



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKAEL YLENIUS
VIILUN KUIVAUSKONEEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN KEHITYS

Diplomityö

Tarkastajat: Assistant Professor
Sampo Tuukkanen ja Professor
Matti Vilkkö
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 7. joulukuuta
2016

TIIVISTELMÄ

MIKAEL YLENIUS: Viilun kuivauskoneen säätöjärjestelmän kehitys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 74 sivua

Huhtikuu 2017

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Prosessienhallinta

Tarkastaja: Assistant Professor Sampo Tuukkanen, Professor Matti Vilkkö

Avainsanat: Säätö, Nopeussäätö, Viilun kuivaus, Mallinnus, Systemin identifiointi, Vaneri, PID, Smith-prediktori, Myötäkytkentä, Sumea säätö, MPC

Viilu on puusta leikattu tai sorvattu ohut levy, jota käytetään vanerin ja viilupuun valmistuksessa sekä levyjen pinnoituksiin. Viilun kuivauksen tavoitteena on laskea märästä tukista saadun viilun kosteus myöhemmille prosessin vaiheille sopivalle tasolle. Viilun kuivaus perustuu puun kosteuden kykyyn tasoittua ympäröivien olosuhteiden edellyttämälle tasolle. Viilun kuivuminen on epälineaarinen prosessi ja alkukosteuden vaihtelu on suurta.

Työn tavoitteena on suunnitella uusi nopeussäädin viilun kuivauskoneelle. Vanha nopeussäädin on takaisinkytketty säädin, jossa myötäkytkentä kuivauskoneen lämpötilan pohjalta. Uusi nopeussäädin tulisi pohjautua uuteen viilun alkukosteuden mittaukseen.

Tutkimuksen kohteena on telakuivauskone, jossa viilut kulkevat telojen kuljettamana kuuman kuivausosan läpi. Kuivauskoneessa on viiluja kuljettavia tasoja useita sekä tasolle mahtuu viiluja rinnakkain. Viilun läpäisy aika koneessa on riippuvainen koneen nopeudesta, jonka seurauksena viive alkukosteuden ja loppukosteuden välillä on muuttuva.

Työssä on mallinnettu kuivausprosessi generoidun datan pohjalta käyttäen neuroverkkoa. Simulaattorin avulla testataan eri säätötapojen soveltuvuutta viilun kuivauskoneen nopeusohjaukseen. Testattavina säätötapoina on PID-säädin, Smith-prediktori, myötäkytketty säätö, sumea säädin ja malliprediktiivinen säädin sekä nykyisen säätöratkaisun kehitetty versio.

Alkukosteuden ja kuivausolosuhteiden pohjalta säätämällä kuivaajan nopeutta saadaan pienennettyä loppukosteuden keskihajontaa. Säädin pystyy reagoimaan myötäkytkennän avulla olosuhteiden muutoksiin ennen näiden näkymistä loppukosteudessa. Näin saadaan pienennettyä liian märkien ja kuivien viilujen kosteuspiikkejä.

Työssä saadut tulokset ovat suuntaa antavia, koska työ on tehty generoiduilla datoilla. Tuloksista nähdään kuitenkin kehittyneiden säätötapojen mahdollinen potentiaali. Saatujen tuloksien pohjalta viilun kuivauskoneen säätöjärjestelmän kehittämistä kannattaa jatkaa ja testata toimintaa todellisessa ympäristössä.

ABSTRACT

MIKAEL YLENIUS: Improvement of veneer dryer control system

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 74 pages

April 2017

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Process control

Examiner: Assistant Professor Sampo Tuukkanen, Professor Matti Vilkkö

Keywords: Control, Speed control, Veneer dryer, Modeling, System identification, Plywood, PID, Smith-predictor, Feedforward, Fuzzy control, MPC

Veneer is a thin slice of wood which is cut or sliced out of wood. Veneers are used in plywood, LVL or panels. Aim of veneer drying is to lower the veneer moisture to correct level. The correct moisture level is dependent on coming process steps. The veneer drying is based on wood moisture to settle on equilibrium point based on surrounding conditions. The veneer drying is nonlinear process and green veneer moisture is varying highly.

Aim of this thesis is to design new drying speed controller to veneer dryer. Current controller is feedback controller with feedforward from dryer temperature. The new controller should be based on new green veneer moisture measurement.

Target dryer is roller type dryer where veneers are driven through hot drying zone on rolls. In dryer, there are many levels where veneers are side by side. Time taken in machine is dependent on dryer speed which leads to varying delay between green veneer moisture and dry veneer moisture.

The drying process is modelled with neural network based on generated data. Different control architectures are tested on simulator. Different control architectures are PID-controller, Smith-predictor, Feedforward control, Fuzzy control, model predictive controller and improved version of old controller.

Standard deviation of dry veneer moisture can be decreased with controller based on green veneer moisture and drying conditions. The controller is able to react on change of drying conditions before it effect on dry veneer moisture. This leads to smaller amounts of wet and over dry veneers.

Thesis results are directional because thesis is made with generated data. In results can be seen the potential of advanced control methods. Based on thesis results the improvement of veneer dryer controller is worth to carry on and test in real environment.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Raute Oyj:n tilauksesta Tampereen teknillisen yliopiston systeemitekniikan laitokselle. Kiitos aiheesta ja ohjauksesta kuuluu yliopistolla Sampo Tuukkaselle ja Matti Vilkolle sekä Rauten päässä Harri Lyytiselle ja Toni Antikaiselle. Kiitos myös Rauten työkavereille hyvästä ja viihtyisästä työympäristöstä.

Haluan kiittää myös Tampereen teknillistä yliopistoa sekä henkilökuntaa opetuksesta ja kiitos myös perheelle sekä ystäville tuesta ja kannustuksesta pitkällä opintiellä. Kiitos myös kaikille opiskelukavereille, joita on ollut ilo tuntea vuosien varrella.

Lahdessa, 16.4.2017

Mikael Ylenius

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Toimintaympäristö	1
1.2	Tutkimuskysymys	2
1.3	Taustatutkimusta	3
2.	TUTKIMUSMENETELMÄT	5
2.1	Simulointi	5
2.2	Systeemin identifiointi	5
2.3	Neuroverkko.....	10
3.	SÄÄTÖRATKAISJA.....	13
3.1	PID-säätö.....	13
3.2	Smith-prediktori	13
3.3	Sumea säätö.....	14
3.4	Malliprediktiivinen säätö.....	16
4.	KUIVAUSPROSESSI	18
4.1	Vanerin valmistus.....	18
4.1.1	Tukkien käsittely.....	18
4.1.2	Viilun valmistus	19
4.1.3	Viilun jalostus	20
4.1.4	Vanerin valmistus ja viimeistely.....	20
4.2	Viilun kuivaus	21
4.2.1	Viilun kuivauskoneet	26
4.2.2	Viilun kuivauskoneen nopeussäätö.....	28
5.	PROSESSIN MALLINTAMINEN.....	31
5.1	Tutkimuskohde.....	31
5.2	Mittausdata	31
5.3	Mallin identifiointi	32
5.3.1	Rakenne.....	32
5.3.2	Sovitus.....	33
5.4	Mallin arviointi.....	35
6.	NOPEUSSÄÄTÖ.....	37
6.1	Tavoite.....	37
6.2	Säätötavat	37
6.2.1	Nykyisen kaltainen.....	37
6.2.2	PID-säätö.....	39
6.2.3	Myötäkytkentä	39
6.2.4	Smith-prediktori	39
6.2.5	Sumea säädin.....	40
6.2.6	Malliprediktiivinen säädin	40
6.3	Säätimien viritys.....	40

7.	SIMULAATIO.....	42
7.1	Simulaattori.....	42
7.2	Simulointitulokset.....	43
7.2.1	PID-säätö.....	48
7.2.2	Nykyinen ja nykyisen kaltaiset.....	50
7.2.3	Myötäkytkentä.....	55
7.2.4	Smith-prediktori.....	56
7.2.5	Sumea säätö.....	57
7.2.6	Malliprediktiivinen säätö.....	58
8.	TULOSTEN KÄSITTELY.....	60
8.1	Tulosten kokoaminen.....	60
8.2	Analyysi.....	69
9.	YHTEENVETO.....	71
	LÄHTEET.....	73

KUVALUETTELO

<i>Kuva 2.2.1. Kaksi lähestymistapaa systeemin mallintamiselle. (Kuva mukaeltu viitteestä Ljung & Glad 1994, s. 18)</i>	6
<i>Kuva 2.2.2. Systeemin identifiointiprosessin vaiheet. (Kuva mukaeltu viitteestä Ljung & Glad 1994, s. 261)</i>	7
<i>Kuva 2.3.1 Myötäkytketty kaksikerroksinen neuroverkko. (Ławryńczuk 2014, s. 24)</i>	10
<i>Kuva 3.2.1. Smith-prediktorin lohkokaavio. (Mukaeltu viitteestä: Wolfgang et al. 2005, s. 152)</i>	14
<i>Kuva 3.3.1. Sumean säätimen lohkokaavio. (Mukaeltu viitteestä Passino & Yurkovich 1998, s. 53)</i>	15
<i>Kuva 3.3.2. Kaksi kosteuden jäsenyysfunktioita</i>	16
<i>Kuva 3.4.1. Ennustettu ulostulon käyttäytyminen ennustehorisontin yli lasketulla ohjaus sarjalla u. (Mukaeltu lähteestä Levine 2010, kpl. 28 s.2)</i>	17
<i>Kuva 4.1.1. Vanerin valmistuksen vaiheet. (Koponen H, s. 28)</i>	18
<i>Kuva 4.2.1. Viilun lämpötila, kosteuspitoisuus ja veden haihtuminen ajan suhteen kuivauksessa. (Koponen H. 2002, s.51)</i>	22
<i>Kuva 4.2.2. Kapasiteetin ja energiakustannusten muutos suutinnopeuden kuivausilman lämpötilan ja kosteuden muuttuessa. (Söyrilä et al. 1988, s. 12)</i>	24
<i>Kuva 4.2.3. Kuusen alkukosteus hajonta. (Raute 2016)</i>	25
<i>Kuva 4.2.4. Viilun telakuivauslinjasto. (Raute 2016)</i>	27
<i>Kuva 4.2.5. Telakuivaajan kuivauslohko. (Raute 2016)</i>	27
<i>Kuva 4.2.6. Kuivattavat viilut telojen ja suutinlaatikoiden välissä. (Raute 2016)</i>	28
<i>Kuva 4.2.7. Lämpötila -nopeus suhde kuvaaja. (Raute 2016)</i>	30
<i>Kuva 5.2.1. Kuivausilman kosteuden, lämpötilan ja alkukosteuden vaikutus kuivausaikaan sekä kuivausajan vaikutus loppukosteuteen</i>	32
<i>Kuva 5.3.1. Viilun kuivauskoneen mallin sisääntulot ja ulostulot</i>	33
<i>Kuva 5.3.2. Opetetun neuroverkkomallin erosuureen histogrammi kuvaaja</i>	34
<i>Kuva 5.3.3. Ote generoidun datan alkukosteudesta, kuivauslämpötilasta, kuivausilman kosteudesta ja kuivausajasta. Datan loppukosteus ja mallin ennustama loppukosteus</i>	35
<i>Kuva 5.4.1. Todellisen prosessin mittausdata ja mallin antaman loppukosteuden vertailu</i>	36
<i>Kuva 6.2.1. Lämpötilan ja alkukosteuden vaikutus viilun kuivausaikaan</i>	38
<i>Kuva 7.1.1. Lohkokaavioesitys simulointimallin rakenteesta</i>	42
<i>Kuva 7.2.1. Nopeuden käyttäytyminen eri säätöratkaisuilla alkukosteuden kasvaessa askelmaisesti hetkellä 1200</i>	43
<i>Kuva 7.2.2. Loppukosteuden käyttäytyminen alkukosteuden kasvaessa askelmaisesti eri säätötavoilla</i>	44

<i>Kuva 7.2.3. Askelmainen häiriö alkukosteuteen kuvaamaan eri pölleistä tulleita viiluja.....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 7.2.4. Simuloinneissa käytetty alkukosteuden ja kuivauslämpötilan käyttäytyminen.....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 7.2.5. Viilun kuivauskoneen lämpötila ja kuivausilman kosteus skaalattuna ajonaikana.....</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 7.2.6. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo kuivaajan nopeuden pysyessä vakiona.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 7.2.7. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus PID-säätimellä ohjattuna.....</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 7.2.8. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus PID-säätimellä ja myötäkitykellä P-säätimellä ohjattuna.</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 7.2.9. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen nykyisellä säätötavalla.</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 7.2.10. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen nykyisellä säätötavalla, jossa rinnalla P tyyppinen myötäkitykentä.</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 7.2.11. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen tasomaisella säätötavalla.</i>	<i>53</i>
<i>Kuva 7.2.12. Nykyisen kaltaisen säätimen säätötulos, kun huomioon on otettu alku- ja ilmankosteuden sekä kuivauslämpötilan vaihtelu.....</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 7.2.13. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus neuroverkkopohjaisella myötäkitykennällä.....</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 7.2.14. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus sumealla myötäkitykennällä.....</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 7.2.15. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus neuroverkkopohjaisella smith-prediktorilla.....</i>	<i>57</i>
<i>Kuva 7.2.16. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus sumealla säätimellä.</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 7.2.17. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuvan keskiarvo sekä kuivaajan nopeuden käyttäytyminen malliprediktiivisellä säätötavalla.</i>	<i>59</i>
<i>Kuva 8.1.1. Loppukosteuden liukuva keskiarvo alkukosteuden ollessa satunnaisesti hajautunutta.....</i>	<i>61</i>
<i>Kuva 8.1.2. Kuivaajan nopeuden käyttäytyminen eri säätöratkaisuilla alkukosteuden ollessa satunnaisesti hajautunutta.</i>	<i>62</i>
<i>Kuva 8.1.3. Nopeuden käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa, alkukosteudessa sekä ilmankosteudessa on sinimäinen muutos.</i>	<i>65</i>
<i>Kuva 8.1.4. Loppukosteuden liukuvan keskiarvon käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa ja kuivausilman kosteudessa sekä alkukosteudessa on sinimäinen muutos.....</i>	<i>66</i>

<i>Kuva 8.1.5. Loppukosteuden liukuvan keskiarvon käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa sekä ilmankosteudessa sinimäinen muutos ja alkukosteudessa askelmainen häiriö.</i>	<i>68</i>
<i>Kuva 8.1.6. Nopeuden käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa sekä ilmankosteudessa sinimäinen muutos ja alkukosteudessa askelmainen häiriö.</i>	<i>69</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

IAE	Erosuureen itseisarvon integraali
LVL	Viilupuu, Laminated veneer lumber
MPC	Malliprediktiivinen säädin
PID	Proportional-integral-derivative säädin
A	Kuivausilman kosteus
a	Polynomimallin parametri
b	Polynomimallin parametri
b_i	Jäsenyysfunktion keskikohta
C	Siirtofunktio
D	Siirtofunktio
d	Haluttu ulostulo
E	Virhevektori
e	Häiriö tai erosuure
F	Funktio
f	Siirtofunktion painokerroin
G	Siirtofunktio
H	Siirtofunktio tai Jacobian matriisi
I_p	Datapisteet
J	Kustannusfunktio
K	Neuroverkon solmujen lukumäärä
k_d	PID säätimen D vahvistus
k_i	PID säätimen I vahvistus
k_p	PID säätimen P vahvistus
M	Puun kosteusprosentti
m_k	Puun kuivamassa
m_m	Puun massa mittaustilanteessa
N	Tarkastelupisteiden määrä
n	Neuroverkko tason solmujen määrä
ne	Viive NARMAX mallissa
nf	Rakenteellinen parametri
nk	Rakenteellinen parametri
nu	Viive NARMAX mallissa
ny	Viive NARMAX mallissa
P	Datapisteiden määrä
p	Painokerroin
q	Diskreetin siirtofunktion ajan siirtokerroin
\hat{R}_{su}	Residuaali
r	Tavoitekosteus
T	Aika-askel tai kuivausilman lämpötila
t	Ajanhetki
u	Mallin tai funktion sisääntulo
u_{crisp}	Sumean logiikan ohjausarvo
v	Kuivausaika
w	Mallin häiriötermi tai neuroverkon painokerroin
y	Mallin tai funktion ulostulo

z	Neuroverkon painokertoimilla painotettu sisääntulojen ja biasen summa
β	Käyttäjän määräämä parametri sigmoidisessa siirtofunktiossa
ε	Ennustevirhe
η	Häiriötön ulostulo tai oppimis tahdin kerroin neuroverkossa
θ	Parametrivektori
μ	Levenberg-Marquardt yhtälön parametri
μ_i	Jäsenyysfunktion pinta-ala
τ	Aikasiirtymä
φ	Yksinäpainen sigmoidinen siirtofunktio

1. JOHDANTO

1.1 Toimintaympäristö

Viilu on puusta sorvaamalla tai leikkaamalla irrotettu ohut levy. Viilun kuivaus on tärkeä vaihe vaneriteollisuudessa. Tämän prosessivaiheen tarkoituksena on laskea viilun kosteus sopivalle tasolle, jotta viilun jatkokäsittely onnistuu. Viiluja käytetään myös mm. viilupuun valmistuksessa sekä erilaisten levyjen pinnoituksiin.

Vaneri koostuu päällekkäin syysuuntaan ristikkäin liimatuista viiluista. Vanerin valmistuksen työvaiheita ovat: tukkien käsittely, viilun valmistus ja jalostus, levyn valmistus ja viimeistely. Tukkien käsittelyprosessissa tehtaalle tulleet tukit haudotaan lämpimässä vedessä, jonka jälkeen tukit mitataan, kuoritaan ja katkotaan pölleiksi jatkokäsittelyä varten. (Koponen, H. 2002, s. 28)

Pöllistä saadaan viilua, joko sorvaamalla tai leikkaamalla. Seuraavaksi vanerin valmistusprosessissa on viilun kuivaus, jossa kuivauskoneella kuivataan viilu 3–14 %:in kosteuteen riippuen käytetystä puulajista ja viilun käyttötarkoituksesta (Koponen H. 2002, s. 49, Thant et al. 2009). Viilun kuivauksen jälkeen se leikataan tai lajitellaan. Viilun jalostusprosessin tarkoitus on nostaa vanerin saantoa. Jalostusprosessiin kuuluu viilun paikkaus, jatkaminen, saumaaminen sekä päiden leikkaus. (Koponen, H. 2002, s. 28)

Levyn valmistusprosessissa viiluista tehdään vaneria liimaamalla ja puristamalla. Viiluihin levitetään liimaa ja ladotaan päällekkäin, jonka jälkeen vaneriaihoa puristetaan kokoon kahdessa vaiheessa. Ensiksi esipuristetaan matalassa paineessa ja huoneenlämpötilassa, jonka jälkeen varsinainen kuumapuristus. Kuumapuristuksen jälkeen vaneri viimeistellään paikkauksella, sahauksella, sekä hionnalla. (Koponen, H. 2002, s. 65) Vanerin viimeistelyn jälkeen se on valmiina pakattavaksi ja lähetettäväksi eteenpäin.

Viilun kuivauksen onnistumisella on suuri merkitys tulevilla vaiheilla ja täten koko vaneritehtaan tuotantoon. Sorvauksen jälkeisten viilujen kosteus on suuri. Kosteaa viilua ei sovellu liimaukseen, joten viilun kosteus täytyy saada laskettua. Liian kosteassa viilussa kuumapuristuksen aikana viilun sisällä oleva vesi höyrystyy ja saa aikaan liimauman rikkoutumisen. Viilun liiallinen kuivaaminen saa aikaan halkeilua, kupruilua, värin muutoksia sekä ylimääräistä energiankulutusta. (Koponen H. 2002 s. 49, 58, 71)

Puu on biologista alkuperää olevaa ainetta, joka on muodostunut soluista. Viilun kuivaus perustuu puun ominaisuuteen asettua ympäröivän ilman lämpötilan ja kosteuden edellyttämään tasapainotilaan. (Koponen, H. 2002, s. 49) Puun kuivauksen perusedellytys on lämpö, jota tarvitaan puussa olevan veden höyrystämiseen. Puun hygroskooppi-

sen kosteuden sidosenergian voittamiseen tarvitaan myös lämpöä. Lämmöllä on suuri merkitys myös diffuusiossa ja kapillaarisen virtauksen nopeudessa. Yhden vesikilon poistamiseksi tarvitaan lämpöä vähintään 2250 – 2500 kJ/kg. (Kuusela J 1984, s. 6)

Peruseriaatteet kosteuden liikkeissä puussa ja lämpö- sekä massakäyttäytyminen ovat yhtäläiset sekä puutavaran että viilujen kuivauksessa. Suuren eron näiden välille aiheuttaa kuitenkin paksuusero, joka saa aikaan erilaisien kuivumistekijöiden suhteellisten vaikutusten muuttumisen. Viilun kuivaus tapahtuu korkeammassa lämpötilassa kuin puutavaran kuivaus. Puutavaran pinnan laatu on tärkeä tekijä kuivauksessa, mutta viilun kuivauksessa tärkeimmässä roolissa on oikeanlainen loppukosteus. (Hanhijärvi et al. 2003)

Tärkeimmät viilujen kuivausaikaan vaikuttavat tekijät ovat: kuivausilman lämpötila, suhteellinen kosteus, ilman puhallusnopeus viilun pintaa vasten, viilun alku- ja loppukosteus, paksuus sekä puulajille ominaiset ominaisuudet. Viilun kuivauksessa merkittävän haasteen tuo puun ja viilujen kosteuserot ennen kuivausta. (Koponen, H 2002, s. 51–53)

Viilun kuivausmenetelmät ovat kehittyneet ulkokuivaamoiden ja sahatavara-kuivaamotyyppisten kamari- ja kanavakuivaamoiden kautta nykyisiin korkeilla lämpötiloilla toimiviin kuivaajiin. Kuumalevykuivaajaa voidaan pitää ensimmäisenä varsinaisena viilujen kuivaamiseen tarkoitettuna koneena. Kuumalevykuivaajan toiminta perustuu lämmön siirtymiseen kuumista levyistä kuivattavaan viiluun. Tämän kuivausmenetelmän yleistymistä teollisuuteen on rajoittanut pieni kapasiteetti sekä pihkan ja höyryn poistoon liittyvät ongelmat. (Kuusela J 1984, s. 11)

Nykyisin viilun kuivaus toteutetaan yleisesti tela- tai verkkokuivaajilla, joiden toiminta perustuu kuumaan kiertoilmaan. Kuuma ilma puhalletaan suuttimilla viilun pintaan tämän edetessä koneessa, joko teloilla tai verkkojen kannattelemana. Kuusela (1984) on tutkimuksessaan etsinyt erilaisia tapoja puun kuivaukselle, mutta esiteltyt tavat eivät ole yleistyneet viilunkuivausteollisuudessa.

1.2 Tutkimuskysymys

Diplomityön tarkoituksena on suunnitella nopeussäätö telakuivauskoneelle uusien mittausten pohjalta. Uudella mittauksella pystytään määrittämään tarkemmin viilujen alku- ja loppukosteuden sekä kuivausolosuhteiden perusteella tulisi määrittää viilujen kuivausaika ja näin pyrkiä pienentämään loppukosteuden vaihtelua. Säätöongelman tekee haastavaksi pitkä ja muuttuva viive alku- ja loppukosteuden välillä, useat tuntemattomat häiriöt ja muuttujat sekä alkukosteuden suuri vaihtelu.

Nykyinen nopeussäätö pohjautuu pitkälti kuivauskoneen lämpötilaan, jossa nopeutta hienosäädetään loppukosteuden ja uudelleenkuivattavien viilujen osuuden avulla. No-

peussäädössä muodostetaan lämpötila-nopeus käyrästä, joka määrittää lämpötilan perusteella kuivaajan nopeuden. Kuivurin jälkeen olevalta kosteusmittarilta saadun mitauksen pohjalta muutetaan nopeuskäyrää tarvittaessa. (Raute 2016)

1.3 Taustatutkimusta

Söyriä et al. (1983) tutkimuksessaan käsittelee viulun kuivauksen optimointia ja määrittelee simulointimallin viulun kuivaukselle. Tutkimuksessa on käsitelty myös viulun kuivauksen loppukosteuden säätöä ja todetaan, että loppukosteutta voidaan säätää koneen nopeudella, kuivausilman lämpötilalla sekä kiertoilmapuhaltimen nopeudella. Näistä tehokkaimmaksi tavaksi loppukosteuden säätöön tutkimuksessa todetaan olevan koneen nopeussäätö.

Säätöongelma ja sen ratkaisu voidaan jakaa neljään osakokonaisuuteen: mallinnukseen, analyysiin, estimointiin sekä säätimen suunnitteluun. Mallinnuksessa määritetään matemaattinen malli, jolla kuvataan todellisen järjestelmän toimintaa, rakennetta ja rajoituksia. Analyysissä mallin käyttäytymistä verrataan todelliseen järjestelmään simuloinnin avulla. Estimoinnalla määritetään tuntemattomille muuttujille arvot sisääntulo - ulostulo datan avulla. Lopuksi suunnitellaan säädin ohjaamaan prosessin ulostuloa halutulla tavalla. (Keesman K.J. 2011, s. 3–5)

Matemaattisten mallien määrittäminen systeemistä vaatii tarkkaa tietoa ja ymmärrystä järjestelmästä. Systeemin identifioinnilla voidaan määrittää suurpiirteinen malli järjestelmästä. Identifioinnilla voidaan määrittää mallin parametreja kerätyn datan pohjalta. Tutkimuksessa tarvittavan mallin tarkkuus riippuu tämän käyttökohteesta. Simulaatio-tarkoituksessa tarvitaan mallilta tarkkaa vastaavuutta järjestelmälle, mutta esimerkiksi säädön suunnittelussa mallin ei tarvitse kuvata kaikkia fysikaalisia yhteyksiä tarkasti. (Keesman K. J. 2011, s. 11–12)

Pang et al. (1997) artikkelissaan esittää simulointimallin montereynmäntyviulun kuivumiselle. Myöskin Hanhijärvi et al. (2003) artikkelissaan esittää yksinkertaistetun mallin koivu- ja kuusiviulun kuivumiselle suutinkuivauksessa. Thant et al. (2009) artikkelissa mallinnetaan viulun kuivumisaikaa ja verrataan sitä kokeellisiin tuloksiin. Tschernitz (1985) määrittää artikkelissaan empiirisiä yhtälöitä kuivausajan estimointiin puristus ja suutintyyppisillä kuivauskoneilla.

Dufour (2006) on tutkinut julkaisuja liittyen teollisten kuivauskoneiden ohjauksiin. Tutkinnassa olevista 71:stä julkaisuista 66,1 % liittyy ruokateollisuuteen ja muut julkaisut koskevat: maali-, lääke-, paperi-, puu-, bio-, mineraali- sekä tekstiiliteollisuutta. Julkaisuissa olevista regulointitehtävistä suurin osa käsittelee PID säätimellä, suljetun systeemin optimaattorilla tai myötäkytkennällä toteutettuja säätöratkaisuja. Optimointitehtävistä valtaosassa on valittu säätöratkaisuksi suljetun tai avoimen systeemin optimaattori.

Viilun kuivauksella ja kuivauksella ruokateollisuudessa on yhteistä pitkä viive loppukosteuden ja alkukosteuden välillä sekä vaihtelu alkukosteudessa. Liu ja Bakker-Arkema (2001) käsittelee artikkelissaan malliprediktiivisen säätimen (MPC) soveltamista viljan kuivauksessa. Mansor et al. (2010) saavuttaa myös hyvän lopputuloksen viljan loppukosteudelle artikkelissaan, jossa kuivuria ohjataan sumealla säätötavalla. Didriksenin (2002) artikkelissa sokerijuurikkaan kuivauksessa MPC säätimellä ohjataan rumpukuivuria, jolla päästään hyvään lopputulokseen, kun alkukosteus on mitattavissa. Artikkelissa myös estimoidaan alkukosteutta Kalman-suotimella, jolloin säädön tarkkuus heikkenee.

