

Esa Alhoniemi

**Prosessin mittauksiin perustuva
sulfaattisellun jatkuvatoimisen keiton
analyysi**

Lisensiaatintutkimus

Teknillinen korkeakoulu
Tietotekniikan osasto
Informaatiotekniikan laboratorio

Otaniemi, elokuu 1998

Tekijä ja työn nimi:

Esa Alhoniemi

Prosessin mittauksiin perustuva sulfaattisellun jatkuvatoimisen keiton analyysi

Päivämäärä: 24. 8. 1998**Sivumäärä:** 88**Osasto:** Tietotekniikan osasto**Professori:** Tik-115 Informaatiotekniikka**Valvoja:** Professori Olli Simula**Ohjaaja:** Vanhempi tutkija Mats Backman

Työssä tarkasteltiin Wisaforestin sulfaattisellutehtaan kuitulinja 2:n jatkuvatoimista keittämöä. Tarkoituksena oli selvittää keittämön vuokeittimen ajoittaisten hallittavuusongelmien ja kappaluvun vaihteluiden syitä.

Analyysi pohjautui prosessin mittauksiin ja muuhun käytettävissä olevaan prosessitietämykseen. Työssä käytettiin erilaisia korrelaation laskentamenetelmiä ja tiedon visualisointitapoja. Keskeisimpiä menetelmiä olivat perinteinen lineaarinen korrelaatioanalyysi ja neuroverkko, itseorganisoiva kartta.

Keittimen hallittavuusongelmat selitettiin sekä teoreettisen keitinmallin että prosessin mittauksien avulla. Eräässä tapauksessa vikatilanteeseen johtaneet tekijät analysoitiin tarkemmin.

Yksi mahdollisuus ehkäistä keittimen häiriöitä olisi homogenisoida keittoa edeltävä hakkeen käsittely mahdollisimman hyvin. Kymmenen päivän mittaiselle normaalille keittojaksolle tehtiin yksityiskohtainen analyysi. Jakson aikana tapahtuneet keiton vaihtelut selitettiin käyttäen prosessin mittauksia ja niiden pohjalta laskettuja suu-reita.

Avainsanat: jatkuvatoiminen sulfaattikeitto, mittaustieto, korrelaatioanalyysi, itseorganisoiva kartta, visualisointi.

Author and name of the thesis: Esa Alhoniemi Process measurement based analysis of continuous kraft pulping process Date: 24. 8. 1998 Number of pages: 88	
Department: Professorship:	Department of Computer Science Tik-115 Information Sciences
Supervisor: Instructor:	Professor Olli Simula Senior researcher Mats Backman
In this work, the continuous kraft pulping process on fiber line 2 of the Wisaforest pulp mill was studied. The purpose of the study was to find out reasons for occasional continuous digester control problems and kappa number variations. The analysis was based on process measurements and other process knowledge. Different correlation computation methods and data visualization techniques were used. The most important methods were traditional linear correlation analysis and a neural network, the self-organizing map. Reasons for control problems were explained using a theoretical model and process measurements. In one case, the factors affecting the rise of a faulty situation were analyzed in detail. One possibility to prevent digester faults would be more homogeneous processing of wood chips before feeding them into digester. A detailed analysis of a normal pulping period of ten days was carried out. Variations in the cook during the period were explained using process measurements and quantities based on measured information. Keywords: continuous kraft cook, measurement data, correlation analysis, self-organizing map, visualization.	

Sisältö

1	Johdanto	10
1.1	Wisaforestin sellutehdas	10
1.2	Motivointi, rajausta ja tavoitteet	10
1.3	Työn rakenne	11
I	Teoria- ja kirjallisuusosa	12
2	Wisaforestin sellutehtaan jatkuvatoiminen keittäminen	13
2.1	Keittämön kytkennät sellutehtaan muihin prosesseihin	13
2.2	Jatkuvatoimisen keittämön rakenne	14
2.3	Keittämön osaprosessit	15
2.3.1	Hakkeen varastointi ja syöttö prosessiin	15
2.3.2	Esihöyrystys ja pasutus	18
2.3.3	Imeytys	21
2.3.4	Keitto	21
3	Sulfaattisellun keiton raaka-aineet ja niiden luonnehdinta	25
3.1	Hake	25
3.1.1	Puun kemiallinen koostumus	25
3.1.2	Hakkeen ominaisuudet	25
3.2	Lipeä	28
3.2.1	Keittokemikaalit	29
3.2.2	Kemikaalien annostelu	30
3.2.3	Kemikaalien mittaukset	30
3.3	Höyry	31
3.3.1	Tuorehöyry	31
3.3.2	Paisuntahöngät	31
4	Mittaustietoihin perustuva prosessin tarkastelu	32
4.1	Mittausten käsittely	32
4.1.1	Valinta	32
4.1.2	Keruu	33

4.1.3	Mittausten esikäsittely	33
4.1.4	Mittausten yhdistely	35
4.2	Mittausten analysointi	35
4.2.1	Korrelaatioanalyysi	35
4.2.2	Itseorganisoiva kartta	36
5	Sulfaattisellun jatkuvatoimisen keiton osavaiheet	42
5.1	Hakkeen lämmitys ja ilman poisto hakkeesta	42
5.2	Keittoliipeän imeytys hakkeeseen	43
5.3	Keitto	46
5.4	Keitinpesu	47
5.5	Keiton lopputuloksen luonnehdinta	47
5.5.1	Delignifioitumisaste	47
5.5.2	Massasaanto	48
6	Keiton matemaattinen mallitus	50
6.1	Miksi mallittaa keittoa?	50
6.2	Mallityypit	50
6.2.1	Peruslakeihin perustuvia malleja	52
6.2.2	Musta laatikko -malleja	52
6.2.3	Harmaa laatikko -malleja	53
II	Kokeellinen osa	54
7	Keittimen toiminta	55
7.1	Keittimen teoreettinen malli	55
7.2	Häiriötilanteet	56
7.2.1	Häiriötilanteen syntyyn vaikuttavat tekijät	56
7.2.2	Häiriötilanneindikaattorit	58
7.2.3	Esimerkki häiriötilanteesta	59
7.2.4	Parannusehdotuksia	61
8	Hakkeen ominaisuudet ja keittoa edeltävä käsittely	63
8.1	Hakkeen ominaisuudet	63
8.2	Esihöyrystys ja pasutus	65
8.3	Imeytys	68
8.4	Laskentaesimerkkejä	70
8.4.1	Keittimen ajautuminen häiriötilanteeseen	70
8.4.2	Hakkeen laadun vaihtelu ja keittoa edeltävä käsittely . . .	71

9	Yhteenveto ja johtopäätökset	77
9.1	Prosessin mittaustiedon analyysi	77
9.2	Keittimen toiminta	77
9.3	Hakkeen käsittelyn vaikutus keittoon	78
A	Prosessikaaviot	79
A.1	Hakkeen varastointi ja syöttö	80
A.2	Hakkeen pasutus ja syöttö imeytystorniin	81
A.3	Imeytys ja keitto	82
A.4	Mustalipeän käsittely	83
	Lähdeluettelo	83

Työssä käytetyt lyhenteet

AA	aktiivinen alkali ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$)
ADt/vrk	ilmakuivaa (<i>Air Dry</i>) sellutonnin vuorokaudessa
EA	<i>effective alkali</i> , tehollinen alkali ($\text{NaOH} + 1/2 \text{Na}_2\text{S}$)
ECCSA	<i>effective capillary cross-sectional area</i> , tehollinen kapillaaripoikkipinta-ala
EML	mustalipeä
EPE	pesulipeä
EVA	valkolipeä
HMP	matalapainehöyry
HON	höngät
HVP	välipainehöyry
i-m ³	irtokuutiometri
L:W	<i>liquid-to-wood ratio</i> , neste/puu -suhde
MLP	<i>multilayer perceptron</i> , monikerrospäätalon
PC	<i>principal component</i> , pääkomponentti
SOM	<i>self-organizing map</i> , itseorganisointikartta

Työssä käytetyt merkinnät

a, b	vakiokertoimia
c	ominaislämpökapasiteetti; myös konsentraatio ja voittajaneuronin indeksi
d	paksuus
h	entalpia
i	yleinen neuronin indeksi
k	suhteellinen reaktionopeuskerroin
l	pituus
m	massa
$\mathbf{m}_i$	neuronin i painovektori
n	vakiokerroin; myös (diskreetti) aika ja kierrosnopeus
p	paine
q	massavirtaus
r	höyrystymislämpö; myös säde
t	lämpötila Celsius-asteina; myös aika
$\mathbf{x}$	näytevektori
x, y	yleisiä signaaleja
A	ECCSA
D	diffuusiokerroin
D_0	diffuusiovakio
E	aktivoitumisenergia
H	H-tekijä
L	ligniinipitoisuus
M	opetusaskelten lukumäärä
N	lukumäärä
$N_i(n)$	neuronin i naapurusto hetkellä n
R	yleinen kaasuvakio, 8.31 kJ/(mol K)
S	sulfiditeetti
T	absoluuttinen lämpötila
V	tilavuus
X, Y	satunnaismuuttujia
$\alpha(n)$	opetuskerroin hetkellä n
η	viskositeetti
κ	kovuus- eli kappaluku
μ	keskiarvo
ρ	tiheys; myös korrelaatiokerroin
σ	keskihajonta
τ	tau-tekijä; myös (diskreetti) viive
Φ	lämpövirtaus

Esipuhe

Tämä tutkimus on tehty Teknillisen korkeakoulun Informaatiotekniikan laboratoriossa, ja se kuuluu Teknologian kehittämiskeskuksen “Oppivat ja älykkäät järjestelmät” -teknologiaohjelmaan.

Kiitän työni valvojaa professori Olli Simulaa ja ohjaajaani, vanhempaa tutkijaa Mats Backmania, tutkimukseni tukemisesta. Olen myös kiitollinen Wisaforest Oy:n automaatiopäällikölle Olli Ahavalle ja Pulp Centerin johtajalle Heikki Öhmanille, jotka osoittivat minulle mielenkiintoisen tutkimusaiheen ja auttoivat minut työni alkuun tehtaalla.

Olen saanut työssäni korvaamatonta asiantuntija-apua lukuisilta ihmisiltä monissa eri yrityksissä. Haluan erityisesti kiittää Ahlström Machinery Oy:n Pekka Tervolaa teoreettisen keitinmallin laskennasta ja Wisaforest Oy:n Raimo Lahtista kärsivällisyydestä auttaa minua lukemattomissa käytännön asioissa.

Kanssani samaan tutkimusryhmään kuuluvien tekn. yo Jussi Aholan, DI Johan Himbergin, tekn. yo Jukka Parviaisen ja DI Juha Vesannon kanssa on ollut ilo työskennellä. Herrojen lisäksi kaikki muutkin Informaatiotekniikan laboratorion ja Neuroverkkojen tutkimusyksikön työntekijät ovat tehneet työntekoni miellyttäväksi luomalla erinomaisen työilmapiirin. Akatemiaprofessori Teuvo Kohonen on myötävaikuttanut työni edistymiseen antamalla käyttööni erinomaiset tietokonelaitteistot.

Kiitän Teknologian kehittämiskeskusta, UPM-Kymmeneä, Tekniikan edistämistätiötä sekä Jenny ja Antti Wihurin rahastoa työni rahoittamisesta.

Lopuksi haluan kiittää rakasta vaimoani Katria hänen kärsivällisyydestään ja tuestaan työni aikana.

Otaniemessä 24. 8. 1998

Esa Alhoniemi

Luku 1

Johdanto

1.1 Wisaforestin sellutehdas

Pietarsaaren Alholmassa aloitti toimintansa vuonna 1962 Oy Wilhelm Schauman Ab:n sulfaattisellutehdas. Vuonna 1988 tehdyn Schauman-Kymmene -fuusion jälkeen tehtaan nimeksi tuli Wisaforest Oy Ab. Kymmene-Repola -fuusiossa 1996 tehdas siirtyi osaksi UPM-Kymmene -konsernia.

Sellutehtaalla on kaksi kuitulinjaa. Kuitulinja 1 tuottaa lehtipuusellua raaka-aineinaan koivu- ja eukalyptuspuu. Keitto tapahtuu joko keittämöllä 1 (”perinteinen” eräkeittäjä) tai keittämöllä 3 (ns. *super batch* -keittäjä). Kuitulinja 2 tuottaa havupuusellua männystä ja kuusesta. Keitto tapahtuu keittäjä 2:n jatkuvatoimisessa vuokeittimessä. Kuitulinjojen yhteistuotanto on noin 580 000 ADt/a.

Sellutehtaan rinnalla toimivat UPM-Kymmene -konserniin kuuluvat paperitehdas Wisapaper, pakkausmateriaaleja valmistava Walki Wisa sekä saha, Wisatimber. Tehtaan yhteydessä toimii myös tutkimuskeskus Pulp Center.

1.2 Motivointi, raja- ja tavoitteet

Työssä tarkasteltiin Wisaforestin sulfaattisellutehtaan kuitulinja 2:n jatkuvatoimista keittäjää. Keittäjän jatkuvatoiminen vuokeitin on tunnetusti vaativa ohjattava johtuen pääosin kahdesta tekijästä: keittimen pitkistä aikaviiveistä ja hakkeen laadun vaihteluista. Keiton ohjausta – kuten myös työssä esitettävää analyysiä – vaikeuttaa kaikkein eniten se, että itse keiton kulusta ei käytettävissä olevalla tekniikalla pystytäkään mittaamaan kaikkein keskeisimpiä tekijöitä. Näitä ovat ennen kaikkea sellun raaka-aineen eli hakkeen ominaisuudet ennen keittoa ja keiton eri vaiheissa.

Tarkasteltaviksi otettiin hakkeen varastointi ja syöttö prosessiin, hakkeen käsittely ennen keittoa, keitto ja keittimessä tapahtuva keitinpesu. Analyysi päättyi keittimen puskuputkeen, josta keitetty massa syötetään edelleen pestäväksi.

Tutkimuskohde valittiin puskussa havaittujen massan kovuus- eli kappaluvun heilahteluiden sekä keittimen ajoittaisten hallittavuusongelmien vuoksi. Ennalta oli odotettavissa, että kappaluvun vaihtelu olisi pääosin selitettävissä hakkeen epähomogeenisuudella, joka heijastuu lopputulokseen keiton epätasaisen kulun kautta.

Analyysi jakautui kahteen erilliseen osioon. Ensin tarkasteltiin itse keitintä ja siinä ilmenneitä ongelmia pyrkien selvittämään niiden alkuperä. Tämän jälkeen siirryttiin keittämön osaprosesseissa keittoa edeltäviin vaiheisiin tutkimaan, löytyisikö niistä ongelmien aiheuttajia.

Työssä pyrittiin analysoimaan mahdollisimman hyvin pitkiltä aikaväleiltä sitä mittaustietoa, joka prosessista oli saatavilla. Uusia antureita ei prosessiin asennettu eikä tehdaskokeita tehty. Lähestymistapa tunnetaan englanninkielisellä nimellä *data mining*, jolle on vakiintumassa suomenkielinen nimitys tiedon louhinta.

1.3 Työn rakenne

Työssä on kaksi osaa: teoriaosuus (luvut 2–6) ja kokeellinen osa (luvut 7–9). Työn sisältö jakautuu lukuihin seuraavasti:

- Luvussa 2 esitetään Wisaforestin tehtaan jatkuvatoimisen keittämön toiminta hakkeen varastoinnista keittimen puskuun.
- Prosessin tärkeimpiä raaka-aineita, niiden ominaisuuksia ja mittauksia käsitellään luvussa 3. Pääpaino on merkittävimmän eli hakkeen tarkastelussa.
- Luku 4 keskittyy mittaustietoihin pohjautuvan prosessin analysoinnin vaiheisiin. Luvussa esitetään työssä käytettävät analyysimenetelmät.
- Keiton vaiheet ja niihin liittyvä teoria esitetään luvussa 5.
- Luvussa 6 tarkastellaan keiton matemaattista mallitusta. Lisäksi luodaan lyhyt katsaus kirjallisuudessa esitettyihin keiton malleihin.
- Työn kokeellisen osuuden alussa, luvussa 7, käsitellään keittimessä esiintyviä ongelmia. Näille löydetään selitys teoreettisen keitinmallin ja mittaustietojen analyysin avulla. Joitakin ehdotuksia vikatilanteiden välttämiseksi esitetään.
- Eräs keino parantaa keittimen hallittavuutta on homogenisoida siihen syötettävä hake. Luvussa 8 analysoidaan hakkeelle ennen keittoa tehtäviä operaatioita ja niiden vaikutusta keittoon.
- Luvussa 9 kootaan työn tulokset ja ehdotetaan parannuksia prosessiin.

Osa I

Teoria- ja kirjallisuusosa

Luku 2

Wisaforestin sellutehtaan jatkuvatoiminen keittämö

Wisaforestin tehtaan jatkuvatoiminen keittämö on tyypiltään esi-meystystornilla varustettu höyry/nestefaasikeitin. Keittämö on rakennettu vuonna 1976, jolloin sen kapasiteetti oli 715 ADt/vrk. Vuonna 1988 keitintä laajennettiin siten, että sen kapasiteetiksi tuli nykyinen 1100 ADt/vrk.

2.1 Keittämön kytkennät sellutehtaan muihin prosesseihin

Keittämön toiminta on vahvasti sidoksissa useisiin tehtaan osaprosesseihin.

Hakkeen käsittely tuottaa prosessiin sellun raaka-ainetta eli haketta.

Höyrynjakokeskus toimittaa keittämölle vesihöyryä, jonka lämpöenergiaa tarvitaan useissa eri keittämön osissa.

Haihduttamo vastaanottaa keiton jäteliemen eli mustalipeän, haihduttaa siitä vettä ja polttaa liemen kuiva-aineen soodakattilassa. Polton lämpöenergia otetaan talteen höyrystämällä vettä kattilassa. Soodakattilan sulan liuottimelta saatavaa tuotosta kutsutaan viherlipeäksi.

Kaustistamo regeneroi viherlipeässä olevat keittokemikaalit, jolloin muodostuu keittokemikaalia eli valkolipeää.

Haihduttamo ja kaustistamo siis huolehtivat prosessin kemikaalikierrosta. Ne ottavat talteen mustalipeässä olevat keittokemikaalit, regeneroivat ja lopulta palauttavat ne takaisin keittämölle keittojätteistä puhdistettuna valkolipeänä. Prosessin tärkeimmät kemikaalit ja niiden virtaukset (Sjöström 1981) on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.1: Wisaforestin jatkuvatoimisen keittämön laitteita. Keskellä on noin 62 m:n korkuinen vuokeitin. Sen vasemmalla puolella on imeytystorni ja oikealla painediffusööripesuri. Kuvan oikeassa reunassa näkyy osa säteispesurista.

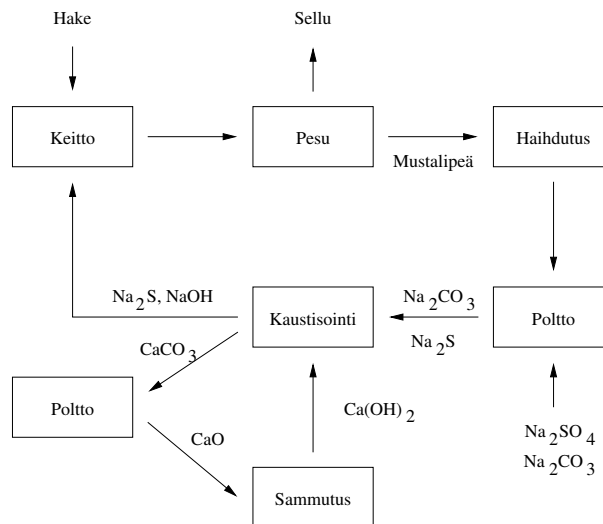
2.2 Jatkuvatoimisen keittämön rakenne

Kuvassa 2.3 on esitetty sulfaattisellun jatkuvatoimisen keittämön osat massan pesua lukuun ottamatta. Prosessin tärkeimmät syötteet ovat

- hake (prosessin raaka-aine),
- höyry (lämmitys),
- valkolipeä (keittokemikaali) ja
- pesulipeä (massan puhdistus reaktiotuotteista).

Tärkeimmät ulostulovirtaukset ovat

- sellu (seoksena lipeän kanssa),



Kuva 2.2: Sulfaattiprosessin kemikaalikierto: vaiheet ja tärkeimmät keittokemikaalit.

- mustalipeä ja
- höngät.

Sekä mustalipeää että hönkiä käytetään prosessissa takaisinkytketysti. Keittolipeä kiertää kolmessa eri silmukassa, jotka ovat imeytystornin syöttökierto, keittimen syöttökierto ja syöttökaulakierto, joka ei kuvasta 2.3 ilmene. Sitä käytetään hakkeen siirtoon pasutusastiasta imeytystornin syöttökiertoon.

Seuraavaksi tarkastellaan vaihe vaiheelta jatkuvatoimisen keiton tapahtumia Wisaforestin tehtaalla. Tiedot on kerätty sekä prosessi-instrumentointi- ja putkistokaavioista että keittämön ISO-ohjeesta (Roivainen ja Sojakka 1996).

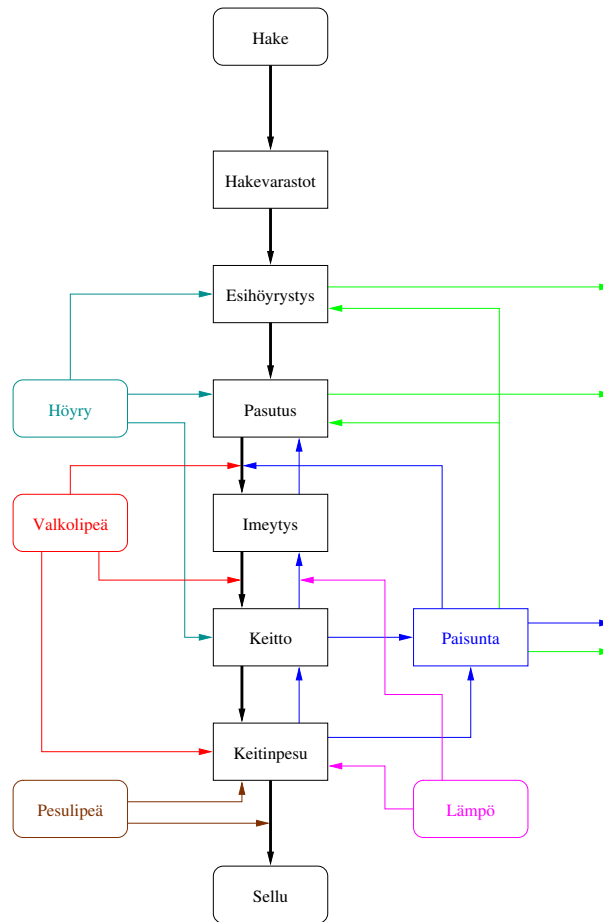
2.3 Keittämön osaprosessit

2.3.1 Hakkeen varastointi ja syöttö prosessiin

Haketta varastoidaan kahdella tavalla: ulkokasoihin ja silloihin. Jatkuvatoimiselle keittämölle haketta syötetään pääsääntöisesti silloista. Liitteessä A.1 on esitetty tehtaalla hakejärjestelyt ja -mittaukset.

Hakesiilot

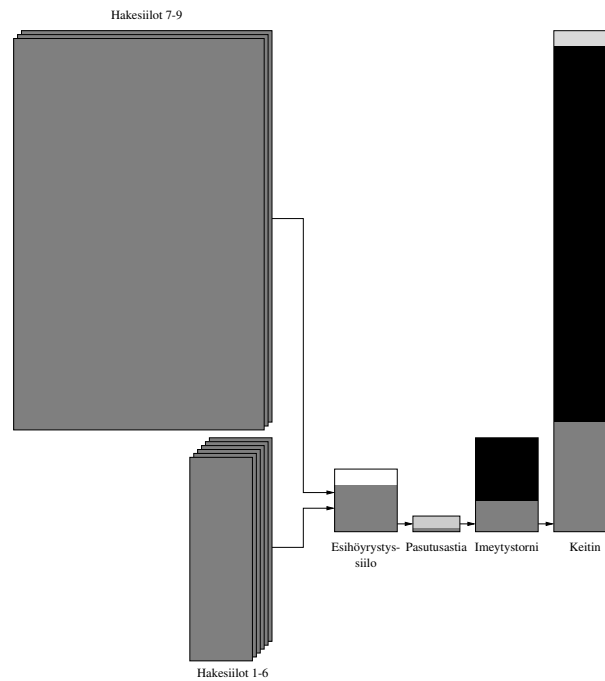
Haketta säilytetään kahden kokoisissa silloissa, joita on yhteensä yhdeksän kappaletta. Silloissa on sekoitus mänty- ja kuusihaketta suhteessa noin 45 % mäntyä ja 55 % kuusta.



Kuva 2.3: Sulfaattisellun jatkuvatoimisen keittämön ainevirtausten kaavio. Hake on merkitty mustalla, keittolipeä ja mustalipeä tumman sinisellä ja höngät vihreällä värillä.

Siilot 1-6. Siilojen 1–6 tilavuus on $500 \text{ m}^3/\text{siilo}$. Niissä säilytetään pääasiassa pintapuu- ja sahaketta. Haketta purkaa siiloista kolme ruuvipurkainta; yksi purkain kahta siiloa kohden. Kunkin purkaimen maksimikapasiteetti on $300 \text{ m}^3/\text{h}$, ja niitä voidaan portaattomasti käyttää 0...100 % teholla. Purkaimet purkavat haketta tasaisesti siilojen molemmilla puolilla oleville hihnakuuljettimille.

Siilot 7-9. Siilot 7–9 ovat tilavuudeltaan kukin 4000 m^3 . Siiloissa säilytetään pääasiassa pöllipuuhaketta. Kutakin siiloa kohden on yksi kapasiteetiltaan $600 \text{ m}^3/\text{h}$ oleva ruuvipurkain. Yhtä purkaimista voidaan kerrallaan ohjata portaattomasti 0...100 % teholla, muut toimivat 100 % teholla tai ovat pysäyksissä.



Kuva 2.4: Prosessin keskeisimmät säiliöt ja astiat kuvattuna niiden kokojen suhteessa. Kuhunkin astiaan on merkitty tumman harmaalla hakkeen, vaalean harmaalla höyryn ja mustalla keittonesteen määrä.



Kuva 2.5: Wisaforestin hakesiilot. Vasemmalla ovat siilot 1–6; oikealla, osin edellisten takana, ovat siilot 7–9.

Hakekasa

Hakekasaa purkaa kolme ruuvipurkainta, joista kahta voidaan ajaa portaattomasti 0...100 % teholla. Kolmas purkain on joko hitaalla tai nopealla käynnillä.



Kuva 2.6: Wisaforestin tehtaan hakekasat.

