan laajimmalle levinnyt sellu- ja paperiprosesseihin erikoistunut simulaattori (WinGEMS 2003). WinGEMS on lähinnä tarkoitettu staattiseen simulointiin, mutta malleihin on mahdollista liittää myös dynaamisia piirteitä. Myös ruotsalaisen Papermacin kehittämä Flowmac soveltuu sekä taselaskentaan että yksinkertaiseen dynaamiseen laskentaan (Flowmac 2003).

Yllä mainituista simulaattoreista IDEAS ja Flowmac on kehitetty yleiskäyttöisen simulointialustan, Extendin päälle (Extend 2003). Muista yleiskäyttöisistä simulointiohjelmistoista erityisesti MATLAB®-ympäristössä toimiva Simulink® on yleistynyt nopeasti. Sen vahvana puolena on monipuoliset mahdollisuudet muun muassa datankäsittelyyn, säätösuunnitteluun ja tulosten visualisointiin. Puutteena on valmiiden kirjastoitujen prosessimallien ja aineominaisuuslaskennan puuttuminen. Toisaalta ratkaisuksi tähän ongelmaan on kehitetty MATLAB® Simulink®-ympäristöä laskentamoottorinaan käyttäviä sellu- ja paperiprosessien simulointiin räätälöityjä ohjelmia, kuten KCL-WEDGE Propose (Piipponen 1996).

Myös jotkut automaatiojärjestelmien toimittajat kehittävät simulointiohjelmia ja tarjoavat simulointipalveluita, esimerkiksi koulutussimulaattoreiden rakentamista (Lindberg et al. 1999).

3. Paperinvalmistusprosessien matemaattinen mallinnus

3.1 Massasulpun koostumuksen kuvaaminen

Paperinvalmistus sisältää dynaamisen simuloinnin kannalta kaksi hyvin erityyppistä prosessialuetta: prosessin alkupäässä kuidut ja muut kiintoaineet ovat vesisuspensiossa painegradienttien liikuteltavina, loppupäässä ne ovat tiukasti toisiinsa sitoutuneena kuitumattona eli rainana, jota kuljetetaan eteenpäin telojen avulla joko viiralla tuettuna tai vapaassa vedossa. On luontevaa kuvata raaka-aineen koostuminen eri komponenteista samalla tavalla molemmissa alueissa.

Valmiin paperin tai kartongin sisältämä kuiva-aine on peräisin monesta eri lähteestä eri puolelta prosessia. Yksinkertaisimmillaan massa voidaan määritellä koostumaan vedestä ja kuiva-aineesta. Tällöin kaikki erityyppiset kuidut sekä lisä- ja täyteaineet käsitellään yhtenä komponenttina. Tämä riittää moneen käyttötarkoitukseen, jos valtaosa valmistettavan tuotteen kuiva-aineesta on kuitua, jonka voidaan olettaa käyttäytyvän samalla tavalla riippumatta sen syntyhistoriasta. Tosin esimerkiksi raaka-ainereseptien vaihtamisen dynamiikkaa ei tällöin voida tarkastella.

Tyypillistä paperikonetta mallinnettaessa on veden ja kuitujen lisäksi huomioitava myös täyteaine. Jotkut paperilajit sisältävät täyteainetta jopa 35 % kuiva-aineesta. Täyteaine vaikuttaa paperin laatuominaisuuksiin ja hintaan, joten sen pitoisuuden mittaaminen ja säätäminen on tärkeää. Täyteaine myös käyttäytyy prosessissa eri tavalla kuin kuitu. Kuitua pienempien ja pallomaisten täyteainepartikkeleiden retentio viiraosalla on selvästi huonompi kuin pitkulaisilla kuiduilla. Täyteaineet, kuten CaCO_3 , voivat myös liueta veteen ja saostua muualla prosessissa mm. pH:sta riippuen.

Jos kuituraaka-aine jaetaan toisistaan eroaviin osiin, voidaan asiaa lähestyä kahdella tapaa. Erottavana tekijänä voidaan pitää

- kuidun valmistustapaa
- kuidun ominaisuuksia, kuten pituutta.

Valmistustavan mukaan jaottelussa esimerkiksi koivusellu käsitellään omana komponenttinaan, havusellu omanaan ja TMP-massa omanaan. Selkeästi erilainen lähestymistapa on jaotella kuitumassa fraktioihin kuidun pituuden mukaan. Yli-Fossi et al. (2002a) raportoivat ensimmäisestä dynaamisesta simulointimallista, jossa tämä on tehty laajaan mittausarjaan perustuen. He jakoivat massan kuuteen komponenttiin: vesi, kuidusta peräisin oleva hienoaine, lyhyet kuidut, pitkät kuidut sekä kaksi erityyppistä täyteainejaetta. Kohteena olevalta nykyaikaiselta hienopaperikoneelta kerättiin lähes kahdestakymmenestä näytestä kolme näytesarjaa, joiden sakeus, tuhkasakeus, kuidunpituusjakauma ja hienoainepitoisuus analysoitiin. Lisäksi automaatiojärjestelmän kautta kerättiin suuri määrä mittausdataa samalta ajanjaksolta. Mittaustulosten perusteella koneesta tehdyn Apros-mallin reunapisteiden massakoostumus ja erotuskertoimet sihdeissä, pyörrepuhdistimilla ja viiralla voitiin määrittää. Esimerkkisimulointeina Yli-Fossi et al. (2002b) esittävät hyllyn määrän muutoksen vaikutusta ja retention muutoksen vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin.

Massakoostumuksen määrittelemisen kuidunpituusjakaumaan perustuen antaa mahdollisuuksia tarkentaa simulointimalleja ja analysoida prosessin käyttäytymistä entistä kattavammin. Pituusjakauma vaikuttaa esimerkiksi retention ja vedenpoistoon, mutta erityisesti monien laatuominaisuuksien mallintamisessa vaikutus on keskeinen. Kuidunpituuden vaikutuksen huomioivien mallien kehittäminen tulee helpottumaan huomattavasti, kun pituusjakaumatiedon mittaaminen prosessista on-line yleistyy.

Kuidunpituusjakauman vaikutusta voidaan huomioida karkeasti ottamalla yksi tai useampi erityisen merkittävistä fraktioista malliin. Simulointimalleissa usein käytetty tapa on jakaa kuituperäinen raaka-aine kuituun ja hienoaineeseen. Hienoaineen osuudella on osoitettu joissain tapauksissa, esimerkiksi viiraosan vedenpoistossa, olevan hyvin merkittävä vaikutus (Wildfong et al. 2000a ja 2000b).

Lisä- ja apuaineita voidaan helposti käsitellä omina komponentteinaan simulointimallissa. Massataseen kannalta niillä ei ole juurikaan merkitystä, mutta niillä voi olla merkittävä välillinen vaikutus: esimerkiksi retentioaineen vaikutus täyteaineen retentoitumiseen. Lisä- ja apuaineiden vaikutusten kattava kvantitatiivinen mallintaminen käytännön prosessiolosuhteissa on haastava tehtävä. Laa-

jan mittausaineiston avulla kone- ja lajikohtaisten mallien identifioiminen on mahdollista.

Massasulpun ilmapitoisuus on tärkeä muuttuja erityisesti paperikoneen määrässä päässä. Liian suuri ilmapitoisuus muun muassa heikentää paperin laatua ja huonontaa viiraosan vedenpoistokykyä (Matula ja Kukkamäki 2000). Simuloinnin kannalta ilma on hankalampi käsitellä kuin kiintoaineet. Ilma voi olla massasulpussa liuenneena tai kuplamaisena. Sen massaosuus on hyvin pieni ja vaikutus prosessissa riippuu tilavuusosuudesta, joka taas riippuu muun muassa paineesta ja käytetyistä kemikaaleista. Esimerkiksi konemassassa on tyypillisesti 1–2 tilavuusprosenttia kuplamaista ilmaa, 1–2 % liuennutta ilmaa ja kokonaisilmamäärä on 2,5–4 % (Matula ja Kukkamäki 2000).

Shirt (1997) raportoi väitöskirjatutkimuksessaan dynaamisesta lyhyen kierron simulointimallista, jossa huomioitiin myös prosessin kemiallisia ilmiöitä. Mallissa laskettiin rinnakkain prosessimallin kanssa retentiopolymeerin adsorptiota kuitujen pintaan, flokkien syntymistä, sekä adsorptoituneiden polymeerien deaktivoitumista. Shirt myös esitteli mallin kykyä ennustaa retentiota ja vedenpoistoa oikeansuuntaisesti mittaustuloksiin vertaamalla. Yleensä kemiallisia reaktioita ei ole huomioitu paperinvalmistusprosessien dynaamisessa simuloinnissa. On paljon simulointisovelluksia, joissa reaktioiden merkitys ei ole keskeinen. Toisaalta paperikoneen määrän pään kemian alueella on selkeitä puutteita tietämyksen ja sopivien työkalujen suhteen. Niinpä esimerkiksi viiraosan retentioon ja vedenpoistoon liittyvän kemian mallintaminen on yleensä jätetty täysin huomiotta tai käytetty kokeellisesti saatuja korrelaatioita.

3.2 Massasulpun virtausominaisuuksien laskenta

Massasulpun reologia on monimutkaista ja edelleenkin osin tuntematonta. Kerekes (1996) kuvailee, että syy kuitususpension virtausominaisuuksien ainutlaatuisuuteen on lähinnä kuitujen keskinäisten kontaktien suuri lukumäärä. Kun kuitujen lukumäärä kasvaa, kuitujen liike toistensa suhteen estyy ensin osittain ja lopulta kokonaan. Massasulpun reologia ja virtausominaisuudet eroavat huomattavasti newtonisten nesteiden ominaisuuksista. Erityisesti matalilla virtausnopeuksilla ja korkeilla sakeuksilla virtaavan massan painehäviö eroaa selvästi veden vastaavasta.

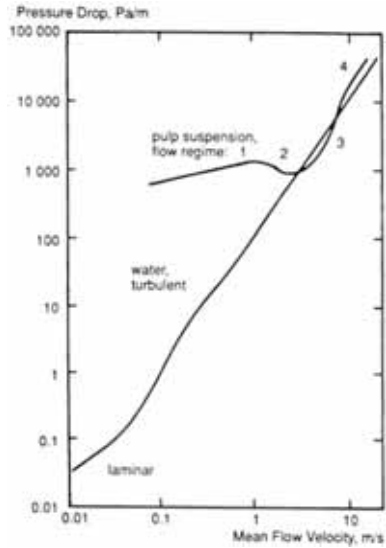
Useissa teollisuuden kiintoaine-vesiseoksissa partikkelin koko ja muoto voidaan suhteellisen helposti karakterisoida ja kirjallisuudessa on esitelty menetelmiä tällaisten ei-newtonisten fluidien painehäviön laskemiseen. Massasulpun vastaanlainen karakterisointi on vaikeaa, kun partikkeleina ovat epäsymmetriset, eripituiset kuidut. Kuidut esiintyvät vapaina partikkeleina vain hyvin laimeissa liuoksissa, niin sanotun rajasakeuden alapuolella. Lehtinen et al. (1983) esittivät rajasakeudelle tyypillisiä arvoja seuraavasti: kuusi- ja mäntymassat 0,2–0,4 %, koivumassat 0,3–0,4 % ja hioke 0,6–0,9 %.

Duffy (2000) kuvailee sakenevaa massasulppua seuraavasti: Kun liuoksen sakeus nousee, alkaa muodostua keskenään erikokoisia kuitukimppuja. Ne muodostuvat ja hajoavat helposti. Kun sakeus edelleen kasvaa, alkaa muodostua keskenään hieman enemmän samankaltaisia kuitukimppuja, joita sanotaan flokeiksi. Ne voivat muodostaa keskenään flokkikimppuja. Vielä korkeammassa sakeudessa muodostuu kestäviä kuituverkkoja, jotka valtaavat koko astian tilavuuden. Havupuumassalle kuituverkko on stabiili ja faasierottumista ei tapahdu, kun ylitetään noin yhden prosentin sakeus.

Putkessa virtaavan massasulpun painehäviöön on havaittu vaikuttavan seuraavat tekijät (Duffy ja Titchener 1974):

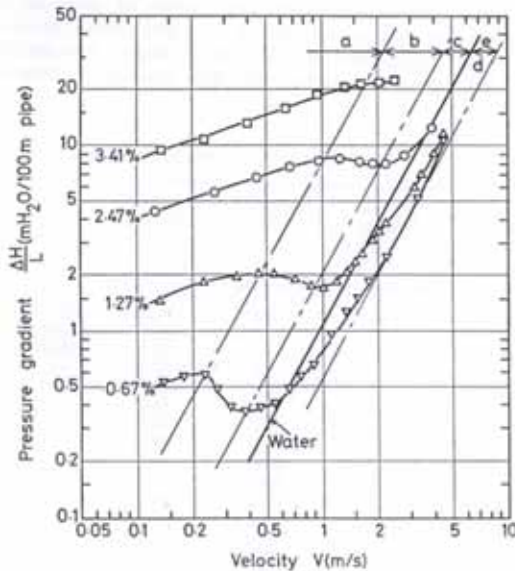
- sakeus
- virtausnopeus
- putken halkaisija
- putken sisäpinnan karheus
- massatyypit (puulaji, kuidunvalmistustapa, kuivatus ja uudelleensulputus, jauhatuste jne.)
- kuidun pituus/paksuus-suhde
- ilmapitoisuus keskisakeilla massoilla
- lisä- ja täyteainepitoisuus.

Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen esimerkki massasulpun virtauksen painehäviöstä keskimääräisen virtausnopeuden funktiona logaritmisilla asteikoilla. Esimerkkikuva on kemialliselle massalle noin neljän prosentin sakeudessa ja halkaisijaltaan 100 mm putkessa. Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty vastaava käyrä puhtaalle vedelle.



Kuva 4. Tyypillinen esimerkki massasulpun virtauksen painehäviöstä keskimääräisen virtausnopeuden funktiona (Myréen 1989a).

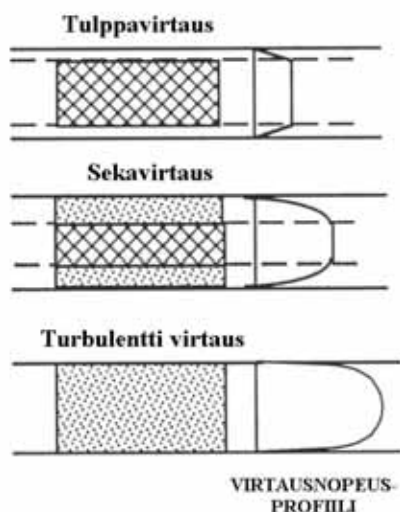
Painehäviökäyrän muoto vaihtelee riippuen sakeudesta, massatyypistä ja muista edellä mainituista seikoista. Kuvassa 5 on esitetty Mollerin ja Normanin (1975) julkaisemat painehäviökäyrät valkaisuainemassalle (CSF 695, lämpötila 19 °C) neljässä eri sakeudessa.



Kuva 5. Valkaisemattomalle sulfaattimassalle mitattuja painehäviökäyriä virtausnopeuden funktiona (Moller ja Norman 1975).

Pienen virtausnopeuden alueella (n. 0,1 m/s) havaitaan painehäviökäyrän loppuminen, sillä putkessa vallitsevan paine-eron on ylitettävä kuituverkoston aiheuttama leikkausvoima, ennen kuin virtaus lähtee liikkeelle. Usein massasulpun liikkumista verrataan tässä vaiheessa kiinteän kappaleen liikkumiseen. Painehäviö on lähes riippumaton virtausnopeudesta. Nopeuden kasvaessa putken reunamille syntyy vesikerros. Tässä vaiheessa on esitetty tapahtuvan myös niin sanottua rullanmuodostumista, kun irronneet kuidut muodostavat höyryjä tai rullia putkiseinän ja kuituverkoston välille (Lehtinen et al. 1983). Kun rullanmuodostus loppuu ja kuituverkoston ja putken seinämän väliin syntyy lähes kuituista vapaa vesikerros, siirrytään alueelle, jota kutsutaan tulppavirtausalueeksi. Kun kuitujen kosketus seinämän kanssa vähenee ja loppuu lähes kokonaan, alenee painehäviö (kohta 2 kuvassa 4) niin, että se useilla massoilla leikkaa puhtaan veden vastaavan käyrän. Nopeuden edelleen kasvaessa tulpan keskiosat pysyvät yhdessä, mutta putken seinämällä oleva rajakerros kasvaa ja siihen irtoaa kuituja keskiosan tulpasta. Virtausaluetta kutsutaan sekavirtaukseksi. Edelleen nopeuden kasvaessa siirrytään turbulentin virtauksen alueelle. Kuva 6 havainnollistaa massasulpun käyttäytymistä putkessa eri virtausnopeusalueilla (Norman 1992).

Putkessa virtaavan massasulpun painehäviön laskemiseksi ei ole pystytty kehittämään tarkkaa ja kattavaa lähestymistapaa. Kirjallisuudessa on kuitenkin esitetty erilaisia lähestymistapoja ongelman ratkaisemiseksi. Esimerkiksi Myrén esitti tavan, jolla voidaan laskea koko virtausnopeusalue kahdessa osassa: pienet virtausnopeudet ja toisaalta tulppa- ja turbulenssivirtausalue (Myrén 1989a ja 1989b). Duffy (2000) on kritisoinut joidenkin esitettyjen mallien pätevyyttä ja varoittanut luokittelemasta massasulppua mihinkään tunnettuun reologiseen luokkaan.



Kuva 6. Periaatekuva massasulpun käyttäytymisestä putkessa eri virtausnopeusalueilla (Norman 1992).

Prosessisuunnittelussa massasulpun virtausnopeuden normaalialueen on raportoitu olevan 0,3–2,4 m/s (Duffy ja Titchener 1974). Kun massan kulkuviirettä putkissa lasketaan, käytetään yleensä tulppavirtausoletusta. Painehäviöiden laskemisessa käytetään kokeellisia korrelaatioita. Ehkä yleisimmin käytetty empiirinen malli on seuraavaa muotoa (Duffy ja Titchener 1974):

$$\frac{\Delta p}{L} = K_1 \cdot u^\alpha \cdot c^\beta \cdot D^\gamma \quad (1)$$

missä

$\Delta p/L$	on	painehäviö (m vesipatsasta / 100 m putkea)
u		massasulpun virtausnopeus (m/s)
c		massasulpun sakeus (%)
D		putken sisähalkaisija (mm)
$K_1, \alpha, \beta, \gamma$		massasulppukohtaisia vakioita

Duffy (2000) pitää yhtälöä edelleen käyttökelpoisena virtausnopeuksille, jotka ovat pienempiä kuin painehäviökäyrän paikallisen maksimikohdan (alue 1 kuvassa 4) nopeus. Duffy (1976) on koontanut raportoituja massakohtaisia vakioita ja esittänyt tyypilliselle pitkäkuituiselle sulfaattimassalle arvot: $K_1 = 11,75$, $\alpha = 0,31$, $\beta = 1,81$ ja $\gamma = -1,34$.

Duffy (2000) suosittelee myös teoreettisesti johdettua mallia, joka muistuttaa suuresti yllä olevaa kokeellista yhtälöä. Malli pätee myös painehäviökäyrän paikallisen maksimin ja minimin välisellä alueella (alue 2 kuvassa 4) ja selittää suhteellisen tarkasti myös lämpötilan vaikutuksen painehäviöön:

$$\frac{\Delta p}{L} = K_2 \cdot \mu^{1/3} \cdot u^{0,33} \cdot c^{1,85} \cdot D^{-1,33} \quad (2)$$

missä

K_2	on	massakohtainen vakio
μ		dynaaminen viskositeetti (Pa s)

Moller ja Duffy (1978) määrittivät useita eri massoja käyttäen kokeelliset kaavat virtausnopeuden ala- ja ylärajalle alueella, missä painehäviö pienenee virtausnopeuden kasvaessa:

$$u_{\min} = 1,22 \cdot c^{1,40} \quad (3)$$

$$u_{\max} = 5,1 \cdot c - 1,5 \quad (4)$$

missä

u_{\min}	on	minimivirtausnopeus (m/s)
u_{\max}		maksimivirtausnopeus (m/s)

TAPPI (TAPPI 1981) julkaisi massasulpun virtauksen painehäviön määrittämiseksi yleisen suunnitteluohjeiston, joka perustuu edellä mainittuihin kokeellisiin korrelaatioihin. Myrénin (1989a) mukaan ohjeistoa käytetään teollisuudessa yleisesti putkihalkaisijoiden ja pumppujen mitoituksessa. Pumppuvalmistajilla on myös omia laskentamenetelmiä ja -ohjelmia käytössä. TAPPI (1985) on julkaissut myös professori Duffyn kokoaman katsauksen, jossa kirjallisuudessa esitettyjä painehäviölaskennan menetelmiä esitellään ja evaluoidaan.

Yleensä sellu- ja paperiteollisuudessa putket ovat paljon tyypillistä flokkikokoa suurempia ja putkeen syntyy tulppa yhteen liittyneistä flokeista. Kun putken koko pienenee – Duffy ja Abdullah (2002) antavat arvion 20 mm halkaisijan raja-arvoksi – tulee flokkien välinen vuorovaikutus ja sidosvoima merkitykselliseksi ja virtauksen sisäinen muoto muuttuu. He vertasivat tuloksia suuremman putken tapaukseen ja havaitsivat selkeän eron virtauskäyttäytymisessä. Pienemässä putkessa virtaus muistuttaa lähemmin veden käyttäytymistä. Duffy ja Abdullah (2002) selittävät syyksi putken seinämälle syntyvän vesikerroksen stabiiliuden hyvin erilaisilla virtausnopeuksilla, myös sakeuden ollessa yli yhden prosentin.

Moller ja Norman (1975) tutkivat virtauksen rauhoittumista äkillisen virtauskanavan muutoksen, esimerkiksi putken mutkan tai venttiilien jälkeen. He havaitsivat, että virtauksen täydellinen rauhoittuminen vaati matkan, joka vastaa noin 80 putken halkaisijaa. Vielreicher et al. (1993) osoittivat, että putkistoissa syntyy hystereesistä, sillä virtauksen kiihdytys- ja hidastustilanteissa painehäviökäyttäytyminen eroaa merkittävästi staattisesta tilanteesta. Ilma on usein mukana kolmantena faasina, mikä edelleen monimutkaistaa reologista käyttäytymistä. Laimeissa sakeuksissa ilmapitoisuuden merkityksen massan virtausominaisuuksiin on kuitenkin todettu olevan pieni. Vaikka monissa paperilajeissa on merkittävä täyteainepitoisuus, ei täyteaineen merkityksestä massasulpun virtauskäyttäytymiselle ole julkaistu kvantitatiivista tutkimustietoa.

Hammarström et al. (2003) esittivät äskettäin uuden lähestymistavan massasulpun virtauskäyttäytymisen laskemiseen. He kehittivät kaupallisen CFD-laskentaohjelman osaksi mallin, jolla pystytään laskemaan putkessa virtaavan massasulpun painehäviökäyriä lähtien pienistä virtausnopeuksista aina painehäviökäyrän paikalliseen minimiin, josta alkaa turbulентinen virtaus. Virtaus ratkaistaan kaksidimensionaalisenä käyttäen aksiaalisuuntaista symmetriaa.

Yleisen kirjallisuudessa vallitsevan käsityksen vastaisesti mallinnus onnistui hyvin käyttäen homogeenista fluidimallia. Malli sovitettiin kirjallisuudesta haetulla yhden putkikoon (halkaisija 4 tuumaa) ja neljän eri sakeuden (1,51–3,51%) mittausdatalla. Tämän jälkeen mallin ennustukset vastasivat hyvin myös pienemmillä putkilla (2 ja 3 tuumaa) suoritettuja mittauksia.

3.3 Massasäiliöt ja sekoittuminen

3.3.1 Sekoittuminen massasäiliöissä

Aario ja Kosonen (1983) listaavat massasäiliöiden tehtävät sellu- ja paperitehtaissa seuraavasti:

- massan määrävaihteluiden tasaaminen
- massan laatuvariaatioiden tasaaminen
- eri massojen ja lisäaineiden sekoittaminen
- pumppaussäiliönä toimiminen.

Säiliöiden realistinen kuvaaminen on tärkeää, sillä ne tuovat hyvin merkittävän osan paperikoneen lähestymisjärjestelmän dynamiikasta. Sekoittumista on tutkittu merkkiainekokein ja viime aikoina myös CFD-laskennalla. Mittaukset ja laskentatulokset ovat säiliö- ja sekoitinkohtaisia, ja niistä on vaikea yleistää yksityiskohtaisia malleja yksidimensioiseen laskentaan. Toisaalta tyypillisessä processisimulointisovelluksessa saavutetaan riittävä tarkkuus suhteellisen yksinkertaisillakin malleilla.

Yleinen tapa säiliöiden mallintamisessa on olettaa sekoitus ideaaliseksi. Pienissä ja tehokkaasti sekoitetuissa isommissakin säiliöissä oletus on hyvä. Suuret ja sekoittamattomat säiliöt voidaan kuvata yhdistelemällä useita ideaalisekoitustilavuuksia ja mahdollisesti myös tulppavirtausosuuksia keskenään. Esimerkiksi massatorni voidaan mallintaa riittävällä tarkkuudella useimpiin käyttötarkoituksiin niin, että tornin yläosa kuvataan tulppavirtausalueena ja sen alapuolinen laimennusvyöhyke ideaalisekoittimena (Tseng et al. 1997). Sopivan mallirakenteen valitsemisessa auttaa, jos on käytettävissä mittaustietoa säiliön viipymäaika- ja jakaumasta.

3.3.2 Ylivuotovirtausten laskeminen

Paperinvalmistusprosesseissa käytetään ylivuotoja säiliöistä toiseen. Ratkaisulla halutaan tyypillisesti vakioida ylivuotavan säiliön pinta niin, että muodostuu vakio hydrostaattinen paine siitä pumppaavan pumpun imupuolelle (esim. kone-säiliö). Ylivuotovirtauksen laskemisesta on esitetty paljon yksityiskohtaista tietoa standardeissa ISO 1438-1 ja ISO 4374. Laskentakaavat perustuvat puhtaalla vedellä tehtyihin mittauksiin. Ylivuotokaavat ovat yleisesti muotoa:

$$\dot{V}_{OF} = k_{OF} \cdot h_{OF}^{3/2} \quad (5)$$

missä

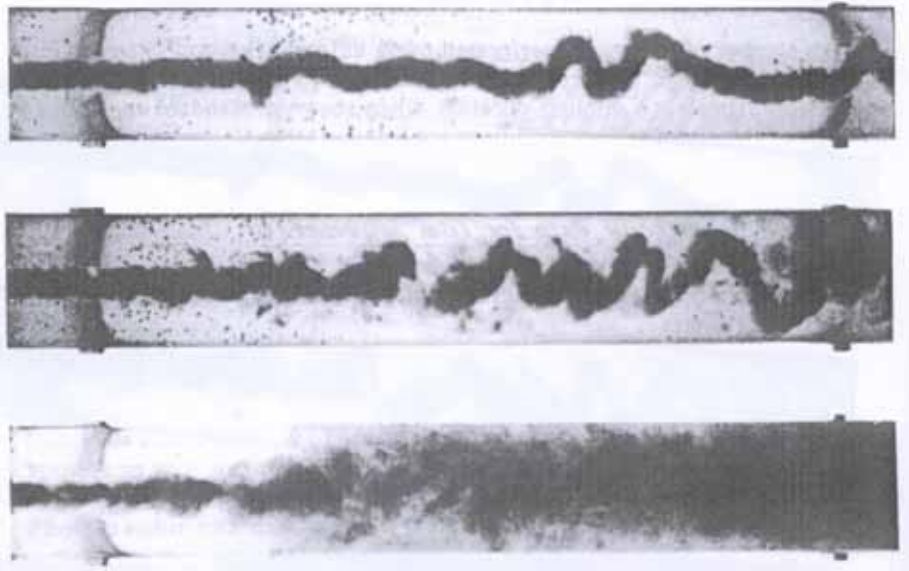
\dot{V}_{OF} on ylivuotovirtaus (l/s)
 k_{OF} virtauskanavan dimensioista ja muodosta riippuva parametri
 h_{OF} ylivuotokorkeuden ylittävä pinnankorkeus (m)

Mainituissa standardeissa parametri k_{OF} lasketaan erimuotoisille virtauskanaville määritetyillä kokeellisilla yhtälöillä.

3.3.3 Sekoittuminen putkien yhdistymispisteissä

Paperin- ja kartonginvalmistusprosessissa on useita paikkoja, joissa eri sakeudessa olevia virtauksia yhdistetään. Yhdistämispisteissä sekoittuminen ei ole täydellistä, eli ne ovat yksi sakeushäiriöiden lähde. Esimerkki tärkeästä sekoituspisteistä on konemassan ja viirakaivosta otettavan laimennusveden yhdistäminen viirakaivon sekoituskartiassa.

Normanin ja Tegengrenin (1988) tutkimusten perusteella sekoittuvien virtausten nopeuksien absoluuttinen taso ei niinkään ole merkitsevä, vaan virtausnopeuksien keskinäinen suhde. Tutkimuksessa syötettiin putkessa virtaavan veden keskelle 4,1 % havupuusellumassaa erilaisilla massan ja veden välisillä virtausnopeussuhteilla. Kuvan 7 valokuvissa vasemmalta suihkutettava massa näkyy tummempana aineena. Hyvä sekoittuminen vaatii Normanin ja Tegengrenin tulosten mukaan nopeussuhteen, johon ei käytännössä yleensä päästä.

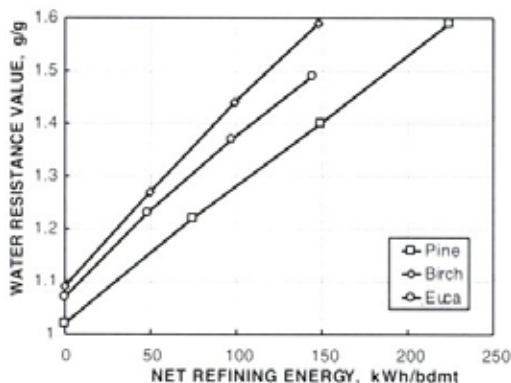


Kuva 7. Valokuvia massasulpun ja puhtaan veden sekoittumisesta virtausnopeussuhteilla 1,5; 5,3 ja 10,8 (Norman ja Tegengren 1988).

3.4 Jauhatuksen vaikutusten huomioiminen

Jauhatuksen tärkein tehtävä on parantaa kuitujen sitoutumiskykyä. Jauhatuksen vaikutukset voidaan havaita massan vedenpoisto-ominaisuuksissa ja monissa paperin laatusuureissa (Lumiainen 2000).

Jauhatus vaikeuttaa veden poistumista massasta, mikä voidaan havaita paperikoneen viira-, puristin- ja kuivatusosalla. Kuvassa 8 on esitetty jauhatuksen vaikutusta vedenpoistoon WRV-arvon avulla (water resistance value).



Kuva 8. Jauhatusenergian kasvattaminen lisää massan vedenpoiston vastusta (Lumiainen 2000).

Lumiainen (2000) esittelee neljä jauhatusta kuvaavaa teoriaa, joista tunnetuin ja laajimmin käytössä oleva on ominaissärmäkuormateoria. Siinä kahdella termillä kuvataan massan saama jauhatusefekti. Jauhatuksen määrä kuvataan ominaisenergiankulutuksella (kWh/t) ja jauhatuksen luonnetta kuvaa ominaissärmäkuorma (J/m tai Ws/m).

Kun mallinnetaan jauhatuksen vaikutusta paperin laatuun, joudutaan tukeutumaan tapauskohtaiseen mittaustietoon. Eri tavoin jauhetusta massasta voidaan valmistaa käsiarkkeja ja tutkia niiden laatuominaisuuksia. Menetelmällä saadaan perustietoa, mutta tuloksilla ei voida suoraan ennustaa paperikoneella valmistetun paperin laatua. Toinen lähestymistapa on identifioida tuotannon-aikaisista prosessi- ja laatumittauksista (mukaan lukien laboratoriomittaukset) tilastollinen laatumalli (esim. Hämäläinen et al. 1997).

3.5 Erotusoperaatioiden toiminnan kuvaaminen

Sekä mekaanisen että kemiallisen massanvalmistuksen yhteydessä massaa pestään ja lajitellaan tehokkaasti, jolloin paperi- tai kartonkitehtaalle tuleva massa on melko puhdasta. Lyhyessä kierrossa olevat erotusoperaatiot, painesihdit ja pyörrepuhdistimet, ovatkin viimeinen varmistus siitä, että perälaatikolle menevä massa ei sisällä paperinvalmistukseen kuulumattomia partikkeleita, kuten hiekanjyviä tai tikkuja. Laitteistot on suunniteltu ja rakennettu niin, että lopullinen

kuitutappio rejektiin on hyvin pieni. Puhdistuslaitteissa syntyvät viiveet ja painehäviöt ovatkin dynaamisessa mallissa vähintään yhtä tärkeitä kuin laitteiden erotteluominaisuuksien kuvaaminen.

3.5.1 Konesihtti

Konesihdin erotteleva toiminta perustuu lieriönmuotoiseen sihtilevyyn, jossa on reikiä tai rakoja. Sihdin sisällä pyörii roottori, joka voi olla sylinterimäinen tai varustettu sykesiivillä. Syöttö tapahtuu joko tangentiaalisesti tai aksiaalisesti lieriöön nähden. Weise et al. (2000) mukaan konesihdin tehtävinä on

- suojella koneen märkää päätä vierailta partikkeleilta
- poistaa tikkuja ja likaa
- hajottaa kuituflokkeja ja parantaa näin paperin tai kartongin formaatiota.

Sihdin akseptivirran paine alenee sen kulkiessa sihtirummun reikien tai rakojen lävitse. Toisaalta sihdin sisällä pyörivä roottori saa aikaan paineen nousun. Riippuukin muun muassa syöttötavasta ja roottorin tyypistä, syntyykö poistovirtoihin positiivinen vai negatiivinen paine-ero syöttövirran paineeseen nähden. Sihti vaimentaa tehokkaasti kaikkia syöttövirran painesykkeitä, joskin se itse aiheuttaa siipitaajuudella esiintyvän painepulseerauksen (Gustafsson et al. 1983).

Konesihtti toimii paineen alaisena ja täysin nesteestä täyttyneenä, ja se voidaan mallintaa hydraulisena virtausverkkona käyttäen putkihaaraa ja putkia, joissa on sopiva virtausvastus. Khanbaghi et al. (2001) esittivät tällä periaatteella johdetun sihtimallin. He vertasivat simulointituloksia mittauksiin ja osoittavat mallin toiminnan vastaavan hyvin todellisuutta.

Sihdin päätehtävää lyhyessä kierrossa, epäpuhtauksien poistamista, voidaan kuvata erottelutehokkuudella E_R :

$$E_R = \frac{\text{epäpuhtauksien määrä rejektissä}}{\text{epäpuhtauksien määrä syötössä}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Nelson (1981) esitti erottelutehokkuudelle seuraavan yhtälön, jota on paljon käytetty teollisuudessa:

$$E_R = \frac{RR_m}{1 - Q_s + Q_s RR_m} \quad (7)$$

missä

Q_s on laitekohtainen parametri

Parametri Q_s kuvaa sihtityypille ominaista lajittelutehokkuutta. Tapaus $Q_s = 0$ vastaa sihtiä, jolla ei ole lajittelukykyä ja tapaus $Q_s = 1$ vastaavasti sihtiä, joka lajittelee epäpuhtaudet täydellisesti.

Jos mallinnetaan epäpuhtauksien lajittelutehokkuutta puhdistuslaitteessa, on tehokkuus määriteltävä erilaisille epäpuhtausryhmille erikseen (Gustafsson et al. 1983). Yksityiskohtaisen mallin laatiminen vaatisi hyvin laajoja mittaussarjoja kohdekoneella, jotta kaikki roskien lajit ja erilaisten prosessiolosuhteiden vaikutus katettaisiin. Simulointimallissa yksittäisten roskien sijaan epäpuhtaudet pitäisi määritellä massaosuuksina mallin reunaehdoissa, jolloin kyseinen pitoisuus kuvaa roskatodennäköisyyttä eri kohdissa prosessia. Toisaalta massan puhdistaminen lyhyen kierron pyörrepuhdistuslaitoksessa ja konesihdeissä on käytännössä vain varmuustoimenpide. Tyypillisessä simulointisovelluksessa epäpuhtauksien erottelutehokkuuden kuvaaminen ei ole keskeistä. Tutkimuksessa on viime aikoina pyritty erityisesti selvittämään sitä, miten sihdin eri rakenteelliset ja toiminnalliset parametrit vaikuttavat sisään menevän massasulpun jakautumiseen aksepti- ja rejektivirtojen kesken.

Samantyyppisiä sihtejä kuin lyhyessä kierrossa on puhdistajina, käytetään myös lajittelutarkoitukseen. Ämmälä (2001) on väitöskirjatyössään tutkinut lajittelua painesihdillä. Lajittelulla pyritään siihen, että hyvin heterogeenisestä kuitumassasta saadaan parhaat osat erilleen, jolloin huonompien osien ominaisuuksia voidaan edelleen jalostaa. Näin raaka-ainetta voidaan hyödyntää entistä tehokkaammin. Painesihdin lajittelututkimuksista saatavaa tietoa voidaan hyödyntää lyhyen kierron mallinnuksessakin, ainakin kvalitatiivisessa mielessä.