Diplomityössä on luvussa 2 käsiteltynä työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä sekä luvussa 3 on esiteltyä mahdollisia säätöratkaisuita lyhyesti. Luvussa 4 käsitellään viilun kuivauksen periaatteita ja kuivauskonetta sekä esitellään lyhyesti vanerin valmistusprosessi, johon viilun kuivaus kytkeytyy. Seuraavassa luvussa on käsiteltynä tutkimuksessa käytetty malli sen työvaiheineen. Nopeussäädössä käytettyjä säätömenetelmien toteutusta esitellään luvussa 6. Luvussa 7 esitellään simulaattori sekä simulaatiolla saadut tulokset. Lopuksi työssä on analysoitu saatuja tuloksia sekä koottu yhteenveto työn suorituksesta ja tärkeimmistä tuloksista.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Simulointi

Simulaatio on menetelmä systeemin käyttäytymisen kuvaamiseksi matemaattisen tai vertauskuvallisen mallin pohjalta. Simulaatio pyrkii matkimaan todellisen systeemin käyttäytymistä. Tämän avulla pystytään testaamaan systeemin käyttäytymistä useissa oletetuissa tilanteissa ja tutkimaan muutosten vaikutukset systeemin käyttäytymiseen. (Sokolowski & Banks. 2009, s. 5)

Simulaatiota voidaan hyödyntää, kun todellinen järjestelmä ei ole käytettävissä. Todellisen järjestelmän käytön esteenä voi olla useita tekijöitä, kuten esimerkiksi systeemi ei ole saatavilla, kokeen tekeminen voi olla vaarallista, järjestelmän toimintaa ei saa häiritä tai todellista järjestelmää ei ole olemassa. Näissä tapauksissa simulaattorilla pyritään matkimaan järjestelmän käyttäytymistä. (Sokolowski & Banks. 2009, s. 5-7)

Simulaatio voidaan suorittaa mallille tietokonelaskennan avulla. Simulaatio on halpa sekä turvallinen tapa tehdä testejä systeemille. Kuitenkin simulaation hyödyt ovat suuresti riippuvaisia tässä käytetyn mallin laadusta. (Ljung & Glad 1994, s. 15)

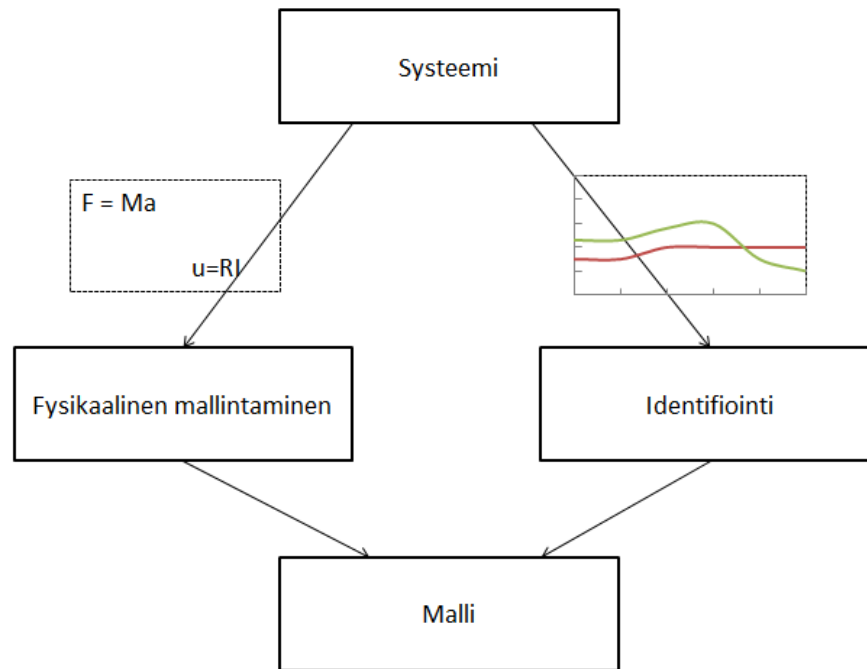
Mallinnuksen ja simuloinnin avulla voidaan saavuttaa monia eri hyötyjä. Esimerkiksi:

- Kyky tehdä oikeita päätöksiä testaamalla muutoksia useilta eri kanteilta.
- Voidaan tutkia nopeasti hitaidenkin prosessien käyttäytymistä.
- Auttaa ymmärtämään miksi jotain tapahtuu tutkimalla käyttäytymistä tarkemmin.
- Voidaan tutkia eri mahdollisuuksia häiritsemättä todellista prosessia.
- Saadaan lisättyä tietämystä järjestelmästä, riippuvuuksista, käytöstä sekä rajoituksista.
- Pienemmät kustannukset muutosten testaamisessa kuin muuttamalla todellista järjestelmää. (Sokolowski & Banks 2009, s. 21-22)

Tässä työssä prosessin mallinnus ja simulointi on toteutettu Mathworksin Matlab ohjelmistolla sekä sen useilla työkaluilla. Matlab on matriisipohjainen laskentaohjelma, joka on kehitetty tieteellisen laskennan tarpeisiin. Simulink on Mathworksin kehittämä lohkopohjainen ohjelmointiympäristö mallinnukseen, simulointiin sekä analysointiin.

2.2 Systeemin identifiointi

Systeemin matemaattisen mallin rakentaminen voidaan toteuttaa kahdella eri lähestymistavalla. Kuvassa 2.2.1. on esitettyä kaksi lähestymistapaa mallinnukselle.



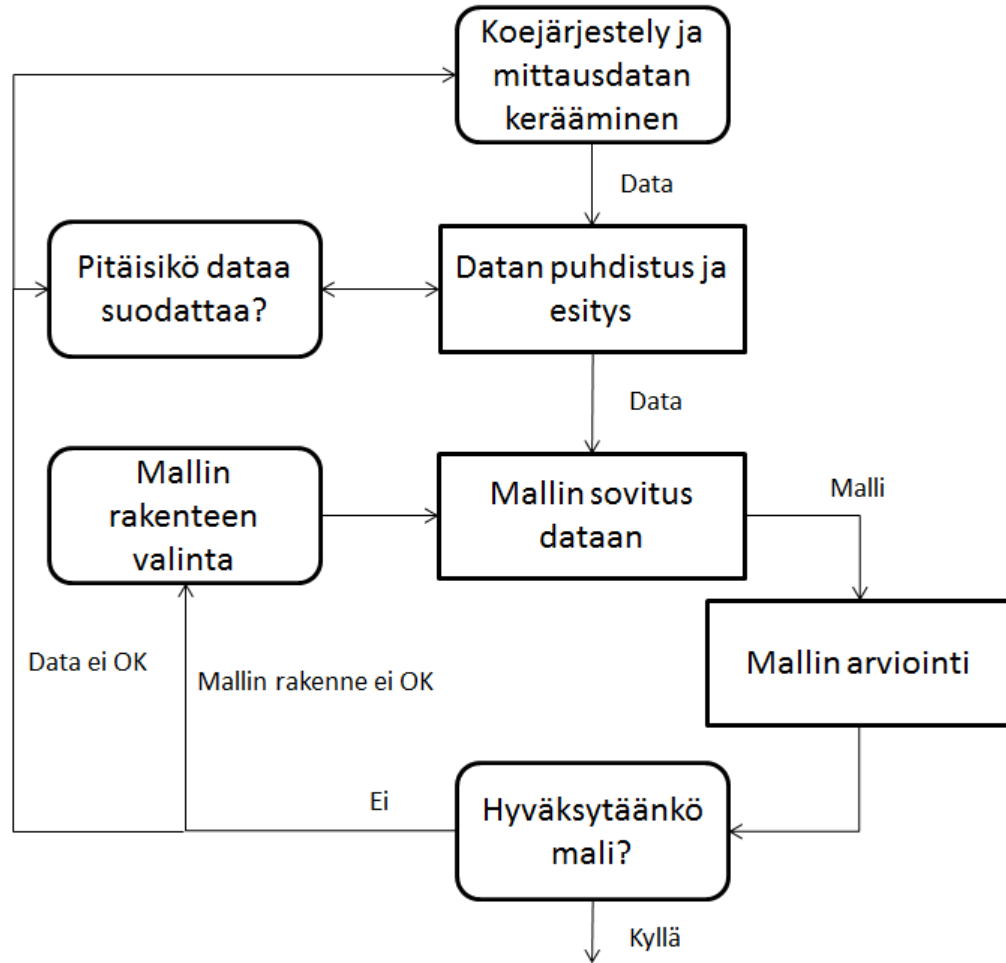
Kuva 2.2.1. Kaksi lähestymistapaa systeemin mallintamiselle. (Kuva mukaeltu viitteestä Ljung & Glad 1994, s. 18)

Fysikaalisessa mallintamisessa jaetaan systeemi pienempiin alisysteemeihin, joiden käyttäytyminen tunnetaan. Teknillisissä systeemeissä tämä tarkoittaa systeemin jakamista sellaisiin osiin, joiden toiminta voidaan kuvata luonnonlakien avulla. Identifiointi lähestymistavassa käytetään hyödyksi havaintoja järjestelmästä mallin sovittamiseen systeemille. Tätä menetelmää voidaan käyttää täydentämään fysikaalista mallinnusta. (Ljung & Glad 1994, s. 16–17)

Fysikaalisella lähestymistavalla tehtyyn malli ei kaikissa tapauksissa ole riittävä. Malliin saattaa jäädä parametreja, joiden arvoja ei pystytä määrittämään tai kaikkia systeemissä esiintyviä ilmiöitä ei voida esittää tunnetuilla fysikaalisilla yhtälöillä. Tässä tapauksessa tarvitaan dataa myös systeemistä, jotta malli saadaan täydennettyä. (Ljung & Glad 1994, s. 189)

Systeemin identifioinniksi kutsutaan mallin täydentämistä tai tekemistä mitatun datan perusteella. Systeemin identifiointi voidaan jakaa kolmeen päämenetelmään. Identifioinnin avulla voidaan helpottaa fysikaalisen mallinnuksen rakennetta tutkimalla datan avulla osajärjestelmien vaikutuksia keskenään ja koko systeemille. Fysikaalisella mallinnuksella tuotetulle mallille voidaan etsiä tuntemattomille parametreille arvot. Identifioinnin avulla voidaan myös määrittää systeemille malli tietämättä fysikaalisia perusteita järjestelmän toiminnasta. (Ljung & Glad 1994, s. 189)

Systeemin identifiointiprosessin vaiheet ovat esitettynä kuvassa 2.2.2.



Kuva 2.2.2. *Systemin identifiointiprosessin vaiheet. (Kuva mukaeltu viitteestä Ljung & Glad 1994, s. 261)*

Kuvasta 2.2.2. on nähtävissä, että mallin tekeminen käyttäen identifiointi menetelmää on iteratiivinen. Datan keräyksen jälkeen se käsitellään, jotta siitä saatava hyötyarvo olisi suurempi. Datan käsittelyvaiheessa voidaan esimerkiksi suodattaa mittausdataa sekä poistaa ajaumat. Käsitelty data sovitetaan valittuun mallirakenteeseen ja tämän jälkeen arvioidaan mallin soveltuvuutta kuvaamaan kyseistä systeemiä. Mallin arvioinnissa päätetään, että hyväksytäänkö tämä kuvaamaan systeemin käyttäytymistä vai pitääkö prosessissa palata johonkin aikaisempaan vaiheeseen.

Tietämättä prosessin fysikaalista käyttäytymistä voidaan lineaarinen malli tehdä impulsivastetta tai taajuusvastetta hyväksikäyttäen. Systemi voidaan myös mallintaa sovitamalla parametrit tunnettuihin mallipohjiin. Mallipohjat yleisesti perustuvat yhtälöön

$$y(t) = -a_1y(t - T) - \dots - a_ny(t - nT) + b_0u(t) + b_1u(t - T) + \dots + b_nu(t - nT),$$

jossa y on mallin ulostulo ja u on sisääntulo sekä T kuvaa aika-askelta. Yhtälöön sovitetaan parametrit a_i ja b_i datan perusteella riippuen mallin kertaluvusta. (Ljung & Glad

1994, s. 189, 344) Tässä työssä keskitytään parametrien sovittamiseen malliin, koska tutkimuskohteesta ei ole saatavissa impulssi- tai taajuusvasteita.

Yleisesti diskreetti lineaarinen malli voidaan esittää muodossa

$$y(t) = \eta(t) + w(t),$$

jossa $w(t)$ on häiriötermi ja $\eta(t)$ on häiriötön ulostulo. Yhtälö voidaan myös kirjoittaa muodossa

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t),$$

jossa u on prosessin sisääntulo ja e on häiriö sisääntulo sekä G ja H ovat siirtofunktioita. Häiriöttömän mallin siirtofunktio on

$$G(q, \theta) = \frac{B(q)}{F(q)} = \frac{b_1q^{-nk} + b_2q^{-nk-1} + \dots + b_bq^{-nk-nb-1}}{1 + f_1q^{-1} + \dots + f_nfq^{-nf}},$$

jossa q on siirtokerroin, b ja f ovat siirtofunktion termien painokertoimet sekä nk ja nf ovat rakenteellisia parametreja, joilla kuvataan siirtofunktion astetta. Valkoisen kohinan (e) vaikutusta kuvaava siirtofunktio H on muotoa

$$H(q, \theta) = \frac{C(q)}{D(q)} = \frac{1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}}{1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd}},$$

jossa c ja d ovat painokertoimia sekä nc ja nd ovat rakenteellisia parametreja. Yllä olevissa yhtälöissä esiintyvä θ on parametrivektori, joka sisältää painokertoimet sekä rakenteelliset parametrit. (Ljung & Glad 1994, s. 231-232)

Yllä olevat yhtälöt voidaan yhdistää muotoon

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (2.3.1)$$

jota kutsutaan Box-Jenkins malliksi. Erikoistapauksessa, jossa häiriösignaalin ominaisuuksia ei mallinneta kutsutaan output error -malliksi. Tämän mallin yhtälö saadaan kaavasta 2.3.1 valitsemalla termien C ja D arvoksi yksi, häiriötermi e on todellisen ulostulon ja häiriöttömän ulostulon erotus. Mallia, jossa häiriöön sekä sisääntuloon vaikuttavat sama prosessin dynamiikka, eli nimittäjät ovat samat, kutsutaan ARMAX -malliksi. ARMAX -malli voidaan kirjoittaa muodossa

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t),$$

jossa A on sisääntulo ja häiriötermin yhteinen nimittäjä. ARMAX -mallista tulee ARX -malli, jos häiriön siirtofunktion osoittaja C saa arvon 1. (Ljung & Glad 1994, s. 232-233)

Epälineaarille systeemeille löytyy useita lähestymistapoja, mutta NARMAX -mallilla voidaan esittää laaja kirjo epälineaarisia systeemeitä. NARMAX -malli määritellään

$$y(k) = F[(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_y), u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-n_u), e(k-1), e(k-2), \dots, e(k-n_e))] + e(k),$$

jossa n_y , n_u ja n_e ovat maksimi viiveet systeemin ulostulossa, sisääntulossa sekä häiriöissä. F on jokin prosessia kuvaava epälineaarinen funktio ja d on viivetermi. Funktion F rakenne voi olla esimerkiksi eksponentiaalinen polynomifunktio, rationaalinen malli, neuraaliverkko, sumeaan logiikkaan perustuva tai jokin muu monista vaihtoehdoista. (Billings 2013, s. 33-35)

Datan sovittaminen malliin tapahtuu minimoimalla ennustevirhe. Parametrivektorilla θ saadaan ennuste ulostulosta ajanhetkellä t . Ennusteen hyvyys voidaan määrittää laskeamalla ennustevirhe

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t|\theta), \quad (2.3.2)$$

jossa $\hat{y}(t|\theta)$ on ennusteen arvo parametrivektorin arvoilla ajanhetkellä t . Kerätystä datasta aikavälin yli $t = 1, \dots, N$ voidaan laskea kuinka hyvin kyseisellä parametrivektorilla malli voi kuvata systeemin käyttäytymistä kaavan

$$V_n(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta)$$

mukaisesti. Minimoimalla V_n voidaan määrittää paras parametrivektori kuvaamaan järjestelmää tällä mallilla. (Ljung & Glad 1994, s. 236–237)

Malli ei ole koskaan täydellinen kuvaus prosessista, mutta tätä ei myöskään vaadita mallilta. Mallit ovat tehty auttamaan jonkin ongelman ratkaisemisessa, jolloin mallin kelpuutus kyseiseen ongelmaan täytyy arvioida. Yleinen keino mallin testaamiseen on verrata mallin ja todellisen systeemin ulostuloja samoilla sisääntuloilla. Ulostulojen eron tarvitsee olla pieni, mutta pienuuden määritelmä riippuu mallin tavoitteesta ja ulostuloon vaikuttavista häiriöistä. (Ljung & Glad 1994, s. 333-334)

Mallin kykyä toistaa järjestelmän käyttäytyminen on luonnollista testata vertaamalla ulostuloja. Tämä vertailu kannattaa suorittaa datalla, jota ei ole käytetty mallin määrittämiseen. Residuaalianalyysillä tutkitaan residuaalia, joka jää mallin ja todellisen systeemin ulostulojen välille. Kaavassa 2.3.2 esiintyvän ennustevirheen tulisi olla riippumaton sisääntuloista. Jos näin ei ole niin ennustevirheessä on komponentteja, jotka johtuvat sisääntulosta. Tällöin systeemissä on enemmän dynamiikkaa kuin mallissa on huomioitu. (Ljung & Glad 1994, s. 283-284)

Tyypillisesti tehdään myös korrelaatioanalyysi osana residuaalitarkastelua. Korrelaatioanalyysissä tarkastellaan ovatko residuaali ja sisääntulo riippuvaisia toisistaan yhtälöllä

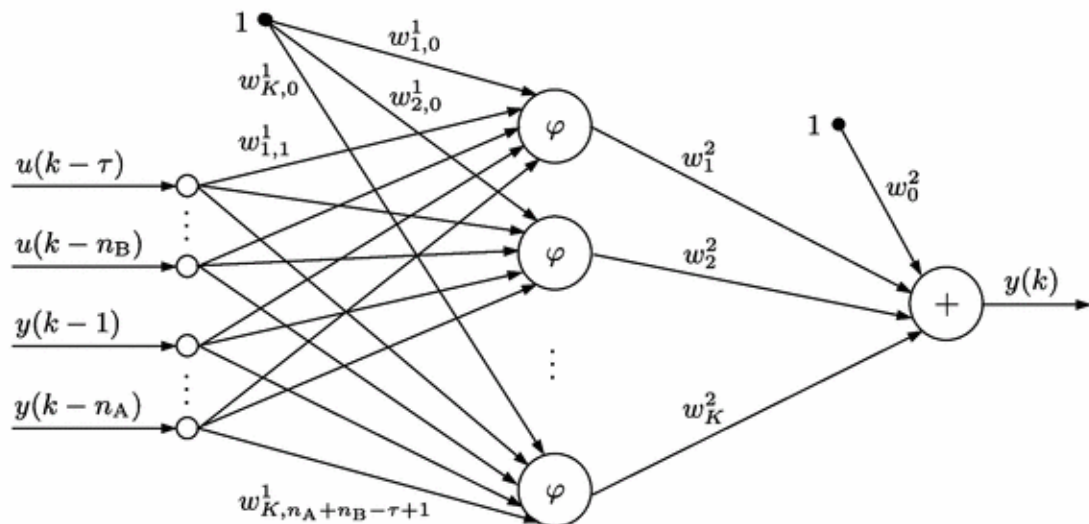
$$\hat{R}_{\varepsilon u}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t + \tau) u(t),$$

jossa N on tarkastelupisteiden määrä ja τ kuvaa aikasiirtymää. Korrelaatio termin tulisi olla lähellä nollaa, jolloin residuaali ja sisääntulo ovat riippumattomia toisistaan. Korrelaatioanalyysin nojalla voidaan todeta, että mitattu data on takaisinkytketystä järjestelmästä, mikäli jollakin aikasiirtymän negatiivisella arvolla löytyy riippuvuus yhteys. Mikäli positiivisella τ arvolla löytyy yhteys, tällöin kannattaa kyseinen termi sisällyttää malliin. Korrelaatioanalyysi voidaan tehdä myös residuaalien kesken, jolloin varmistetaan, että residuaali on molemmin puolin riippumaton. (Ljung & Glad 1994, s. 284-285)

Kaikilla systeemimalleilla on rajoitettu pätevyysalue, joka voi liittyä prosessin ominaisuuksiin tietyssä toimipisteessä tai tarkkuus rajoituksiin. Mallin käyttäminen testatun pätevyysalueen ulkopuolella on riskialtista, mutta toisaalta mallia voidaan vain tarkastella tilanteissa, joissa todellinen prosessi voi toimia. Mallin uskottavuutta tulee arvioida pätevyyden lisäksi, mikäli mallia käytetään tarkastelu alueen ulkopuolella. (Ljung & Glad 1994, s. 336)

2.3 Neuroverkko

Neuroverkko on musta laatikko tyyppinen malli, jossa pyritään jäljittelemään elävän eliön hermostoa. Musta laatikko malleja ovat mallit, joiden sisään- ja ulostulo tiedetään, mutta mallin sisäiseen käyttäytymiseen ei oteta kantaa. Neuroverkko tyyppisiä on useita, mutta kuvassa 2.3.1. on yleisesti käytetty kaksikerroksinen myötäkytketty neuroverkko.



Kuva 2.3.1 Myötäkytketty kaksikerroksinen neuroverkko. (Ławryńczuk 2014, s. 24)

Kuvassa 2.3.1. u ja y ovat mallin sisääntulot sekä ulostulo. Sisääntuloissa n_B ja n_A kuvaavat kuinka moni edellinen arvo vaikuttaa mallissa ja τ on aika-askel. w on solmun

painokerroin, jonka alaindeksi kertoo solmujen lukumäärän. Neuroverkko mallin ulostulo lasketaan kuvan 2.3.1. tapauksessa yhtälöllä

$$y(k) = w_0^2 + \sum_{i=1}^K w_i^2 \varphi(z_i(k)),$$

jossa K on solmujen määrä, z on painokertoimilla painotettu sisääntulojen ja biaksen summa

$$z_i(k) = w_{i,0}^1 + w_{i,1}^1 u(k - \tau) + \dots + w_{i,n_B - \tau + 1}^1 u(k - n_B) + w_{i,n_B - \tau + 2}^1 y(k - 1) + \dots + w_{i,n_A + n_B - \tau + 1}^1 y(k - n_A)$$

ja φ on solmun funktio. Funktiona käytetään yleensä kaksinapaista hyperbolista tangentia tai yksinapaista sigmoidista siirtofunktiota

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}},$$

jossa β on parametri, joka on yleensä 1. (Ławryńczuk 2014, s. 22-24)

Neuroverkon parametrien opettaminen on tärkeä osa neuroverkkojen käytössä. Opetusalgoritmeja on useita, mutta kaksi algoritmia on vakioitunut tekniikan alalla. Vastavirtamenetelmällä lasketaan jokaisen solmun vaikutus virheeseen ja korjataan solmun kerrointa tämän pohjalta. Kustannusfunktio J annetulle dataryhmälle I_p voidaan määrittää yhtälöllä

$$J(w) = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n (d_i^p - y_i^p(I_p, w))^2,$$

jossa P on datapisteiden määrä, n on tason solmujen määrä sekä d on solmun haluttu ulostulo. Parametrien arvot päivitetään gradientin avulla kaavalla

$$w_{ij}^k(t+1) = w_{ij}^k(t) - \eta \frac{\partial J(w)}{\partial w_{ij}^k(t)},$$

jossa η on oppimis tahti ja t on aika-askellettä kuvaava termi. Määrittelemällä $\Delta w_{ij}^k(t) = w_{ij}^k(t+1) - w_{ij}^k(t)$ saadaan edellinen kaava muotoon

$$\Delta w_{ij}^k(t) = -\eta \frac{\partial J(w)}{\partial w_{ij}^k(t)}. \text{ (Bogdan \& Irwing 2011, kpl 3 s. 4-5)}$$

Vastavirtamenetelmän merkittävimpänä ongelmana on hidas painokertoimien suppeneminen. Hagan ja Menhaj sovelsivat Marquardt algoritmin päivittämään painokertoimien arvot myötäketylle neuroverkolle. Parametrit päivitetään yhtälöllä

$$w_{t+1} = w_t - (\nabla_w^2 J(w_t))^{-1} \nabla_w J(w_t),$$

jossa $\nabla_w^2 J(w_t) = 2H(w_t)^T H(w_t) + g(H(w_t))$, jossa $g(H(w_t))$ on pieni residuaali, sekä $\nabla_w J(w_t) = 2H(w_t)^T E(w_t)$. E ja H ovat virhevektori ja Jacobian matriisi. Virhevektori sisältää jokaisen datapisteen virheen arvon ja Jacobian sisältää osittaisderivaatat jokaiselle virheen komponentille painokertoimien suhteessa

$$H(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1^1(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1^1(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1^1(w)}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_2^1(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2^1(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2^1(w)}{\partial w_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial e_n^1(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_n^1(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_n^1(w)}{\partial w_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial e_1^P(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1^P(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1^P(w)}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_2^P(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2^P(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2^P(w)}{\partial w_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial e_n^P(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial e_n^P(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_n^P(w)}{\partial w_N} \end{bmatrix}.$$

Näiden määritelmien pohjalta voidaan Gauss-Newton algoritmi antaa muodossa

$$w_{t+1} = w_t - (H(w_t)^T H(w_t))^{-1} H(w_t)^T E(w_t)$$

ja Levenberg-Marquardt muodossa

$$w_{t+1} = w_t - (\mu I + H(w_t)^T H(w_t))^{-1} H(w_t)^T E(w_t),$$

jossa $\mu (>0)$ on käyttäjän määrittämä parametri matriisin $H(w_k)^T H(w_k)$ asteen vajauksen korjaamiseksi ja I on yksikkömatriisi. (Bogdan & Irwing 2011, kpl 3 s. 7-8)

Mikäli sovitukseen käytettävää dataa on saatavissa suuri määrä on neuroverkko pohjaiset mallit hyvä vaihtoehto datan kuvaamiseksi. Neuroverkko pystyy huomioimaan suuriakin määriä sisään- ja ulostuloja, joita todellisissa systeemeissä voi olla. Suurelle määrälle sisään- ja ulostuloja voi olla hankala löytää lineaarisia tai epälineaarisia yhteyksiä, jolloin neuroverkot ovat hyvä vaihtoehto. Suuresti kohinainen mittausdata heikentää neuroverkon kykyä mallintaa datan käyttäytymistä. (Bogdan & Irwing 2011, kpl 3 s. 10-12)

3. SÄÄTÖRATKAISJA

3.1 PID-säätö

Proportional-integral-derivative (PID) säädin on yleisin tapa hyödyntää takaisinkytkentää prosessin ohjauksessa. PID –säädintä esiintyy useissa eri muodoissa: omana säätimenä, osana säätöhierarkiaa, hajautetussa säätöjärjestelmässä sekä sulautetuissa järjestelmissä. PID –säädin on yleistermi säätimen mahdollisille eri variaatioille. (Åström & Murray 2009, s. 293)

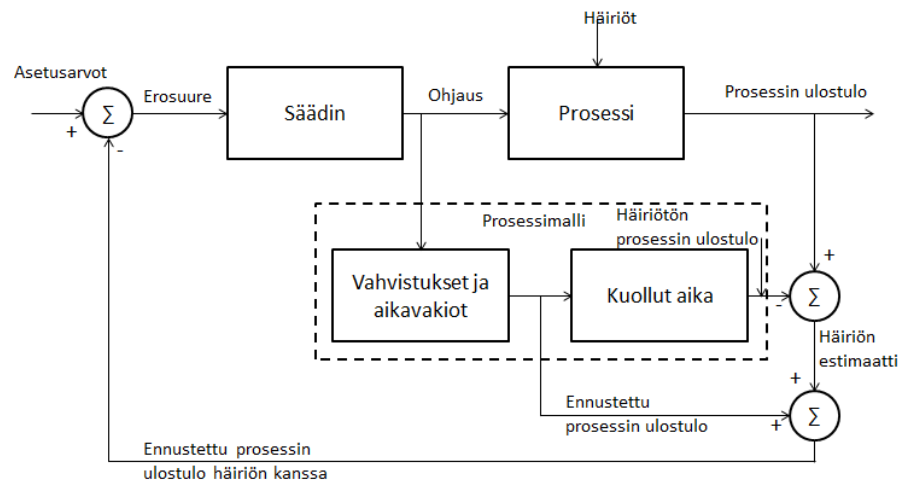
PID –säädössä ohjaussuureen u muodostaminen perustuu puhtaasti erosuureeseen e kaavan

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt}$$

mukaisesti, jossa k_p on verrannollisuuskerroin, k_i on integraalikerroin ja derivointikerroin k_d . Integraali- ja derivointikertoimen tilalla voidaan käyttää myös integrointi (T_i) ja derivointi (T_d) aikaa. (Åström & Murray 2009, s. 293-294)

3.2 Smith-prediktori

Yksi haastavimmista ongelmista takaisinkytketyssä säädössä on prosessin kuolleesta ajasta selviytyminen. Yksi menetelmä kuolleen ajan hallitsemiseksi on virittää säätimelle hitaampi vaste. Smith-prediktorilla pyritään ottamaan huomioon kuollut aika säädössä ja näin ollen ei tarvitse virittää säädintä hitaaksi. (Wolfgang et al. 2005, s. 150-152) Kuvassa 3.2.1. on Smith-prediktorin lohkokaavioesitys.