2.3.2 Esihöyrystys ja pasutus

Varastoinnista hake syötetään esihöyrystysssiiloon ja sieltä edelleen pasutusastiaan. Esihöyrystyksen ja pasutuksen sekä imeytystornin hakesyötön kaaviokuva ja mittaukset ovat liitteessä A.2.

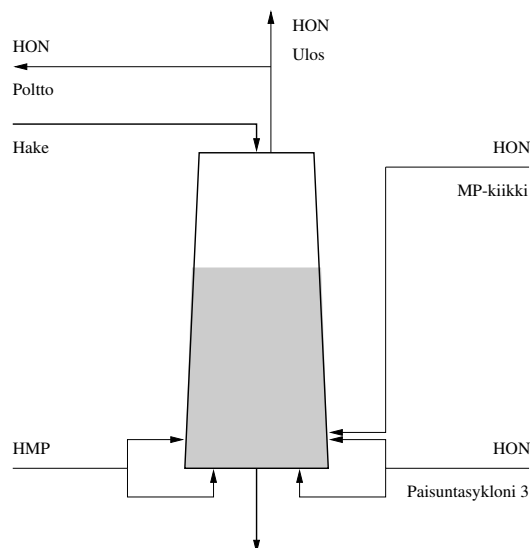
Esihöyrystysssiilo

Hake kuljetetaan hihnakuljettimilla varastoilta esihöyrystysssiilon yläosassa sijaitsevalle syöttöruuville. Ruuvi pudottaa hakkeen 160 m³ kokoiseen esihöyrystysssiiloon.

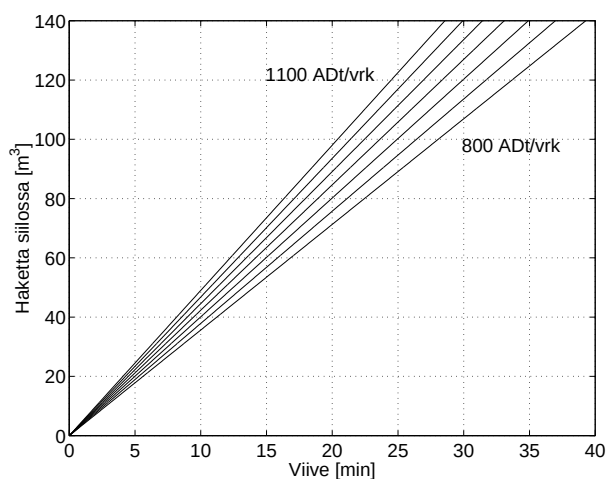
Kuvassa 2.7 on kaavio esihöyrystysssiilon virtauksista. Siilossa haketta lämmitetään pääasiassa kahdesta eri lähteestä peräisin olevalla höyryllä: keittimen paisuntasykloni 3:n höngillä ja tarvittaessa, etenkin talvella, tuorehöyryllä. Höyry tiivistyy lähes täydellisesti hakkeeseen luovuttaen lämpönsä hakkeelle. Tiivistynyt neste nostaa hakkeen kosteutta muutamia prosentteja. Hakkeen läpi nouseva, normaalisti vähäinen höyrymäärä, johdetaan hajukaasujen polttolaitokselle.

Mikäli hakkeen pinta laskee liian alas, merkittävä osa höyrystä läpäisee hakepatsaan, ja hake ei lämpiä kunnolla. Tätä höyrymäärää hajukaasujen keräilyjärjestelmä ei pysty kokonaan käsittelemään: osa höyrystä purkautuu suoraan ulkoilmaan.

Hakkeen viipymäaika siilossa on tuotantonopeudesta ja täyttöasteesta riippuen noin 20–25 minuuttia. Kuvassa 2.8 on siilon viive siilossa olevan haketilavuuden funktiona.



Kuva 2.7: Esihöyrystysilön virtaukset.



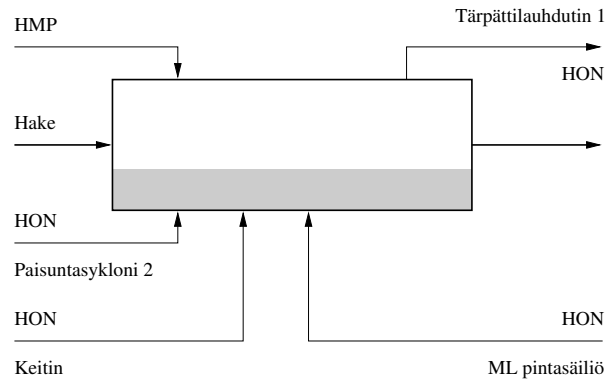
Kuva 2.8: Hakkeen viive syötöstä ulostuloon silon haketilavuuden funktiona tuotantoonopeuksilla 800, 850, ..., 1100 ADt/vrk.

Pasutusastia

Esihöyrystysiltoa purkaa sen alaosasta hakeruuvi, jonka kapasiteetti on 720 i-m³/h. Ruuvi määrää keittämön tuotantonopeuden. Hakeruuvista hake putoaa matalapaineikiikkiin, lokerosyöttimeen, joka siirtää hakkeen pasutusastiaan. Kiikin tarkoituksena on estää pasutusastian höyryä purkautumasta esihöyrystysiloon. Se vähäinen määrä höyryä, joka vuotaa kiikin ohi, ohjataan esihöyrystysiloon.

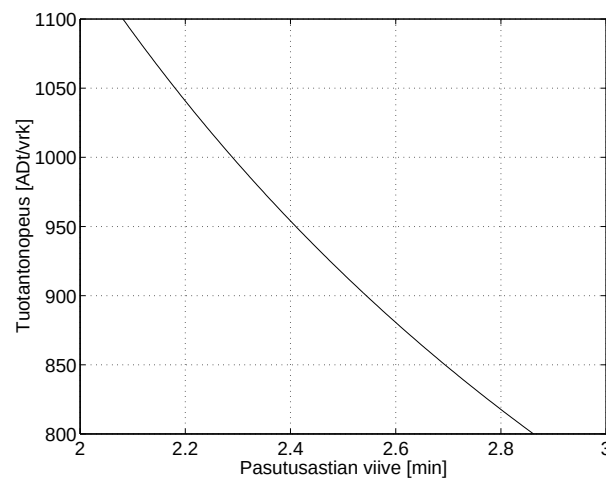
Pasutusastiassa, jonka tilavuus on 34 m^3 , haketta lämmitetään edelleen ja siitä pyritään poistamaan jäljellä oleva ilma. Astian virtaukset on esitetty kuvassa 2.9. Tärkeimmät astiaan johdettavat höyryt ovat tuorehöyry ja paisuntasykloni 2:n höngät. Höyryvirtausta astiaan ja poistuvaa höyrymäärää säätelemällä astian paine pidetään vakioarvossa hieman yli 1 bar:n. Pasutusastiasta ulos virtaavat höngät johdetaan tärpättilauhduttimelle.

Vaakasuorassa oleva ruuvi kuljettaa hakkeen astian päästä toiseen, ja hakkeen lämpötila nousee. Tiivistyvän höyryn ansiosta hakkeen kosteus kasvaa hieman kuten esihöyrystyssiilossakin.



Kuva 2.9: Pasutusastian virtaukset.

Myös pasutusastian viive riippuu tuotantonopeudesta. Kuvassa 2.10 on astian laskennallinen viive eri nopeuksilla, kun astian täyttöasteen oletetaan olevan 30 % hakesilon purkausruuvien täyttöasteesta.



Kuva 2.10: Hakkeen viipymäaika pasutusastiassa.

2.3.3 Imeytys

Pasutuksen jälkeen hake putoaa pasutusastian pohjan läpi lipeällä täytettyyn romuloukkuun, jossa lipeää tiheämmät aineet poistetaan. Hake kelluu lipeää kevyempänä syöttökaulaan. Syöttökaulan läpi korkeapainekiikkiin pudottuaan hake ohjautuu imeytystornin syöttökiertoon ja lopulta itse imeytystorniin. Korkeapainekiikkiin läpi vuotava lipeä syötetään hiekanerotimen ja putkisihtien kautta takaisin romuloukkuun ja sieltä taas syöttökaulaan. Osa tästä lipeästä imetään putkisihtien läpi mustalipeän pintasäiliöön, josta se syötetään edelleen imeytystorniin. Imeytystornin hakesyötön kaaviokuva mittauspisteineen on liitteessä A.2.

Imeytystorni on tilavuudeltaan 287 m³ oleva paineastia, joka on täynnä hakkeen ja lipeän sekoitusta. Hake syötetään torniin sen yläosassa pystyasennossa olevan ruuvin kautta. Ruuvin ympärillä olevan sihtilieriön läpi imetään syöttökiertopumpun avulla lipeää takaisin syöttökiertolipeäksi korkeapainekiikille.

Imeytystorniin syötetään höyrykäsitellyn hakkeen lisäksi valko- ja mustalipeää, jolloin kokonaisnestemäärä koostuu neljästä eri osasta:

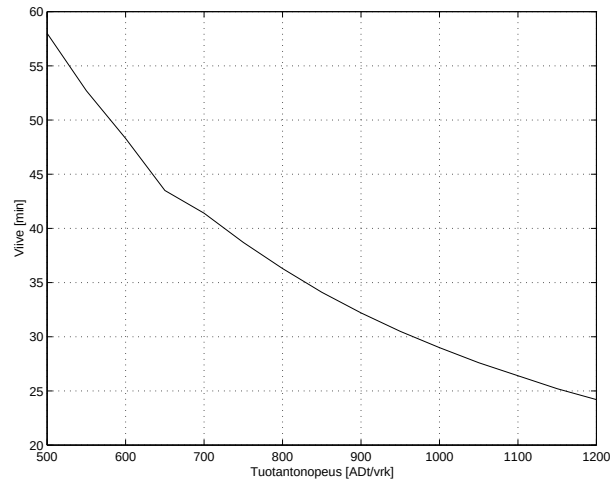
- hakkeen mukana tuleva vesi eli lastuvesi,
- hakkeeseen esihöyrystyssäiliössä ja pasutusastiassa tiivistynyt höyry (paisuntasykloni 2:n ja 3:n höngät sekä tuorehöyry),
- mustalipeä keittimen paisunnasta sekä mustalipeän kuidunerottimelta ja
- valkolipeä kaustistamolta.

Haketta ja lipeää imeytystorniin syötettäessä pyritään vakioimaan kaksi masasuhdetta: neste/puu -suhde ja alkali/puu -suhde eli keittokemikaalin ja puun kuiva-aineen massojen suhde. Tämä johtuu siitä, että imeytystornin alkalikonsentraatio riippuu molemmista. Lisäksi hakepatsaan pakkautuminen ja liikkuminen imeytystornissa ja keittimessä riippuu neste/puu -suhteesta. Imeytystorniin syötettävä alkali koostuu valkolipeän sisältämästä alkalista ja pienessä määrin mustalipeässä olevasta keiton jäännösalkalista.

Imeytystornissa vallitsee noin 12 bar:n paine ja 120–130 °C lämpötila. Hakkeen viipymäaika imeytystornissa on esitetty tuotantonopeuden funktiona kuvassa 2.11. Tornissa keittolipeä imeytyy hakkeeseen. Ensin lipeä penetroituu hakkeeseen painegradientin ansiosta. Sen jälkeen keittokemikaalien ja reaktiotuotteiden liikkumista ohjaa diffuusio, jonka nopeus on verrannollinen lämpötilaan ja konsentraatiogradienttiin.

2.3.4 Keitto

Imeytystornista hake syötetään keittimen yläosaan, jossa olevasta ruuvista hake putoaa keittimeen. Siirrosta huolehtii siirtokiertolipeä, joka imetään keittimen yläosassa olevien sihtien läpi takaisin imeytystornin alaosaan. Kiertoon yhtyvät



Kuva 2.11: Imeytystornin viive tuotantonopeuden funktiona.

virtaukset keittimen tasoituskiertosihteiltä ja ylemmiltä paisuntasihdeiltä sekä valkolipeävirtaus kaustistamolta. Kaikki virtaukset keittimeen/keittimestä mittauksineen on esitetty liitteessä A.3.

Syöttökiertolipeää lämmitetään höyryllä syöttökierron lämmönvaihtimessa, minkä jälkeen osa lipeästä syötetään imeytystornin alaosaan pohjalaimennusvirtaukseksi, osa suoraan keittimen syöttöputkeen.

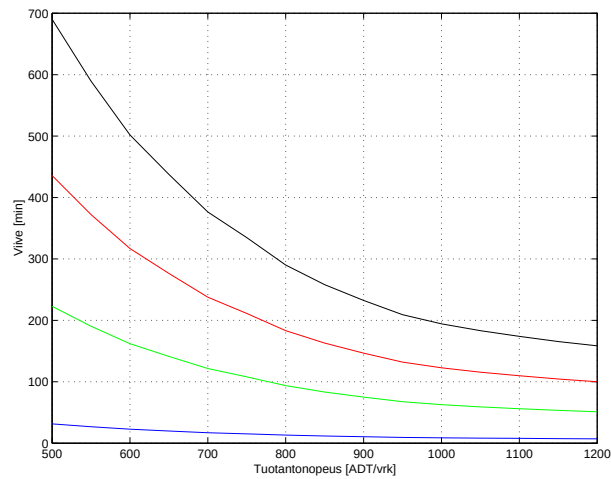
Keittimessä on kolme vyöhykettä. (1) Keittimen höyrytilasta tasoituskiertosihteille hake lämpiää ja painuu lipeäpinnan alle. (2) Tasoituskierrosta alapaisuntasihdeille tapahtuu varsinainen keitto eli suurin osa delignifointireaktioista. (3) Keittimen alaosassa tapahtuu vastavirtakeitinpesu. Hakkeen viipymääjat vyöhykkeissä tuotantonopeuden funktioina ovat kuvassa 2.12.

Keittimen sihtien paikat on esitetty kuvassa 2.13. Paisuntasihdejä on kahdet, joista ylempiä käytetään koivu- ja alempia havusellua ajettaessa. Koska linjal la ajetaan nykyisin yksinomaan havusellua, ylempiä paisuntasihdejä käytetään toisina tasoituskiertosihteinä.

Keittimen yläosaan eli höyrytilaan johdetaan höyryä, jonka avulla haketta lämmitetään. Oltuaan hetken höyryssä hake painuu lipeäpinnan alle, ja alkaa keittyä liikkuen keittimessä alaspäin painovoiman vaikutuksesta. Keittimen toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että keittimessä olevan hakkeen ja lipeän pintojen korkeudet ovat mahdollisimman vakaat, ja että hakepinta on sopivasti lipeäpintaa korkeammalla.

Keitto päättyy alapaisuntasihdeillä. Sihtien alapuolella tapahtuu vastavirtapesu (ns. *hi-heat* -pesu). Keittimen alaosaan pumpattava lipeä virtaa ylöspäin hakepatsasta vastaan ja syrjäyttää hakepalojen sisällä olevat keiton reaktiotuotteet. Samalla hake jäähtyy.

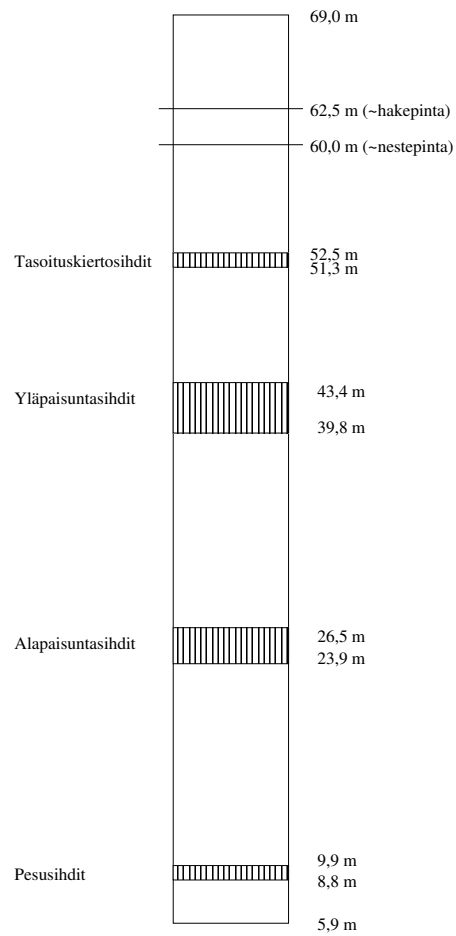
Pesulipeää syötetään keittimeen kolmella tavalla: pesusihtien yläpuolelle poh-



Kuva 2.12: Hakkeen viipymääajat keittimen vyöhykkeissä tuotantonopeuden funktiona. Sininen väri kuvaa viivettä välillä höyrytila-tasotuskiertosihdit, punainen tasotuskiertosihdit-paisuntasihdit ja vihreä paisuntasihdit-pesukiertosihdit. Kokonaisviive on merkitty mustalla.

jakaavarin läpi kulkevan putken kautta (pesukiertoliipeä), pesusihlien alapuolella olevien yhteiden kautta (vaakasyrjäytysliipeä) ja keittimen pohjassa olevien yhteiden kautta (pystysyljäytysliipeä). Osa lipeästä poistuu keittimestä paisuntasihlien läpi haihduttamolle, osa pesusihlien kautta pesukiertoon (josta osa johdetaan niinkään haihduttamolle) ja osa poistuu keittimestä puskuputken kautta.

Keittimen pohjalla pyörii pohjakaavari, joka sekoittaa ulos tulevaa massaliipeäseosta niin, että massa poistuu keittimestä vaivattomasti. Sellu pusketaan ulos keittimestä, ja johdetaan pesuriin edelleen pestäväksi.



Kuva 2.13: Keittimen sihtien paikat. Metriluvut ovat korkeuksia merenpinnasta.

Luku 3

Sulfaattisellun keiton raaka-aineet ja niiden luonnehdinta

Sulfaattisellun keittoprosessin keskeisiä raaka-aineita on kolme: hake, lipeä ja höyry. Seuraavassa tarkastellaan näiden ominaisuuksia, mittauksia ja vaikutuksia keittoon.

3.1 Hake

3.1.1 Puun kemiallinen koostumus

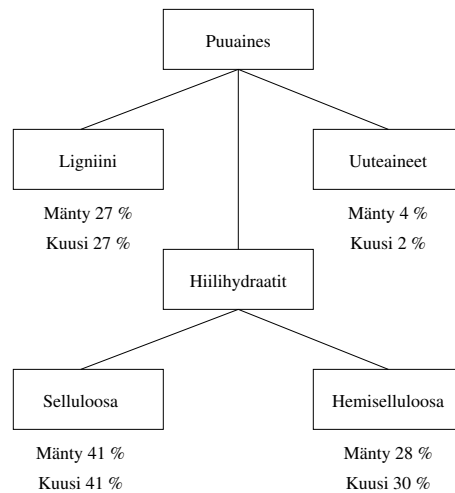
Kuvassa 3.1 on esitetty tärkeimmät puun ainesosat (Smook 1982) ja niiden karkeasti arvioidut prosenttiosuudet (Virkola 1983a) tarkasteltavan kuitulinjan puuraaka-aineista eli männystä ja kuusesta.

Keiton tärkein tavoite on mahdollisimman tehokas ligniinin poisto eli delignifikaatio. Puusta pyritään saamaan mahdollisimman hyvin talteen hiilihydraatit eli selluloosa ja hemiselluloosa. Keiton aikana on kuitenkin väistämätöntä, että osa edellisestä ja varsin suuri osa jälkimmäisestä liukenee. Keiton jälkeen puussa alun perin olevasta selluloosasta jää jäljelle noin 90 %, hemiselluloosasta 30 %, ligniinistä 10 % ja uuteaineista 15 % (Virkola 1983b).

3.1.2 Hakkeen ominaisuudet

Loppulaadultaan täysin tasainen keitto edellyttää toimivan keittämön ohjauksen lisäksi tasaista hakevirtausta keittoon ja ominaisuuksiltaan homogeenista haketta. Käytännössä hakkeen ominaisuudet vaihtelevat, kuten palakoon osalta kuvasta 3.2 voidaan todeta.

Tässä luvussa tarkastellaan syitä hakkeen laadun vaihteluun.



Kuva 3.1: Puun ainesosat ja niiden osuudet mänty- ja kuusipuusta.



Kuva 3.2: Haketta Wisaforestin hakekasalla.

Puulaji. Eri puulajit käyttäytyvät pasutuksessa, imeytyksessä ja keitossa eri tavoin johtuen erilaisesta rakenteestaan. Wisaforestilla käytetään jatkuvatoimisella keittämöllä kuusen ja männyn sekoitusta keskimääräisessä suhteessa 55 % kuusta (*Picea abies*) ja 45 % mäntyä (*Pinus silvestris*). Suhde saattaa vaihdella hetkellisesti paljonkin.

Puun tiheys. Tiheys vaihtelee männyllä ja kuusella puun rungon eri osien välillä. Tiheyseroja on sekä rungon leveyssuunnassa (sydän/pintapuu) että korkeussuunnassa (tyvi/latvapuu). Puun tiheys kasvaa tasaisesti puun ytimestä ulospäin: männyllä vaihtelu on suurempi kuin kuusella. Tyvipuu on yleensä keskimäärin latvapuuta tiheämpää. Tätä voidaan perustella sillä, että tiheys kasvaa ytimestä

pintaan päin likimain samalla tavalla eri korkeuksilla (Kärkkäinen 1985).

Merkittävä tiheyteen vaikuttava tekijä on myös kevät- ja kesäpuun suhde: esimerkiksi männyllä kesäpuu on yli kaksi kertaa tiheämpää kuin kevätpuu. Tämä johtuu kevät- ja kesäpuun erilaisesta rakenteesta. Kesäpuun solukon soluseinämät ovat selkeästi paksummat kuin kevätpuun. Muista eroista mainittakoon mm. se, että kesäpuu sisältää enemmän selluloosaa ja vähemmän ligniiniä kuin kevätpuu (Kärkkäinen 1985).

Mittava kokeellinen tiheyden määrittästyö on Hakkilan (Hakkila 1979) tutkimus suomalaisten mänty-, kuusi- ja koivurunkojen puuaineen tiheydestä.

Hakkeen palakoko ja palakokojakauma. Hakkeen palakoon vaikutusta keiton lopputulokseen on tutkittu paljon, koska se on osoittautunut keiton kannalta erittäin tärkeäksi. Palakoko vaikuttaa sekä hakkeen keittymiseen että pakkautumiseen keittimessä.

Hakepalan *paksuus* on monissa kokeissa todettu hakkeen keittymisen kannalta tärkeimmäksi hakkeen kolmesta dimensiosta (Hartler 1962; Akhtaruzzaman ja Virkola 1979a; Akhtaruzzaman ja Virkola 1979b; Akhtaruzzaman, Lunabba ja Virkola 1980). Liian paksu (yli 5 mm) hakepalanen ei kunnolla keity sisäosiltaan, ja tätä pienemmätkin (yli 2 mm paksut) keittyvät epätasaisesti (Gullichsen, Kolehmainen ja Sundqvist 1992).

Palakoko määrää sen hakemäärän, joka mahtuu tiettyyn tilavuuteen. Kun hakkeen suurimman ja pienimmän dimension eli pituuden suhde paksuuteen kasvaa, pakkautumistiheys pienenee (Edberg, Engström ja Hartler 1973). Palakoon vaihtelu muuttaa keittimen pakkautumista, mikä puolestaan vaikuttaa hakepatsaan kulkuun keittimessä.

Palakokoa ei käytännössä mitata jatkuvatoimisesti, vaan ottamalla näytteitä hakkeesta. Kokojakauman selvittämiseksi näytteet sihdataan jollakin standardoidulla analyysimenetelmällä kuten SCAN-CM 40:94. Menetelmän avulla hake jaotellaan viiteen luokkaan: (1) ylisuuri hake, (2) ylipaksu hake, (3) hyväksytty hake, (4) tikkuhake ja (5) puru. Hyvä esimerkki palakoon vaihtelun merkityksestä keittoon on tutkimus (Andrews ja Barnes 1985), jossa suuri osa keiton lopputuloksen vaihteluista selittyi palakoon (ja hakkeen kosteuden) muutoksilla.

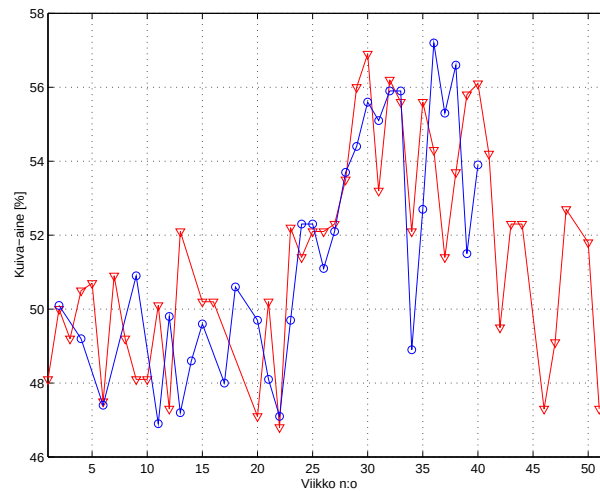
Hakkeen irtotiheys. Hakkeen irtotiheys kuvaa hakkeen massaa irtotilavuutta kohti (Kärkkäinen 1985). Irtotiheys on siis hakemassan varaama tilavuus hakepalojen välissä oleva ilma mukaan lukien. Täten se on *hakkeen tiheyden ja palakoon yhdistetty mitta*, ja siitä syystä varsin epämääräinen. Irtotiheyden yksikkö on kilogrammaa irtokuutiometriä kohti ($\text{kg}/\text{i-m}^3$), ja siitä käytetään myös nimitystä tilavuuspaino.

Hakkeen kosteus. Hakkeen kosteudella tarkoitetaan tässä työssä veden massan prosentuaalista osuutta hakkeen kokonaismassasta. Hakkeen kuiva-aine on

puolestaan täysin kuivan puuaineksen osuus hakkeen kokonaismassasta.

Noin puolet hakkeen massasta on vettä. Vesimäärän vaihtelu vaikuttaa keittoon kolmella eri tavalla. (1) Hakkeen lämmittämiseen tarvittava energiamäärä vaihtelee, koska veden ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin puuaineksen. (2) Hakkeen höyrykäsittely vaikeutuu hakkeessa olevan vapaan veden määrän kasvaessa. (3) Mikäli hakkeessa olevaa vesimäärää ei pystytä mittaamaan, keiton neste/puu -suhde saattaa vaihdella.

Hakkeen kosteudessa on satunnaista ja vuosittaista vaihtelua. Kesäisin hake on jonkin verran kuivempaa kuin muulloin. Tämä ilmenee kuvasta 3.3, jossa ovat keittihakkeesta viikoittain vuosina 1996–1997 Wisaforestilla otettujen hakenäytteiden kuiva-ainepitoisuudet.



Kuva 3.3: Hakkeen kuiva-ainepitoisuuden vaihtelu vuosina 1996 (punainen käyrä) ja 1997 (sininen).