Sihtien toimintapisteen kuvaamiseen käytetään yleisesti tilavuus- ja massa-rejektisuhdetta (Ämmälä 2001). Tilavuusrejektisuhde RR_v määritellään rejekti- ja syöttövirran suhteena:

$$RR_V = \frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_F} \quad (8)$$

missä

\dot{V}_R on rejektivirran tilavuusvirtaus (l/s)
 \dot{V}_F syöttövirran tilavuusvirtaus (l/s)

Massarejektisuhde RR_m määritellään vastaavasti kuiva-aineen massavirtausten suhteena:

$$RR_m = \frac{c_R \dot{V}_R}{c_F \dot{V}_F} \quad (9)$$

missä

c_R on rejektivirran sakeus (%)
 c_F syöttövirran sakeus (%)

Kolmas yleisesti käytetty sihdin toimintaa kuvaava suure on rejektin sakeutumiskerros RTF :

$$RTF = \frac{RR_m}{RR_V} = \frac{c_R}{c_F} \quad (10)$$

Gooding ja Kerekes (1992) tutkivat sihdin rejektivirran sakeutumista. He käyttivät apuna läpäisysuhdetta P :

$$P = \frac{c_a}{c_u} \quad (11)$$

missä

c_a on sakeus sihtireiän akseptipuolella (%)
 c_u sakeus sihtireiän ylävirran puolella (%)

Gooding ja Kerekes (1992) johtivat rejektin sakeutumiskertoimelle kaksi yhtälöä eri oletuksilla massan virtaustavasta, kun se etenee syöttöaukosta sihtilieriön

suuntaisesti osittain akseptoituen ja jäljelle jäänyt rejektoituen. Tulppavirtaus-
tapauksessa oletetaan, että virtaus on täydellisesti sekoittunut radiaalisesti, mutta
ei sekoitu aksiaalisuunnassa. Tällöin rejektin sakeutumiskertoimeksi saadaan:

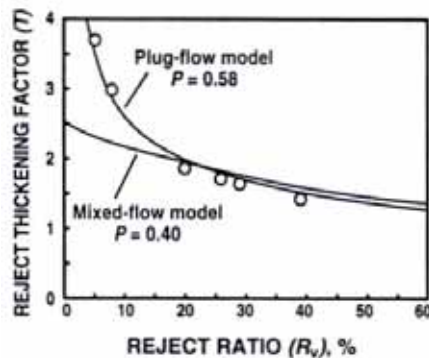
$$RTF = RR_V^{(P-1)} \quad (12)$$

Jos oletetaan, että virtaus sekoittuu myös aksiaalisuunnassa, saadaan:

$$RTF = \frac{1}{P - RR_V P + RR_V} \quad (13)$$

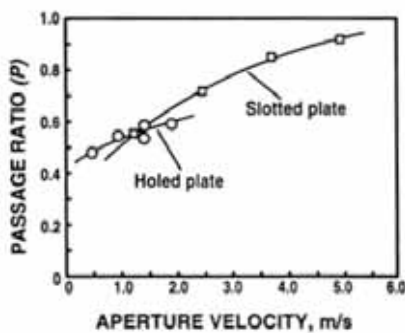
Gooding ja Kerekes (1992) viittasivat artikkelissaan tutkimuksiin, joiden mu-
kaan läpäisyysuhde riippuu massan nopeudesta ennen sihtirummun rakoa (tai
reikää) ja nopeudesta itse raossa. Näistä ensimmäinen voidaan olettaa vakioksi
tietyllä roottorin pyörimisnopeudella, ja jälkimmäinen riippuu suoraan aksepti-
virran suuruudesta. Läpäisyysuhteeseen vaikuttavat myös lajiteltavan massan
ominaisuudet ja lajittimen tyyppi.

Gooding ja Kerekes (1992) sovittivat molempia sakeutumiskertoimen malleja
Papricanin pilottilaitoksella tehtyihin mittauksiin. Käytetyssä sihdissä oli umpi-
nainen sylinterimäinen roottori. He havaitsivat, että tulppavirtausoletukseen
perustuva malli selittää mittauksia parhaiten. Kuva 9 esittää tuloksen, jossa mo-
lemmat mallit on sovitettu reitetyllä sihtirummulla saatuihin mittauksiin. Sama
tulos toistui myös raolla varustetulla sihtirummulla.

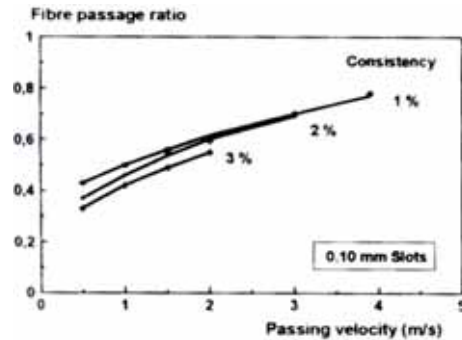


Kuva 9. Rejektin sakeutumiskerroin tilavuusrejektisuhteen funktiona (Gooding ja Kerekes 1992).

Goodingin ja Kerekesin (1992) mukaan läpäisysuhde oli sovittava uudestaan, kun akseptivirtausta muutettiin. Myös massan sakeus vaikutti läpäisysuhteen arvoon, joka pieneni sakeamman massan tapauksessa. Gooding ja Kerekes (1992) laskivat mittauksille keskimääräisen nopeuden, jolla fluidi läpäisee reiän tai raon. He esittivät läpäisysuhteen kehittymisen tämän läpäisynopeuden funktiona kuvan 10 mukaisesti. Kun tiedetään mallinnettavan sihdin reikien tai rakojen kokonaisala ja akseptivirtauksen suuruus, voidaan kuvan 10 datan ja yhtälön 12 avulla laskea sihdissä tapahtuva rejektin sakeutuminen. Syöttösakeuden vaikutusta tämä laskentatapa ei kuitenkaan huomioi.



Kuva 10. Läpäisysuhde keskimääräisen reiän/raon läpäisynopeuden funktiona (Gooding ja Kerekes 1992).



Kuva 11. Läpäisysuhde keskimääräisen raon läpäisynopeuden funktiona eri sakeuksissa (Julien Saint Amand ja Perrin 1998).

Julien Saint Amand ja Perrin (1998) esittivät mittaustuloksia sakeuden vaikutuksesta läpäisysuhteeseen kuvan 11 mukaisesti. Kuvan mittaukset on tehty kemiallisella massalla. He mainitsevat, että TMP-massalla sakeuden vaikutus on suurempi. Julien Saint Amand ja Perrin (1998 ja 1999) tutkivat myös roottorin tyyppin, raon leveyden ja läpäisynopeuden sekä massatyyppin vaikutusta sekä läpäisysuhteeseen että epäpuhtauksien poistokykyyn. He osoittivat, että kuidun käyttäytyminen sihdissä riippuu ensisijaisesti kuidun pituus-, paksuus- ja jäykkyydjakaumasta. Taipuisat kemialliset kuidut ovat sihtikäsittelyn kannalta helpompia kuin mekaanisten massojen jäykät ja paksut kuidut. Raon leveydellä on vaikutusta läpäisysuhteeseen, eli tietyllä läpäisynopeudella läpäisysuhde kasvaa, kun raon leveyttä kasvatetaan. Myös sihdin roottorin tyyppillä on selkeä vaikutus. Kuvien 10 ja 11 data soveltuukin vain kyseisen sihtirummun (tietynkokoiset reiät tai raot) ja roottorityypin mallintamiseen, ja tarkkaan ottaen vain tutkittua

massaa käytettäessä. Toisaalta Vollmer et al. (2001) päätyivät tutkimuksessaan tulokseen, että sihdin lajitteluominaisuudet voidaan karakterisoida yhdellä massalla ja tulosta voidaan soveltaa muiden massatyypin lajittelun ennustamiseen samalla sihdillä.

Julien Saint Amand ja Perrin (1998) tähdentävät, että tulppavirtausoletuksen tai sekoittuneen virtauksen oletuksen pitävyys riippuu roottorityypistä. Tulppavirtausoletus soveltuu suljetuille sylinterimäisille roottoreille ja sekoittunut virtaus foilityypisille roottoreille. Lisäksi Julien Saint Amand ja Perrin huomauttavat, että edellä mainitut rejektin sakeutumiskertoimen laskemiseen tarkoitettut yhtälöt 12 ja 13 soveltuvat vain homogeenisista partikkeleista muodostuneelle massalle, eli käytännössä vain tietylle kuidunpituusluokalle. Esimerkiksi täyteaineet ja hienoaineet pitäisi käsitellä erikseen. Niillä ei ole Julien Saint Amandin ja Perrinin (1998) mukaan ole vaikutusta lajittelussa, ja niiden läpäisyosuuteksi voidaan olettaa yksi. He painottavat, että erityisesti moniportaista lajittelua tarkasteltaessa massa olisi jaettava homogeenisiin kuitu- ja roska- luokkiin. Julien Saint Amand ja Perrin (1998) myös esittävät oman lähestymistapansa lajittelun mallintamiseen perustuen partikkelien todennäköisyyksiin läpäistä sihtirummun reikä tai rako.

Ämmälä (2001) tutki kokeellisesti, kuinka TMP-massan eri kuitufraktiot erottuvat painesihdissä. Hän havaitsi, että tietyllä sihtilevyn tyypillä kunkin fraktion erottuminen riippuu lähes yksinomaan massa- ja tilavuusrejektisuhteista. Hienoaineen kulkeutumista selittää parhaiten tilavuusrejektisuhte, kun taas varsinaiset kuitufraktiot riippuvat enemmän massarejektisuhteesta.

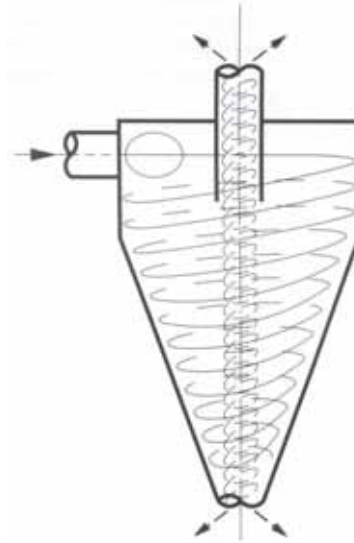
Myös Olson (2001) on tutkinut painesihtien toimintaa lajittelun näkökulmasta ja esittää tuloksia eripituisten kuitujen jakautumisesta. Hän vertaa mittaustuloksia myös kehittämänsä mallin laskemiin tuloksiin. Olsonin läpäisyosuuden laskevalla mallilla voidaan ennustaa rejektisuhteen, raon leveyden, sihtipinnan muotoilun ja raon läpäisy nopeuden vaikutusta lajittumiseen ja sakeusmuutoksiin. Friesen et al. (2002) esittivät konkreettisen käyttötavan sihtien lajittelukykyä ennustaville malleille. He demonstroivat, kuinka sihtimallilla laskettuja tuloksia ja numeerista optimointia käyttäen voidaan suunnitella kulloisetkin puhdistus- ja lajittelukriteerit täyttyviä sihtilaitoksia. Tutkimuksessa vertailtiin erilaisten (reiät/raot) ja eri tavoin keskenään kytkettyjen sihtien (1–3 kappaletta) maksimaalista lajittelukykyä tilavuusrejektisuhteen funktiona. Vertailtavana lajittelukykyyn mittarina

käytettiin muuttujaa, joka kuvaa suhteellisesti, kuinka hyvin lyhyet kuidut poistuvat rejektivirrasta ja pitkät kuidut kerääntyvät rejektivirtaan.

3.5.2 Pyörrepuhdistin

Pyörrepuhdistimia käytetään raskaiden kuidun kokoisten tai pienempien partikkeleiden poistamiseen massasta. Tällaisia partikkeleita ovat muun muassa hiekka, tikut ja pihka (Weise et al. 2000).

Kuvassa 12 on esitetty tyypillisen paperikoneella käytettävän myötävirta-tyyppisen puhdistussyklonin toimintaperiaate. Yläosasta tangentiaalisesti sisään tuleva fluidi lähtee pyörimään syklonin sisäseinää ympäri ja raskaat partikkelit rikastuvat seinämävirtaukseen. Virtaus jatkaa spiraalirataa alaspäin kohti kapeenevan kartion pohjassa olevaa poistoaukkoa, jonne osa virrasta (rejekti) poistuu vieden raskaat partikkelit mukanaan. Alaosassa pääosa virrasta kääntyy poikkipinnan pienenemisen vaikutuksesta ja alkaa nousta ylöspäin kohti syklonin yläosassa olevaa poistoaukkoa (aksepti).



Kuva 12. Periaatekuva virtauksesta pyörrepuhdistussyklonissa (Weise et al. 2000).

Jotta pyörrepuhdistin toimisi optimitehokkuusalueella, täytyy rejektin osuuden olla 15–25 % syötön määrästä. Massan joukossa epäpuhtauksia on kuitenkin alle

1 %. Siksi pyörrepuhdistuslaitos koostuu useasta portaasta (Gustafsson et al. 1983). Kussakin portaassa on vaihteleva määrä puhdistussykloneita. Yhden syklonin kapasiteetti on suhteellisen pieni, mistä syystä syöttö jaetaan useaan rinnakkaiseen sykloniin. Mitä pienempi syklonin halkaisija on, sitä tehokkaampaa on raskaiden epäpuhtauksien poistotehokkuus, mutta vastaavasti sitä pienempi on hydraulinen kapasiteetti (Weise et al. 2000). Ensimmäisessä portaassa, joka käsittelee koko puhdistettavaa tilavuusvirtaa, sykloneita on tyypillisesti useita kymmeniä kappaleita.

Pyörrepuhdistuslaitoksen dynaamisen mallin kehittämisessä on ratkaistava, miten kuvataan massan eri komponenttien erottuminen pyörrepuhdistusportaissa ja painehäviöt pyörrepuhdistusportaan syötön ja akseptin sekä rejektin välillä. Pyörrepuhdistuslaitoksen rakenteesta syntyy moniiviveytkentä, joka auttaa vaimentamaan perälaatikkoa kohti kulkevia sakeushäiriöitä. Mallinnuksessa on syytä varoa yksinkertaistamasta laitoksen rakennetta liikaa, jotta vastaava vaimennus saadaan aikaan simulaattorissa.

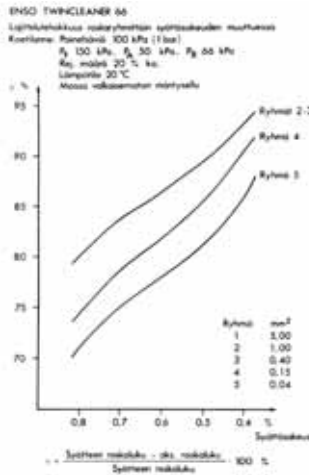
Pyörrepuhdistusportaan paine-eroon ja rejektivirran sakeutumiseen vaikuttavat Weise et al. (2000) mukaan puhdistimen rakenne sekä seuraavat operointimuuttujat:

- syötön määrä ja paine
- ala- ja ylävirran virtausmäärien suhde
- syöttösakeus
- rejektipuolen vastapaine.

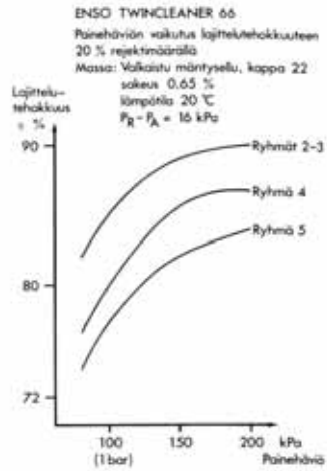
Koska pyörrepuhdistuslaitoksen operointi perustuu pitkälle sopivien paineerojen ylläpitämiseen, on painemittauksia eri portaiden syötöistä sekä aksepti- ja rejektityhteistä yleensä hyvin saatavissa tehtailta. Painehäviöiden tarkka mallintaminen on näin ollen mahdollista, kun prosessin eri toiminta-alueilta kerätään dataa.

Kuvat 13 ja 14 valaisevat pyörrepuhdistussyklonien toimintaa lajittelutehokkuuden kannalta. Roskien lajittelutehokkuus kasvaa, kun syötön ja akseptin painehäviö kasvaa ja toisaalta, kun syötön sakeus alenee. Erotteluominaisuuksien mallintamisessa on sama ongelma kuin sihtien tapauksessa, eli epäpuhtauksien lajittelutehokkuus (yhtälö 6) olisi määritettävä erilaisille epäpuhtausryhmille

erikseen (Gustafsson et al. 1983). Laajoja mittaussarjoja vaativa malli pätisi lisäksi vain tietyille syklonin geometrialle.



Kuva 13. Pyörrepuhdistimen lajittelu-
tehokkuus syöttösäkeuden funktiona
(Gustafsson et al. 1983).



Kuva 14. Pyörrepuhdistimen lajittelu-
tehokkuus syötön ja rejektin välisen
painehäviön funktiona (Gustafsson et al.
1983).

Kuten edellä sihtien tapauksessa myös pyörrepuhdistimien mallintamisessa on otettava kantaa siihen, miten erotusoperaatio vaikuttaa itse massasulpun koostumukseen. Yksiselitteisiä yhtälöitä esimerkiksi rejektivirran sakeutumisen laske-
miseksi ei ole kehitetty. Kvalitatiivista tietoa pyörrepuhdistimen toiminnasta on
saatavilla. On esimerkiksi luonnollista, että kuitua raskaampia täyteaineita rikas-
tuu rejektivirtaan (Weise et al. 2000). Erottuminen määräytyy pitkälle syklonin
rakenteesta, mutta myös massan kehänopeudesta sen sisällä, jolloin laitteen yli
oleva paine-ero vaikuttaa erottumiseen ja sitä kautta rejektivirran sakeutumiseen.
Tätä selventää kuva 15.

ENSO TWINCLEANER 66

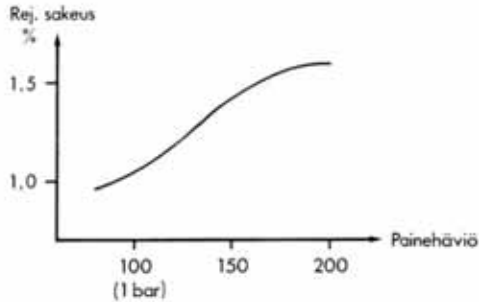
Rejektin sakeuden muutos painehäviön muuttuessa, rej. määrä 20 %

Massa: Valkaistu mäntysellu, kappa 22

sakeus 0,65 %

lämpötila 20 °C

$P_R - P_A = 16 \text{ kPa}$



Kuva 15. Rejektin sakeus syötön ja akseptin paine-eron funktiona (Gustafsson et al. 1983).

Pyörrepuhdistuksen ilmiöistä on äskettäin julkaistu uusia tutkimuksia. Vollmerin et al. (2001) tulokset vahvistivat jo aiemmin tunnetun seikan, että kuidun ominaispinta-alalla on erottelussa suuri vaikutus. He eivät tutkimuksessaan löytäneet tapaa karakterisoida sykklonia niin, että tietyn laitteen erottelukykyä voitaisiin kuvata riippumatta kuitutyypistä. Pyörrepuhdistussykloni olisi siis karakterisoi-tava erikseen kullekin kuitutyypille.

Fluidin ja partikkelien virtausta ja erottumista sykklonissa on tutkittu myös CFD-mallinnuksen avulla. Statie et al. (2002) esittävät kirjallisuuskatsauksen aiheesta ja raportoivat uusia laskentatuloksia. He kuvaavat kuidut epäsäännöllisinä sylinterimäisinä partikkeleina ja tutkivat erottumista kuidun eri ominaisuuksien funk-tiona. Tutkittuja ominaisuuksia olivat tiheys, halkaisija, pituus, karheus, omi-naistilavuus ja muoto. Menetelmä mahdollistaa minkä tahansa sykkloni-geometrian tutkimisen eri virtausnopeuksilla ja erilaisilla partikkeleilla. Onkin mahdollista, että esitetty lähestymistapa vie puhdistussyklonien lajitteluominaisuuksien mallintamista nopeasti eteenpäin. Statie et al. (2002) painottavat kui-tenkin, että erottuminen sykklonissa osoittautui hyvin riippuvaiseksi kuidun omi-naisuuksista, mikä asettaa suuret vaatimukset itse kuitujen karakterisoinnille vastaavissa simulointitutkimuksissa.

3.6 Perälaatikon mallinnus

Perälaatikko levittää lähestymisputkistosta tulevan massan viiran levyiseksi taiseksi matoksi. Massa on pumpattava perälaatikkoon sopivalla paineella, jotta se kiihtyy huuliaukosta purkautuessaan lähelle viiran nopeutta. Nopeuksien suhdetta kutsutaan suihku/viira-suhteeksi tai lyhyemmin suihkusuhteeksi. Kun huuliaukon leveys ja säädettävissä oleva korkeus tunnetaan, voidaan huulisuihkun nopeus määrittää teoreettisesti Bernoullin yhtälöstä:

$$p + \frac{\rho}{2} u^2 + \rho gh + U = \text{vakio} \quad (14)$$

missä

p	on	paine (Pa)
ρ		tiheys (kg/m ³)
u		virtausnopeus (m/s)
g		putoamiskiihtyvyyys (m/s ²)
h		korkeus (m)
U		sisäenergia (J)

Sisäenergia kasvaa, kun osa mekaanisesta energiasta muuttuu lämmöksi. Tämä voidaan käytännössä kuitenkin jättää huomiotta. Ennen viiralle iskeytymistään huulisuihku kuroutuu ilmassa, jolloin sen nopeus kasvaa. Tämä voidaan huomioida mallinnuksessa kuroumakertoimen k_{con} avulla:

$$k_{con} = \frac{u_{teor}}{u_{tod}} \quad (15)$$

missä

u_{teor}	on	teoreettinen virtausnopeus (m/s)
u_{tod}		todellinen virtausnopeus (m/s)

Suihkusuhteen säätö antaa asetusarvon perän paineen säädölle, joka ohjaa peränsyöttöpumpun kierrosnopeutta. Jos huuliaukkoa avataan, kasvaa virtausmäärä viiralle. Peränsyöttöpumppu ottaa kasvaneen virtausmäärän viirakaivosta. Kun konemassan virtaus ei muutu, laimenee perälaatikolle menevä massa. Perä-

laatikolla onkin keskeinen asema lyhyen kierron sekä paine-virtaus- että sakeuskäyttäytymisessä.

Erityyppisten perälaatikoiden mallintamisesta löytyy useita esimerkkejä kirjallisuudesta. Virtanen (1988) esitteli ilmatyynyperälaatikon mallia osana lyhyen kierron simulaattoria (ks. myös TTKK 1988). Mallin ennustukset vastasivat mittauksia hyvin esimerkissä, jossa perälaatikon syöttöpumpun kierrosnopeuteen tehtiin askelmuutos ja tarkasteltiin vastetta perän paineeseen, pinnankorkeuteen ja ylijooksun pinnankorkeuteen. Simulaattorin käyttökohteista mainittiin muun muassa perälaatikon säätöstrategioiden suunnittelu ja säätöjen viritys.

Tuladhar et al. (1997) tutkivat tuotantokoneella havaitun koneensuuntaisen neliöpainovaihtelun syitä. He mallinsivat ilmatyynyperälaatikon neljällä epälineaarilla differentiaaliyhtälöllä. Käyttäen simulaattoria ja tehtaalta kerättyä mittausaineistoa apunaan he analysoivat perälaatikon painepulseerausongelmaa ja esittivät ratkaisuksi monimuuttujasäädön käyttöä. Simuloinneilla havainnollistettiin, että malliprediktiivinen säätöalgoritmi kykenee poistamaan perälaatikon paineen ja pinnankorkeuden väliset ristikkäisvaikutukset hyvin.

Nissinen et al. (2000) esittivät kokemuksia ja tuloksia laimennusperälaatikon mallinnuksesta. Apros-ympäristössä toteutetussa mallissa on huomioitu myös paperikoneen poikkisuunta, mikä mahdollistaa simulaattorin hyödyntämisen poikkisuuntaisten säätöjen kehittämisessä.

3.7 Rainauksen ja vedenpoiston kuvaaminen

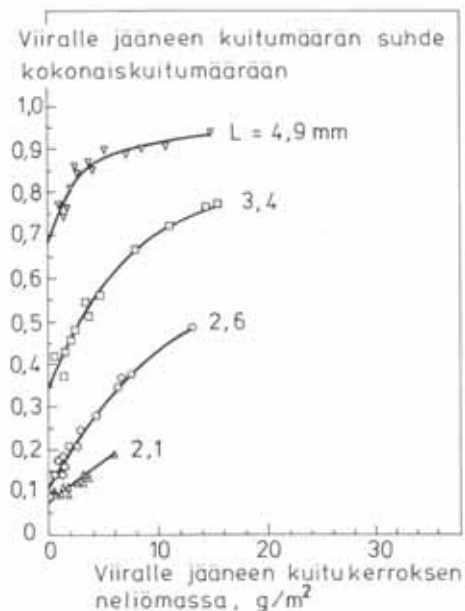
3.7.1 Retentio ja vedenpoisto tasoviiralla

Paperin ja kartongin rainaus tapahtuu joko tasoviiralla tai kitaformerissa. Kitaformerissa massasulppu suihkutetaan perälaatikosta kahden viiran väliseen kiitaan, jolloin myös vedenpoisto tapahtuu kahteen suuntaan. Hybridiformeriksi nimitetään tasoviiraa, jonka päälle on rakennettu yläviiraformerit tehostamaan vedenpoistoa. Seuraavassa keskitytään tasoviiralla tapahtuvaan rainaukseen.

Perälaatikosta ulosvirtaavat kuidut suotautuvat viiralle eli asettuvat viirakankaalle ja muodostavat siihen kuitukerroksen. Suotautuminen jatkuu kuitujen

ja muun kiintoaineen kerrostumisella jo muodostuneen ainekerroksen eli rainan päälle. Suotautumisen alkuosaa, kun huulisuihku kohtaa viiran, kutsutaan initiaalivedenpoistoksi. Suotautumisvaiheen lopussa laimea sulppukerros häviää rainan päältä, mikä havaitaan vesirajana. Tämän jälkeen seuraa tiivistymisvaihe, jossa vesi poistuu ja sakeus kasvaa koko rainan paksuudelta (Aaltonen et al. 1983).

Viiraosan mallintaminen jaetaan yleisesti kahteen osaan: kuinka hyvin perälaatikosta tulevat kiintoaineet pysyvät viiralla eli retentoituvat ja toisaalta kuinka hyvin vesi poistuu rainasta. Donat et al. (2000) suosittelevat mallintamaan ensin retention ja sitten vedenpoiston. Retention vaihtumisesta seuraa perälaatikon sakeuden muutos, joka vaikuttaa vedenpoistoon. Yksityiskohtaisen retentiomallin tulisi huomioida muun muassa kuidun pituuden ja käytettävän viiran vaikutus. Kuva 16 esittää mittaustuloksia eripituisten kuitujen retentoitumisesta. Nähdään, että lyhyempien kuitujen retentio on huonompi. Viiratyyppillä, erityisesti reikien koolla, on myös merkittävä vaikutus retentioon. Paperilajeilla, joissa on korkea täyteainepitoisuus, on mallintamisessa lisähaasteena täyteaineretention kuvaaminen, missä retentioaineilla on keskeinen merkitys.



Kuva 16. Kuituretentio viiralle suotautumisen alussa kuidunpituuden funktiona (Aaltonen et al. 1983).

Vedenpoisto paperi- tai kartonkikoneen määrässä päässä on yksi tärkeimmistä muuttujista, jotka vaikuttavat laatuun, tuottavuuteen ja tehokkuuteen. Kuitenkin vedenpoiston tarkka ennustaminen on todettu hyvin vaikeaksi (Hojjatie ja Coffin 1999). Yleinen tapa mallintaa viiran vedenpoisto on yhden tai useamman vakio-kertoimisen erotuskomponentin käyttö. Kirjallisuudessa on esitelty hyvinkin yksityiskohtaisia vedenpoistomalleja erityyppisille vedenpoistokomponenteille. Sen sijaan raportit mallien menestyksellisestä soveltamisesta käytännön olo-suhteisiin puuttuvat. Yksi ongelma on se, että koko viiraosan laskemiseksi näitä eri lähtökohdista kehitettyjä, eri parametreja käyttäviä malleja olisi yhdisteltävä.

Kirjallisuudessa on joitakin esimerkkejä, joissa on käsitelty koko viiraosan vedenpoistoa ja lähestymistapa on ollut muu kuin vakiokertoimisten erotuskomponenttien käyttö. Donat et al. (2000) tutkivat kaksoisviirarainanmuodostuksen mallintamista. He tukeutuivat mallinnuksessa sakeus-, hienoaine-pitoisuus- ja virtausmittauksiin ja jakoivat formerin vedenpoistoelimien mukaan osiin. He etsivät sopivia korrelaatioita kuitu- ja hienoaineretentiolle sekä vedenpoistolle. Retentiomalleissa huomioitiin myös käytetyt retentioaineet. He osoittivat kehitetyn mallin ennustavan kohtuullisen hyvin tuotantokoneen formeriosan toimintaa. Käytettyä lähestymistapaa voidaan soveltaa myös muille koneille, kunhan vastaavat mittaustulokset on käytettävissä. Mittauksia eri kohdissa formeria poistuvista vesivirroista ja rainan kuiva-aineesta on kuitenkin vaikea käytännössä saada. Mallin pätemisalue riippuu suoraan mittaussarjojen laajuudesta.

Shirt (1997) mallinsi väitöskirjassaan massan partikkelien ja kemiallisten lisä-aineiden yhteisvaikutusta lyhyessä kierrossa. Hän käytti simuloinneissaan viiraosalla vedenpoistomallia, jossa hyödynnettiin Darcyn lakia ja Kozeny-Carman riippuvuutta. Seuraavassa kappaleessa esitellään tätä monien muidenkin suotautumisilmiöiden tutkijoiden käyttämää lähestymistapaa tarkemmin.

3.7.2 Vedenpoiston mallintaminen Darcyn lakiin perustuen

Kirjallisuudessa viiraosan vedenpoiston mallintamisessa lähdetään usein liikkeelle Darcyn laista. Darcy havaitsi vuonna 1856 yhteyden huokoisen kerroksen läpi virtaavan nesteen ja kerroksen yli vaikuttavan paine-eron välillä:

$$\dot{V} = \frac{kA\Delta p}{\eta Y} \quad (16)$$

missä

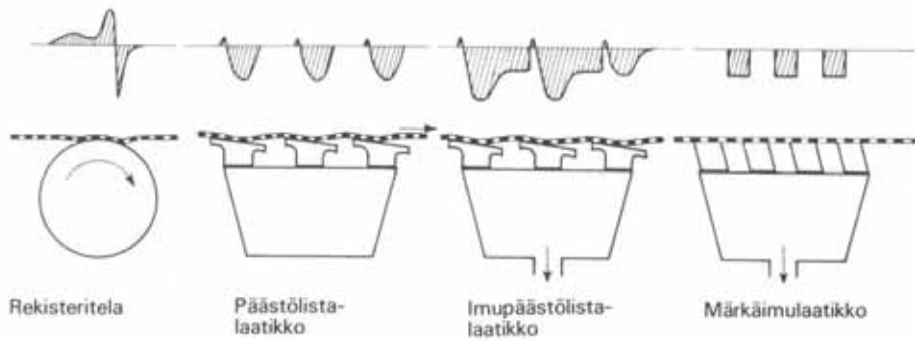
\dot{V}	on	tilavuusvirtaus kerroksen läpi (m ³ /s)
k		permeabiliteetti (m ²)
A		pinta-ala (m ²)
Δp		paine-ero kuitumaton yli (Pa)
η		viskositeetti (Pa s)
Y		kerroksen paksuus (m)

Toinen tapa esittää yhtälö on käyttää permeabiliteetin sijasta sen käänteislukua, suotautumisvastusta R .

$$\dot{V} = \frac{A\Delta p}{\eta YR} \quad (17)$$

Darcyn yhtälö pätee laminaarille virtaukselle homogeenisen ja kokoonpuristumattoman kerroksen läpi. Oletukset eivät viiraosan vedenpoistossa päde, joten sellaisenaan yhtälöä ei voida käyttää.

Rainasta poistuvan virtauksen laskemiseksi on arvioitava vedenpoistoa ajava paine-ero. Rintapöydällä vedenpoisto perustuu lähinnä gravitaation vaikutukseen. Sitten paine-ero synnytetään foililistoilla tai vakuumpumpuilla. Foililistojen luomat painepulssit riippuvat viiran nopeudesta, massasulpun tiheydestä, listojen dimensioista ja asennuskulmista. Kuvassa 17 on esitetty eri vedenpoistotelinten aiheuttamia impulssien muotoja. Imulaatikoiden tyhjötasot saadaan tuotantokoneilla usein on-line-mittauksina.



Kuva 17. Viiraosan eri vedenpoistoelinten aiheuttamia impulssien muotoja (Aaltonen 1983).

Suurin ongelma Darcyn yhtälön soveltamisessa on rainan permeabiliteetin arviointi. Permeabiliteetti on täysin riippuvainen väliaineen materiaalista: hiukasten koosta, muodosta, pintaominaisuuksista ja erityisesti huokoisuudesta (Aaltonen 1983). Ehkä yleisimmin käytetty tapa yhdistää huokoisuus ja suotautumisvastus on Kozeny-Carmanin yhtälö (esim. Ingmanson et al. 1959). Yhtälöllä voidaan arvioida permeabiliteetti rainan aukko-osuuden ja kuidun ominaispinta-alan avulla:

$$k = \frac{1}{\kappa S_0^2} \cdot \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (18)$$

missä

- ϕ on aukko-osuus
- κ Kozenyn vakio
- S_0 kuitujen ominaispinta-ala (m^2/m^3)

κ riippuu partikkelien muodosta ja kuitumassalle annetaan usein vakioarvo 5,55. Aukko-osuus voidaan laskea kaavalla:

$$\phi = 1 - c' \cdot v_s \quad (19)$$

missä

- c' on sakeus (kg/m^3)
- v_s ominaistilavuus (m^3/kg)

Rainan sakeutuminen riippuu massan kompressibiliteetista ja kerrokseen kohdistuvasta mekaanisesta paineesta. Riippuvuuden kuvaamiseksi on kehitetty kokeellisia korrelaatioita, joista seuraava on hyvin yleisesti käytetty:

$$c' = M \cdot \Delta p^N \quad (20)$$

missä

Δp on puristava paine (Pa)

M, N massakohtaisia kompressibiliteettivakioita

Rainan epätasaisen tiivistymisen vuoksi suotautumisvastuskaan ei ole paksuus-suunnassa homogeeninen. Jos tämä otetaan huomioon, on ratkaistava rainan paksuussuuntainen huokoisuusprofiili, ennen kuin voidaan laskea rainasta poistuva vesimäärä.

Kun veden poistumista rainasta lasketaan ja tarkastelupiste etenee pitkin viiraosaa, on huomioitava, että rainan päälle suotautuu jatkuvasti lisää kuituja. Maton paksuus kasvaa, kunnes vesirajan jälkeen alkaa tiivistyminen koko rainan paksuudelta. Britt ja Unbehend (1985) tulivat tutkimustensa perusteella siihen tulokseen, että viiraosa voidaan jakaa vedenpoiston vallitsevan mekanismin kannalta kahteen osaan: suotautumisvyöhykkeeseen ennen vesirajaa ja sen jälkeiseen imuvyöhykkeeseen. He raportoivat, että veden poistuminen massoiltaan erityyppisistä rainoista poikkeaa toisistaan näillä vyöhykkeillä niin, että ominaisuudet, jotka edesauttavat vedenpoistoa toisella vyöhykkeellä, usein heikentävät sitä toisella. Niinpä massan ominaisuuksien muutoksen vaikutus suotautumisvyöhykkeen vedenpoistoon saattaa kompensoitua imuvyöhykkeellä niin, että kokonaistilanne ei muutu. Tämä vedenpoiston mekanismin muuttuminen vesirajan tietämällä on otettava huomioon myös mallintamisessa.

Toistaiseksi koko viiraosan kattavaa, yleisesti hyväksyttyä vedenpoiston ennustavaa teoreettista mallia ei ole käytettävissä. Seuraavassa kappaleessa tutustutaan kokeellisen tutkimuksen viimeaikaisiin tuloksiin viiraosan vedenpoistoon liittyen.

3.7.3 Vedenpoiston mittaaminen laboratoriolaitteilla

Keskeinen ilmiö viiraosan vedenpoistossa on veden virtaaminen kokoonpuristuvan huokoisen aineen läpi. Virtaukseen vaikuttavat sekä viiran että rainan kompressibiliteetti ja permeabiliteetti. Rainan kompressibiliteetti ja permeabiliteetti ovat massakohtaisia parametreja. Canadian Standard Freeness (CSF), Schopper-Riegler (SR) ja TAPPI Drainage Time ovat yleisiä teollisuudessa käytettyjä testejä, joilla mitataan massan permeabiliteettia (Duplantis ja Green 2002). Nämä testit soveltuvat kuitenkin huonosti kuvaamaan vedenpoistoa massasta paperikoneen viiraosan olosuhteissa. Ne ennustavat vedenpoistonopeuksia, jotka ovat selkeästi liian pieniä rainanmuodostumisalueelle (Hojjatje ja Coffin 1999). Norman (2000) kertoo kaksi pääsytyä tähän:

- rainausprosessin rakenne vaikuttaa oleellisesti rainan rakenteeseen
- raina on kokoonpuristuva, jolloin vedenpoistovastus muuttuu vedenpoistoa ajavan paine-eron muuttuessa.

Edellä mainitut on-line-mittaukset ovat myös suhteellisen herkkiä mitattavan massan lämpötilalle, sakeudelle, massatyypille ja monelle muulle muuttujalle (Hojjatje ja Coffin 1999).

Eri tutkijat ovat pyrkineet kehittämään koelaitteita massan karakterisoinniseksi niin, että koeolosuhteet vastaisivat mahdollisimman hyvin vedenpoistotapah- tumaa tuotantokoneen viiraosalla. Tällaiset laitteet antaisivat erinomaisen mah- dollisuuden kehittää massakohtaisia vedenpoistomalleja viira- ja puristinosille, jos laitteet soveltuvat myös on-line-käyttöön tehtaille. Seuraavassa on koottu tuloksia, jotka antavat kvalitatiivista tietoa vedenpoistoon vaikuttavista tekijöistä.

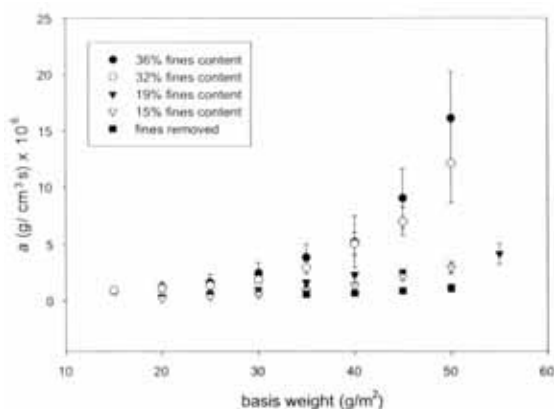
Jong et al. (1999) osoittivat, että huulisuihkun ja viiran kohtaamiskohdalla ja heti sen jälkeen viiran vaikutus vedenpoistoon on merkittävä, kun rainan neliöpaino on alle 20 g/m². Tämän neliöpainon yläpuolella viiran osuus viiran ja rainan yli olevasta painehäviöstä on maksimissaan 5 %:n luokkaa.