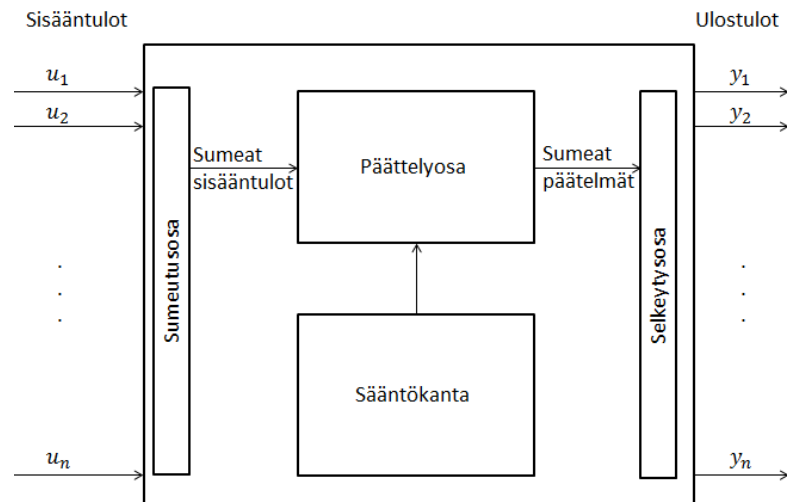
Kuva 3.2.1. Smith-prediktorin lohko-kaavio. (Mukaeltu viitteestä: Wolfgang et al. 2005, s. 152.)

Kuten kuvasta 3.2.1. nähdään, että Smith-prediktorissa on tavallinen takaisinkytkentä silmukka sekä toinen silmukka, joka sisältää prosessimallin. Prosessimallilla pyritään kuvaamaan prosessin ulostuloa häiriöttömässä tilanteessa. Prosessimalli on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen sisältää prosessin käyttäytymisen ilman kuollutta aikaa ja toinen osa lisää kuolleen ajan ulostuloon. (Wolfgang et al. 2005, s. 152-153)

Smith-prediktori kytkennällä säädetään prosessia ennustetun viiveettömän prosessin ulostulon perusteella, johon on lisätty todellisen järjestelmän sekä ennustetun ulostulon välinen virhe. Tällä pyritään vähentämään mallinnusvirheen vaikutusta prosessin säädössä. Smith-prediktorilla poistetaan viiveen vaikutus takaisinkytkennässä.

3.3 Sumea säätö

Sumea säätö on käytännönläheinen vaihtoehto haastavimmille säätöratkaisuille. Se tarjoaa kätevän menetelmän epälineariselle säätimelle heuristisen tiedon pohjalta. Sumealla säätimellä prosessia ohjataan sääntöjen perusteella, joilla pyritään matkimaan prosessia ohjaavan operaattorin päätöksentekoprosessia. (Passino & Yurkovich 1998, s. vii) Kuvassa 3.3.1. on esitettyä sumean säätimen rakenne.

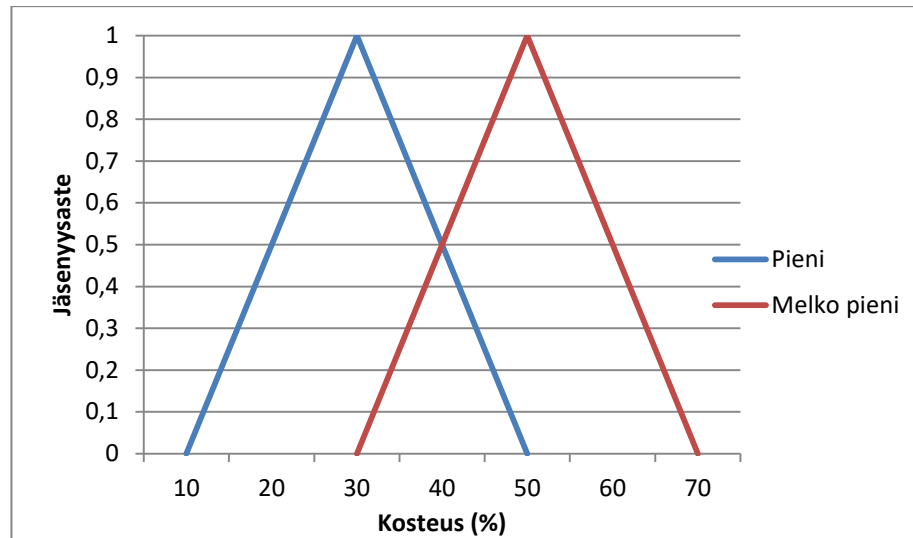


Kuva 3.3.1. Sumean säätimen lohkokaavio. (Mukaeltu viitteestä Passino & Yurkovich 1998, s. 53)

Sumea säädin sisältää neljä pääkomponenttia, kuten kuvasta 3.3.1. on nähtävissä. Sääntökanta sisältää ohjeet, kuinka systeemiä tulisi ohjata. Päätelyosa laskee säätö-ohjeiden perusteella halutun ulostulon. Sumeutusosassa sisääntulot muutetaan sumeiksi arvoiksi ja selkeytysosa muuntaa sumeat päätelmät säätimen ulostuloiksi. (Passino & Yurkovich 1998, s. 11)

Sääntökanta rakentuu kaikista prosessin ohjaukseen tarvittavista säännöistä sanallisesti. Säännöt koostuvat ehdoista, joiden rakenne on muotoa: jos ehdot täyttyvät niin siitä seuraa jotakin. (Passino & Yurkovich 1998, s. 31) Esimerkiksi, jos kuivauskoneen lämpötila on suuri ja sisääntulevan viilun kosteus on pieni, niin kuivausaika on lyhyt. Ehdon seuraus voi olla myös sisääntulojen funktio, jolloin voidaan vähentää päätelyiden lukumäärää (Takagi & Sugeno 1985). Tällaista sumeata logiikkaa kutsutaan sugeno tyyppiseksi sumeaksi logiikaksi.

Päätelyt perustuvat sanallisiin ehtoihin, joten sisääntulojen lukuarvot täytyy muuntaa vastaamaan sanallisia arvoja. Sumeutusosa muuntaa sisääntulon sumean joukon jäsenyysasteeksi vertaamalla kyseisen joukon jäsenyysfunktioon. (Passino & Yurkovich 1998, s. 52 - 53) Kuvassa 3.3.2. on sisääntulokosteuden kaksi jäsenyysfunktioita.



Kuva 3.3.2. Kaksi kosteuden jäsenyysfunktiota.

Kuvasta 3.3.2. nähdään kosteuden pieni sekä melko pieni jäsenyysfunktio. Sisääntulokosteus 30 % on pieni jäsenyysasteella 1, mutta 40 %:n kosteus on pieni sekä melko pieni jäsenyysasteella 0,5. Jäsenyysfunktiot voivat olla eri muotoisia, jolloin ne välittävät eri merkityksen kielelliselle ilmaisulle, jota ne määrittävät (Passino & Yurkovich 1998, s. 56).

Päätelyosan tehtävänä on päätellä mitkä säännöt ovat oleellisia kyseisessä tilanteessa sekä tehdä päätelmä käyttäen sisääntuloja sekä sääntökantaa. Kaikkien sääntöjen jos ehdot käydään läpi ja päätetään mitkä ovat tarpeellisia tähän tilanteeseen. Päätelmä sääntötoimenpiteestä tehdään käytettyjen ehtojen perusteella. (Passino & Yurkovich 1998, s. 37)

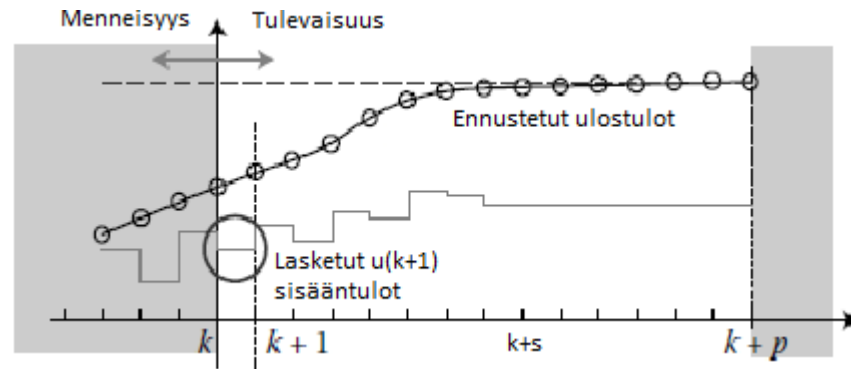
Selkeytysosassa päätelmä muunnetaan lukuarvoilliseksi ulostuloiksi. Muuntoalgoritmeja on useita, mutta yleisin käytetty on painopiste menetelmä

$$u^{crisp} = \frac{\sum_i b_i \int \mu(i)}{\sum_i \int \mu(i)},$$

jossa u^{crisp} on ohjausarvo, b_i on jäsenyysfunktion keskikohta ja μ_i on jäsenyysfunktion pinta-ala kyseisellä jäsenyysasteella. (Passino & Yurkovich 1998, s. 44 - 45)

3.4 Malliprediktiivinen säätö

Malliprediktiivisessä säädössä (MPC, model predictive control) lasketaan sarja ohjauksia ennustamalla systeemin käyttäytymistä ennustehorisontin yli. Kyseisestä sarjasta ohjauksia toteutetaan käsillä olevan ajanhetken ohjaus ja seuraavalla ajanhetkellä toistetaan laskuoperaatio. (Levine 2010, kpl. 28 s. 1) Kuvassa 3.4.1. on esitettyinä säätimen laskema ennuste.



Kuva 3.4.1. Ennustettu ulostulon käyttäytyminen ennustehorisontin yli lasketulla ohjauksarjalla u . (Mukaeltu lähteestä Levine 2010, kpl. 28 s.2)

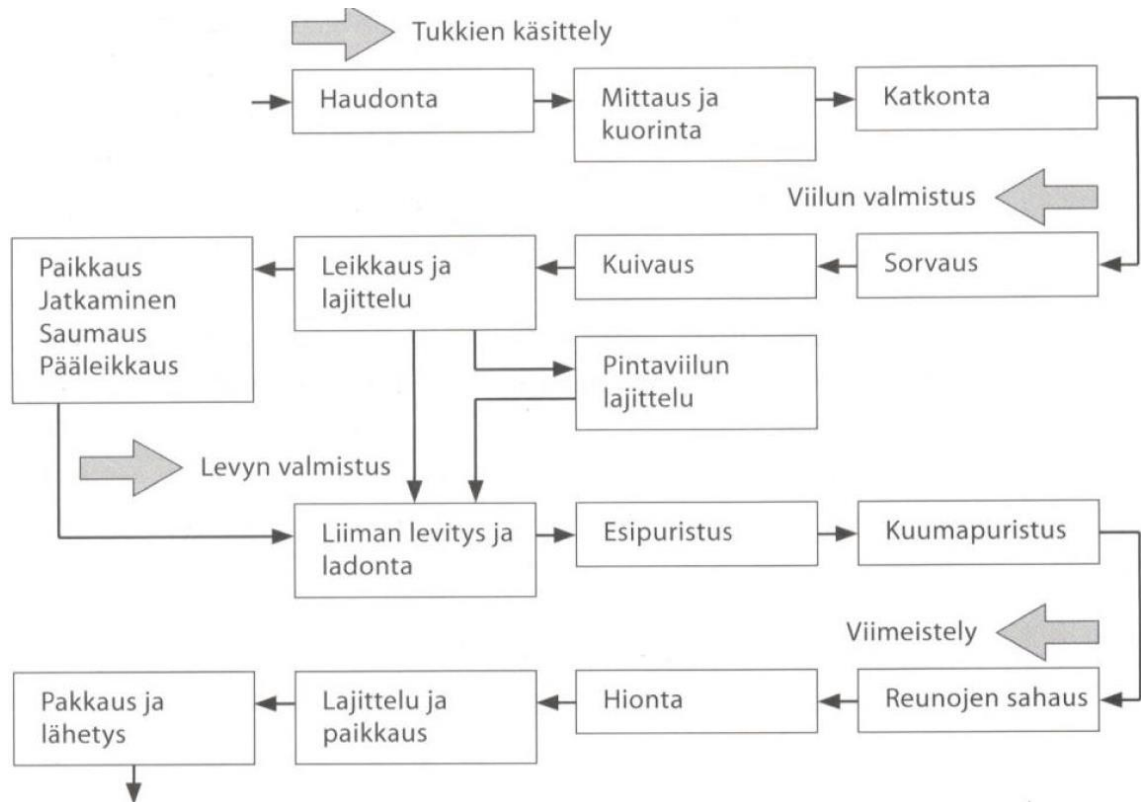
Kuvassa 3.4.1. on ennustettu prosessin mallin perusteella systeemin käyttäytyminen ennustehorisontin (p) yli säätöhorisontin (s) ohjauksilla. Tulevat ohjaukset lasketaan minimoimalla säätövirheen kustannusfunktiota. Lasketuista ohjauksista käytetään vain ensimmäistä, koska häiriöiden ja mallinnusvirheiden takia todellisen prosessin käyttäytyminen voi erota ennustetusta (Levine 2010, kpl. 28 s. 2).

Malliprediktiivinen säätö on hyvä ratkaisu lineaarisille suhteellisen hitaille systeemeille. Haasteena MPC säädölle voidaan pitää monimutkaisia systeemeitä kuten epälineaariset ja nopeat prosessit. Näihin prosesseihin on myös viime vuosina kehitelty MPC säätöratkaisuja. Vaikkakaan MPC teknologia ei ole lyönyt läpi prosessien ohjauksissa, joissa on vahvoja epälineaarisuuksia sekä toimintapisteen muutokset ovat yleisiä, niin epälineaaristen MPC sovellutuksien määrä on kasvussa. (Camacho & Bordons 2007, s. 8-9)

4. KUIVAUSPROSESSI

4.1 Vanerin valmistus

Vanerin valmistus voidaan jakaa kuvan 4.1.1. tavalla vaiheisiin.



Kuva 4.1.1. Vanerin valmistuksen vaiheet. (Koponen H, s. 28)

Kuvasta 4.1.1. on nähtävissä vanerin valmistukseen kuuluvat osaprosessit: tukkien käsittely, viilun valmistus sekä vanerin valmistus ja viimeistely. Viilun valmistusprosessista voidaan erottaa myös viilun jalostus osaprosessi. (Koponen, H. 2002, s. 28) Viiluista voidaan myös liimaamalla leveäksi laataksi tehdä viilupuuta (LVL, laminated veneer lumber) (Koponen, H. 2002, s. 82).

4.1.1 Tukkien käsittely

Tukkien käsittelyprosessi tehtaalla alkaa puiden vastaanoton ja mahdollisen varastoinnin jälkeen haudonnalla. Haudonnan tarkoituksena on lämmittää puu tilaan, jossa siitä saadaan sorvatuksi tai leikatuksi käyttökelpoista viilua. Haudonnan aikana puun kosteu-

den on tarkoitus nousta tasolle, jossa viilu leikkautuu pinnaltaan tasaisena, sileänä ja riittävän lujana. (Koponen, H. 2002, s. 29–30)

Haudonnan jälkeen tukit kuoritaan, jotta jatkokäsittelyssä syntyvät sivutuotteet voidaan muuttaa selluloosan valmistukseen soveltuvaksi hakkeeksi. Tugin kuorinnalla vältetään myös kuoren mukana tulevien epäpuhtauksien, kuten hiekan, joutumista sorville. Tugin kuorinnassa on tärkeitä, että kuoritun puun pinta ei vahingoitu kuorinnan seurauksena. Tugin pinnan tulisi olla puhdas kuoresta, jotta pöllin pyörityksestä tullut viilu on jalostettavaksi kelpaavaa esimerkiksi selluloosaksi. (Koponen, H. 2002, s. 33)

Ennen sorvausta tukit täytyy katkaista viilun mitan edellyttämiin pituuksiin. Tugin katkaisun optimoimiseksi se analysoidaan, jotta voidaan laskea parhaimmat katkaisuvaihtoehdot. Tugin katkaisun tavoitteena on optimoida saatavan viilun määrä ja laatu, minimoida katkaistu raaka-ainekulutus sekä sovittaa pöllien pituus ja saatavan viilun laatu haluttuun tilauskantaan. (Koponen, H. 2002, s. 35)

4.1.2 Viilun valmistus

Kuoritusta ja mittaan leikatusta pöllistä saadaan viilua, joko sorvaamalla tai leikkaamalla. Sorvauksessa viilu irrotetaan pyörivästä pöllistä terien avulla spiraalimaisesti. Sorvauksessa viilu vuoleutuu puun vuosirenkaiden suuntaisesti. Leikkaus menetelmällä viilu leikataan pöllistä edestakaisin liikkuvan terän avulla. Tällöin viilu leikkautuu puun vuosirenkaiden suunnan vastaisesti, jolloin saadaan kuviollista viilua. (Koponen, H. 2002, s. 37)

Sorville ja sorvilta tulevalle viilulle asetetaan paljon laatuvaatimuksia, koska sorvauksella pystytään vaikuttamaan tuotetun vanerin laatuun sekä sorvauksessa aiheutuneet virheet voivat näkyä lopputuotteessa. Sorvatulle viilulle tärkeitä ominaisuuksia ovat pinnan sileys, viilun eheys, tasainen ja sopiva paksuus sekä viilussa ei saa olla liiallisia jännityksiä. Sorvin jälkeen viilu voidaan leikata arkeiksi ja ohjata kuivurille tai syöttää kuivuriin yhtenäisenä mattona riippuen kuivaustavasta. (Koponen, H. 2002, s. 37–38)

Sorvilta tuleva viilu on erittäin kostea eikä sovellu liimaukseen ilman kuivatusta. Kuivauksessa on tarkoitus laskea viilun kosteus tasolle, että se voidaan liimata. Seuraavat työvaiheet asettavat viilun kuivaukselle vaatimuksia. Viilun tulisi olla pinnalta tasaista, eikä siinä saisi olla kuivauksesta johtuvia aaltoiluja tai kupruiluja. Viilun tulisi olla rikkoutumaton ja kosteuspitoisuuden tulisi olla viilussa tasainen. Kuivattujen viilujen kosteuksissa ei myöskään tulisi olla suuria eroja. (Koponen, H. 2002, s. 49) Viilun kuivausta käsitellään enemmän seuraavissa luvuissa.

Mikäli viiluja ei ole leikattu arkeiksi ennen kuivausta suoritetaan leikkaus kuivauksen jälkeen. Viilut lajitellaan kuivauksen jälkeen ehjiin viiluihin, saumattaviin tai poistettavaksi leikkausjätteeksi. Viilut lajitellaan myös käytetyn puun laatuluokkien mukaan.

Esimerkiksi koivuviilut lajitellaan parempiin pintaviilulauluihin, keskimmäiset viilut, paikattava pintaviilulaulu, saumauskappaleet, saumattavat pintaviilut sekä päästä sahattava viilulaulu. (Koponen, H. 2002, s. 56)

4.1.3 Viilun jalostus

Viilun jalostuksen yleisimmät työvaiheet ovat paikkaus, jatkaminen, saumaus ja päistään viallisten viilujen sahaus. Näiden työvaiheiden tarkoituksena on valmistaa viilut mitoiltaan ja laaduiltaan liimaukseen soveltuviksi. Käyttämällä hyödyksi saumauskappaleet saadaan parannettua puuraaka-aineen saantoa. Viilun jalostuksella saadaan myös kasvatettua varsin alhaista viilun saantoa sekä vanerin käyttöalue on laajentunut, kun sorvauspituutta suurempien vanereiden valmistaminen on tullut mahdolliseksi viilun jatkamisen ansiosta. (Koponen, H. 2002, s. 59)

Viilun saumauksessa viiluarkit tai saumauskappaleet liitetään toisiinsa liimaamalla tai sulatelangalla puun syiden suuntaisesti. Näin voidaan valmistaa viilun kokoa suurempia arkkeja ja käyttää hyödyksi kapeat saumauskappaleet. Saumauksella voidaan hyödyntää myös valmistuksessa rikkoutuneet kappaleet. Saumatuiden viilujen saumojen tulisi olla yhtenäisiä, tiiviitä, tasaisia, yhdensuuntaisia sekä niiden tulisi kestää seuraavien työvaiheiden käsittelyä. Saumattavien viilujen tulisi olla keskenään yhtä paksuja, suorakulmaisia, päistään tasaisia ja määrämittaan leikattuja. (Koponen, H. 2002, s. 60–61)

Viilun pinnassa olevat viat, kuten oksat, pienet reiät, laho tai kuori voidaan poistaa viilusta paikkaamalla. Paikkauksessa mahdollinen laatuviirhe poistetaan ja tilalle kiinnitetään ehjästä viilusta tehty paikka. Paikka kiinnitetään joko liimaamalla tai liimapaperilla. Viilun paikkaus tulee suorittaa laatuohjeiden mukaisesti, paikan tulee pysyä kiinni seuraavissa työvaiheissa, paikan ja viilun välillä ei ole paksuuseroja sekä paikka sopii viilun syysuuntaan ja ulkonäköön. (Koponen, H. 2002, s. 61)

4.1.4 Vanerin valmistus ja viimeistely

Vaneri valmistetaan liimaamalla viiluja syysuunnassa ristikkäin päällekkäin. Vanerin liimauksen työvaiheet ovat liiman levitys, viilujen ladonta, esipuristus ja kuumapuristus. Vanerin liimaus on yksi tärkeimmistä työvaiheista, koska levyn ominaisuudet kuten lujuus sekä kestävyys ovat ratkaisevia tekijöitä vanerin käyttökelpoisuutta arvosteltaessa. Liimatulle vanerille on tärkeitä, että vanerin rakenne ja laatu ovat oikeat, levyn paksuus on oikeanlainen, pinnassa ei ole vikoja sekä vanerin liimaus täyttää asetetut lujuus- ja kestävyysvaatimukset. (Koponen, H. 2002, s. 65)

Liimanlevitys ja ladonta tapahtuvat samassa työvaiheessa, jossa liima levitetään tai ruiskutetaan määrättyihin viiluihin ja viilut ladotaan päällekkäin vanerilta vaadittujen ominaisuuksien perusteella. Liima levitetään, joko liimaviiluihin tai kaikkiin viiluihin pintaviilua lukuun ottamatta. (Koponen, H. 2002, s. 67–68)

Vaneriaihiot ladotaan pinkkaan puristusta varten liimanlevityksen jälkeen. Yleensä puristus suoritetaan huoneenlämpöisellä esipuristuksella, jonka jälkeen korkeassa lämpötilassa puristetaan varsinaiseksi levyksi. Esipuristuksessa levyaihiokuormia puristetaan 5–10 minuuttia 0,5–1,0 MPa:n paineessa. Esipuristuksella levyaihioiden kosteus saadaan tasaantumaan viilukerrosten välillä, levyaihiot voidaan syöttää automaattisesti kuumapuristimeen sekä levyaihiot voidaan tarvittaessa varastoida esi- ja kuumapuristuksen välillä. (Koponen, H. 2002, s. 69–70)

Kuumapuristuksessa yksittäisen vaneriaihiot puristetaan kuumien puristuslevyjen välissä. Puristinlevyistä lämpö johtuu levyn sisäosiin, joka saa aikaan liiman viskositeetin laskun ja imeytymisen viilujen sisäosiin. Samalla levyn pinnassa oleva kosteus siirtyy sisäosiin. Puristimen avautuessa levyssä oleva vesi höyrystyy merkittävästi ja saattaa aiheuttaa liimasaumojen hajoamisen, mikäli vanerin kosteus on liian suuri kuumapuristusvaiheessa. (Koponen, H. 2002, s. 70–71)

Vanerin viimeistely osaprosessissa vaneri työstetään lopulliseen muotoonsa ja pakataan. Puristimelta tulevien vanereiden reunat sahataan vakiomittaan, määrämittaan tai karsintamittaan. Reunojen sahauksessa poistetaan vanerista liimauksen vaatima työvara. Reunojen sahauksen jälkeen vaneri hiotaan tasapaksuiksi ja paksuustoleranssit täyttäväksi. Hionnassa vanerin pinnasta poistuu myös aikaisempien työvaiheiden jättämät jäljet. (Koponen, H. 2002, s. 74–75)

Osana vanerin viimeistelyprosessia on myös laadun tarkastus ja korjaus. Vanerien laatu tarkastetaan lajittelun yhteydessä. Lajittelussa tarkastetaan vanerin pinnan laatu, mitat sekä erotetaan korjattavat ja hylkykappaleet. Levyn pinnan vikoja voidaan korjata kitkaamalla tai paikkaamalla. Vaneritehtaalla vanerit voidaan myös leikata asiakkaan haluamiin määrämittäisiin. Lopuksi vanerit pakataan kuljetusta varten. (Koponen, H. 2002, s. 77–79)

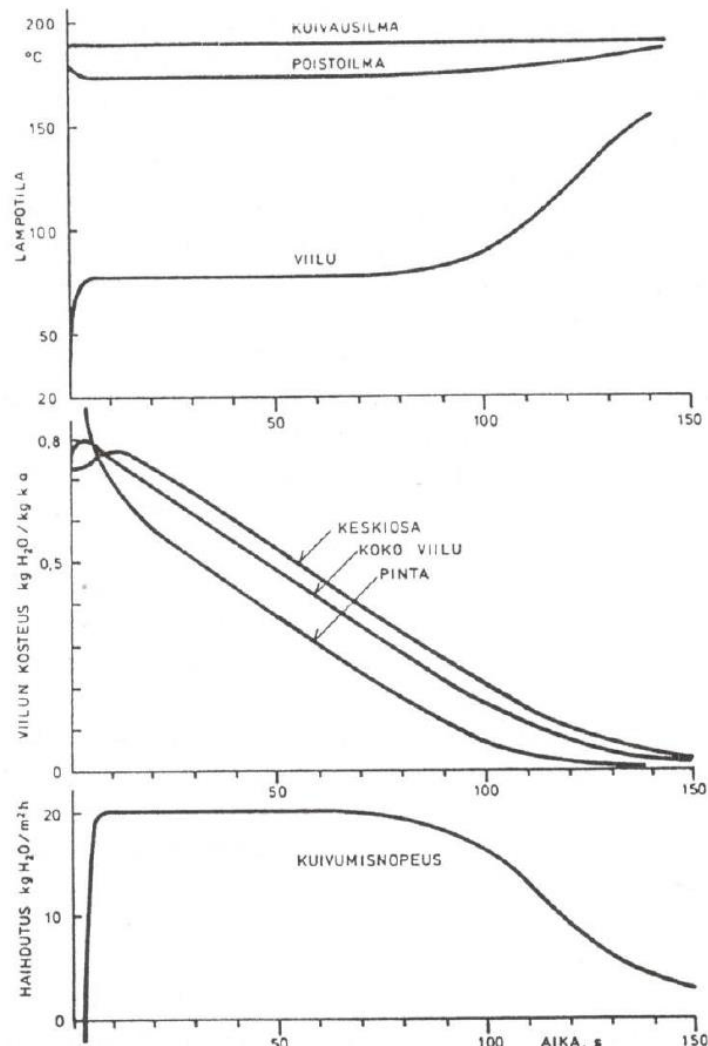
4.2 Viilun kuivaus

Puu on biologista alkuperää oleva aine, joka muodostuu soluista. Soluilla on puussa erilaisia tehtäviä. Puun rungon suuntaisten solujen tehtävänä on ravintoaineiden kuljetus juurista lehtiin. Kyseisiä rungon suuntaisia soluja on suurin osa puun soluista. Poikittaiset solut johtavat nesteiden liikkeitä puun pinnan kerroksista muihin soluihin. Viilun kuivaus perustuu puun hygroskooppisuuteen. Hygroskooppisuus tarkoittaa, ominaisuutta asettua ympäröivän ilman ja suhteellisen kosteuden edellyttämään tasapainotilaan. Viilun kuivauksessa käytetään lähes 200 °C:n lämpötilaa, koska puun tasapainokosteus laskee lämpötilan kohotessa sekä pihkan haihtuminen vaatii korkean lämpötilan. (Koponen, H. 2002, 49)

Puussa vesi sijaitsee joko imeytyneenä soluonteloihin ja solun sisään tai sitoutuneena solunseinämiin. Sitoutuneen veden molekulaariset voimat ovat suuremmat kuin absor-

boituneen, joten puun kuivuessa vesi poistuu aluksi soluonteloista ja solun sisältä. Syiden kyllästymispisteeksi sanotaan tilaa, jossa kaikki imeytynyt vesi on poistunut ja kaikki vesi sijaitsee soluseinämässä. Kyllästymispiste on yleensä puun kosteuden ollessa 25 ja 30 %:in välillä. Puun mekaaniset ominaisuudet kuivauksessa ei merkittävästi muutu ennen kyllästymispisteen saavuttamista. Solurakenteeseen sitoutuneen veden poistuminen saa aikaan puun kutistumisen kuivauksen aikana. (Walker 2006, s. 78-79)

Puiden kosteus vaihtelee puun pinnan ja sisäosien välillä, joka aiheuttaa haasteita puun kuivaukselle. Koivulla ei ole yhtä merkittävää eroa kosteudessa puun eri osien välillä verrattuna havupuihin. Vesi poistuu myös nopeammin viilun reunoilta kuin sisäosasta, joka voi aiheuttaa päiden liiallista kuivumista. (Koponen, H. 2002, 50–51) Kuvassa 4.2.1. on esitettyä viilun lämpötila, kosteuspitoisuus ja veden haihtuminen ajan suhteen kuivauksessa.