Hakkeen lämpötila. Haketta säilytetään lämmittämättömissä ulkovarastoissa eli sen lämpötila vaihtelee jonkin verran ulkoilman lämpötilan mukaan. Vaihtelu kompensoidaan esihöyrystyssiilossa säätelämällä siiloon johdettavaa höyrymäärää. Ongelmia aiheuttaa joskus talvisin tapahtuva hakkeen jäätyminen.

3.2 Lipeä

Työssä käytetään neljää termiä kuvaamaan prosessin keittoliuosta eli lipeä keiton eri vaiheissa: (1) valko-, (2) musta-, (3) keitto- ja (4) pesulipeä. Valkolipeä on kaustistamolta keittämölle syötettävä regeneroitu keittoliuos, jonka keittokemikaalikonsentraatio on suuri. Mustalipeällä tarkoitetaan keiton jätelientä, johon

on liennut hakkeesta puun ainesosia – pääasiassa ligniiniä – ja jonka keittokemikaalikonsentraatio on pieni. Keittolipeä on sekoitus edellisiä. Pesulipeän keittokemikaalikonsentraatio on pieni, ja se sisältää hieman puun liuenneita ainesosia.

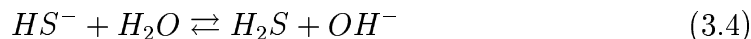
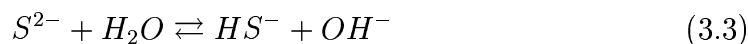
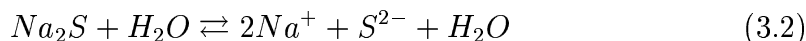
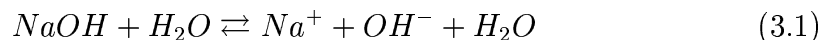
3.2.1 Keittokemikaalit

Sulfaattikeiton tärkeimmät kemikaalit ovat natriumhydroksidi (NaOH) ja natriumsulfidi (Na₂S). Keittonesteessä on pieniä määriä muitakin yhdisteitä kuten natriumkarbonaattia (Na₂CO₃), mutta niiden merkitys on keiton kannalta vähäinen. Keittokemikaalitermit on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1: Keittokemikaaleihin liittyviä käsitteitä.

suure	yksikkö	koostumus
titrautuva alkali	g/l	Na ₂ CO ₃ + NaOH + Na ₂ S
aktiivinen eli vaikuttava alkali	g/l	NaOH + Na ₂ S
tehollinen alkali	g/l	NaOH + $\frac{1}{2}$ Na ₂ S
sulfiditeetti	%	$100 \cdot \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH}}$

Valkolipeässä vallitsevat seuraavat tasapainot eri yhdisteiden välillä (Sjöström 1981; Virkola 1983b):



Tehollisen alkalin määritelmä taulukossa 3.1 edellyttää reaktion 3.3 olevan täydellinen, ja reaktion 3.4 erittäin vähäinen, mikä pätee keiton pH-alueella 13–14 (Sjöström 1981). Tämän vuoksi tehollista alkalia käytetäänkin yleensä lipeän keittokemikaalikonsentraation mittana.

Kemikaalien määrät ilmaistaan joko NaOH- tai Na₂O -ekvivalentteina. Yhdisteet muunnetaan toisiaan vastaaviksi kiinteillä kertoimilla, jotka on esitetty taulukossa 3.2 (Virkola 1983b).

Taulukko 3.2: Sulfaattiprosessin kemikaalien väliset muuntokertoimet.

kemikaali, mistä tai mihin	kerroin, jolla Na ₂ O:ksi	kerroin, jolla Na ₂ O:sta	kerroin, jolla NaOH:ksi	kerroin, jolla NaOH:sta
NaOH	0.775	1.290	1.000	1.000
Na ₂ O	1.000	1.000	1.290	0.775
Na ₂ S	0.795	1.258	1.025	0.975
NaHS	0.554	1.807	0.714	1.400
Na ₂ CO ₃	0.585	1.710	0.755	1.325
Na ₂ SO ₄	0.437	2.290	0.563	1.775

3.2.2 Kemikaalien annostelu

Keittokemikaalia (mitattuna tehollisena alkalina) annostellaan keittoon noin 20 % prosessiin syötettävän hakkeen kuiva-aineen massasta. Alkalin syöttö keittoon tapahtuu tarkasteltavalla keittämöllä kolmeen eri kohtaan, jotka ovat imeytystornin syöttö, imeytystornin pohja/keittimen syöttökierto ja keittimen pesukierto. Näiden suhteelliset prosenttiosuudet on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3: Keiton alkalijako Wisaforestin tehtaalla.

keiton vaihe	syöttökohta	prosenttia kokonaisalkalista
imeytys	imeytystornin syöttö	72
keitto	imeytystornin pohja ja keittimen syöttö	25
keitinpesu	pesukierto	3

3.2.3 Kemikaalien mittaukset

Valkolipeästä mitataan tehollisen alkalin määrä NaOH-ekvivalenttina käyttäen jatkuvatoimista johtokykymittausta. Mittausta kalibroidaan kahdeksan tunnin välein tehtävillä laboratoriomittauksilla. Mittauksen avulla pidetään keittoon syötettävä alkalimäärä sellaisena, että alkali/puu -suhde on vakio. Laboratorioanalyysissä määritetään myös valkolipeän sulfiditeetti.

Muita jatkuvatoimisia lipeän analyysimittauksia ovat imeytystornin alaosan jäännösalkalimittaus (tehollinen alkali NaOH:na) ja keiton alapaisuntasihtien mustalipeän jäännösalkalimittaukset (aktiivinen alkali Na₂O:na).

3.3 Höyry

3.3.1 Tuorehöyry

Höyrynjakokeskuksesta syötetään keittämölle kahta eri tuorehöyryä: matalapaine- ja välipainehöyryä.

Matalapainehöyryn käyttökohteet ovat

- esihöyrystyssiilo (hakkeen höyrykäsittely; etenkin talvella),
- pasutusastia (hakkeen höyrykäsittely) ja
- syöttökaulakierron putkisihdit (tukkeutuneiden sihtien puhdistus; satunnaisesti).

Välipainehöyryä syötetään seuraaviin kohteisiin:

- keittimen höyrytila (hakkeen lämmitys),
- syöttökierron lämmönvaihdin (keittimen syöttökiertoliipeän lämmitys),
- pesukierron kaksi lämmönvaihdinta (pesukiertoliipeän lämmitys) ja
- pesuliipeän lämmönvaihdin (pesuliipeän lämmitys).

3.3.2 Paisuntahöngät

Keittimestä paisuntasihtien kautta poistettava mustaliipeä eli paisuntaliipeä, syötetään kolmen paisuntasyklonin läpi (liite A.4). Sykloni syklonilta paisuntaliipeän paine alenee, jolloin mustaliipeä kiehuu, ja siitä höyrystyy vettä ja muita kemiallisia yhdisteitä. Tätä höyryä kutsutaan paisuntahöngiksi. Sykloneista ensimmäisessä ja kolmannessa on vaahtosyklonit, joiden avulla mustaliipeän vaahtoaminen voidaan hallita. Paisuntahönkiä käytetään normaalissa ajotilanteessa siten, että

- paisuntasykloni 1:n höngät ohjataan pesuliipeän lämmönvaihtimelle tai tärpättilauhdutin 2:lle,
- paisuntasykloni 2:n höngät ohjataan kokonaisuudessaan pasutusastiaan ja
- paisuntasykloni 3:n höngistä noin 75 % johdetaan esihöyrystyssiiloon ja loput 25 % tärpättilauhdutin 1:lle.

Luku 4

Mittaustietoihin perustuva prosessin tarkastelu

Mittaustietoihin pohjautuva prosessin tarkastelu on perusteltua, kun halutaan hankkia tietoa ilmiöistä, joille ei ole konstruoitavissa analyyttistä mallia. Työssä tarkasteltavat keittimen häiriötilanteet ja hakkeen höyrykäsittelyn vaikutus keittoon ovat tällaisia.

Työn analyysi pohjautuu pääasiassa keittämöltä saatavaan aikasarjamuotoiseen mittaustietoon. Tiedon tarkastelussa voidaan erottaa kuvan 4.1 vaiheet, jotka yleisesti pätevät minkä hyvänsä systeemin mittausten analysointiin. Vaiheet mittausten valinnasta yhdistelyyn käsittelevät ja valmistavat prosessista saatavaa tietoa analyysiä varten.



Kuva 4.1: Mittauksiin perustuvan prosessin tarkastelun osavaiheet.

Lähestymistavan suurin rajoitus on se, että systeemin dynamiikkaa ei oteta lainkaan huomioon. Jatkuvatoiminen sulfaattiprosessi on siitä kiitollinen sovelluskohde, että se on hyvin staattinen: dynamiikan huomiotta jättäminen ei aiheuta suurta virhettä. Jonkin toisen systeemin kohdalla dynamiikan eliminointi olisi tässä esitettävää analysointitekniikkaa sovellettaessa välttämätöntä.

4.1 Mittausten käsittely

4.1.1 Valinta

Mitattavat suureet valitaan tarkasteltavan ongelman pohjalta. Työ tehdään usein tutkittavan prosessin asiantuntijan avustuksella, jolloin varmistutaan siitä, että

mitään oleellisia mittauksia ei jää pois. Mitattavia suureita kannattaa valita mahdollisimman suuri joukko, jota voidaan analyysin edetessä karsia.

4.1.2 Keruu

Suureiden valinnan jälkeen kerätään mittaukset. Tässä vaiheessa saattaa olla mahdollista vaikuttaa mittausten näytteenottotaajuuteen. Taajuus tulee valita siten, että se on järkevä tarkasteltavan prosessin dynamiikan kannalta eli että se kuvaa hyvin prosessissa tapahtuvia oleellisia muutoksia. Toisaalta taajuuden ei ole järkevää olla liian suuri, koska tällöin kulutetaan turhaan rajallista talletettavalle tiedolle käytettävissä olevaa tietokoneen massamuistikapasiteettia.

Mittaukset voidaan luokitella kahteen päätyyppiin: jatkuvatoimisiin ja näytteistykseen perustuviin. Edellisestä esimerkki on anturi, joka mittaa jatkuvasti lämpötilaa. Prosessitietokone hakee anturin lukeman näytteenottotaajuuden määräämin välein, muuttaa signaalin analogisesta digitaalseksi ja tallettaa tuloksen esim. tietokantaan. Jälkimmäistä tyyppiä edustaa laboratorioanalyysi, jossa määrätään prosessista otetun ainenäytteen kemiallinen koostumus.

Työssä käytettiin pääasiassa jatkuvatoimisia mittauksia, jotka olivat kymmenen mittauksen keskiarvoja minuutin välein tehtävistä mittauksista. Tämän tarkkuuden katsottiin olevan riittävä, koska keittoprosessissa tapahtuvat muutokset ovat tunnetusti hitaita.

Mittaukset kerättiin tehtaan automaatiojärjestelmän XIS-tietokannasta, johon kerätään prosessimittauksia ja joidenkin ylätasen säätöjen asetusarvoja. Laboratoriomittaukset, esimerkiksi lipeäanalyysit, talletetaan yleensä SPOS-järjestelmään. Tehtaan mittaustietojen keruu on esitetty kuvassa 4.2.

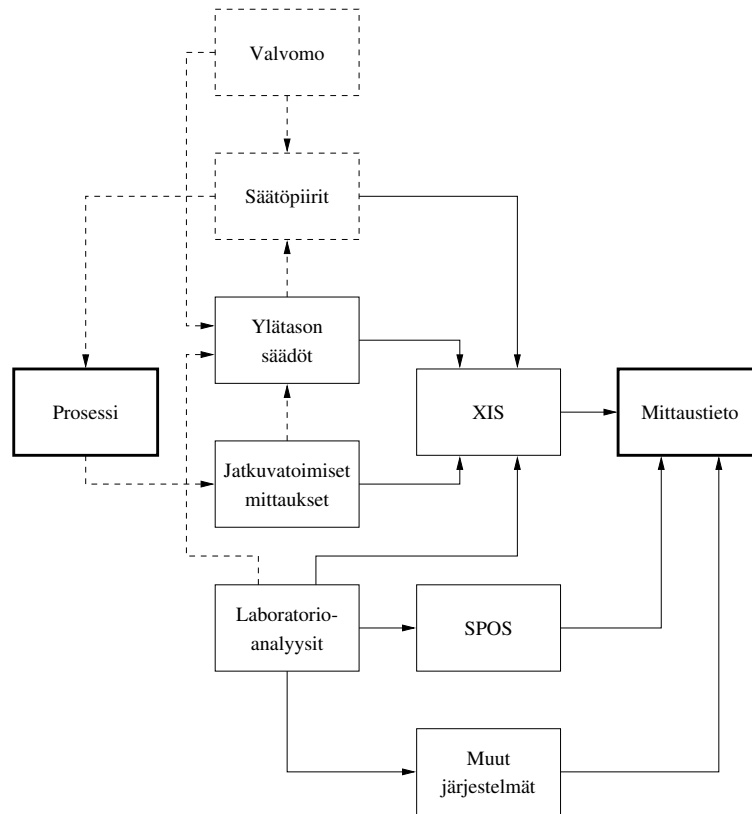
Mittaustietojen tehokkaan analysoinnin kannalta olisi järkevää, että kaikki tieto kerättäisiin yhteen järjestelmään. Tämä työ on tehtäällä käynnissä, mutta johtuen urakan valtavasta työmäärästä vielä kesken.

4.1.3 Mittausten esikäsittely

Virheiden poisto. Lähes kaikille prosessimittauksille tyypillinen piirre on se, että niissä on virhettä. Virheet voidaan jakaa kahteen luokkaan: (1) mittalaitteen vikaantuminen tai mitattavan suureen ajautuminen pois laitteen toiminta-alueelta ja (2) kohina, joka on peräisin mittaussignaalin käsittelyn ja/tai mittalaitteen epäideaalisuudesta.

Tyypin (1) virheet voidaan yleensä helposti havaita ja poistaa määräämällä kullekin mittaukselle ylä- ja alarajat. Mittaus saattaa myös ”jumiutua” tiettyyn vakioarvoon, vaikka mitattavan suureen tiedetään käytännössä muuttuvan jatkuvasti. Myös tällaiset virheet on helppo tunnistaa ja eliminoida.

Tyypin (2) virheet ovat satunnaisia signaalin värähtelyitä, joita voidaan vaimentaa suodattamalla. Usein käytetään alipäästö- eli keskiarvoistavaa suodatusta. Toinen vaihtoehto on mediaanisuodatus, joka soveltuu impulssimaisten virheiden



Kuva 4.2: Prosessin mittauksia käsittelevät yksiköt ja niiden väliset tietovuot. Ohjaukseen liittyvät yksiköt ja tietovuot on merkitty katkoviivalla ja tietovuo tiedonkeruuseen yhtenäisellä viivalla.

den poistoon. Näitä suodatustekniikoita ovat käsitelleet erittäin laajalti Astola *et al.* (Astola ja Kuosmanen 1997).

Viiveen kompensointi. Monet prosessit – kuten jatkuvatoiminen keitin – sisältävät aikaviiveitä. Oletetaan esimerkiksi, että halutaan analysoida, mitkä tekijät ovat vaikuttaneet keittimen lopputuotteen laatuun. Tällöin on prosessissa ennen lopputuotteen laadun mittaria olevia mittaussignaaleja viivästettävä ko. sensorien ja lopputuotteen laadun mittarin välisen aikaviiveen verran.

Riippuen prosessista viive voi olla joko ennalta tunnettu tai tuntematon. Jälkimmäisessä tapauksessa viive voidaan estimoida keskenään mahdollisimman hyvin korreloivien mittausten perusteella käyttäen signaalien välistä korrelaatiokerroinfunktiota (Aumala, Ihalainen, Jokinen ja Kortelainen 1995).

4.1.4 Mittausten yhdistely

Analyysin kannalta oleelliset suureet on usein muodostettava mittauksia yhdistelemällä. Näin tehdään esimerkiksi laskettaessa prosessin taseita aine- tai energiamäärien suhteen. Taselaskennat ovat hedelmällisiä, koska niiden kautta paljastuneihin prosessin epäkohtiin on yleensä helppo prosessin säätöperiaatteita muokkaamalla puuttua.

Ainetaselaskennan periaate on yksinkertainen: systeemiin syötetään yhtä paljon ainetta kuin siitä tulee ulos. Energiataselaskenta on monimutkaisempaa havainnoitavien ilmiöiden mittauksen vaikeuden vuoksi. Seuraavassa on esimerkkejä mittausten yhdistelystä energiataseiden laskennassa ja muutosten vaikutuksia energiataseen kannalta (Laine 1997):

- lämpövirta astiaan (+) / astiasta (-),
- säteilyhäviö (-) / säteilylämmitys (+),
- höyrystymisenergia (-) / lauhtumisenergia (+),
- eksotermisen reaktiolämpö (+) / endotermisen (-),
- paineen lisäys (-) / alennus (+) ja
- rakennemateriaalin lämpeneminen (-) / jäähtyminen (+).

4.2 Mittausten analysointi

Työn mittausten analysointi on pelkistäen korrelaatiolaskentaa. Lähtökohtahan oli etsiä sellaisia prosessista mitattavissa olevia tekijöitä, jotka vaikuttavat lopputuotteen laatuun eli kappalukuun.

Tässä luvussa esitellään menetelmiä, joiden avulla korrelaatioita voidaan etsiä. Korrelaatiokerroin ja korrelaatiokerroinfunktio ovat perinteinen tapa mitata lineaarista riippuvuutta kahden muuttujan välillä. Lisäksi tarkastellaan neuroverkon, itseorganisoivan kartan, käyttöä prosessin mittausaineiston visuaalisessa esittämisessä ja korrelaatioiden etsinnässä.

4.2.1 Korrelaatioanalyysi

Korrelaatiokerroin voi saada arvoja väliltä $-1 \dots 1$. Kerroin kuvaa satunnaismuuttujien X ja Y välisen *lineaarisen* riippuvuuden voimakkuutta.

Monet järjestelmät – selluprosessi mukaan lukien – sisältävät epälineaarisia riippuvuuksia. Näille korrelaatiokertoimen laskenta antaa aina liian pienen arvon. Kerrointa voidaan kuitenkin käyttää karkeaan korrelaation voimakkuuden arviointiin, jos voidaan olettaa, että prosessin käytös tarkasteltavan toimintapisteen ympäristössä on lähes lineaarinen.

Korrelaatiokerroin. Satunnaismuuttujien X ja Y välinen korrelaatiokerroin ρ määritellään kaavalla (Aumala, Ihalainen, Jokinen ja Kortelainen 1995)

$$\rho = \frac{c_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}.$$

Muuttujien X ja Y kovarianssi c_{XY} ja varianssit σ_X ja σ_Y on estimoitava. Kovarianssin estimaatti saadaan N :n $(x(n), y(n))$ -parin mittausaineistosta kaavalla

$$\hat{c}_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \hat{\mu}_x)(y(n) - \hat{\mu}_y),$$

missä $\hat{\mu}_x$ ja $\hat{\mu}_y$ ovat muuttujien keskiarvojen μ_X ja μ_Y estimaatit.

Korrelaatiokerroinfunktio. Satunnaismuuttujien X ja Y välinen korrelaatiokerroinfunktio $\rho(\tau)$ on korrelaatiokertoimen yleistys. Se määritellään (Aumala, Ihalainen, Jokinen ja Kortelainen 1995)

$$\rho(\tau) = \frac{c_{XY}(\tau)}{\sigma_X \sigma_Y}.$$

Muuttujalle $c_{xy}(n)$ eli kovarianssifunktiolle voidaan nyt laskea (harhainen) estimaatti kaavalla

$$\hat{c}_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} (x(n) - \hat{\mu}_x)(y(n+\tau) - \hat{\mu}_y).$$

Parametri τ määrää viiveen, jolla korrelaatio lasketaan. Kun $\tau = 0$, korrelaatiokerroinfunktion arvo on sama kuin edellä esitetyn korrelaatiokertoimen.

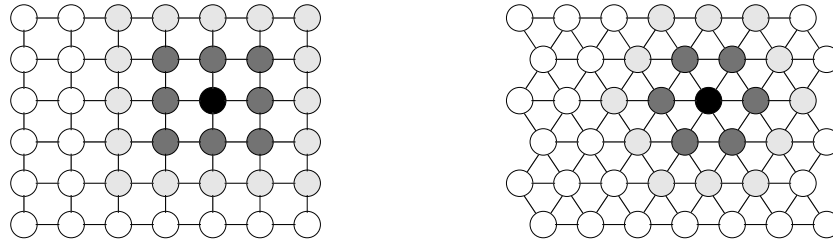
Korrelaatiokerroinfunktiota voidaan käyttää kahden korreloivan signaalin välisen viiveen estimointiin. Signaalien väliseksi viiveeksi valitaan se τ :n arvo, jolla funktion arvo on itseisarvoltaan suurin.

Mikäli muuttujat X ja Y ovat samat, korrelaatiokerroinfunktion avulla voidaan tarkastella ko. signaalin autokorrelaatiota eli korrelaatiota itsensä kanssa. Tällaisen tarkastelun avulla voidaan paljastaa signaalissa esiintyvä jaksollisuus.

4.2.2 Itseorganisoiva kartta

Rakenne. Itseorganisoiva kartta (*Self-Organizing Map, SOM*) (Kohonen 1995) on neuroverkko, joka koostuu hilasta toisiinsa kytkettyjä neuroneita. Kutakin neuronin i edustaa paino- tai mallivektori $\mathbf{m}_i$. Neuronit on järjestetty tyypillisesti kaksiulotteiseen säännölliseen hilaan, jolloin kartta on helppo esittää tasossa: tietokoneen näytöllä tai paperilla. Tästä eteenpäin kartalla tarkoitetaan kaksiulotteista karttaa.

Kartassa voidaan käyttää kahta eri hilaa: suorakulmaista tai heksagonaalista, jotka on esitetty kuvassa 4.3. Kohonen suosittelee heksagonaalisen käyttöä, joskaan hilojen välillä ei ole käytännössä kovin suurta eroa.



Kuva 4.3: Kaksi karttaa, joiden koko on 7×6 eli 42 neuronia. Vasemmalla olevan kartan hila on suorakulmainen, oikealla olevan heksagonaalinen. Molemmissa kartoissa on värjätty mustalla merkityn karttayksikön naapurustosäteen 1 neuronit tumman ja säteen 2 vaalean harmaalla.

Toimintaperiaate. Kartta opetetaan joukolla opetusvektoreita, joiden dimensio on sama kuin kartan painovektorien. Opetuksen jälkeen neuronien painovektorit ovat asettuneet avaruuteen, jonka pisteitä opetusvektorit ovat – kutsuttakoon avaruutta tässä syöteavaruudeksi – siten, että ne approksimoivat karkeasti syöteavaruuden tiheysfunktioita.

Kartan tärkein ominaisuus on se, että painovektorit ovat opetuksen jälkeen *järjestyksessä*. Karttakilassa lähekkäin olevat neuronien painovektorit muistuttavat paljon toisiaan.

Kartan muodostus. Kartan muodostuksessa on kolme vaihetta: (1) kartan koon ja muodon valinta, (2) painovektorien alustus ja (3) opetus.

- *Kartan koon ja muodon valinta.* Kartan neuronien lukumäärä määrää kartalla esitettävän tiedon esitystarkkuuden. Valintaan vaikuttaa käyttötarkoitus ja käytettävissä olevan opetusaineiston määrä. Koska jokainen karttayksikkö on tietyn syöteavaruuden osan ”prototyyppi”, opetusjoukon vektoreita tulee olla selkeästi enemmän kuin karttayksiköitä.

Lisäksi on määrättävä kartan yksiköiden määrä vaaka- ja pystysuunnissa. Nämä kannattaa valita opetusaineiston kahden pääkomponentin (*principal component, PC*) (Bishop 1995) pituuksien suhteessa.

- *Alustus.* Painovektorien alkuarvot voidaan asettaa usealla eri tavalla, joista seuraavat kaksi tapaa ovat yleisimmät. (1) Painovektorien komponenteille annetaan satunnaiset arvot. (2) Opetusaineistolle lasketaan sen kaksi pääkomponenttia, ja painovektorit alustetaan tasavälisesti näiden kahden pääkomponentin virittämään aliavaruuteen.

Jälkimmäinen on näistä kahdesta suositeltavampi, koska sen ansiosta kartta on jo karkeasti järjestyksessä ennen opetusta, joka on algoritmin laskennallisesti raskain osuus. Tällöin tapaan (1) verrattuna opetukseen vaadittavien opetuskierrosten määrä on pienempi eli vaadittava opetus aika lyhenee.

- *Opetusalgoritmi.* Kartan opetusalgoritmi on iteratiivinen. Opetuksessa tarvittavat naapurustofunktio $N(n)$ ja opetuskerroin $\alpha(n)$ valitaan usein lineaarisiksi funktioiksi, joista edellinen pienenee opetuksen kuluessa alkuarvostaan yhteen ja jälkimmäinen nolnaan.

1. Valitaan naapurustosäteelle $N(n)$ ja opetuskertoimelle $\alpha(n)$ alkuarvot $N(0)$ ja $\alpha(0)$.
2. Valitaan opetusaskelten lukumäärä M .
3. Asetetaan $n=0$.
4. Valitaan opetusnäytteiden joukosta satunnaisesti yksi vektori $\mathbf{x}$.
5. Etsitään voittajayksikkö c , jonka painovektori $\mathbf{m}_c$ on lähinnä vektoria $\mathbf{x}$:

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_c\| = \min_i \{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\|\}. \quad (4.1)$$

Useimmiten etäisyyksmittana käytetään euklidista etäisyyttä.

6. Päivitetään voittajayksikön ja sen naapuriyksiköiden painovektorien arvot. Naapurustosäteen sisäpuolella olevia vektoreita käännetään näytevektorin $\mathbf{x}$ suuntaan:

$$\mathbf{m}_i(n+1) = \begin{cases} \mathbf{m}_i(n) + \alpha(n)[\mathbf{x} - \mathbf{m}_i(n)], & i \in N_c(n) \\ \mathbf{m}_i(n), & i \notin N_c(n). \end{cases} \quad (4.2)$$

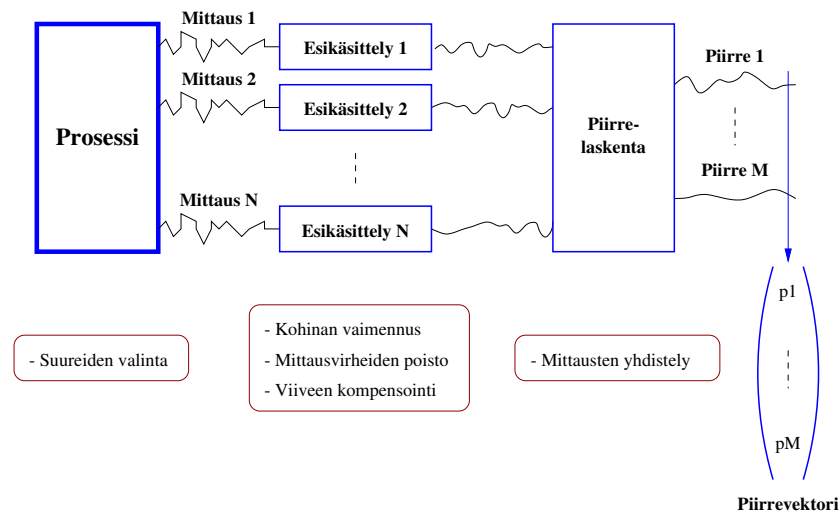
7. Asetetaan $n = n+1$. Jos $n = M$, lopetetaan, muuten palataan kohtaan 4.