Wildfong et al. (2000a) kehittivät vedenpoiston tutkimiseen mittalaitteen, jolla he kertoivat pääsevänsä lähelle teollisia vedenpoisto-olosuhteita. He tutkivat suotautumisvastuksen kasvua neliöpainon kasvaessa. Kozeny-Carmanin yhtä-

lössä vain aukko-osuus voi muuttua neliöpainon kasvaessa. Tälle muutokselle Wildfong et al. (2000b) esittivät kaksi mahdollista mekanismia:

- kuitumaton kokoonpuristuminen vedenpoiston edetessä
- huokosten täytyminen kasvavan hienoaineretention vuoksi.

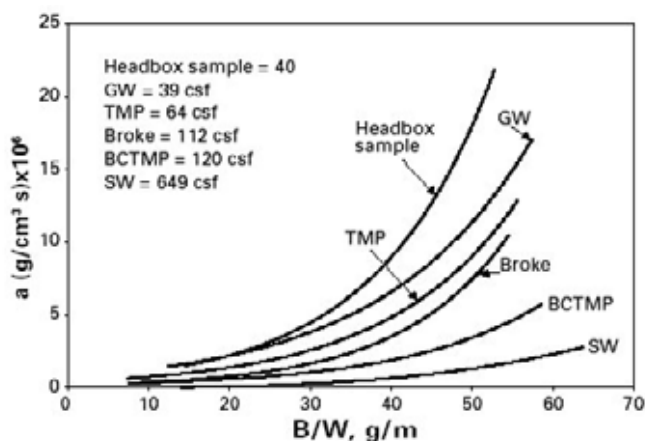
Kun aukko-osuus on Kozeny-Carmanin yhtälössä korotettu kolmanteen potenssiin, voi pienistäkin aukko-osuuden muutoksista aiheutua suuria muutoksia vastuskertoimeen. Wildfong et al. (2000b) tulosten mukaan edellä mainituista mekanismeista jälkimmäinen, eli hienoaineen retention kasvu vedenpoiston edetessä, selittää suurimman osan vastuskertoimen kasvusta neliöpainon kasvaessa. Kuvassa 18 on esitetty vedenpoiston vastuskerroin hienopaperimassalle, jonka hienoainepitoisuutta on muunneltu eri tasoille. Neliöpainon kasvaessa, eli kun matto paksuntuu rainanmuodostuksen edetessä, vastuskerroin ei juurikaan nouse, jos massassa ei ole lainkaan hienoainetta. Toisaalta tulokset osoittavat, että hyvin alhaisilla neliöpainoilla (alle 30 g/m^2) hienoainejakeen nousulla ei ole merkittävää vaikutusta vastuskertoimeen. Brittin ja Unbehendin (1985) tulokset tukevat tätä havaintoa. Edelleen Wildfong et al. (2000b) päättelivät, että hienoaineen huokosia veden poistumisreittejä tukkivan mekanismin vaikutus häviää suuremmilla neliömassoilla, kun retentio on korkea ja suhteellisen vakio. Sano-malehtipaperikoneen massalla, jossa hienoaineen osuus on suuri, oli vastuskertoimen kasvu selvästi voimakkaampaa neliöpainon funktiona kuin hienopaperikoneen massalla.



Kuva 18. Vedenpoistovastusta kuvaava kerroin (kuvan merkinnöissä a) kasvaa selkeästi hienoainepitoisilla massoilla neliöpainon noustessa (Wildfong et al. 2000b).

Duplantis ja Green (2002) esittelivät oman, standardimenetelmiä paremmin vedenpoiston mittaamiseen sopivan laitteensa. He raportoivat alustavina tuloksina, että massatyypillä on suurempi vaikutus permeabiliteettiin kuin viiratyypillä. Lisäksi, kun verrattiin lyhytkuituista sellumassaa, pitkäkuituista sellumassa ja TMP-massaa, olivat sellumassat keskenään melko samanlaisia, mutta TMP-massan permeabiliteetti oli alhaisempi.

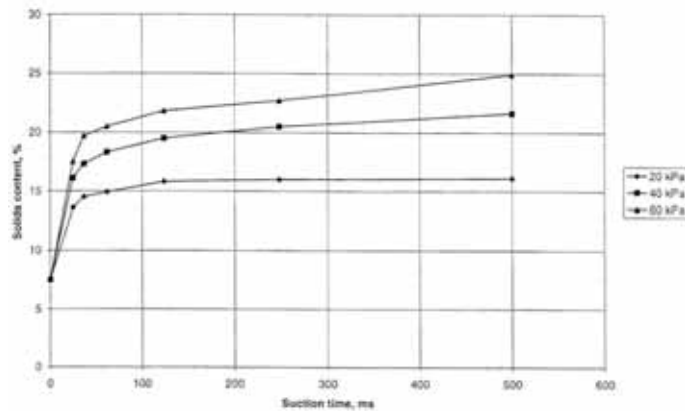
Paradis et al. (2002) kehittivät koelaitteen, jolla voidaan mitata vedenpoistovastusta niin, että massaan kohdistuva leikkausvoima tunnetaan. He tutkivat myös viiran virtausvastusta ja havaitsivat niin sanotun Ergunin yhtälön pätevän. Ergunin yhtälöllä voidaan laskea viiran vastus, kun tunnetaan keskimääräinen viiralankojen halkaisija, ilman aukko-osuus viirassa ja viiran paksuus. Paradis et al. esittivät myös mittaamiensa vedenpoistovastuksia LWC-koneen eri massakomponenteille. Näytteet otettiin ennen komponenttien sekoittumista sekoitus-säiliössä, sekä sekoittumisen jälkeen perälaatikosta. Kuvassa 19 esitetty tulos oli aika yllättävä: perälaatikkomassan vedenpoistovastus oli suurempi kuin yhdenkään yksittäisistä massakomponenteista. Paradis et al. (2002) arvelivat viiravedestä laimennettaessa tulevan hienoaineen ilmiön aiheuttajaksi. Massakomponentit olivat pienenevän vedenpoistovastuksen mukaisessa järjestyksessä hioke, TMP, hylky, BCTMP ja lehtipuusellu. Kuvassa on esitetty myös massojen CSF-arvot.



Kuva 19. Vedenpoistovastus neliöpainon funktiona eri massakomponenteille ja perälaatikkomassalle LWC-koneella (Paradis et al. 2002).

Räisänen (1998) tutki väitöskirjatyössään vedenpoistoa suurta alipainetta käytettäessä, eli viiraosan loppuosalla imulaatikoiden ja imutelan avulla. Työssä kehitettiin TKK:n Paperitekniikan laboratorioon uudentyyppinen koelaitte vedenpoiston tutkimiseen. Kehitetyllä MBDT-laitteella (Moving Belt Drainage Tester) voidaan jäljitellä tuotantokoneen fourdrinier-viiran olosuhteita realistisesti. Laitteessa kuitumatto, josta vettä poistetaan, pidetään paikallaan viiralla, jonka alla pyörii uritettu hihna. Verrattaessa muihin vedenpoistoa mittaaviin laitteisiin, on MBDT:llä Räisänen mukaan (1998) kaksi hyvää ominaisuutta: imulle saadaan aikaan korkea pulseeraustaaajuus ja imuprofiilia voidaan muuttaa dynaamisesti vedenpoiston edetessä. Kuva 20 esittää laitteella mitattuja tuloksia alipainetason vaikutuksesta kuiva-ainepitoisuuden kehittymiseen.

Ehkä toimivin lähestymistapa viiraosan retention ja vedenpoiston yksityiskohtaisessa mallintamisessa on edellä kuvattujen laboriolaitteiden hyödyntäminen. Onnistumisen edellytyksenä olisi, että käytetään kohdekoneen oikeaa massaa tai massoja ja että koelaitteella kyetään jäljittelemään kohdekoneen olosuhteita riittävän realistisesti.



Kuva 20. Paperin kuiva-ainepitoisuuden kasvu ajan funktiona kolmella eri alipainetasolla (Räisänen 1998).

3.8 Vedenpoiston ennustaminen paperin märkäpuristuksessa

Märkäpuristus on tuotantokustannusten kannalta tärkeä osa paperikonetta, sillä veden poistaminen mekaanisesti puristamalla on edullista verrattuna höyryllä tapahtuvaan haihduttamiseen kuivatusosalla. Rainaa puristetaan puristinnipissä kahden telan välissä, jolloin rainassa olevan veden paine nousee niin, että vesi alkaa virrata rainasta (Kankaanpää ja Verho 1983). Vesi poistetaan joko rainan molemmin puolin olevilla huovilla tai vain toispuolisesti yhdellä huovalla.

Kankaanpää ja Verho (1983) mainitsevat useita puristinnipin toimintaan ja siten vedenpoistoon vaikuttavia tekijöitä:

- viivakuormitus
- rainan nopeus
- sisään tulevan rainan kosteus, neliömassa ja lämpötila
- rainan kuituverkoston ominaisuudet
- puristinhuopien laatu ja kunto
- puristintelojen halkaisija ja geometria (sileä, rei'itetty, uritettu jne.)
- telapäällysteiden joustavuus.

Vedenpoiston lisäksi märkäpuristuksen tehtävänä on myös tiivistää ja lujittaa rainaa, jotta saavutetaan riittävä märkälujuus rainan siirtämiseksi kuivatusosalle. Puristus vaikuttaa merkittävästi myös rainan laatuominaisuuksiin, kuten lujuuteen, sileyteen ja rakenteen symmetriaan (Kankaanpää ja Verho 1983). Mallinnuksessa ensimmäisenä haasteena on kuitenkin vedenpoiston ennustaminen.

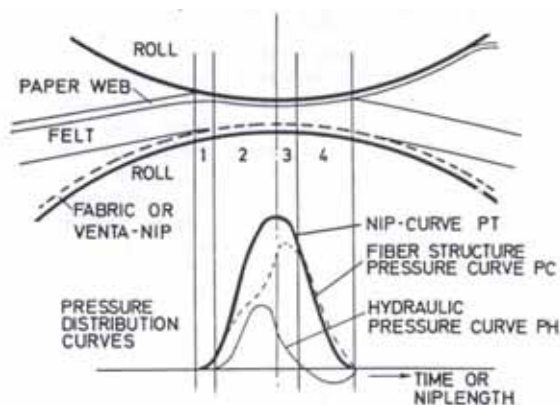
Paperikoneen puristinosaa on mallinnettu monella eri tavalla ja moneen eri tarkoitukseen. Yksinkertaisimmat mallit on identifioitu mittausdatasta ja pätevät vain rajatulla alueella kohdekoneen simulointiin. Kelvinin elementtimallissa, jota Caufield et al. (1986) sovelsivat paperikoneelle, rainan viskoelastinen luonne kuvataan jousen ja vaimentimen avulla. Laukkanen (2001) esittelee tarkemmin mallin rakennetta ja käyttöä Apros-ympäristössä.

Useat puristinmallit lähtevät liikkeelle Darcyn laista, vaikkei se sellaisenaan sovellukaan kuvaamaan vedenpoistoa puristustapahtumassa. Darcyn laista johdettuja tai johdettavissa olevia puristinmalleja ovat ainakin Jönssonin ja Jönssonin

nin (1992) malli sekä alenevan permeabiliteetin malli (Kerekes ja McDonald 1991).

Puristustapahtumasta on tehty myös hyvin yksityiskohtaisia malleja. Tällainen on Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksella kehitetty malli (Honkalampi ja Kataja 1995), jossa kuituverkoston, veden ja ilman virtausnopeudet, tilavuusosuudet ja paineet ratkaistaan massan ja liikemäärän säilymlakien avulla sekä rainan että huovan alueella. Puristinnipin laskenta on mallissa diskretoitu sekä paksuus- että konesuunnassa. Myös malli, jonka Riepen et al. (1996) esittivät, on yksityiskohtainen paksuus- ja konesuuntaan diskretoitu kaksifaasimalli. Tämän-tyyppisten yksityiskohtaisten mallien käyttö osana paperi- tai kartonkikoneen kokonaismallia ei yleensä ole tarpeellista tai edes mahdollista, erityisesti jos laskennalle asetetaan reaaliaikavaatimus. Myös mallin parametointi vaatii käytettävällä massalla tehtäviä erikoismittauksia. Toisaalta yksityiskohtaisella mallilla laskettuja tuloksia voidaan hyödyntää yksinkertaisemman mallin parametroinnissa.

Useimmat märkäpuristuksen analyysit pohjautuvat Wahlströmin (1960) esittämään kvalitatiiviseen malliin puristustapahtumasta. Nilsson ja Larsson (1968) kehittivät ajatusmallia edelleen jakamalla puristustapahtuman nipissä neljään vyöhykkeeseen oheisen kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Puristustapahtuman kvalitatiivinen malli (Nilsson ja Larsson 1968).

Kuvassa esitetyn mukaisesti rainaan kohdistuva kokonaispaine voidaan jakaa kahteen osaan eli hydrauliseen paineeseen sekä rakennepaineeseen. Näistä hydraulinen paine on määräävä vedenpoiston kannalta. Kerekes ja McDonald hylkäsivät paineen kahtiajaon omassa lähestymistavassaan (Kerekes ja McDonald 1991, McDonald ja Kerekes 1991). He perustelivat, että tämä kvalitatiivisesti hyödyllinen ajatusmalli ei ole välttämättä paras matemaattisen mallinnuksen kannalta, sillä paineen kahtiajako jakaa samalla paineen ja ajan erillisiksi muuttujiksi. He painottivat, että laboratoripuristimissa näin voi ollakin, mutta käytännön märkäpuristuksessa tuotantokoneella paineen ja ajan tulo, puristusimpulssi, määrää vedenpoiston tehokkuuden. Kerekes ja McDonald (1991) lähtivätkin esittämässään alenevan permeabiliteetin mallissa siitä, että kaikki paine osallistuu vedenpoistoon. Veden poistuminen tapahtuu kuitenkin läpi kuituverkon, jonka veden läpäisevyys eli permeabiliteetti pienenee jatkuvasti vedenpoiston edetessä.

McDonald ja Kerekes (1991) testasivat mallia eri pilotti- ja tuotantokoneilta kerätyllä laajalla aineistolla ja osoittivat sen olevan hyvä approksimaatio puristimen toiminnasta. He esittivät kaksi käyttötarkoitusta, joihin malli hyvin soveltuu. Ensinnäkin mallia voidaan käyttää karkeana suunnittelu-yhtälönä ennustamaan vedenpoistoa esimerkiksi paperikonesimuloinneissa. Toisena käyttötapana he esittivät ekstrapolointia mallin avulla kahdessakin mielessä: arvioimaan laboratoriomittausten avulla millaiseen vedenpoistoon tuotantokoneella päästäisiin tutkitulla massalla tai arvioimaan pienten muutosten (koneen nopeus, puristinpaine ja rainan lämpötila) vaikutusta tutkimuksen kohteena olevan puristimen vedenpoistokykyyn.

McDonald ja Kerekes (1995) esittivät myöhemmin malliin yksinkertaisen laajennuksen, jolla voidaan huomioida rainan jälleenkastumisilmiön vaikutus. I'Anson ja Ashworth (2000) esittivät mallia täydentävän teorian, missä huomioidulla puristinhuopien rakenne voidaan korvata hankalaksi koettu jälleenkastumistermi.

McDonald ja Amini (2000) ovat raportoineet mallin soveltamisesta myös suurineliöpainoisille paperi- ja kartonkilajeille. He esittivät samalla tarvittavan muutoksen malliyhtälöön, jos puristinnipissä käytetään kahta huopaa. Seuraavassa alenevan permeabiliteetin mallia kuvaavassa yhtälössä yhden ja kahden huovan tapaukset on yhdistetty kaavaan kertoimen k_{FLT} avulla:

$$\frac{z}{z_0} = \left(1 + \frac{k_{FLT} A_s n z_0^n I}{v W^2} \right)^{-1/n} \quad (21)$$

missä

z	on	rainan kosteus nipin jälkeen (kg H ₂ O/kg k.a.)
z_0		rainan kosteus ennen nippiä (kg H ₂ O/kg k.a.)
I		puristusimpulssi ((kN/m)/(m/s))
n		kompressibiliteettikerroin
A_s		ominaispermeabiliteetti (g/m)
W		kuivaneliöpaino (kg/m ²)
v		veden kinemaattinen viskositeetti (m ² /s)
k_{FLT}		kerroin, joka riippuu puristinnipin vedenpoistohuopien lukumäärästä.

Nipille, jossa on yksi huopa, k_{FLT} on 1, ja kahden huovan tapauksessa k_{FLT} saa arvon 4. Yhtälössä esiintyvä puristusimpulssi lasketaan jakamalla puristinpaine koneen nopeudella:

$$I = \frac{p_{LL}}{u} \quad (22)$$

missä

p_{LL}	on	puristinpaine (kN/m)
u		koneen nopeus (m/s)

Mallin sovitusta tapahtuu kahdella massakohtaisella parametrilla, joista ominaispermeabiliteetti (A_s) kuvaa rainan suotautuvuusominaisuuksia ja kompressibiliteettikerroin (n) kokoonpuristuvuutta. Kerekes kollegoineen on määrittänyt parametrit puristamalla kaksitelaisella yksihuopaisella laboratoriopuristimella eri kosteudessa olevia käsiarkkeja erilaisilla puristusimpulsseilla. Käsiarkkien tekemiseen vaaditaan 1 kg kohdekoneen massaa viiraosan lopusta (McDonald et al. 2000). Useille eri massoille määritettyjä parametreja on julkaistu (mm. McDonald et al. 2000).

Danielsson ja Funkquist (1998) vertailivat kolmen eri puristinmallin antamia tuloksia keskenään sovittamalla mallit STFI:n koepaperikoneelta tehtyihin mitauksiin. Vertailussa olivat Jyväskylän yliopiston puristinmallin yksinkertaistettu versio, Riepenin ja kumppaneiden (1996) malli sekä alenevan permeabiliteetin malli (Kerekes ja McDonald 1991). He havaitsivat, että kaikki mallit kykenivät ennustamaan koekoneen puristimen loppukosteuden yhtä hyvin. Kahden ensin mainitun mallin tuloksina saadaan tietoa myös nipin sisäisistä ilmiöistä, joskin tältä osin tulokset erosivat keskenään huomattavasti. Mittausdatan puuttuessa mallin ennustuksia sisäisistä ilmiöistä on hyvin hankala todentaa. Danielssonin ja Funkquistin tekemän vertailututkimuksen tulos puoltaakin yksinkertaisen mallin käyttöä, jos validointidataa on huonosti saatavilla.

3.9 Paperin kuivatuksen mallinnus

3.9.1 Yleistä kuivatuksesta ja kuivatussimulaattoreista

Tarkastellaan esimerkkinä tässä työssä mallinnettua kolmikerroskartonkikonetta (kappale 5.1) vedenpoiston jakautumisen kannalta. Viiraosalta, esimerkiksi keskikerroksesta, vettä poistuu noin 300 kg yhtä puristinosalle jatkavaa kuitukiloa kohti. Puristinosalla vettä poistetaan noin 2,5 kg kuivaa kartonkikiloa kohti ja pohjakartongin kuivatusosan poistettavaksi jää noin 1,5 kg vettä/kartonkikilo. Kuivatusosalla haihdutettava vesimäärä on siis suhteellisesti ottaen pieni, mutta siihen vaaditaan hyvin massiivinen laitteisto.

Perinteisellä paperi- tai kartonkikoneen kuivatusosalla höyrylämmitteisiä kuivatussylintereitä on useita kymmeniä. Raina kulkee sylinteriltä toiselle niin, että väliin jää noin metrin mittainen vapaavienti. Rainaa tuetaan viiralla yleensä sylinterikosketuksen aikana ja nopeilla koneilla myös vapaaviennin aikana. Kuivatusosaa ympäröivän huuvan ilmastointi poistaa rainasta ilmaan haihtuneen kosteuden. Lämmöntalteenottojärjestelmä huolehtii siitä, että ilmanvaihto tapahtuu energiankäytön kannalta tehokkaasti.

Paperin sylinterikuivatuksen matemaattista mallinnusta on tutkittu paljon. Malleja voidaan käyttää työkaluna, kun tutkitaan erilaisia mahdollisuuksia nostaa kuivatusrajoitteisen koneen tuotantokapasiteettia tai kun halutaan minimoida kuivatusosan käyttökustannuksia (Sidwall et al. 1999a). Erityisesti vanhojen koneiden

kuivatusosan toimintaa voidaan usein tehostaa pienin investoinnein. Simuloimalla voidaan testata esimerkiksi kuivatussylintereiden sisälle asennettavien lauhdelistojen tai taskutuuletuksen tehostamisen vaikutusta kuivatuskapasiteettiin. Jos tavoitteena on kuivatusosan perinpohjainen uusiminen, simulaattorilla helpotetaan eri kuivainvaihtoehtojen keskinäistä vertailua. Vastaavaa kuivatuskapasiteetin arviointia tarvitaan myös uusien koneiden suunnittelussa.

Sidwall et al. (1999a) tekivät kattavan katsauksen kirjallisuudessa esitettyihin kuivatussimulaattoreihin. He esittelivät ja vertasivat lähes kolmeakymmentä erilaista simulointimallia. He painottivat vertailussa rainan sisäisten lämmön- ja aineensiirtoilmiöiden mallintamistarkkuutta, eli kuinka yksityiskohtaisesti eri malleissa huomioidaan lämpötilan ja kosteuden epätasainen jakautuminen rainan paksuussuunnassa. Muita keskeisiä piirteitä Sidwall et al. (1999a) mukaan kuivatussimulaattorissa ovat ulkoisten tekijöiden ja reunaehtojen monipuolinen huomioiminen, sekä mahdollisuus erityyppisten kuivaimien yhdistelemiseen samassa simulointitutkimuksessa. Sidwall et al. (1999a, 1999b) esittelivät McGillin yliopistossa kehitetyn staattisen kuivatussimulaattorin ominaisuuksia ja laskentaperiaatteita sekä validointituloksia useista mallinnetuista tuotantomittakaavan paperi- ja kartonkikoneista.

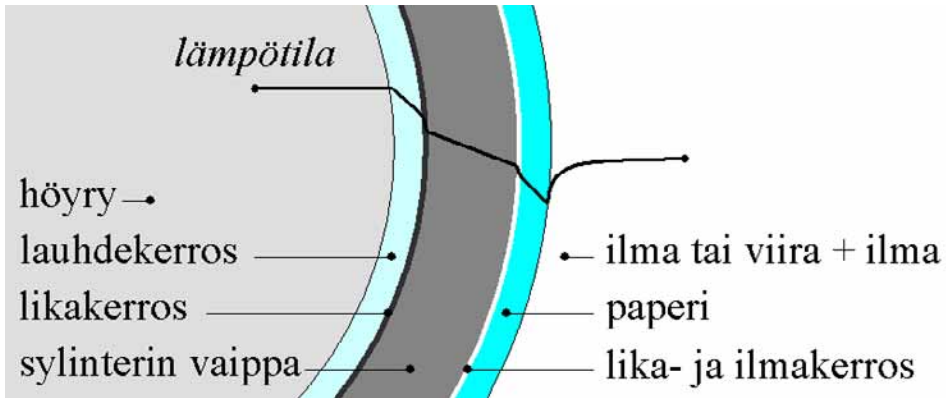
Valtaosa raportoiduista kuivatusosan simulointimalleista on staattisia malleja. Yllä mainitun McGillin yliopiston mallin (Sidwall et al. 1999b) lisäksi tällaisia ovat esittäneet mm. Karlsson (1984), Heikkilä (1993), Paltakari (1995 ja 2000) ja Wilhelmsson (1995). Dynaamisia malleja ovat julkaisseet ainakin Hinds (1983) ja Persson (1998). Aprosimulointiympäristössä kuivatusosaa on mallinnettu ja simuloitu vuodesta 1994 alkaen (Niemenmaa et al. 1996, Tuuri et al. 2001 ja Lappalainen et al. 2001).

Seuraavassa kahdessa kappaleessa käsitellään kuivatusosan keskeisiä ilmiöitä ja niiden mallintamista.

3.9.2 Lämmönsiirto sylinterikuivatuksessa

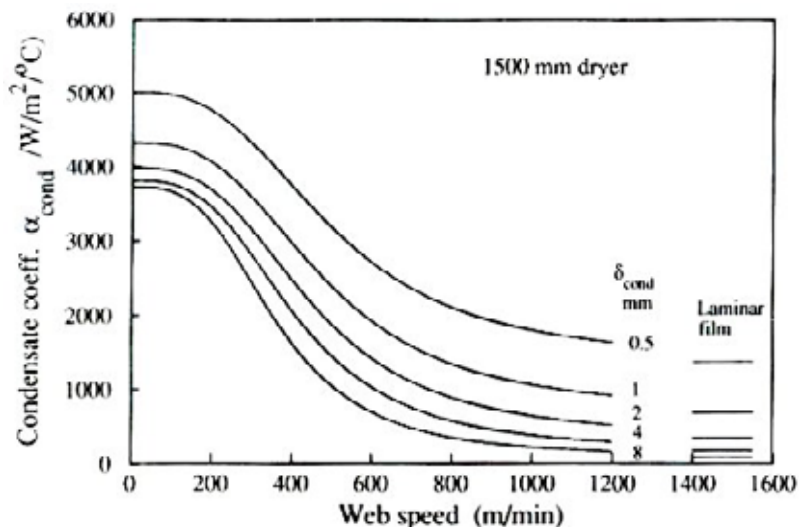
Kuivuva paperirata saa tarvitsemansa lämpöenergian kuivatussynterinin sisällä lauhtuvalta höyryltä. Heikkilä et al. (2000) esittävät lämmönsiirtotapahtuman

kuvan 22 mukaisesti. Kuvassa nähdään eri lämmönsiirtovastukset ja kuinka lämpötila kehittyi matkalla höyrystä paperiin ja ilmaan.



Kuva 22. Lauhtuvan höyryn luovuttama lämpö siirtyy erilaisten lämmönsiirtovastusten läpi paperiin ja ilmaan.

Lauhdetta poistetaan sifonilla sylinterin akselitapin kautta. Lauhde on sylinterin pohjalla lammikkona, jos koneen nopeus on pieni. Tällöin lämmönsiirto sylinteriin on erittäin hyvä, sillä suuri osa sylinterin sisäpinnasta on lauhteesta vapaana. Kun nopeus kasvaa, lauhde lähtee nousemaan sylinterin seinämää pitkin ja ryöpyää sieltä alas, kunnes tietyn rajanopeuden jälkeen se muodostaa sylinterin seinämälle tasaisen kerroksen, jolloin lämmönsiirtokerroin pienentyy. Lauhdetta on sylinterissä tyypillisesti muutaman millimetrin paksuudelta (Soininen 1983). Heikkilä (1993) sovitti Appelin ja Hongin (1975) julkaisemasta datasta riippuvuuden lämmönsiirtokerroimelle sylinterin halkaisijan, lauhdekerroksen paksuuden ja koneen nopeuden funktiona. Kuvassa 23 esitetyt käyrät on laskettu halkaisijaltaan 1 500 mm sylinterille.



Kuva 23. Lämmönsiirto lauhdekerroksen läpi höyrystä sylinterin sisäpintaan riippuu mm. koneen nopeudesta ja lauhdekerroksen paksuudesta (Heikkilä 1993).

Kuivatussylintereitä varustetaan nykyään yleisesti lauhdelistoilla. Listat lisäävät lauhteen sekoittumista ja rikkovat näin ehjänä hyvin eristävän lauhdekerroksen. Tällöin lämmönsiirron riippuvuus lauhdekerroksen paksuudesta vähenee merkittävästi (Kuhasalo et al. 2000).

Lämmönjohtuminen sylinterin vaipan läpi voidaan laskea yhtälöllä:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_{p,c}} \frac{\partial^2 T_c}{\partial y_c^2} \quad (23)$$

missä

T_c	on	sylinterin lämpötila (°C)
t		aika (s)
λ_c		sylinterin lämmönjohtumiskerroin (W/m°C)
ρ_c		sylinterin tiheys (kg/m ³)
$c_{p,c}$		sylinterin ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)
y_c		sylinterin vaipan paksuussuuntainen koordinaatti (m)

Soininen (1983) erittelee sylinterin ja paperin välisen lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä, joista tärkein on paperin kosteus. Muita tekijöitä ovat viiran kireys sekä sylinteripintojen sileys ja puhtaus. Merkittävä vaikutus on myös itse kuivatettavalla materiaalilla, sillä kuituraaka-aine sekä täyteaineen määrä ja laatu vaikuttavat paperin lämmönjohtavuuteen.

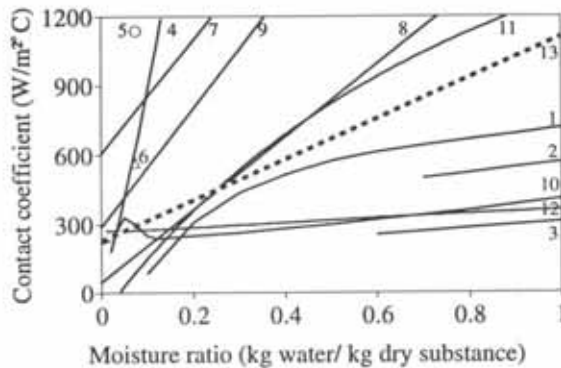
Sylinterin ja paperin välinen lämmönsiirto lasketaan kaavalla:

$$q_{in} = \alpha_{cp} \cdot (T_c - T_p) \quad (24)$$

missä

q_{in}	on	lämpövuoto sylinteristä paperiin (W/m^2)
α_{cp}		kontaktilämmönsiirtokerroin sylinteristä paperiin ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)
T_p		paperin lämpötila (°C)

Sylinterin ja paperin välinen kontaktilämmönsiirtokerroin on tärkeä tekijä kuivatuksessa. Kerrointa käytetäänkin kuivatusmalleissa usein mallin virityksessä. Kuvassa 24 on esitetty Wilhelmssonin (1995) keräämiä eri tutkijoiden raportteja mittauksista lämmönsiirtokerroimista kosteuden funktiona. Katkovii-valla piirretty suora on Wilhelmssonin omasta väitöskirjatutkimuksesta, josta myös tarkemmat lähteet muille tapauksille löytyvät. Nähdään, että kaikissa tapauksissa lämmönsiirto paranee kosteuden kasvaessa, mutta kertoimen muutos kosteusyksikköä kohden vaihtelee paljon eri tutkimuksissa.

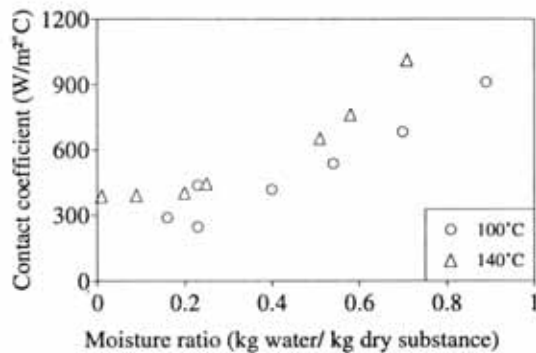


- | | |
|----|---------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Redfern, 80°C, 2.20 kN/m |
| 2 | Redfern, 70°C, 2.20 kN/m |
| 3 | Redfern, 70°C, 0.45 kN/m |
| 4 | Sundberg et al., 60 g/m ² , 5-10 kN/m |
| 5 | Han, paper |
| 6 | Han, board |
| 7 | Depoy |
| 8 | Rhodus et al., 80-200 g/m ² |
| 9 | Karlsson, 49-95 g/m ² |
| 10 | Lee et al., 600 g/m ² , 105°C, 0.7 kN/m |
| 11 | Asensio et al., machine samples, 210 g/m ² , 83-105°C, 2.7 kPa |
| 12 | Asensio et al., handsheets, 210 g/m ² , 83-105°C, 2.7 kPa |
| 13 | The present work, 69 g/m ² , 140°C, 2-6 kN/m |

Kuva 24. Eri tutkimuksissa raportoituja kuivatussylinterin ja paperin välisen kontaktilämmönsiirtokertoimen arvoja (Wilhelmsson 1995).

Wilhelmsson (1995) tutki viiran tyypin ja kireyden sekä paperin lämpötilan vaikutusta sylinterin ja paperin väliseen lämmönsiirtokertoimeen laboratoriolaitteella. Hienopaperin (69 g/m²) kuivatuksessa viiran topografia, eli se kuinka paljon viiran ja paperin välillä on kontaktipisteitä, ei vaikuttanut merkittävästi lämmönsiirtoon. Wilhelmsson testasi myös viiran kireyden vaikutusta kireydetasolla 2, 4 ja 6 kN/m. Yllättävä tulos oli, että viiran kireyden nosto paransi lämmönsiirtoa vain vähän.

Kirjallisuudessa on esitetty ristiriitaista tietoa siitä, miten lämmittävän pinnan lämpötila vaikuttaa lämmönsiirtokertoimeen tietyssä kosteudessa olevaan paperiin. Wilhelmsson (1995) päätyi tutkimuksessaan tulokseen, että korkeampi pinnan lämpötila nostaa selvästi lämmönsiirtokerrointa kuvan 25 mukaisesti.



Kuva 25. Kuivatussylinterin ja paperin välisen lämmönsiirtokertoimen arvoja sanomalehtipaperille kuivaimen pinnan kahdella eri lämpötilalla (Wilhelmsson 1995).

3.9.3 Veden poistuminen rainasta

Kuivatusprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen sen mukaan, mikä tekijä rajoittaa kuivumista. Seuraavassa mukailaan Heikkilän ja Paltakarin (2000) esitystä asiasta.

Ensimmäisessä vaiheessa raina lähinnä lämpenee. Kun raina on lämmennyt riittävästi, seuraa toinen vaihe, jossa kuivatusnopeus pysyy suunnilleen vakiona. Rainasta poistuu silloin haihtumisen kautta sama lämpömäärä, jonka se vastaanottaa kuivaimelta. Paperi on vielä niin märkää, että haihtuva höyry pääsee vapaasti siirtymään ympäröivään ilmaan paperin pinnalta. Kun kosteus vähenee, vastus höyryn diffuusiolle rainan sisältä nousee merkittäväksi. Siirrytään kolmanteen, alenevan kuivatusnopeuden vaiheeseen. Toisen ja kolmannen vaiheen välistä taitekohtaa kutsutaan kriittiseksi pisteeksi ja vastaavaa kosteutta kriittiseksi kosteudeksi. Tuotantokoneissa ei välttämättä voida havaita selkeää vakio-kuivatusnopeuden vaihetta saati käännepistettä kolmanteen vaiheeseen. Kriittinen kosteus ei ole aito materiaalikohtainen parametri, sillä ulkoiset kuivatusolosuhteet aiheuttavat suuria vaihteluita sen arvoihin (Paltakari 2000).

Paperi on hygroskooppinen aine, sillä selluloosa ja vesi kiinnittyvät polaarisisinä molekyyleinä toisiinsa. Hygroskooppisen luonteen takia veden höyrynpaine

laskee kosteuden aletessa ja tarvitaan korkeampi lämpötila ylläpitämään sama ajava voima haihtumiselle. Tämä näkyy rainan lämpötilan nousuna kuivatuksen loppuvaiheessa. Alenevan kuivatusnopeuden vaihe voidaan edelleen jakaa kahteen osaan, sillä joskus laskevassa kuivatusnopeuskäyrässä havaitaan taitekohta siinä, missä vapaa vesi loppuu paperista.

Kuivatusosan ympärillä on huuva, joka erottaa kuivatusosan muusta konehallista. Ilmankosteus ja lämpötila huuvassa sekä rainan ja sylintereiden väliin jäävissä taskuissa vaikuttavat kuivatustehokkuuteen. Taskujen olosuhteet voidaan olettaa vakioiksi normaalissa stationäärisessä tuotantotilanteessa. Muutostilanteessa, ainakin jos neliöpaino muuttuu paljon, oletus ei välttämättä enää päde. Aihetta ei ole kirjallisuudessa juurikaan käsitelty, ovathan kuivatusosan simulaattoritkin yleensä staattisia. Persson (1998) esitti lajinvaihdon aikaisia lämpötila- ja märkälämpötilamittauksia yhdestä taskusta. Hänen esittämässään lajinvaihdossa (neliöpainon nosto 20 g/m^2) taskun tila ei juurikaan muuttunut. Tulosta ei kuitenkaan voida yleistää, sillä käytännössä tilanteeseen vaikuttaa myös se, kuinka lähellä huuvan kosteudenpoiston maksimikapasiteettia toimitaan.

Kun paperiraina on märkää, voidaan olettaa, että kaikki haihtuminen tapahtuu paperin pinnalta. Pinnalla oleva höyrynpaine on pelkästään lämpötilan funktio, ja se voidaan laskea Antoine'n yhtälöstä:

$$p_0 = 133,322 \cdot \exp \left(18,3036 - \frac{3816,44}{T'_p - 46,12} \right) \quad (25)$$

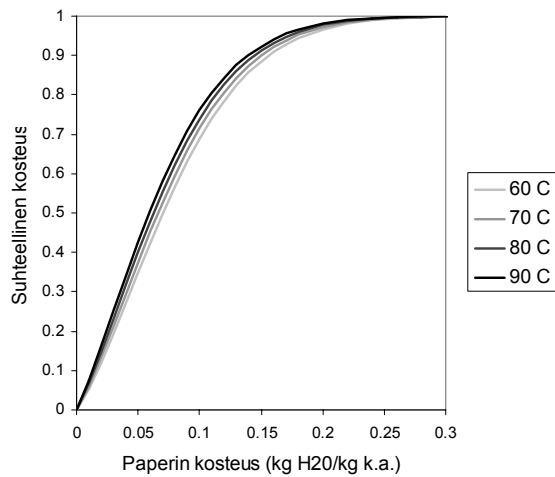
missä

p_0 on vesihöyryn osapaine paperin pinnalla (Pa)
 T'_p rainan lämpötila (K)

Antoine'n yhtälöä voidaan käyttää niin kauan, kun vettä siirtyy kapillaari-ilmiön vaikutuksesta rainan sisältä pinnalta haihtuvan veden tilalle (Heikkilä ja Paltakari 2000).