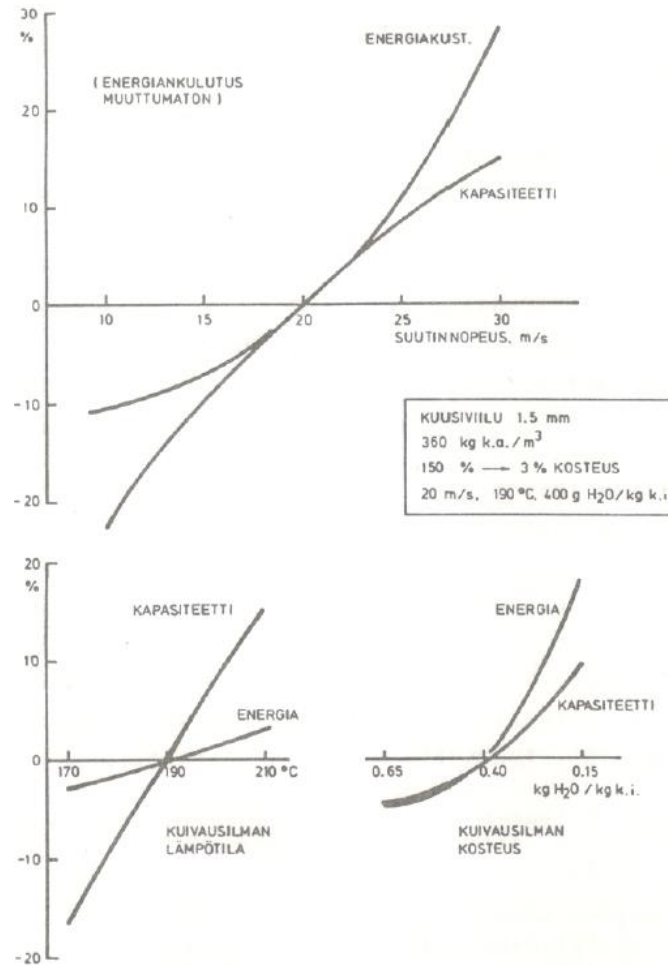


Kuva 4.2.1. Viilun lämpötila, kosteuspitoisuus ja veden haihtuminen ajan suhteen kuivauksessa. (Koponen H. 2002, s.51)

Kuvan 4.2.1. mukainen viilun kuivumisprosessi voidaan jakaa vaiheisiin, jotka ovat lämpötilan nosto, viilun kuivuminen sekä viilun jäädyttäminen. Viilun kuivumisprosessin alussa viilun lämpötila nousee kuivausilman lämpötilan suhteellisen kosteuden edellyttämälle tasolle. Tässä vaiheessa ei kuivumista juurikaan tapahdu. Lähes 200 °C:n lämpötilassa viilun lämpötilan nousu kestää noin 10 sekuntia. Viilun kuivausvaiheessa, jolloin soluonteloista poistuu vesi, viilu kuivuu nopeasti ja vakionopeudella. Tässä vaiheessa viilun lämpötila on lähellä veden kiehumispistettä. Veden poistuttua soluonteloista alkaa solun seinämiin sidottu vesi poistumaan. Tämä vaihe on hitaampi sekä viilun lämpötila alkaa nousta kohti kuivausilman lämpötilaa. Viilun jäädyttämisen aikana tasaantuvat viilun ulko- ja sisäkerroksien väliset kosteuserot ja viilun epätasaisuutta aiheuttavat kuivausjännitykset pienenevät. (Koponen H. 2002, 51)

Viilun kuivumiseen vaikuttavat tekijät voidaan luokitella kolmeen kategoriaan. Laitteiston aiheuttamiin muuttujiin lasketaan esimerkiksi suuttimien muotoilu ja sijoittelu sekä poistoilmajärjestelmä. Prosessimuuttujia ovat lämpötila, kosteus ja suutinnopeus. Viilun aiheuttamia kuivumiseen liittyviä tekijöitä ovat puun tiheys ja laatu sekä viilun ominaisuuksia kuten kosteus ja paksuus. (Pang et al. 1997)

Kuvassa 4.2.2. on esitetty, kuinka kuivauksessa energiakustannukset ja kapasiteetti ovat riippuvaisia suutinnopeudesta, kuivausilman lämpötilasta ja kosteudesta 1,5 mm paksulla kuusiviilulla.



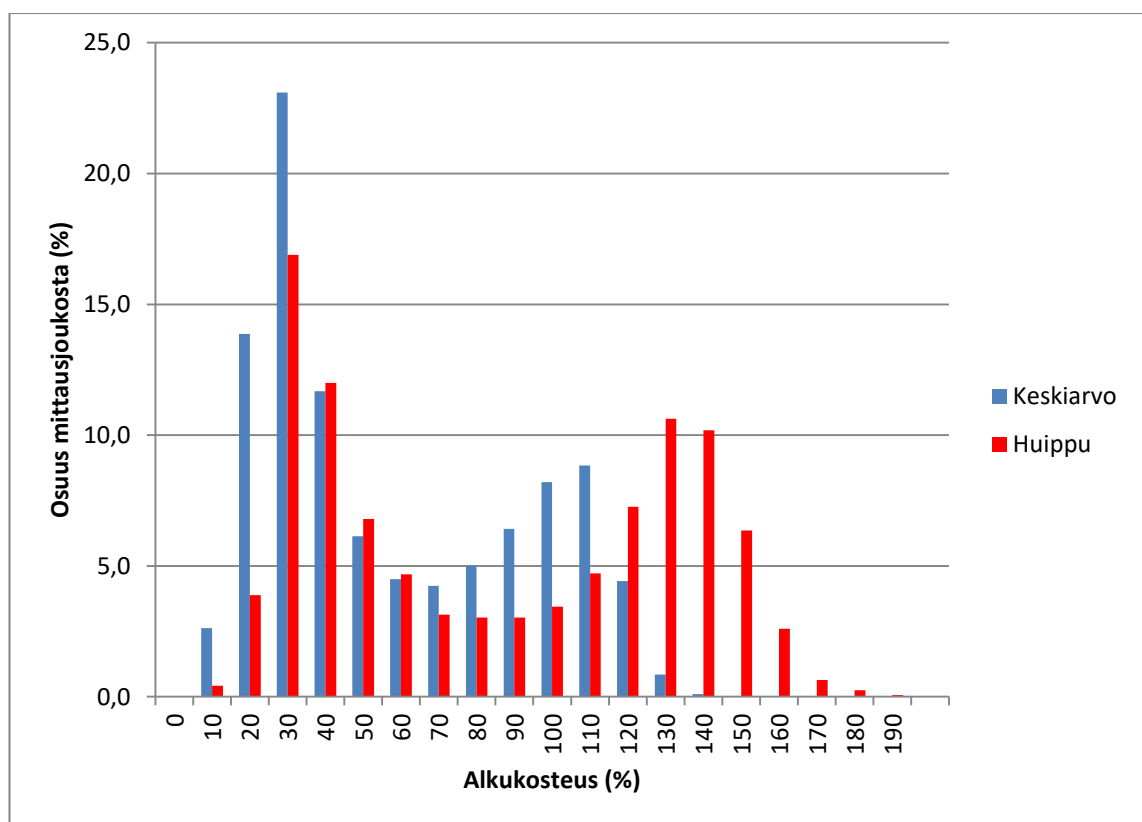
Kuva 4.2.2. Kapasiteetin ja energiakustannusten muutos suutinnopeuden kuivausilman lämpötilan ja kosteuden muuttuessa. (Söyriä et al. 1988, s. 12)

Kuvasta 4.2.2. on nähtävissä, että suutinnopeuden muutoksella on merkittävä vaikutus kapasiteettiin eli kuivausaikaan. Suutinnopeuden kasvattaminen lisää energiankulutusta jyrkemmin kuin kapasiteetti kasvaa. Kuivausilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus kuivausaikaan sekä energiankulutuksen muutosnopeus ei ole yhtä jyrkkä kuin kapasiteetin. Kuivausilman kosteuden laskiessa kapasiteetti kasvaa, mutta energiankulutuksen kustannuksella. Kuivausilman kosteuden nostaminen ei pudota kapasiteettia merkittävästi energiankulutukseen nähden.

Kuivausilman lämpötilan nostolla on merkittävä vaikutus viulun kuivausaikaan, mutta liian suuri lämpötila aiheuttaa viulun tummumista ja palamista. Kuivausilman suhteellisen kosteuden laskiessa viilu kuivuu nopeammin, mutta viulun laatu kärsii. Liian kuiva kuivausilma saa aikaan viulun epätasaisuutta ja koppuraisuutta, joka haittaa viulun loppukäyttöä. Suurella nopeudella viulun pintaan puhalletulla ilmalla pienennetään viulusta haihtuvan vesihöyryn muodostamaa rajakerrosta. Vesihöyryn muodostama rajakerros hidastaa viulun kuivumista. Kuivauskoneeseen syötetyn puun kosteudella on voimakas vaikutus kuivumisaikaan. Tuore puu sisältää sitä enemmän vettä mitä pienempi sen tilavuuspaino on. Solurakenteen vuoksi koivun kuivumisaika on pienempi kuin kuu-

sella, koska koivun avarat putkilot johtavat vettä tehokkaammin kuin kuusen suippomaiset vesisolut. (Koponen, H. 2002, s. 52–53)

Viilun alkukosteuksissa on suuria eroja johtuen sorvauksessa käytetystä puusta. Puun kosteuteen vaikuttavat puulaji, kasvupaikka sekä muut olosuhdetekijät. Puulajien välillä on merkittäviä eroja kosteudessa sekä kuivumisessa. Esimerkiksi koivun kosteus vaihtelee välillä 60 – 80 % ja kuusella 30 – 200 %:in välillä. Havupuilla sydänpuun rengas- huokokset ovat sulkeutuneet sekä pintapuun elävät solut muodostavat kuollessaan ja muuttuessaan sydänpuuksi pihkaa ym. hartsivahamaisia aineita. Nämä tukkivat soluontelot ja huokokset, jolloin sydänpuun vedenjohtokyky pienenee huomattavasti. (Pulkinen et al. 2000, s. 9) Kuvassa 4.2.3. on kuusen alkukosteuden mittauksen kosteushajonta.



Kuva 4.2.3. Kuusen alkukosteus hajonta. (Raute 2016)

Kuvasta 4.2.3. näkyy kuinka eri viilujen alkukosteuden keskiarvo on jakautunut sekä kosteuspiikkien jakauma. Kosteusjakaumasta erottuu sydänpuun ja pintapuun ero kosteudessa kahtena erillisenä huippuna. Puun kosteusprosentti kuvaa puun sisältämää vesimäärää suhteessa kuivapainoon kaavan

$$M = \frac{m_m - m_k}{m_k}$$

mukaisesti, jossa M on kosteusprosentti, m_m on puun massa mittaustilanteessa sekä m_k puun kuivamassa (Walker 2006, s. 69).

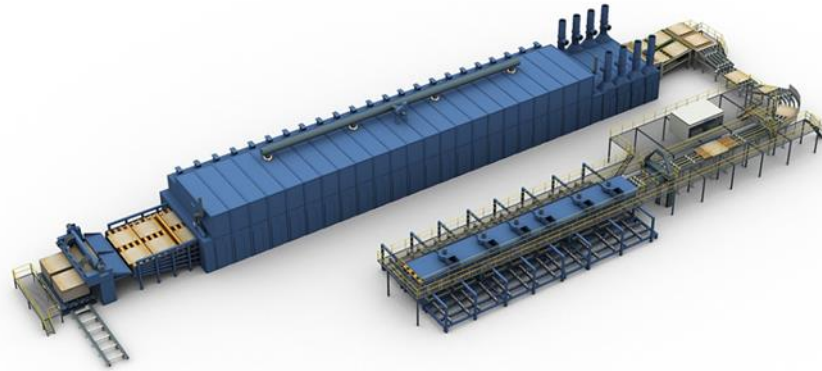
Viilun alkukosteudella on merkittävä vaikutus kuivausaikaan. Tämä tekijä on otettu huomioon lajittelemalla viiluja ennen kuivausta, jolloin kosteusvaihtelu tasaantuu. (Söyriä et al. 1983, s. 66–68) Samankin puulajin erilaisista alkukosteuksista sekä ominaisuuksista johtuen viilut eivät kuivu samaan loppukosteuteen samoissa olosuhteissa (Pulkinen et al. 2000, s. 11).

Viilun kuivauksessa tapahtuneita virheitä ei voida täysin korjata prosessin myöhemmissä vaiheissa. Kuivausvirheet vaikuttavat merkittävästi lopputuotteen ominaisuuksiin. Tästä johtuen viilun kuivaus on yksi tärkeimmistä vaiheista vanerin valmistuksessa. Erityisesti viilun loppukosteuden ja sen hajonnan saaminen hallintaan on tärkeä tekijä kuivauksessa. Liimauksen onnistumisen kannalta viilun kosteus ei saisi olla liian suuri. Liiallinen kuivaus tekee viiluista hauraita sekä aiheuttaa ylimääräistä energiankulutusta. (Pulkinen et al. 2000, s. 11) Liian märäksi jäänyt viilu joudutaan kuivaamaan uudelleen tai saattaa aiheuttaa liimauksessa vanerin hajoamisen ja aiheuttaa tehtaan tuotannon laskemisen.

4.2.1 Viilun kuivauskoneet

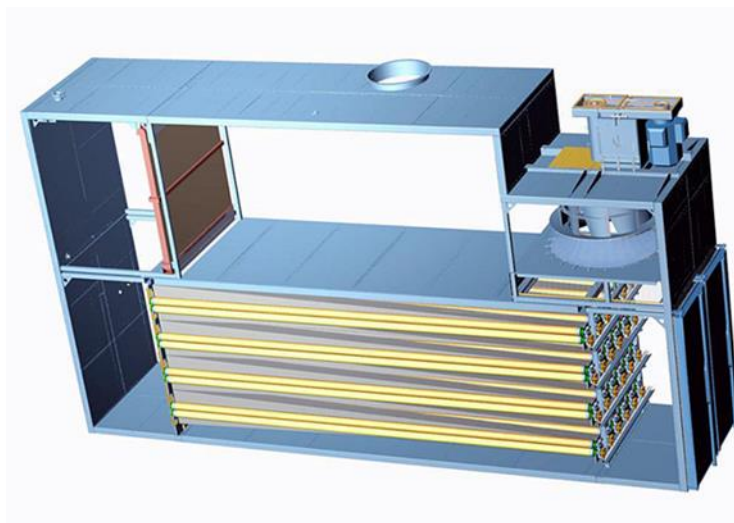
Viilun kuljetustavan perusteella kuivauskoneet jaotellaan tela- ja verkkokuivaajiin. Telakuivauskoneessa viilut syötetään sorvauksen jälkeen leikattuina arkkeina viilun pituussuunnassa ja verkkokuivauskoneisiin suoraan sorvilta tullessa mattona. Verkkokuivaajalle syötetyiden viilujen syysuunta on poikittain. Telakuivauskoneessa viiluarkit syötetään koneeseen useampi rinnakkain sekä monessa kerroksessa. Kuivauskoneessa viilut kulkevat telaparien vetämänä. Verkkokuivauskoneessa viilumatto ohjataan yläpuolelta koneen syöttölaitteeseen josta viilumatto ohjataan verkkojen väliin. Viilumatto kulkee useita kertoja koneen lävitse ja jäähdytysosa sijaitsee koneen alaosassa. Kuivauskoneen lämpöenergia siirretään koneessa kiertävään ilmaan tavallisesti lämpöpattereilla. Vaneritehtaalla käytetystä lämpöenergiasta 60–70 % kulutetaan viilun kuivauksessa. (Koponen, H. 2002, 53–55)

Jatkuvatoimisella kuivauskoneella saavutetaan korkea tuotantomäärä, mutta on tärkeätä jakaa viilun ryhmiin puun ominaisuuksien mukaan ja asettaa kuivausolosuhteet näiden mukaan. Viilu kuljetetaan hitaasti pitkän lämmitetyn koneen läpi telojen tai verkon avulla, jonka tehtävänä on rajoittaa viilun liike ja pitää laakeana. Suuttimilla ohjattu ilma puhalletaan kovalla nopeudella (20 m/s) viilujen pintaan, joka saa aikaan pinnalla seisovan ilmakerroksen hajoamisen ja näin nopeuttaa viilun kuivumista. (Walker 2006, s. 410) Kuvassa 4.2.4 on esitettyä viilun kuivauslinjasto.



Kuva 4.2.4. Viilun telakuivauslinjasto. (Raute 2016)

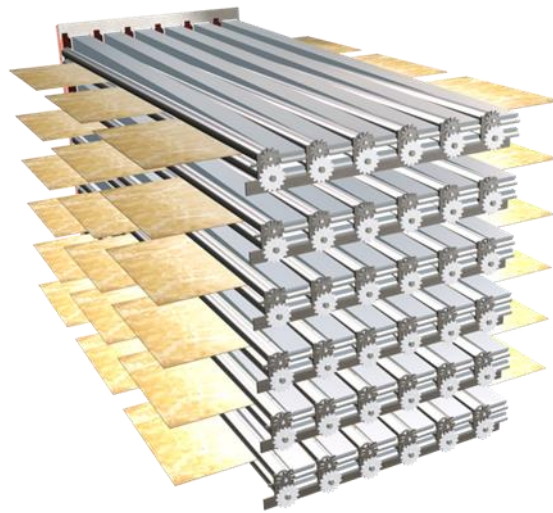
Kuvasta 4.2.4. viilun kulkusuunnasta vasemmalta luettuna kuivauslinjastoon kuuluu viilunsyöttökone, kuivaaja, viilujen purkaus, viilujen laadun ja kosteudenmittaus laitteistot sekä pinonta. Telakuivaaja koostuu peräkkäisistä vyöhykkeistä, joiden sisällä on omat lämpötila- ja kosteusohjaukset. Tyypillisesti vyöhykkeet ovat jaoteltu käyttötarkoituksen mukaan joko lämmitys, vapaan veden tai sidotun veden höyrystämiseen. Vyöhykkeet koostuvat useista kuivauslohkoista. Kuivauskoneen perässä on myös jäähdytysosa, jonka tarkoituksena on jäähdyttää viilut oikeaan lämpötilaan. Liian lämmin viilu aiheuttaa ongelmia liimauksessa. Kuvassa 4.2.5. on yhden kuivauslohkon rakenne. (Raute 2016)



Kuva 4.2.5. Telakuivaajan kuivauslohko. (Raute 2016)

Vyöhykkeet koostuvat kuvan 4.2.5. mukaisista lohkoista, joiden määrä riippuu koneen kapasiteettitarpeesta. Kuivauslohkossa tuulettimilla puhallettava ilma lämmitetään lämpöpattereilla ja ohjataan suutinlaatikoille. Lämpöpattereille lämpöenergia tuodaan yleensä kuumalla höyryllä. Suutinlaatikoilla ilma ohjautuu teloilla oleville viiluille. (Raute 2016)

Viilut kulkevat telakuivauskoneessa kuvan 4.2.6. mukaisesti.



Kuva 4.2.6. Kuivattavat viilut telojen ja suutinlaatikoiden välissä. (Raute 2016)

Kuvasta 4.2.6. on nähtävissä kuinka viilut kulkevat kuivauskoneen sisällä teloja pitkin. Telojen vieressä on suutinlaatikoita, jotka puhaltavat kuumaa ilmaa suoraan viilujen pintaan sen molemmiin puolin. Telakuivaajassa lämpö siirtyy viiluun kuumen puhallusilman mukana ja toisaalta johtamalla kuumista teloista sekä hieman myös säteilemällä ympäröivistä rakenteista (Kuusela J. 1984, s. 11).

Viilun kuivauskoneessa säädetään useita asioita hyvän kuivauslaadun saavuttamiseksi. Kuivaukselle tärkeitä ohjauksia ovat: lämpötila- sekä nopeus-, kosteus- ja jäähdytysilmanohjaus. Korkealla kuivausilman kosteudella kuivauksessa saavutetaan lämpeneminen läpi viilun. Liian kuiva kuivausilma saa aikaan viilun pinnan kuivumisen, joka johtaa pinnan halkeiluun ja kosteuden jäämisen viilun sisään. Korkealla ilmankosteudella saavutetaan myös pienempi energiankulutus verrattuna kuivaan ilmaan. Kuivauskoneen lämpötilalla on suuri merkitys viilun kuivumiseen ja näin kuivausaikaan. (Raute 2016)

4.2.2 Viilun kuivauskoneen nopeussäätö

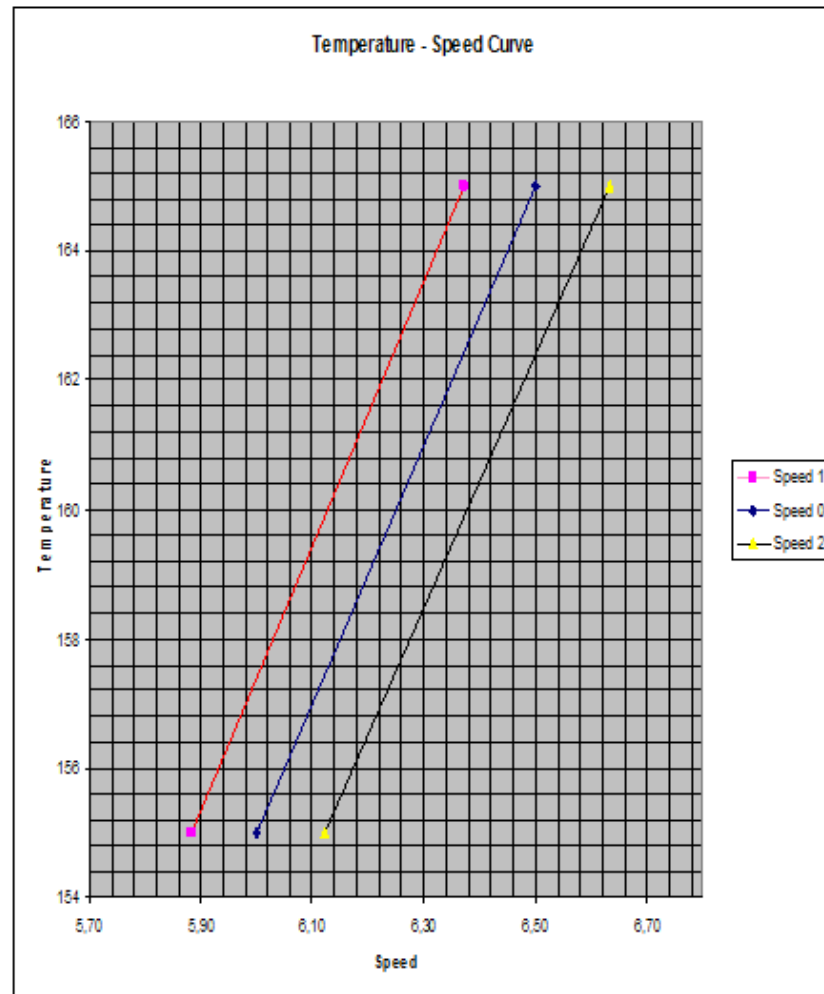
Viilun loppukosteutta voidaan säätää kuivauskoneen nopeudella, kuivausilman lämpötilalla sekä kiertoilmapuhaltimen nopeudella, joka vaikuttaa suuttimilta puhalletun ilman nopeuteen. Loppukosteutta säädettäessä kuivausilman lämpötilalla on otettava huomioon suuren ilmamäärän aiheuttaman hitauden vaikutus säädön nopeuteen. Kiertoilma-

puhaltimen kierrosluvun tarvitsisi vaihdella suurella skaalalla, koska suutinnopeuden vaikutus kuivaustehoon on vähäinen. Joten kuivausajan säädöllä voidaan vaikuttaa parhaiten viilujen loppukosteuteen. (Söyriä et al. 1983, s. 71–72)

Viilun loppukosteus tulee saada halutulle alueelle, joka nykyään on välillä 6 – 15 % riippuen sovellutuksesta. Viilun loppukosteuden kasvattamisella on merkittävä vaikutus kuivausaikaan ja näin koneen kapasiteettiin. Jopa loistavalla viilun kosteuden säädöllä loppukosteus vaihtelee melko laajasti, joten on tärkeitä tarkkailla yksittäisten viilujen loppukosteutta ja erotella kosteat viilut uudelleen kuivattaviksi. Yleensä sallitaan tietty osuus viiluista uudelleenkuivattaviksi, jolloin vältetään liiallinen ylikuivaaminen. Ylikuivaaminen pienentää koneen tuotantoa, kuluttaa paljon energiaa ja aiheuttaa viilun laadun heikkenemisen. (Walker 2006, s. 410)

Loppukosteuden mittauksella voidaan havaita poikkeamat tavoiteloppukosteudessa sekä ottaa huomioon kuivausolosuhteiden muutokset ja reagoida näiden perusteella kuivauskoneen nopeuteen. Loppukosteuden avulla säätämällä ei kuitenkaan pystytä ottamaan huomioon alkukosteuden vaihteluita sekä virhe loppukosteudessa on jo tapahtunut ennen kuin se on havaittavissa mittauksissa. Alkukosteuteen perustuvalla säätötavalla pystytään ottamaan huomioon alkukosteuden vaihtelut ja tämän perusteella määrittämään kuivausaika. Näin pyrittäisiin vähentämään alkukosteudesta riippuvaa vaihtelua viilun loppukosteudessa. (Söyriä et al. 1983, s. 70)

Kehityksen kohteena olevan koneen nopeussäätö tällä hetkellä perustuu lämpötilaan, jonka perusteella lasketaan nopeus. Kuvassa 4.2.7. on esitettyä lämpötila –nopeus käyrästä.



Kuva 4.2.7. Lämpötila -nopeus suhde kuvaaja. (Raute 2016)

Kuvan 4.2.7. mukaisesti määritetään kuivauskoneen nopeus. Kuvassa on esitettyä kolme lineaarista nopeuskäyrää. Nopeuskäyrää muutetaan loppukosteusmittarilta tulevan datan perusteella. Esimerkiksi kuvassa Speed 0 käyrä kuvaa perustilannetta ja toisissa käyrissä kuivauskoneen nopeutta on tarvinnut pienentää tai kasvattaa riippuen loppukosteudesta. Kuivauksesta tulevista viiluista määritetään keskikosteus sekä uudelleen kuivattavien osuus ja näitä verrataan määritettyihin asetusarvoihin. Näin nopeussäädössä voidaan huomioida kuivausolosuhteiden muutokset.