Kohonen esittää kartalle opetusta, joka tehdään soveltamalla edellä kuvattua opetusalgoritmia kahdesti. Ensimmäisessä eli karkeassa opetuksessa $N(0)$ on noin puolet kartan koosta ja $\alpha(0)$ on suuruusluokkaa 0.5. Toisessa eli hienosäätöopetuksessa $N(0)$ on pieni, esimerkiksi kolme ja $\alpha(0)$ on selkeästi edellistä vaihetta pienempi, luokkaa 0.05.

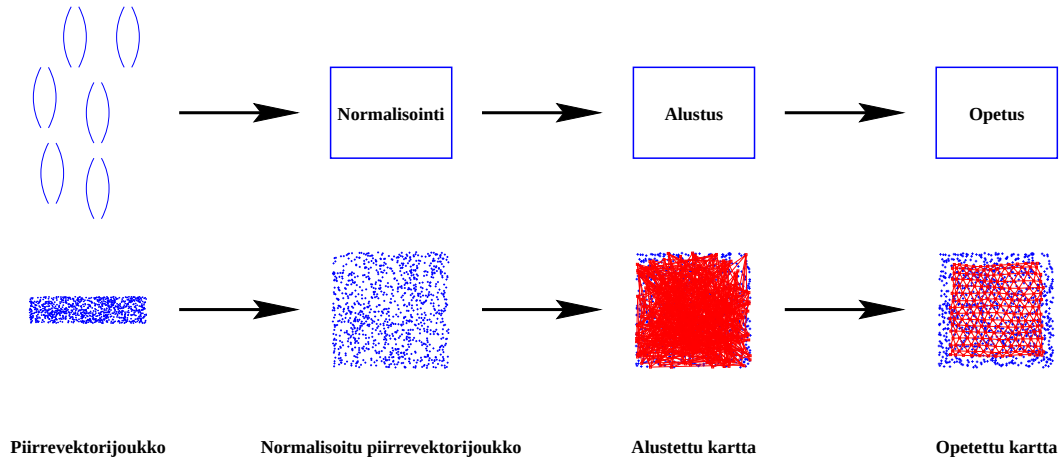
Kartan käyttö. Kuvassa 4.4 on esitetty SOM:lle syötettävien opetusvektorien muodostus käytettäessä karttaa prosessin toiminnan analysoimiseen.

Kuvassa 4.5 on esitetty kartan opetus kuvassa 4.4 muodostettujen vektorien avulla. Ennen opetusta vektorit normalisoidaan, mikä usein – kuten myös tässä työssä – tehdään skaalaamalla kukin muuttuja varianssiltaan ykköseksi. Tällöin kaikkien muuttujien kontribuutio kartan järjestymiseen on yhtä suuri.

Prosessin mittaustiedolla opetettu kartta on esitys prosessin tiloista opetuksen käytettyjen mittausten suhteen. Kukin kartan yksikkö, jota kuvaa sen painovektori, edustaa tiettyä prosessin toimintapistettä. Tilat järjestyvät kartalle opetuksessa siten, että samankaltaiset tilat kuvautuvat lähelle toisiaan karttahi-
lassa.



Kuva 4.4: Kartan opetusvektorien (piirrevektori) muodostus.



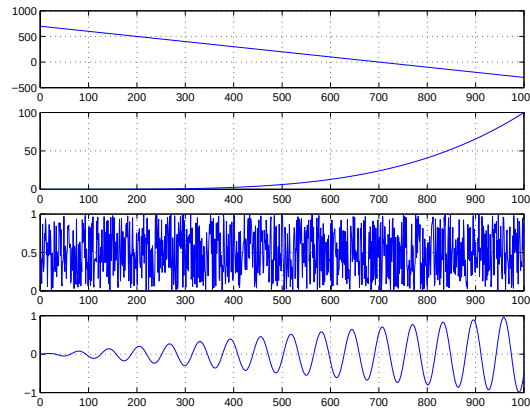
Kuva 4.5: Kartan opetus. Opetusaineiston pisteet on värjätty sinisellä ja kartan yksiköt – kuten myös vierekkäisiä yksiköitä yhdistävät viivat – punaisella värillä. Kuvasta nähdään selvästi satunnaisesti alustetun kartan asettuminen syöteavaruuteen.

Visualisointi. SOM:n käytön suurin etu mittaustiedon tarkastelussa on monipuolinen tiedon visuaalinen esitys. Seuraavassa esiteltävien, tässä työssä käytettyjen tekniikoiden lisäksi on olemassa useita muitakin.

- *Komponenttitasoesitys* kertoo kunkin painovektorin komponentin eli yhden muuttujan jakauman kartalla. Tutkimalla kaikkia komponenttitasoja samanaikaisesti voidaan karkeasti tarkastella muuttujien välisiä riippuvuuksia ja erottaa prosessin erilaisia toimintatiloja.

- *Jatkuva-arvoisessa värjäyksessä* kullekin karttayksikölle annetaan oma värinsä, joka on viereisissä yksiköissä samankaltainen. Tämän jälkeen valitaan kaksi painovektorin komponenttia, tehdään niistä xy-kuvaaja ja värjätään kuvaajan pisteet kartan värjäyksen mukaan. Tällöin voidaan havainnollisesti nähdä prosessin käytös sen eri tiloissa näiden kahden suureen suhteen.

Esimerkki kartan käytöstä. Tarkastellaan kartan käyttöä keinotekoisena esimerkkinä avulla. Opetusaineistona on viisi signaalia: x , $700 - x$, $10^{-10}x^4$, satunnaisluku väliltä $0 \dots 1$ ja $\sin(x/10) \cdot (x/1000)$. Kuvassa 4.6 on esitetty signaalit, kun x saa arvot $1 \dots 1000$.

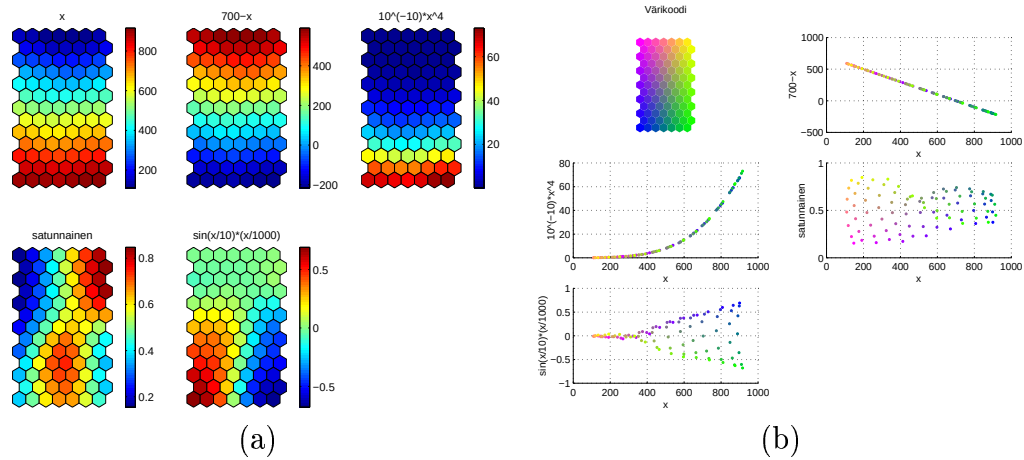


Kuva 4.6: Esimerkin signaalit.

Kuvassa 4.7 (a) on 13×7 yksikön kokoisen, signaaleilla opetetun kartan viisi komponenttitasoa. Tasot on värjätty painovektorien komponenttien arvojen perusteella kunkin tason vieressä olevan väriasteikon mukaan. Kuvasta nähdään esimerkiksi, että muuttujien 1 ja 2 sekä 1 ja 3 välillä on vahva korrelaatio, joista edellinen on negatiivinen. Lisäksi, kun muuttujan 1 arvo on suuri, muuttuja 5 saa suurimmat ja pienimmät arvonsa.

Kuvassa 4.7 (b) on esimerkkikartan jatkuva-arvoinen värjäys, ja neljä xy-kuvaajaa. Vertaamalla kuvaajia alkuperäisiin signaaleihin (kuva 4.6) nähdään värjäyksen toiminta. Esimerkiksi sinisignaalin pienet arvot kuvautuvat kartan yläosaan, jolloin niitä vastaavat kuvaajien pisteet värjätään punaisiksi ja keltaisiksi. Suuret arvot ovat kartan alaosaan, jolloin pisteet värjätään sinisiksi ja vihreiksi.

SOM_PAK ja SOM Toolbox. SOM:n opetukseen ja visualisointiin on olemassa kaksi vapaasti saatavilla olevaa ohjelmistopakettia: SOM_PAK ja SOM Toolbox, joista jälkimmäistä on käytetty tässä työssä kaikkiin SOM-kokeisiin.



Kuva 4.7: Esimerkkikartan (a) komponenttitasot ja (b) jatkuva-arvoinen värjäys.

SOM_PAK¹ (Kohonen, Hynninen, Kangas ja Laaksonen 1996) on ohjelmoitu C-kielellä, minkä ansiosta se on nopea kartan opetuksessa ja käyttökelpoinen suurten tietomäärien käsittelyssä. Paketti sisältää kartan opetuksessa ja visualisoinnissa tarvittavat perusoperaatiot.

SOM Toolbox² vaatii toimiakseen Matlab 5 -ympäristön (Mathworks Inc. 1996). Kartan opetuksessa sen rutiinit ovat SOM_PAK:n vastaavia hitaampia, mutta SOM Toolbox:n vahvuus onkin SOM_PAK:a monipuolisempi kartan visualisointi. SOM Toolbox on rakennettu SOM_PAK:n kanssa yhteensopivaksi siten, että tietojen siirto ohjelmistojen välillä on mahdollista. Tällöin opetus on mahdollista tehdä SOM_PAK:lla ja visualisointi SOM Toolbox:lla.

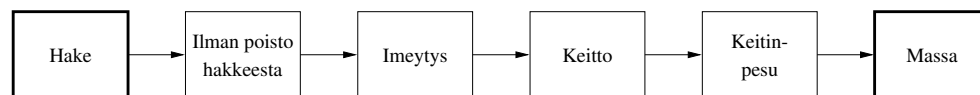
¹http://www.cis.hut.fi/nnc/som_pak/

²<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/>

Luku 5

Sulfaattisellun jatkuvatoimisen keiton osavaiheet

Sulfaattisellun jatkuvatoiminen keitto on työssä jaettu kuvan 5.1 osoittamalla tavalla neljään erilliseen osavaiheeseen. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin kunkin vaiheen teoriaa.



Kuva 5.1: Jatkuvatoimisen sellunkeiton osavaiheet.

5.1 Hakkeen lämmitys ja ilman poisto hakkeesta

Hake koostuu kolmesta osasta: puun kuiva-aine, vesi ja ilma. Varastoinnista hake syötetään keittämölle esihöyrystysilön ja pasutusastian kautta, joissa tapahtuu hakkeen höyrykäsittely. Käsittelyn tarkoitus on lämmittää hake ja poistaa siitä mahdollisimman paljon ilmaa.

Ilmaa poistuu hakepalasista kahden eri mekanismin kautta: ilman lämpölaajenemisen ja vesihöyryn diffuusion kautta. Lämpölaajenemisen ansiosta hakkeen ilmasta poistuu noin 25 %. Loppu ilmanpoisto tapahtuu vesihöyryn diffuusion kautta, jonka nopeus riippuu diffuusiokertoimesta (Stamm 1953)

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \frac{760}{p}, \quad (5.1)$$

missä D_0 on diffuusiovakio, T on absoluuttinen lämpötila ja p on vesihöyryn osapaine elohopeamillimetreinä (mmHg).

Vettä on keittohakkeessa paitsi sitoutuneena hakkeen soluseinämiin yleensä myös vapaana puun huokosissa (Virkola 1983b) eli hakkeen kosteus on puun

kyllästymispistettä korkeampi. Huokosissa oleva vesi hidastaa höyryn tunkeutumista hakkeeseen, sillä höyryn on edetäkseen syrjäytettävä tämä vesi tieltään. Myös puun rakenne vaikuttaa höyryn siirtymiseen hakkeeseen. Stammin mukaan (Stamm 1953) höyryn virtausvastus on kääntäen verrannollinen hakkeen onteloiden säteen neljänteen potenssiin.

Käytännössä tärkeä tekijä on myös höyrystyksen epätasaisuus. Hakepalaset pääsevät eri tavoin kosketuksiin höyryn kanssa johtuen hakkeen vaihtelevasta pakkautumisesta. Etenkin esihöyrystyssiilossa on mahdollista, että hakkeeseen pääsee muodostumaan kanavia, joita pitkin suurin osa höyrystä kulkee: tuloksena on hakkeen epätasainen lämpiäminen. Tätä epäkohtaa ovat laitevalmistajat korjanneet muuttamalla esihöyrystyssiilon rakennetta (Lundgren 1990).

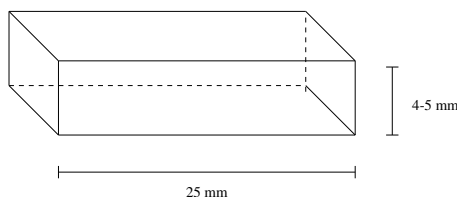
Höyryn tunkeutuminen hakkeeseen on hidas tapahtuma. Tutkimuksissa on todettu, että höyrystysajan tulisi olla vähintään 10–20 minuuttia tehokkaan ilmanpoiston takaamiseksi (Aurell, Stockman ja Teder 1958; Wilson 1971).

Haketta höyrykäsitteltäessä siitä poistuvat osittain puun uuteaineista etenkin terpeenit (Virkola 1983b). Höyrykäsittelyn höngät johdetaan tärpättilaitokselle, jossa otetaan talteen lauhteena raakatärpätti.

5.2 Keittoliipeän imeytys hakkeeseen

Höyrykäsittelyn jälkeen hake saatetaan kosketukseen keittonesteen eli lipeän kanssa ja syötetään imeytystorniin. Tornissa tapahtuu keittokemikaalien siirtyminen hakkeeseen penetraation ja diffuusion avustamana. Edellinen on puhtaasti fysikaalinen ja jälkimmäinen fysikaalis-kemiallinen reaktio.

Kuvassa 5.2 on tyypillinen jatkuvatoimisessa sulfaattikeitossa käytettävä hakepala mittoineen. Palan imeytyksen kannalta tärkeät dimensiot ovat suurin ja pienin eli pituus ja paksuus.



Kuva 5.2: Sulfaattikeitossa käytettävä hakepala mittoineen. Puun syyt ovat suurimman dimension suuntaiset.

Penetraatio. Penetraatio on lipeän tunkeutumista hakkeeseen painegradientin vaikutuksesta (Stone ja Green 1958). Paine-ero palan sisustan ja ulkopuolen välillä on suuri, joten lipeä työntyy voimakkaasti hakkeeseen. Penetraatio tapah-

tuu voimakkaimmin hakkeen pituussuuntaan, ja on diffuusiota huomattavasti nopeampi reaktio.

Mitä paremmin hakkeen ilma saadaan imeytystä edeltävässä höyrykäsittelyssä korvattua vesihöyryllä, sitä tehokkaammin keittoneeste hakkeeseen tunkeutuu. Imeytystornin lämpötilassa ja paineessa hakepalan sisällä oleva vesihöyry tiivistyy ja lipeä ”imee” itsensä palan sisään. Liuoksen tunkeutuminen hakkeeseen noudattaa Poiseulle’n yhtälöä (Stone ja Green 1958)

$$\frac{V}{t} \propto \frac{Nr^4 \Delta p}{l\eta}, \quad (5.2)$$

missä V on tilavuus, joka virtaa N :n r -säteisen l :n pituisen kapillaarin läpi ajassa t . Suure Δp on paine-ero hakepalan sisäisen ja ulkoisen paineen välillä ja η on hakkeeseen tunkeutuvan nesteen viskositeetti.

Tunkeutuva nestemäärä V on siis suoraan suhteessa paine-eroon Δp eli mitä suurempi paine-ero, sitä tehokkaampi penetraatio. Määrä on myös verrannollinen kapillaarien säteiden neljänteen potenssiin: pintapuulla r on suurempi kuin sydänpuulla, joten pintapuu myös penetroituu paremmin (Stone ja Green 1958). Nesteen viskositeetti η pienenee lämpötilan kasvaessa.

Penetraatioon vaikuttaa myös keittoliuoksen pH. Sulfaattikeiton liuos on vahvasti emäksinen, jolloin hakkeen joutuessa keittoliuoksen kanssa kosketukseen puuaineksen soluseinäämä turpoaa (Stone 1957). Tällöin kaavan 5.2 r kasvaa, ja penetraatio tehostuu.

Ongelmaksi penetraation ja koko keiton kannalta muodostuu hakepalan sisään jäänyt ilma, joka muodostaa kokoon puristuessaan palan keskusta ”ilmakuplan”. Ilma poistuu palasta vain keittoneesteeseen liukenemisen kautta, mikä on hidasta sen huonosta liukoisuudesta johtuen. Tällöin hakkeen sisus ei pääse kosketuksiin keittokemikaalin kanssa ja jää kunnolla keittymättä.

Diffuusio. Hakkeen kyllästyessä keittoliuoksella puun ainesosat alkavat reagoida keittokemikaalien kanssa. Kemikaalien liikkumista hallitsee imeytystornin olosuhteissa – alle 140 °C lämpötilassa – diffuusio eli konsentraatiogradientin vaikutuksesta tapahtuva aineen siirtyminen hakepalasen ja sitä ympäröivän keittoliuoksen välillä (Stone ja Green 1958).

Diffuusiota käsiteltäessä käytetään usein käsitettä puun tehollinen kapillaari-poikkipinta (*effective cross-capillary sectional area, ECCSA*). ECCSA on se prosenttiosuus puun poikkileikkauspinnasta, joka on diffuusion käytettävissä. Eräät diffuusiota koskevat tutkimustulokset ovat ristiriitaisia: Stonen (Stone 1957) mukaan alkalisisessä keittoliuoksessa diffuusio on lähes yhtä nopeaa hakkeen joka suuntaan, kun taas Robertsenin (Robertsen 1993) mukaan diffuusio on jopa 100 kertaa nopeampaa hakkeen pituus- kuin paksuussuuntaan. Vaikka Stone tutkimuksissaan käytti haapaa ja Robertsen kuusta ja mäntyä, ero on hämmästyttävän suuri.

Diffuusiota voidaan kuvata Fickin ensimmäisellä lailla (Virkola 1983b)

$$\frac{dm}{dt} = -D \frac{dc}{dx} dydz, \quad (5.3)$$

missä massan m siirtyminen aikayksikköä kohti on suoraan verrannollinen konsentraation c muutosnopeuteen suuntaan x pinta-alayksikköä $dydz$ kohti; D on diffuusiokerroin.

Kun huokoisen kiinteän ainekerroksen molemmiin puolin vallitsee sama vakio-konsentraatio, tapahtuu diffuusio kaavan

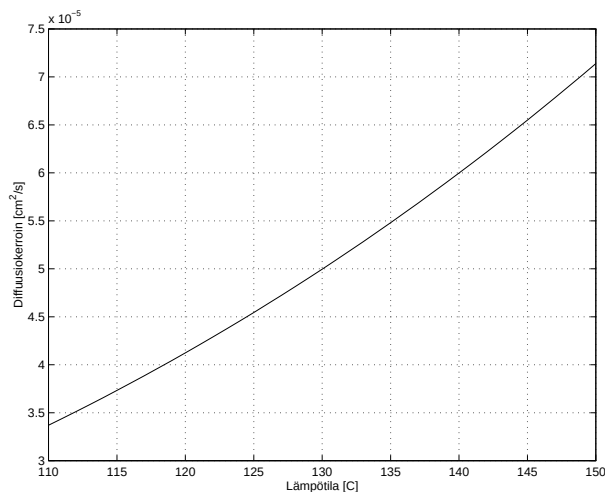
$$\frac{m}{t} = DA \frac{c}{d/2} \quad (5.4)$$

mukaisesti (Virkola 1983b). Kaavassa m on ajassa t hakkeeseen siirtyvä kemikaalimäärä, D on diffuusiokerroin (katso kaava 5.5), A on puun ECCSA, c on konsentraatioero ja d on hakkeen paksuus.

Robertsen osoitti väitöskirjassaan (Robertsen 1993), että diffuusio noudattaa Fickin ensimmäistä lakia ja että kaavojen 5.3 ja 5.4 diffuusiokerroin D riippuu lämpötilasta T kaavan

$$D = D_0 e^{-E/(RT)} \quad (5.5)$$

mukaisesti. D_0 on diffuusiovakio ($0.0948 \text{ cm}^2/\text{s}$), E on aktivoitumisenergia (25300 J/mol) ja R on yleinen kaasuvakio. Kuvassa 5.3 on diffuusiokertoimen lämpötilariippuvuuden kuvaaja.



Kuva 5.3: Diffuusiokerroin lämpötilan funktiona.

5.3 Keitto

Keiton kolme vaihetta ovat tapahtumajärjestyksessä uutos-, bulkki- ja jäännösdelignifointivaihe (Kleppe 1970). Ajanhetkeä, jolloin siirrytään uutosvaiheesta bulkkivaiheeseen kutsutaan keiton ensimmäiseksi käännoispisteeksi ja bulkkivaiheen muuttumista jäännösdelignifioinniksi vastaavasti toiseksi käännoispisteeksi.

Uutosvaihe. Keiton ensimmäinen osa eli uutosvaihe tapahtuu imeytystornissa. Vaiheelle on tyypillistä runsas alkalin kulutus, joka aiheutuu suurelta osin hemiselluloosan reaktioista sekä siitä, että emäksinen keittoliuos neutraloi puun happamia yhdisteitä. Ligniiniä liukenee vähän, noin 15–25 % sen kokonaismäärästä.

Hemiselluloosista glukomannaani liukenee imeytystornin olosuhteissa varsin tehokkaasti. Sitä on noin 75 % liukenevista hiilihydraateista. Ksylaania liukenee vähän. Sen liukenemismäärä ja -nopeus on riippuvainen keittoliuoksen alkalipitoisuudesta: korkea alkalipitoisuus imeytystornissa heikentää ksylaanisaintoa.

Bulkkivaihe. Keiton keskeisin osa on bulkkivaihe, joka tapahtuu keittovyöhykkeessä höyrytilasta paisuntasihdeille. Vaiheen aikana pääosa alkalista kuluu ligniinin liukenemiseen eli delignifointiin. Delignifointireaktiota voidaan approksimoida yhtälöllä

$$-\frac{dL}{dt} = kc_iL, \quad (5.6)$$

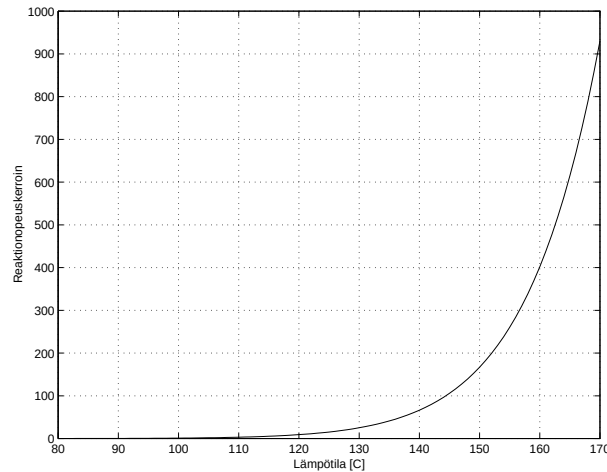
missä L on massan ligniinipitoisuus hetkellä t , k on suhteellinen reaktionopeusvakio ja c_i on keiton alkuperäinen tehollinen alkaliväkevyys. Reaktionopeuskerroin k riippuu lämpötilasta Arrheniuksen yhtälön

$$\ln k = b - \frac{a}{T} \Leftrightarrow k = \exp\left(b - \frac{a}{T}\right) \quad (5.7)$$

mukaan. Yhtälössä a ja b ovat vakiokertoimia ja T on absoluuttinen lämpötila. Kertoimet a ja b määritellään yleensä siten, että k lämpötilassa 100 °C on yksi. Tällöin a saa arvon 16115 ja b 43.2 (Virkola 1983b). Kuvasta 5.4 ilmenee reaktionopeuden voimakkaasti epälineaarinen riippuvuus lämpötilasta.

Bulkkivaiheessa liukenee 70–80 % puun ligniinistä ja delignifointinopeus on suuri verrattuna uutos- ja jäännösdelignifointivaiheisiin. Alkalia kuluu selvästi hitaammin kuin uutosvaiheessa.

Jäännösdelignifointivaihe. Jäännösdelignifointivaihe alkaa, kun noin 90 % ligniinistä on liuennut eli kun kappaluku on 35–40 (Virkola 1983b). Alkalin kulutus kiihtyy, ja sitä alkaa kulua jälleen hiilihydraattien reaktioihin. Ligniinin liukenemisnopeus hidastuu.



Kuva 5.4: Delignifointireaktion nopeus lämpötilan funktiona.

5.4 Keitinpesu

Keittimen alaosassa, alapaisuntasihtien alapuolella, tapahtuu keitinpesu. Pesulla on kaksi tarkoitusta: lopettaa keitto alentamalla massan lämpötilaa ja puhdistaa hakepalat keiton reaktiotuotteista.

Keittimessä alaspäin liikkuvaa hakepatsasta vastaan pumpataan keittolämpötilaa viileämpää pesulipeää. Lipeää syötetään keittimeen kolmella eri tavalla: (1) pesukiertolipeä pumpataan keittimen pohjalla pyörivän pohjakaavarin läpi pesusihtien yläpuolelle, (2) pesusihtien alapuolelle ja (3) keittimen pohjassa oleviin yhteisiin syötetään pesulipeää.