Kun paperin kosteus vähenee, rainan sisältä poistuvan höyryn diffuusio alkaa rajoittaa kuivumista. Samanaikaisesti paperin hygroskooppinen luonne alentaa

veden höyrynpainetta ja Antoine'n yhtälöä ei voida enää sellaisenaan käyttää. Lämpötilan lisäksi höyrynpaineeseen vaikuttaa nyt myös kosteus. Höyrynpaineen, raihan lämpötilan ja kosteuden välistä riippuvuutta kuvataan sorptioisotermeillä, joista kuvassa 26 on esitetty esimerkkejä. Sorptioisotermit ovat erilaisia eri paperilajeille ja massan jauhausasteille. Systemaattista tietoa massatyyppin vaikutuksesta kuivumiseen ei ole julkaistu. Käytännössä on havaittu joitain seikkoja, jotka helpottavat kuivatusta (Heikkilä et al. 2000): kemiallisen sellun suuri osuus, korkea täyteainepitoisuus ja sellaisten kuitujen käyttö, joita on jo aiemmin kuivattu (esim. paalusellu).



Kuva 26. Paperin sorptioisotermejä eri lämpötiloissa.

Heikkilä (1993) esitti, että kriittisen kosteuden alapuolella alentunut höyrynpaine p_v voidaan arvioida käyttämällä sorptioisotermin suhteellista kosteutta korjauskertoimenä φ :

$$p_v = \varphi \cdot p_0 \tag{26}$$

Kertoimen φ arvo lähenee yhtä, kun kosteus kasvaa. Paltakari (2000) kokosi yleisimmät yhtälöt, joilla sorptioisotermejä on kuvattu matemaattisesti. Seuraavassa on Heikkilän (1993) käyttämä muoto:

$$\varphi = 1 - e^{-(C_1 \cdot z^{C_2} + C_3 \cdot T_p \cdot z^{C_4})} \quad (27)$$

missä

z on rainan kosteus (kg H₂O/kg k.a.)

C_1, C_2, C_3, C_4 ovat paperin koostumuksesta riippuvia vakioita

Yllä olevassa yhtälössä käytetään kosteuspitoisuuden yksikkönä kg vettä / kg kuivaa ainetta (kg H₂O/kg k.a.). Tämä on kuivatusmalleissa tyypillisesti käytetty yksikkö.

Stephanin laki on kirjallisuudessa usein käytetty tapa laskea paperista höyrystyvän veden määrä \dot{m}_{ev} kriittisen kosteuden yläpuolella. Heikkilä (1993) esitti Stephanin laista yksinkertaistetun yhtälön, joka saadaan käyttämällä saman-aikaisen lämmön- ja aineensiirron välistä analogiaa:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \alpha_F C \ln \frac{p_{tot} - p_{va}}{p_{tot} - p_v} \quad (28)$$

missä

\dot{m}_{ev} on haihtuvan veden massavirta (kg/s)

A paperin pinta-ala, jolta höyrystyminen tapahtuu (m²)

C vakio: 7,03E-04 (kgH₂O°C/W/s)

α_F konvektiivinen lämmönsiirtokerroin paperista ilmaan (W/m²°C)

p_{tot} huuvan ilmanpaine (Pa)

p_{va} vesihöyryn osapaine ilmassa (Pa)

p_v vesihöyryn osapaine haihdutuspinnalla (Pa)

Kun saavutetaan kriittinen kosteus ja kuivuminen siirtyy rainan sisälle, joutuu haihtuva vesi kulkemaan pidemmän matkan rainan pinnalle. Vastaavasti rainan pinnalle syntynyt kuiva kerros vastustaa sylinteristä tulevan lämpövirran pääsyä rainan sisäosiin. Paperin paksuussuunnassa voikin olla merkittäviä lämpötila- ja kosteuseroja, etenkin paksuilla laaduilla, kuten kartongilla (esim. Sidwall et al. 1999a, Paltakari 2000).

Kuivatusmalleissa käsitellään rainan paksuussuuntaisia kosteus- ja lämpötilagradientteja eri tavoin. Monissa malleissa rainaa käsitellään pistemäisenä eli paksuussuunnassa homogeenisena lämpötilan ja kosteuden suhteen (esim. Niemenmaa et al. 1996, Paltakari 2000, Nilsson 2002). Joissain malleissa lämpötilan paksuussuuntainen jakauma ratkaistaan, muttei kosteusjakaumaa (Wilhelmsson 1995, Persson 1998). Yksityiskohtaisimmat mallit huomioivat molemmat jakaumat. Esimerkiksi McGillin yliopistossa kehitetyssä kuivatusmallissa (Sidwall et al. 1999b) lasketaan lämmön, nestemäisen veden ja vesihöyryn kulkeutumista rainassa, joka on diskretoitu paksuussuunnassa tyypillisesti 30 osaan.

Lämmönsiirtokerroin paperista ilmaan lasketaan kuivatusmalleissa usein käyttäen hyödyksi Nusseltin, Prandtin ja Reynoldsin dimensiottomia lukuja (esim. Wilhelmsson 1995). Karlsson havaitsi väitöskirjatyössään (1984), että teoreettisesti lasketut lämmönsiirtokertoimet ovat suurempia kuin kokeellisesti mitatut. Hän käytti vapaaviennin lämmönsiirtokertoimelle laskentakaavaa:

$$\alpha_F = 5,3 \cdot u^{0,46} \quad (29)$$

missä

U on koneen nopeus (m/s)

Karlsson (1984) muistuttaa, että vaikka lämmönsiirtokertoimen yhtälö esittää riippuvuuden vain koneen nopeuden funktiona, vaikuttavat asiaan myös taskujen ilmavirta ja mahdollinen viiravienti. Karlssonin mukaan yksiviiravientiselle tapaukselle yllä oleva yhtälö voi antaa liian pieniä arvoja.

Paperista tietyllä aikavälillä ilmaan siirtyvä teho voidaan jakaa höyrystymislämpöön, konvektiiviseen lämpöhäviöön ja sorptiolämpöön. Säteilylämmönsiirto on vähäistä, ja se voidaan jättää huomiotta. Paperin sisään jäävä nettoteho kuluu paperin sisältämän kiintoaineen ja veden lämmittämiseen.

Sorptiolämpö voidaan määrittää kalorimetrin mittauksin tai sorptioisotermistä derivoimalla Clausius-Clapeyronin lakiin perustuen. Paltakari (2000) tarkasteli väitöskirjassaan jälkimmäistä tapaa ja sitä, kuinka eri isotermien matemaattiset esitystavat soveltuvat sorptiolämmön määrittämiseen. Hän raportoi joidenkin esitystapojen johtavan virheellisiin sorptiolämmön kosteus- ja lämpötila-

riippuvuuksiin. Edellä esitetty tapa kuvata isotermi (yhtälö 27) soveltuu kuitenkin hyvin sorptiolämmön määrittämiseen. Sorptiolämmölle saadaan yhtälö:

$$\Delta r_a = \frac{C_3 R_v z^{C_4} (273 + T_p)^2}{e^{(C_1 z^{C_2} + C_3 \cdot T_p \cdot z^{C_4})} - 1} \quad (30)$$

Tässä esitetty tapa laskea veden poistumista voidaan soveltaa sekä rainaan, joka on kosketuksissa kuivatussyylintereiden kanssa, että rainaan vapaaviennin aikana. Vapaaviennin laskennassa on huomioitava, että haihtuminen tapahtuu rainan kummaltakin puolelta.

3.10 Laatusuureiden mallintaminen

Useat paperin ja kartongin laatusuureet, kuten formaatio tai jäykkyys, ovat luonteeltaan sellaisia, että niille ei ole pystytty teoreettisesti johtamaan tarkasti ennustavia malleja. Tarkkuudeltaan karkeita, mutta vaikutussuunnat oikein ennustavia laatumalleja on laadittu, ja niitä käytetään koulutuksessa. Kohtuullisen suoraviivainen tapa mallintaa laatusuureita kvantitatiivisesti on prosessi- ja laatumittausten yhdistäminen tilastollisia menetelmiä käyttäen.

Laatuun vaikuttavien tekijöiden ja laatusuureen välisen matemaattisen yhteyden lisäksi tarvitaan tapa kuljettaa tieto kuidun käsittelystä simulointimallissa niin, että tietoa voidaan käyttää valmiin paperin tai kartongin laatumuuttujan laskemiseksi oikea-aikaisesti. Tähän on esitetty kaksi tapaa:

- *massan ominaisuuksien mallinnus ja kuljetus*: mallinnetaan ohjaussuureiden vaikutukset kuidun ominaisuuksiin, joita kuljetetaan virtausverkossa ja joiden perusteella laatusuureen arvo aikanaan lasketaan
- *kuidun prosessointihistorian tallennus ja kuljetus*: liitetään ohjaussuureiden hetkelliset ajoarvot virtauksen mukaan, esimerkiksi ominaissärmäkuorma kuidun ohittaessa jauhimen, ja kuljetetaan arvot käytettäväksi myöhemmin laatusuureen laskentaan.

IDEAS-simulaattorin Kodiak-versiossa on käytetty ensin mainittua tapaa (Shirt ja Manness 1999). Massan mukana kulkevia ominaisuustietoja ovat muun muassa tiheys ja näennäinen tiheys, CSF ja WRV, kimmomoduuli, entalpia, kuidun karheus, ominaispinta-ala ja -tilavuus sekä viskositeetti. Kahden tai useamman virran sekoituspisteissä käytetään erilaisia sekoitussääntöjä kunkin ominaisuuden uuden arvon määrittämiseksi.

Kuidun prosessointihistoriaan perustuva tapa on kehitetty ja toteutettu Apro Paper -ohjelmaan (Kangas 2001). Sekoitussääntöjä ei tarvita, vaan esimerkiksi kahta erityyppistä massaa sekoitettaessa molempien käsittelyhistoria pidetään tallessa. Lisäksi prosessi- ja laatumittaukset yhdistämällä tehdyn tilastollisen laatumallin käyttö on menetelmässä suoraviivaista.

Tilastollisen laatumallin muodostamisvaiheessa on ratkaistava prosessidatan ajallinen kohdentaminen laatu-tietoihin, jotka usein ovat rullakohtaisia. Tästä syntyy myös kysymys hetkittäisen ennusteen oikeellisuudesta, kun pitkää aikaväliä käyttäen saatu tilastollinen laatumalli otetaan käyttöön dynaamisessa ympäristössä. Tuotantodatasta laaditun mallin ominaispiirteenä on usein pieni toimintaikkuna. Mallin ennustuskyky myös heikkenee ajan kuluessa, mistä syystä mallin parametrit on pystyttävä tarvittaessa päivittämään helposti tai automaattisesti.

Tilastollisen staattisen laatumallin ja mekanistipohjaisen dynaamisen simulointimallin yhdistäminen tuo simulointimallin käytölle uusia mahdollisuuksia. Koulutussimulaattorissa laatumuuttujien esittäminen koulutettaville on hyvin hyödyllistä. Jos laatumallinnuksessa onnistutaan hyvin, voidaan simulaattoria käyttää laadun optimointiin. Staattisen mallin suoraan käyttöön verrattuna sen yhdistäminen mekanistiseen malliin tuo selvän edun: mekanistinen prosessimalli ja mallinnettu automaatio yhdessä rajoittavat optimoinnin sellaisiin ohjaussuureiden arvojen yhdistelmiin, jotka ovat prosessin ja tuotteen kannalta mahdollisia ja järkeviä kombinaatioita (Hämäläinen et al. 1997). Esimerkiksi formaation optimoinnissa toisistaan riippuvien formaatiomallin sisäänmenosuureiden, joita voisivat olla suihkusuhde ja perälaatikon paine, arvoja ei voida muunnella toisistaan riippumattomina.

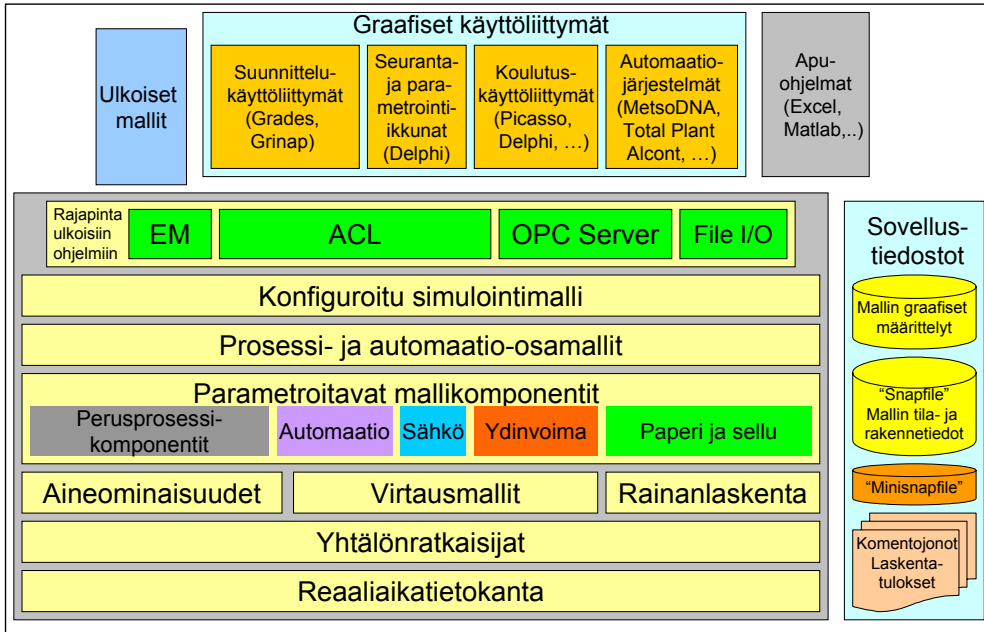
4. Apros-simulointiympäristö

4.1 Simulointiympäristön taustaa ja perusrakenne

Apros (Advanced PROcess Simulator) on VTT:n ja IVO Oy:n (nykyään Fortum Oyj) yhteistyössä kehittämä simulointiohjelmisto. Kehitystyö alkoi varsinaisesti vuonna 1986, mutta hankkeella oli taustanaan yli vuosikymmenen ajan hankittua simulointiosaamista ja eri tarkoituksiin kehitettyjä simulointikoodeja (Silvennoinen et al. 1989). Keskeinen tekijä simulointiosaamisen kartuttamisessa oli Loviisan ydinvoimalan koulutussimulaattorihanke 1970-luvulla.

Apros-ohjelmaa käytettiin aluksi VAX- ja VMS-ympäristöissä, mistä siirryttiin eri Unix-alustoille. Vuonna 1997 otettiin käyttöön ohjelman Windows-versio, jolla simulointisovellukset nykyään lähes yksinomaan tehdään.

Apros-simulointiympäristön laajentaminen sellu- ja paperiprosessien puolelle alkoi VTT:llä vuonna 1994. Ohjelmaa esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1995 (Tuuri et al. 1995). Aluksi ohjelmasta käytettiin nimeä APMS (Advanced Paper Mill Simulator), nykyään nimenä on Apros Paper. Paperi- ja selluprosessien mallien kehityksestä tai niiden soveltamisesta on raportoitu yli 15 diplomii- tai lisensiaatintyössä tai väitöskirjassa.

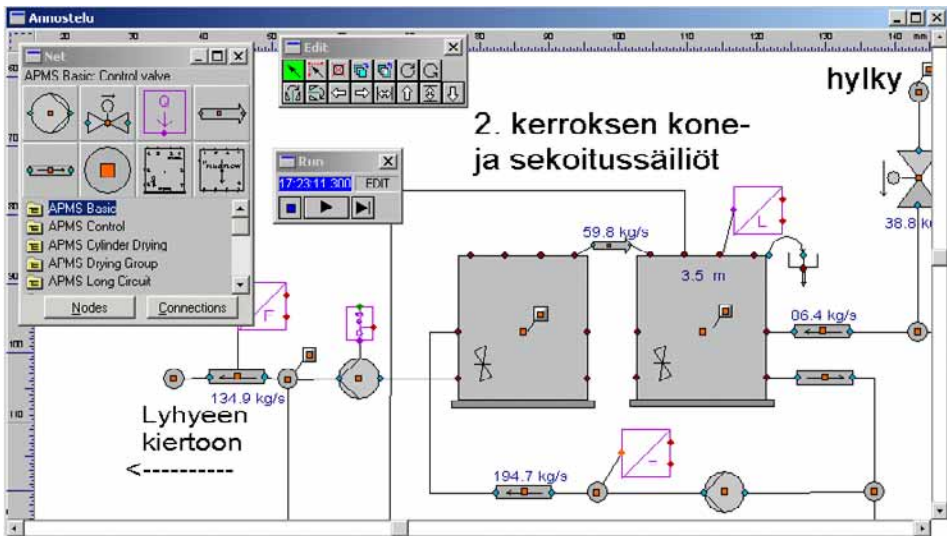


Kuva 27. Periaatekuva Apros-simulointiohjelman rakenteesta ja käyttöympäristöstä.

Kuvassa 27 on esitelty Apros-simulointiympäristön rakennetta. Ohjelmiston perustana on reaaliaikatiekanta ja yhtälönratkaisijat. Virtausmallit, rainanlaskenta ja aineominaisuudet tarvitaan, että parametroiduista prosessikomponenteista voidaan synnyttää laskentatason rakenne, joka mahdollistaa yhtälönratkaisijoiden käytön. Paperi- ja selluprosessien mallinnuksessa käytetään perusprosessikomponentteja, kuten putket ja venttiilit, automaatiokomponentteja sekä sovellusaluekohtaisia prosessikomponentteja. Käyttötarkoituksesta riippuen simulaattoria ajetaan erityyppisten graafisten käyttöliittymien kautta. Kommunikointi Apros ja käyttöliittymien välillä tapahtuu joko ACL:ää (Apros Communication Library) tai Apros OPC Serveriä käyttäen. Mallien rakentamisessa syntyy erilaisia määrittelytiedostoja. Malleja käytettäessä tuloksia kirjoitetaan tekstitiedostoihin tai dataa luetaan sieltä simuloinnin reunaehdoiksi. Datankäsittelyssä apuna käytetään yleensä taulukkolaskentaohjelmaa. Tekstitiedostoja käytetään myös simulointiajajojen suorittamiseen eräajoina. Käyttäjä voi liittää simulointimalliin omia ulkoisia laskentamalleja EM-rajapinnan (External Model) kautta dynaamisesti linkattavina kirjastoina.

4.2 Simulointimallien rakentaminen

Simulointimallit rakennetaan graafisen mallieditorin avulla valitsemalla ja yhdistämällä mallikirjaston komponentteja laitejärjestyksen mukaiseen järjestykseen kuvan 28 mukaisesti. Simuloinnin tarvitsemat lähtötiedot annetaan syöttökaavakkeen avulla. Mallin rakennusvaiheessa komponentit parametroidaan laitedimensioilla (esim. putken pituus) ja toiminnallisilla parametreilla (esim. pumpun ominaiskäyrä). Parametointi tehdään pääsääntöisesti suunnittelutiedon pohjalta käyttäen apuna PI- ja layout-kaavioita.



Kuva 28. Simulointimallin määrittely ja simuloinnin ajaminen tapahtuvat graafisen mallieditorin avulla.

Prosessilaitteiden määrittelyn jälkeen dynaamiseen malliin lisätään ne osat automaatiosta, joiden toimintaa halutaan simuloida. Sovelluskohteesta riippuu, miten tarkasti ja kattavasti automaatio mallinnetaan. Dynaamisen simuloinnin perusluonne vaatii yleensä ainakin perussäätöjen rakentamisen simulointimalliin.

Mallia rakennettaessa lisätään tyypillisesti muutamia mallikomponentteja, esimerkiksi säiliö pinnankorkeuden säätöineen, ja tämän jälkeen toimivuus testataan simuloimalla. Kun suurempi mallikokonaisuus on valmis, mallin toimivuutta testataan vertaamalla simulointituloksia mittausdataan mikäli mahdollista. Mallin rakennetta voidaan helposti muuttaa ja täydentää myöhemmin. Mallin

rakenteen muutos voi tapahtua myös osana simulointikoetta. Näin voidaan tutkia laitteiston ja automaation käyttäytymistä epänormaalissa tilanteessa, esimerkiksi putken vuototapauksessa.

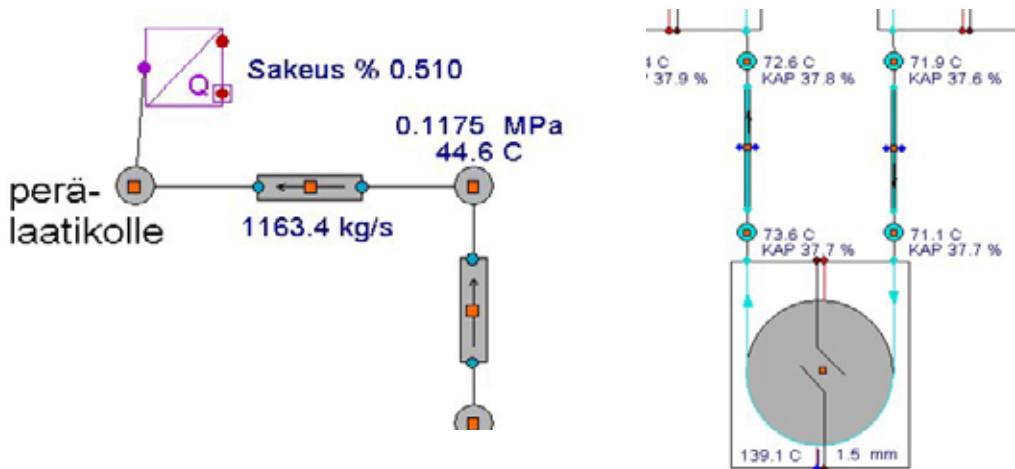
4.3 Simulointimallien ratkaisuperiaatteet

Apros-ohjelman mallit perustuvat fysiikan ja kemian peruslakeihin sekä kokeellisiin riippuvuuksiin. Keskeisenä periaatteena kehityksessä on ollut, että käyttäjältä ei vaadita simuloitavien ilmiöiden matemaattisten mallien hallintaa. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin kahta paperikonemalleissa tarvittavaa ratkaisuperiaatetta.

4.3.1 Virtausverkon laskenta

Apros-ohjelman virtauslaskenta on perinteisesti perustunut paine-virtausratkaisijan käyttöön, jota on käytetty myös tämän työn kokeellisessa osassa.

Virtausverkkomalli koostuu tietyssä tilassa (paine, lämpötila ja koostumus) ja tietyllä korkeudella (metrejä valitusta 0-tasosta) olevista solmupisteistä (ns. termohydrauliset solmut) ja niitä yhdistävistä haaroista (esim. pumppu, putki tai venttiili) kuvan 29 mukaisesti. Ratkaisu perustuu massan, liikemäärän ja energian säilymsyhtälöihin. Sellu- ja paperiprosessien simulointisovelluksissa voidaan käyttää oletusta, että virtaavan seoksen faasit ovat homogeenisena seoksena. Tällöin esimerkiksi neste ja mahdollinen höyry virtaavat samalla nopeudella. Tällä oletuksella säilymsyhtälöistä tarvitaan kutakin vain kerran ratkaisussa, ja niinpä puhutaan kolmiyhtälömallin käytöstä. Apros-ohjelman virtauslaskenta mahdollistaa myös viisi- ja kuusiyhtälömallien käytön. Niissä sovelletaan joko massa- ja energiayhtälöitä, tai kaikkia kolmea yhtälöä sekä kaasun- että nestefaasille.



Kuva 29. Yksityiskohtia simulointimallin paine-virtaus-verkosta ja rainamallista. Vasemmalla perälaatikon lähestymisputkistoa, oikealla kuivatussylinteri ja kaksi vapaavientiä kuivatusosan alusta.

Jokaiselle laskentasolmulle ratkaistaan säilymisyhtälöistä linearisoidut yhtälöt. Kaikki ne solmut, joista on välitön yhteys tiettyyn solmuun, vaikuttavat kyseisen solmun ratkaisuun. Näin syntyvät prosessin rakennetta kuvaavat paineen, lämpötilan ja massaosuuksien muotoa $Ax = B$ olevat matriisiyhtälöt. Matriisiin kukin rivi vastaa yhdelle solmulle tarvittavaa yhtälöä. Aprosin ratkaisujärjestelmän ydin on täten lineaarisen yhtälöryhmän ratkaisu. Ratkaisussa käytetään hyväksi kerroinmatriisi A:n erikoispiirteitä, joista tärkein on harvuus. Virtausyhtälöiden epälineaarisuuden vuoksi ratkaisu haetaan iteroimalla. Ratkaisu toistetaan kokonaisuudessaan jokaisella aika-askeleella, eli tyypillisesti 0,2 sekunnin välein. Tarkempia kuvauksia ratkaisujärjestelmästä ja ohjelmiston rakenteesta löytyy runsaasti kirjallisuudesta (esim. Silvennoinen et al. 1989, Laukkanen 2001).

Vuodesta 2001 lähtien simulointiympäristössä on ollut käytössä myös sekventiaalinen virtausratkaisu. Siinä virtauksia ei ratkaista paine-eron perusteella, vaan jonkin virtauslinjassa olevan komponentin, kuten säätöventtiilin, määräämällä. Laskenta etenee kullakin aika-askeleella ennalta määrättyssä järjestyksessä komponentista toiseen. Aprosin sekventiaalista virtausratkaisua voidaan käyttää silloin, kun simulointisovelluksen luonne ei vaadi paineiden ratkaisemista. Mallin määrittelyparametreja on selkeästi vähemmän, jolloin rakentaminen on nopeam-

paa. Simuloinnissa voidaan käyttää pidempää aika-askelta (esim. 5 s), mikä nostaa simulointinopeutta merkittävästi.

4.3.2 Rainaosan laskenta

Paperikoneen lyhyessä kierrossa putkiverkko päättyy perälaatikolle, missä tapahtuu rainaus. Myös simulointimallissa laskentatapa muuttuu perälaatikon kohdalla. Rainaosa on mallinnettu käyttäen tilapisteitä, jotka liikkuvat viiran nopeudella. Tilapisteet ottavat perälaatikolta "näytteen", eli tallentavat perälaatikkoon virranneen massan hetkelliset ominaisuudet. Samalla perälaatikon ulosvirtaus tallentuu tilapisteen massavirraksi. Tilapisteet liikkuvat koneen nopeudella ja niiden sisältämien tilasuureiden arvot muuttuvat tilapisteen ohitettua jonkun vedenpoistokomponentin. Mallissa raina rakennetaan peräkkäisistä vedenpoistokomponenteista, kuten viiraosasta, puristinnipeistä ja kuivatussylintereistä sekä vapaavienneistä. Näitä paperikonekomponentteja kytketään niin sanottujen rainapisteiden väliin, kuten kuvan 29 oikealla puolella on esitetty. Tässä kuvattavaa rainan laskennallista käsittelyä kutsutaan jäljempänä rainanlaskennaksi.

Rainan paikallista tilaa voidaan seurata rainapisteistä, sillä liikkuvat tilapisteet päivittävät niiden tilan ohi kulkiessaan. Tilapisteiden määrä on käyttäjän asetettavissa. Tarkastellaan esimerkkinä 300 m pitkää paperikonetta. Jos kone on mallinnettu käyttäen 20 tilapistettä, tarkoittaa se yhtä pistettä joka 15. metri. Oletetaan koneen nopeudeksi 5 m/s. Tällöin yksittäinen vedenpoistokomponentti, esimerkiksi 50. kuivatussylinteri, lasketaan joka kolmas sekunti. Myös yksittäisen rainapisteen, esimerkiksi tähän 50. sylinteriin kytketyn, tila päivittyy yhtä usein. Rainapisteisiin päivitetään muun muassa seuraavien suureiden arvot:

- rainan massavirta (kg/s)
- rainan keskimääräinen lämpötila (°C)
- rainan koostumus massaosuuksina
- rainan kuiva- ja märkäneliöpaino (g/m^2)
- rainan keskimääräinen kosteus ($\text{kg H}_2\text{O/kg k.a.}$)
- rainan paksuus (mm).

Osa mallikomponenteista, kuten kuivatussylinteri, sisältää laskennassaan tarkemman paikallisen konesuuntaisen diskretoinnin. Virtausverkon laskenta ja

rainanlaskenta yhtyvät paitsi perälaatikolla, myös viira- ja puristinvesien palatesa lyhyeen kiertoon sekä reunanauhojen tai ratakatkon aikana koko radan pudotessa pulpperiin. Kuivatussyylinterimallissa rainanlaskenta antaa höyry- ja lauhdejärjestelmän virtausverkolle lämmönsiirron reunaehdot sylinterin seinämästä otettavana lämpötehona.

4.4 Toteutettuja simulointisovelluksia

Yksityiskohtaisen prosessi- ja automaatiomallin rakentaminen vie suhteellisen paljon aikaa, sillä parametrintyötä on paljon. Kustannustehokkuus paranee, jos on mahdollista hyödyntää tehtyä mallia useassa vaiheessa prosessin elinkaarta. Suunnitteluprojektin aikana rakennettua ja hyödynnettyä simulaattoria voidaan käyttää myös (Laukkanen et al. 1998)

- koulutukseen
- käyttöönoton suunnitteluun
- automaatiojärjestelmän testaamiseen
- säätöjen virittämiseen
- ajotapojen kehittämiseen
- tulevien prosessi- ja automaatiomuutosten suunnitteluun.

Hyviä yleisiä kuvauksia simulointimallien hyödyntämisestä eri käyttökohteisiin löytyy runsaasti kirjallisuudesta (Eskes 1992, Laukkanen 2001, Wasik 2002). Seuraavassa esitellään lyhyesti joitakin Apros Paper -simulaattorilla tehtyjä sovelluksia.

Vuonna 1996 rakennettiin simulointimalli Kirkniemen paperitehtaan suunnitella olevasta vähävetisestä paperikoneesta (Laukkanen et al. 1998, Laukkanen 2001). Mallia käytettiin ennen tehtaan käyntiinlähtöä häiriöaineiden kulkeutumisen dynamiikan tutkimiseen ja käyttöhenkilökunnan koulutukseen. Simulaattori yhdistettiin Damatic XD -automaatiojärjestelmään, jolloin koulutuksessa päästiin hyödyntämään aitoja ohjausnäyttöjä ja -näppäimistöjä.

Sunilan sellutehtaalle vuonna 1998 valmistuneesta valkaisimosta rakennettiin koulutussimulaattori, jota käytettiin erityisesti prosessin käynnistämisen ja pysäyttämisen harjoitteluun ennen varsinaisen laitoksen käynnistymistä (Tervola et

al. 1999). Simulaattori liitettiin laitoksen TotalPlant Alcont -automaatiojärjestelmään niin, että automaatiosovelluksen lukitukset hyödynnettiin osana koulutussimulaattoria (Lappalainen et al. 1999). Liittämistyössä havaittiin virheitä automaatiosovelluksessa, mikä edesauttoi samaan aikaan edennyttä automaatiojärjestelmän testaustyötä.

Dynaaminen simulaattori sopii hyvin prosessi- ja säätösuunnittelua yhdistäväksi työkaluksi (Paljakka et al. 2000, Kokko 2002). Erityistä hyötyä simuloinnista saadaan, kun suunnitellaan totutuista ratkaisuista selvästi eroavaa konseptia. Tähän tarkoitukseen Apros Paperia on käytetty Metso Oyj:n uuden paperinvalmistuskonseptin, OptiFeedin kehityksessä (Kokko et al. 2000, Kokko 2002).

Simulaattorin yhdistäminen automaatiojärjestelmään mahdollistaa hyvin realistisen koulutussimulaattorin rakentamisen, mutta antaa myös mahdollisuuden testata todennukaisesti säätöratkaisuja uudentyyppisille prosesseille, joista ei ole vielä käytännön kokemuksia. Menetelmää hyödynnettiin Ahlstrom Machinery Oy:n (nyk. Andritz) uuden lähestymisjärjestelmäkonseptin ShortFlow:n kehityksessä, jossa liitännä tehtiin TotalPlant Alconttiin (Matula et al. 1999). Metso Oyj:n päällepuhalluskuivatuksen säätöratkaisuja testattiin vastaavasti metsoDNA-liitoksen avulla (Kääriäinen 2001).

Apros Paperin laskentaa on laajennettu kattamaan myös rainan poikkisuunta. Laajennusta on sovellettu laimennusperälaatikon ja radan poikkisuuntaisten säätöjen tutkimiseen (Nissinen et al. 2000).

Tässä työssä raportoidun kartonginvalmistusprosessin mallintamista ja mallin hyödyntämistä lajinvaihtojen tutkimiseen on esitelty kirjallisuudessa jo aiemmin (Lappalainen et al. 2001). Vehviläinen (2001) raportoi yksityiskohtaisesti mallin käyttämisestä lajinvaihtoautomaation virittämisessä. Ansaharju (2002) tutki työssään vaikutuksia ja mahdollisuuksia, joita päällepuhalluskuivaimen lisääminen toisi lajinvaihtojen ja kosteuden hallinnan kannalta.

5. Kolmikerroskartonkikoneen malli

5.1 Kohdeprosessin kuvaus

Stora Enso Oyj:n Kaukopään tehtaiden kartonkikone numero kaksi (KA2) tuottaa valkoisia päällystämättömiä ja mineraalipäällystettyjä nestepakkaus- ja elintarvikekartonkeja, graafisia kartonkeja ja pakkauskartonkeja (Myller 2000). Koneen tuotantokapasiteetti on 210 000 tonnia vuodessa. Koneen ratalevyys rullaimella on 5,6 m. Kartongin massakomponentteja ovat koivu- ja mäntysellu, CTMP eli kemikumahierre sekä hylkymassa. Kuituraaka-aine valmistetaan Kaukopäässä kartonkitehtaan läheisyydessä.

Kartonginvalmistusprosessin alkupäässä massan ominaisuuksia muutetaan jauhamalla. Jauhatuksen jälkeen erityyppiset massat annostellaan sekoitussäiliöön, jolloin määrätään kuitujen keskinäiset määräsuhteet valmiissa tuotteessa. Sekoitussäiliöstä massa pumpataan konesäiliöön, ja samalla massan sakeutta vakioidaan säätämällä sitä laimentamalla. Konesäiliöstä on ylivuoto sekoitussäiliöön, jolloin konesäiliön pinnankorkeus pysyy käytännöllisesti katsoen vakiona. Konesäiliöstä massa pumpataan lyhyeen kiertoon. Lyhyessä kierrossa massaa puhdistetaan ja joukkoon lisätään yleensä erilaisia lisä- ja apuaineita, kuten neutraaliliimaa, alunaa, tärkkelystä, värejä, lipeää sekä retentioaineita.

Lyhyeen kiertoon tuleva konemassa pumpataan pyörrepuhdistuslaitokseen, jonka syöttöpumppu imee massan sekaan laimennusvettä viirakaivosta. Pyörrepuhdistuslaitoksesta päävirta palaa uudelleen viirakaivon alaosaan laimennettavaksi. Tässä kohtaa prosessi poikkeaa tyypillisestä paperikoneesta, jossa pyörrepuhdistuksen jälkeen massasta poistetaan yleensä ilma ilmanpoistosäiliössä. Toisessa laimennuksessa peränsyöttöpumppu imee viirakaivosta jälleen vettä ja pumppaa laimentuneen massan viimeiseen puhdistukseen konesihdeille ennen perälaatikkoa. Perälaatikko levittää massan tasaisesti viiralle. Suurin osa vedestä poistuu viiralta painovoiman ja alipaineen avulla ja johdetaan viirakaivoon. Vedен poistuessa kuidut tarttuvat toisiinsa ja muodostuu raina.

KA2:n kartonki muodostuu pinta-, tausta- ja runkokerroksesta. Koneessa on siten myös kolme perälaatikkoa ja lyhyttä kiertoa. Kuituraaka-aineen annosteluja sekoitus- ja konesäiliöineen prosessissa on kaksi: pinta- ja taustakerroksille yhteinen ja keskikerrokselle omansa.

Rainauksen ja kerrosten yhdistämisen jälkeen raina on noin 20-prosenttista kuiva-ainepitoisuudeltaan. Rainasta poistetaan vettä seuraavaksi märkäpuristuksessa mekaanisesti puristamalla, jolloin kuiva-ainepitoisuus kohoaa noin 38 %:iin. Vedenpoistoa jatketaan kuivatusosalla noin kolmen prosentin kuiva-aineeseen saakka. Alkukuivatuksen jälkeen kartonki pintaliimataan tärkkelyksellä liimapuristimella. Pintaliimauksessa kostunut kartonki kuivataan vielä jälkikuivatusosalla ja kalanteroidaan. Lopullinen kuiva-ainepitoisuus kartongilla on tyypillisesti noin 92–94 %. Kartonki voidaan myös päällystää mineraalipäällystysyksiköillä, minkä jälkeen se vielä kalanteroidaan uudelleen lopullisten pintaominaisuuksien aikaansaamiseksi. Kuvassa 30 on esitetty KA2-koneen rakenne perälaatikoilta rullaimelle.



Kuva 30. KA2-koneen rakenne perälaatikoilta rullaimelle.

Valmis kartonki rullataan suuriksi konerulliksi, jotka siirretään pituusleikkaukseen. Pituusleikkurilla konerullasta leikataan leveydeltään ja halkaisijaltaan asiakkaan tarpeisiin soveltuvia asiakasrullia. Nestepakkauskartonkien tapauksessa asiakasrullat jatkojalostetaan päällystämällä ne polymeeripäällysteillä erillisillä jalostuskoneilla. Rullat voidaan myös arkittaa asiakkaan toivomusten mukaan (Myller 2000).

5.2 Mallin rajaus

KA2-malli alkaa jauhatuksen syöttösäiliöistä. Säiliöt toimivat mallin reunaehtoina, eli niiden tila ei simuloinnin aikana muutu. Reunaehtoina annetaan pinnan korkeus, lämpötila ja massan koostumus. Massan tuorekuituraaka-aineet on määritelty kukin omana komponenttinaan. Massa koostuu seuraavista komponenteista: vesi, koivusellu, havusellu, CTMP-massa ja muut kiintoaineet. Ryhmään muut kiintoaineet on yhdistetty kaikki prosessiin annosteltavat lisä- ja täyteaineet. Hylkymassa koostuu samoista komponenteista.

Tässä työssä esitelty malli käsittää edellä kuvatun KA2-kartonkikoneen prosessin jauhatussäiliöistä aina viidennen höyryryhmän jälkeiselle mittaraamille asti. Malliin kuuluvat myös liimapuristin ja höyryryhmät 6 ja 7, mutta niiden käsittely on jätetty yksinkertaisuuden vuoksi pois.

Jauhatuksen vaikutuksia massaan ei ole tässä työssä pyritty mallintamaan. Jauhlinjat on mallinnettu todellisen pituisiksi ja jauhimilla on lievä pumppausvaikutus. Lähestymistapa mahdollistaa sakeushäiriöiden ja mahdollisten häiriöaineiden seuraamisen jauhatussäiliöiltä lähtien.