5. PROSESSIN MALLINTAMINEN

5.1 Tutkimuskohde

Tutkimuskohteena on Rauten toimittama telakuivauskone vaneritehtaalla. Raute Oyj on suomalainen puutuotetoimialaa maailmanlaajuisesti palveleva teknologia- ja palveluyritys. Rauten tärkeimmät asiakasteollisuudet ovat vaneri- ja viilupuuteollisuus. Raute on maailmanlaajuinen markkinajohtaja vaneriteollisuudessa sekä Rautella on vahva asema viilupuuteollisuudessa. Rauten teknologiatarjonta kattaa asiakkaan koko tuotantoprosessin koneet ja laitteet. Rautella on henkilökuntaa noin 650 yhdeksässä eri maassa. (Raute 2016)

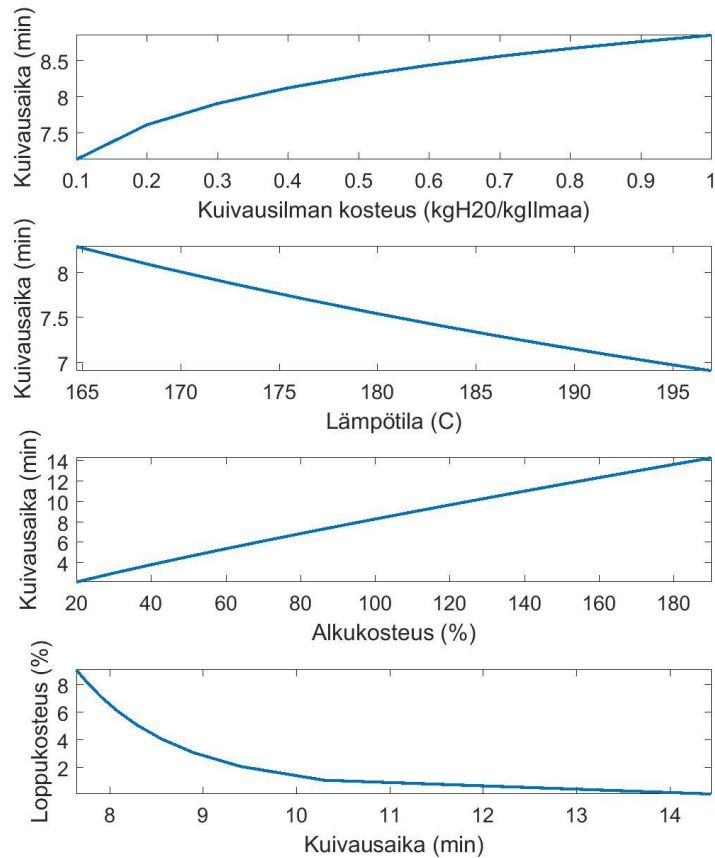
Tutkittavassa kuivauskoneessa on kuivausosassa 6 tasoa, 3 vyöhykettä, 23 lohkoa. Kuivattavana puulaatuna on havupuu. Kuivauskoneelta saatavia mittauksia ovat lämpötila, ilman kosteus ja kuivausaika vyöhykeittäin. Viilun alkukosteus mitataan tehtaan sorvillä, jonka jälkeen viiluja on varastoitu pinkoissa. Loppukosteustieto saadaan kuivauksen ja jäähdytyksen jälkeiseltä viilun kosteusanturilta.

5.2 Mittausdata

Mittausdata on generoitu Rauten kuivauskoneen mitoitusohjelmalla. Mitoitusohjelma perustuu kokemusperäiseen sovitukseen sekä mittauksittain. Ohjelman antamat tulokset eivät ole tarkkoja, mutta tulokset ovat kuitenkin suuntaa-antavia. Mitoitus-ohjelman tulokset vastaavat parhaiten todellista normaaleissa olosuhteissa, mutta ääriolosuhteiden tuloksista ei ole varmennusta.

Mittausdatan generoinnissa luodaan dataa kuuselle tutkinnassa olevan koneen tyyppiselle kuivauskoneelle. Muuttuvina olosuhteina mitoitusohjelmassa käytetään alkukosteutta, kuivausilman kosteutta, höyryn painetta sekä loppukosteutta. Höyryn paineesta ohjelma laskee kuivauslämpötilan. Mitoitusohjelmasta luetaan laskettu kuivausaika.

Datan muodostamisessa alkukosteutta vaihdellaan 20 %:n ja 190 %:n välillä, jotta alkukosteuden vaihteluvälistä tulee tarpeeksi kattava. Loppukosteus vaihtelee väliltä 0,1-9,1 % jolloin saadaan mittausdataan mukaan myös kuivausnopeuden hidastumisesta johtuva epälineaarisuus. Kuivausilman lämpötila vaihtelee 164-197 °C sekä kuivausilman kosteus vaihtelee 0,1-1 välillä. Kuivausilman kosteuden suhdeluku kertoo kuinka monta kiloa vettä on yhdessä kilossa ilmaa. Kyseisillä alkuarvojen vaihteluilla kuivausaika vaihtelee 1,4 minuutin ja 26,6 minuutin välillä. Kuvassa 5.2.1. on kuvattuna eri olosuhteiden muutoksen vaikutus kuivausaikaan generoidun datan pohjalta.



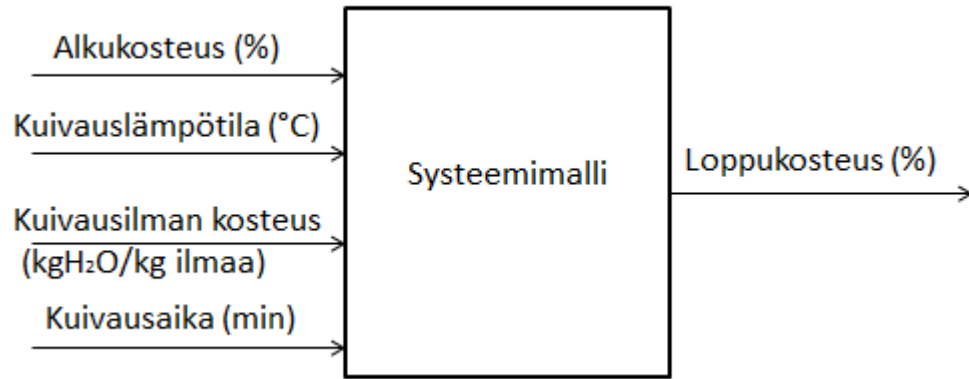
Kuva 5.2.1. Kuivausilman kosteuden, lämpötilan ja alkukosteuden vaikutus kuivausaikaan sekä kuivausajan vaikutus loppukosteuteen.

Kuvan 5.2.1. kuivausolosuhteet ovat samat eri kuvaajissa ja yhtä muuttujaa muutetaan kerrallaan. Kuivausilman kosteuden pienentyessä vaadittu kuivausaika samaan loppukosteuteen pienenee epälineaarisesti. Kuivausilman lämpötilan kasvaessa vaadittu kuivausaika vähenee lähes lineaarisesti. Viilun alkukosteuden kasvaessa viilun kuivausajan tarvitsee myös nousta. Viilun alkukosteuden ja kuivausajan välinen suhde on lähes lineaarinen. Kuvasta 5.2.1. nähdään, että alkukosteuden muutoksella on suuri vaikutus kuivausaikaan. Kuivausajan lyhentyessä loppukosteuden käyttäytyminen on selkeästi epälineaarista.

5.3 Mallin identifiointi

5.3.1 Rakenne

Kuivauskoneen kuivausprosessin mallintaminen tehdään datasta johtuen staattiseksi. Kuvassa 5.3.1. on lohkokaavio mallin rakenteesta.



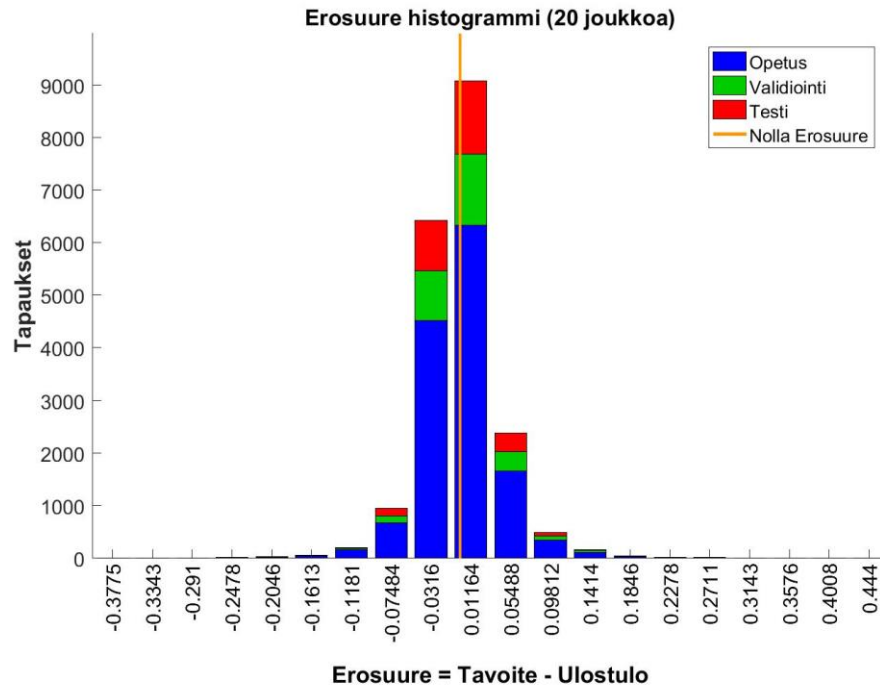
Kuva 5.3.1. Viilun kuivauskoneen mallin sisääntulot ja ulostulot.

Loppukosteus lasketaan alkukosteuden, kuivauslämpötilan, kuivaajan ilmankosteuden ja kuivausajan perusteella. Kuivausajan vaikutus loppukosteuteen on epälineaarinen, joten mallin tulee olla rakenteeltaan epälineaarinen. Datan epälineaarisuudesta ja staattisuudesta johtuen lineaarisen systeemin dynaamiset polynomisovitukset eivät sovellu mallin pohjaksi.

Neuroverkko pohjainen malli on musta laatikko tyyppinen malli, jossa ei tarvitse tuntea tarkemmin fysikaalisia ilmiöitä viilun kuivaus prosessin taustalla. Neuroverkko pohjaiseen malliin voidaan lisätä sisään- ja ulostuloja tarvittaessa. Data sovitetaan neuroverkkomalliin, joka laskee sisääntulojen perusteella loppukosteuden. Läpäisyajasta johtuva viive lisätään simulaatioon erikseen.

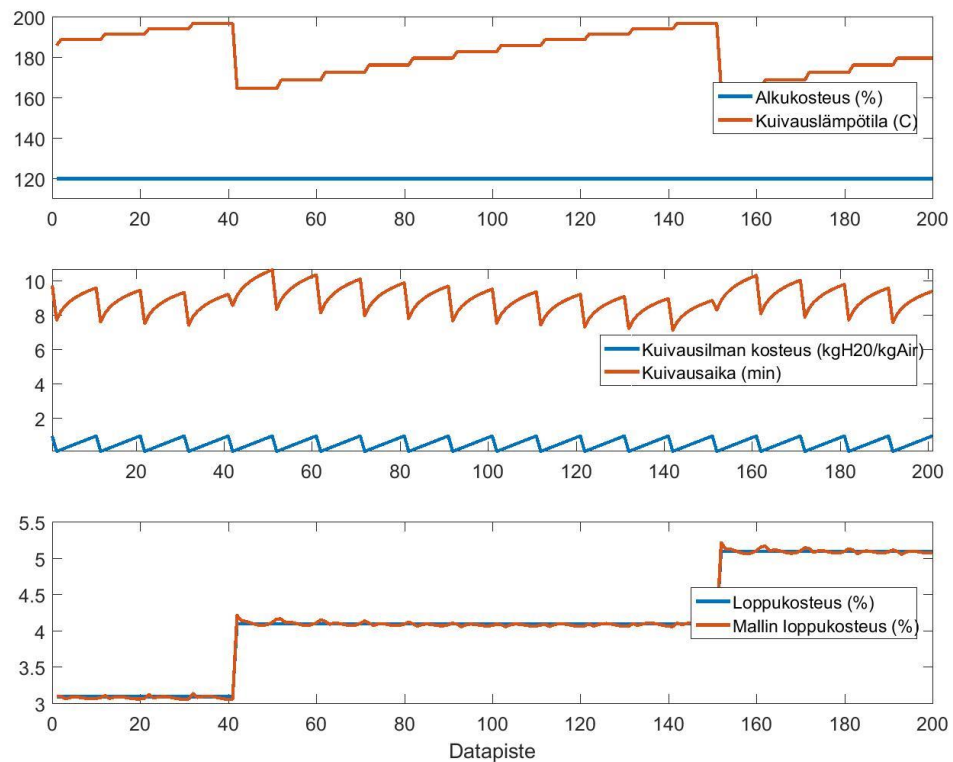
5.3.2 Sovitus

Mallin sovitukseen käytetään Matlabin valmista neuroverkko sovitus työkalua. Työkalu sovittaa datan kaksikerroksiseen myötäkytkettyyn neuroverkkoon. Neuroverkon funktiona käytetään sigmoidista siirtofunktiota. Työkalu opettaa neuroverkon Levenberg-Marquardt algoritmin pohjalta. Kuvassa 5.3.2. on 20 solmuisen opetetun neuroverkon erosuureen histogrammi kuvaaja.



Kuva 5.3.2. Opetetun neuroverkkomallin erosuureen histogrammi kuvaaja.

Kuvan 5.3.2. pohjalta nähdään, että suurimmassa osassa tapauksista erosuureen arvo on lähellä nolla erosuureen pylvästä. Datasta on 70 % käytetty neuroverkon opetukseen ja 15 % sekä validointiin ja testaamiseen. Testi pylvästä nähdään, että opetettu neuroverkko tuottaa yhtäläisen tuloksen myös testijoukolla kuin opetuksessa ja validoinnissa käytetyllä datajoukolla. Joten sovitettu malli toimii yhtäläisesti koko generoidun datan alueella.

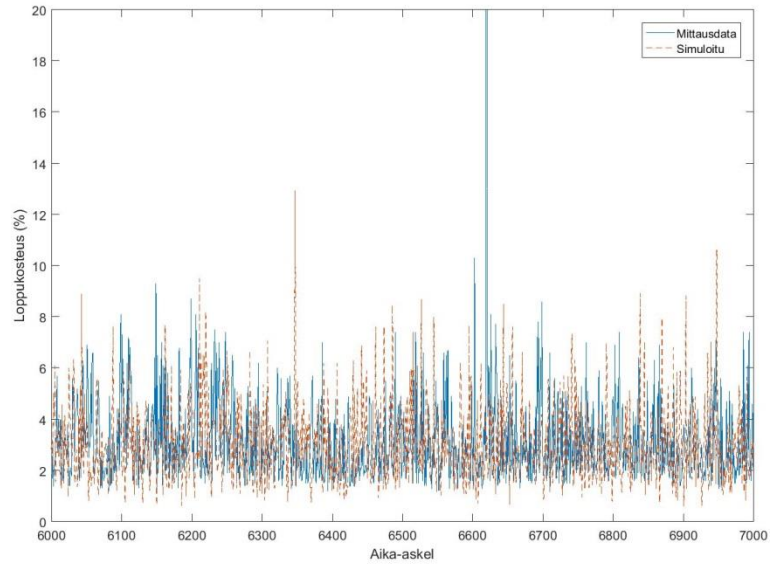


Kuva 5.3.3. Ote generoidun datan alkukosteudesta, kuivauslämpötilasta, kuivausilman kosteudesta ja kuivausajasta. Datan loppukosteus ja mallin ennustama loppukosteus.

Kuvasta 5.3.3. nähdään ote generoidusta datasta sekä 20 solmuisen neuroverkon laske-
masta loppukosteudesta. Malli pystyy hyvin ennustamaan loppukosteutta, mutta ennus-
teessa on pientä aaltomaisuutta. Lisäämällä neuroverkkoon solmuja saavutetaan tar-
kempi ennuste, mutta säädön suunnittelun kannalta mallin tarkkuus on riittävä 20 sol-
mulla.

5.4 Mallin arviointi

Malli pystyy riittävällä tarkkuudella laskemaan loppukosteuden annetuista lähtötiedoista. Mallia voidaan käyttää pätevyysalueella kuvaamaan viulun kuivauskoneen käyttäytymistä alkutietojen vaihdella. Mallin tarkkuus on riittävä säädön suunnittelun kannalta. Kuvassa 5.4.1. on vertailtuna tutkimuksen kohteena olevalta kuivauskoneelta ajonaikana kerätyn datan sekä samoilla kuivaus olosuhteilla mallin ennustaman loppukosteuden käyttäytyminen.



Kuva 5.4.1. *Todellisen prosessin mittausdata ja mallin antaman loppukosteuden vertailu.*

Kuvasta nähdään, että loppukosteuksien käyttäytyminen on yhtäläistä sekä simulaatio mallilla, että todellisella prosessilla. Todellisesta mittausdatasta on tiedossa kosteusluokka, mutta ei tarkkaa alkukosteutta, joten simulointimallissa on käytetty generoitua alkukosteustietoa. Tämän seurauksena kuvan kosteuspiikit ovat erilaisia. Kuvan 5.4.1. simuloinnissa on käytetty kosteinta kosteusluokkaa, jonka vaste on paras kolmesta eri kosteusluokasta. Tästä johtuen simuloinneissa käytetään kosteinta kosteusluokkaa.

Saatu malli ei kuvaa fyysisiä tapahtumia eikä ota huomioon kaikkia todellisessa kuivaajassa tapahtuvia muutoksia. Mallin tarkkuus riittänee kuitenkin säätöratkaisuiden vertailuun sekä ennustamaan kuinka kukin säätöratkaisu kykenisi ohjaamaan loppukosteuden käyttäytymistä kuivausolosuhteiden muuttuessa.

6. NOPEUSSÄÄTÖ

6.1 Tavoite

Säädön tavoitteena on kuivurin nopeuden avulla säätää viilun loppukosteutta ja pienentää loppukosteuden vaihtelua. Kuivauskoneelta saatavia mittauksia ovat: vyöhykkeiden lämpötilat sekä kuivausilman kosteudet ja koneen nopeus. Viilu kohtaisesti saadaan tietoon sijainti kuivauskoneessa ja loppukosteus. Mitoitusohjelmalla saatu data ei sisällä vyöhykekohtaisia tietoja eikä sijaintia koneessa.

Käytössä olevan datan pohjalta voidaan käyttää hyödyksi sekä takaisin- että myötäketyttyä säätöratkaisua. Myötäketytkennässä säädetään prosessia tähän vaikuttavien häiriömittauksien pohjalta. Myötäketytkennällä pyritään usein kompensoimaan häiriöiden vaikutusta prosessissa ennen kuin häiriö näkyy ulostulossa. Takaisinkytkennässä saadaan tietoa prosessin ulostuloista, jota verrataan haluttuihin ulostuloihin. Näin on mahdollista saada tarkempi säätötulos kuin pelkällä myötäketytyllä säädöllä.

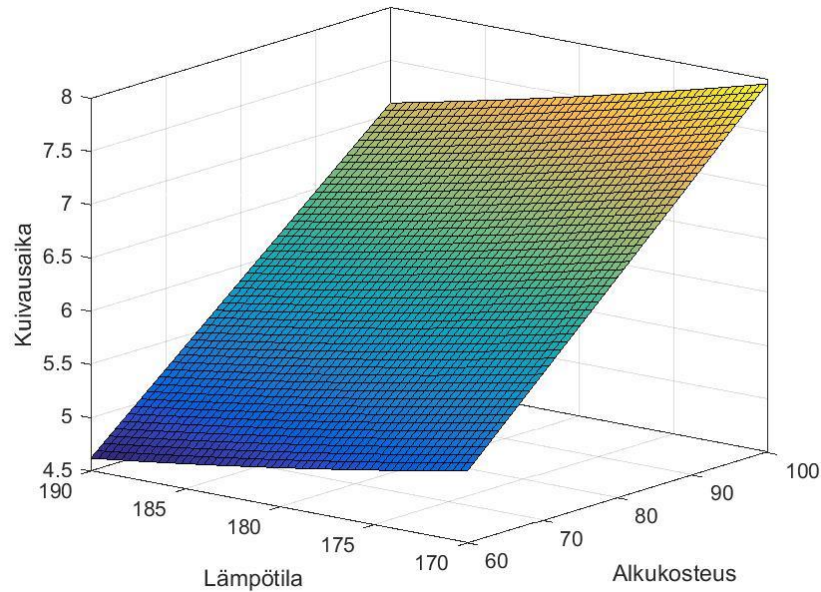
Viilun kuivauskoneen nopeussään tekee hankalaksi prosessin epälineaarisuus, pitkä viive sisään- ja ulostulevan viilun välillä sekä alkukosteuden suuri vaihtelu. Prosessissa esiintyvä viive on kuivauskoneen nopeuteen verrannollinen, jolloin viive muuttuu ajan aikana. Prosessissa esiintyy myös useita mittaamattomia häiriöitä, jotka vaikuttavat viilun loppukosteuteen. Viilun kuivauskone myös likaantuu ja vikaantuu käytössä, jonka seurauksena kuivauksen teho muuttuu ajan kuluessa. Kyseisistä tekijöistä johtuen säätimeltä vaaditaan robustisuutta sekä mallipohjaisten säätimien säädön tarkkuus heikenee mallin virheellisyyden johdosta.

6.2 Säätötavat

6.2.1 Nykyisen kaltainen

Nykyisessä nopeussäädössä kuivurin nopeus määritellään kuivauskoneen lämpötilan perusteella, jota hienosäädetään loppukosteus mittauksen pohjalta. Nykyisen kaltainen säätötapa voidaan alkukosteuden mittauksen pohjalta tehdä kahdella eri lähestymistavalla. Tieto alkukosteudesta voidaan ottaa huomioon korjauskertoimena nykyiselle lämpötila-nopeus käyrästölle. Toisessa lähestymistavassa muodostetaan uusi nopeuskäyrä sekä kuivauslämpötilan että alkukosteuden perusteella.

Ottamalla huomioon sekä kuivauslämpötila että alkukosteus saadaan aikaan tasomainen nopeuskuvaaja. Kuvassa 6.2.1. on esitettyä kolmiulotteinen nopeuskuvaaja.



Kuva 6.2.1. Lämpötilan ja alkukosteuden vaikutus viilun kuivausaikaan.

Kuvassa 6.2.1. esiintyvä taso on muodostettu yhtälöllä

$$v(M, T) = p_{00} + p_{10}M + p_{01}T + p_{11}MT + p_{02}T^2,$$

jossa v on kuivausaika ja p on painokertoimet sekä T on kuivausilman lämpötila. Muuttamalla parametrin p_{00} arvoa saadaan hienosäädettyä tason sijaintia kuten nykyisessäkin nopeussäädössä. Tällä parametrin p_{00} arvon muuntamisella voidaan lisätä säätimen robustisuutta tason mallinnusvirheen korjaamiseksi. Taso tulee määrittää viilun kuivauskoneen toiminta-alueelle, koska kuivausajan käyttäytyminen muuttuu kuivausolosuhteiden muuttuessa epälineaarisuudesta johtuen.

Säätimen virittämiseen tarvitaan taulukko, jossa on tiedossa haluttu kuivausaika erilaisilla alkukosteuksilla sekä lämpötiloilla. Taulukkoon voidaan sovittaa taso yllä olevan funktion mukaisesti. Säätimelle tulee myös määrittää vahvistukset korjauskertoimen voimakkuudelle. Tason asemaa voidaan korjata kuten nykyisessä säätötavassa, jossa käyrän asemaa korjataan viilujen ulostulokosteuksien keskiarvon perusteella.

Yhtälöön voidaan lisätä kertoimia uusien mittauksien pohjalta. Mittausdatassa on myös tieto kuivausilman kosteudesta. Dataan kuivausolosuhteiden ja kuivausajan välille sovitetaan funktio

$$v(M, T, A, r) = p_0 + p_1 * r^{p_2} * T^{p_3} * M^{p_4} * A^{p_5},$$

jossa r on tavoitekosteus ja A on kuivausilman kosteus.

6.2.2 PID-säätö

PID-säädön tavoitteena on viilujen loppukosteuden keskiarvon avulla säätää kuivaajan nopeus sopivaksi. Kuivaajan säätö painottuu suurelta osalta pelkälle I osalle, koska P ja D vahvistukset reagoivat hetkellisiin arvoihin. Pitkän viiveen seurauksena ei ole tarvetta reagoida nopeasti erosuureen muutoksiin, joten säädin tulee virittää hitaaksi, jotta vältetään liiallista nopeuden muuttamista. Derivointiosa saa aikaan nopeuteen suurta vaihtelua johtuen yksittäisten viilujen loppukosteuden suuresta vaihtelusta.

Perinteinen takaisinkytketty PID-säätörakenne ei ota huomioon alkukosteuden vaihtelua. Vaihtelu otetaan huomioon lisäämällä alkukosteuden vaikutus myötä-kytkettyyn PID-säätimeen, jossa erosuurena alkukosteuden keskiarvon ja kosteus-luokan keski-kosteuden väliltä. Samalla tekniikalla otetaan myös huomioon kuivaus-ilman kosteuden sekä lämpötilan muutos.

6.2.3 Myötäkytkentä

Myötäkytkennässä tavoitteena on reagoida alkukosteuden muuttumiseen ennen tämän vaikuttamista viilujen loppukosteuteen. Myötäkytkentä voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla, mutta tässä tutkimuksessa on testattu myötäkytkennän vaikutusta joko suoraan vahvistetulla kertoimella tai prosessimallin avulla. Viilun kuivauskoneen prosessimalli säätimelle on määritetty samoilla menetelmillä kuten koko prosessin mallintaminen. Säätimen prosessimalli on toteutettu sekä sumealla logiikalla että neuroverkolla.

Mallin pohjalta lasketaan kyseisille kuivausolosuhteille viilulle haluttu kuivausaika. Myötäkytketty säädin laskee kuivausajan alkukosteuden ja kuivauskoneen ilman-kosteuden sekä lämpötilan pohjalta. Mallin laskemaa kuivausaikaa korjataan säätövirheen pohjalta, jotta mallin aiheuttamaa virhettä saadaan pienennettyä. Alkukosteuden suurta vaihtelua suodatetaan laskemalla kuivausaika alkukosteuden liukuvan keskiarvon pohjalta. Keskiarvon liukumana käytetään puolen koneellisen alkukosteutta.

6.2.4 Smith-prediktori

Smith-prediktori ennustaa mallin pohjalta prosessin ulostulon ilman viivettä, jolloin voidaan ohjata prosessia ennustetun ulostulon pohjalta. Prosessimalli ennustaa kuivauskoneen ulostulon samojen sisääntulojen pohjalta ilman viivästystä kuten simulaatio mallissa käytetty kuivauskoneen malli.

Smith-prediktori on toteutettu simulaatiomallissa sekä neuroverkko että sumealla prosessimallilla. Prediktorissa käytetty prosessimalli ennustaa kuivauksen loppukosteuden alkukosteuden, kuivauslämpötilan, kuivaajan ilmakehän kosteuden sekä kuivausajan perusteella. Mallin virhettä korjataan vertaamalla ennustettua sekä todellista ulostulokosteutta.

6.2.5 Sumea säädin

Sumea säädin käyttää sumeata logiikkaa laskeakseen kuivausajan alkukosteuden, lämpötilan ja ilmankosteuden sekä erosuureen avulla. Alkukosteuden vaihdellessa suuresti kuivausaika lasketaan käyttäen hyödyksi liukuvaa keskiarvoa. Näin tulee myös huomioidua useampi koneeseen syötetty alkukosteus.

Simulaattorissa käytetty sumea säädin laskee kuivausajan lämpötilan, ilmankosteuden ja alkukosteuden ehtojen avulla. Viilun kuivausaikaa muutetaan erosuureen integraaliin pohjautuvien ehtojen nojalta. Integraalin avulla saadaan poistettua jatkuva säätövirhe säädöstä.

6.2.6 Malliprediktiivinen säädin

Malliprediktiivinen säädin laskee optimaalisen ohjauksen ennustehorisontin yli tietyllä säätöhorisontilla. Laskennassa käytetty ennustemalli on lineaarisoitu prosessimallista toimintapisteeseen. Säätimessä käytetty ennustehorisontti on koneen läpäisyn aika, jotta tulee laskettua mihin loppukosteuteen sisään tullut viilu päättyy. Alkukosteuden suuren vaihtelun seurauksena säätöhorisontin tulee olla lyhyt, koska suurta määrää askelia ei voida ennustaa etukäteen. Alkukosteuden suurta vaihtelua suodatetaan keskiarvoistamalla.

Simulaattorissa käytetyssä malliprediktiivisessä säätimessä mitattuina häiriöinä on alkukosteuden liukuva keskiarvo ja kuivausilman lämpötila sekä kosteus. Malli on lineaarisoitu toimintapisteen ympärille, jolloin säätimen toiminta-alue on rajattu epälinearisessa prosessissa. Malliprediktiivisessä säädössä otetaan huomioon kuivaajan nopeudesta aiheutuvat rajoitukset.