Pesulipeä syrjäyttää diffuusioon perustuen osan hakepalasten sisällä olevista keiton reaktiotuotteista, jotka imetään osin alemman alapaisuntasihtin, osin pesukiertosihtin kautta ulos keittimestä. Osa pesulipeästä poistuu keittimestä poistuvan massan mukana keittimen puskuputkeen. Pesukiertosihtien läpi imeytystä lipeästä likaisin osa poistetaan mustalipeän selkeytyssäiliöstä ja korvataan puhtaammalla pesulipeällä, minkä jälkeen se syötetään takaisin keittimeen.

5.5 Keiton lopputuloksen luonnehdinta

5.5.1 Delignifioitumisaste

Koska keiton keskeisin tavoite on ligniinin poisto hakkeesta, on luonnollista, että keiton lopputuloksen tärkein mittari on delignifioitumisastetta kuvaava suure.

Kappaluku. Keiton kovuus- eli kappaluku (κ) on nykyään käytetyin delignifointiasteen mitta. Käytössä on myös muita samaa asiaa mittaavia suureita kuten

Roe-luku ja klooriluku (Jensen 1977).

Wisaforestin jatkuvatoimisella keittämöllä käytetään Kajaani Oy:n valmistamaa kappa-analysaattoria. Se ottaa noin 20 minuutin välein massanäytteen puskulinjasta, analysoi sen, ja syöttää tuloksen automaatiojärjestelmään käytettäväksi keiton ohjauksessa.

Joitakin yksinkertaisia kappaluvun empiirisiä malleja.

- *H-tekijä*. Vroom (Vroom 1957) kehitti luvun 5.3 kohdassa ”Bulkkivaihe” esitettyyn teoriaan pohjautuvan suureen nimeltä H-tekijä, joka on delignifoinnin reaktionopeuskertoimen k (kaava 5.7) aikaintegraali:

$$H = \int_0^t k dt = \int_0^t \exp \left(43.2 - \frac{16115}{T} \right) dt. \quad (5.8)$$

Mikäli hakkeen ominaisuudet, kemikaaliannostus ja kemikaalin kulumisen keiton aikana oletetaan vakioiksi, samalla H-tekijämäärällä saadaan aina saman kappaluvun omaavaa massaa. Tällöin voidaan laskea ja säätää keitossa tarvittava lämpötila kappatavoitteen mukaan. Mallin selkeä puute on sen oletuksissa: hakkeen laatu ja kemikaalin kulumisnopeus eivät ole käytännössä vakioita. H-tekijää voidaan käyttää kuitenkin osana kappamalleja, jotka ottavat huomioon keiton kemiallisten olosuhteiden muutokset.

- *Tau-tekijä*. Tau-tekijän (Edwards ja Norberg 1973) avulla voidaan mallittaa keiton kappalukua käyttäen keittoprosessista helposti mitattavia suureita. Tekijä määritellään yhtälöllä

$$\tau = \left[\frac{S}{2 - S} \right] \cdot \left[\frac{EA}{L : W} \right]^2 \cdot H, \quad (5.9)$$

missä S on sulfiditeetti, EA on keiton tehollisen alkalin määrä, $L : W$ on neste/puu -suhde ja H on keiton H-tekijä.

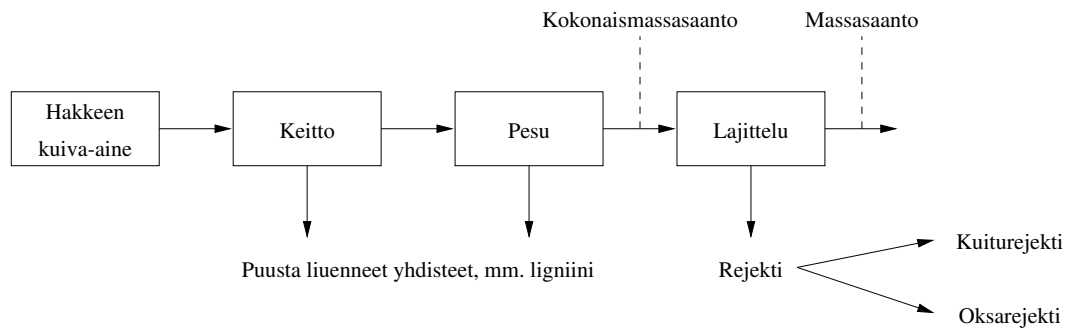
- *Hattonin malli*. Wisaforestin keittimen ohjaus pohjautuu ns. Hattonin malliin (Hatton 1973b). Malli on muotoa

$$\kappa = a + b [(\log H)(EA)^n], \quad (5.10)$$

missä H on keiton H-tekijä ja EA on tehollinen alkali. Mallin kokeellisesti määritettäviä, puulaadusta riippuvia parametrejä ovat a , b ja n .

5.5.2 Massasaanto

Kokonaismassasaanto kertoo, montako prosenttia keittoon syötetyn hakkeen kuiva-aineen massasta on keiton ja pesun jälkeen jäljellä. Sitä ei pystytä syötettävän hakkeen ja keitetyn massan määramittauksien epätarkkuudesta johtuen



Kuva 5.5: Massasaantoon liittyviä käsitteitä.

tarkkailemaan jatkuvatoimisesti. Kuvassa 5.5 on esitetty massasaantoon liittyviä käsitteitä.

Massasaantoon vaikuttavat hakkeen laatu ja massan keittymisaste. Hakelaa- tu vaikuttaa erilaisen keittymisen ja puuaineksen vaihtelevan kemiallisen koostu- muksen kautta. Mitä alhaisempaan kappalukuun massa keitetään, sitä enemmän siitä liukenee puun yhdisteitä – pääasiassa ligniiniä, mutta myös hemiselluloosaa ja selluloosaa. Wisaforestin jatkuvatoimisella keittämöllä havupuumassan saanto on noin 47 %, kun kappatavoite on 32.

Rejekti jaetaan kuitu- ja oksarejektiin, joista edelliseen voidaan vaikuttaa keitto-olosuhteita muuttamalla ja jälkimmäinen riippuu prosessiin syötettävän puun oksaisuudesta.

Luku 6

Keiton matemaattinen mallitus

6.1 Miksi mallittaa keittoa?

Matemaattinen malli on lähes aina tarkasteltavan ilmiön yksinkertaistettu esitys, jonka muoto riippuu sen käyttötarkoituksesta. Sellunkeiton mallien sovelluksia ovat prosessin toiminnan analysointi, simulointi tai lopputuotteen laadun ennustaminen, kun syötteen tunnetaan. Kaikilla näillä on sama perimmäinen tavoite: systeemin toiminnan optimointi.

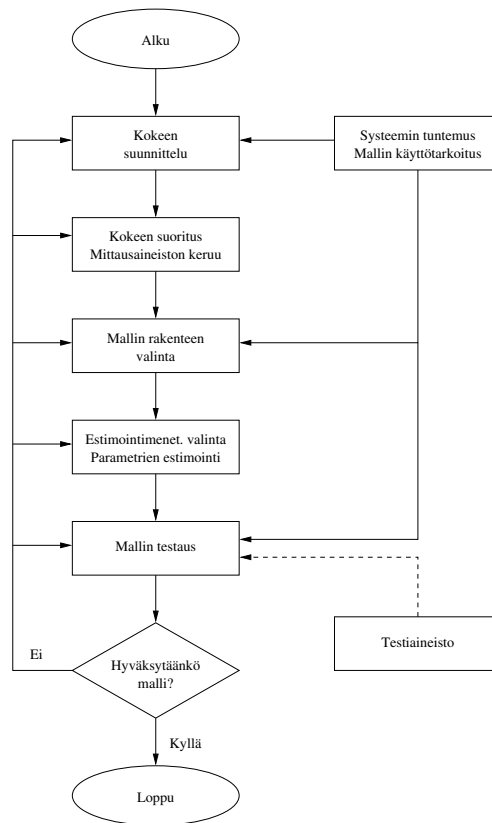
Optimoitavia asioita on sellunkeiton tapauksessa kaksi: taloudellisuus ja ekologisuus. Edellinen merkitsee tehokasta puuraaka-aineen käyttöä, pientä kemikaalien, veden ja energian kulutusta sekä mahdollisimman tasaista keiton lopputulosta. Nämä tavoitteet ovat harmoniassa ekologisten näkökohtien kanssa, joihin lukeutuu lisäksi haitallisten ympäristövaikutusten minimointi.

6.2 Mallityypit

Mallituksessa on kaksi lähestymistapaa (Ljung 1987): (1) fysikaalisiin tai kemiallisiin peruslakeihin pohjautuva mallitus (*first principles modeling*) ja (2) identifiointi, joka perustuu mallin sovittamiseen kokeelliseen aineistoon.

Peruslakeihin perustuva mallitus. Peruslakeihin perustuvassa mallituksessa tarkasteltavan järjestelmän malli on ”valkoinen laatikko”. Sen perimmäiset toimintaperiaatteet ovat selkeästi ymmärrettävissä, ja niillä on analogia tarkasteltavaan ilmiöön. Mallitusta voi hankaloittaa joko todellisen järjestelmän monimutkaisuus tai se, että systeemin toiminnan periaatteita ei riittävän tarkasti tunneta.

Systeemin identifiointi. Toinen vaihtoehto on rakentaa malli identifioimalla systeemi käyttäen tunnettuja syöte-vaste -pareja. Tällöin konstruoidaan ”musta laatikko” eli mallirakenne, jonka toiminnalla ei tarvitse olla mitään yhteyttä



Kuva 6.1: Systeemin identifioinnin lohkokaavio.

tarkasteltavan systeemin todelliseen olemukseen. Riittää, että malli toteuttaa halutulla tarkkuudella kuvauksen systeemin syötteistä ulostuloihin. Malliin kuuluu tyypillisesti joukko parametreja, joiden arvot estimoidaan tunnetun mittausaineiston avulla. Mallin rakenteen valinta on ongelmallisinta, sillä toisin kuin peruslakeihin perustuvassa mallituksessa, yhtä ja ainoaa “luonnollista” mallirakennetta ei ole. Yleensä joudutaankin kuvan 6.1 mukaiseen raskaaseen iterointiin parhaan mallin löytämiseksi (Söderström ja Stoica 1989).

Harmaa laatikko -mallit. Joskus puhutaan edellisten lisäksi malliluokasta, joka valkoisen ja mustan laatikon välimuoto eli “harmaa laatikko”. Sellainen on esimerkiksi peruslakeihin perustuva malli, jonka parametrit estimoidaan kokeellisen aineiston avulla.

Sulfaattisellun jatkuvatoimisen keiton mallit. Michelsen on väitöskirjassaan (Michelsen 1995) kehittänyt uuden keitinmallin, ja kerännyt ja jäsennellyt tyypin mukaan suuren määrän työnsä valmistumiseen mennessä kehitetyistä merkittävistä keiton malleista. Hänen työtään referensseineen voi suositella keiton

mallituksesta kiinnostuneelle.

6.2.1 Peruslakeihin perustuvia malleja

Peruslakeihin perustuvat mallit ovat keiton kemian, hakkeen ja keittonesteen virtauksien ja/tai hakkeen pakkautumisen matemaattisia formulaatioita.

Gustafson *et al.* kehittivät mallin, joka selittää keiton lopputuloksen pohjautuen reaktiokinetiikkaan ja diffuusioon (Gustafson, Sleicher, McKean ja Finlayson 1983). Malliin on tehty mm. seuraavat laajennukset:

- Agarwal *et al.* (Agarwal, Gustafson ja Arasakesari 1994; Agarwal ja Gustafson 1997) laajensivat mallia ottamaan huomioon paremmin hakkeen palakoon. Aiemmissä malleissa yleensä 1-ulotteisena mallitettua hakepalasta on käsitelty 3-ulotteisena, koska paksuuden lisäksi myös palan pituudella on keiton kannalta merkitystä.
- Jiménez *et al.* ja Gustafson *et al.* (Gustafson, Jiménez, McKean ja Chian 1988; Jiménez, Gustafson ja McKean 1989; Jiménez, McKean ja Gustafson 1990) mallittivat puutteellisen penetraation vaikutusta keiton epätasaisuuteen. Mallin avulla voidaan laskea penetraatioaste, kun hakkeen paksuus, kosteus ja keittimen lämmitysaika tunnetaan.

Christensenin malli (Christensen, Smith, Albright ja Williams 1983) perustuu keiton reaktioiden mallitukseen. Jatkuvatoiminen keitin jaetaan useisiin vaakasuoriin "siivuihin", ja kullekin osalle muodostetaan oma mallinsa: laskenta on varsin raskas.

Härkösen (Härkönen 1984; Härkönen 1987) mallin avulla voidaan määrittää mm. hakkeen ja lipeän virtausnopeudet keittimessä, hakkeen pakkautumisaste ja hakepaine keittimen eri osissa. Härkösen mallia ovat käyttäneet osana omaa malliaan mm.

- Saltin (Saltin 1992), joka mallitti keiton kemiaa Christensenin malliin pohjautuen ja
- Michelsen (Michelsen 1995; Michelsen ja Foss 1996), joka myös käytti hyödykseen yksinkertaistettua Christensenin mallia. Michelsenin mallin avulla on mahdollista tarkastella hakkeen viipymääjan ja keiton kemiallisten reaktioiden riippuvuutta jatkuvatoimisessa keittimessä.

6.2.2 Musta laatikko -malleja

Musta laatikko -malleihin luetaan tässä työssä yksinkertaiset empiiriset kappamallit, joista osa esiteltiin luvussa 5.5.1. Näitä ovat mm. H-tekijä (Vroom 1957), tau-tekijä (Edwards ja Norberg 1973), Hattonin malli (Hatton 1973a; Hatton 1973b). Hattonin mallin kertoimien jatkuvaa päivitystä kehittivät Ball *et al.*

(Ball, Dawson, Gunn, Dupuis ja Lynn 1994). Kerrin mallia (Kerr 1970; Kerr ja Uprichard 1976) edelleen kehittäli ja sovelsi Clarke (Clarke 1987).

Rudd (Rudd 1994) vertasi monikerrospersptron-tyyppisen neuroverkon (*multi-layer perceptron, MLP*), käyttöä perinteisiin menetelmiin selluprosessien mallituksessa. Verkon etu on, että sitä voidaan käyttää nopeasti ja tehokkaasti monen muuttujan epälineaarisen prosessin mallitukseen. MLP-verkkoa on useissa töissä (Dayal, MacGregor, Taylor ja Marcikic 1994; Musavi, Coughlin ja Qiao 1995; Sutinen 1996; Haataja 1996) käytetty kappaluvun mallittamiseen siihen vaikuttavien prosessin muuttujien avulla.

6.2.3 Harmaa laatikko -malleja

Michaelson *et al.* (Michaelson, Christensen, Lunde, Lundman ja Johansson 1994) ja Sidrak (Sidrak 1995) käyttivät Christensenin mallia (Christensen, Smith, Albright ja Williams 1983) keittimen toiminnan ohjaukseen. Edellisessä laskenta pohjautui Kalman-suotimeen perustuvaan tilaennustimeen, jälkimmäisessä käytettiin dynaamista ohjelmointia.

Vanchinathan *et al.* (Vanchinathan ja Krishnagopalan 1987) käyttivät keittolipeäanalyysointia peruslakeihin pohjautuvan mallin kertoimien reaaliaikaiseen päivitykseen. Työssä bulkki- ja jäännösdelineointivaiheet mallitettiin Christensenin mallin avulla (Christensen, Smith, Albright ja Williams 1983).

Funkquist (Funkquist 1996a; Funkquist 1996b) käytti yksinkertaista keiton kemian osittaisdifferentiaaliyhtälömallia. Malli muunnettiin tilaesitysmuotoon, jonka kertoimet määritettiin käyttäen prosessista saatavilla olevia mittauksia.

Osa II

Kokeellinen osa

Luku 7

Keittimen toiminta

Lähtökohtana koko työlle oli se että, etsittiin syitä massan kappaluvun vaihtelulle keittimessä. Laadun vaihtelu oli suurinta, kun keittimessä ilmeni sen ajettavuutta vaikeuttavia ongelmia. Tässä luvussa paneudutaan näihin tilanteisiin ja tarkastellaan vikatilannetta indikoivia mittaussuureita.

7.1 Keittimen teoreettinen malli

Keittimelle muodostettiin yhteistyössä Ahlström Machinery Oy:n kanssa ns. Härkösen malli (Härkönen 1984; Härkönen 1987). Sen avulla voidaan laskea mm. seuraavat suureet, kun keittimen geometria, sihtien koot ja paikat, virtausmäärät ja -lämpötilat keittimeen/keittimestä, kappaluku, saanto, eräät hakkeen ominaisuudet ja hake- ja lipeäpintojen korkeuksien erotus tunnetaan:

- hakkeen ja lipeän lämpötilajakaumat,
- hakepalasten varaama tilavuus keittimen kokonaistilavuudesta keittimen eri osissa (*chip fraction*) ja
- hakkeen ja lipeän virtausnopeudet keittimessä.

Mallia muodostettaessa käytettiin mm. seuraavia parametriarvoja:

- kappaluku (puskussa) 32,
- saanto 47 % ja
- hake- ja lipeäpintojen erotus 2,5 m.

Muut mallin arvot kerättiin keittimen piirustuksista ja mittaustiedoista. Malli kuvaa keittimen tilaa tuotantonopeudella hieman yli 950 ADt/vrk.

Kuvassa 7.1 on esitetty nesteen ja hakepalasten kussakin keittimen osassa varaamien tilavuuksien suhde mallin mukaan. Hake on erittäin tiiviisti pakkautunut alapaisuntasihtien kohdalla: hakepalasten keittimestä varaama tilavuus ko. kohdassa on hyvin suuri, jopa yli 90 % keittimen kokonaistilavuudesta.

Kuvassa 7.2 on esitetty mallin avulla laskettu lämpötilajakauma, jossa lämpötilaa jonkin verran kohottava reaktiolämpö on jätetty huomiotta. Koska lämpötila on paisuntasihtien jälkeen varsin korkea, keitto ei oletettavasti katkea välittömästi alapaisuntasihtien jälkeen.

Esitetty malli on todellisuuden vahva yksinkertaistus ja koostuu suuresta määrästä erilaisia parametrejä, joita ei pystytä täydellä varmuudella määrittämään. Tästä huolimatta on ilmeistä, että tulos on oikean suuntainen eli keitin on nykyisillä tuotantonopeuksilla varsin häiriöaltis.

7.2 Häiriötilanteet

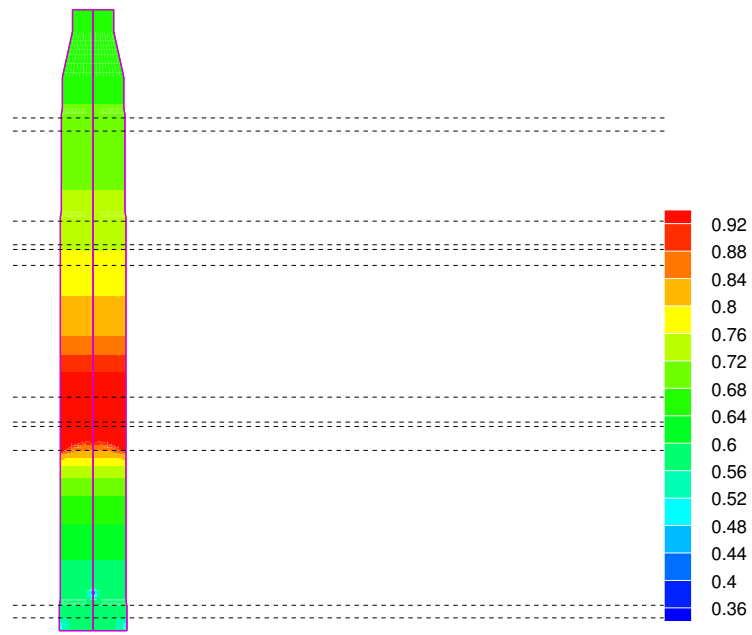
Malli vahvisti epäilyn, että keittimessä voi esiintyä ongelmia hakepatsaan liikkumisessa. Patsaan kulku saattaa hidastua tai jopa pysähtyä kokonaan, jolloin keittynyttä haketta ei poistu keittimestä sisään tulevaa haketta vastaava määrä.

Ongelman ydin on hakepatsaan pakkautumisasteen muutos keittimen alapaisuntasihtien kohdalla. Mikäli patsaasta muodostuu sihtien kohdalla liian tiivis, ylöspäin virtaava pesulipeä ei pysty kunnolla läpäisemään sitä. Pesulipeä alkaa kannatella hakepatsasta, ja sen kulku alaspäin hidastuu. Koska lipeä ei läpäise kunnolla hakepatsasta, hake ei jäähdy kunnolla ja keittyminen pääsee jatkumaan liian pitkään. Tällöin hake keittyy liian pehmeäksi.

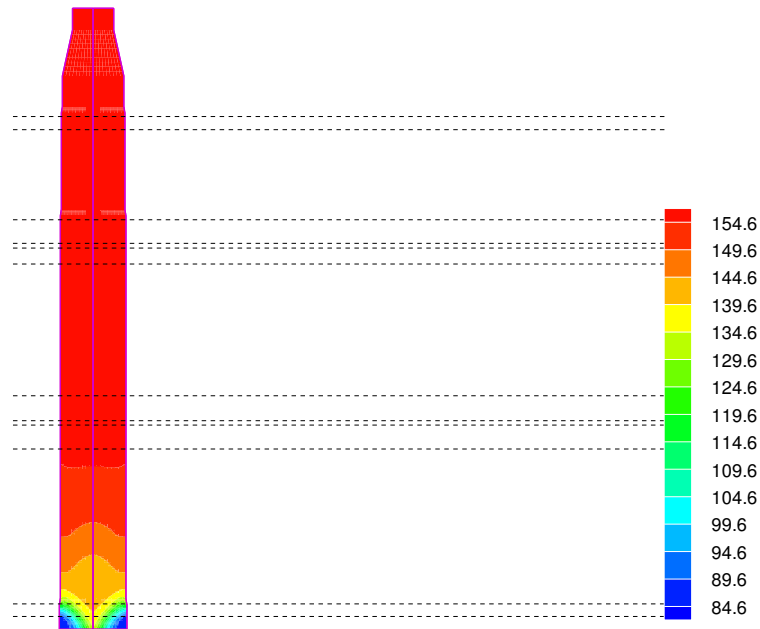
7.2.1 Häiriötilanteen syntyyn vaikuttavat tekijät

On oletettavaa, että pakkautumisen muutos, joka aiheuttaa ongelmatilanteen syntyä, johtuu seuraavista tekijöistä.

- *Hakkeen palakoko.* Mitä pienempi hakkeen palakoko on, sitä tiiviimmin hake pääsee pakkautumaan. Tiiviimpi pakkautuminen aiheuttaa suuremman virtausvastuksen pesulipeälle.
- *Keittymisaste.* Mikäli hake on keittynyt liian pitkälle alapaisuntasihtien kohdalla, se pehmeämpänä ja kokoonpuristuvampana pakkautuu normaalisti keittynyttä tiiviimmin. Myös palakoko vaikuttaa hakkeen keittymiseen: mitä ohuempia hakepalat ovat, sitä tehokkaammin ne keittyvät.
- *Neste-puu -suhde keittimessä.* Mitä pienempi neste-puu -suhde on eli mitä vähemmän nestettä hakkeen määrään nähden keittimeen syötetään, sitä helpommin ajaudutaan häiriötilanteeseen.



Kuva 7.1: Hakepalasten täyttämä osuus keittimen kokonaistilavuudesta keittimen eri osissa (1 = hake täyttää yksin koko tilavuuden). Katkoviivat osoittavat sihtien paikkoja keittimessä.



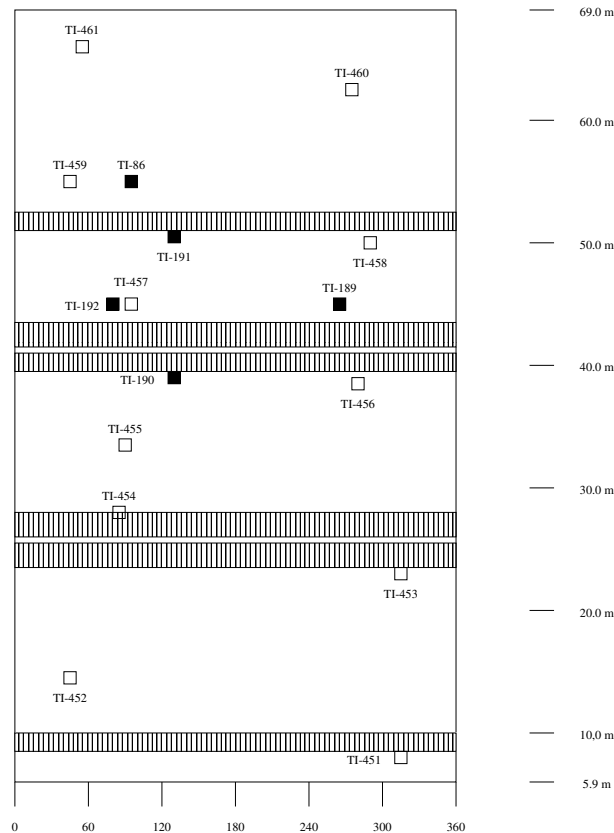
Kuva 7.2: Hakkeen lämpötilaprofili keittimessä ($^{\circ}\text{C}$), kun reaktiolämpö on jätetty huomiotta. Katkoviivat osoittavat sihtien paikkoja keittimessä.

Vikatilanteen synnyn ennakointi on vaikeaa, koska palakoosta ja hakkeen keittymisasteesta keiton aikana ei ole käytettävissä jatkuvatoimisia mittauksia.

7.2.2 Häiriötilanneindikaattorit

Anodisen suojauksen lämpötilamittaukset. Ensimmäinen ajatus hakepat-saan kulun seuraamiseksi ja häiriön tunnistamiseksi oli käyttää keittimen anodisen korroosiosuojauksen (SITRA 1986) yhteydessä keittimeen asennettuja kylkilämpömittareita, joita on keittimessä 11 kappaletta. Kuvassa 7.3 on esitetty sekä anodisen suojauksen että keittimen alkuperäisten anturien sijainnit.

Ideana oli laskea pareittain keittimessä kahden toisiaan pystysuunnassa lähellä olevan lämpötilamittauksen välinen korrelaatio, ja määrätä sen avulla ko. mittauspisteiden välinen viive. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, koska keittimen lämpötila höyrytilasta alapaisuntaan vaihtelee erittäin vähän. Lisäksi lipeä ja hake liikkuvat keittimessä alaspäin varsin hitaasti, jolloin vähäisetkin lämpötilavaihtelut tasoittuvat lämmön johtumisen vuoksi.



Kuva 7.3: Lämpötilan kylkimittausten sijainnit keittimessä. Anodisen suojauksen lämpötilamittaukset on merkitty avoimin, keittimen alkuperäiset mittaukset suljetuin neliöin.

Muut mittaukset. Tämän jälkeen siirryttiin tarkastelemaan keittimen muita mittauksia. Seuraavassa on esitetty tärkeimmät vikatilanteessa tapahtuvat muutokset keittimen toiminnassa ja se, miten ne mittauksissa näkyvät.