Molemmat sekoitus- ja konesäiliöjärjestelmät (kuva 28) on mallinnettu, samoin kuin kaikki kolme lyhyttä kiertoa. Lyhyissä kierroissa reunaehtoina toimivat pyörrepuhdistuslaitosten viimeisten portaiden rejektivirtojen vastapaineet sekä rejektisihtien rejektivirtojen vastapaineet. Viirakaivojen ylivuodot johdetaan kiertovesisäiliöön, josta osa mallinnetun prosessialueen laimennusvesistä otetaan. Muiden kiertovesisäiliöstä lähtevien ja sinne tulevien putkien päätepiisteet toimivat mallin reunaehtoina.

Apros Paper mahdollistaa kuivatusosan höyry- ja lauhdejärjestelmän mallintamisen hyvin yksityiskohtaisesti verrattuna yleisesti kuivatusmalleissa käytettyyn tapaan määritellä sylinterin sisällä oleva paine vakioksi. Tässä työssä sylinterikomponentteihin on mallinnettu höyryä tuovat putket ja venttiilit sekä vastaavasti lauhdetta ja läpipuhallushöyryä vievät sifoniputket. Höyry otetaan kolmesta eripaineisesta höyrytukista, jotka on mallinnettu voimalaitoksen suuntaan niin, että höyryn virtausmittarit vielä sisältyvät malliin. Lauhdejärjestelmästä malli käsittää ryhmien lauhdesäiliöt, hönkähöyrylauhduttimen sekä lauhteiden keräyssäiliön. Mallinnettu alue loppuu lauhteiden keräyssäiliön jälkeiseen lauhteen virtausmittaukseen.

5.3 Säiliöiden ja virtausverkon mallinnus

Apros-simulointiympäristössä säiliöt voidaan mallintaa sekoituksen suhteen ideaalisena tai tulppavirtaussäiliöinä. Näitä tapoja voi myös yhdistellä. Tässä työssä esitetyissä simuloinneissa säiliöt on kuvattu ideaalisekoitussäiliöinä. Viirakaivojen mallinnuksessa kokeiltiin myös useamman ideaalisekoitussäiliön yhdistelmää sekä tulppavirtauksen käyttöä. Säiliöiden määrittelyssä tarvittavat

tiedot, kuten pohjan pinta-ala ja säiliön korkeus, on saatu PI-kaavioista ja rakennepiirustuksista.

Putkien määrittely tapahtuu Aprosissa antamalla putken pituus, sisähalkaisija ja tiedot virtausvastuksesta. Konsentraatioiden kulkeutumisen kannalta putki voidaan mallintaa usean ideaalisekoittimen sarjana tai tulppavirtausputkena. Putkien pituustietoja on määritetty paikan päällä silmämääräisesti arvioimalla ja osittain laskettu putkistopiirustuksista. Virtausvastuksen voi määrittellä joko putken paikallisvastuskertoimen avulla tai nimellistoimintapisteen virtaus-, painehäviö- ja tiheysarvot antamalla. Putkien virtausvastukset on enimmäkseen arvioitu mallia rakennettaessa. Termohydraulisten solmupisteiden korkeustiedot määräävät putken päiden korkeustasot. Korkeustiedot on saatu PI- ja layout-kaavioista, säiliöiden rakennepiirustuksista ja osittain paikan päällä arvioimalla. Sekoittuminen putkien yhdistymispisteissä oletetaan ideaaliseksi.

Pumppujen määrittelyssä annetaan pumpun tuoma pituus virtauslinjaan, virtauspinta-ala ja tiedot pumpun ominaiskäyrästä. Ominaiskäyrä annetaan nimellistoimintapisteen pyörimisnopeuden, tilavuusvirran ja nostokorkeuden sekä maksiminostokorkeuden avulla, tai vaihtoehtoisesti antamalla pumppukäyrä piste pisteeltä. KA2-mallin pumput on määritelty PI-kaavion tietojen perusteella.

Säätöventtiilien määrittelyssä annetaan venttiilin pituus, sisähalkaisija ja tiedot venttiilin toimintakäyrästä. Toimintakäyrä määräytyy nimellistoimintapisteen asennon, virtauksen, painehäviön ja tiheyden avulla. Tiedot on saatu PI-kaavioista ja osittain arvioitu vastaamaan tyypillisiä suunnittelussa käytettäviä arvoja.

Säädettävien pumppujen ja venttiilien toimintamäärittelyihin kuuluu myös laiteohjaimiin määriteltävä nopeus venttiilin aukenemiselle tai sulkeutumiselle ja pumpun kierrosluvun muuttumiselle. Tiedot on arvioitu mallin rakennusvaiheessa, ja validointivaiheessa niitä on tarvittaessa muutettu mittausdataan vertailun perusteella.

Massatyyppin ja -sakeuden vaikutusta massan virtausominaisuuksiin ei huomioida, vaan laskennassa käytetään puhtaan veden aineominaisuuksia. Mallinnettavalla alueella kartonginvalmistusprosessia sakeus vaihtelee nollassa ja noin neljän prosentin välillä. Tyypillinen virtausnopeus massa- ja vesijärjestelmien

putkissa on mallista katsottuna 2,5 m/s. Tehty oletus ei näin ollen heikennä mallinnuksen tarkkuutta oleellisesti.

Khanbaghi et al. (2001) esittivät, kuinka sihti voidaan mallintaa osana painevirtaus-verkkoa. He myös esittävät mallin toimivan mittaustulosten mukaisesti. Apros Paperissa käytetään samaa lähestymistapaa hyödyntäen simulointiympäristön valmiita mallikomponentteja. Aksepti- ja rejektihaaran painehäviöt haettiin mittaustulosta yhdessä toimintapisteessä. Mekanistisen mallinnustavan vuoksi painehäviökäyttäytyminen on oikeansuuntaista myös tuon toimintapisteen ulkopuolella. Sihtien erottelutoiminta perustuu vakioerotuskertoimien käyttöön:

$$s_{A,i} = \frac{c_{A,i} \dot{m}_A}{c_{F,i} \dot{m}_F} \quad (31)$$

missä

$s_{A,i}$	on	aineen i erotuskerroin akseptivirtaan (%)
$c_{A,i}$		aineen i osuus akseptivirrassa (%)
\dot{m}_A		akseptin massavirtaus (kg/s)
$c_{F,i}$		aineen i osuus syöttövirrassa (%)
\dot{m}_F		syötön massavirtaus (kg/s)

Eri raaka-ainekomponenteille määriteltiin keskenään samat erotuskertoimet PI-kaavion sakeustietojen perusteella, sillä jakautumista selvittäviä mittauksia ei ollut käytettävissä. Vedelle ei anneta erotuskerrointa, vaan se määräytyy painevirtaus-ratkaisijan laskemien massavirtojen ja muiden komponenttien jakautumisen kautta. Epäpuhtauspitoisuuksia ei ole malliin määritetty.

Pyörrepuhdistuslaitokset on mallinnettu niin, että kukin porras kuvataan yhtenä virtaushaarana, jossa tapahtuu erottumista. Kussakin portaassa käytetään vakioituja erotuskertoimia (yhtälö 31), jotka määriteltiin vastaavasti kuin edellä kerrottiin konesihtien yhteydessä.

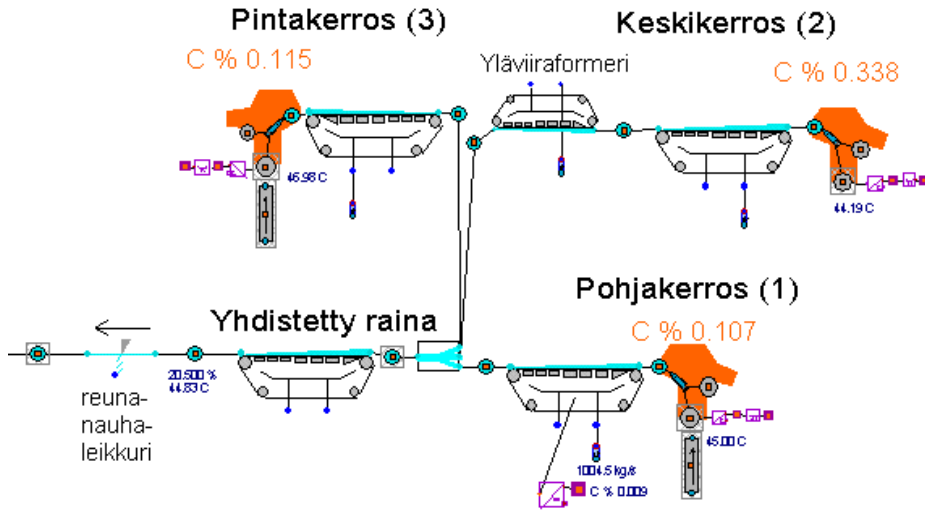
KA2-koneen kolme perälaatikkoa ovat keskenään samanlaisia ilmatyynyillä varustettuja reikätelaperälaatikoita. Koska valmistettavan kartongin pinta- ja taustakerrokset ovat selvästi ohuempia kuin keskikerros, ajetaan niitä pienemmällä

virtauksilla ja alhaisemmilla sakeuksilla. Tässä työssä on käytetty sellaisenaan Apros Paperin hydraulisen perälaatikon mallikomponenttia. Ilmatyyny säätöineen puuttuvat, mutta validointitulosten perusteella yksinkertaistus voidaan mallin käyttötarkoitus huomioon ottaen tehdä. Mallia ei toki tällaisena voi käyttää perälaatikon alueen kaikkien säätöjen yksityiskohtaiseen tarkasteluun.

5.4 Viira- ja puristinosien mallinnus

5.4.1 Viiraosa

Kuten aiemmin kohdassa 4.3.2 kuvattiin, rainaosa on mallinnettu käyttäen tilapisteitä, jotka liikkuvat viiran nopeudella. Tilapisteiden sisältämä informaatio kuvaa kartongin tilaa eri kohdissa rullaimelle kulkevaa rainaa. KA2-koneen viiraosa muodostuu kolmesta tasoviirasta. Kuva 31 esittää viiraosan mallin graafista näkymää. Kerrosten yhdistämisen jälkeen viiraosa jatkuu vielä noin kymmenen metrin matkan. KA2-mallissa on neljä erillistä rainamallia tilapisteineen. Kukin KA2-koneen kolmesta perälaatikosta aloittaa kerroskohtaisen viiraosan pituisen rainamallin. Tämän jälkeen kunkin rainamallin tilapisteiden kuljettama informaatio yksittäisten kerrosten tilasta yhdistetään ja uudelle yhdistetylle rainalle lasketaan homogeeniset ominaisuudet. Yhdistettyä rainaa kuvaava rainamalli käsittää viiraosan lopun, puristinosan ja kuivatusosan, eli se ulottuu mallinnetun alueen loppuun saakka.



Kuva 31. KA2-mallin viiraosan laskennassa kartongin kolme kerrosta yhdistetään ja niiden ominaisuudet homogenisoidaan.

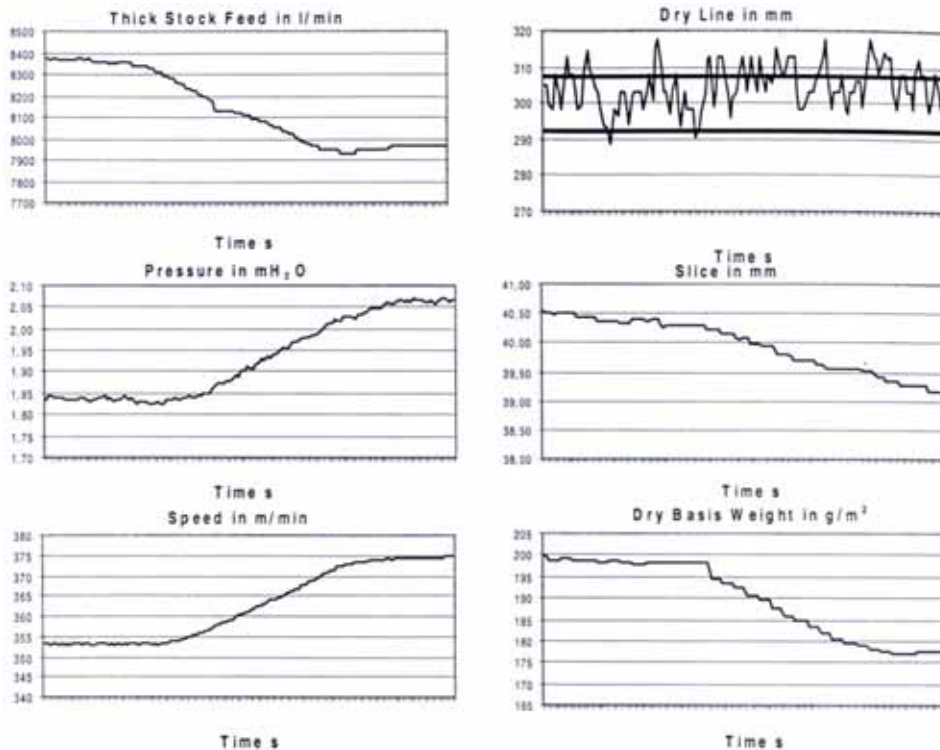
Massakomponenttien retentiot viiraosilla oletetaan mallissa vakioiksi. KA2-koneella oletus on kohtuullisen hyvä. Raaka-aineena ei juurikaan käytetä retention mallintamisen kannalta ongelmallisia täyteaineita. Suurin osa kuiva-aineesta tulee keskikerroksesta, jonka kuituretentio pysyy hyvin muuttumattomana suuren neliömassan takia.

Retentiota suurempana ongelmana voidaan pitää vedenpoiston kuvaamista. Vedenpoistoelementteinä käytetään rintapöytää, foililaatikoita, listaimulaatikoita ja kuivaimulaatikoita. Keskikerroksen viiran päälle on lisäksi jälkiasennuksena lisätty yläpuolinen vedenpoistoyksikkö eli yläviiraformeri.

KA2-koneen massalla ei ole tehty tutkimuksia, jotka antaisivat lisätietoa viiraosan vedenpoiston mallintamiseen. Ainoat saatavilla olevat vedenpoistoon liittyvät mittaustulokset ovat viiratoimittajien tekemiä. Mallinnuksen kannalta ne ovat kuitenkin riittämättömiä, sillä mittaukset on tehty vain yhdessä toimintapisteessä. Tehtaalla yritettiin ottaa näytteitä rainasta ennen puristinosaa kuiva-aineen laboratoriomäärittystä varten, mutta olosuhteet olivat luotettavan näytteen saamiseksi liian hankalat. Kannettavat, rainan läpi mittaavat kosteusmittaritkaan eivät sovellu kartonkikoneelle rainan paksuudesta johtuen.

Kettunen (1995) esitteli viiraosan vedenpoiston mallintamisesta julkaistua kirjallisuutta ja vertasi eri lähestymistapoja keskenään. Työ tehtiin viiraosan mallien kehittämiseksi Apros Paper -ohjelman käyttöön, mutta tulokset mallien sovellettavuudesta eivät olleet rohkaisevia. Kun tuolloiset lähtötiedot vastasivat pitkälle tilannetta tämänkin työn aikana, valittiin KA2-malliin yksinkertainen lähestymistapa, eli viiraosien vedenpoisto lasketaan vakiokertoimisilla erotuskomponenteilla kuten retentiotkin. Poikkeuksen tekee viiraosan loppuosa, jossa kerrokset on jo yhdistetty toisiinsa. Tältä osalta puristimelle lähtevän rainan kuiva-ainepitoisuus on vakioitu arvoon 20,5 %, ja vettä poistuu kyseistä kuiva-ainepitoisuutta vastaava määrä.

Perusteena kuiva-ainepitoisuuden vakioimiselle on se, että koneen ajajat säätävät huuliaukkojen avaumia vesirajan paikan perusteella. Kun vesiraja pysyy suhteellisen pienen alueen sisällä, oletetaan, että puristimelle jatkavan rainan kosteuskin pysyy likimain vakiona. Oletuksen hyvyttä voidaan tarkastella KA2-koneen naapurikoneelta (Kaukopään Kartonkikone 1, jäljempänä KA1) saatujen tulosten avulla. Niemi et al. (1998) ovat tutkineet KA1-koneen pohjakerroksen tasoviiran vesirajan mittausta ja takaisinkytkettyä säätöä. Vesirajan paikka mitataan videokameran ja kuvankäsittelyn avulla, ja sitä säädetään huuliaukkoa avaamalla ja sulkemalla.



Kuva 32. Kartonkikoneella (KA1) suoritettu lajinvaihto, jonka aikana vesiraja (ylhäällä oikealla) on ollut takaisinkytketyssä säädössä (Berndtson et al. 1999). Huuliaukon avauma on kuvassa keskellä oikealla. Aikaskaala 1 380 sekuntia.

Vesirajan paikan automaattinen säätö pidettiin päällä myös lajinvaihtojen aikana (Berndtson et al. 1999). Kuvassa 32 on esitetty tällainen lajinvaihto. Lajinvaihdossa kuivaneliöpainoa pudotetaan noin 20 g/m^2 (kuva oikealla alhaalla) muuttamalla konemassan syöttöä (ylhäällä vasemmalla) ja koneen nopeutta (alhaalla vasemmalla). Vesiraja (ylhäällä oikealla) pysyy lajinvaihdon aikana paikallaan noin kahden senttimetrin tarkkuudella. Oikeanpuoleisesta keskikuvasta nähdään, että säätö on saanut tämän aikaan sulkemalla huuliaukkoa noin puoli-toista millimetriä.

Tässä Berndtsonin et al. (1999) esittämässä lajinvaihdossa vesiraja viiralla pysyi suhteellisen paikallaan, kun huuliaukkoa suljettiin rampinomaisesti lajinvaihdon aikana kohti sopivaa asetusarvoa. Jos tulos on yleistettävissä, niin KA2:n mallinnuksessa tehty oletuskin pätee tietyin varauksin. Päätelyssä tosin oletetaan

vesirajan paikan stabiiliuden merkitsevän myös kuiva-ainepitoisuuden pysymistä vakiona, mihin Niemi kollegoineen tutkimuksissaan ei ota kantaa. Käytännössä oletusta heikentää kaksi seikkaa: Vaikka huuliaukkoa ohjataan KA2:lla välillä lajinvaihdossa rampittamalla (esim. Lappalainen et al. 2001), niin uuden lajin tavoitearvo ei välttämättä ole niin hyvä, ettei käyttäjän tarvitsisi lajinvaihdon jälkeen muuttaa huuliaukkoa. Toisaalta monet KA2-koneen ajajat ohjaavat huuliaukkoja käsin (esim. kuva 37), jolloin ainakin suurempien askelten tapauksessa vesirajan paikka ja kuiva-ainepitoisuus muuttuvat. Viiraosan jälkeisen kuiva-ainepitoisuuden ja vesirajan paikan välistä yhteyttä on vaikea arvioida, sillä aiheesta ei löytynyt kirjallisuus- eikä mittaustietoa.

On syytä muistaa, että mallissa käytetty kuiva-ainepitoisuuden vakiointi ei merkitse simuloidun kosteuden täydellistä tunteettomuutta huuliaukkojen muutoksille. Avaamiseen ja sulkemiseen liittyvä perälaatikon sakeuden ja ulosvirtauksen muuttuminen aiheuttavat puristus- ja kuivatusosille tulevan absoluuttisen kuiva-ainevirtauksen ja samalla vesivirtauksen muutoksen, mikä nähdään myös simuloidussa loppukosteudessa.

5.4.2 Puristinosa

KA2-koneella puristinosa koostuu kolmesta vettä poistavasta puristinnipistä sekä tasauspuristimesta. Puristusosan ensimmäinen nippi on varustettu kahdella huovalla, ja kaksi seuraavaa ovat yksihuopaisia. Neljäntenä nippinä oleva tasauspuristin ei poista vettä. Puristosan vedenpoisto lasketaan luvussa 3.8 esitetyllä alenevan permeabiliteetin mallilla (yhtälö 21).

Puristinmallin parametointi perustuu kirjallisuuslähteisiin, joissa alenevan permeabiliteetin mallia on käytetty, sekä KA2-koneelta tehtyihin mittauksiin. Raportoitujen parametrien vaihteluvälit ovat olleet pyöristäen seuraavat (McDonald ja Kerekes 1995, McDonald ja Amini 2000, McDonald et al. 2000):

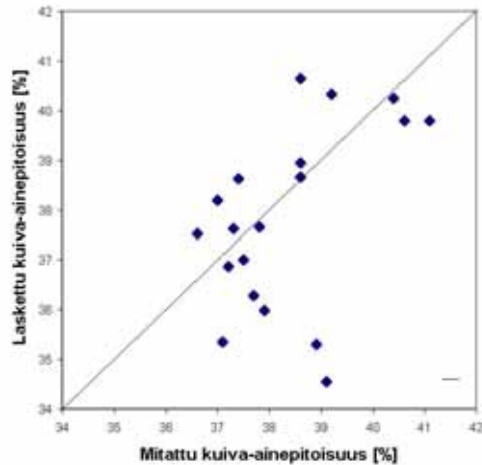
$$\begin{array}{l} 2,4 < n < 5,9 \\ 5,3 \cdot 10^{-12} < A_s < 4,0 \cdot 10^{-11} \end{array}$$

KA2:n puristinnippien välistä ei voida mitata kuiva-ainepitoisuutta. Kuten viiraosan yhteydessä edellä mainittiin, myöskään puristosalle sisään menevän rai-

nan kuiva-ainepitoisuutta ei onnistuttu luotettavasti mittaamaan. Puristinosan jälkeisiä kuiva-ainemittauksia tehtiin 20 kappaletta aikavälillä 4.10.2001–21.1.2002 (Myller 2002). Mittaukset tehtiin kaappaamalla näyte rainasta ja määrittämällä kuiva-ainepitoisuus laboratoriossa. Koneen muut tarvittavat ajoarvot kirjattiin samalla ylös. Mittaukset otettiin normaalituotannon aikana ja valmistettavina tuotteina oli eri laatuja ja neliöpainoja (156–340 g/m²).

Kun mittaustietoa ei ollut käytettävissä, asetettiin parametrien määrittämisessä puristimeen sisään menevän rainan kuiva-ainepitoisuudeksi tyypilliseksi ajateltu arvo: 20,5 %. Kuiva-ainepitoisuus kunkin nipin jälkeen laskettiin yhtälöllä 21 käyttäen apuna mittausajankohtien muita tuotantotietoja. Kolmannen nipin ulostulon kuiva-ainepitoisuutta verrattiin vastaavaan mittaustulokseen.

Parametrien n ja A_s arvot haettiin I'Ansonin ja Ashworthin (2000) esittämää tapaa mukaillen. He eivät sovitaneet molempia parametreja mittausdatalla, vaan vakioivat kompressibiliteetikertoimen n arvon ja sovittoivat mittauksien avulla arvon parametrille A_s . He perustelevat menettelyä sillä, että sovitus voi muuten antaa käytännönvastaisia parametriyhdistelmiä ja että McDonald ja Kerekes tuloksissaan (1991 ja 1995) osoittivat n :n arvon olevan massasta riippumatta tyypillisesti noin 3. Tässä työssä n -parametrin arvoksi asetettiin 3,5. Koska kohdekoneelta saadut mittaukset olivat epätäydellisiä sisäänmenokuiva-ainepitoisuuden puuttumisen vuoksi, pienimmän neliösumman sovitusta ei tehty. A_s -parametri haarukoitiin niin, että mallin laskemat kuiva-ainepitoisuudet ja vastaavat mittaukset asettuivat diagonaalin tuntumaan kuvan 33 mukaisesti. Parametrin A_s arvoksi saatiin $2,6 \cdot 10^{-11}$. Kuvassa näkyy otetuista 20 näytestä 19 kappaletta. Havaitaan, että joukossa on pahimmillaan yli kolmen prosenttiyksikön virheitä laskettujen ja mitattujen tulosten välillä. Oletus, että puristinosalle sisään menevä kuiva-aine olisi vakio, aiheuttanee tarkastelun suurimmat virheet.



Kuva 33. Puristinosan jälkeen mitatut rainan kuiva-ainepitoisuudet ja mallin vastaavat ennustukset.

Neljäs puristin eli tasauspuristin on ilman huopaa eikä poista vettä. Koneella on kuitenkin huomattu, että tasauspuristimen käyttö alentaa höyryryhmien höyrynpainetarvetta verrattuna ajamiseen ilman tasauspuristinta. Tämä selittyy rainan pinnan tasoittumisella, mikä parantaa lämmönsiirtoa sylinteristä paperiin. Vaikutuksen suuruudesta ei kuitenkaan ole tarkkaa tietoa, joten tasauspuristimen käytön vaikutusta ei mallissa huomioitu.

5.5 Kuivatusosan mallinnus

5.5.1 Kuivatusosan laskennan perusrakenne

Tässä työssä raportoitu malli kattaa kuivatusosan viisi ensimmäistä höyryryhmää eli yhteensä 61 kuivatussylinteriä. Apros Paper -ohjelman kuivatussylinterin mallikomponentissa lasketaan, kuinka lämpö siirtyy höyrystä sylinteriin, sylinterin läpi paperiin ja kuinka vesi poistuu rainasta. Vapaaviennin mallissa lasketaan veden haihtuminen ja rainan lämpötilan muutos. Höyry- ja lauhdejärjestelmä on mallinnettu yksityiskohtaisesti, kuten kappaleessa 5.2 kuvattiin. Mallinnukseen on käytetty Apros-simulointiympäristön peruspiirteitä, eikä sitä käsitellä tässä työssä tarkemmin.

Työssä käytetty kuivatusosan mallinnus- ja laskentatapa on perusrakenteiltaan sama kuin Niemenmaa et al. (1996) raportoima. Laskentaa on kuitenkin sittemmin tarkennettu (Tuuri et al. 2001 ja Lappalainen et al. 2001) ja kehittäminen on jatkunut tämän työn puitteissa.

Veden haihtumista yksittäisessä kuivatussylinteri- tai vapaavientikomponentissa lasketaan yleistä aika-askelta harvemmin. Rainanlaskennan peruseriaatteiden mukaisesti (luku 4.3.2) laskenta käynnistyy vain silloin, kun koneen nopeudella liikkuva tilapiste ohittaa kyseisen mallikomponentin. Haihtumisnopeus rainasta pysyy tämän jälkeen vakiona, kunnes seuraava tilapiste ohittaa mallikomponentin. Tässä työssä käytetystä tilapisteiden määrästä (20 kpl), rainan pituudesta ja KA2-koneen tyypillisestä nopeudesta johtuen yksittäisten vedenpoistokomponenttien päivitysväli on noin kolme sekuntia. Tämä päivitysväli on riittävä, sillä kuivatussylinterin seinämän suuren lämpökapasiteetin vuoksi lämpötilan muutokset ovat suhteellisen hitaita. Päivitysvälin tihentäminen ei toisi lisätarkkuutta laskentatuloksiin, mutta hidastaisi laskentaa. Kuivatussylinterimallissa rainan lämpenemisen ja haihtumisen ottama tehontarve viedään lähdeterminä sylinteriseinämän lämpörakennetta kuvaaville laskentasolmuille. Sylinteriseinämän lämmönjohtuminen kuten höyry- ja lauhdejärjestelmän mallikin ratkaistaan käyttäen yleistä simuloinnin aika-askelta (tyypillisesti 0,2 s).

Kun kuivatussylinteri- tai vapaavientimallikomponentti lasketaan, ratkaistaan kosteuden ja lämpötilan muuttuminen komponentin sisällä useassa konesuuntaan jaetussa osassa. Laskennassa seurataan rainapalan tilan muuttumista sen liikkuessa mallikomponentin alkupisteestä loppupisteeseen, eli mallikomponenttiin määritellyn rainan pituuden matkan. Tässä työssä tuo rainan pituus on jaettu 20 osaan. Jos rainaa tuetaan sylinterikosketuksen aikana viiralla, oletetaan laskennassa, että viira peittää rainan koko sylinterikosketuksen ajan. Seuraavassa esitetään yhtälöt, joita käytetään, kun ratkaistaan rainan tilan muuttuminen kunkin 1/20-matkan aikana.

5.5.2 Lämmönsiirto

Höyryn ja sylinterin sisäpinnan välisen lämmönsiirron laskennassa kokeiltiin sekä Heikkilän (1993) esittämää kuvan 23 mukaista lämmönsiirtokertoimen riippuvuutta että sylinterikohtaisia vakioarvoja. KA2:n kuivatusosalla osa sylin-

tereistä on varustettu lauhdelistoilla, jotka parantavat lämmönsiirtoa ja vähentävät sen riippuvuutta koneen nopeudesta. Tässä työssä esitetyissä simuloinneissa kaikille sylintereille on käytetty lämmönsiirtokertoimen vakioarvoja välillä 1 100–1 800 W/m²°C höyryryhmästä riippuen. Arvot perustuvat kuivatusosalta tehdyssä tutkimuksessa esitettyihin laskelmiin (PAPES 2002).

Lämmönjohtumisen laskenta sylinteriseinämän läpi on diskretoitu seinämän paksuussuunnassa kolmeen osaan. Vaipan lämmönjohtuminen sylinterin akselin suunnassa jätetään huomiotta. Oletus on hyvä erityisesti paperiradan keskellä. Sylinterin päissä sylinteri on muutaman senttimetrin matkalta koko kehältään paljaana, jolloin paljaan alueen ja paperin osaksi peittämän alueen välillä tapahtuu myös pituussuuntaista lämmönsiirtoa. Koko rainan leveyteen nähden alue on kuitenkin pieni, ja toisaalta poikkisuuntaisia ilmiöitä ei muutenkaan ole sisällytetty malliin.

Soinisen (1983) mukaan suomugrafiittivaluraudalle lämmönjohtumiskerroin on 50 W/m°C ja pallografiittivaluraudalle 35 W/m°C. Usein kirjallisuudessa käytetty arvo on 45 W/m°C (esim. Wilhelmsson 1995), mitä myös tässä työssä on käytetty.

Sylinterin ulkopinnalla paikallaan oleva piste kokee sylinterin pyöriessä jaksotaisen lämpötilan vaihtelun. Soinisen (1983) esittämässä esimerkkilaskelmassa vaihtelun suuruus oli alle yksi Celsiusaste. Erityisesti, kun vertaa vaihtelua sylinterin vaipan sisä- ja ulkopintojen lämpötilaeroon (tyypillisesti välillä 10–30 °C) voidaan olettaa, että ulkopinta on kauttaaltaan vakiolämpötilassa. Näin ollen, kun rainan tilan muuttumista pitkin sylinterin kaarta lasketaan 20 osassa, oletetaan sylinterin pintalämpötilan pysyvän vakiona tuon ajan. Mallissa lasketaan sylinteristä paperiin siirtyvä lämpövuoto ja sylinterin paljaalta pinnalta ympäröivään ilmaan siirtyvä lämpövuoto yhteen, ja yhdistetty lämpövuoto annetaan reunaehdoksi sylinterin vaipan lämmönsiirron ratkaisulle.

Viiratyypin ja kireyden vaikutusta lämmönsiirtoon ei huomioida. Sylinterin ja kartongin välinen lämmönsiirto ratkaistaan yhtälöä 24 käyttäen. Kontakti-
lämmönsiirtokertoimen riippuvuus kosteudesta lasketaan seuraavasti:

$$\alpha_{cp} = k_{HI}(a + b \cdot z) \quad (32)$$

missä

α_{cp}	on	kontaktilämmönsiirtokerroin sylinteristä kartonkiin ($W/m^2\text{°C}$)
z		paperin kosteus ($kg\ H_2O/kg\ k.a.$)
k_{HI}		viritysparameetri (oletusarvoisesti 1,0)
a		kontaktilämmönsiirtokerroin, kun kosteus on nolla ($W/m^2\text{°C}$).
b		kertoimen kosteusrippuvuuden kulmakerroin ($W/(m^2\text{°C}\ kg\ H_2O/kg\ k.a.)$)

Tässä työssä käytettiin parametrille a arvoa $650\ W/m^2\text{°C}$ ja parametrille b arvoa $250\ W/(m^2\text{°C}\ kg\ H_2O/kg\ k.a.)$ Prosessin yhteen toimintapisteeseen haettu lämmönsiirtokerroimen kosteusrippuvuus ei kuitenkaan välttämättä päde enää tarkasti, kun neliöpaino tai massaresepti muuttuu. Nämä erot huomioidaan viritysparameetrilla k_{HI} .

Vaikka rainaa ei ole diskretoitu paksuussuunnassa, on laskennassa otettu huomioon se, että sylinteriä koskettavalta puolelta rainan lämpötila nousee keskimääräistä lämpötilaa korkeammalle. Ilman korjausta laskenta ennustaisi liian suuren sylinteristä rainaan siirtyvän lämpömäärän. Käytetty ratkaisu perustuu ajatukseen, että lämpövirran on läpäistävä eristävä pintakerros päästäkseen syvemmillä rainan sisään. Seuraavassa yhtälössä läpäistäväksi matkaksi on valittu puolet rainan paksuudesta (Heikkilä ja Paltakari 2000):

$$q_{in} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{cp}} + \frac{Y}{2\lambda_p}} (T_c - T_p) \quad (33)$$

missä

q_{in}	on	lämpövuoto sylinteristä paperiin (W/m^2)
α_{cp}		kontaktilämmönsiirtokerroin sylinteristä paperiin ($W/m^2\text{°C}$)
Y		rainan paksuus (m)
λ_p		rainan efektiivinen lämmönjohtavuus ($W/m\text{°C}$)

Paperin efektiiviseen lämmönjohtavuuteen vaikuttavat Heikkilän ja Paltakarin (2000) mukaan lähinnä rainan kosteus, tiheys ja lämpötila. Simuloinnit yllä olevaa yhtälöä käyttäen osoittivat, että puolen rainan paksuinen eristävä kerros ko-

rosta lämmönsiirron ja paksuuden välistä vaikutusta liikaa. Niinpä eristävän kerroksen osuutta pienennettiin laskennassa ja siitä tehtiin käyttäjän aseteltavissa oleva kerroin (k_{cp}).

Rainan paksuus muuttuu kuivatuksen edetessä. Paksuus lasketaan kosteuden funktiona seuraavasti (mm. Wilhelmsson 1995):

$$Y = W \left(\frac{1}{\rho_{dp}} + \frac{1}{\rho_w} \right) \quad (34)$$

missä

W	on	kartongin kuivaneliöpaino (kg/m^2)
ρ_{dp}		kartongin kuiva-aineen tiheys (kg/m^3)
ρ_w		veden tiheys (kg/m^3)

Tässä työssä kartongin kuiva-aineen tiheytenä käytettiin arvoa $700 \text{ kg}/\text{m}^3$.

5.5.3 Veden poistuminen rainasta

Paperista höyrystyvän veden määrä lasketaan aiemmin esitetyllä Stephanin lakiin perustuvalla yhtälöllä 28. Kriittisen kosteuden yläpuolella vesihöyryn osapaine lasketaan Antoineen yhtälöllä (yhtälö 25). Kriittisen kosteuden alapuolella höyrynpainetta korjataan alaspäin käyttäen sorptioisotermin perustuvaa kerrointa (yhtälöt 26 ja 27). Sorptioisoterminä käytetään Heikkilän (1993) esittämää muotoa (yhtälö 27). Yksinkertaisuuden vuoksi laskennassa käytetään yhtä sorptioisoterminä riippumatta kartongin raaka-aineista. Parametreina käytetään samoja parametreja kuin Heikkilä (1993) käytti työssään. Myös kuvan 26 sorptioisotermit on laskettu käyttäen näitä arvoja:

$$C_1 = 47,58$$

$$C_2 = 1,877$$

$$C_3 = 0,10085 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$C_4 = 1,0585.$$

Lämmönsiirtokerroin paperista ilmaan lasketaan yhtälöllä 29, joskin kaavaa on täydennetty seuraavasti:

$$\alpha_F = k_{E1}k_{E2} \cdot 5,3 \cdot u^{0,46} \quad (35)$$

missä

k_{E1} on viritysparametri

k_{E2} kerroin, jonka arvo riippuu kuivatusolosuhteista

Kerrointa k_{E1} käytetään kuivatusmallin virityksessä haihtumisnopeuteen vaikuttavana viritysparametrina. Kertoimen k_{E2} arvo riippuu siitä, lasketaanko haihtumista sylinteriä koskettavasta rainasta vai vapaasta viennistä, ja tuetaanko rainaa viiralla. Viiralla tuetulta pinnalta lämmön- ja aineensiirto on pienempää. Wilhelmssonin (1995) mukaan aineensiirtokerroimen alenema on 30–50 %. Tässä työssä käytetään arvoa 40 %.

Huuvan ilman lämpötila ja kosteus on määritelty mallissa sylinteri- ja vapaa-ventiikohtaisesti vakioarvoina. Käytetyt arvot perustuvat kuivatusosalla tehtyihin mittauksiin (mm. PAPES 2002, Johnson 2002).

Vaikka rainan tilaa ja koostumusta käsitellään homogeenisena paksuus-suunnassa, pyritään laskennassa huomioimaan paksussa rainassa syntyvän kuivan kerroksen aineensiirtovastus. Toteutus perustuu Heikkilän (1993) esittämään tapaan, jossa yhtälö 28 muunnetaan muotoon:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{\alpha_F CK}{\alpha_F C + K} \ln \frac{p_{tot} - p_{va}}{p_{tot} - p_v} \quad (36)$$

Yhtälön parametri K kuvaa kuivan rainan aiheuttamaa virtausvastusta. Se lasketaan seuraavasti (Heikkilä 1993):

$$K = \left(\frac{D_{eff}}{D_v} \right) \frac{p_{tot}}{R_v T_p} \frac{D_v}{\Delta y} \quad (37)$$

missä

D_v	on	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa (m^2/s)
D_{eff}		vesihöyryn diffusiviteetti huokoisessa materiaalissa (m^2/s)
R_v		vesihöyryn kaasuvakio ($J/kgH_2O/K$)
Δy		kuivan kerroksen paksuus (m)

Yhtälössä tarvittava kuivan kerroksen paksuus, minkä läpi höyryn täytyy kulkea, arvioidaan seuraavasti:

$$\Delta y = k_Y \frac{Y}{2} \frac{z_{crit} - z}{z_{crit}(z + 1)} \quad (38)$$

missä

Y	on	rainan paksuus (m)
z_{crit}		rainan kriittinen kosteus ($kg H_2O/kg$ k.a.)
k_Y		viritysparametri

Kaava kuvaa kuivan kerroksen kehittymistä niin, että kerros alkaa syntyä kriittisen kosteuden alapuolella, ja se on maksimissaan puolet (kun virityskerroin k_Y on yksi) rainan koko paksuudesta. Virityskertoimen ykköistä suuremmat arvot vastaavat sitä käytännössä vallitsevaa tilannetta, että höyryn kuljettavana oleva reitti rainan sisältä pinnalle on mutkitteleva.