6.3 Säätimien viritys

Säätimien vahvistukset on viritetty iteroimalla simulaattoria tilanteessa, jossa alkukosteus vaihtelee keskiarvon 76,6 ympärillä keskihajonnalla 11,6 sekä alkukosteuteen ja kuivauslämpötilaan sekä ilmankosteuteen on lisätty sinimäinen värähtely. Vahvistukset lasketaan minimoimalla kustannusfunktiota

$$J = 10 * \left| r - \frac{\sum_{t=1}^N y(t)}{N} \right| + \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N e^2}{N}},$$

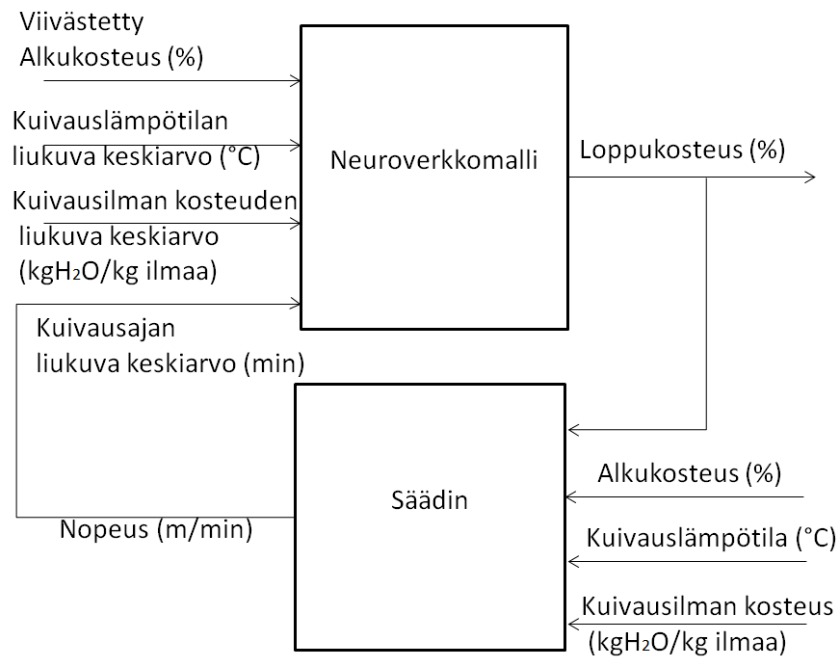
jossa N on mittauspisteiden lukumäärä, y on ajanhetken t ulostulo ja e on erosuureen arvo. Keskiarvo voi olla haluttu vaikkakin ulostulon arvo heilahtelisi referenssiarvon ympärillä. Tämän seurauksena jälkimmäisen termin tarkoitus on ottaa huomioon erosuureen värähtely. Kustannusfunktiossa keskiarvon kertoimena 10, koska keskiarvon virhe saa pienempiä arvoja kuin keskihajonnan termi.

Sumean säätimen ehdot lasketaan Matlabin genfis2 työkalulla, joka muodostaa sugeno tyyppisen sumean logiikan syötetyn datan pohjalle. Genfis2 ryhmittelee mittaukset algoritmien pohjalta ja luo näiden välille riippuvuudet ja ehdot. Tämän työkalun avulla tehdään sumeat prosessimallit myötäkytketyille sekä smith-prediktori säätimille. Nykyisen kaltaisen säätötavan yhtälöt sovitetaan dataan käyttämällä nlinfit –komentoa matlabissa. Nlinfit sovittaa parametrit epälineaarille funktiolle datan pohjalta.

7. SIMULAATIO

7.1 Simulaattori

Kuvassa 7.1.1. on simulointimallin rakenne esitettyinä.



Kuva 7.1.1. Lohkokaavioesitys simulointimallin rakenteesta.

Viilun kuivauskoneen simulointimallissa kuivausprosessin staattiseen malliin sisään-tulot ovat viivästetty koneen läpäisyajan aika-askeleiden verran. Tällöin ulostulevan viilun kosteus lasketaan viivästetystä alkukosteudesta sekä kuivausolosuhteiden liuku- van keskiarvon pohjalta. Keskiarvon liukuman suuruus on koneen pituus aika-askelissa. Simulaattorin aika-askel on syöttölaitteen tahti, eli jokaisella aika-askeleella kuivausko- neeseen menee yksi syöttöllinen viiluja sisään ja loppupäästä tulee ulos. Simulaatiomal- lissa oletetaan:

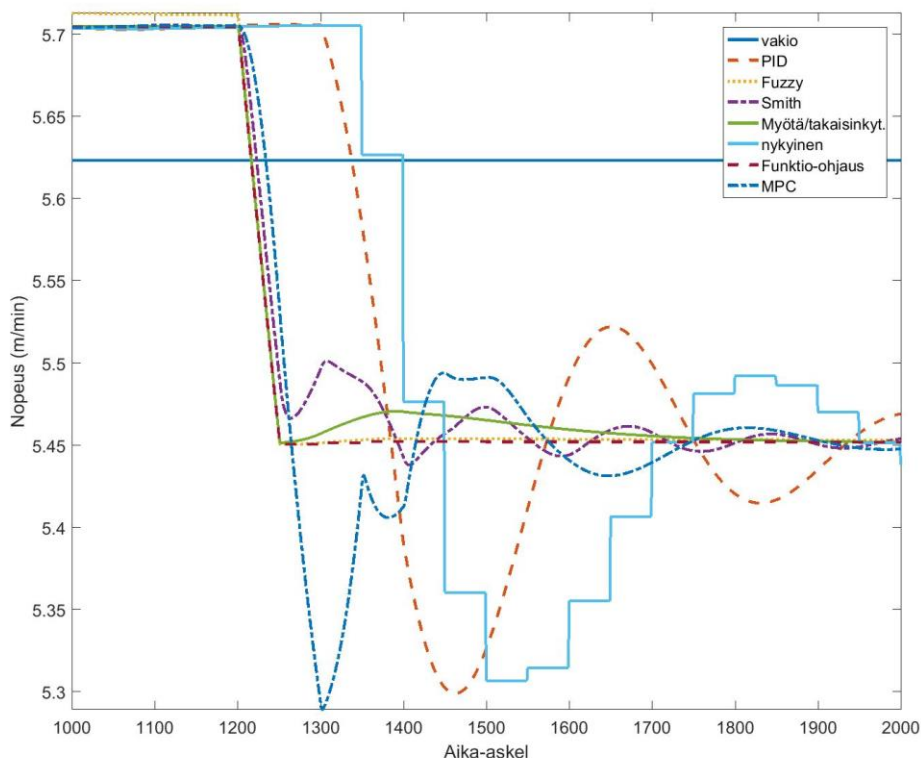
- Koneessa olevan vakio täyttöaste.
- Kuivauskone pyörii ilman taukoja.
- Koneen nopeuden olevan asetusarvon suuruinen.
- Mittaukset ovat ideaalisia.
- Viilut kuivuvat identtisissä olosuhteissa yhtäläisesti.
- Kuivauskoneen läpäisy aika on 100 syöttöä.

Aika-askeleen ollessa syöttölaitteen syöttötahti saadaan viive kuivaajan yli vakioitua simulaatiossa. Koneen syöttötahti on riippuvainen kuivauskoneen nopeudesta. Nopeuden ollessa suuri myös syöttötahti on tiheä, jolloin aika-askel sekunti maailmassa on lyhyt.

Simulaattorissa säätimet laskevat kuivausajan mittausten pohjalta. Kuivausaika muutetaan kuljettimien nopeudeksi kuivurin kuumanosuuden pituuden pohjalta. Kuivausnopeuden muutos on rajoitettu per aika-askel, jotta ei tule liiallista nopeuden vaihtelua kuivauskoneelle.

7.2 Simulointitulokset

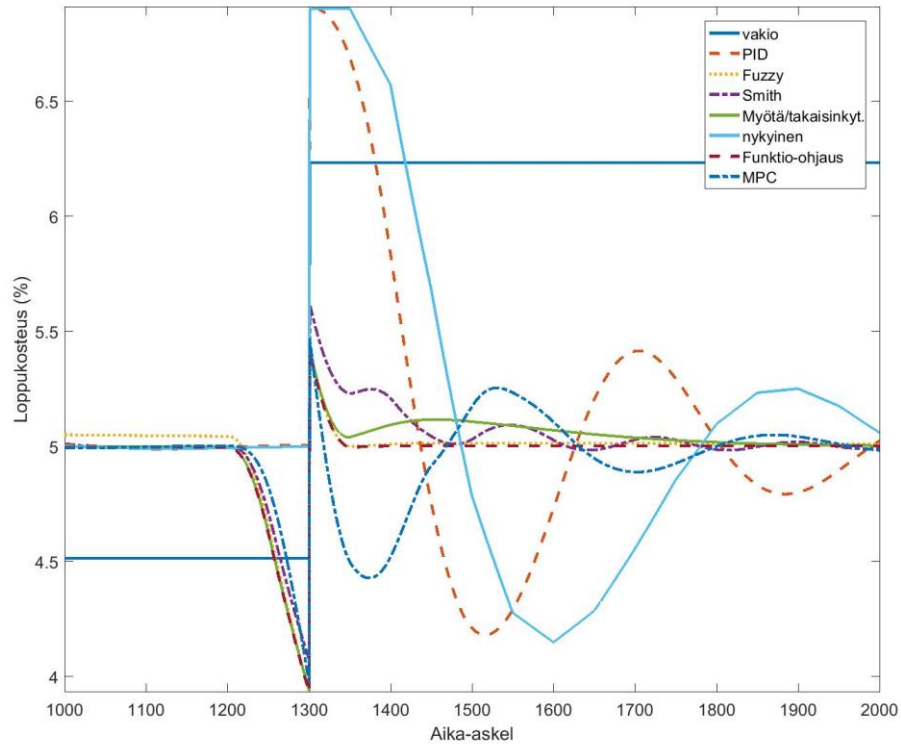
Kuvien 7.2.1. ja 7.2.2. tapauksessa kaikki kuivausolosuhteet pysyvät vakioina, mutta alkukosteuteen tulee askelmainen muutos ajanhetkellä 1200.



Kuva 7.2.1. Nopeuden käyttäytyminen eri säätöratkaisuilla alkukosteuden kasvaessa askelmaisesti hetkellä 1200.

Kuvasta 7.2.1. nähdään alkukosteuteen perustuvan säädön hyöty verrattuna puhtaasti takaisinkytkettyihin säätötapoihin. Pelkästään takaisinkytkettyjä säätötapoja ovat PID-säädin ja nykyisin käytössä oleva säädin. Alkukosteuden huomioon ottavat säätötavat rupeavat muuttamaan kuivaajan nopeutta heti askelmaisen alkukosteuden muutoksen jälkeen, mutta takaisinkytketyillä säätö tapahtuu vasta viiveellä, kun askel näkyy loppu-

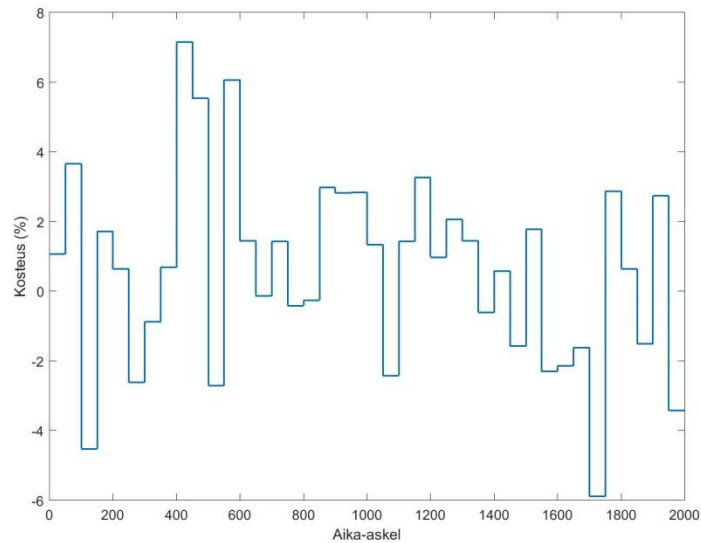
kosteudessa. Kuvasta 7.2.2. nähdään kuinka askel alkukosteudessa näkyy loppukosteudessa.



Kuva 7.2.2. Loppukosteuden käyttäytyminen alkukosteuden kasvaessa askelmaisesti eri säätötavoilla.

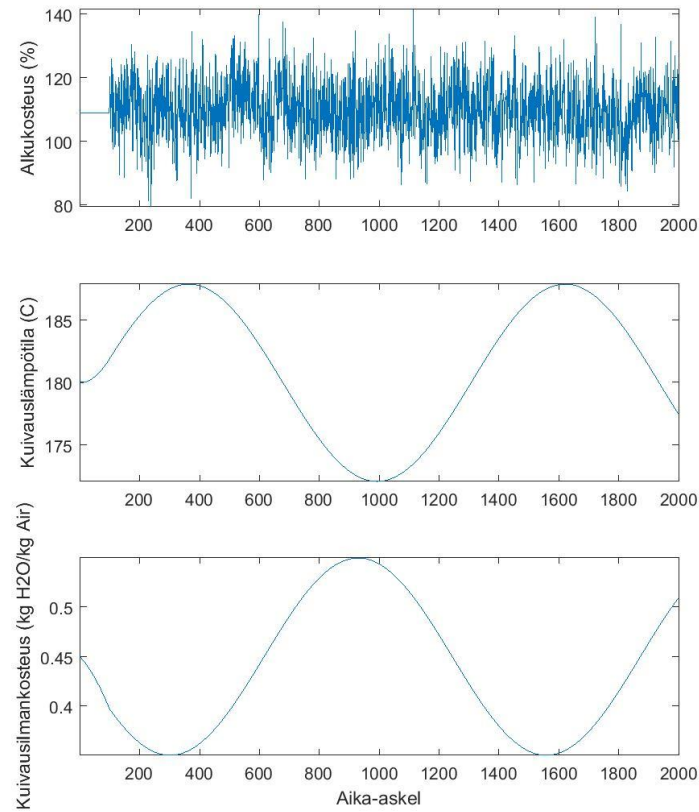
Alkukosteuden kasvaessa tarvitsee kuivausajan nousta, jotta saavutetaan sama loppukosteus kuin aikaisemmin. Kuvasta 7.2.2. on nähtävissä, että alkukosteuden huomioon ottavilla säätötavoilla viilujen kosteus pysyy alhaisemmalla tasolla verrattuna loppukosteuteen perustuviin säätötapoihin. Säädin muuttaa nopeutta heti alkukosteuden muuttuessa jonka seurauksena jo koneessa olevat pienemmän kosteuden viilut kuivuvat liikaa, mutta liian kosteiden viilujen määrä pienenee merkittävästi.

Simuloinneissa alkukosteus on normaalijakautunut satunnais signaali, jonka keskiarvo on 109,3 ja varianssi 77,1. Keskiarvo ja varianssi on laskettu kuvan 4.2.3. datan pohjalta. Kosteusjakauma on jaettu kolmeen kosteusluokkaan. Satunnais signaaliin on lisätty 50 viulun välein vaihtuva satunnainen häiriö. Kuvassa 7.2.3. on esitettyä tämä askelmainen häiriö.



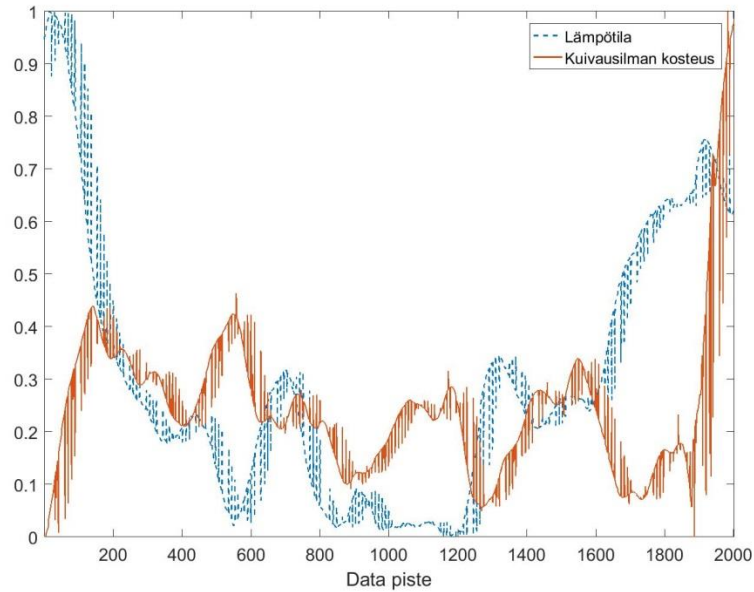
Kuva 7.2.3. Askelmainen häiriö alkukosteuteen kuvaamaan eri pölleistä tulleita viiluja.

Kuvan 7.2.3. satunnaisella häiriöllä kuvataan eri pölleistä tulevien viilujen alkukosteuden vaihtelua. Loppukosteuden haluttu arvo on 5 %, koska kuivausaika kasvaa merkittävästi, kun loppukosteus pienenee. Suuremmalla loppukosteuden keskiarvolla saadaan kasvatettua kapasiteettia ja pienennettyä energiankulutusta, mutta liian märkiä viiluja tulee välttää. Kuvassa 7.2.4. on alkukosteuden ja kuivaajan lämpötilan sekä il-mankosteuden kuvaajat.



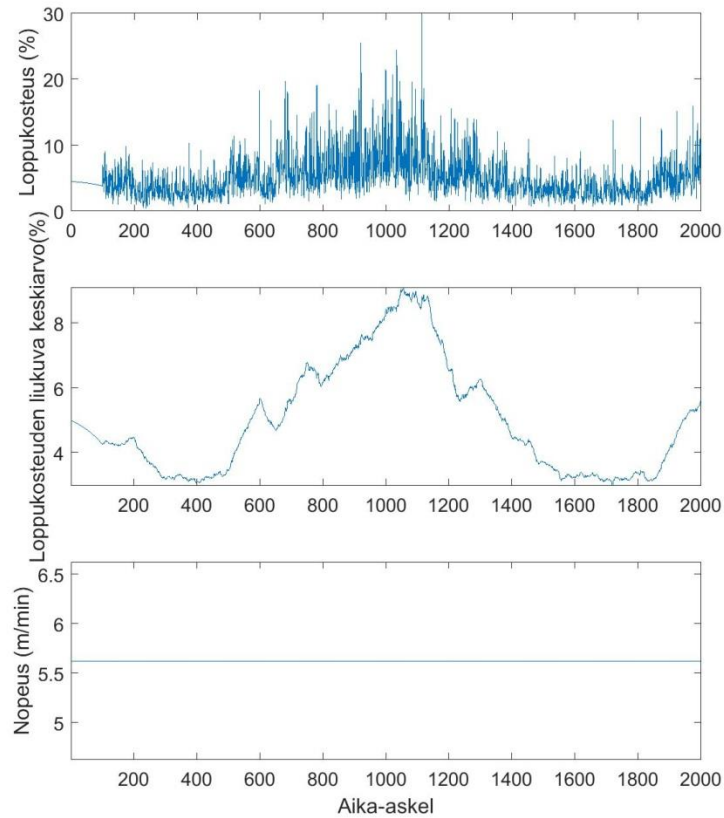
Kuva 7.2.4. Simuloinneissa käytetty alkukosteuden ja kuivauslämpötilan käyttäytyminen.

Kuvaajan alussa alkukosteus on vakio, koska alkukosteus on viivästetty vastaamaan hetkellisen ulostulon alkukosteutta. Kuivaus lämpötila ja ilmankosteus muuttuvat sinimäisesti vastakkaisessa vaiheessa. Kuvassa 7.2.5. on koneen mittausdatasta kuivausilman kosteus ja lämpötila skaalattuna.



Kuva 7.2.5. Viilun kuivauskoneen lämpötila ja kuivausilman kosteus skaalattuna ajon aikana.

Kuvasta nähdään, että lämpötilan laskiessa kuivausilman kosteus nousee ja toisinpäin. Kuivauskoneessa säädetään molempia omilla säätimillä. Simulaatiossa ei ole kyseisiä suureita säädetty vaan ne käyttäytyvät mallin sisääntulon mukaisesti. Kun viilun kuivauskoneen nopeutta pidetään vakiona, käyttäytyy viilun loppukosteus kuvan 7.2.6. mukaisesti.

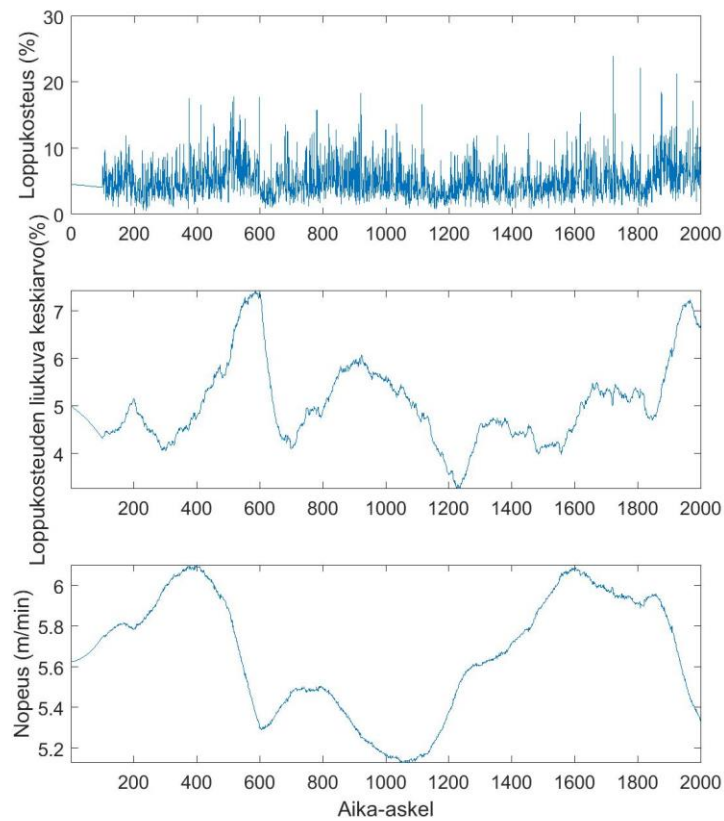


Kuva 7.2.6. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo kuivaajan nopeuden pysyessä vakiona.

Loppukosteuden suuri vaihtelu on seurausta alkukosteuden suuresta vaihtelusta. Kuivaajan sisällä on kerrallaan suuri joukko viiluja, joiden kosteus vaihtelee. Tämän seurauksena loppukosteuden vaihtelua ei saada tasoitettua. Kuivaajan nopeuden pysyessä vakiona lämpötilan ja kosteuksien vaihtelut näkyvät loppukosteuden keskiarvossa tämän aaltoiluna. Loppukosteuden käyttäytymistä voidaan havaita myös, että loppukosteuden keskiarvon ollessa pieni myös loppukosteuden hajonta on pienempää kuin suurilla kosteuksilla. Tämä on seurausta kuivumisen epälineaarista luonteesta.

7.2.1 PID-säätö

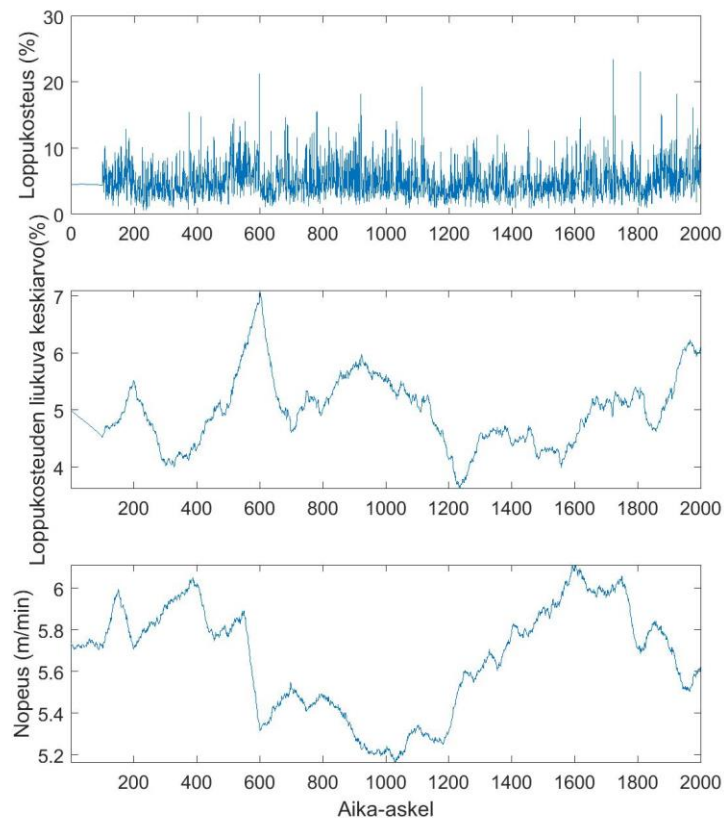
Kuvassa 7.2.7. on viilun loppukosteuden käyttäytyminen PID-säädöllä.



Kuva 7.2.7. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus PID-säätimellä ohjattuna.

PID-säätimellä ohjattuna viilun loppukosteus ei seuraa haluttua asetusarvoa paremmin kuin vakionopeudella saadut tulokset. Säädin pyrkii korjaamaan keskiarvo kosteuden putoamista nostamalla nopeutta, jolloin koneessa olevat kosteamat viilut jäävät märemmäksi jota kompensoidaan vastakkaisella toimenpiteellä. Tämä saa aikaan kuivaajan nopeuden sekä loppukosteuden keskiarvon aaltoilun.

PID-säätimen rinnalle lisätään alkukosteuden keskiarvon ja alkukosteuden ero-suureeseen perustuva P-säädin, jonka tarkoituksena on huomioida alkukosteuden muutokset nopeudessa. Myötäkytkentään lisätään myös P-säätimet jotka ottavat huomioon kuivausilman kosteuden sekä lämpötilan muutoksen keskiarvoon nähden. Kuvassa 7.2.8. on esitettyä myötäkytketyn PID-säätimen säätötulos.

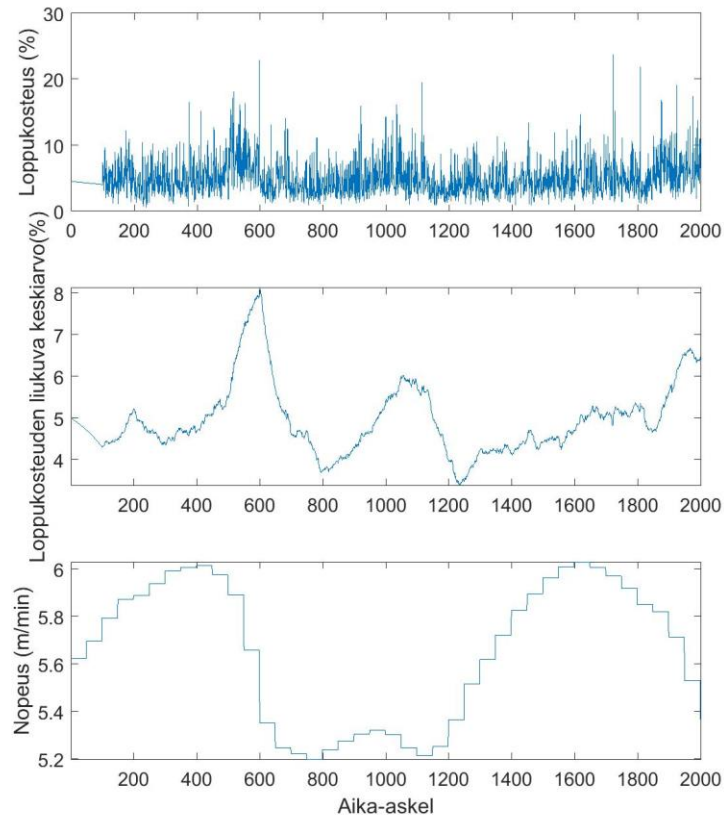


Kuva 7.2.8. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus PID-säätimellä ja myötäketyllä P-säätimellä ohjattuna.

Yksinkertaisen myötäketyllä avulla saadaan säätötulosta parannettua verrattuna pelkkään PID -säätöön. Tämän säätöratkaisun tulos on kuitenkin heikompi verrattuna myöhemmin luvussa esitettyihin kehittyneempiin menetelmiin.

7.2.2 Nykyinen ja nykyisen kaltaiset

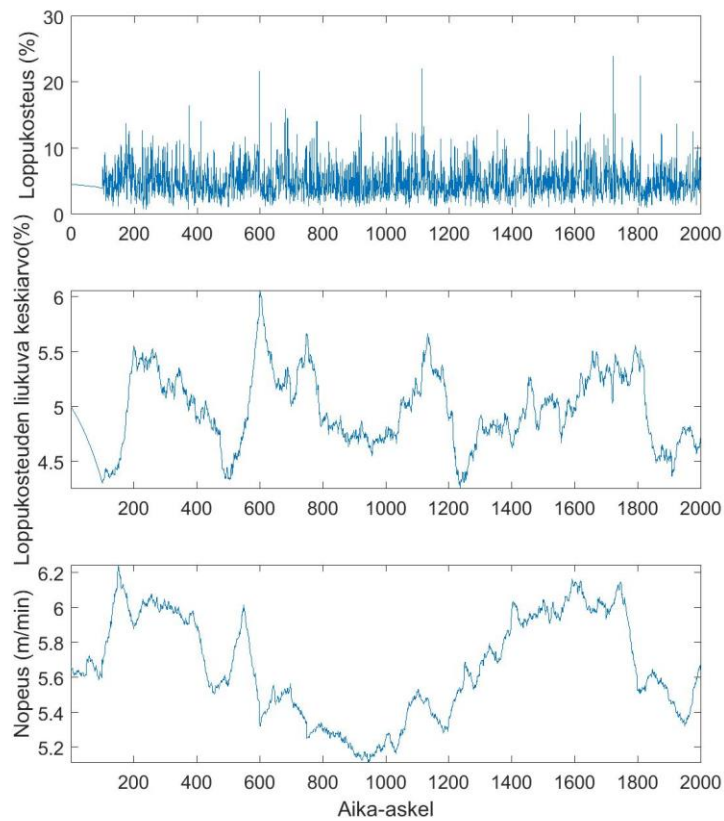
Nykyinen säätöratkaisu ottaa huomioon lämpötilan muutokset, mutta alku- eikä ilman- kosteuden muutosta oteta huomioon. Nykyisen säätötavan säätötulos on esitettyinä kuvassa 7.2.9.