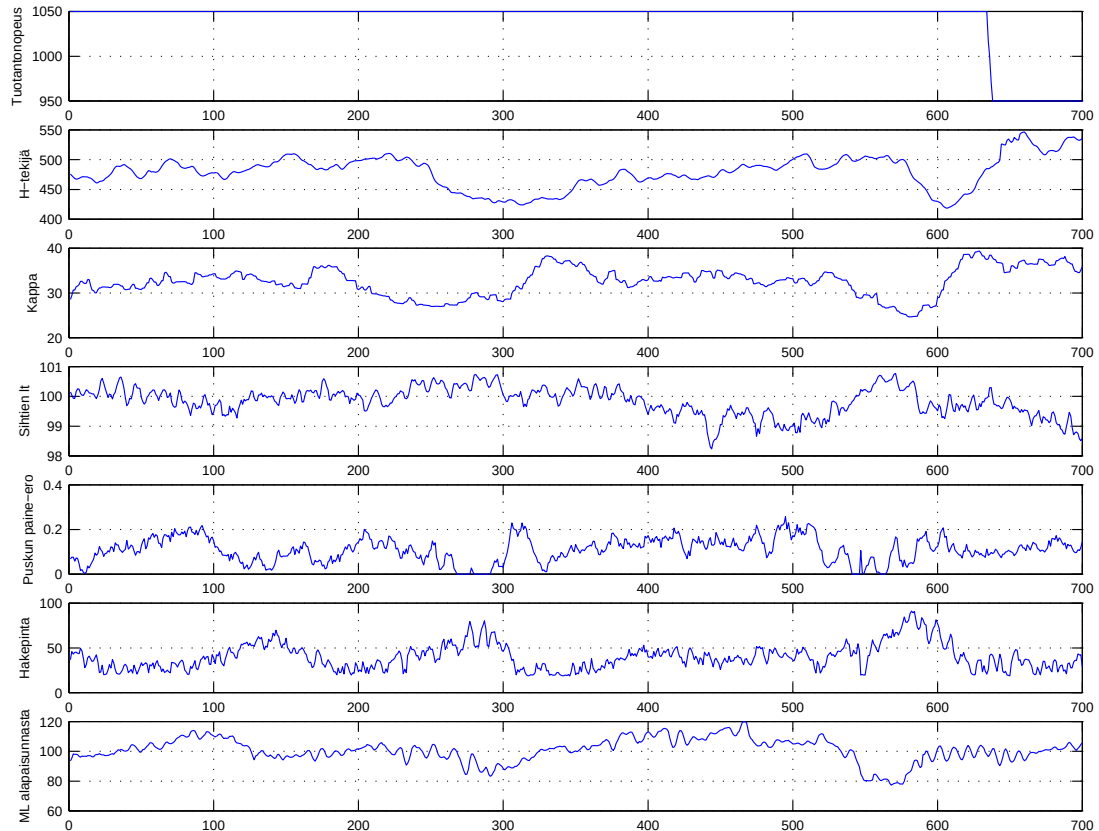
- *Puskun sakeus pienenee.* Hake ei tule ulos keittimestä, jolloin lipeän suhteellinen osuus puskuvirtauksesta kasvaa. Työssä sakeuden mittarina käytetään sakeuden kanssa vahvasti korreloivaa keittimen pohjan ja puskuputken välillä tehtävää paine-eron mittausta.
- *Keitto ei lopu alemman paisuntasihdin kohdalla.* Mikäli näin tapahtuu, keittimen alemman paisuntasihdin lämpötila voi olla ylempää sihtiä korkeampi. Keiton jatkuessa sihtivyöhykkeen yli lämpötila nousee vapautuvan reaktiolämmön ansiosta.
- *Pesuliipeä ei läpäise kunnolla alaspäin valuvaa hakepatsasta.* Osan pesuliipeästä tulisi poistua keittimestä alempien paisuntasihtien kautta. Häiriötilanteessa pesuliipeä ei poistu kunnolla paisuntasihtien, vaan pesusihtien ja puskuputken kautta.
- *Keittimen hakepinta nousee.* Tämä johtuu samasta syystä kuin puskun sakeuden pieneneminen eli siitä, että hake ei poistu kunnolla keittimestä. Pinta nousee, koska hakesyöttö pysyy vakiona.
- *Kappaluku pienenee eli massa tulee pehmeämmäksi.* Tämä voi johtua kahdesta syystä. (1) Häiriön johdosta hakkeen viipymäaika keitossa pitenee, ja keittimen viiveet vakioiksi olettava H-tekijään perustuva keittimen kappaluvun takaisinkytketty säätö ei kunnolla toimi. (2) Keitto jatkuu liian pitkälle, mitä em. H-tekijälaskenta ei osaa ottaa huomioon.

Valmet Automaation häiriöntunnistin. Valmet Automaatio rakensi vuonna 1997 keittimeen sumeaa logiikkaan pohjautuvan hakepatsaan kulun häiriöntunnistimen osaksi keittämön ohjauksessa käytettävää Damatic XD -järjestelmää (Puranen 1997). Häiriön tunnistus tapahtuu seuraavien mittaussuureiden perusteella: lipeäpinnan korkeus, hakepinnan korkeus, puskun sakeus, kappaluku ja alapaisunnan yläsihdin paine-ero keittimen ja lipeän poistoputken välillä.

7.2.3 Esimerkki häiriötilanteesta

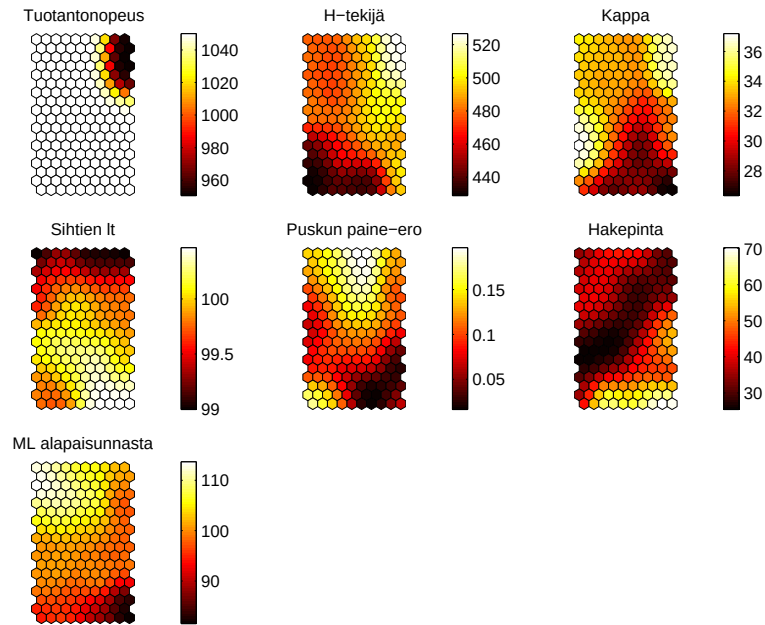
Keittimen häiriötilanteesta on esimerkki kuvassa 7.4. Kuvan muuttuja ”sihtien lt” kuvaa sitä, montako prosenttia alemman alapaisuntasihdin lämpötila on ylemmän alapaisuntasihdin lämpötilasta; yli 100 % lukema merkitsee siis sitä, että keitto jatkuu sihtien yli.

Kukin kuvaajien piste kuvaa yhtä 10 minuutin keskiarvoa eli käyrät kuvaavat keittimen käytöstä noin viiden vuorokauden aikana. Signaaleista voidaan havaita, että keitin on pahassa häiriötilassa ajanhetkinä 250–350 ja 500–600. Jälkimmäinen häiriötila on niin vaikea, että keittimen saamiseksi takaisin hallintaan joudutaan sen tuotantonopeutta pudottamaan 100 ADt/vrk:lla. Edellä esitetyt häiriötilanteen tunnusmerkit ovat havaittavissa; kappaluku laskee selkeästi alle 30:n tavoitteen ollessa 32.

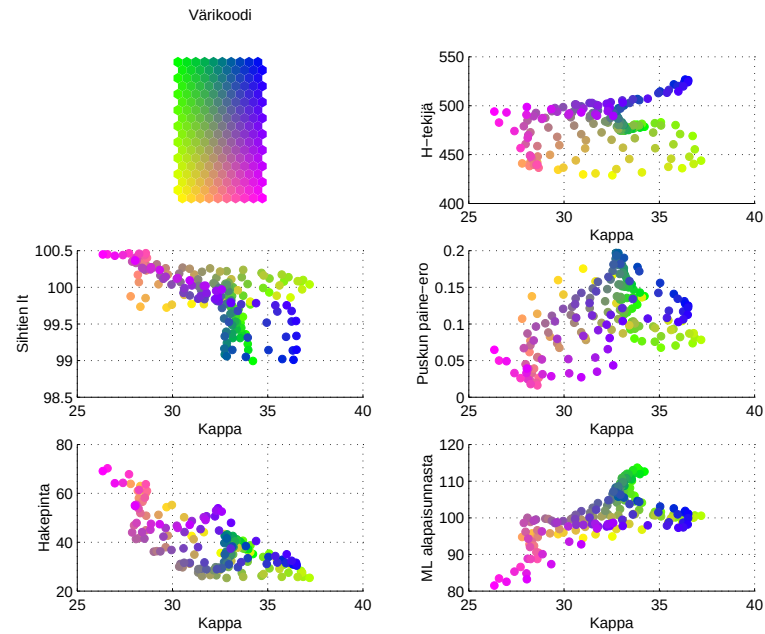


Kuva 7.4: Vikatilanne keittimessä. Signaalit ylhäältä alas lukien ovat tuotantonopeus (ADt/vrk), H-tekijä, kappaluku, sihtien lämpötilaero (%), pusken paine-ero (bar), hakepinta (%) ja mustalipeävirtaus alapaaisunnasta paisuntasykloneille (l/s).

Kuvassa 7.5 on häiriötilan signaalit esitetty SOM:n avulla. Ongelmatilanteet kuvautuvat kartan oikeaan alakulmaan. Kuvassa 7.6 on kuvan 7.5 SOM värjätty jatkuvalla värikoodauksella, jolloin ongelmatilannetta kuvaavat pisteet ovat violetteja. Kuvan 7.6 viidessä erillisessä kuvaajassa on tarkasteltu kappaluvun ja muiden muuttujien välisiä riippuvuuksia. Ongelmatilanteissa kappaluku riippuu lähes lineaarisesti kolmesta tekijästä: sihtien lämpötilat, hakepinta ja mustalipeän virtaus alapaaisunnasta paisuntasykloneihin.



Kuva 7.5: Vikatilanne keittimessä. Kuvan 7.4 signaalit havainnollistettuna SOM:n avulla.



Kuva 7.6: Kuvan 7.5 SOM:n värikoodaus ja viisi erillistä xy-kuvaajaa. Kaikkien kuvaajien vaaka-akseleilla on kappaluku ja pystyakseleilla muuttujat H-tekijä, sihtien lämpötilat, puskun paine-ero, hakepinta ja mustalipeävirtaus paisuntasihdeiltä.

7.2.4 Parannusehdotuksia

- *Hakkeen palakoko*. Palakokoon voidaan vaikuttaa käytännössä varsin vähän.

- *Keittymisaste.* Keittimen toimintaa jonkin verran helpottava ratkaisu saataisi olla keittimeen syötettävän hake-lipeä -seoksen nykyistä parempi keittymisasteen ja lämpötilan hallinta. Näin voitaisiin ehkäistä se, että hake ei keity liian pehmeäksi ja näin ollen ei myöskään pakkaudu yhtä tiiviisti.

Työn loppuosa keskittyy sen analysointiin, mitä on tehtävissä ennen hakkeen syöttämistä keittimeen, jotta keitto olisi nykyistä tasaisempi ja sen ongelmia voitaisiin vähentää.

- *Neste-puu -suhde.* Neste-puu -suhde pysyy yleensä hyvin hallinnassa keittimen automaatiojärjestelmän ansiosta lukuun ottamatta joitakin tilapäisiä häiriöitä.
- *Hake- ja lipeäpintojen erotus.* Mallin laskennassa oletettiin pintojen erotuksen olevan 2.5 m. Erotusta pienentämällä voitaisiin helpottaa tilannetta jonkin verran.
- *Nesteen ja hakkeen tilavuuksien suhde alapaisuntasihtien kohdalla.* Ongelmaa merkittävästi helpottavin ratkaisu olisi keittimen virtauksien uudelleenjärjestely niin, että lipeää otettaisiin ulos keittimestä alapaisuntasihtien kohdalla nykyistä selkeästi vähemmän. Tällöin massa ei olisi liian sakeaa sihtien kohdalla. Tässä tapauksessa tarvitsisi myös määrittää uudelleen järkevät valkolipeän syöttökohdat ja annokset keittoon.

Reunaehdot modifikaatiolle asettavat keittimen aine- ja lämpötaseet. Esimerkiksi mustalipeää ei voida poistaa keittimestä haihduttamolle tasoituskierto- tai yläpaisuntasihtien kautta, koska tällöin keittokemikaalihäviö olisi liian suuri.

Luku 8

Hakkeen ominaisuudet ja keittoa edeltävä käsittely

Kuten edellä todettiin, keittimeen syötettävän hakkeen homogenisointi on yksi tapa parantaa keittimen hallittavuutta. Tässä luvussa käydään läpi hakkeen käsittely ennen keittoa, ja esitetään laskentamahdollisuuksia prosessin toiminnan analysoimiseksi. Käytetyimmät vakioarvot on lueteltu taulukossa 8.1.

Taulukko 8.1: Laskennoissa käytetyt vakioarvot.

	ominaislämpökapasiteetti kJ/(kg°C)	tiheys kg/dm ³
abs. kuiva puu	1.53	0.67
vesi	4.19	1.00
mustalipeä	3.76	1.05
valkolipeä	3.77	1.15

8.1 Hakkeen ominaisuudet

Jatkuvatoimiset hakemittaukset. Esihöyrystyssiilon purkausruuvissa on hakkeen kosteus- ja tiheysmittarit. Mittarit on asennettu niin äskettäin, että tämän työn kokeissa niiden mittauksia ei ole voitu käyttää hyväksi. Tällöin on oletettu kosteuden olevan 50 % ja hakkeen irtotiheyden 300 kg/dm³, jotka ovat mittarien keskiarvot koko tähänastiselta käyttöajaltaan.

Hakesyöttö prosessiin laskettiin kaikissa kokeissa kaavalla

$$q_{\text{hake}} = \rho_{\text{hake}} V_{\text{ruuvi}} n_{\text{ruuvi}}, \quad (8.1)$$

missä ρ_{hake} on hakkeen irtotiheys, V_{ruuvi} on hakeruuvin kierrostilavuus (0.52 m³/r) ja n_{ruuvi} on ruuvin kierrosnopeus (r/s). Ruuvin täyttöasteeksi oletetaan 100 %.

Kokeellinen hakkeen ominaisuuksien määrittäminen. Tehtaalla tehtiin 17. – 18. 11. 1997 hakkeen laadun määrittämiseksi kolme koetta. Kokeiden näytteet otettiin keittoon syötettävästä hakkeesta.

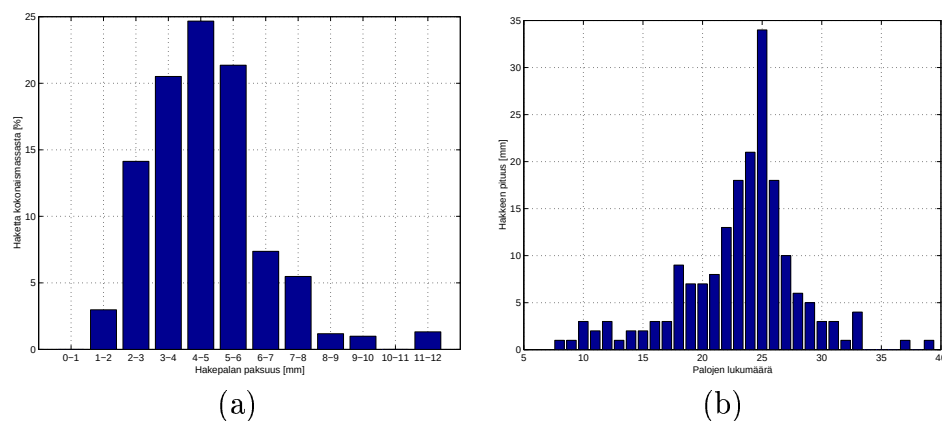
Kunkin näytteen hakkeella täytettiin 100 l astia. Astiassa oleva hake punnittiin. Astiaa täristettiin 10 minuutin ajan, jonka jälkeen laskettiin hakkeen tilavuus astiassa. Jakamalla hakkeen massa tällä tilavuudella saatiin hakkeen irtotiheys.

Hakkeesta määritettiin myös kuiva-aine, pituus- ja paksuusjakaumat ja seulontatulokset. Kokeiden tulokset ovat taulukossa 8.2.

Taulukko 8.2: Hakeanalyysien tulokset. Näytteen 2 jakaumatulokset puuttuvat, koska sen pituus- ja paksuusnäyte sekoittuivat vahingossa toisen näytteen kanssa. Kokojakauma-analyysia ei voitu siis tehdä.

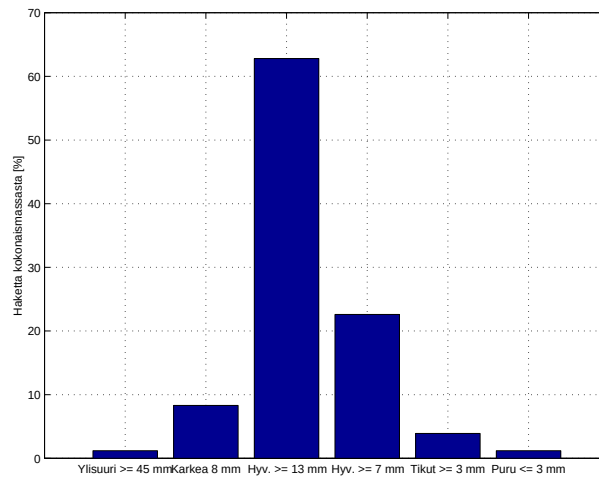
näyte n:o	irtotiheys i-m^3	kuiva-aine %	keskipituus mm	keskipaksuus mm
1	377.2	47.8	23.2	4.6
2	380.6	44.0		
3	376.6	46.8	23.0	5.1

Kaksi kokonaan suoritettua koetta olivat tuloksiltaan hyvin samankaltaiset. Näytteen 1 hakepalojen paksuus- ja pituusjakaumat on esitetty kuvissa 8.1 (a) ja (b). Seulontatulokset on kuvassa 8.2.



Kuva 8.1: Hakkeen (a) paksuus- ja (b) pituusjakauma.

Jakaumat vaikuttivat hyviltä: keskimääräiset palakoot ovat varsin lähellä jatkuvatoimiseen sulfaattikeittoon hyvinä pidettyjä 4 mm:n paksuutta ja 25 mm:n pituutta.



Kuva 8.2: Hakkeen seulontatulos.

8.2 Esihöyrystys ja pasutus

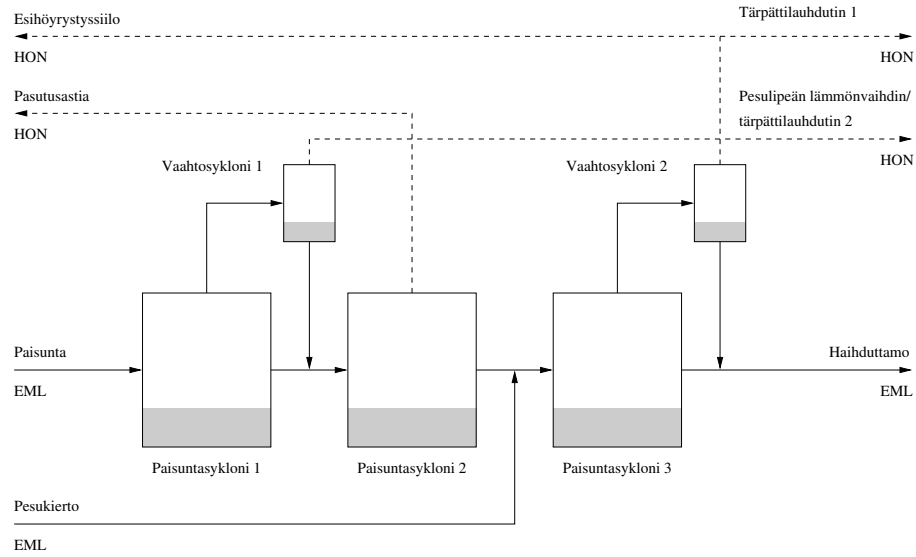
Pasutushöngät

Hakkeen lämmitykseen ja ilman poistoon hakkeesta käytetään matalapainehöyryä ja paisuntahönkiä. Höyrystä on määrä- ja lämpötilamittaukset, mutta höngistä niitä ei ole. Tässä esitetään karkea tapa laskea hönkien määrät ja lämpötilat.

Kuvassa 8.3 on esitetty paisuntasyklonien virtaukset normaalissa ajotilanteessa. Paisuntalipeän lisäksi paisuntasykloni 3:een tulee mustalipeävirtaus keittimen pesulipeäkierrosta. Laskennoissa tehdään seuraavat oletukset:

- paisuntasyklonissa 1 on kylläistä höyryä, joka oletetaan ominaisuuksiltaan vesihöyryksi sen lämpötila/paine -riippuvuuden laskennassa
- vaahtosykloneissa tiivistyvän mustalipeän määrä on häviävän pieni
- mustalipeä on ominaisuuksiltaan vakio: höyrystymislämpö ja ominaislämpökapasiteetti ovat (Virkola 1983b)
 - paisuntasykloni 1:ssä 2144 kJ/kg ja 3.79 kJ/(kg°C),
 - paisuntasykloni 2:ssa 2202 kJ/kg ja 3.78 kJ/(kg°C) ja
 - paisuntasykloni 3:ssa 2258 kJ/kg ja 3.76 kJ/(kg°C)
- kaikki mustalipeän luovuttama energia kuluu höyrystymiseen.

Paisuntasykloni 1. Syklonista tunnetaan paine p_{ps1} . Mustalipeästä tiedetään virtaus q_{em11} ja lämpötila t_{em11} . Syklonin lämpötila t_{ps1} saadaan kylläisen vesihöyrin tunnetun paine-lämpötila -riippuvuuden avulla (kuva 8.4). Höyrystyvä mus-



Kuva 8.3: Syklonien virtaukset.

talipeämäärä q_{hon1} saadaan, kun lämpötilan muutos syklonin syötöstä ulostuloon tunnetaan:

$$q_{hon1} = \frac{c_{eml1} q_{eml1} (t_{eml1} - t_{ps1})}{r_{ps1}}. \quad (8.2)$$

Virtaus paisuntasykloni 2:een saadaan, kun vähennetään höyrystynyt mustalipeä paisunnasta tulevasta virtauksesta.

$$q_{eml2} = q_{eml1} - q_{hon1} \quad (8.3)$$

Paisuntasykloni 3. Koska paisuntasykloni 2:n lämpötilaa ei voida suoraan määrätä, tarkastellaan ensin paisuntasyklonia 3. Syklonissa höyrystyvän mustalipeän määrä voidaan laskea esihöyrystys-siilon lämpötaseen avulla. Esihöyrystys-siilon lämmitykseen tarvitaan höyryä

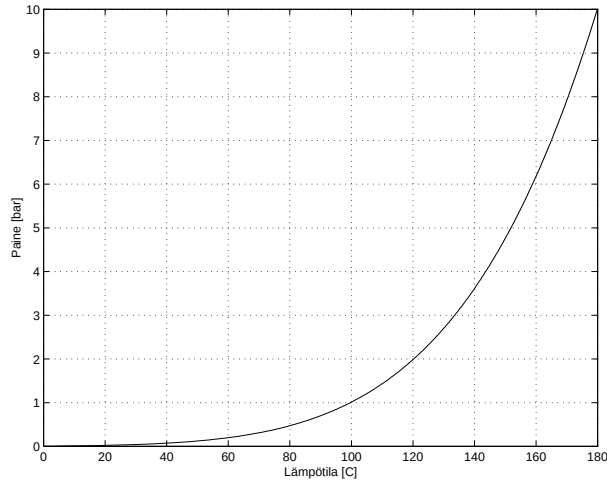
$$q_{hoyry}^{esih} = \frac{(c_{puu} q_{puu} + c_{vesi} q_{vesi}) \Delta t_{siilo}}{h_{hoyry} - h_{lauhde}}. \quad (8.4)$$

Matalapainehöyryn ja paisuntahöngien entalpioiden (h_{hoyry}) oletetaan molempien olevan 2700 kJ/kg. Lauhteiden entalpiat (h_{lauhde}) oletetaan 335 kJ/kg:ksi.

Kun oletetaan, että paisuntasykloni 3:n höngistä 75 % syötetään esihöyrystys-siiloon, saadaan syklonissa höyrystyvän mustalipeän määräksi

$$q_{hon3} = (q_{hoyry} - q_{hmp})/0.75, \quad (8.5)$$

missä q_{hmp} on esihöyrystys-siiloon syötettävän matalapainehöyryn määrä.



Kuva 8.4: Kylläisen vesihöyryn paine lämpötilan funktiona.

Mustalipeän lämpötila ennen paisuntasyklonia 3 on

$$t_{\text{eml}3'} = t_{\text{ps}3} + \frac{r_{\text{ps}3} q_{\text{hon}3}}{c_{\text{eml}3} q_{\text{eml}3'}}. \quad (8.6)$$

Yhtälössä kaikki muut ovat tunnettuja paitsi $q_{\text{eml}3'}$, joka on itse asiassa

$$q_{\text{eml}3'} = q_{\text{eml}3} + q_{\text{pesu}} = q_{\text{eml}2} + q_{\text{pesu}} + q_{\text{hon}2}. \quad (8.7)$$

Myös tässä yhtälössä on yksi tuntematon, paisuntasyklonissa 2 höyrystyvä lipeämäärä $q_{\text{hon}2}$. Sen suuruudeksi arvioidaan laskennassa 3 kg/s.