Kartongista ilmaan siirtyvä teho aikana, mikä rainalta kuluu edetä diskreetointivälin verran ($1/20$), lasketaan kaavalla:

$$\Delta q_{out} = \frac{\dot{m}_{ev}}{A} (\Delta r_a + \Delta r_z) + \Delta q_{conv} \quad (39)$$

missä

A	on	kartongin pinta-ala (m^2)
\dot{m}_{ev}		haihtuneen veden massavirta (kg/s)
Δr_z		höyrystymislämpö (kJ/kg)
Δr_a		sorptiolämpö (kJ/kg)
Δq_{conv}		konvektiivinen lämpöhäviö (kJ/kg)

Höyrystymislämpö lasketaan höyrytaulukko-datasta sovitetulla yhtälöllä. Sorptiolämpö lasketaan aikaisemmin esitetyllä yhtälöllä 30. Lämpöhäviöiden laskemiseksi arvioidaan lämmönsiirtokerroin paljaan sylinterin pinnan ja ympäröivän ilman välillä. Rainan sisään jäävä nettoteho Δq_p kuluu kartongin sisältämän kiintoaineen ja veden lämmittämiseen:

$$\Delta q_p = \frac{\Delta T_p}{\Delta t} (c_{ds} + z \cdot c_w) \cdot W \quad (40)$$

missä

ΔT_p	on	rainan lämpötilan muutos ($^{\circ}\text{C}$)
Δt		aika-askeleen pituus (s)
c_{ds}		kuivan kartongin ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
c_w		veden ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
W		kartongin kuivaneliöpaino (kg/m^2)

On havaittu, että kuivan paperin ominaislämpökapasiteetti kasvaa lämpötilan noustessa (Heikkilä 1993). Koska vaikutus on suhteellisen pieni ja mittaustietoa on vähän saatavilla, on kuivan kartongin ominaislämpökapasiteetti vakioitu mallissa arvoon $1,4 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$.

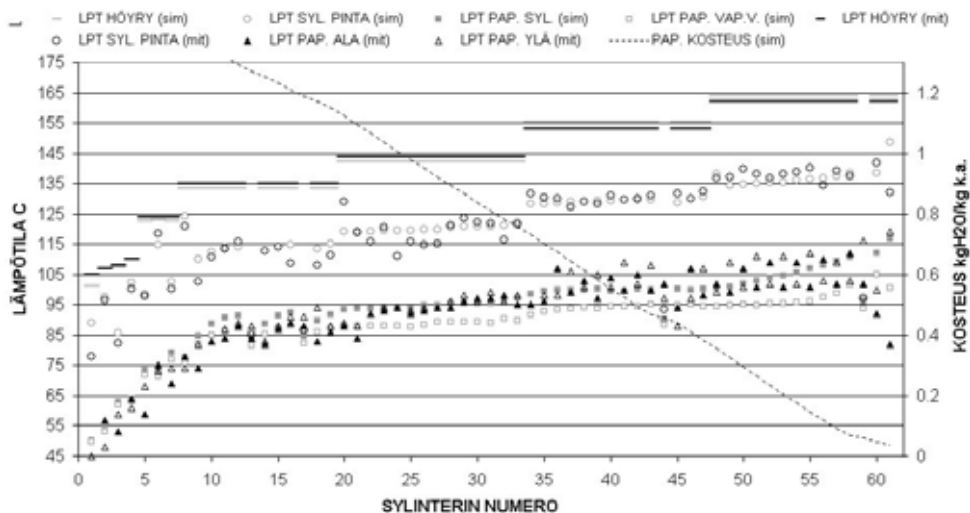
Kun yhtälön 40 avulla ratkaistaan paperin lämpötilan muutos ja yhtälöllä 28 tai 36 rainasta poistuvan veden määrä, voidaan laskea rainan uusi tila. Tämän jälkeen edetään seuraavan diskreetointivälin laskentaan. Viimeisen diskreetointivälin laskennan jälkeen rainan tila päivitetään tilapisteelle, ja mallikomponentin laskennasta poistutaan.

5.5.4 Kuivatusosan mallin virittäminen

Kuivatusosan mallin viritys ja validointi perustui paitsi prosessista kerättyyn online-dataan, myös tehtaan teettämiin kuivatusosan mittausraportteihin. Prosessidataan vertaamalla arvioitiin mallin dynamiikan oikeellisuutta, kuten neliöpainon ja kosteuden muutoksia lajinvaihdossa. Mittausraportit tarjosivat mahdollisuuden verrata simuloituja ja mitattuja konesuuntaisia lämpötilaprofiileja, eli sylinterikohtaisia kartongin ja sylinterien pintalämpötiloja, keskenään.

Tehtaan aika-ajoin teettämässä kuivatusosan mittausraporteissa on yleensä mitattu ainakin sylintereiden pintalämpötilat, rainan ylä- ja alapuolen lämpötilat vaipaissa vienneissä sekä huuvan taskuissa olevan ilman kosteudet ja lämpötilat. Mallin ja mitattujen lämpötilaprofiilien vastaavuudesta voidaan päätellä, miten realistisesti malli ennustaa lämmönsiirron ja kuivumisen ilmiöitä eri kohdissa kuivatusosaa. Mittausraporttien avulla haettiin hyvät arvot mallin parametreille a , b , k_{cp} , k_Y ja z_{crit} . Simulaattoria käytettiin tyypillisesti niin, että sillä toistettiin tehtaalta kerättyjä ajotilanteita, lähinnä lajinvaihtoja. Tällöin simulaattorin laskema kosteus viritettiin vastaamaan mittausdatan alkutilannetta parametrien k_{E1} ja k_{H1} avulla.

Kuvassa 34 on esitetty mallilla laskettuja tasapainotilan lämpötila- ja kosteusarvoja ja mittaustuloksia sylinterikohtaisesti. Mittaukset on tehty KA2:n kuivatusosalla heinäkuussa 2002 (Johnson 2002). Simulointimalli on ajettu raportissa kerrottujen prosessitietojen perusteella samaan toimintapisteeseen, kuin missä kohdekone oli mittaushetkellä. Neliöpaino oli 187 g/m^2 . Myös huuvan taskujen kosteudet ja lämpötilat on asetettu mittausten mukaisiksi.



Kuva 34. KA2-koneen kuivatusosan (sylinterit 1–61) hetkellinen profiili, jossa mustat merkinnät vastaavat mittauksia ja harmaat simuloituja arvoja. Oikeanpuoleiselta asteikolta luettavasta rainan kosteudesta (katkoviiva) ei ole mittaustietoa.

Kuvassa 34 lämpötilat luetaan vasemmalta pystyakselilta, ja kartongin simuloitu kosteus, josta ei ollut vastaavaa mittausta saatavissa, vastaavasti oikeanpuoleiselta akselilta. Sylintereiden höyrynpaineen perusteella lasketut sisälämpötilat ovat ylimpänä ja ryhmäkohtaisesti vakioita. Simuloitujen arvojen ja mittausten erot johtuvat painemittareissa havaituista virheistä (PAPES 2002), jotka on huomioitu mallissa. Sylintereiden pintalämpötilat on mitattu koskettavalla lämpötilamittarilla. Rainan lämpötila on mitattu infrapunamittarilla vapaasta viennistä rainan ylä- ja alapuolelta. Mittaushetkellä kuivatusosalta oli poikkeuksellisesti suljettuna sylinterit 13, 17, 44 ja 59 (Johnson 2002), mikä huomioitiin myös simulointimallissa. Muissa tässä työssä esitetyissä simuloinneissa suljettuja sylintereitä on vain yksi kappale (numero 13).

Keskeinen simuloitun rainan lämpötila- ja kosteusprofiileihin vaikuttava parametri mallissa on kartongin kriittinen kosteus, jolle annettiin arvo 0,8 kg H₂O/kg k.a. Koska simulointimallissa rainan lämpötila on homogeeninen paksuussuunnassa, eikä pinta- ja pohjalämpötiloja ole erikseen saatavilla, on kuvassa esitetty lämpötila kunkin vapaaviennin alku- ja loppupisteessä. Näin rainan lämpötilan paikalliset minimi- ja maksimiarvot saadaan näkyviin.

Kuvasta nähdään, että mitatut ja simuloitut pintalämpötilojen arvot vastaavat toisiaan melko hyvin koko tarkasteltavan profiilin alueella. Myös simulointitulokset rainan lämpenemisestä kuivaan päähän mennessä seuraavat mittauksia kohtuullisen hyvin. Sylinterikohtaisia lämmön- tai aineensiirtokertoimia ei ole viritetty muuten kuin kuivatusosan ensimmäisen sylinterin osalta, vaikka tällaisella virityksellä voitaisiin parantaa simulointien ja kyseisen mittaussarjan vastaavuutta entisestään. Olisi kuitenkin kyseenalaista, saavutettaisiinko todellista mallin tarkkuuden parantumista, joka olisi hyödyksi simuloitaessa muita, kuvan ajotilanteeseen verrattuna erilaisia tilanteita.

Eriytyistä haastetta mallin viritykseen toi valmistettavan kartongin paksuus, oletettiinhan mallinnuksessa kosteus ja lämpötila vakioiksi rainan paksuussuunnassa. Kuten aiemmin todettiin, monet kuivatussimulaattoreiden kehittäjät, kuten Sidwall et al. (1999a), ovat painottaneet rainansisäisten massan- ja lämmönsiirtotapahtumien kuvaamisen suurta merkitystä suurineliöpainoisilla lajeilla. He esittivät kritiikkiä, että nykyään laskentakapasiteetin puutteella ei voida enää perustella sitä, että lämmön- ja aineensiirtoilmiöt rainan sisällä jätetään mallintamatta. On kuitenkin syytä muistaa dynaamisen mallin käyttö-

tarkoitukset, jotka poikkeavat staattisten kuivatussimulaattorien käytöstä. On selvää, että paksuussuuntainen diskretointi lisää mallin laskentakuormaa ja hidastaa simulointinopeutta.

Nilsson (2002) julkaisi äskettäin tutkimuksen paperin ja kartongin kuivatuksen simuloinnista mallilla, jossa rainan paksuussuuntaisia kosteus- ja lämpötilagradientteja ei huomioida. Nilssonin lähtökohtana oli selvittää, miten hyvin homogeenisella rainamallilla voidaan ennustaa kuivatusta. Hän sovitti mallit neljälle tuotantokoneelle käyttäen ainoastaan lämmönsiirtokerrointa sylinteristä rainaan virituskertoimena. Hän määritteli lämmönsiirtokertoimen höyrystä sylinterin sisäpintaan perustuen sylinterin pintalämpötilan mittaukseen ja tietoon käytetystä sifonityypistä. Konvektiivisen lämmön ja aineensiirtokertoimen rainasta ilmaan hän laski teoreettisesti Nusseltin lukuun perustuen. Hän vertasi sovitettun mallin toimintaa tarkastelupisteen ympäristössä testaamalla, kuinka lähelle vertailukohdetta malli ennustaa koneen nopeuden, kun muut muuttujat on täsmätty keskenään. Malli ennusti hyvin kuivatusosan toimintaa kolmella koneella, joiden neliöpainoalue oli 56–159 g/m². Sen sijaan raskaampaa kartonkia tekevän koneen (189–390 g/m²) tapauksessa malli ennusti paksuilla lajeilla liian suuren nopeuden (yliarvioi kuivatustehokkuuden) ja ohuilla lajeilla liian pienen nopeuden. Nilsson päätteli virheen paksun lajin kohdalla syntyvän rainan paksuussuuntaisen homogeenisuuden oletuksen pitämättömyydestä. Valittujen kohdekoneiden perusteella Nilssonin johtopäätös oli, että alle 160 g/m² tuottavien koneiden tuotantokapasiteetin arviointi onnistuu ilman yksityiskohtaista diskretoitua rainamallia.

Kokemukset KA2-mallilla tehdyistä simuloinneista, joissa neliöpaino on yleensä ollut yli 160 g/m², tukevat Nilssonin (2002) havaintoja. On toisaalta syytä huomioida myös tässä työssä käytetyn mallin ja Nilssonin lähestymistavan erot. Nilssonin kehittämä simulointimalli on staattinen ja rajoittunut pelkästään kuivatusosan simulointiin. Mallissa ei ole kuvattu höyry- ja lauhdejärjestelmää. Kuivatuksen laskenta on yksinkertaistettu versio tässä työssä käytettyyn malliin nähden erityisesti sikäli, että Nilsson ei pyrkinyt millään tavalla huomioimaan rainan sisäisiä aineen- ja lämmönsiirtovastuksia. Keskeinen tehtävä KA2-mallin kehittämisessä ja viritämisessä olikin juuri lämmönsiirron ja aineensiirron vastuksen arvioiminen, kun kuivuminen siirtyy rainan sisälle.

5.6 Automaation mallinnus

5.6.1 Mallinnuksen kattavuus

Automaatio on tärkeä osatekijä tuotantoprosessin dynaamisessa käyttäytymisessä, kuten kuvassa 1 esitettiin. Riippuu kuitenkin dynaamisten mallien tarkkuudesta ja luonteesta, miten kattavasti säätöjä ja muuta automaatiota voidaan ja kannattaa mallintaa osaksi kokonaismallia. Taselaskennasta lähdettäessä ensimmäinen askel dynaamiseen suuntaan on säiliöiden pinnankorkeuksien simulointi ja säätö. Toisessa ääripäässä ovat nopeat painesäädöt, jotka vaativat myös mallilta yksityiskohtaisuutta ja lyhyttä laskenta-askelta. Tässä työssä käytettiin Aprosin paine-virtaus-laskentaa, joten kaikki säädöt voitiin mallintaa realistisesti.

Lukitusten ja sekvenssien rakentaminen malliin on yleensä vähintään yhtä suuri työ kuin prosessimallin ja perussäätöpiirien rakentaminen. Binääriautomaatiikkaa ei ole sisällytetty KA2-malliin.

5.6.2 Mittaukset

Simulaattorissa kaikkia laskettavia suureita voidaan mitata ideaalisesti. Toisaalta mittaukseen voidaan haluttaessa lisätä suodatusta, kohinaa tai mittausvirhettä. Tehdasmittausten suodatusparametreja ei ole KA2-malliin sellaisenaan siirretty, vaan on käytetty mittauskomponenttien oletusaikavakiota (1 s). Poikkeuksena ovat perälaatikoiden sakeusmittaukset, joiden mittausviive ja suodatus selvitettiin ja sisällytettiin malliin.

Prosessidatan ja simulointitulosten vertailussa havaittiin, että joidenkin sakeusmittausten taso riippuu myös raaka-ainereseptistä. Mallissa sakeusmittaukset mittaavat kuitenkin ideaalisesti kokonaiskuiva-aineen osuuden massassa. Simulaattorin sakeusmittaus on myös tunteeton mittauslinjan virtausnopeusmuutoksille.

Virtausmittaus mittaa mallissa massavirtausta (kg/s). Mitattua arvoa on kuitenkin mallin validoinnissa käytetty suoraan vastaavana tilavuusvirtauksena (l/s), eli massasulpun tiheydeksi on oletettu $1\ 000\ \text{kg/m}^3$.

Kosteuden ja neliöpainon mittauksessa käytetään mallikomponenttia, joka jäljittelee radan poikkisuunnassa edestakaisin kulkevan mittauksen toimintaa. Se antaa uuden mittausarvon määritellyn radan poikki kulkemiseen kuluvan ajan välein. Mittausarvo on laskettu keskiarvona kullakin simulointiaskeleella mitatuista hetkellisistä arvoista.

5.6.3 Säätopiirit

Vaikka säätopiirien mallintaminen on dynaamisessa simuloinnissa hyvin tärkeää, ei yleensä ole tarpeen pyrkiä täydelliseen yhteneväisyyteen algoritmitasolla. Keskeisempää on virittää säädöt vastaaviksi kuin kohdeprosessissa. Toisaalta, jos simulointiohjelma tarjoaa kohdeprosessin automaatiojärjestelmän käyttämän säätöalgoritmin, voidaan parametrit kopioida suoraan tehtaalta. Algoritmien samanlaisuuden merkitys kasvaa, kun tutkitaan käyttäytymistä erikoistilanteissa, kuten lähellä säätöalueen rajaa, jolloin toimilaitteiden saturoiminen ja säätimen anti-windup-toteutus vaikuttavat tuloksiin. Kehittyneemmät säätöratkaisut, kuten malliprediktiivinen säätö, vaativat myös simulaattorissa perinteisestä PID-säädöstä poikkeavaa lähestymistapaa, esimerkiksi kuolleen ajan kompensointia Smithin prediktorin avulla.

Tässä työssä raportoitu malli käsittää yhteensä 62 kappaletta säätopiirejä taulukon 1 mukaisesti. Muu-luokassa ovat suihkusuhteiden, neliöpainon ja kosteuden säätopiirit. Esimerkiksi kuivatusosan säätopiireihin kuuluvat höyryryhmäkohtaisesti ryhmän höyrynpaineen säätö, paine-eron säätö ryhmän höyry- ja lauhdetukin välillä ja lauhdetta keräävän lauhdetankin pinnankorkeuden säätö. Kosteussäätö ja lajinvaihtoautomaatio ohjaavat pohjakartongin kuivatusosalla suoraan vain 5. höyryryhmän painetta. Ryhmien välinen suhdesäätö hoitaa ryhmien 4, 3, 2 ja 1b paineiden asetusarvojen asettamisen niin, että höyry- ja lauhdejärjestelmän kaskadikytkentä toimii. Esimerkiksi 3. ja 2. ryhmien paineiden asetusarvojen suhde on tyypillisesti 0,7.

Taulukko 1. Tässä työssä raportoidun KA2-mallin säätöpiirit.

<i>Säädettävä suure</i>	<i>Lukumäärä mallissa</i>
Virtaus	12
Pinnankorkeus	16
Sakeus	8
Paine	14
Paine-ero	6
Lämpötila	1
Muu	5
<i>Yhteensä</i>	62

5.6.4 Lajinvaihtoautomaatio

Paperi- tai kartonkikoneen lajinvaihdossa yhtä tai useampia tuotteen laatuominaisuuksia muutetaan uutta lajia vastaaviksi. Tehtaasta ja koneesta riippuen lajinvaihdot tehdään joko käsin tai sitten erityistä lajinvaihtoon kehitettyä automaatiota käyttäen, kuten KA2-koneella. Lajinvaihtoautomaatio-ohjelmisto on KA2-koneella integroitu osaksi koneen Damatic XD -automaatiojärjestelmää (Vehviläinen 2001).

Koska KA2-mallia päätettiin soveltaa lajinvaihtoautomaation tutkimiseen ja virittämiseen, oli koneella käytettävän lajinvaihtoautomaation toiminnallisuus mallinnettava. Malli toteutettiin Aprosin automaatiokirjaston peruskomponenteilla. Kuten koneen oikea lajinvaihtoautomaatio, myös rakennettu malli laskee osan uuden lajin tavoitearvoista ja hallinnoi ohjattavien suureiden rampitusta ja keskinäistä ajastusta. Lajinvaihdon aikana koneen laatusäädöt eivät ole päällä.

Lajinvaihtoautomaatio ohjaa lajinvaihdon aikana seuraavia ohjaussuureita:

- koneen nopeus
- konemassavirtaukset eri kerroksille (3 kpl)
- huuliaukkojen avaumat perälaatikoissa (3 kpl)
- suihkusuhteet eri kerroksille (3 kpl)
- höyrynpaineet höyryryhmissä 5 ja 7.

Tiedustelu tehtaalla osoitti, että koneen koko ajohenkilöstö suorittaa lajinvaihdot lajinvaihtoautomaatiota käyttäen. Toiset käyttäjistä kytkevät kuitenkin osan yllä olevista suureista pois automaattisesta ohjauksesta ja ajavat ohjaukset käsiajolla. Huuliauikkojen ohjaus on tyypillisin käsiajolla tehtävä ohjaus.

Lajinvaihtoautomaatio laskee tavoitearvot konemassavirtauksille ja kahdelle höyrynpaineelle. Ryhmän 7 paine ohjaa myös 6. ryhmän painetta, eli liimapuristimen jälkeistä kuivatusta ennen päällystysosaa. Tässä työssä on kuitenkin rajoitettu tarkastelemaan kuivatusta vain liimapuristimelle asti. Kuva 35 esittää lajinvaihtoautomaation ohjaussivun simulaattorissa. Keskeisiä näytettäviä asioita ovat uuden lajin tavoitearvot, tämän hetken asetus- ja mittausarvot, alatason säätöpiirien tilat sekä se, osallistuuko ohjaus automaattiseen lajinvaihtoon. Myös ennustettu lajinvaihtoon kuluva aika esitetään. Kun lajinvaihto käynnistetään, lajinvaihtoautomaatio koordinoi mukaan valittujen suureiden keskinäisen ajastuksen ja rampituksen kohti uuden lajin tavoitearvoja. Vehviläinen (2001) kuvaillee tarkemmin työssään KA2:n lajinvaihtoautomaation toimintaperiaatteita.

LAJINVAIHTOAUTOMAATIO				
	Tavoite	AsetusA	Mittaus	Tila
Koneen nopeus	200.0	365.0	365.0	min
5 neliöpaino			244.5	g/m ²
5 kuivapaino	263.9	223.4	223.1	g/m ²
5 kosteus	13.0	11.5	9.7	%
6 kosteus	7.0	7.0	7.10	%
Kr 5 paine	900.5	921.0	921.2	kPa yp 0
Kr 7 yllä. paine	133.9	204.0	204.0	kPa yp
1 Suihkusuhte 3	1.000	1.021	1.021	
1 Suihkusuhte 2	1.070	1.052	1.052	
1 Suihkusuhte 1	1.020	1.019	1.019	
1 Huuliauikko 3	32.0	38.0	28.9	mm 1
1 Huuliauikko 2	40.0	39.2	38.2	mm 1
1 Huuliauikko 1	31.0	30.0	30.0	mm 1
Kuivapaino 3 krs	61.7		41.2	g/m ²
Kuivapaino 2 krs			120.9	g/m ²
Kuivapaino 1 krs	61.7		41.2	g/m ²
Massan virtaus 3	64.8	62.3	62.2	kg/s
Massan virtaus 2	124.6	135.3	135.2	kg/s
Massan virtaus 1	64.8	62.3	62.2	kg/s
<input checked="" type="checkbox"/> Lajinvaihto päälle <input type="checkbox"/> Lajinvaihto siltinen ?				
Lajinvaihtoaika, min 7.3				

Kuva 35. Lajinvaihtoautomaation ohjauskuva rakennettiin vastaamaan tehtaan aidon järjestelmän käyttöliittymää.

Lajinvaihtoautomaatiosta rakennetun mallin testaamisessa havaittiin konkreettisesti se, kuinka käyttäjät ovat osa prosessin kokonaiskäyttäytymistä (kuva 1). Mallia ei saatu aluksi laskemaan järjestelmällisesti oikein, mikä näkyi eroina lasketuissa tavoitearvoissa ja ohjausramppien jyrkkyydessä simulointien ja prosessidatan välillä. Ongelmaa etsittäessä tehtaalla havaittiin, että operaattorit käyttivät automaatiota keskenään poikkeavilla tavoilla. Seuraavat epäkohdat lajinvaihtoautomaation käytössä löydettiin:

- Lajinvaihdon tavoitteiden laskettaminen voidaan tehdä paitsi automaattisesti ennen lajinvaihdon alkamista myös haluttuna ajanhetkenä käsin. Simulaattorissa tavoitelaskenta tehdään automaattisesti juuri ennen lajinvaihdon käynnistymistä. Käsin tehdyssä laskettamisessa on se riski, että ajotilanne voi muuttua ennen lajinvaihdon alkua laskettamishetken tilanteeseen nähden. Havaittiin, että pahimmillaan laskettaminen oli tehty pari tuntia ennen lajinvaihtoa.
- Lajinvaihtoautomaatio mahdollistaa huuliaukkojen mukanaolon ohjausramppien ajastuksen laskennassa, vaikka niitä ajettaisiinkin lajinvaihdossa käsin. Tällöin huuliaukkojen tavoitearvot jäävät helposti virheellisiksi ja joku huuliaukoista voi hidastaa rampitusnopeutta olematta itse mukana rampituksessa.

Molemmat havaitut epäkohdat pidentävät yleensä lajinvaihdon kokonaiskestoa. Vuoroja opastettiin asiassa parempaan ja yhdenmukaisempaan käytäntöön.

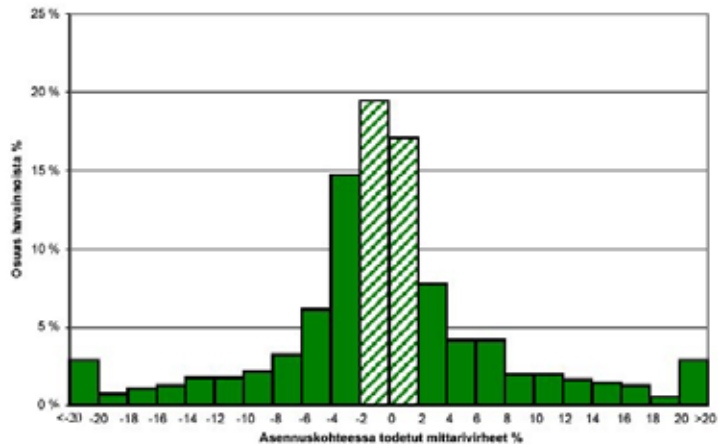
5.7 Simulointimallin validointi

5.7.1 Prosessimittausten tarkkuus

Simulointimalleja kehitettäessä ja rakennettaessa on ensiarvoisen tärkeää päästä vertaamaan mallin ennustuksia ja todellisesta prosessista kerättyjä mittauksia keskenään. Joskus on kuitenkin vaikea vetää rajaa, missä mallin todellinen kehittäminen loppuu. Pahimmillaanhan viritystyö muuttuu mittausvirheiden selittämiseksi. Mittausten kriittinen arviointi ja mittaustavan ymmärtäminen ovatkin oleellinen osa validointityötä.

Tässä työssä mallin hyvyttä on arvioitu lähinnä lajinvaihtoista kerättyyn prosessidataan vertaamalla. Haluttaessa datankeruu kytkeytyy tehtaalla automaattisesti päälle 20 minuuttia ennen lajinvaihtoa ja sulkeutuu 40 minuuttia käynnistymishetken jälkeen. Keruuseen kuuluu satoja mittauskanavia ja tallennusväli on viisi sekuntia.

Mittaukset tarjoavat aina vain epätarkan arvion todellisuudesta. Tyypillinen paperikoneen simulointimallin validoinnissa vastaantuleva esimerkki tästä on tuotantomäärä. Kun huomioidaan konemassan virtaus ja sakeus, muut annosteltavat aineet, tasealueesta poistuvat rejektit jne., saadaan laskettua kuiva-ainevirtaus rullaimelle. Käytännössä ei kuitenkaan saada täsmälleen samaa kuiva-tuotantomäärää, mikä koneella mitataan kuivaneliöpainosta ja koneen nopeudesta. Ristiriitaisissa tapauksissa on punnittava, mihin tietoon voidaan eniten luottaa.



Kuva 36. Suomen ja Ruotsin sellu- ja paperitehtailta mitatuissa virtausmittauksissa (yhteensä 556 kappaletta) havaitut mittausvirheet (IndMeas 2003).

Prosessin kanssa päivittäin töitä tekevällä henkilöstöllä on usein tietoa ja arvioita eri mittausten luotettavuudesta. Mittauksia myös tarkistetaan aika ajoin. Sakeusmittausten luotettavuudesta saadaan tietoa näytteenottojen ja laboratoriomäärittysten avulla. Tehtailla teetetään myös ulkopuolisia selvityksiä mittareiden tarkkuudesta. Tässä työssä on hyödynnetty kuivatusosan painemittausten tarkastusta (PAPES 2002) asettamalla simulaattorin mittaukseen vastaava virhe.

Kuvassa 36 on esitetty tilastotietoa Suomen ja Ruotsin sellu- ja paperitehtailta tehdyistä virtausmittausten kalibroinneista. Tehdyistä 556 kenttäkalibroinnista kerätyn aineiston mukaan 36,5 % virtausmittauksista näyttää $\pm 2\%$ tarkkuudella oikein (IndMeas 2003).

Staattisen tilan tarkasteluun käytetään taseentäsmäysmenetelmiä, mutta dynaamisten tilojen vastaavanlainen tarkastelu ei ole suoraviivaista. Morton et al. (1992) esittivät, että Kalman-suodin soveltuu tehtävään ainakin pienimittakaavaisessa yhtälöpohjaisessa simuloinnissa.

5.7.2 Lajinvaihtosimuloinnit

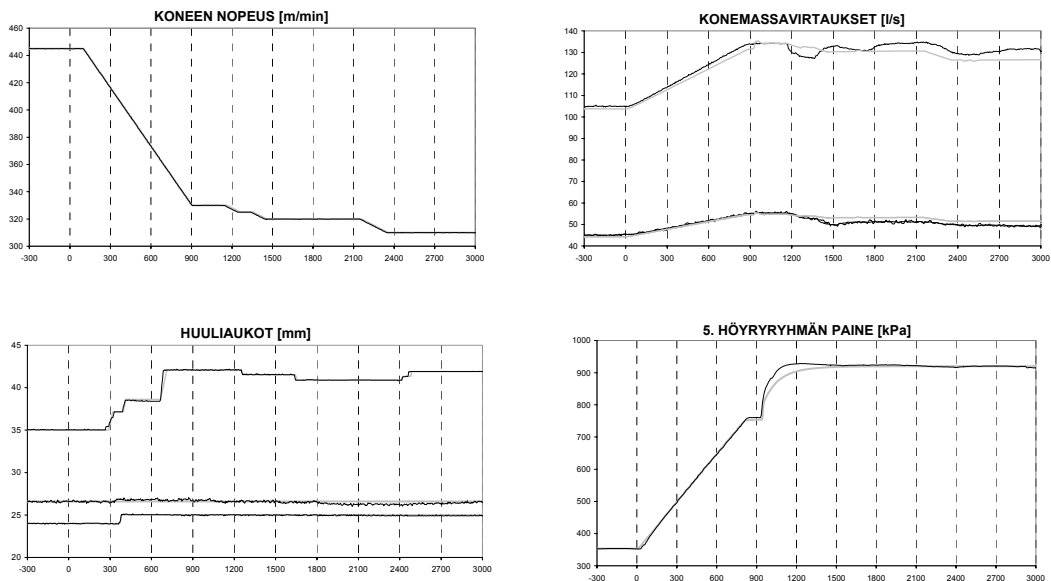
Kappaleessa 5.5.4 verrattiin kuivatuslaskennan tuloksia mittauksiin tasapainotilassa. Mallin validoinnissa havaittiin, että jos rainan kosteuspitoisuuden kehittymistä konesuunnassa ei ole kuvattu realistisesti, malli saattaa ennustaa kosteusmuutokset virityskohdan ympäristöön siirryttäessä väärin.

Erityisesti monikerroskartonkikoneella lajinvaihto on monimutkainen tapahtuma. Yksinkertaisimmillaan KA2:n lajinvaihdossa muutetaan laatusuureista vain neliöpainoa, monimutkaisemmassa tapauksessa samanaikaisesti muutetaan useita laatuominaisuuksia, massareseptiä ja päällystyspastan ominaisuuksia (Vehviläinen 2001). Dynaamisen simulointimallin testaamiseen tai jopa mallin identifioimiseen (Menani et al. 1998) lajinvaihto antaa hyvät mahdollisuudet, sillä koneen toimintapistettä muutetaan merkittävästi ja dataa on suhteellisen helposti saatavissa. Tosin se, että lajinvaihdossa ohjaussuureiden muutokset tapahtuvat lähestulkoon samanaikaisesti, mutkistaa tulosten analysointia. Myös Persson esitti tutkimuksessaan (1998) kuivatusosan dynaamisen simulointimallin validointituloksina lajinvaihtoja.

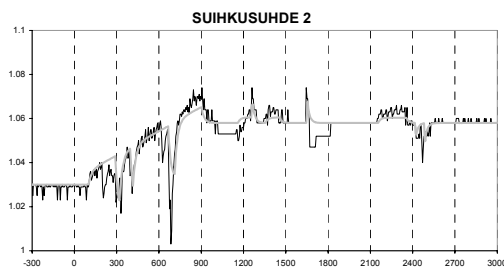
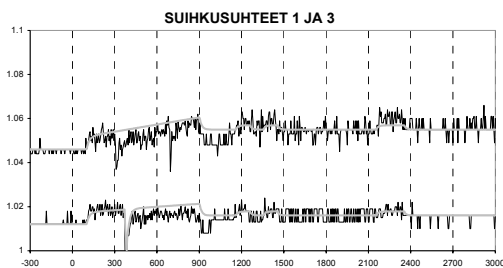
Lajinvaihtosimuloinnit tehtiin pääsääntöisesti eräajoina. Tarkasteltaviksi valituista lajinvaihdosta siirrettiin prosessidata taulukkolaskentaohjelman valmiiseen pohjaan, joka määrittäi automaattisesti vanhan lajin asetusarvot sekä tarvittavat uuden lajin tavoitearvot. Arvot siirrettiin tekstitiedostoihin, jotka toimivat eräajoina ajettujen lajinvaihtosimulointien syötteinä. Kun simulaattori ajettiin vastaamaan tilaa ennen lajinvaihtoa, kävi useimmiten niin, että simulaattorin ennustama kartongin kosteus erosi puoli prosenttiyksikköä tai enemmän mitatusta. Tulosten vertaamisen helpottamiseksi simulaattorin laskema kosteus haluttiin saada samaksi kuin datajaksen alussa. Niinpä kuivatusosan mallia vielä hienoviritettiin ennen kutakin lajinvaihtosimulointia. Tässä käytettiin ensisijaisena viritysparametrina haihdutusnopeuteen vaikuttavaa kerrointa k_{EI} (yhtälö 35). Myös sylinterin ja paperin välistä lämmönsiirtoa viritettiin (kerroin k_{HI} , yhtälö 32) silloin, jos koneensuuntainen rainan lämpötilaprofiili laski tai nousi epärealistiselle tasolle.

Lajinvaihtosimuloinneissa vanhaa lajia simuloitiin aluksi viiden minuutin jakso. Kun lajinvaihto käynnistään (kuvissa ajanhetkellä 0 s), lähtee lajinvaihtoautomaatio alkuviiheen jälkeen rampittamaan ohjaussuureita kohti asetettuja tai las-

kettuja tavoitearvoja. Aiemmin luvussa 5.6.4 lueteltiin suureet, jotka KA2-koneella ovat valittavissa automaattiseen ohjaukseen. Seuraavissa kuvissa 37–41 on esitetty lajinvaihto, jossa kuivaneliöpainoa nostetaan arvosta 143 g/m² arvoon 243 g/m². Kysymyksessä ei ole malliesimerkki hyvin onnistuneesta lajinvaihdosta, mutta validointitarkoitukseen data soveltuu hyvin. Kuvan 37 kuva-sarjasta nähdään mitatut ja simuloidut arvot koneen nopeudelle, kerroskohtaisille konemassavirtauksille, huuliaukoille ja 5. höyryryhmän höyrinpaineelle. Seuraavassa kuvassa 38 on esitetty suihkusuhteet. Lajinvaihtoautomaatio rampittaa koneen nopeuden aluksi arvosta 445 m/s arvoon 330 m/s (kuva 37). Konemassavirtaukset pinta- ja pohjakerroksille ovat käytännössä identtiset, keskikerroksella virtaus on yli kaksinkertainen niihin nähden (kuva 37). Huuliaukkojen ohjaukset on tässä lajinvaihdossa tehty käsiajolla (kuva 37). Suurimmat muutokset on tehty keskikerrokselle, pintakerrokselle on tehty yksi muutos ja pohjakerroksen huuliaukkoa ei ole muutettu lainkaan. Koneen nopeuden muutosrampin alku- ja loppukohdat, sekä huuliaukkojen muutokset (kuva 37) erottuvat hyvin kuvan 38 suihkusuhteissa.

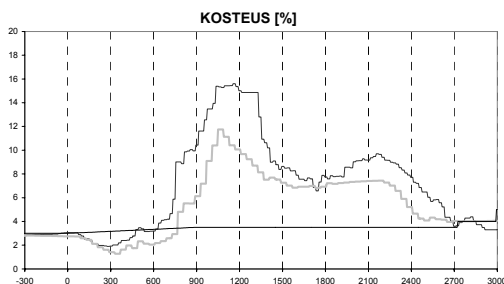
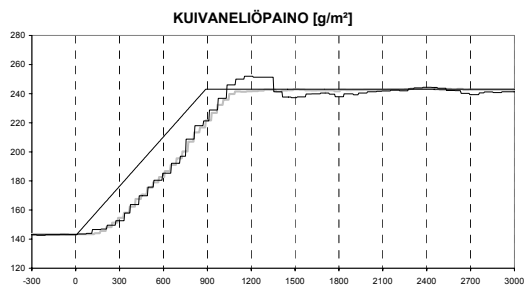


Kuva 37. Lajinvaihtosimulointi. Ohjaussuureet koneen nopeus, konemassavirtaukset ja huuliaukot eri kerroksille sekä päähöyryryhmän paine mitattuna (musta) ja simuloituna (harmaa). Aika sekunneissa.



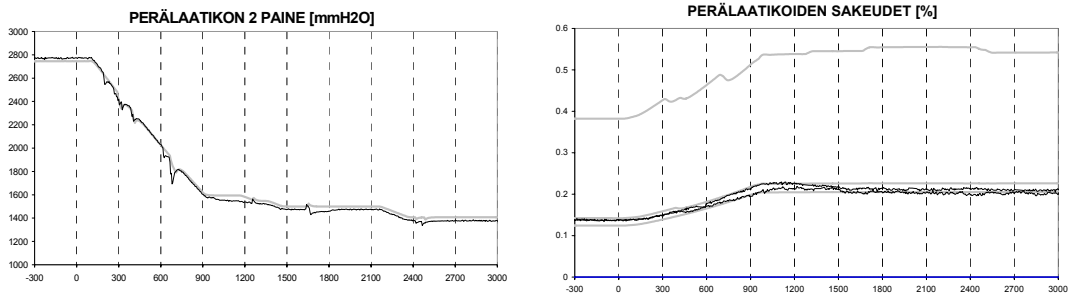
Kuva 38. Lajinvaihtosimulointi. Suihkusuhteet pinta- ja pohjakerroksille sekä keskikerrokselle mitattuna (musta) ja simuloituna (harmaa). Aika sekunneissa.