Kuva 7.2.9. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen nykyisellä säätötavalla.

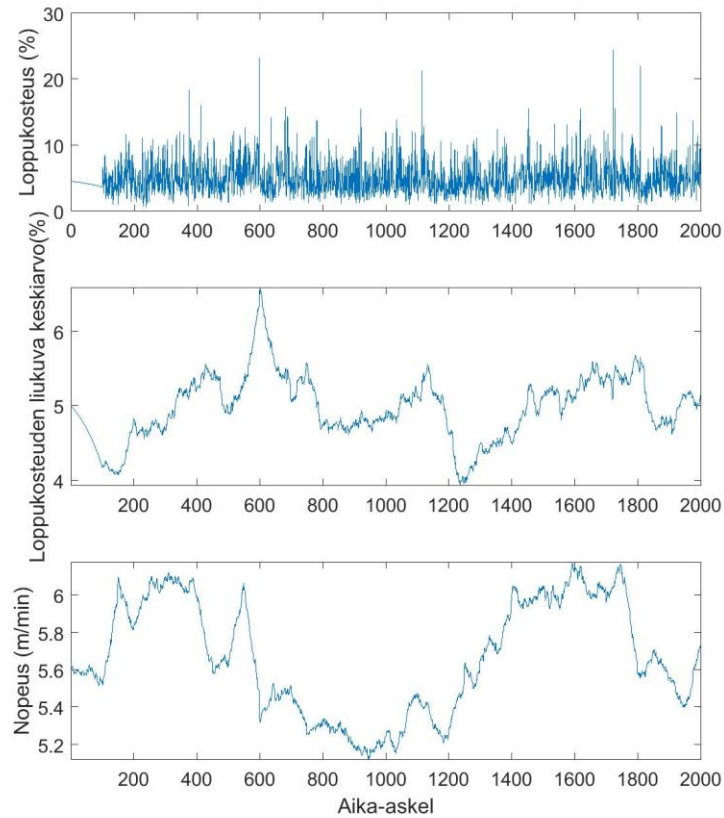
Nykyisen säätöratkaisun loppukosteus pyrkii seuraamaan asetusrvoa, mutta häiriöistä johtuvia piikkejä loppukosteudessa näkyy selvästi. Nopeuskäyrän askelmaisuus johtuu nykyisessä säätötavassa käytetystä säätövälistä. Nopeuskäyrä ja nopeus lasketaan tietyn syöttömäärän välein, jolloin nopeuden muutos ei ole yhtä vaihtelevaa kuin jatkuvatoimisilla säätimillä.

Nykyisen säätöratkaisun rinnalle voidaan lisätä yksinkertainen P tyyppinen säädin myötäkennäksi, jolloin kuivausolosuhteet tulee huomioiduksi. Kuvassa 7.2.10. on säätötulos, kun nykyisen säätimen rinnalle on lisätty samanlainen säädin kuin PID-säätimelle.



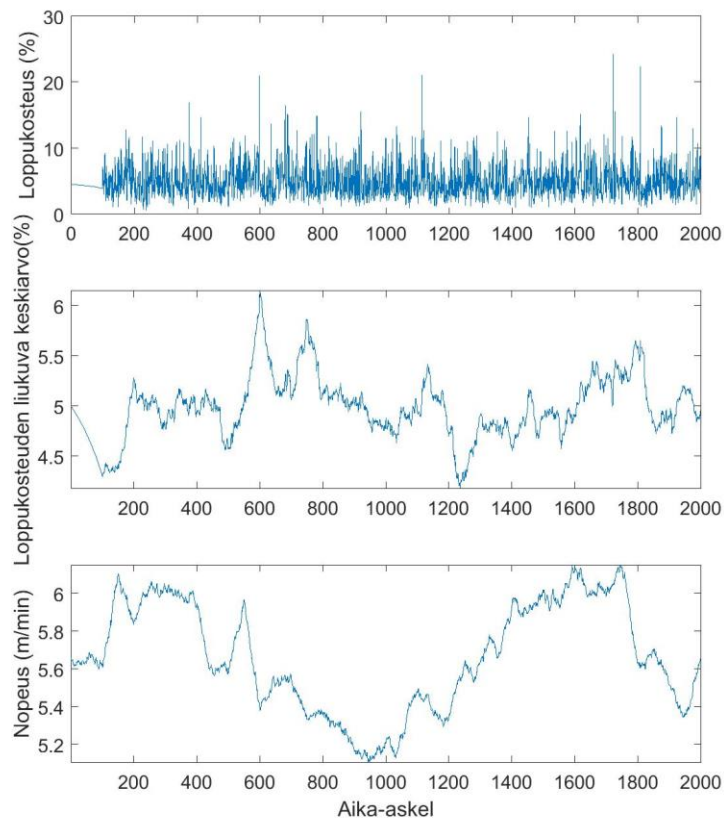
Kuva 7.2.10. Viulun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen nykyisellä säätötavalla, jossa rinnalla *P* tyyppinen myötäkitykentä.

Kuvasta 7.2.10. nähdään, että myötäkitykentä toimii nykyisen säätöratkaisun rinnalla ja loppukosteuden liukuvassa keskiarvossa seuraa tavoitearvoa tarkemmin kuin ilman myötäkitykentää. Jatkuva alkukosteuden seuraaminen näkyy myös nopeusohjauksessa, joka ilmenee suuritaajuisena nopeuden vaihteluna. Kuvan 7.2.11. tulokset on saatu lisäämällä nykyisen säätötavan nopeuskäyrä tasomaiseksi uudella alkukosteus ulottuvuudella.



Kuva 7.2.11. Viulun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeuden käyttäytyminen tasomaisella säätötavalla.

Tasomaisella ohjaustavalla loppukosteuden keskiarvo seuraa tavoiteltua 5 %:n keskiarvoa, mutta seuranta ei ole yhtä tarkkaa kuin myötäketyllä kytkennällä. Kuvassa 7.2.12. on otettu huomioon myös kuivausilmankosteuden vaikutus lisäterminä yhtälöön.



Kuva 7.2.12. Nykyisen kaltaisen säätimen säätötulos, kun huomioon on otettu alku- ja ilmankosteuden sekä kuivauslämpötilan vaihtelu.

Ottamalla huomioon myös kuivausilmankosteus saadaan säätötulosta parannettua entisestään ja säädin pystyy seuraamaan haluttua asetusarvoa ilman suuria piikkejä loppukosteuden keskiarvossa. Taulukossa 7.2.1. on vertailtuna nykyisen ja nykyisen kaltaisten säätötapojen tuloksia.

Taulukko 7.2.1. Eri säätöratkaisuiden säätötuloksia.

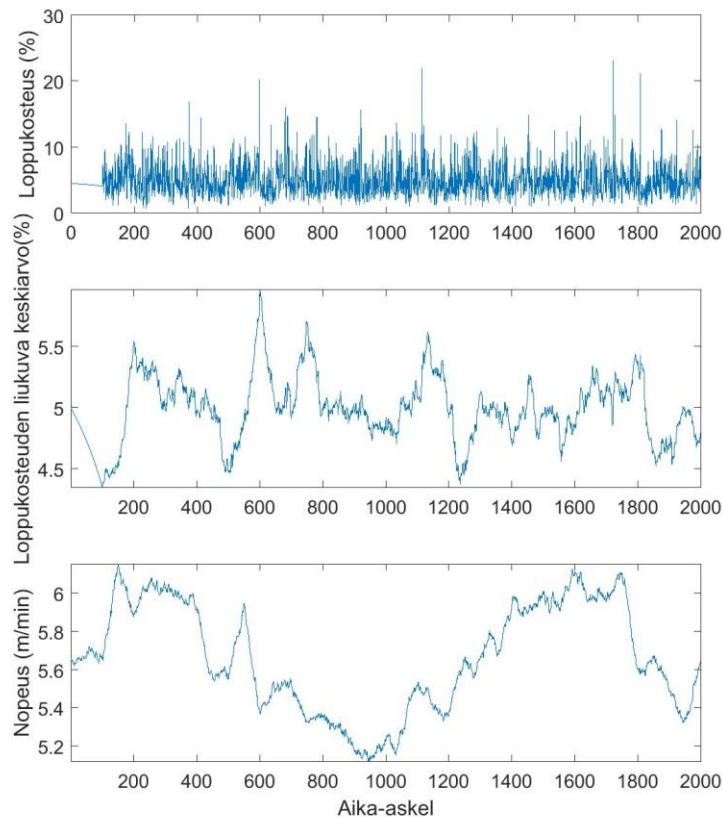
Säätötapa	Nykyinen	Taso-ohjaus	Funktio-ohjaus	Nykyinen + PID
Keskikosteus (%)	5,06	5,06	5,06	5,00
Keskihajonta	2,89	2,69	2,66	2,64
IAE	1120,72	500,52	363,84	421,63
Keskimääräinen kuivausaika (min)	8,24	8,22	8,22	8,23
Uudelleenkuivattavien osuus (%)	1,00	0,60	0,60	0,60

Taulukosta 7.2.1. nähdään, että alkukosteus huomioon ottamisella saadaan keskihajontaa pienennettyä, joka näkyy loppukosteudessa piikkien tasoittumisena. Taso-ohjaus

tyyppisellä ratkaisulla säätövirheen IAE (Integral absolute error) luku pienenee verrattuna nykyiseen säätötapaan. Ottamalla huomioon myös kuivausilman kosteuden muutos funktiossa saadaan säätöä tarkennettua entisestään. Tarkimman säätötuloksen simuloinnissa antaa funktio-ohjaus. Uudelleen kuivattaviksi lasketaan viilut, joiden loppukosteus ylittää 15 %:n rajan.

7.2.3 Myötäkytkentä

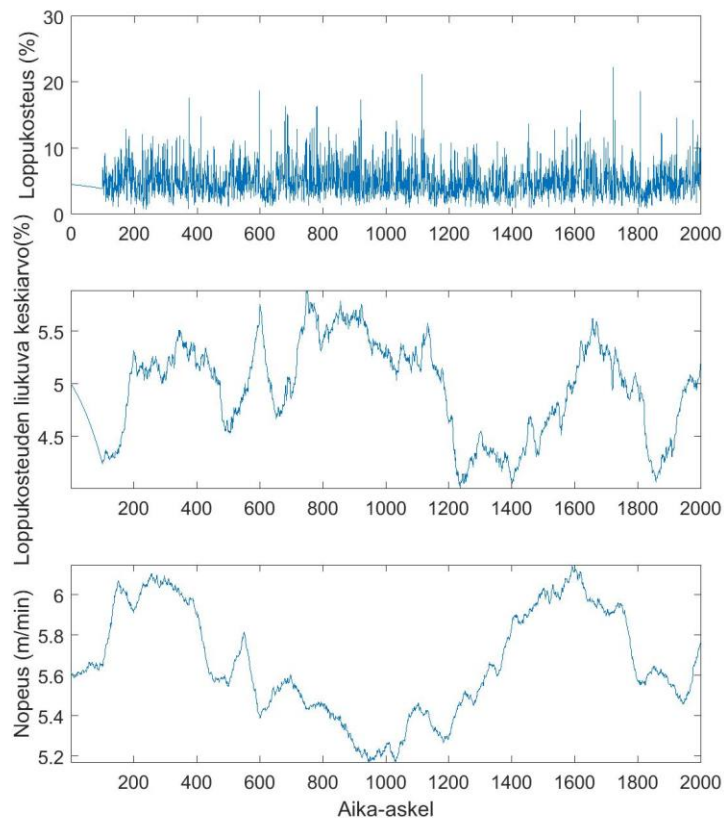
Kuvassa 7.2.13. on neuroverkolla toteutetun myötäkytketyn ohjauksen säätötulokset.



Kuva 7.2.13. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus neuroverkkopohjaisella myötäkytkennällä.

Malliin perustuvalla myötäkytkennällä asetusravon seuranta onnistuu hyvin. Alkukosteuden suurta vaihtelua ei saada suodatettua loppukosteudesta, mutta keskiarvon pitäminen halutulla tasolla onnistuu. Myötäkytketyssä säätötavassa nopeuden vaihtelu on taajuudeltaan tiheätä alkukosteuden muuttumisen seurauksena.

Kuvassa 7.2.14. on säätötulokset myötäkytkennässä käytetyn mallin ollessa toteutettuna sumealla logiikalla.

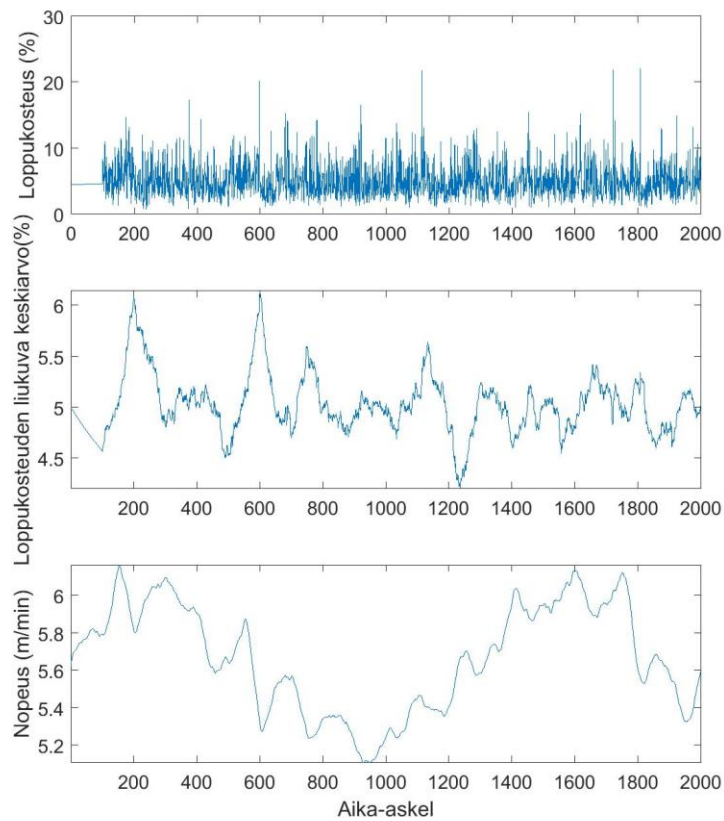


Kuva 7.2.14. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus sumealla myötäktykennällä.

Kuvasta nähdään, että sumealla logiikalla toteutettu myötäktykentä onnistuu pitämään loppukosteuden liukuvan keskiarvon asetusarvossaan. Sumealla logiikalla toteutetun myötäktykennällä asetusarvon seuranta ei onnistu yhtä hyvin kuin neuroverkolla toteutettu. Malliin perustuvalla myötäktykennällä saavutetaan parempi lopputulos kuin pelkällä erosuureeseen perustuvalla myötäktykennällä. Mallipohjaisella myötäktykennällä saadaan otettua huomioon kuivausolosuhteet ja näin kompensoitua olosuhteista johtuvaa epälineaarisuutta.

7.2.4 Smith-prediktori

Neuroverkkopohjaisen smith-prediktorin loppukosteuden, loppukosteuden liukuvan keskiarvon ja nopeuden kuvaaja on esitettyä kuvassa 7.2.15.

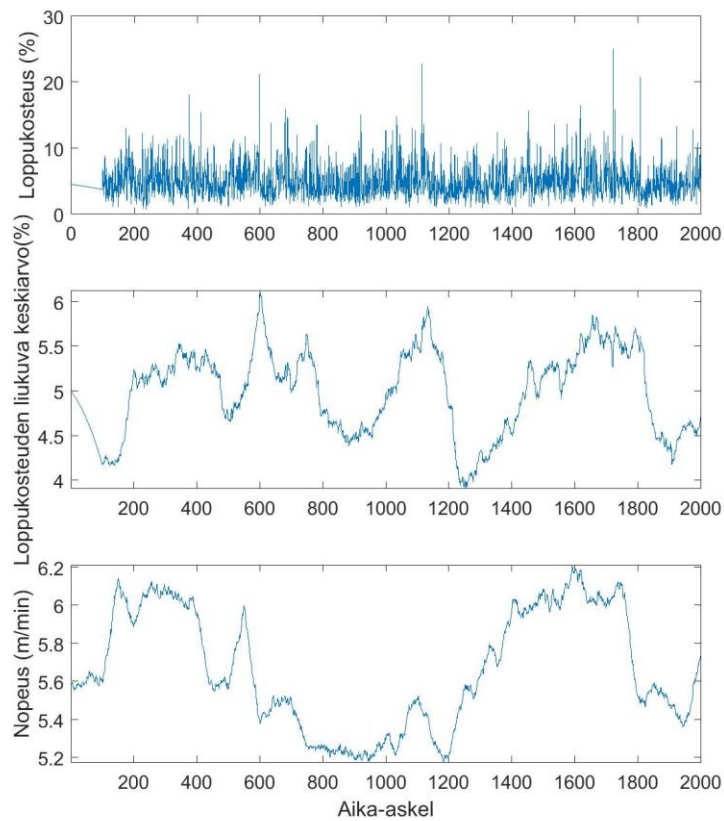


Kuva 7.2.15. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus neuroverkkopohjaisella smith-prediktorilla.

Kuvasta 7.2.15. nähdään, että smith-prediktori kykenee seuraamaan asetuservoa hyvin. Kuivaajan nopeuden muutoksessa ei ole havaittavissa samanlaista suuritaajuista piikkikyyttä kuin myötäkytketyssä säätöratkaisussa. Sumealla logiikalla toteutetulla smith-prediktorilla saavutetaan samanlainen säätötulos kuin neuroverkkopohjaisella.

7.2.5 Sumea säätö

Kuvassa 7.2.16. on sugeno tyyppiseen sumeaan logiikkaan pohjautuvalla säätötavalla saadut simulointitulokset.

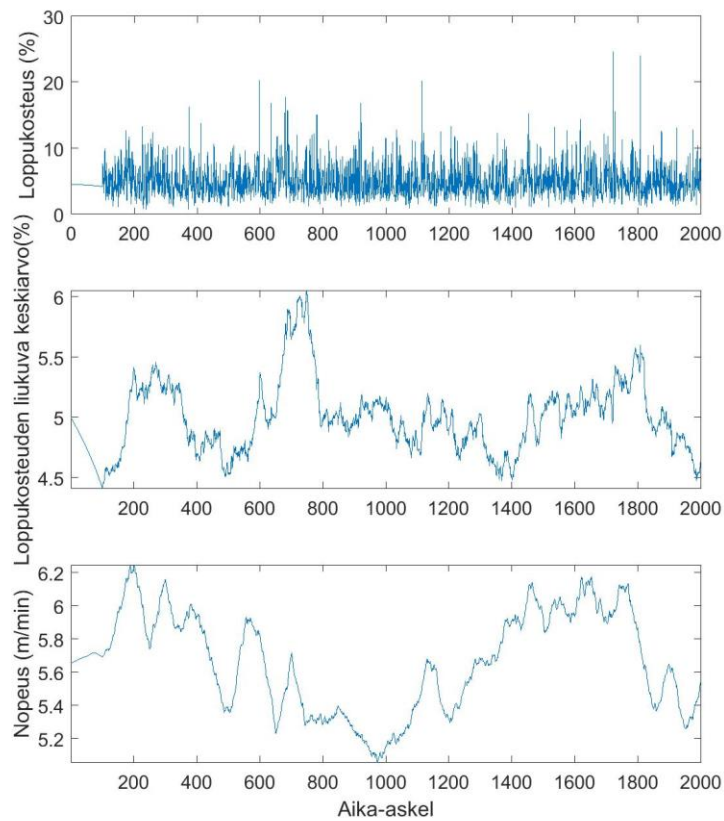


Kuva 7.2.16. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuva keskiarvo sekä nopeus sumealla säätimellä.

Kuvasta 7.2.16. nähdään, että sumealla logiikalla toteutettu säädin pystyy seuraamaan asetusrvoa, mutta loppukosteuden liukuva keskiarvo vaihtelee suuremmalla amplitudilla kuin smith-prediktorilla tai myötäkynällä. Kuivauskoneen telojen pyörimisnopeuden muutokset ovat jyrkempiä kuin mallipohjaisilla säätöratkaisuilla.

7.2.6 Malliprediktiivinen säätö

Malliprediktiivisen säädön simulointitulokset on esitetty kuvassa 7.2.17.



Kuva 7.2.17. Viilun loppukosteus ja loppukosteuden liukuvan keskiarvo sekä kuivaajan nopeuden käyttäytyminen malliprediktiivisellä säätötavalla.

Kuvasta 7.2.17. on havaittavissa, että lineaarisella malliprediktiivisellä säädöllä pystytään seuraamaan asetusarvoa onnistuneesti. Malliprediktiivisellä säädöllä pystytään pitämään loppukosteuden liukuva keskiarvo lähellä haluttua 5 %:n tasoa. Kuivaajan nopeuden asetusarvo vaihtelee suuresti.

8. TULOSTEN KÄSITTELY

8.1 Tulosten kokoaminen

Seuraavaksi esitetyissä taulukoissa on kerättyä erilaisten simulointitilanteiden tulokset eri säätötavoilla. Vertailtavista säätötavoista on jätetty pois PID-säädin jonka rinnalla myötäktykenta, koska sillä ei saavutettu merkittävää hyötyä. Taulukkoon on kerättyä ulostulevien viilujen keskikosteus ja keskihajonta. Säädön onnistumisen mittarina käytetään IAE lukua

$$IAE = \int |e|,$$

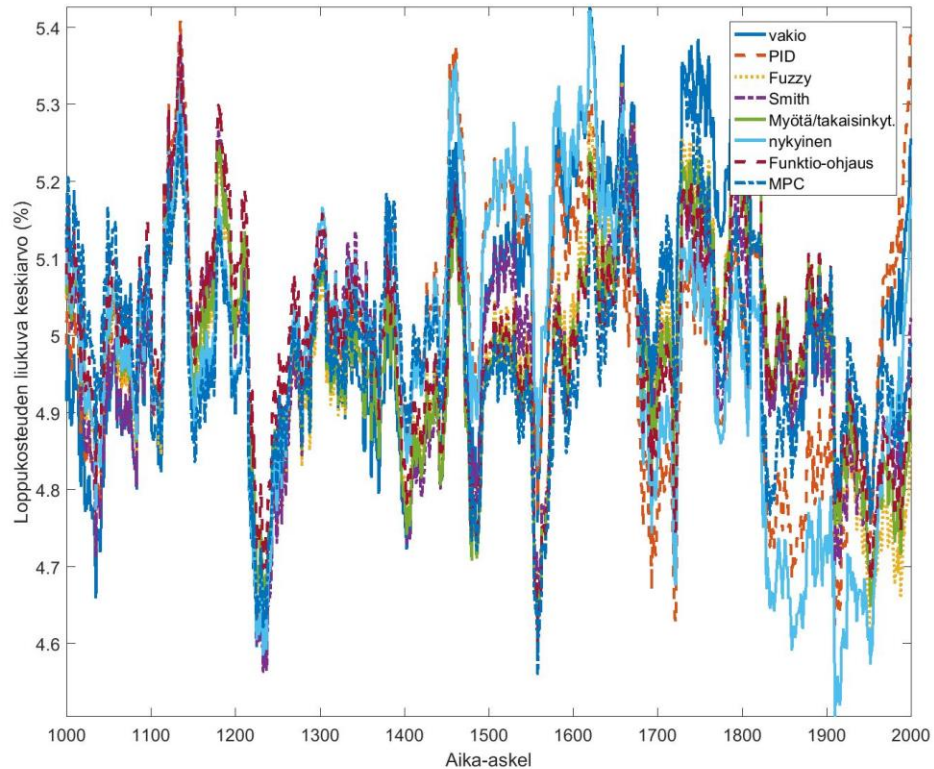
jossa e on ero suure, joka on laskettu liukuvan keskikosteuden ja referenssin erotuksena. Taulukossa on myös kirjattuna ylös keskimääräinen kuivausaika sekä liian märkien viilujen osuus (Redry). Viilu lasketaan liian märäksi, jos loppukosteus ylittää 15 %:n rajan. Taulukossa 8.1.1. on kuvattuna simulointitulokset eri säätötavoilla alkukosteuden ollessa satunnaisesti hajautunutta ja kuivausolosuhteet pysyvät vakiona.

Taulukko 8.1.1. Eri säätötapojen viilun loppukosteuden mitta-arvoja alkukosteuden ollessa täysin satunnaisesti hajautunutta.

Säätötapa	Vakio	PID-säädin	Nykyinen	Funktio-ohjaus	Sumea säädin
Keskikosteus (%)	5,02	5,01	4,98	5,02	4,99
Keskihajonta	2,61	2,61	2,59	2,60	2,59
IAE	184,69	185,62	230,44	143,44	156,40
Keskikuivaik (min)	8,18	8,18	8,19	8,18	8,18
Redry(%)	0,60	0,60	0,60	0,53	0,53
Säätötapa	Myötä- ja takaisinkytketty	Sumea myötäktykentä	Smith-prediktori	Sumea Smith-prediktori	MPC
Keskikosteus (%)	5,01	5,00	5,01	5,00	4,99
Keskihajonta	2,60	2,59	2,60	2,60	2,60
IAE	149,63	156,16	153,48	175,39	225,06
Keskikuivaik (min)	8,18	8,18	8,18	8,18	8,19
Redry(%)	0,53	0,53	0,53	0,47	0,60

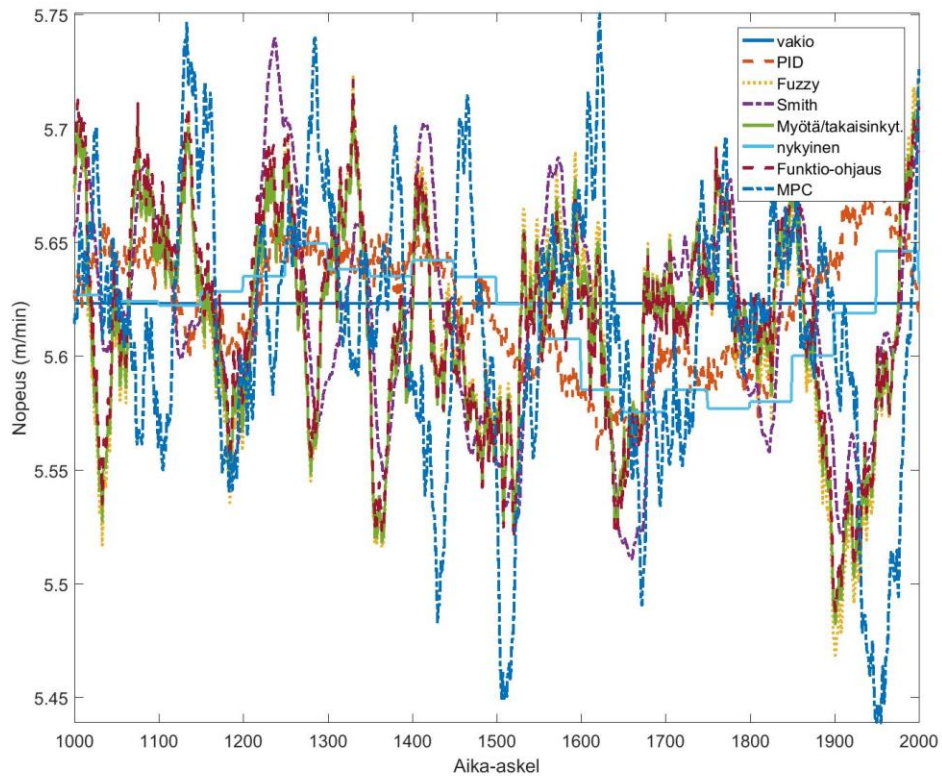
Taulukosta nähdään, että eri säätötavoilla ei ole suurta vaikutusta viilun loppukosteuden käyttäytymiseen, kun alkukosteuden vaihtelussa ei ole havaittavissa säännönmukaisuut-

ta. Säättövasta riippumatta keskimääräinen kuivausaika on lähestulkoon sama, jolloin myös viilujen kuivuminen on yhtäläistä. Uusilla säättötavoilla, poislukien MPC, saavutetaan pienempi säätövirhe kuin vakio ohjauksella. Näillä säätöratkaisuilla myös uudelleenkuivattavien viilujen osuus on hieman pienempi. Kuvassa 8.1.1. on loppukosteuden liukuva keskiarvo taulukon 8.1.1. tilanteessa.