Paisuntasykloni 2. Mustalipeävirtaus paisuntasykloni 3:een, ja sen lämpötila tunnetaan. Kun virtauksesta vähennetään pesukierron lipeävirtauksen aiheuttama lämpötilan nousu, saadaan paisuntasykloni 2:n lämpötilaksi

$$t_{\text{ps}2} = t_{\text{eml}3'} - \frac{q_{\text{pesu}} t_{\text{pesu}}}{q_{\text{eml}3'} - q_{\text{pesu}}}. \quad (8.8)$$

Lopulta saadaan paisuntasykloni 2:ssa höyrystyvän mustalipeän määrä

$$q_{\text{hon}2} = \frac{c_{\text{eml}2} q_{\text{eml}1} (t_{\text{ps}1} - t_{\text{ps}2})}{r_{\text{eml}2}}. \quad (8.9)$$

Esihöyrystyksessä ja pasutuksessa kuluva höyry

Hakkeen höyrykäsittelyssä kuluva tuorehöyry ja höngät voidaan karkeasti laskea, kun oletetaan, että

- kaikki esihöyrystysiloon syötettävä höyry tiivistyy hakkeeseen eli sitä ei pääse poistumaan siilosta,
- keittimestä ja mustalipeän pintasäiliöstä pasutusastiaan johdettavien hönkien määrä on häviävän pieni ja
- pasutusastiasta poistuva höyry on lähes kokonaan joko tuorehöyryä tai höntkiä.

Höyrykäsittelyn höyrynkulutus saadaan kaavalla

$$q_{\text{höyry}}^{\text{kulutus}} = q_{\text{hon2}} + 0.75q_{\text{hon3}} + q_{\text{hmp}} - q_{\text{ulos}}, \quad (8.10)$$

missä q_{hon2} ja q_{hon3} ovat edellä laskettujen paisuntasyklonien 2 ja 3 hönkien määrät, q_{hmp} on esihöyrystysiloon ja pasutusastiaan johdettavan matalapainehöyryn kokonaismäärä ja q_{ulos} on pasutusastiasta tärpättilauhduttimelle johdettavien hönkien määrä. Kerroin 0.75 on peräisin oletuksesta, että 75 % paisuntasykloni 3:n höngistä johdetaan esihöyrystysiloon.

8.3 Imeytys

Imeytystä karakterisoi kolme keskeistä tekijää: imeytysaika, imeytystornin lämpötila ja alkalikulutus.

Seuraavissa laskuissa jätetään imeytystornin noin 30 minuutin viive yksinkertaisuuden vuoksi huomiotta. Laskuissa tehtävä virhe on erittäin pieni, koska mittauksen autokorrelaatio on voimakas.

Imeytysaika. Imeytysaika riippuu lähinnä tuotantonopeudesta. Koska yleensä keitintä ajetaan tuotantonopeuksilla 900–1050 ADt/vrk, aika on lähes vakio. Viive voidaan haluttaessa karkeasti laskea, kun tunnetaan torniin syötettävien aineiden määrä ja tornin koko V_{imp} , joka on 287 m³..

$$t_{\text{imeytys}} = \frac{V_{\text{imp}}}{\frac{q_{\text{eml}}^{\text{taytto}}}{\rho_{\text{eml}}} + \frac{q_{\text{eva}}}{\rho_{\text{eva}}} + \frac{q_{\text{puu}}}{\rho_{\text{puu}}} + \frac{q_{\text{vesi}}}{\rho_{\text{vesi}}}}. \quad (8.11)$$

Imeytystornin lämpötila. Imeytystornin lämpötilaan vaikuttavat useiden aineiden virtaukset ja lämpötilat: pohjalaimennus, valkolipeä, mustalipeä, hake ja siihen sitoutunut vesi. Lisäksi lämpötilaan vaikuttaa puun ja keittokemikaalien välisten reaktioiden reaktiolämpö.

Imeytystornin hakepinnan korkeutta pidetään vakiona kahdella eri säädöllä: tarvittaessa muutetaan ensin pohjakaavarin pyörimisnopeutta ja mikäli tämä ei riitä, muutetaan lisäksi pohjalaimennusvirtausta (Poranen 1996). Koska virtaus on suurin ja lämpimin, vaikuttaa se muuttuessaan merkittävästi koko tornin lämpötilaan.

Lämpövirta torniin on

$$\Phi_{\text{imp}} = \Phi_{\text{eml}}^{\text{taytto}} + \Phi_{\text{eml}}^{\text{laim}} + \Phi_{\text{eva}} + \Phi_{\text{puu}} + \Phi_{\text{vesi}}. \quad (8.12)$$

Yhtälön 8.12 avulla voidaan laskennallisesti määrätä lämpötila tornin alaosassa, jos siinä oletetaan tapahtuvan ideaalinen aineiden sekoittuminen ja lämpöpohäviöt jätetään huomiotta:

$$T_{\text{imp}}^{\text{lask}} = \frac{c_{\text{eml}}(q_{\text{eml}}^{\text{taytto}} T_{\text{eml}}^{\text{taytto}} + q_{\text{eml}}^{\text{laim}} T_{\text{eml}}^{\text{laim}}) + c_{\text{eva}} q_{\text{eva}} T_{\text{eva}} + c_{\text{puu}} q_{\text{puu}} T_{\text{puu}} + c_{\text{vesi}} q_{\text{vesi}} T_{\text{vesi}}}{c_{\text{eml}}(q_{\text{emu}}^{\text{taytto}} + q_{\text{emu}}^{\text{laim}}) + c_{\text{eva}} q_{\text{eva}} + c_{\text{puu}} q_{\text{puu}} + c_{\text{vesi}} q_{\text{vesi}}}. \quad (8.13)$$

Vähentämällä laskennallinen lämpötilaa todellisesta voidaan laskea puun ja keittokemikaalien välisten eksotermisten reaktioiden aiheuttama tornin lämpötilan nousu

$$\Delta T_{\text{imp}} = T_{\text{imp}}^{\text{tod}} - T_{\text{imp}}^{\text{lask}}. \quad (8.14)$$

Imeytystornin alkalikulutus. Imeytystornin alkalikulutus riippuu pääosin kahdesta tekijästä: torniin syötettävän alkalin määrästä ja tornin lämpötilasta. Alkalin määrä vaikuttaa alkalikonsentraatioon ja lämpötila diffuusiokertoimeen, jotka ovat molemmat diffuusion nopeuteen vaikuttavia tekijöitä.

Torniin syötettävän alkalin määrä on

$$q_{\text{alkali}}^{\text{syotto}} = c_{\text{eml}} q_{\text{eml}}^{\text{taytto}} + c_{\text{eva}} q_{\text{eva}}, \quad (8.15)$$

jolloin konsentraatio syötössä on

$$c_{\text{alkali}}^{\text{syotto}} = \frac{q_{\text{alkali}}^{\text{syotto}}}{\rho_{\text{emu}} q_{\text{eml}}^{\text{taytto}} + \rho_{\text{eva}} q_{\text{eva}} + \rho_{\text{vesi}} q_{\text{vesi}}} \quad (8.16)$$

Syötön alkalikonsentraatiota tornin alaosassa olevaan konsentraatiomittaukseen vertaamalla voidaan laskea alkalikonsentraation muutos tornissa:

$$\Delta c_{\text{alkali}} = c_{\text{alkali}}^{\text{syotto}} - c_{\text{alkali}}^{\text{loppu}}. \quad (8.17)$$

Laskennassa jätetään huomiotta pohjalaimennusvirtauksen aiheuttama pieni konsentraation muutos ja puun yhdisteiden liukenemisen aiheuttama nesteen määrän muutos. Myöhemmin esitettävissä laskelmissa on huomioitava, että imeytystornin jäännösalkalimittaus on putkessa, jossa kiertää vain vähän lipeää. Mittari soveltuu konsentraation vaihteluiden tarkkailuun, mutta mittauksen taso saattaa olla virheellinen.

Kun tunnetaan imeytystorniin syötettävän nesteen määrä ($\approx$ ulos tulevan nesteen määrä), voidaan laskea imeytystornin alkalikulutus:

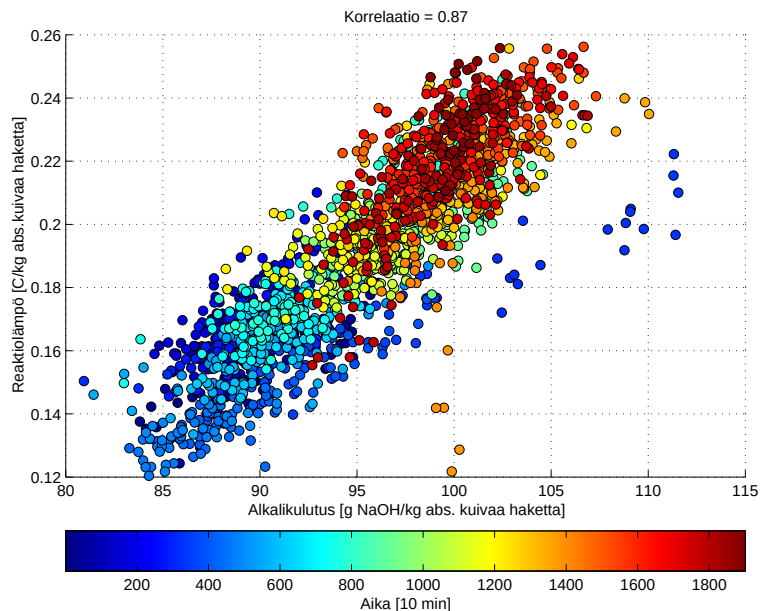
$$\Delta q_{\text{alkali}} = (q_{\text{eml}}^{\text{taytto}} / \rho_{\text{eml}} + q_{\text{eva}} / \rho_{\text{eva}} + q_{\text{vesi}} / \rho_{\text{vesi}}) \Delta c_{\text{alkali}}. \quad (8.18)$$

8.4 Laskentaesimerkkejä

8.4.1 Keittimen ajautuminen häiriötilanteeseen

Palataan luvun 7 esimerkkiin, jossa keitin ajautui häiriötilanteeseen. Esimerkissä käytettiin 700:a näytepistettä. Tarkastellaan häiriötilaan joutumista ottamalla mukaan lisäksi 1300 aiempaa pistettä ja jättämällä pois alkuperäisten aikasarjojen viimeiset 100 pistettä, koska tuolloin jouduttiin muuttamaan tuotantonopeutta ja koko linjan käytös muuttui. Tarkasteltava aineisto koostuu siis 1900:sta 10 minuutin näytteestä eli kyseessä on noin kahden viikon ajanjakso (25. 2. – 11. 3. 1998).

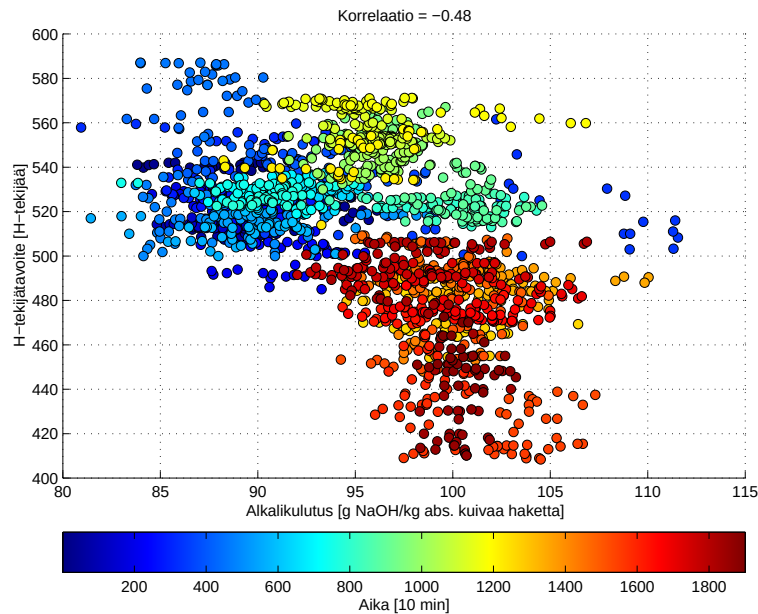
Keittimen vikatilanne ajoittuu tarkasteltavan aineiston loppuosaan. Kuvan 8.5 muuttujat kuvaavat alkalikulutusta (kaava 8.18) ja reaktiolämpöä (kaava 8.14) torniin syötettävää hakkeen kuiva-ainekilogrammaa kohden. Kuvasta ilmenee selkeästi, että alkalin kulutus kasvaa hitaasti ajan kuluessa. Alkalin kulutuksen kas-



Kuva 8.5: Imeytystornin alkalikulutus vs. vapautuva reaktiolämpö kilogrammaa abs. kuivaa haketta kohti. Ajanhetki on koodattu kuvan alla olevin värein.

vu liuottaa enemmän puun ainesosia. Hake on pehmeämmäksi keittynyttä tullessaan paisuntasihtien kohdalle, ja keitin ajautuu helpommin häiriötilaan.

Muuttunut alkalikulutus vaatii H-tekijätavoitteen pienentämistä eli höyrytilaan johdettavan höyryn määrän vähentämistä, jotta hakkeen imeytystornissa pitkälle keittyminen voidaan kompensoida. Tämä ilmenee kuvasta 8.6, jossa H-tekijätavoite korreloi negatiivisesti kasvaneen imeytystornin alkalikulutuksen kanssa.



Kuva 8.6: Imeytystornin alkalikulutus vs. H-tekijätavoite keittimessä. Ajanhetki on koodattu kuvan alla olevin värein.

Eräs mahdollinen selitys alkalikulutuksen muutokseen on vähitellen lisääntynyt höyrykäsittelyn höyrynkulutus. Kun höyrynkulutus kasvaa, hakkeeseen jää vähemmän ilmaa, mikä nopeuttaa imeytystornin reaktioita. Kuvassa 8.7 on höyrykäsittelyn höyrynkulutus imeytystornin alkalikulutuksen funktiona.

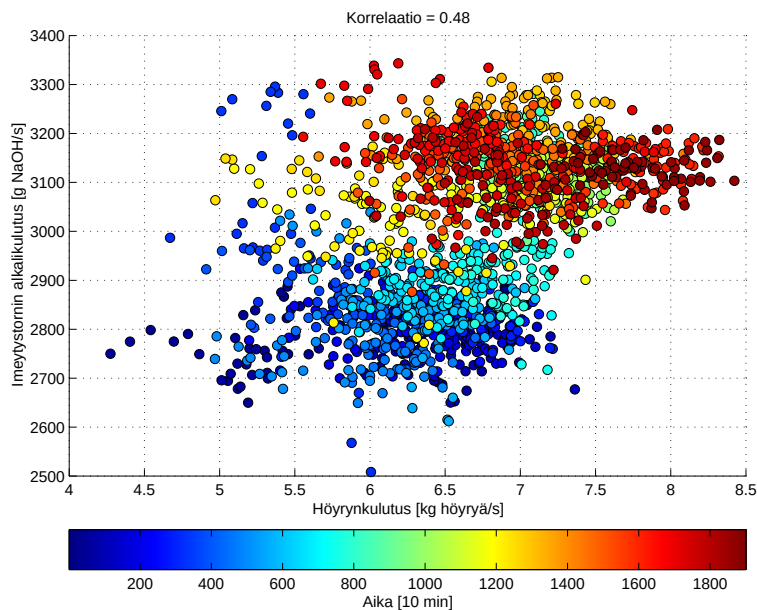
Kulutuksen lisääntyminen johtuu yksinkertaisesti siitä, että ulkoilman ja sen myötä oletettavasti myös keittämölle syötettävän hakkeen lämpötila aleni lähes koko tarkasteltavan jakson: kuvassa 8.8 on ulkoilman lämpötila tehtaalla.

8.4.2 Hakkeen laadun vaihtelu ja keittoa edeltävä käsittely

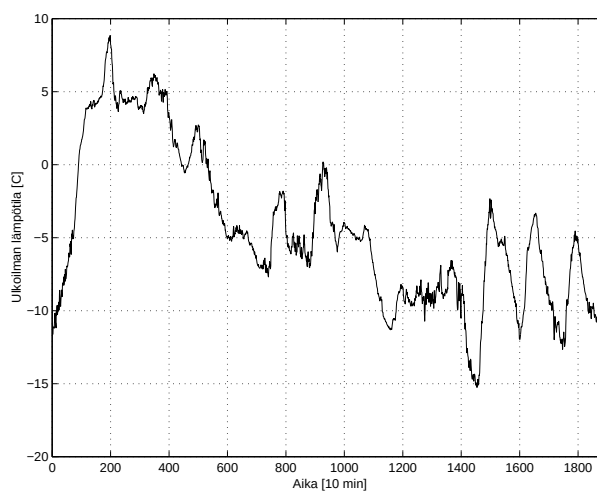
Kuvassa 8.9 on kahdeksan signaalia, jotka kuvaavat keittämön toimintaa noin 10 vuorokauden aikana 21. 11. – 2. 12. 1997. Jakso valittiin, koska tuotantonopeus oli vakio (1040 ADt/vrk) ja keittoon syötettävä hakelaatu ja höyrykäsittelyn höyrynkulutus vaihtelivat merkittävästi. Tarkasteltavan jakson jälkeen tapahtui lopulta sama asia kuin edellisessä esimerkissä, eli keitin ajautui häiriötilaan, ja tuotantonopeutta jouduttiin pienentämään.

Jakson mittaukset on viivästetty toisiinsa nähden siten, että ne kuvaavat yhden “massapalan” kulkua hakkeen syötöstä keiton loppuun. Signaalit ovat:

- *jakosuhde* suhde, jossa haketta syötetään keittämölle silloilta 1–6/7–9; 100 % merkitsee vain sillojen 7–9 käyttöä,
- *ulkoilman lt* ($^{\circ}\text{C}$),



Kuva 8.7: Höyrykäsittelyn höyrynkulutus vs. imeytystornin alkalikulutus. Ajanhetki on koodattu kuvan alla olevin värein.

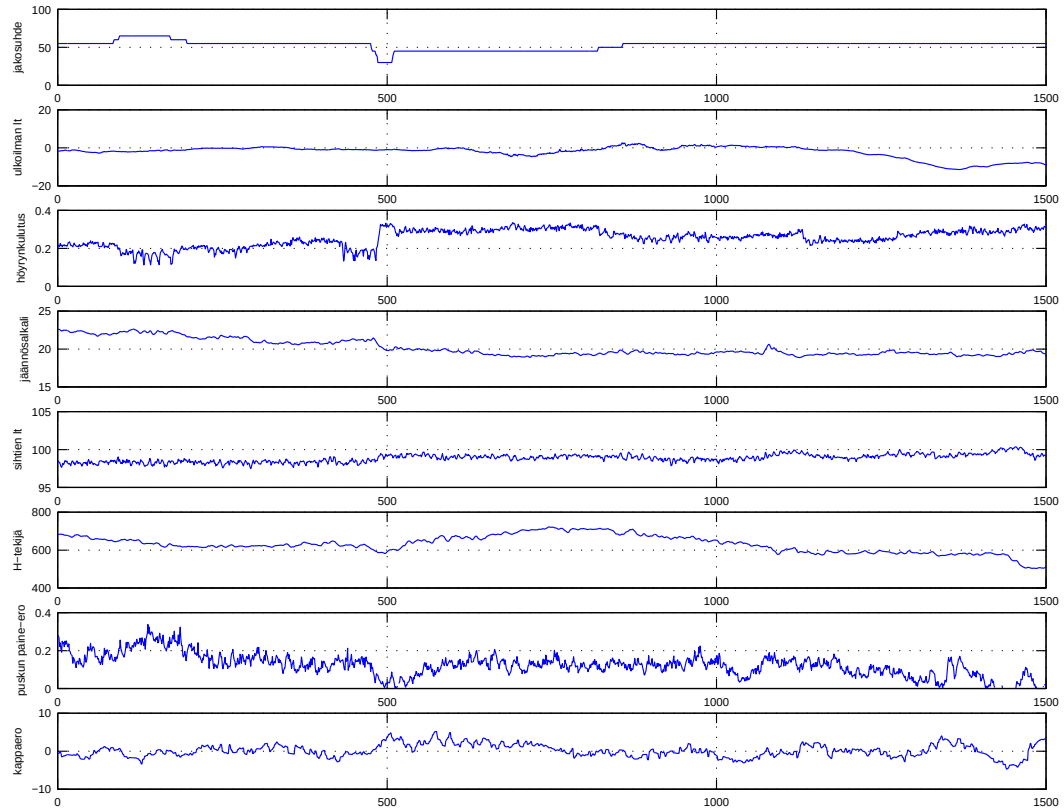


Kuva 8.8: Ulkoilman lämpötilä.

- *höyrynkulutus* esihöyrystyssiilossa ja pasutusastiassa kuluva höyry laskettuna kaavalla 8.10 (kg höyryä/kg hakkeen kuiva-ainetta),
- *jäännösalkali* keiton jäännösalkali keittimen ylemmällä alapaisuntasihdillä (g/l aktiivisena alkalina Na_2O -ekvivalenttina),
- *siehtien lt* montako prosenttia alemman alapaisuntasihdin lämpötila on

ylemmän sihdin lämpötilasta; muuttuja kuvaa alapaisuntasihdeillä tapahtuvan keiton katkaisun hyvyttä,

- *H-tekijä* keittimen H-tekijämäärä,
- *puskun paine-ero* paine-ero puskuputken ja keittimen pohjan välillä (bar); pieni arvo kuvaa keittimen häiriötilannetta,
- *kappaero* kappaluvun ja -tavoitteen (32) erotus.

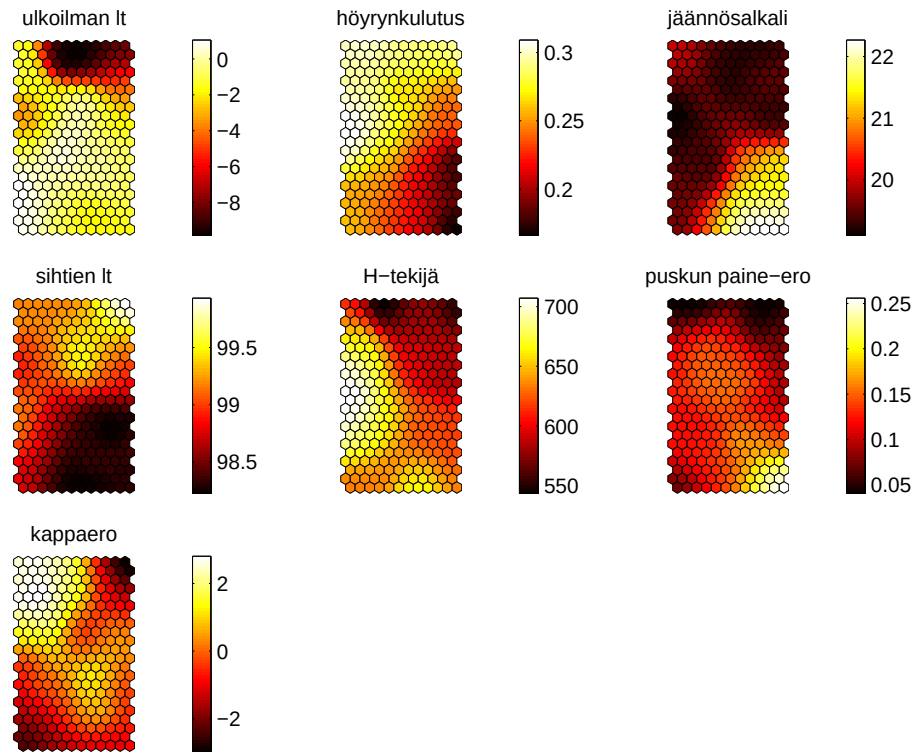


Kuva 8.9: Keittämön toimintaa kuvaavat signaalit.

Signaaleista nähdään, että ajanhetkien 500 ja 1500 tienoilla keitin on puskun paine-erosta päätellen häiriötilassa. Tilanteista edellinen vaikuttaa johtuneen jakosuhteen suuresta muutoksesta.

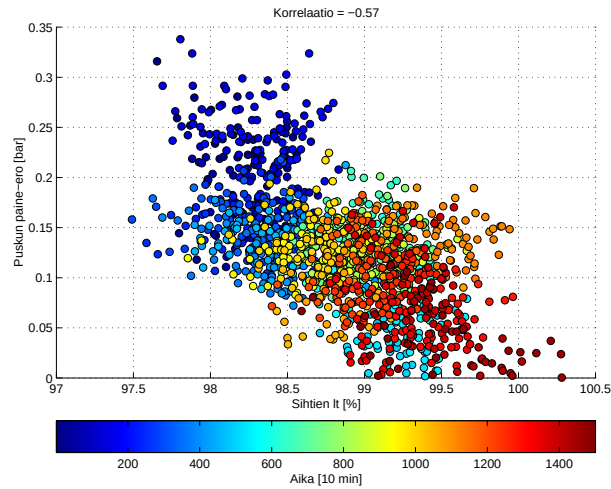
Kuvassa 8.10 on signaaleilla opetetun SOM:n komponenttitasoesitys, jonka avulla voidaan tarkastella mittauksia toisiinsa nähden. Ensimmäinen signaali eli jakosuhte on jätetty pois opetuksesta, jotta se ei vaikuttaisi häiritsevästi kartan järjestymiseen.

Mittausten perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset.

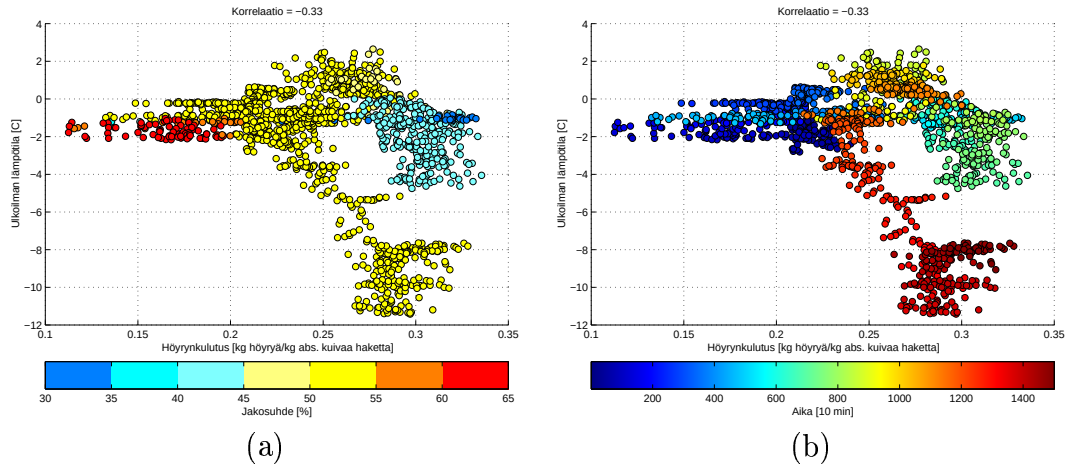


Kuva 8.10: Kuvan 8.9 signaalit ensimmäistä eli jakosuhdetta lukuun ottamatta havainnollistettuina SOM:n komponenttitasoesityksen avulla.