Höyrynpaineita rampitetaan tässä lajinvaihdossa ylöspäin (kuva 37). Lajinvaihtoautomaation laskema höyrynpaineen tavoite ei tässä tapauksessa ollut riittävä ja kosteus nousee selvästi yli tavoitearvon, kuten kuvasta 39 nähdään. Heti lajinvaihtoramppien ja loppuviiveiden jälkeen ajomiehistö on lähtenyt korjaamaan tilannetta. Ensimmäisenä toimenpiteenä paineen asetusarvo on asetettu maksimiin (noin hetkellä 900 s, kuva 37). Kun tämäkään ei laske kosteutta tavoitetasolle, on koneen nopeutta laskettu kolmeen otteeseen (kuva 37). Simuloinnissa on toistettu myös nämä ohjaukset, ja niiden vaikutukset näkyvät kuvan 39 simuloitussa kosteudessa.



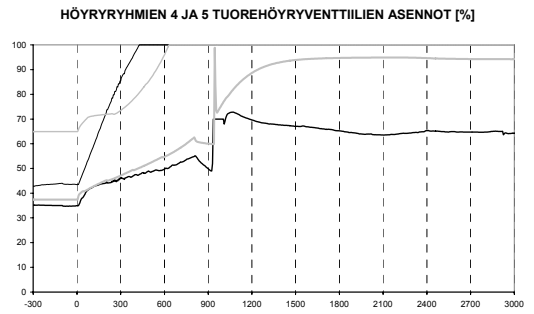
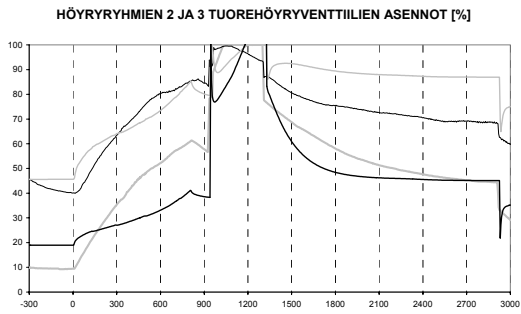
Kuva 39. Lajinvaihtosimulointi. Kuivaneliöpaino ja kosteus mitattuna (musta) ja simuloituna (harmaa) sekä vastaavat tavoitearvot (ohut musta). Aika sekunneissa.

Lajinvaihdon aikana ja pitkään sen jälkeenkin koko prosessi on muutostilassa. Seuraavissa kuvissa esitellään muita kuin lajinvaihdon varsinaisia ohjaus- tai laatusuureita. Kuvassa 40 on esitetty keskikerroksen perälaatikon paine sekä perälaatikoiden sakeudet. Pinta- ja pohjakerrosten perälaatikoiden paineet, jotka eivät näy kuvissa, käyttäytyvät hyvin samalla tavalla. Keskikerroksen sakeudesta on esitetty vain simulointi (ylin käyrä), sillä vastaava mittaus oli keruuhetkellä epäkunnossa. Tulokset osoittavat, että malli vastaa hyvin todellisuutta lyhyen kierron dynamiikan osalta.



Kuva 40. Lajinvaihtosimulointi. Keskikerroksen perälaatikon paine sekä perälaatikoiden sakeus mitattuna (musta) ja simuloituna (harmaa). Keskikerroksen osalta sakeusmittaus puuttuu. Aika sekunneissa.

Kuvassa 41 on esitetty yksityiskohtia höyry- ja lauhdejärjestelmän toiminnasta lajinvaihdossa. Vasemmalla näkyvät höyryryhmien 2 ja 3 tuorehöyryventtiilien asennot mitattuna ja simuloituna. Oikeanpuoleisessa kuvassa nähdään vastaavat venttiilit 4. ja 5. höyryryhmistä. Höyry- ja lauhdejärjestelmän sisäisessä kytkenässä käytetään niin sanottua kaskadijärjestelmää, jolloin ryhmät käyttävät ensisijaisesti korkeampipaineisilta ryhmiltä yli jäävän höyryä. Järjestelmän toiminta vastaa mallissa hyvin todellisuutta. Simulointitulokset vastaavat hyvin myös höyrylinjojen virtausmittauksia ja lauhteenkeräyssäiliön jälkeistä lauhteen virtausmittausta.



Kuva 41. Lajinvaihtosimulointi. Höyryryhmien 2, 3, 4 ja 5 tuorehöyryventtiilien asennot mitattuna (mustat) ja simuloituna (harmaat). Aika sekunneissa.

6. Kartonkikonemallin hyödyntäminen

6.1 Yleistä simulointimallin käyttämisestä

Kehitettyä dynaamista simulointimallia voidaan käyttää kahdella eri tavalla:

- *Vuorovaikutteisesti*, jolloin simuloinnin aikana tehdään ohjauksia simulointimalliin, esimerkiksi viritetään pinnankorkeuden säädintä. Myös tehtaan käyttöhenkilökunnan koulutuksessa käyttötapa on vuorovaikutteinen.
- *Eräajoihin*, jolloin simuloidaan ennalta suunnitellut simulointiajot esimerkiksi yöaikaan. Eräajosimuloinneissa käytetään apuna tekstitiedostoja, joihin kuvataan simulointiajojen vaatimat ohjaustoimenpiteet eri ajanhetkinä. Samaa eräajoon voidaan määrittellä useita simulointiajoja muuttuvilla parametrien arvoilla.

Simulaattorin käyttäjän kannalta tärkeimmät simulaattorin piirteet ovat helppokäyttöisyys ja luotettavat laskentatulokset. Simulointituloksia voidaan tarkastella seuraavilla tavoilla:

- Numeronäytöt mallin määrittelykuivissa
- Trendikäyrät
- Tiedostoon tulostaminen ja myöhempi käsitteleminen esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla
- On-line-tiedonsiirto muihin ohjelmiin.

Kaikkia näitä tapoja on käytetty tässä työssä kuvatun mallin rakentamisessa, viritämisessä ja hyödyntämisessä. Tiedostoon tulostaminen on käytännössä ainoa tapa analysoida kattavasti laajan mallin toimintaa. Mittaustietoa voidaan myös kirjoittaa malliin päin, jolloin esimerkiksi mallin reunapisteiden tila saadaan vastaamaan tarkalleen – tietysti mittausrvirheiden puitteissa – mittausjakson olosuhteita. Tyypillinen esimerkki on-line-tiedonsiirrosta muihin ohjelmiin on koulutussimulaattori, jossa simulointimalli on yhdistetty automaatiojärjestelmään. Tässä työssä hyödynnettiin on-line-tiedonsiirtoa Excel[®]-taulukkolaskentaohjelmaan kuivatusosan lämpötilaprofilin viritämisessä.

KA2-mallin laskentanopeus PC-tietokoneella (1,21 GHz, 512 MB RAM) on lähes kymmenkertainen reaaliaikaan nähden.

6.2 Lajinvaihtojen nopeuttaminen

Lajinvaihdon aikana valmistuu yleensä tuotteita, jotka eivät täytä vanhan eivätkä uuden lajin laatuvaatimuksia, ja ne joudutaan hyllyttämään. Kun lajinvaihtoja on toistuvasti, KA2-koneella keskimäärin kerran päivässä, on niillä selkeä vaikutus koneen tuotantotehokkuuteen.

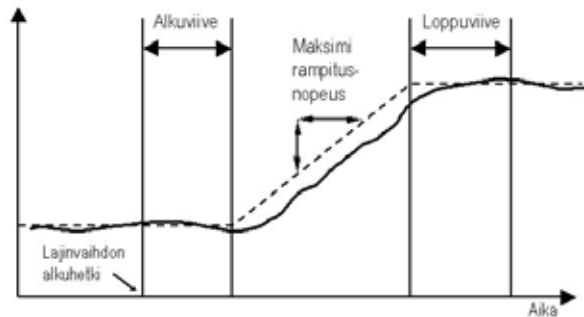
Paperi- tai kartonkikoneen lajinvaihtojen tutkiminen simuloinnin avulla ei ole uusi idea. Usein painopiste lajinvaihtoa koskevissa simuloinneissa on ollut lähestymisjärjestelmän viivedynamiikan tutkimisessa. Miyanishi et al. (1988) demonstroivat konesäiliön koon, viiraretention ja hylyn annostelun vaikutuksia lajinvaihdossa, jossa tuotteen resepti muuttuu. Prosessin ketteryys lajinvaihdossa on myös uusien prosessikonseptien suunnittelussa keskeinen kriteeri, jota on demonstroitu simuloimalla (Kokko 2002, Matula et al. 1999).

Ihalainen ja Ritala (1996) esittivät ajatuksen käyttää dynaamista simulointia lajinvaihdon ohjausten optimointiin. Murphy ja Chen (2000) ehdottivat uudenlaista ohjausstrategiaa automaattiseen lajinvaihtoon, jossa paperin kosteusheilattelua pyritään kompensoimaan ohjaamalla konemassavirtausta perälaatikon paineen perusteella. Mori et al. (2000) esittivät yksinkertaisen, mutta kuitenkin sylinterikohtaisen kuivatusosan mallin, jota he käyttivät höyrynpaineen tavoitearvojen ennustamiseen. Murphyn ja Chenin tapaan myös he ehdottivat epälineaaristen ramppien käyttöä lajinvaihdossa, mutta konemassavirtauksen lisäksi myös höyrynpaineen ohjaamiseen. Myös ennustavan mallipohjaisen säädön käyttöä lajinvaihdon ohjaamiseen on tutkittu (Välisuo et al. 1996, Kuusisto et al. 2001).

Tässä työssä esitetyn mallin avulla ei pyritty suoranaisesti lajinvaihtoautomaation kehittämiseen, vaan lisäämään ymmärrystä lajinvaihtojen dynamiikasta ja virittämään KA2-koneen olemassa olevaa lajinvaihtoautomaatiota.

Lajinvaihtoautomaation virittäminen ei ole yksinkertainen tehtävä. KA2-koneelakaan parametreja ei ollut muutettu järjestelmän käyttöönoton jälkeen (Vehviläinen 2001). Kullekin ohjattavalle suurelle määritellään alkuviive, maksimirampitusnopeus ja loppuviive kuvan 42 mukaisesti. Lisäksi ne annetaan erikseen ylös- ja alaspäin meneville rampeille. Alkuviiveen verran odotetaan ennen rampituksen aloittamista. Loppuviive määrittelee ajan, jonka jälkeen kyseisen ohja-

ussuureen puolesta voidaan kytkeä laatusäädöt päälle. Ohjauksilla on lisäksi synkronointi-parametri. Jos ohjaus valitaan mukaan synkronointiin, sen rampitus loppuu samanaikaisesti hitaimman ohjausrampin kanssa.

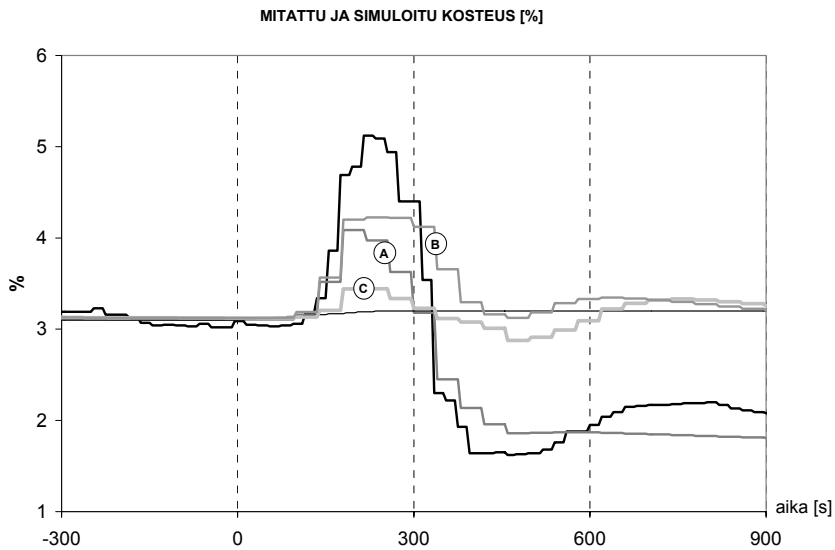


Kuva 42. Ohjaussuurekohtaisesti määriteltävät alkuviive, maksimirampitusnopeus ja loppuviive ovat lajinvaihtoautomaation keskeisiä viritysparametreja.

Simulaattorin avulla tutkittiin, kuinka lajinvaihtoparametrien muuttaminen vaikuttaa keskeisten laatusuureiden, eli neliöpainon ja kosteuden käyttäytymiseen lajinvaihdossa (Vehviläinen 2001). Lajinvaihdolle on tyypillistä kosteusheilautelu, jossa kosteus alenee, kun koneen nopeus lähtee hidastumaan, mutta nousee pian yli lähtötason (esim. kuva 39). Vastaavasti, jos lajinvaihdossa koneen nopeutta nostetaan, lähtee kosteus ensin ylöspäin ja laskee sitten alle lähtötason. Heilahtelun minimi- ja maksimipiikkien taso vaihtelee eri tapauksissa, riippuen muun muassa nopeusmuutoksen suuruudesta ja lasketun höyrynpaine-tavoitteen hyvydestä. Simulaattorilla tehtyjen virityskokeiden tavoitteena oli nopeuttaa lajinvaihtoja ja pienentää kosteuden heilahtelua lajinvaihdossa.

Kuvassa 43 on esitetty kosteusmittaus lajinvaihdossa ja vastaava simulointi sekä demonstroitu erästä virityskokeilua. Lajinvaihdossa kuivaneliöpainoa muutetaan arvosta 218 g/m^2 arvoon 182 g/m^2 . Kosteuden asetusarvo on vähän yli 3 %, ja se muuttuu lajinvaihdossa vain vähän (ohut musta käyrä). Käyrä A kuvaa perustapausta, jossa alkuperäinen lajinvaihto on toistettu simulaattorilla sellaisenaan. Nähdään, että kosteusheilautuksen maksimiarvo (noin hetkellä 200 sekuntia) jää mitattua arvoa matalammalle tasolle. Ilmiö toistui useissa lajinvaihtosimuloinneissa, mutta kosteuskäyttäytymisen muoto vastasi pääsääntöisesti erinomaisesti mitattua dataa. Käyrä B esittää simuloinnin, jossa 5. höyryryhmän höyryn-

paineen tavoitearvoksi asetettiin kokeilemalla haettu parempi arvo, joka oli 50 kPa alkuperäistä arvoa alempi. Loppukosteus on tavoitteen mukainen, mutta kosteusheilahdus ylöspäin suureni alkuperäiseen verrattuna. Käyrä C on simuloitu samalla höyrynpainetavoitteella kuin tapaus B, mutta lisäksi höyrynpaineen asetusarvon rampitusparametreja on muutettu: höyrynpaineramppi on vapautettu ramppien keskinäisestä synkronoinnista ja sen alkuviihettä on pidennetty. Oikealla paineen tavoitearvolla ja sopivalla lajinvaihtoautomaation virityksellä kosteusheilahdeltu saatiin tässä tapauksessa lähestulkoon poistettua.



Kuva 43. Lajinvaihtoautomaation virityskokeilu. Kosteuden asetusarvo on merkitty ohuella mustalla ja mitattu kosteus paksulla mustalla viivalla. Lajinvaihto on ensin toistettu simulaattorilla sellaisenaan (A), sitten korjatulla höyrynpainetavoitteella (B) ja lopuksi korjatulla höyrynpainetavoitteella ja muutetuilla päähöyryryhmän rampitusparametreilla (C).

Kosteusheilahdellun poistaminen viritysparametreja muuttamalla niin, että ratkaisu toimisi koko koneen toiminta-alueella, osoittautui vaikeaksi tehtäväksi. Sen sijaan lajinvaihtosimuloinnit osoittivat, että ohjauksuuksien maksimirampitusnopeuksia voidaan selkeästi nostaa ilman, että kosteusheilahdeltu aiheuttaisi ratakatkon vaaraa. Parametrimuutoksia tehtiin muun muassa 5. höyryryhmän paineen, koneen nopeuden ja suihkusuhteiden rampitusnopeuksiin (Vehviläinen 2001).

Koneen nopeuden rampitusnopeus – joka muutettiin suurimmillaan jopa 2,5-kertaiseksi lähtötasoon nähden – oli usein lajinvaihdon kokonaisaika määräävä tekijä. Sen nopeutus näkyi suoraan pohjakartongin neliöpainon vaihtumisen nopeutumisenä. Kosteustavoitteen saavuttamiseen nopeutus ei siirtynyt sellaisenaan. Selitys tähän on, että lasketuilla uuden lajin tavoitearvoilla kosteus ei useinkaan ole lajinvaihdon lopussa tavoitearvossaan, vaan vaaditaan käsin tehtäviä tai päälle kytkeytyvän kosteussäädön tekemiä höyrynpaineen muutoksia. Toisin sanoen tavoitelaskentaa kannattaisi pyrkiä tarkentamaan nykyisestä. Toisaalta sellaisiakin lajinvaihtoja havaittiin, joissa tavoitelaskenta oli onnistunut kohtuullisen hyvin, mutta kosteuspoikkeama – varsinkin ylöspäin tapahtunut – säilyi pitkään lajinvaihdon rampitusvaiheen loppumisen jälkeen. Mahdollinen selitys tälle on huuven tilassa tapahtunut selvä muutos, johtuen esimerkiksi ilmanvaihdon kapasiteetin hetkellisestä ylittymisestä, ja tilanteen palautuminen taas ennalleen muutamassa minuutissa. Tämä selittäisi myös sen, että simulaattori ennustaa usein kosteuspiikistä toipumisen alkavan mitattua aiemmin. Tilanteen todentaminen vaatisi mittauksia, joista huuven tilaa voitaisiin seurata lajinvaihtojen aikana.

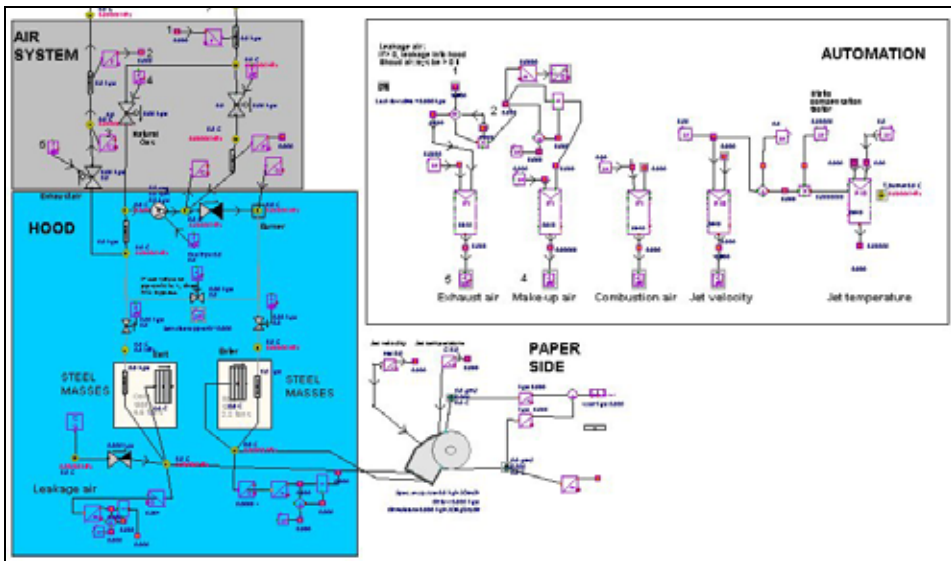
Lajinvaihtojen onnistumista seurattiin KA2-koneella ennen simulointitutkimuksia ja niiden perusteella tehtyjen toimenpiteiden jälkeen. Lajinvaihtoautomaation parametrien muuttamisen lisäksi koneen henkilöstöä ohjeistettiin myös havaituista epäjohtonmukaisuuksista lajinvaihtoautomaation käytössä (luku 5.6.4). Puolen vuoden seurannan jälkeen selvitettiin virityksen vaikutusta lajinvaihtoaikaan. Selvitykseen käytettiin tilastotietoja lajinvaihdoista, joissa päällystämättömien graafisten kartonkien neliöpainoa oli muutettu raaka-ainereseptin pysyessä samana. Havaittiin, että lajinvaihtoajat olivat näissä lajinvaihdoissa pienentyneet keskimäärin 15 %.

Koneelta kerättiin lajinvaihtodataa myös lajinvaihtoautomaation parametrien virittämisen jälkeen. Lajinvaihdoissa tehtävät rampitukset nopeutuivat huomattavasti, mikä tarkoitti selvää lajinvaihtojen aikaista muutosta koko koneen dynamiikassa. Kun näitä lajinvaihtoja toistettiin simulaattorilla, havaittiin simulointitulosten ja mittauksen vastaavan yhtä hyvin toisiaan kuin ennen muutoksiakin (Lappalainen et al. 2001). Tämä osoitti, että lajinvaihtoautomaation parametri-muutosten testaaminen simulaattorilla oli perusteltua.

6.3 Päällepuhalluskuivaimen lisääminen

Paperi- ja kartonkikoneille on tyypillistä, että kuivatusosan kapasiteetti rajoittaa tuotantoa. KA2-koneellakin on tämä tilanne osalla tuotettavista lajeista ja onkin pohdittu keinoja kuivatuskapasiteetin nostamiseksi.

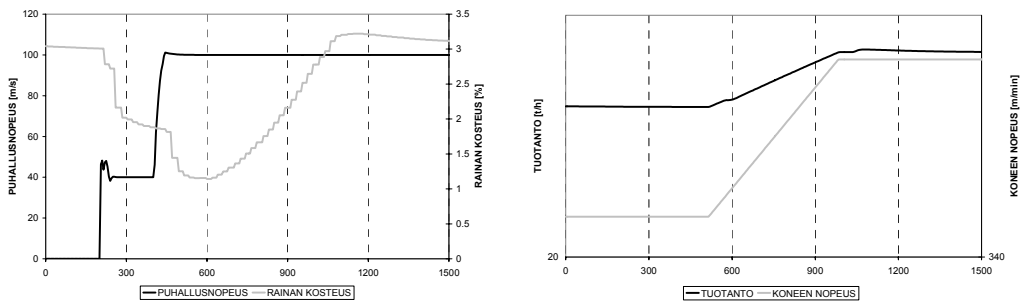
Tuuri et al. (2001) raportoivat Metso Paperin kehittämän uudentyyppisen kuivaimen, päällepuhallusyksikön (OptiDry) mallin kehittämisestä Apros Paper -simulaattoriin. KA2-mallia laajennettiin tällaisella kuivainmallilla ilma- ja poltinjärjestelmään ja säätöineen. Kuvassa 44 on esitetty lisätyn mallin pääosat. Tutkimuksen raportoi Ansaharju (2002).



Kuva 44. KA2-malliin lisätty päällepuhallusyksikön malli säätöpiireineen ja ilmajärjestelmään.

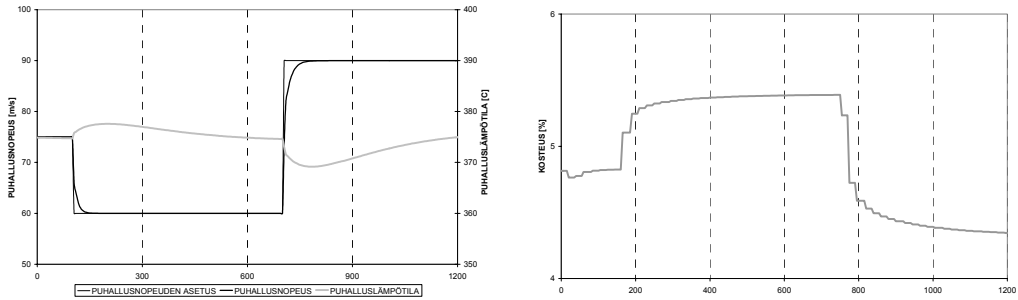
Päällepuhalluskuivaimen ominaishaihdutusteho on moninkertainen verrattuna sylinterikuivatuksen (Juppi ja Kaihovirta 2001). Niinpä vanhan koneen kuivatuskapasiteettia voidaan nostaa korvaamalla päällepuhallusyksiköllä kuivatusosan sylintereitä. Kuvan 45 simulointitulokset antavat havainnollisen esimerkin uuden kuivaimen vaikutuksesta kuivatuskapasiteettiin ja sitä kautta koneen tuotantoon. Simulointikokeessa ajetaan ensin prosessidatasta poimitun tyypillisen ajo-

tilanteen mukaisesti ilman päällepuhalluskuivainta. Hetkellä 200 sekuntia päällepuhalluskuivain otetaan käyttöön minimiteholla, mikä näkyy rainan kosteuden putoamisena. Hetkellä 400 sekuntia päällepuhallusnopeus nostetaan maksimi-arvoonsa, mikä pudottaa jälleen kosteutta. Kasvaneen kuivatuskapasiteetin ansiosta koneen nopeutta lähdetään nostamaan sama neliöpaino säilyttäen. Tuotanto nousee ja kartongin kosteus alkaa myös nousta. Koneen nopeuden nostoa jatketaan, kunnes loppukosteus on noussut kokeen lähtötasolle (n. 3,1 %), jolloin tuotannon nousu alkuperäiseen verrattuna voidaan laskea.



Kuva 45. Simulointikoe, joka havainnollistaa, kuinka päällepuhallusyksikön mukaan ottaminen mahdollistaa tuotannon nostamisen. Aika sekunneissa.

Kosteuden säädön kannalta päällepuhalluskuivain tarjoaa perinteiseen sylinterikuivatukseen verrattuna erään ylivertaisen ominaisuuden, nimittäin nopean vasteen ohjausmuutoksesta rainan kosteuteen. Mahdolliset ohjaussuureet ovat puhalluslämpötila ja puhallusnopeus. Suureiden välillä on vahva ristikkäisvaikutus. Puhallusnopeuden vaste on selvästi nopeampi, joten sitä käytetään pääasiallisena säätösuureena. Ristikkäisvaikutusta kompensoidaan ohjaamalla puhallusnopeuden kanssa samanaikaisesti puhalluslämpötilaan vaikuttavaa polttimen syöttöä. Kuvassa 46 on esitetty kaksi asetusravomuutosta kosteuteen säädettynä pelkällä päällepuhallusyksiköllä ja vastaavat päällepuhallusnopeuden ja -lämpötilan arvot. Ristikkäisvaikutus puhalluslämpötilaan pysyy pienenä kompensoinnin ansiosta. Aiheesta löytyy lisätietoa kirjallisuudesta (Kokko 2002, Kääriäinen 2001). Mallin avulla testattiin uuden kuivaimen tuomia mahdollisuuksia kosteuden säädössä.



Kuva 46. Simulointikoe, jossa rainan kosteuteen (oikealla) on tehty kaksi asetusarvomuutosta. Ohjaussuureena päällepuhallusnopeus. Aika sekunneissa.

6.4 Mallin hyödyntäminen tulevaisuudessa

Simulaattori on ollut asennettuna Kaukopäässä marraskuusta 1999 lähtien. Tehtaalla on ajettu kymmeniä lajinvaihtosimulointeja. Mallia ylläpidetään ja sille etsitään uusia käyttökohteita. Ainakin seuraavat käyttökohteet ovat mahdollisia:

- lajinvaihtojen kehittämiseen liittyvien uusien ideoiden testaaminen
- hyödyntäminen suunniteltavien prosessimuutosten testauksessa
- hyödyntäminen automaatiojärjestelmän uusinnassa
- koulutuskäyttö
- ongelmanratkaisu.

Mallilla viritettiin lajinvaihtoautomaatiota ja samaan käyttötarkoitukseen voidaan helposti palata. Tähän asti tehty työ osoitti, että lajinvaihdon ohjaaminen lineaarisia rampeja käyttämällä mahdollistaa tyydyttävän, muttei erinomaista lopputulosta kosteusdynamiiikan hallinnan suhteen. Toisaalta on muistettava, että virityskokeilut tehtiin eräajoina määrittelemällä parametrit käsin tekstitiedostoon. Virityskokeiluiden automatisointi, eli simulaattorin liittäminen optimointiohjelmaan saattaisi tuoda asiaan merkittävänkin parannuksen. Malli antaa hyvät mahdollisuudet testata kirjallisuudessa jo esitettyjä tai kokonaan uusia ideoita lajinvaihtoautomaation kehittämiseksi. On toki myönnettävä, että testausmahdollisuudesta huolimatta KA2-koneen kolmen kerroksen tuoma monimutkaisuus pitää uusien ratkaisujen viemisen tehdaskäyttöön asti haastavana.

Mallilla voidaan testata suunnitteilla olevien prosessimuutosten toimivuutta etukäteen. Esimerkkejä tällaisista muutoksista voisivat olla lyhyiden kiertojen prosessimuutokset tai höyry- ja lauhdejärjestelmän putkistokytkeiden muutokset. Myös uusien säätöstrategioiden toimivuutta voidaan testata vastaavalla tavalla.

Kohtuullisen hyvin toimivan järjestelmän merkittävä kehittäminen on aina vaikea päätös. Automaatiojärjestelmän uusinnassa tilanne voi muuttua. Lisäksi uusinnassa perusasioidenkin toimivuudesta on varmistuttava. Uuden automaatio-sovelluksen kytkeminen simulaattoriin mahdollistaa testaamisen todenmukaisessa ympäristössä. Kun liitostyö on tehty ja järjestelmää on käytetty testaukseen, voidaan sitä hyödyntää sellaisenaan koulutussimulaattorina.

Kehitettyä simulointimallia voidaan käyttää mallin kattavuuden ja tarkkuuden puitteissa tuotannossa ilmaantuvien ongelmien ratkaisuun. Käytännön hankaluutena tehtailla on se, että soveltava simulaattorin käyttö totutusta poikkeavalla tavalla vaatii käyttäjältä hyvää työkalun ja myös mallien pätemisalueen tuntemista. Suurimpana ongelmana on kuitenkin yleensä tehtävään soveltuvien henkilöiden ajan puute.

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

Työssä tarkasteltiin paperinvalmistusprosessien mallintamista ja dynaamista, laskentanopeudeltaan vähintään reaaliaikaista simulointia sekä kirjallisuuskatsauksen että käytännössä toteutetun sovellusesimerkin avulla. Dynaamisen simuloinnin taustaa ja nykytilaa sellu- ja paperiteollisuudessa pohdittiin. Kirjallisuudessa julkaistua mallinnuksen kannalta hyödyllistä tietoa esiteltiin erityisesti liittyen massasulpun virtausominaisuuksiin, erotusoperaatioihin, viiraosan ja märkäpuristuksen vedenpoistoon sekä sylinterikuivatukseen.

Kirjallisuuskatsaus tuo selvästi ilmi paperinvalmistusprosessien matemaattisen mallintamisen suurimmat haasteet. Raaka-aineet, puukuidut ja täyteaineet muodostavat veden kanssa epähomogeenisen, matemaattisesti vaikeasti karakterisoitavan ja ennustettavissa olevan kuitu-vesi-suspension. Prosessissa raakaainetta kuljetetaan erilaisissa kuiva-ainepitoisuuksissa kahdella täysin erityyppisellä tavalla: putkistossa painegradienttien liikuteltavana ja toisaalta rainana viirojen, telojen ja kuivatussylinterien välityksellä. Erityisesti näiden kahden alueen välistä tapahtumaa, rainanmuodostusta, on vaikeaa tutkia mittauksin tuotanto-olosuhteissa saati kuvata teoreettisesti. Paperi- ja kartonkikoneen raina on yleensä useita metrejä leveä ja erityisesti kartonkikoneilla raina on myös suhteellisen paksu. Rainan poikki- ja paksuussuuntaisen epähomogeenisuuden kuvaaminen simulointimallissa lisää laskentatarvetta huomattavasti. Molemmat dimensiot ovat kuitenkin olennaisia, kun tavoitellaan esimerkiksi radan poikisuuntaisten säätöjen kehittämistä tai lämmön- ja aineensiirron tarkkaa ennustamista. Eri osatekijöiden lisäksi paperinvalmistusprosessin ja sen automaation muodostama kokonaisuus on huomattavan monimutkainen ja sisältää paljon takaisinkytkentöjä.

Toisaalta mallinnuksessa tehdään aina yksinkertaistuksia. Siksi on tärkeää verifioida mallin luotettavuutta mittauksia vastaan. Tässä työssä keskeinen mallin yksityiskohtaisuutta rajaava tekijä on ollut mallin laajuus yhdessä reaaliaika-vaatimuksen kanssa. Mallinnukselle ja simuloinnille asetetut tavoitteet vaikuttavat myös käytettävän simulointiympäristön valintaan. Työssä käytettiin Aprosimulointiympäristöä ja sen paperi- ja sellupuolelle kehitettyä versiota (Apros Paper).

Sovellusesimerkkinä työssä esiteltiin Stora Enso Oyj:n Kaukopään tehtaiden kartonkikone 2:n mallinnusta ja simulointia. Raportoitu malli kattaa prosessin jauhatuksen syöttösäiliöiltä viidennen höyryryhmän jälkeiselle mittaraamille asti. Myös säätöpiirit ja koneella käytettävä lajinvaihtoautomaatio mallinnettiin. Mallinnuksessa käytetyt periaatteet ja yksinkertaistukset esiteltiin. Malli viritettiin ja sen toimintaa validoitiin käyttäen sekä automaatiojärjestelmällä kerättyä mittausdataa lajinvaihtoista että käytettävissä olleita muita mittauksia. Mittaus- ja simulointitulosten vertailun perusteella malli kuvaa hyvin KA2-koneen dynaamista käyttäytymistä. Esimerkiksi perälaatikoiden sakeudet ja paineet seuraavat simulaattorissa erittäin hyvin vastaavia mittauksia. Laatusuureista neliöpainon ennustaminen onnistuu simulaattorilla hyvin ja kosteuden ennustaminen kohtuullisen hyvin.

Simulointimallin rakentamiselle alun perin asetettu välitön tavoite saavutettiin. Mallilla voitiin toistaa koneella tehtyjä lajinvaihtoja riittävällä tarkkuudella niin, että automaattisen lajinvaihdon lukuisten parametrien vaikutusta päästiin tutkimaan. Havaittiin, että simulaattori soveltuu erinomaisesti monimutkaisen automaation parametrimuutosten testipenkiksi. Lajinvaihtoautomaation mallin ja todellisen järjestelmän toiminnassa havaittuja eroja selvitettyä huomattiin, että koneen ajajat käyttivät lajinvaihtoautomaatiota keskenään poikkeavilla tavoilla. Vuoroja opastettiin parempaan ja yhdenmukaisempaan käytäntöön. Simuloimalla haetut uudet lajinvaihtoautomaation parametrit asetettiin myös tuotantokoneelle. Lajinvaihtojen tilastollinen seuranta ennen ja jälkeen muutosten osoitti lajinvaihtoaikojen lyhentyneen noin 15 prosenttia. Kehitettyä mallia hyödynnettiin lajinvaihtotutkimuksen jälkeen päällepuhalluskuivaimen lisäämisen tuomien mahdollisuuksien tutkimiseen. Uuden kuivaimen tuomaa tuotantokapasiteetin nousua ja hyödyntämistä kosteuden säädössä selvitettiin.

Käyttöliittymää kehittämällä mallia voidaan hyödyntää käyttökonekannan koulutuksessa tai prosessin ohjauksen tukivälineenä. Sellaisenaan simulaattori soveltuu suunniteltavien prosessi- tai automaatiomuutosten evaluointiin ja automaatiosovelluksen testaamiseen automaatiuusinnassa sekä tuotannon ongelmien selvitystyökaluksi. On tilanteita, joissa simulointi on ainoa tapa vertailla ongelman eri ratkaisuvaihtoehtoja keskenään, jos tuotantokoneella kokeilu ei tule kysymykseen. Kuivatusosan mallia tai vastaavaa lähestymistapaa voitaisiin soveltaa myös lajinvaihtoautomaation osana uuden lajin höyrynpainetavoitteiden ennustamisen tarkentamiseksi.

Mallintamisessa on aina vastattava kysymykseen, miten yksityiskohtaista ja tarkasti ennustavaa mallia tavoitellaan. Tasapaino mallintamistarkkuudessa koko mallinnusalueella on tärkeää. Kirjallisuuskatsaus osoitti, että tietämystä prosessin ilmiöistä ja käyttäytymisestä on enemmän kuin tässä työssä on hyödynnetty. Usein tämän tiedon soveltamiseksi käytäntöön ja mallien verifioimiseksi tarvittaisiin kuitenkin uusia on-line-mittauksia prosessista tai laajojen näytesarjojen ottamista ja analysointia. Tässä työssä käytettyjen ratkaisujen ja nähtyjen tulosten valossa on hyödyllistä pohtia, missä kohdin mallin tarkentaminen kannattaisi ja missä tarkennuksen tuoma lisähyöty olisi vähäinen tai merkityksetön.

Kartongin kosteusdynamikan mallintamisessa suurin ongelma on viira- ja puristusosien toiminnan ennustaminen riittävän realistisesti. Koneen märässä päässä tapahtuvan vedenpoiston tarkempi mallintaminen vaatisi riittävän suuria muutostilanteita sisältävää mittaustietoa viira- ja puristinosilta. Yksinomaan se, että kuiva-ainepitoisuutta voitaisiin mitata luotettavasti ennen puristinosaa, antaisi mallintamiseen erittäin arvokasta lisätietoa. Kuivatusmallin osalta tarkennusta voidaan hakea suoraviivaisesti diskretoimalla raina paksuussuuntaan ja laskeamalla kosteus- tai ainakin lämpötilajakauma rainan sisällä. Toisaalta tässä työssä esitettiin uutta tietoa ja tuloksia siitä, kuinka rainan yksipistemallilla saadaan toimiva ratkaisu dynaamisen simuloinnin käyttöön. Huuvan tilan muuttuminen lajinvaihdon aikana kaipaa lisäselvitystä. Massatyypin ja jauhatusteoksen huomioiminen vedenpoiston mallintamisessa on haastava alue, mutta siinä edistyminen parantaisi mallin ennustuskykyä tilanteissa, joissa koneella tehdään merkittäviä resepti- tai jauhatusmuutoksia.