- Sihtien lämpötila ja paine-ero korreloivat voimakkaasti keskenään. Tämä on selvää – ovathan molemmat keittimen häiriötilan indikaattoreita. Kuvassa 8.11 on esitetty suureiden välinen riippuvuus. Ajan värikoodauksesta nähdään, että keitin ajautuu lopulta häiriötilaan.
- Kun ulkoilman – ja oletettavasti myös hakkeen – lämpötila on matala, höyrynkulutus on suuri. Kulutus vaihtelee myös jakosuhdetta muutettaessa. Mahdollisia selityksiä tähän on ainakin kaksi: siiloissa 1–6 on siiloja 7–9 viileämpää tai kosteampaa haketta (veden ominaislämpökapasiteetti on noin nelinkertainen puun vastaavaan verrattuna). Kuvasta 8.12 (a) nähdään, että ulkoilman lämpötilan pysyessä lähes vakiona höyrynkulutus riippuu jakosuhteesta. Kuvasta 8.12 (b) puolestaan käy ilmi, että tarkasteltavan jakson loppupuolella höyrynkulutus kasvaa ulkoilman lämpötilan laskiessa. Jakosuhte pysyy tällöin vakiona, mikä voidaan tarkistaa kuvasta 8.12 (a).
- Kun höyrynkulutus on suuri, sihtien lämpötila -muuttujan arvo kasvaa. Tämä saattaa indikoida, että käytettäessä suurempaa höyrymäärää hakkeen höyrykäsittely onnistuu paremmin. Tällöin hakkeeseen jää vähemmän ilmaa, ja hake imeytyy ja keittyy paremmin. Sihtien lämpötilan riippuvuus



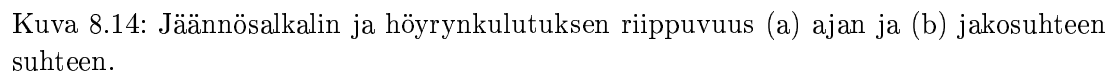
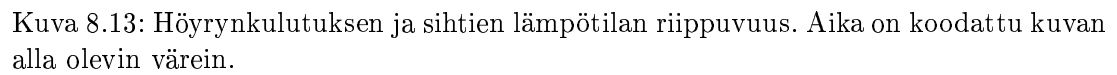
Kuva 8.11: Paine-eron ja sihtien lämpötilojen riippuvuus. Aika on koodattu kuvan alla olevin värein.



Kuva 8.12: Höyrynkulutuksen ja ulkoilman lämpötilan riippuvuus (a) jakosuhteen ja (b) ajan suhteen.

höyrynkulutuksesta ajan funktiona on esitetty kuvassa 8.13.

- Höyrynkulutus korreloi myös vahvasti keiton jäännösalkalin kanssa, kuva 8.14 (a). Höyrynkulutus lienee eräs jäännösalkaliin vaikuttavista tekijöistä, mutta myös jakosuhte vaikuttanee asiaan (kuva 8.14 (b)).
- Kappaluku poikkeaa tavoitteestaan melko vähän ja satunnaisesti. Ainoa selvästi selitettävissä oleva asia on kuvan 8.10 kartan oikeaan yläkulmaan kuvautuva keittimen häiriötilantessa tapahtuva kappaluvun pieneneminen.



Luku 9

Yhteenvedo ja johtopäätökset

9.1 Prosessin mittaustiedon analyysi

Mittaustiedon analyysi on järkevä lähestymistapa prosessin toiminnan tarkasteluun, mikäli systeemiä ei voida mallittaa. Työn kokeellisessa osassa käsitellyt asiat – keittimen häiriötilanteet ja useiden eri keittämön osien toiminnan vaikutus keittoon – olivat luonteeltaan juuri tällaisia ongelmia.

Monimutkaisen tiedon esittäminen helposti ymmärrettävässä muodossa oli työssä keskeisessä asemassa. Neuroverkon, itseorganisoivan kartan, avulla voidaan muodostaa havainnollinen esitys prosessin tiloista. Kartan avulla prosessin toimintaa voidaan tutkia useiden muuttujien suhteen samanaikaisesti. Tämän jälkeen voidaan kohdentaa tarkastelu tutkittavan ongelman kannalta olennaisiin muuttujiin ja prosessin tiloihin.

9.2 Keittimen toiminta

Työn kokeellisessa osassa osoitettiin, että keitin on varsin altis häiriötilanteille. Sekä teoreettisen mallin että keittimen mittausten avulla todettiin häiriöherkkyyden johtuvan siitä, että massan pakkautumisaste alempien paisuntasihtien kohdalla on liian suuri.

Tilannetta voitaisiin parhaiten parantaa pienentämällä radikaalisti keittimen alapaisuntasihtien läpi keittimestä poistettavaa mustalipeämäärää. Vastaava määrä lipeää olisi tällöin poistettava muiden sihtien kautta. Jotta keittokemikaalia ei menetettäisi, olisi keittimen alkalisyöttöpisteitä muutettava. Tämä ei ole keittimessä mahdollista, joten sen rakennetta olisi muutettava. Tätä mahdollisuutta Wisaforest kartoittaa parhaillaan Ahlström Machinery Oy:n kanssa.

Tulevaisuudessa keittimen toimintaa tulee myös helpottamaan uusi esihappivaihe. Sen ansiosta tavoitekappaa voidaan nostaa eli haketta ei tarvitse keittää niin pitkälle kuin nykyisin. Tällöin hake on heikommin kokoon puristuvaa, ja keitin on oletettavasti nykyistä vähemmän altis häiriöille.

9.3 Hakkeen käsittelyn vaikutus keittoon

Edellisiä vähäisempi tapa ehkäistä keittimen häiriötilanteita on homogenisoida keittimeen syötettävä hake nykyistä paremmin. Tämä on perusteltavissa sillä, että mikäli hake on liian pitkälle keittynyttä keittimeen tullessaan, se on paisuntasihtien kohdalla liian pehmeää ja pakkautuu tiiviimmin.

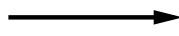
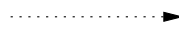
Imeytystorni on keittimeen syötettävän hakkeen kannalta avainasemassa. Työn kokeellisessa osassa analysoitiin eräs keittiön häiriötilaan johtanut tapaus, jossa imeytystornin alkalikulutus ja lämpötila vähitellen kasvoivat. Lopulta keitin ajautui häiriötilaan, jonka vuoksi tuotantonopeutta jouduttiin pudottamaan 100 ADt/vrk:lla. Imeytystornin jäännösalkalikonsentraation säätö, jota tähän mennessä ei olla Wisaforestilla käytetty, otettaneen lähitulevaisuudessa käyttöön vastaavien tilanteiden ehkäisemiseksi.

Molemmissa esimerkeissä ajaututtiin häiriötilaan. Eräs mahdollinen selitys oli hakkeen höyrykäsittelyn hidas tehostuminen ajan myötä ulkoilman ja oletettavasti myös hakkeen lämpötilan laskiessa. Höyrykäsittelyn tehostuessa ilman poisto hakkeesta tehostuu, mikä nopeuttaa imeytystä ja keittoa.

Esitettyjen tulosten perusteella höyrykäsittelyn tässä työssä esitettyä paljon perusteellisempi tutkimus on perusteltua, kun prosessin toimivuutta halutaan parantaa.

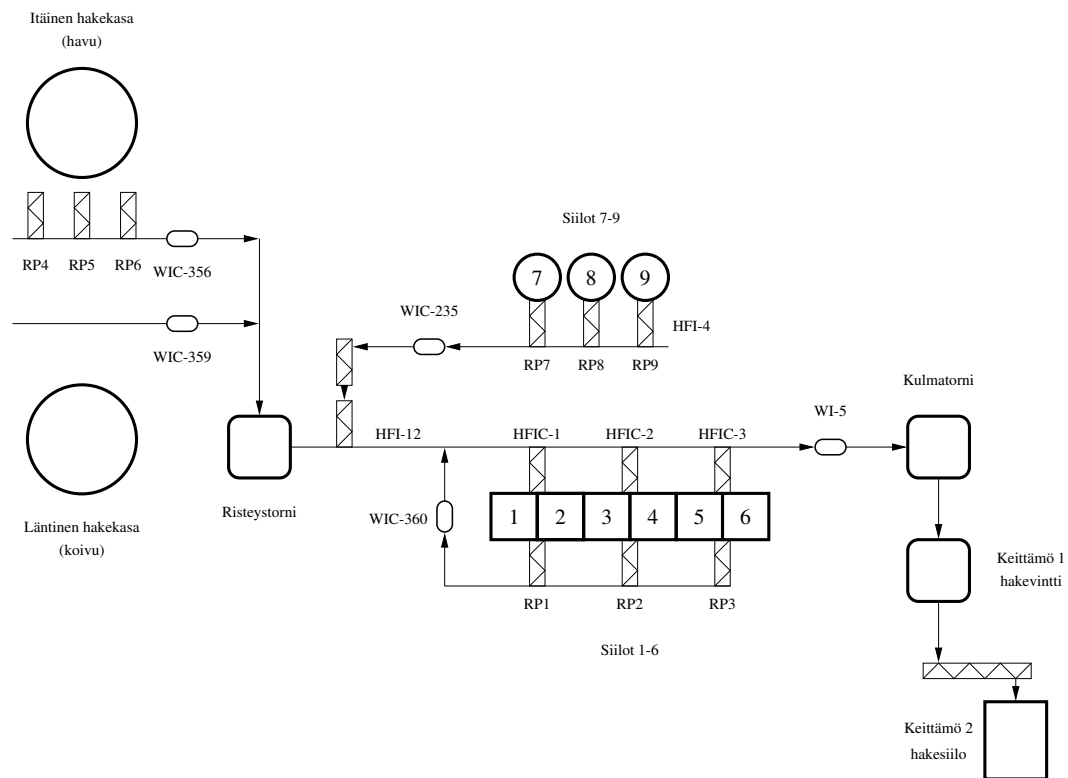
Liite A

Prosessikaaviot

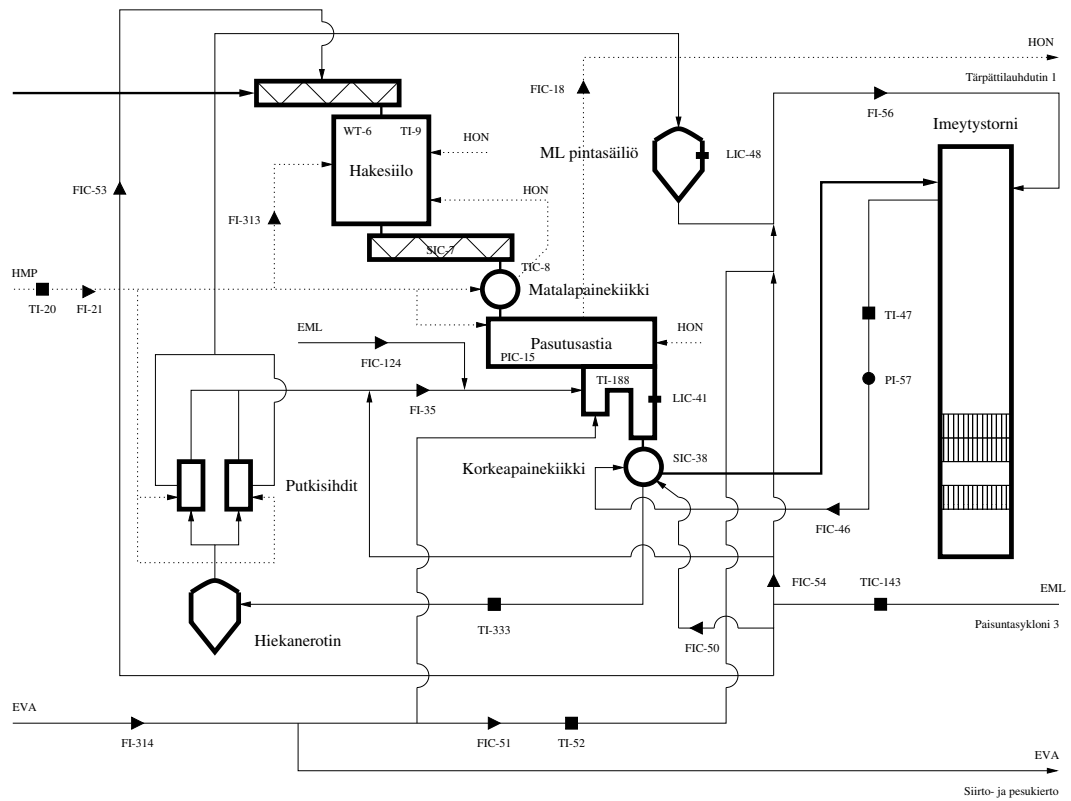
	massavirtaus
	höyryvirtaus
	lipeävirtaus
	painemittaus
	virtausmittaus
	lämpötilamittaus
	pinnankorkeusmittaus
	punnitus
	hakeruuvi
	lämmönvaihdin
	sihti

Kuva A.1: Prosessikaavioissa käytetyt symbolit.

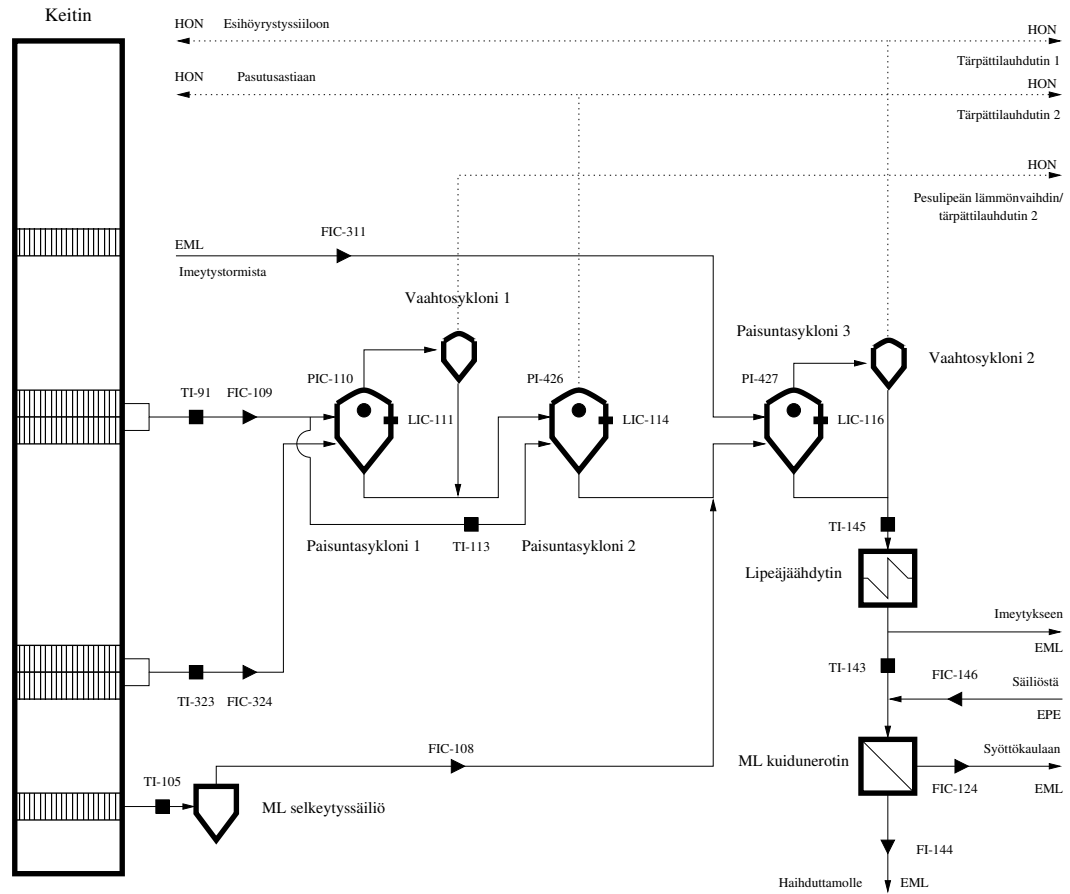
A.1 Hakkeen varastointi ja syöttö



A.2 Hakkeen pasutus ja syöttö imeytystorniin



A.4 Mustalipeän käsittely



Lähdeluettelo

Agarwal, N. ja Gustafson, R. (1997, helmikuu). A Contribution to the Modeling of Kraft Pulping. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 75, 8–15.

Agarwal, N., Gustafson, R. ja Arasakesari, S. (1994, helmikuu). Modeling the effect of chip size in kraft Pulping. *Paperi ja Puu – Paper and Timber* 76(6–7), 410–416.

Akhtaruzzaman, A. F. M., Lunabba, P. ja Virkola, N.-E. (1980). Influence of chip dimensions and chip quality on the kinetics of kraft pulping. *Paperi ja Puu – Papper och Trä* 72(3), 133–134, 139–144.

Akhtaruzzaman, A. F. M. ja Virkola, N.-E. (1979a). Influence of chip dimensions in kraft pulping. Part I. Mechanism of movement of chemicals into chips. *Paperi ja Puu – Papper och Trä* 71(9), 578–580.

Akhtaruzzaman, A. F. M. ja Virkola, N.-E. (1979b). Influence of chip dimensions in kraft pulping. Part II. Present state and scope of the study. *Paperi ja Puu – Papper och Trä* 71(10), 629–634.

Andrews, I. M. ja Barnes, R. (1985, marraskuu). Better-quality pulp gained by using statistics to analyze chip variations. *Pulp & Paper* 59(11), 103–107.

Astola, J. ja Kuosmanen, P. (1997). *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*. Electronic Engineering Systems Series. CRC Press.

Aumala, O., Ihalainen, H., Jokinen, H. ja Kortelainen, J. (1995). *Mittaussignaalien käsittely* (2. painos). Pressus.

Aurell, R., Stockman, L. ja Teder, A. (1958, marraskuu). Flisens impregnering vid sulfitkokning. *Svensk papperstidning* 61(21), 937–944.

Ball, J., Dawson, I., Gunn, I., Dupuis, M. ja Lynn, W. (1994, tammikuu). On-line identification of digester model coefficients and transport lag. *Pulp & Paper Canada* 95(1), 52–55.

Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern recognition*. Oxford University Press.

- Christensen, T., Smith, C. C., Albright, L. F. ja Williams, T. J. (1983). Dynamic modelling of the Kamyr digester: normal operation including hardwood-softwood swings. *Proceedings of TAPPI 1983 Annual Meeting*, pp. 247–255.
- Clarke, F. R. (1987, kesäkuu). A kraft delignification model and its use in production optimization. *Pulp & Paper Canada* 88(6), T197–T201.
- Dayal, B. S., MacGregor, J. F., Taylor, P. A. ja Marcikic, S. (1994). Application of feedforward neural networks and partial least squares for modelling kappa number in a continuous kamyr digester. *Pulp & Paper Canada* 95(1), 26–32.
- Edberg, U., Engström, L. ja Hartler, N. (1973). The influence of chip dimensions on chip bulk density. *Svensk papperstidning* 76(14), 529–533.
- Edwards, L. ja Norberg, S.-E. (1973, marraskuu). Alkaline Delignification Kinetics. A General model Applied to Oxygen Bleaching and Kraft Pulping. *Tappi* 56(11), 108–111.
- Funkquist, J. (1996a, huhtikuu). Grey-box identification of the continuous digester. *Control Systems '96 Preprints*, Chateau Halifax, Halifax, Nova Scotia, Canada, pp. 147–152. SPCI, TAPPI.
- Funkquist, J. (1996b). Grey-box identification of the continuous digester. *Pulp & Paper Canada* 98(11), T414–T418.
- Gullichsen, J., Kolehmainen, H. ja Sundqvist, H. (1992). On the nonuniformity of the kraft cook. *Paperi ja Puu – Paper and Timber* 74(6), 486–490.
- Gustafson, R. R., Jiménez, G., McKean, W. T. ja Chian, D.-S. (1988). The role of penetration and diffusion in pulping nonuniformity of softwood chips. *TAPPI Proceedings 1988 Pulping Conference*, osa 3, pp. 685–691.
- Gustafson, R. R., Sleicher, C. A., McKean, W. T. ja Finlayson, B. A. (1983, tammikuu). Thoretical Model of the Kraft Pulping Process. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 22(1), 87–96.
- Haataja, K. (1996). Estimation of Kappa Number with Neural Networks and Liquor Analysis. L. Yliniemi ja E. Juuso (Toim.), *Proceedings of TOOLMET '96 – Tool Environments and Development Methods for Intelligent Systems*, pp. 143–147. Oulun yliopisto.
- Hakkila, P. (1979, elokuu). Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. Tekninen raportti 96.3, Metsäntutkimuslaitos.
- Hartler, N. (1962). Penetrerings- och diffusionsförhållandena vid sulfatkoket. *Paperi ja Puu – Papper och Trä* 44(7), 365–374.

- Hatton, J. V. (1973a, elokuu). Application of Empirical Equations of Kraft Process Control. *Tappi* 56(8), 108–111.
- Hatton, J. V. (1973b, heinäkuu). Development of Yield Prediction Equations in Kraft Pulping. *Tappi* 56(7), 97–100.
- Härkönen, E. J. (1984, tammikuu). *A Mathematical Model For Two-Phase Flow*. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu.
- Härkönen, E. J. (1987, joulukuu). A mathematical model for two-phase flow in a continuous digester. *Tappi Journal* 70, 122–126.
- Jensen, V. (Toim.) (1977). *Puukemia* (2. painos), luku 15, pp. 314–340. Suomen paperi-insinöörien yhdistys.
- Jiménez, G., Gustafson, R. R. ja McKean, W. T. (1989, toukokuu). Modelling Incomplete Penetration of Kraft Pulping Liquor. *Journal of Pulp and Paper Science* 15(3), 110–115.
- Jiménez, G., McKean, W. T. ja Gustafson, R. R. (1990, heinäkuu). Using a kraft pulping model to improve pulp uniformity. *Tappi Journal* 73, 173–176.
- Kerr, A. J. (1970, marraskuu). The kinetics of kraft pulping – progress in the development of a mathematical model. *APPITA* 24(3), 180–188.
- Kerr, A. J. ja Uprichard, J. M. (1976, heinäkuu). The kinetics of kraft pulping – refinement of a mathematical model. *APPITA* 30(1), 48–54.
- Kleppe, P. J. (1970, tammikuu). Kraft Pulping. *Tappi* 53, 35–47.
- Kohonen, T. (1995). *Self-Organizing Maps*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J. ja Laaksonen, J. (1996). SOM_PAK: The Self-Organizing Map Program Package. Tekninen raportti A31, Teknillinen korkeakoulu.
- Kärkkäinen, M. (1985, toukokuu). *Puutiede*. Sallisen Kustannus Oy.
- Laine, J. (1997, toukokuu). *Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot*. Jouko Laine.
- Ljung, L. (1987). *System identification, theory for the user*. Prentice-Hall.
- Lundgren, S. (1990). Kamyr continuous cooking and washing systems. *Kamyr Technical Symposium, Kamyr Management Symposium, Jakarta, Indonesia*, pp. 76–112.
- Mathworks Inc. (1996). *Using Matlab Version 5*. Mathworks Inc.

- Michaelsen, R., Christensen, T., Lunde, G. G., Lundman, G. ja Johansson, K. (1994, joulukuu). Model predictive control of a continuous kamyr digester at SCA-Nordliner, Munksund, Sweden. *Pulp & Paper Canada* 95(12), 146–149.
- Michelsen, F. A. (1995, toukokuu). *A Dynamic Mechanistic Model and Model-based Analysis of a Continuous Kamyr Digester*. Väitöskirja, University of Trondheim.
- Michelsen, F. A. ja Foss, B. A. (1996, huhtikuu). A dynamic model of the interaction between the chemical reactions and the residence time in a continuous digester. *Tappi Journal* 79(4), 170–176.
- Musavi, M. T., Coughlin, D. R. ja Qiao, M. (1995). Prediction of wood pulp K# with radial basis function neural network. *Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, osa 3, Piscataway, pp. 1716–1719. IEEE.
- Poranen, T. (1996). *UPM-Kymmene Oy Wisaforest, Pietarsaaren tehtaant. Kuitulinja 2. Keittämön ylätasen säädöt. Tekninen määrittely. Rev. 1.3*. Valmet Automation.
- Puranen, T. (1997). Jatkuvatöimisen sellukeittimen häiriöntunnistus sumealla logiikalla. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Robertsen, L. (1993). *Diffusion in wood*. Väitöskirja, Åbo Akademi.
- Roivainen ja Sojakka (1996). *Keittämö 2:n ISO-ohje* (2. painos). UPM-Kymmene.
- Rudd, J. B. (1994, helmikuu). Prediction and control of pulping processes using neural network models. *80th Annual Meeting, Technical Section*, osa B, Montreal, Quebec, Canada, pp. 169–173. Canadian Pulp & Paper Association.
- Saltin, J. F. (1992). A predictive dynamic model for continuous digesters. *TAPPI Proceedings 1992 Pulping Conference*, osa 1, pp. 261–268.
- Sidrak, Y. L. (1995, maaliskuu). Model-based optimization of Kamyr digester operation. *Tappi Journal* 78(3), 93–98.
- SITRA (1986). Korroosio sulfaattisellun vuokeittimissä. Sarja B, no. 86.
- Sjöström, E. (1981). *Wood chemistry. Fundamentals and Applications*. Academic press, Inc.
- Smook, G. A. (1982). *Handbook for Pulp & Paper Technologists*. Joint Textbook Committee of the Paper Industry.

- Söderström, T. ja Stoica, P. (1989). *System Identification*. Prentice Hall International series in systems and control engineering. Prentice Hall.
- Stamm, A. J. (1953, helmikuu). Diffusion and Penetration Mechanism of Liquids Into Wood. *Pulp & Paper Magazine of Canada* 54(2), 54–63.
- Stone, J. E. (1957, heinäkuu). The Effective Capillary Cross-Sectional Area of Wood as a Function of pH. *Tappi* 40(7), 539–541.
- Stone, J. E. ja Green, H. V. (1958, lokakuu). Penetration and Diffusion Into Hardwoods. *Pulp & Paper Magazine of Canada* 59(10), 223–232.
- Sutinen, R. (1996). Sellun keiton lopputuloksen ennustaminen neuroverkkojen avulla. *Automaatioväylä* 12(5), 19–22.
- Vanchinathan, S. ja Krishnagopalan, G. A. (1987, maaliskuu). Dynamic modeling of graft pulping of southern pine based on on-line liquor analysis. *Tappi Journal* 80(3), 123–133.
- Virkola, N.-E. (Toim.) (1983a). *Puumassan valmistus* (2. painos), osa 1, luku 1, pp. 1–43. Suomen paperi-insinöörien yhdistys.
- Virkola, N.-E. (Toim.) (1983b). *Puumassan valmistus* (2. painos), osa 1, luku 8, pp. 291–410. Suomen paperi-insinöörien yhdistys.
- Vroom, K. E. (1957). The “H”-Factor: A Means of Expressing Cooking Times and Temperatures as a Single Variable. *Pulp & Paper Magazine of Canada* 58(3), 228–231.
- Wilson, K. (1971, maaliskuu). Inverkan av temperatur och tryckförhållande under basning och impregnering. *STFI-dag, sulfatimpregnering*. Svenska träforskningsinstitutet.