Massan virtauskäyttäytymisen tarkempi huomioiminen paperi- tai kartonkikoneen mallissa – ainakaan tässä työssä esitettyihin käyttötarkoituksiin – ei tunnu välttämättömältä. Sitä keskeisempää olisi putkissa ja säiliöissä tapahtuvan epäideaalisen sekoittumisen huomioiminen, mikä lisäisi mallin realismia tuottamalla stokastisuutta sakeusdynamikkaan. Erotusoperaatioiden tarkempi mallinnus vaatisi massan kuvaamisessa lähestymistavan muutosta, eli kuitufraktioiden ja tarvittaessa myös roskien huomioimista. Siinä suhteessa parannus nyt esitellyissä käyttökohteissa ei olisi merkittävä. Tilanne muuttuu selkeästi, jos kuidunpituusjakauman vaikutusmekanismeja retentioon, vedenpoistoon ja laatuun voidaan huomioida. Massan mukana olevien epäpuhtauksien simulointia voitaisiin ehkä käyttää tutkittaessa ratakatkojen tai paperin reikien syntyä.

Dynaaminen simulointi on uusi asia sellu- ja paperitehtailla, ja osa mallintamisen motivaatiosta on usein uuteen tekniikkaan tutustuminen omassa toimintaympäristössä. Tämä oli tilanne myös KA2-koneen mallinnusta aloitettaessa. Kehitettyä simulointimallia sovellettiin ensimmäisenä lajinvaihtotutkimukseen, mikä kuitenkin otettiin huomioon jo mallin kehittämisvaiheessa. Tällainen ongelmalähtöinen lähestymistapa on osoittautunut menestyksekkäämmäksi kuin työkalu- ja tekniikkakeskeinen, jossa ensin rakennetaan simulaattori ja sitten ryhdytään miettimään, mitä sillä tehtäisiin. Toisaalta mallinnusvaiheeseen hyödyllisyyttä ei pidä aliarvioida. Kirjallisuudessa usein esitetty kokemus teollisuusprosessien mallintamis- ja simulointiprojekteista on, että mallintamisvaiheessa havaitut prosessin ja automaation kehityskohteet sekä mukana olleiden henkilöiden prosessidynamiikan ymmärryksen kasvu riittävät kattamaan projektin kustannukset.

KA2-mallia sovellettiin myös tarkoitukseen, joka ei ollut tiedossa mallin rakennusvaiheessa. Merkittävän prosessimuutoksen – päällepuhalluskuivaimen lisäämisen – vaikutuksia voitiin tutkia olemassa olevaan malliin tehdyillä pienillä muutoksilla.

Sellu- ja paperiprosessien simulointi on haastava alue. Tärkeää mallinnus- ja simulointiprojektin onnistumiselle on saada sopivat ja innostuneet henkilöt tehtaalta mukaan. Vaikka mallinnusta tehtäisiinkin lähinnä tehtaan ulkopuolisten henkilöiden voimin, on tehtaan oman henkilöstön osallistuminen sopivalla panoksella jo mallin rakentamis- ja validointivaiheessa erittäin hyödyllistä. Edelleen on tärkeää, että mallinnukseen ja simulointiin osallistuvan tiimin jäsenet eivät vaihdu liikaa, jotta mallinnukselle tyypillinen tiedon kumuloituminen ja kypsyminen eivät vaarantuisi. Rakennetun oivallisenkin simulaattorin pitkän elinkaaren uhkakuvina ovat henkilövaihdokset, muut työkiireet ja käyttämisen hankaluus esimerkiksi puolen vuoden tauon jälkeen sekä mallin päivitystarve vastamaan prosessin ja automaation muuttuvaa nykytilaa. Siksi simulaattorista on tehtävä osa tulevien muutosten suunnittelua ja hallintaa. Onnistuminen sellu- ja paperitekniikan simuloinnin eteenpäinviennissä vaatii uusia työkaluja ja menetelmiä kehittävän, osaavan ja innostuneen asiantuntijatiimin sekä ennakkoluulottomia ja yhteistyöhaluisia kumppaneita teollisuudesta.

Lähdeluettelo

Aaltonen, P. Sulpun suotautuminen. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 121–149.

Aaltonen, P, Pfaler, J. & Ryti, N. Rainanmuodostus. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 551–606.

Aario, M. & Kosonen, V. Massasäiliöt. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 469–482.

Ansaharju, J. *Increasing drying capacity on a board machine*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Espoo 2002, 112 s.

Appel, D. W. & Hong, S. H. Optimizing heat transfer using bars in dryers, *Proceedings of the International Water Removal Symposium*, The British Paper and Board Industry Federation, Lontoo 1975.

Bale, S., Nuyan, S., Spring, R., Taha, O. & Dumont, R. Automatic grade change and optimisation at Frasier Papers' Madawaska operations, *Proceedings of the 86th annual meeting of PAPTAC*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal 2000, s. B203–B207.

Berndtson, J., Niemi, A. J. & Karine, S. Experiences on automatic measurements and control of the dry line on wire, *Proceedings of the XXVII EUCEPA Conference*, Association Technique de l'Industrie papetière, Grenoble 1999, s. 131–136.

Britt, K. W. & Unbehend, J. E. Water removal during paper formation, *Tappi Journal* **68** (4) (1985) s. 104–107.

CADSIM, CADSIM Plus Process Simulation, <http://www.aurelsystems.com/>, 3.2.2003.

Caufield, D. F., Young, T. L. & Wegner, T. H. How web and press parameters interact to control water removal in the wet press, *Tappi Journal* **69** (6) (1986) s. 90–93.

Cutshall, K. Nature of paper variation, *TAPPI Wet End Operations Short Course*, TAPPI Press, Memphis 1997, s. 371–402.

Danielsson, K. & Funkquist, J. Dewatering of a deformable porous media: a simulation study of the press nip of a paper machine, *Proceedings of the Eurosim'98 Congress*, toim. K. Juslin, The Federation of European Simulation Societies, Espoo 1998, s. 139–144.

Donat, V., Paris, J. & Van de Ven, T. G. M. Simulation of a paper machine twin wire forming section, *Journal of pulp and paper science* **26** (2000) s. 284–288.

Duffy, G. G. & Titchener, A. L. Design procedures for obtaining pipe friction loss for chemical pulps, *Tappi Journal* **57** (5) (1974) s. 162–166.

Duffy, G. G. A review and evaluating of design methods for calculating friction loss in stock piping systems, *Tappi Journal* **59** (8) (1976) s. 124–127.

Duffy, G.G. The importance of mechanistic-based models in fibre suspension flow, *Proceedings of the 54th Appita annual conference*, Appita, Melbourne 2000, s. 337–342.

Duffy, G. G. & Abdullah, L. Flow of fibre in small diameter pipes, *Proceedings of the 56th Appita annual conference*, Appita, Rotorua 2002, ss. 127–133.

Duplantis, W. E. & Green, S. I. Measurements of fibre mat permeability with a new device, *Journal of pulp and paper science* **28** (2002) s. 240–244.

Eskes, J. M. Dynamic simulation in industrial plants, *Proceedings of 1992 Process Control Conference*, TAPPI press, Atlanta 1992, s. 59–70.

Extend, Home:Products:Additional Modules,
http://www.imaginatinc.com/prods_modules.html, 3.2.2003.

Flowmac, A tool for Evaluation of Pulp and Papermaking Processes, <http://www.papermac.se/flowmac.html>, 3.2.2003.

Friesen, T., Bourdet, N., Tuomela, P., Allison, B. & Olson, J. A. *Proceedings of the 88th annual meeting of PAPTAC*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal 2002, s. C33–C38.

Gooding, R. W & Kerekes, R. J. Consistency changes caused by pulp screening, *Tappi Journal* **75** (11) (1992) s. 109–118.

Gustafsson, H., Surakka, J., Huuskonen, J., Lankinen, M. & Matula, J. Massan puhdistus ja ilmanpoisto. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 497–524.

Hammarström, D., Hämäläinen J. P. & Dahlkild, A. CFD simulation of fiber suspensions, *Proceedings of VIII Suomen Mekaniikkapäivät*, toim. Råback, P., Santaoja, K. & Stenberg, R. CSC ja TKK, Espoo 2003, s. 71–76.

Heikkilä, P. *A study on the drying process of pigment coated paper webs*, Väitöskirja, Turun yliopisto, Kemiantekniikan osasto, Turku 1993, 150 s.

Heikkilä, P. & Paltakari, J. Fundamentals of paper drying. Teoksessa *Papermaking Part 2, Drying*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 55–83.

Heikkilä, P., Timofeev, O. & Kiiskinen, H. Multicylinder drying. Teoksessa *Papermaking Part 2, Drying*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 85–125.

Hinds, J. A. & Neogi, A. N. The dynamic computer simulation of a paper machine dryer, *Tappi Journal* **66** (6) (1983) s. 79–82.

Hojjatie, B. & Coffin, D. W. On-line freeness sensors used in papermaking, *Paper Technology* **40** (5) (1999) s. 29–34.

Honkalampi, P. & Kataja, M. Puristinnipin vedenpoistotapahtuman analysointi JYFL:n märkäpuristusmallilla. Teoksessa *Kokoonpuristuvan huokoisen aineen virtausvastus: Loppuraportti*. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, Jyväskylä 1995, 49 s.

Hämäläinen, J., Huovinen, T., Holmberg, J., Lappalainen, J. & Silvennoinen, J. Tuotannaikaisiin mittauksiin perustuvat paperin laatumallit, *Proceedings of Automaatio 97*, Suomen Automaatioseura, Helsinki 1997, 6 s.

l'Anson, S. & Ashworth, T. Differentiated permeability surface layer (DPSL) pressing theory, *Tappi Journal* **83** (11) (2000) 16 s.

IDEAS, Ideas home page, <http://www.ideas-simulation.com>, 3.2.2003.

Ihalainen, R. & Ritala, R. Optimal grade changes, *Proceedings of Control Systems 1996*, Canadian Pulp and Paper Association, Halifax 1996, s. 213–216.

Indmeas, Kenttäkalibroinneissa havaitut virtausmittausten virheet, *Kirjallinen tiedonanto*, 11.2.2003, Espoo, 1 s.

Ingmanson, W. L., Andrews, B. D. & Johnson, R.C. Internal pressure distributions in compressible mats under fluid stress, *TAPPI* **42** (10) (1959) s. 840–849.

Johnson Systems International, *Kuivatusosan mittaukset; STORAENSO Packaging Boards; Kaukopää KA-2*, Raportti, 18.9.2002, 52 s.

Jong, J. H., Baines, W. D. & Currie, I. G. Experimental characteristics of forming fabrics and fibre mats, *Journal of pulp and paper science* **25** (1999) s. 95–99.

Julien Saint Amand, F. & Perrin, B. Screening: experimental approach and modelling, *Proceedings of the 1998 TAPPI Pulping Conference*, TAPPI Press, Montreal 1998, s. 1019–1031.

Julien Saint Amand, F. & Perrin, B. Fundamentals of screening: effect of rotor design and fibre properties, *Proceedings of the 1999 TAPPI Pulping Conference*, TAPPI Press, Orlando 1999, s. 941–955.

Juppi, K. & Kaihovirta, J. Impingement drying of printing papers at elevated temperatures, *Tappi Journal* **84** (7) (2001) 11 s.

Jönsson, K. A-S. & Jönsson, B. T. L. Fluid flow in compressible porous media: II: dynamic behavior, *AIChE Journal*, **38** (1992) s. 1349–1356.

Kangas, P. *Modelling effects of beating on paper properties*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Espoo 2001, 114 s.

Kankaanpää, M. & Verho, A. Rainan märkäpuristus. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 623–640.

Kappen, J. Simulation in the paper industry - an overview, *PTS News* (9) (2002) s. 18–22.

Karlsson, M. *On-line study and mathematical modelling of a paper dryer section*, Väitöskirja, Turun yliopisto, Kemianteeniikan osasto, Turku 1984, 64 s.

Kaunonen, A. *Paperikoneen lyhyen kierron simulaattorin kehittäminen*, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere 1983, 70 s.

Kerekes, R. J. & McDonald, J. D. A decreasing permeability model of wet pressing: theory, *Tappi Journal* **74** (12) (1991) s. 150–156.

Kerekes, R. J. Characterizing fibre suspensions, *Proceedings of TAPPI 1996 Engineering Conference*, Tappi Press, Chicago 1996, s. 21–28.

Kettunen, K. *Kartonkoneen viiraosan kaksifaasivirtauksen matemaattinen malli*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Kemian tekniikan laitos, Espoo 1995, 50 s.

Khanbaghi, M., Allison, B. J., Olson, J. A. & Backström, J. A dynamic model of pressure screen hydraulics, *Journal of pulp and paper science* **27** (2001) s. 124–129.

Klemola, K. & Turunen, I. *State of mathematical modelling and simulation in the Finnish process industry, universities and research centres*, Technology Review 107/2001, Tekes, Helsinki 2001, 94 s.

Kokko, T. *Development of papermaking process based on integrated process and control design*, Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere 2002, 141 s.

Kokko, T., Huhtelin, T., Ahola, J. & Lautala, P. Integrated process and control design of new stock preparation system, *Proceedings of Control Systems 2000*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Victoria 2000, s. 63–66.

Kuhasalo, A., Niskanen, J., Paltakari, J. & Karlsson M. Introduction to paper drying and principles and structure of a dryer section. Teoksessa *Papermaking Part 2, Drying*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 16–53.

Kuusisto, R., Kosonen, M., Shakespeare, J. & Huhtelin, T. Multivariable control of paper machine grade changes, *Proceedings of the 87th annual meeting of PAPTAC*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal 2001, s. C141–144.

Kääriäinen, J. *Paperin kosteudensäätö päällepuhallusyksiköllä*, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere 2001, 61 s.

Lappalainen, J., Tuuri, S., Karhela, T., Hankimäki, J., Tervola, P., Peltonen, S., Leinonen, T., Karppanen, E., Rinne, J. & Juslin, K. Direct Connection of Simulator and DCS Enhances Testing and Operator Training, *Proceedings of TAPPI 1999 Engineering / Process & Product Quality Conference*, TAPPI Press, Anaheim 1999, s. 495–502.

Lappalainen, J., Myller, T., Vehviläinen, O., Tuuri, S. & Juslin, K. Enhancing grade changes with dynamic simulation, *Proceedings of TAPPI Engineering Conference 2001*, TAPPI Press, San Antonio 2001, 11 s.

Laukkanen, I., Lappalainen, J. & Juslin, K. Using a dynamic simulation model in a plant design project - A case study, *Proceedings of CHISA'98 13th International Chemical Engineering Congress*, EFCE, Praha 1998, 12 s.

Laukkanen, I. *Studies in using hybrid dynamic simulation through the life-cycle of paper mill*, Lisensiaatintyö, Teknillinen korkeakoulu, Kemian tekniikan osasto, Espoo 2001, 117 s.

Lehtinen, A., Ilmoniemi, E., Wahren, D. & Koskimies, J. Puukuitujen käyttäytyminen vesilietteessä. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörin Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörin Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 101–119.

Lindberg, C.-F., Dahlquist, E. & Ekwall, H. Quality improvement, process optimization, and uptime increasing with a pulp and paper simulator, *Proceedings of the 6th International Conference on New Available Technologies*, Swedish Association of Pulp and Paper Engineers, Tukholma 1999, s. 385–388.

Lumiainen, J. Refining of chemical pulp. Teoksessa *Papermaking Part 1, Stock Preparation and wet end*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 87–122.

Matula, J., Björkstедt, L.-M. & Tarhonen, P. *ShortFlow – paperikoneen uusi lyhyen kierron prosessi sekä tehdaskonsepti*, Paperitehdaspäivät, Ahlstrom-Machinery Oy, Savonlinna 1999, 5 s.

Matula, J. P. & Kukkamäki, E. New findings of entrained air and dissolved gases in pm wet end: mill case study, *Tappi Journal* **83** (4) (2000) 22 s.

McDonald, J. D. & Kerekes, J. A decreasing-permeability model of wet pressing: applications, *Tappi Journal* **74** (12) (1991) s. 142–149.

McDonald, J. D. & Kerekes, J. A decreasing-permeability model of wet pressing with rewetting, *Tappi Journal* **78** (11) (1995) s. 107–111.

McDonald, J. D. & Amini, J. Predicting the press dewatering of heavyweight grades, *Tappi Journal* **83** (2) (2000) s. 79–82.

McDonald, J. D., Hamel, J. & Kerekes, R. J. Design equation for paper machine press sections, *Journal of pulp and paper science* **26** (2000) s. 401–406.

Menani, S., Koivo, H. N., Huhtelin, T. & Kuusisto, R. Dynamic modeling of paper machine from grade change data, *Proceedings of Control Systems 1998*, Suomen Automaatioseura, KCL ja Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, Porvoo 1998, s. 79–86.

Miyanishi, T., Iida, K. & Iwatsu T. Dynamic simulation for efficient paper machine grade change, *Tappi Journal* **71** (1) (1988) s. 49–56.

Moller, K. & Norman, B. Calming lengths in pulp suspension flow, *Svensk papperstidning* **78** (16) (1975) s. 582–587.

Moller, K. & Duffy, G. G. An equation for predicting transition-regime pipe friction loss, *Tappi Journal* **61** (1) (1978) s. 63–66.

Mori, Y., Shimizu, H. & Takao, K. Development of a new automatic grade change control system for paper machine, *Proceedings of Control Systems 2000*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Victoria 2000, s. 231–234.

Morton, W., Paterson, W. R. & Cameron, D. B., Dynamic data reconciliation in process simulation, *Proceedings of 1992 Engineering Conference*, TAPPI Press, Atlanta 1992, s. 789–799.

Murphy, T. F. & Chen, S. C. Fast grade change for paper-making processes, *Proceedings of Control Systems 2000*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Victoria 2000, s. 189–192.

Myller, T. Kaukopään KA2:n prosessikuvaus, *Kirjallinen tiedonanto*, Imatra 23.3.2000, 1 s.

Myller, T. KA2:n puristinmittaukset, *Kirjallinen tiedonanto*, Imatra 22.1.2002, 1 s.

Myréen, B. Modelling the flow of pulp suspensions in pipes: Part 1, *Paperi ja Puu* **71** (5) (1989a) 497–504.

Myréen, B. Modelling the flow of pulp suspensions in pipes: Part 2, *Paperi ja Puu* **71** (7) (1989b) 791–798.

Nelson, G. L. The screening quotient: a better index for screening performance, *Tappi Journal* **64** (5) (1981) s. 133–134.

Niemenmaa, A., Lappalainen, J., Juslin, K. & Laukkanen, I. Dynamic Modelling and Simulation of Paper Machine Drying Section, *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, toim. C. Strumiłło & Z. Pakowski, Łódź Technical University, Łódź 1996, s. 1157–1164.

Niemi, A. J., Berndtson, J. & Karine, S. Improved wet end control of the paper machine, *Proceedings of Control Systems 1998*, Suomen Automatioseura, KCL ja Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, Porvoo 1998, s. 371–378.

Nilsson, L. Some observations regarding the drying capacity of paper machines, *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*, toim. C. W. Cao, Y. K. Pan, X. D. Liu & Y. X. Qu, Beijing University of Chemical Technology, Peking 2002, s. 1782–1791.

Nilsson, P. & Larsson K. O. Paper web performance in a press nip, *Pulp and paper magazine of Canada* **69** (24) (1968) s. 66–73.

Nissinen, A., Tuuri, S., Rinta-Kokko, P., Airikka, P., Huhtelin, T. & Lautala, P. Modelling and simulation of web forming process with dilution headbox, *Proceedings of the 19th IASTED International Conference Modelling, Identification and Control*, IASTED, Innsbruck 2000, 5 s.

Norman, B. & Tegengren, Å. Mixing of thick stock and white water, *Proceedings of the XXIII EUCEPA Conference*, Paper Industry Technical Association, Harrogate 1988, vol. 1 s. 52–56.

Norman, B. *Pappersteknik*, Institutionen för pappersteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, STFI-tryck, Tukholma 1992, 496 s.

Norman, B. Web forming. Teoksessa *Papermaking Part 1, Stock Preparation and wet end*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 193–250.

Olson, J. A. Fibre length fractionation caused by pulp screening, slotted screen plates *Journal of pulp and paper science* **27** (2001) s. 255–261.

Paljakka, M., Karhela, T., Laakso, P., Tuuri, S., Lappalainen, J. & Juslin, K. Simulation integrates Process and Automation Development, *Automation Technology Review 2000*, VTT Automation, Helsinki 2000, s. 52–58.

Paltakari, J. *Koelaite ja menetelmä paperin kuivatusteknisten parametrien määrittämiseksi*, Lisensiaatintyö, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1995, 62 s.

Paltakari, J. *Internal and external factors affecting the paper drying process*, Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Espoo 2000, 166 s.

PAPES, *KA2 höyry- ja lauhdejärjestelmän tutkimus*, Raportti PAPES1817, 27.11.2002, 16 s.

Paradis, M. A., Genco, J. M., Bousfield, D. W., Hassler, J. C. & Wildfong, V. Determination of drainage resistance under known shear rate, *Tappi Journal* **1** (6) (2002) s. 12–18.

Persson, H. *Dynamic modelling and simulation of multi-cylinder paper dryers*, Lisensiaatintyö, Lund University, Department of Chemical Engineering, Lund 1998, 104 s.

Peters, N. Commissioning a training simulator preparation and follow-up, *Proceedings of the 1988 Process Simulation Symposium*, Canadian Pulp and Paper Association, Quebec 1988, s. 9–14.

Piipponen, J. KCL-Propose – A new simulation and optimisation system for papermachines, *Paperi ja Puu* **78** (6–7) (1996) s. 40–44.

Rantakokko, J. *Paperikoneprosessin simulointimalli*, Lisensiaatintyö, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1993, 160 s.

Riepen, M., Sinon, A. M. J. & Mulder, B. M. P. The integrated paper machine dewatering model (IPM), *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, toim. C. Strumillo & Z. Pakowski, Łódź Technical University, Łódź 1996, s. 1197–1204.

Räisänen, K. *Water removal by flat boxes and a couch roll on a papermachine wire section*, Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1998, 125 s.

Shirt, R. W. *Modelling and identification of paper machine wet end chemistry*, Väitöskirja, The University of British Columbia, Department of Electrical and Computer Engineering, Vancouver 1997, 183 s.

Shirt, R. W. & Manness, M. Dynamic simulation of retention chemistry effects using a material attribute array structure, *Proceedings of TAPPI 1999 Engineering/Process & Product Quality Conference*, TAPPI Press, Anaheim 1999, s. 185–195.

Sidwall, S., Sadeghi, M. & Douglas, W. J. M. Comparative structures for simulation of paper drying, *Proceedings of TAPPI 1999 Engineering/Process & Product Quality Conference*, TAPPI Press, Anaheim 1999a, s. 239–259.

Sidwall, S., Bond, J.-F. & Douglas, W. J. M. Industrial validation of a multiple technique paper drying simulator, *Proceedings of TAPPI 1999 Engineering/Process & Product Quality Conference*, TAPPI Press, Anaheim 1999b, s. 271–301.

Silvennoinen, E., Juslin, K., Hänninen, M., Tiihonen, O., Kurki, J. & Porkholm, K. *The APROS Software for Process Simulation and Model Development*, VTT, Research reports 618, Espoo 1989, 106 s.

Soininen, M. Paperiradan kuivatus. Teoksessa *Paperin valmistus: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa 1*, toim. A. Arjas, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, 2. painos, Turku 1983, s. 641–724.

Statie, E., Salcudean, M., Gartshore, I. & Bibeau, E. A computational study of particle separation in hydrocyclones, *Journal of pulp and paper science* **28** (2002) s. 84–92.

TAPPI, Pipe friction pressure loss of pulp suspensions: literature review and evaluation of data and design methods, *TAPPI Technical Information Sheets*, TAPPI TIS 0410-12, TAPPI Press, Atlanta 1985, 5 s.

TAPPI, Generalized method for determining the pipe friction pressure loss of flowing pulp suspensions, *TAPPI Technical Information Sheets*, TIS 408-4, TAPPI Press, Atlanta 1981, 5 s.

Tervola, P., Lappalainen, J., Rinne, J., Leinonen, T., Peltonen, S., Karhela, T. & Juslin, K. Bleach Plant Training Simulator Featuring Enhanced Linkage Between Simulator and DCS, *Proceedings of the 1999 TAPPI Pulping Conference*, TAPPI Press, Orlando 1999, s. 1031–1045.

Tseng, J., Cluett, W. R. & Bialkowski, W. L. Variability propagation through a stock preparation system: Implications for process control and process design, *Pulp and Paper Canada* **98** (9) (1997) s. 63–66.

TTKK, *Paperikoneen hallittavuuden ja raaka-aine- ja energiahyötysuhteen parantaminen*, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sääntötekniikan laitos, Sarja D, Helsinki 1988, 110 s.

Tuladhar, A., Davies, M. S., Yim, C. & Woods, G. R. Headbox modelling and wet end pressure pulsation analysis, *Pulp and Paper Canada* **98** (9) (1997) 91–94.

Tuuri, S., Niemenmaa, A., Laukkanen, I., Lappalainen, J. & Juslin, K. A multi-purpose tool for dynamic simulation of paper and board mills, *Proceedings of the 1995 Eurosim Conference*, toim. F. Breitenecker & I. Husinsky, Elsevier, Amsterdam 1995, s. 867–872.

Tuuri, S., Heikkilä, P. & Hamström, K. Dynamic model of drying section including air impingement unit, *Proceedings of the 3rd EcoPaperTech Conference*, KCL, Helsinki 2001, 11 s.

Wahlström, P. B. A long-term study of water removal and moisture distribution on a newsprint machine press section, *Pulp and Paper Magazine of Canada* **61** (8) (1960) s. T379–491.

Wasik, L. S. Simulation, a pulp and paper perspective, *Proceedings of the 13th SIMS Simulation and Modelling Conference*, toim. E. Juuso & L. Yliniemi, Suomen Automaatioseura ja Scandinavian Simulation Society, Oulu 2002, s. 11–20.

Vehviläinen, O. *Kartonkikoneen automaation kehittäminen dynaamisen simuloinnin avulla*, Lisensiaatintyö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Lappeenranta 2001, 62 s.

Weise, U., Terho, J. & Paulapuro H. Stock and water systems of the paper machine. Teoksessa *Papermaking Part 1, Stock Preparation and wet end*, toim. H. Paulapuro, Fapet Oy, Jyväskylä 2000, s. 125–190.

Vielreicher, T., Müller-Steinhagen, H. & Duffy, G. G. Non steady-state flow behaviour of wood pulp fibre suspensions, *Proceedings of the 47th Appita Annual Conference*, Appita, Rotorua 1993, s. 515–526.

Wildfong, V. J., Shands, J. A., Genco, J. M. & Bousfield, D. W. Filtration mechanics of sheet forming, Part I: Constant pressure filtration resistance determination, *Journal of pulp and paper science* **26** (2000a) s. 250–254.

Wildfong, V. J., Genco, J. M., Shands, J. A. & Bousfield, D. W. Filtration mechanics of sheet forming, Part II: Influence of fine material and compression, *Journal of pulp and paper science* **26** (2000b) s. 280–283.

Wilhelmsson, B. *An experimental and theoretical study of multi-cylinder paper drying*, Väitöskirja, Lund University, Department of Chemical Engineering, Lund 1995, 164 s.

WinGEMS, Pacific Simulation home page,
http://www.pacsim.com/WG/Release_WG5.shtml, 3.2.2003.

Virtanen, P. Computer simulator for paper machine wet end, *Proceedings of the 1988 Process Simulation Symposium*, Canadian Pulp and Paper Association, Quebec 1988, s. 85–89.

Vollmer, H., Fredlund, M. & Grundström, K.-J. Characterization of fractionation equipment, *Proceedings of the 3rd Ecopapertech Conference*, Helsinki 2001, s. 27–35.

Välisuo, H., Niemenmaa, A., Lappalainen, J., Laukkanen, I. & Juslin, K. Dynamic Simulation of Paper and Board Mills: A Case Study of an Advanced Grade Change Method, *TAPPI Engineering Conference 1996*, TAPPI Presss, Chicago 1996, s. 491–498.

Yli-Fossi, T., Kosonen, M., Toivonen, M., Karaila, I., Lautala, P. & Huhtelin, T. Modelling of stock fractions for a dynamic paper machine simulator, *Proceedings of the Scandinavian Paper Symposium*, Helsinki 2002a, 6 s.

Yli-Fossi, T., Kosonen, M., Toivonen, M., Karaila, I., Lautala, P. & Huhtelin, T. Simulations of stock fractions with a dynamic paper machine simulator, *Proceedings of the 13th SIMS Simulation and Modelling Conference*, toim. E. Juuso & L. Yliniemi, Suomen Automaatioseura ja Scandinavian Simulation Society, Oulu 2002b, s. 172–177.

Ämmälä, A. *Fractionation of thermomechanical pulp in pressure screening*, Väitöskirja, Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulu 2001, 102 s.

Tekijä(t) Lappalainen, Jari T. J.			
Nimeke Paperin- ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi			
Tiivistelmä Tietokoneavusteinen dynaaminen simulointi tarjoaa matemaattisen testipenkin, jossa prosessin ja sen automaation käyttäytymistä voidaan tutkia kustannustehokkaasti ja ilman riskiä ihmisille, ympäristölle tai tuotantolaitteistolle. Tehtaanlaajuisten, laskentanopeudeltaan vähintään reaaliaikaisten dynaamisten simulointimallien hyödyntäminen yleistyy muun muassa prosessin ja automaation suunnittelussa ja kehitystyössä, automaation testauksessa ja operaattoreiden koulutuksessa. Simulointiin tarvittavien matemaattisten mallien kehittäminen on paperinvalmistusprosessien tapauksessa moniulotteinen tehtävä. Paperin raaka-aineet, kuidut ja täyteaineet muodostavat veden kanssa epähomogeenisen seoksen, jonka käyttäytymistä on vaikea ennustaa tarkasti. Prosessissa on useita yksikköoperaatioita, esimerkiksi rainaus, joiden ilmiöitä pystytään vain osittain kuvaamaan teoreettisesti ja joista on hyvin vähän saatavilla mallinnukseen soveltuvaa mittausdataa. Eri osatekijöiden lisäksi prosessin ja sen automaation muodostama kokonaisuus on monimutkainen sisältäen paljon takaisinkytkentöjä ja ristikkäisvaikutuksia. Prosessin ilmiöiden aikajänne vaihtelee millisekunneista tunteihin. Tämä tutkimus kokoaa mallinnuksen näkökulmasta keskeistä tietoa paperin- ja kartonginvalmistuksesta. Työssä tutustutaan simuloinnin taustaan, sovelluksiin sekä työkaluihin sellu- ja paperiteollisuudessa. Käytännön esimerkkinä kuvataan Apros Paper -simulointiympäristössä (APMS) toteutettu kolmikeroskartonkikoneen mallinnus: valitut mallit, käytetyt yksinkertaisuudet sekä kokemuksia mallin rakentamisesta, validoinnista ja hyödyntämisestä. Kohdeprosessin mallinnus alkaa jauhatuksen syöttösäiliöiltä ja kattaa prosessin kuivatusosan ensimmäiselle mittaraamille asti. Mallinnuksessa on käytetty mahdollisimman pitkälle mekanistisia, fysiikan ja kemian peruslakeihin perustuvia malleja, joita on tarpeen mukaan täydennetty kokeellisella tiedolla. Mittaustietoihin vertailu osoitti mallin vastaavan hyvin kohdekoneen dynaamista käyttäytymistä. Työssä osoitetaan, että dynaamista simulointimallia, johon on yksityiskohtaisesti kuvattu prosessin ja automaation keskeiset osat, voidaan menestyksellisesti käyttää monimutkaisen dynaamisen järjestelmän tutkimiseen ja hallinnan kehittämiseen. Rakennettua kartonkikoneemallia sovellettiin ensimmäisenä lajinvaihtojen kehittämiseen. Jo simulaattorin rakentamisvaihe oli hyödyllinen syventäen ymmärrystä eri tekijöiden vaikutuksesta lajinvaihdossa. Lisäksi lajinvaihtoautomaation mallia testattaessa havaittiin kaksi operaattoreiden virheellistä käytäntöä lajinvaihtoautomaation käyttämisessä. Tehtaalla tehtyjen simulointikokeiden avulla haettiin lajinvaihtoautomaation viritysparameetreille uudet arvot, jotka otettiin käyttöön kohdekoneella. Muutosten ansiosta lajinvaihtoakojen todettiin lyhentyneen noin 15 %. Toisessa sovellusesimerkissä simulointimallin kuivatusosaa muutettiin korvaamalla kuivatussyylinterit päällepuhalluskuivaimella. Simuloimalla selvitettiin muutosten vaikutusta kuivatuskapasiteettiin ja tutkittiin uuden kuivaimen hyödyntämistä kartongin kosteuden hallintaan. Työn lopuksi arvioidaan käytettyä mallinnuksen ja simuloinnin lähestymistapaa sekä pohditaan mallin kehittämiskohteita saatujen tulosten valossa. Kehitetyle simulointimallille esitellään myös uusia mahdollisia käyttötapoja.			
Avainsanat pulp and paper, mathematical modelling, dynamic simulation, paper making, board making, grade change, Apros			
Toimintayksikkö VTT Tuotteet ja tuotanto, Tekniikantie 12, PL 1301, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6267-4 (nid.) 951-38-6268-2 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero	
Julkaisu-aika Helmikuu 2004	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 144 s.	Hinta C
Avainnimeke ja ISSN VTT Publications 1235-0621 (nid.) 1455-0849 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Lappalainen, Jari T.J.			
Title Modelling and dynamic real-time simulation of paper and board making processes			
Abstract This thesis focuses on the mathematical modelling and dynamic real-time simulation of paper and board making processes. The aim of dynamic simulator development is to obtain a mathematical test bench for process and automation studies, which is low-cost and risk free for people, the environment and equipment. Use of millwide dynamic simulators (real-time or faster), in process and control system design and development, control system testing and training of operators, is on the up rise. There are many challenges in developing accurate simulation models for papermaking processes. The raw materials, fibers and fillers, are transported and processed together with water as a nonhomogenous suspension, the behaviour of which is hard to predict. Theoretical descriptions and accurate measurements of some unit operations, such as web forming, are difficult to perform. Process and controls form together a complex integrated system with many interactions and recirculations. The time span of the process phenomena varies from milliseconds to hours. This work presents fundamental information on the latest research results relevant to modelling paper and board making processes. Use of simulation in the pulp and paper industry is reviewed. A modelling case study of a three-ply board machine, making use of the Apros Paper simulation environment (APMS) is reported. The mechanistic modelling approach applied is described. The experiences gained with regard to model construction and validation are dealt with. The model starts from the chests before refining and ends to the first scanning gauge in the drying section. The model agrees well with measured data. The modelling and validation phases increased the simulation team's understanding about the prevailing dynamics in grade changes. Additionally, it revealed weaknesses in operational practices for using the machine's automatic grade change program. The simulator was used in finetuning the automatic grade change program. As a result, the grade change times decreased by 15%. Moreover, use of a new type of dryer, an air-impingement unit, in the drying section was simulated. Potential to increase drying capacity and to improve board moisture control was investigated. Dynamic simulation using detailed and carefully verified process and automation models proved to be a powerful method to study and develop a complicated dynamic system. The last part of the thesis evaluates the modelling and simulation approach that is used. Ideas for further development and future use of the board machine model are also discussed.			
Keywords pulp and paper, mathematical modelling, dynamic simulation, paper making, board making, grade change, Apros			
Activity unit VTT Industrial Systems, Tekniikantie 12, P.O.Box 1301, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6267-4 (soft back ed.) 951-38-6268-2 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number	
Date February 2004	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 144 p.	Price C
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0621 (soft back ed.) 1455-0849 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT PUBLICATIONS

- 500 Karppinen, Sirpa. Dietary fibre components of rye bran and their fermentation *in vitro*. 96 p. + app. 52 p.
- 501 Marjamäki, Heikki. Siirtymäperusteisen elementtimenetelmäohjelmiston suunnittelu ja ohjelmointi. 2003. 102 s. + liitt. 2 s.
- 502 Bäckström, Mika. Multiaxial fatigue life assessment of welds based on nominal and hot spot stresses. 2003. 97 p. + app. 9 p.
- 503 Hostikka, Simo, Keski-Rahkonen, Olavi & Korhonen, Timo. Probabilistic Fire Simulator. Theory and User's Manual for Version 1.2. 2003. 72 p. + app. 1 p.
- 504 Torkkeli, Altti. Droplet microfluidics on a planar surface. 2003. 194 p. + app. 19 p.
- 505 Valkonen, Mari. Functional studies of the secretory pathway of filamentous fungi. The effect of unfolded protein response on protein production. 2003. 114 p. + app. 68 p.
- 506 Mobile television – technology and user experiences. Report on the Mobile-tv project. Caj Södergård (ed.). 2003. 238 p. + app. 35 p.
- 507 Rosqvist, Tony. On the use of expert judgement in the qualification of risk assessment. 2003. 48 p. + app. 82 p.
- 508 Parviainen, Päivi, Hulkko, Hanna, Kääriäinen, Jukka, Takalo, Juha & Tihinen, Maarit. Requirements engineering. Inventory of technologies. 2003. 106 p.
- 509 Sallinen, Mikko. Modelling and estimation of spatial relationships in sensor-based robot workcells. 2003. 218 p.
- 510 Kauppi, Ilkka. Intermediate Language for Mobile Robots. A link between the high-level planner and low-level services in robots. 2003. 143 p.
- 511 Mäntyjärvi, Jani. Sensor-based context recognition for mobile applications. 2003. 118 p. + app. 60 p.
- 512 Kauppi, Tarja. Performance analysis at the software architectural level. 2003. 78 p.
- 513 Uosukainen, Seppo. Turbulences as sound sources. 2003. 42 p.
- 514 Koskela, Juha. Software configuration management in agile methods. 2003. 54 p.
- 516 Määttä, Timo. Virtual environments in machinery safety analysis. 2003. 170 p. + app. 16 p.
- 515 Palviainen, Marko & Laakko, Timo. mPlaton - Browsing and development platform of mobile applications. 2003. 98 p.
- 517 Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko. Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät. 2003. 69 s. + liitt. 9 s.
- 518 Lappalainen, Jari T. J. Paperin- ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi. 2004. 144 s.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 456 4404
Fax +358 9 456 4374