Kuva 8.1.1. Loppukosteuden liukuva keskiarvo alkukosteuden ollessa satunnaisesti hajautunutta.

Kuvasta 8.1.1. nähdään, että kaikilla säättötavoilla loppukosteus käyttäytyy lähes yhtäläisesti. Nykyisellä, PID ja vakionopeuksisella säättötavalla on huomattavissa suurempaa vaihtelua loppukosteuden liukuvassa keskiarvossa verrattuna muihin säättötapoihin. Kuvassa 8.1.2. on kuivauskoneen nopeuden käyttäytyminen samassa tilanteessa.



Kuva 8.1.2. *Kuivaajan nopeuden käyttäytyminen eri säätöratkaisuilla alkukosteuden ollessa satunnaisesti hajautunutta.*

Kuvasta 8.1.2. nähdään, että nopeuden heiluminen on voimakasta keskiarvon ympärillä kaikilla alkukosteuteen perustuvilla säätötavoilla. Pelkästään takaisinkytketyillä nopeuden vaihtelu on rauhallisempaa, koska alkukosteuden vaihtelu ei näy loppukosteuden keskiarvossa yhtä merkittävästi.

Taulukossa 8.1.2. on taulukoituna simulointitulokset alkukosteuden vaihdellessa sinimäisesti sekä muut kuivausolosuhteet pysyvät vakiona.

Taulukko 8.1.2. Eri säätötapojen simulointituloksia alkukosteuden vaihdellessa sinimäisesti. Muut kuivausolosuhteet pysyvät vakioina.

Säätötapa	Vakio	PID-säädin	Nykyinen	Funktio-ohjaus	Sumea säädin
Keskikosteus (%)	4,93	5,05	4,96	5,01	4,96
Keskihajonta	2,68	2,71	2,80	2,61	2,58
IAE	882,29	574,29	1155,70	203,91	211,35
Keskikuivaik (min)	8,18	8,15	8,18	8,15	8,16
Redry(%)	0,53	0,67	0,67	0,53	0,53
Säätötapa	Myötä- ja takaisinkytketty	Sumea myötäkytkentä	Smith-prediktori	Sumea Smith-prediktori	MPC
Keskikosteus (%)	4,98	4,96	4,99	4,98	4,97
Keskihajonta	2,59	2,60	2,61	2,61	2,60
IAE	229,92	328,82	167,38	220,28	354,66
Keskikuivaik (min)	8,16	8,16	8,16	8,16	8,16
Redry(%)	0,53	0,47	0,53	0,47	0,60

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että alkukosteuden vaihdellessa säännönmukaisesti alkukosteuteen perustuvilla säätötavoilla saavutetaan pienempi keskihajonta kuin pelkästään takaisinkytketyillä ratkaisuilla. Alkukosteuden huomioivilla säätöratkaisuilla uudelleenkuivattavien viilujen osuus sekä säätövirheen IAE luku pienenevät.

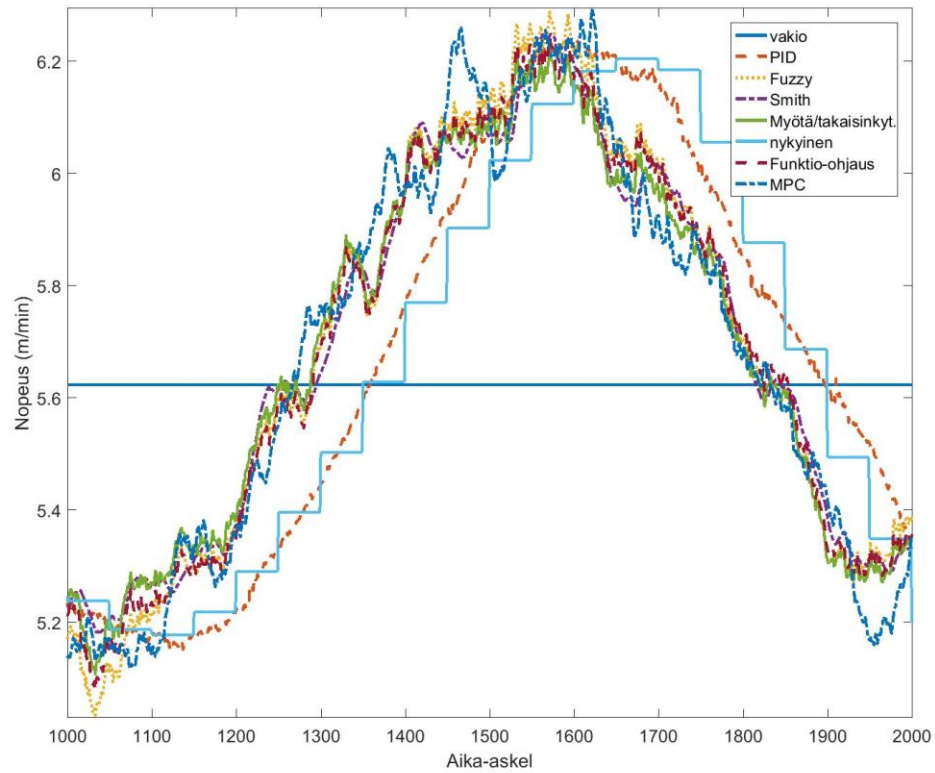
Taulukossa 8.1.3. on taulukoituna tulokset tilanteessa, jossa kuivausilman lämpötila sekä kosteus vaihtelevat sinimäisesti alkukosteuden lisäksi.

Taulukko 8.1.3. Eri säätötapojen viilun loppukosteuden mitta-arvoja alkukosteuden, ilmankosteuden sekä kuivauslämpötilan vaihdellessa sinimäisesti.

Säätötapa	Vakio	PID-säädin	Nykyinen	Funktio-ohjaus	Sumea säädin
Keskikosteus (%)	5,15	5,17	5,05	5,01	4,98
Keskihajonta	3,46	2,93	2,96	2,63	2,62
IAE	2374,39	1028,87	1301,41	246,40	309,14
Keskikuivaik (min)	8,18	8,13	8,16	8,15	8,15
Redry(%)	2,06	0,87	0,73	0,60	0,60
Säätötapa	Myötä- ja takai-sinkytetty	Sumea myötä-kytkentä	Smith-prediktori	Sumea Smith-prediktori	MPC
Keskikosteus (%)	4,98	4,95	5,00	4,98	5,01
Keskihajonta	2,60	2,65	2,62	2,64	2,63
IAE	213,62	573,57	155,50	312,52	345,39
Keskikuivaik (min)	8,15	8,16	8,15	8,15	8,15
Redry(%)	0,53	0,47	0,53	0,53	0,60

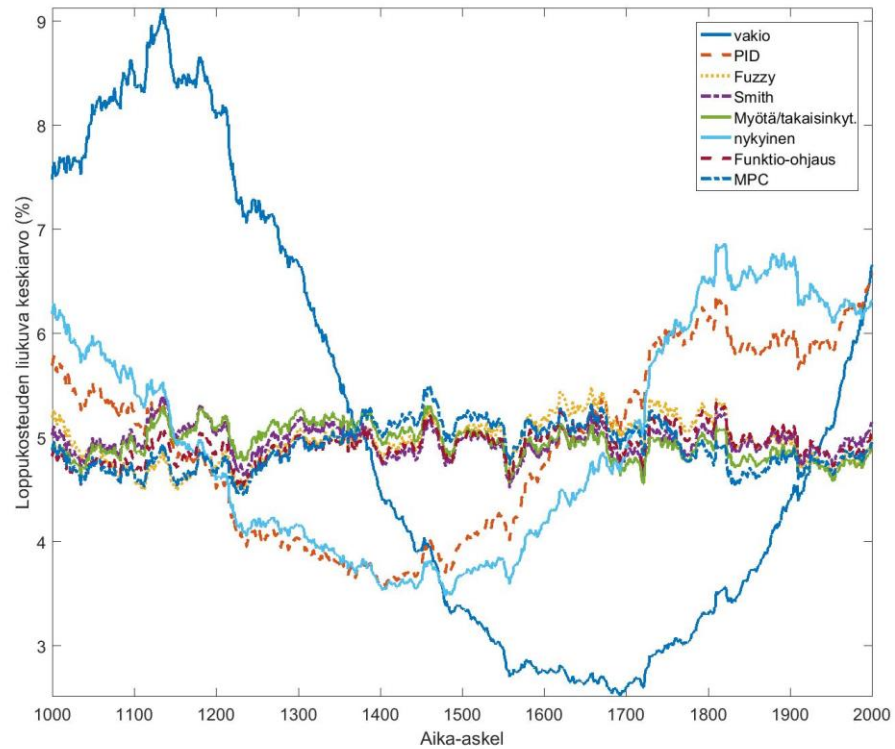
Taulukon IAE –luvusta nähdään, että säätötarkkuus paranee merkittävästi säätöratkaisuilla, jotka ottavat huomioon kuivausolosuhteiden muutoksen. Säätötavat, jotka eivät ota huomioon alkukosteuden mittausta pystytään seuraamaan asetusarvoa, mutta loppukosteuden keskihajonta sekä säätövirhe ovat suuria. Kuivausolosuhteiden mittauksen avulla loppukosteuden keskihajonta pysyy pienempänä ja täten myös uudelleenkuivattavien osuus pienenee. Funktio-ohjauksella, myötäkytketyllä ja smith-prediktorilla saavutetaan parhaat säätötulokset IAE –luvun perusteella. Sumeaan prosessimalliin perustuvalla myötäkytkennällä sekä smith-prediktorilla ei saavuteta yhtä hyvää lopputulosta kuin neuroverkkopohjaisella, joka on seurausta mallinnuksen tarkkuudesta.

Kuvassa 8.1.3. on nopeuden käyttäytyminen eri säätimillä tilanteessa, jossa alkukosteus sekä kuivausolosuhteet vaihtelevat sinimäisesti.



Kuva 8.1.3. Nopeuden käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa, alkukosteudessa sekä ilmankosteudessa on sinimäinen muutos.

Kuvasta 8.1.3. nähdään, että kuivausolosuhteiden vaihdellessa sinimäisesti myös kuivaajan nopeusohjaus vaihtelee sinimäisesti. Nykyisen säätöratkaisun sekä PID –säätimen nopeusohjaukset seuraavat koneen läpäisyn kestävän viiveen verran muihin ohjaustapoihin verrattuna. Muilla säätötavoilla ei ole havaittavissa merkittävää eroa nopeusohjauksessa. Säätöviive näkyy kuvan 8.1.4. loppukosteuden keskiarvossa aaltomaisuutena.



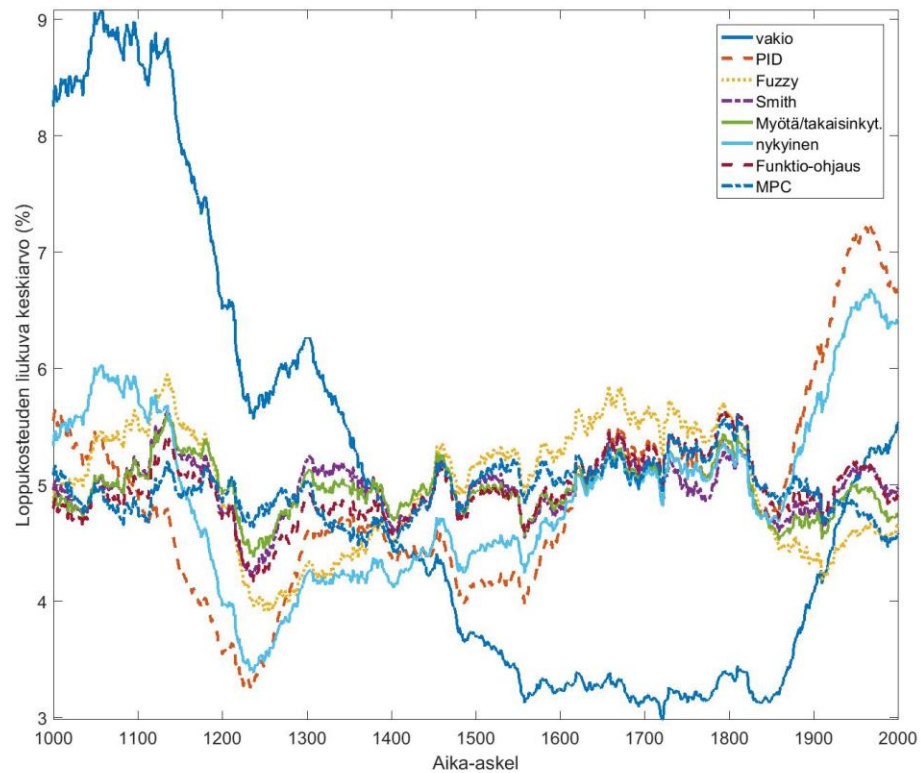
Kuva 8.1.4. Loppukosteuden liukuvan keskiarvon käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa ja kuivausilman kosteudessa sekä alkukosteudessa on sinimäinen muutos.

Kuvasta 8.1.4. nähdään, että vakionopeuksisen, PID –säädetyt ja nykyisen säätöratkaisun loppukosteuden keskiarvossa on sinimäistä aaltoilua. Tämä sinimäinen aaltoilu saadaan korjattua kuivausolosuhteiden mittauksella, jolloin loppukosteuden keskiarvo pysyy halutussa asetusarvossa. Todellisuudessa syötettyjen viilujen alkukosteus ei vaihtelee sinimäisesti vaan suurin muutos sydän ja pintapuiden kosteusmuutosten lisäksi tulee sorvattavien pöllien yksilöllisistä ominaisuuksista sekä kasvuolosuhteista. Tätä tilannetta on kuvattu lisäämällä askelmainen satunnainen häiriö, joka pysyy vakiona aina 50 viilun verran. Taulukossa 8.1.4. on esitettyä säätimien tulokset tilanteessa, jossa alkukosteudessa on askelmainen häiriö, kuten kuvassa 7.2.3., sekä lämpötila ja ilmankosteus vaihtelevat sinimäisesti.

Taulukko 8.1.4. Eri säätötapojen viulun loppukosteuden mitta-arvoja alkukosteuden vaihdellessa satunnaisesti portaittain sekä kuivauslämpötilan ja ilmankosteuden vaihdellessa sinimäisesti.

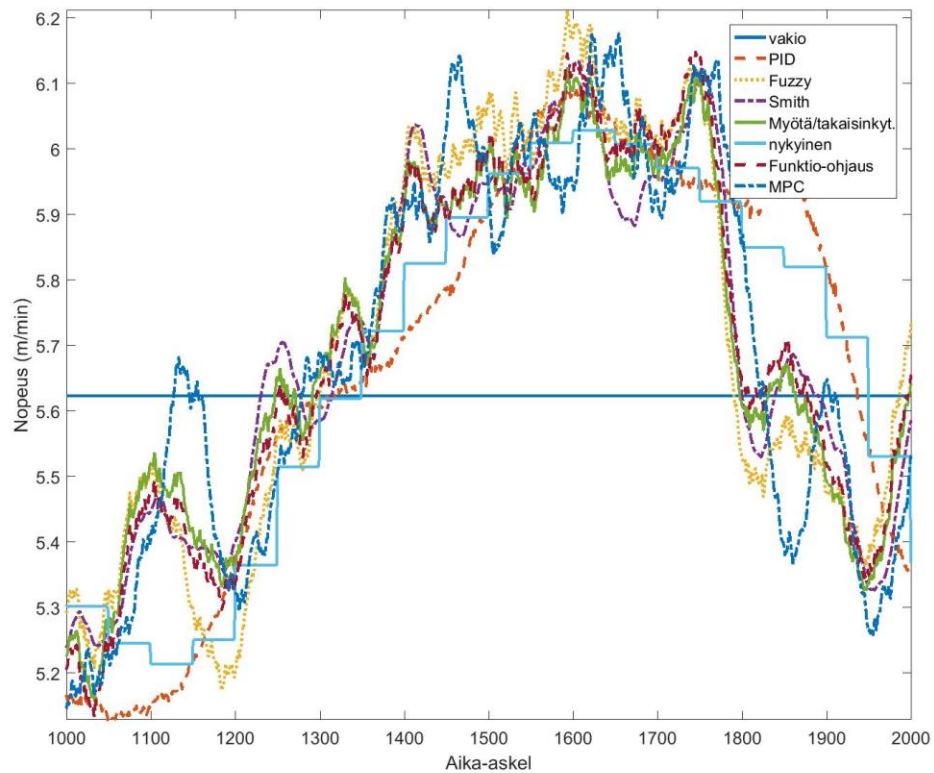
Säätötapa	Vakio	PID-säädin	Nykyinen	Funktio-ohjaus	Sumea säädin
Keskikosteus (%)	5,47	5,16	5,06	5,06	5,01
Keskihajonta	3,50	2,91	2,89	2,66	2,69
IAE	2263,69	1101,79	1120,72	363,84	638,74
Keskikuivaik (min)	8,18	8,22	8,24	8,22	8,24
Redry(%)	2,33	1,00	1,00	0,60	0,60
Säätötapa	Myötä- ja takaisinkytketty	Sumea myötäkytkentä	Smith-prediktori	Sumea Smith-prediktori	MPC
Keskikosteus (%)	5,03	4,99	5,03	5,02	5,03
Keskihajonta	2,63	2,66	2,65	2,64	2,66
IAE	286,86	603,73	297,69	344,18	323,80
Keskikuivaik (min)	8,23	8,24	8,22	8,23	8,22
Redry(%)	0,40	0,60	0,53	0,47	0,73

Taulukossa 8.1.4. nähdään, että kuivausolosuhteiden mittauksella saavutetaan säätötarkkuutta parantava vaikutus myös alkukosteuden vaihdellessa satunnaisesti. Tulokset ovat vastaavat kuin tilanteessa, jossa alkukosteuden vaihtelu olisi sinimuotoista. Huomioitavaa taulukoiden 8.1.3. ja 8.1.4. välillä on, että funktio-ohjaukseen perustuvan säätötavan säätötulos heikkenee enemmän kuin muilla mallipohjaisilla säätötavoilla. Kuvassa 8.1.5. näkyy loppukosteuden keskiarvon muuttuminen taulukon 8.1.4. tilanteessa eri säätötavoilla.



Kuva 8.1.5. Loppukosteuden liukuvan keskiarvon käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa sekä ilmankosteudessa sinimäinen muutos ja alkukosteudessa askelmäinen häiriö.

Automaattisella nopeussäädöllä saadaan parempi asetusarvon seuranta kuin vaki-onopeudella tilanteessa, jossa olosuhteet vaihtelevat, kuten kuvasta 8.1.5. nähdään. Nykyisellä säätötavalla sekä PID –säätötavalla loppukosteuden keskiarvossa näkyy suurempia ylityksiä ja alituksia kuin alkukosteus säädöissä. Kuvassa 8.1.6. on tämän tilanteen nopeus kuvaaja eri säätötavoilla.



Kuva 8.1.6. Nopeuden käyttäytyminen eri säätötavoilla, kun lämpötilassa sekä ilman-kosteudessa sinimäinen muutos ja alkukosteudessa askelmainen häiriö.

Uusilla säätötavoilla nopeuden käyttäytyminen on yhtäläistä, kuten kuvasta 8.1.6 näkyy, riippumatta säätötavan teoreettisesta taustasta. Näillä säätötavoilla nopeuden muutokset ovat jyrkempiä ja tiheämpiä kuin ilman alkukosteustietoa säätäminen. Tämä johtuu loppukosteuden keskiarvon rauhallisemmasta muutoksesta verrattuna alkukosteuden muutokseen.

8.2 Analyysi

Alkukosteuteen perustuvan nopeusohjauksen etuna on, että alkukosteuden muuttuessa voidaan viulun kuivauskoneen nopeutta säätää ennen tämän näkymistä loppukosteudessa. Tämän seurauksena saadaan alkukosteuden muutoksen aiheuttamaa loppukosteuden vaihtelua pienennettyä.

Simulointitulosten pohjalta voidaan sanoa, että ottamalla alkukosteus huomioon saadaan pienennettyä loppukosteuden keskihajontaa. Keskihajonnan pienentyminen vähentää ylikuivien sekä märkien viilujen osuutta ja näin parantaa kuivauksen onnistumista. Pelkällä nopeussäädöllä ei saada poistettua alkukosteuden eikä viulun tai kuivauksen luonteesta johtuvaa suurta loppukosteuden hajontaa. Loppukosteuden hajonta on suurta,

koska koneessa on suuri määrä eri kosteuksisia viiluja ja kaikkia ei voida kuivata haluttuun loppukosteuteen.

Alkukosteuden ollessa täysin satunnaisesti hajautunutta alkukosteuteen pohjautuvalla säätötavalla ei saada suurta hyötyä. Täysin satunnaisesti hajautuneessa alkukosteuden vaihtelussa myös kuivausnopeus vaihtelee keskiarvon ympärillä. Kaikilla säätötavoilla saadaan asetusarvoa seurattua, jolloin vältetään liiallista ylikuivaamista tai märeksi jättämistä.

Mallipohjaisilla säätöratkaisuilla saavutettu hyöty näkyy alkukosteudessa olevien kosteuspiikkien tasaantumisenä loppukosteudesta. Tämän seurauksena ulostulevien viilujen keskikosteuden hajonta pienenee. Keskihajonnan pienentyessä loppukosteuden asetusarvoa voidaan nostaa, koska liian märkien viilujen määrä pienentyy. Tämän seurauksena viilujen keskimääräinen läpäisy aika pienenee ja saadaan tuotannon kapasiteettia kasvatettua. Eri säätöratkaisuilla, jotka ottavat kuivausolosuhteet huomioon, ei ole merkittäviä etuja keskenään verrattuna alkukosteuden huomioon ottamisella saavutettavaan etuun.

Otettaessa huomioon myös kuivausilman kosteuden muutos koneessa saadaan säätötarkkuutta mallipohjaisilla ratkaisuilla parannettua verrattuna pelkkään alkukosteuteen. Tästä nähdään, että lisämittauksilla sekä näin ulostulon ennustettavuuden parantamisella saadaan parannettua säädön tarkkuutta. Parantaakseen säätötulosta enemmän tulisi tehdä tarkempi analyysi kuinka eri mitattavissa olevat tekijät vaikuttavat kuivaustulokseen ja näin parantaa mallin ennustavuutta.

Myötäkytkettyjen säätötapojen hyödyt ovat suuresti verrannollisia prosessin mallintamisen onnistumisesta. Viilun kuivausprosessi on haastava mallintaa, koska puu ei ole homogeenistä ja tämän seurauksena jokainen viilu ei kuivu yhtäläisesti. Viilun kuivausteho muuttuu komponenttien likaantuessa sekä vikaantumisen seurauksena. Näiden tekijöiden pohjalta säätöratkaisun tulee olla mahdollisimman robusti häiriöille sekä mahdollisesti adaptiivinen.

Kaikissa simulointitilanteissa neuroverkkopohjainen smith-prediktori sekä myötäkytketty säätö tuottivat parhaita tuloksia IAE -luvun nojalla. Generoituun dataan sovitettu neuroverkkomalli pystyy hyvin kuvaamaan prosessin käyttäytymistä simuloinneissa, joka johtaa säätöjen hyvään suorituskykyyn. Malliprediktiivinen sekä sumea säädin on määriteltä tietyn toimintapisteen ympärille, jolloin säätöratkaisuiden tulos heikkenee olosuhteiden suurten muutoksien johdosta.

9. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena on kehittää viilun kuivauskoneen säätöjärjestelmää uuden viilun alkukosteuden mittauksen pohjalta. Nykyinen säätöjärjestelmä ei ota huomioon alkukosteutta ja tämän seurauksena kuivauskoneen nopeutta on säädetty jälkikäteen, kun loppukosteudessa on havaittavissa poikkeamaa. Uuden säätöjärjestelmän tulisi saada loppukosteuden käyttäytyminen seuraamaan haluttua arvoa ja pienentämään loppukosteuden vaihtelua.

Viilun kuivaus on tärkeä osa vaneriteollisuudessa, koska puusta sorvatun tai leikatun viilun kosteus on liian suuri prosessin myöhemmille vaiheille. Puussa kosteus on sitoutunut pääosin soluihin ja solun seinämiin. Solujen sisällä oleva vesi poistuu soluonteloita pitkin lineaarisella nopeudella. Solun seinämissä olevan veden poistaminen vaatii enemmän energiaa ja veden haihtumisnopeus pienenee kosteuden pienentyessä. Tämän seurauksena puun kuivattaminen alhaisille kosteuksille on epälineaarista.

Viilun kuivumisen nopeuteen vaikuttavat tekijät voidaan lajitella laitteiston, prosessimuuttujien ja viilun ominaisuuksista johtuviin. Kuivauksessa käytettävän laitteiston aiheuttamia tekijöitä ovat esimerkiksi suuttimien muotoilu, sijoittelu sekä poistoilmajärjestelmä. Prosessimuuttujia ovat kuivausilman lämpötila, kosteus ja suutinnopeus. Viilun ominaisuuksista johtuvia tekijöitä ovat mm. puun tiheys, laatu, kosteus sekä paksuus.

Työssä tarkastelun kohteena oleva viilujen kuivauskone on tyypiltään telakuivauskone, jossa viilut kulkevat jatkuvassa liikkeessä teloilla. Teloilla olevan viilun molemmille pinnoille puhalletaan suurella nopeudella kuumaa ilmaa. Kuivauskoneesta saatavia mittauksia ovat kuivausilman lämpötila ja kosteus sekä kuivausaika vyöhykkeittäin. Työssä käytetty mittausdata on generoitu Rauten kuivauskoneen simulointityökalun avulla. Mittausdata sisältää tiedon kuinka loppukosteus määräytyy alkukosteuden, kuivausilman lämpötilan ja kosteuden sekä kuivausajan perusteella.

Generoidun datan pohjalle määritetään systeemin identifioinnin menetelmillä neuroverkko malli. Neuroverkko malli on staattinen musta laatikko tyyppinen malli, jossa alkukosteuden, kuivausajan sekä kuivausilman kosteuden ja lämpötilan avulla lasketaan loppukosteus. Mallin sisääntulot viivästetään ja keskiarvoistetaan koneen läpäisyn verran. Tämän tarkoituksena on ottaa huomioon kuivauskoneen sisällä vallitsevien olosuhteiden muutokset viilun kulkiessa kuivauskoneen läpi.

Työssä vertaillaan erilaisten säätömenetelmien kykyä selvittää viilun kuivauskoneen säätöhaasteesta. Vertailtaviksi säätötavoiksi on valittu PID –säädin, sumea säädin, smith-prediktori, myötäkytkentä ja malliprediktiivinen säädin. Mukana on myös nykyinen säätöratkaisu sekä nykyisen säätöjärjestelmän variaatioita. PID –säädin on perinteinen takaisinkytketty säätömenetelmä. Sumea säädin perustuu empiirisesti määritettyihin jos –niin ehtoihin. Smith-prediktori ennustaa mallin pohjalta viiveettömän prosessin ulostulon ja tämän pohjalta säädetään systeemiä. Myötäkytketty säätöjärjestelmä laskee kuivausajan kuivausolosuhteiden pohjalta. Malliprediktiivinen säätö optimoi mallin pohjalta parhaan ohjauksen.

Ottamalla alkukosteuden muutoksen huomioon säädössä saadaan reagoitua alkukosteuden muutokseen ennen tämän näkymistä loppukosteudessa. Tämän avulla saadaan pienennettyä alkukosteudesta johtuvaa loppukosteuden hajontaa. Mallipohjaisilla säätöratkaisuilla saadaan pienennettyä loppukosteuden keskihajontaa sekä säätövirheen arvoa. Mallipohjaiset säätöratkaisut ovat kuitenkin riippuvaisia mallinnuksen onnistumisesta.

Tarkastelussa olevista säätöratkaisuista parhaiten simulaation pohjalta kuivauskoneen ohjaukseen sopii smith-prediktori sekä myötäkytkentä. Näiden säätötapojen keskihajonta ja säätövirheen IAE -luku ovat pienimmät kaikissa simulointitilanteissa. Näiden säätöratkaisuiden virittämisessä on käytetty samaa dataa ja lähestymistapaa kuin prosessin mallinnuksessa, joten tulos on suuntaa antava ja tarvitsee lisätutkimista todellisella prosessilla.

Keskihajonnan pienennyksen seurauksena on mahdollista nostaa tavoitekuosteuden arvo ilman liian märkien viilujen määrän kasvamista. Tämän seurauksena keskimääräistä kuivausaikaa saadaan lyhennettyä ja koneen kapasiteettia kasvatettua. Viilun liiallinen kuivaaminen aiheuttaa myös ylimääräistä energiankulutusta. Simulaatiotulosten pohjalta nähdään, että uudella kuivauskoneen nopeuden ohjauksella saavutetaan pienempi keskihajonta ja näin mahdollistetaan kuivauskapasiteetin sekä energiatehokkuuden kasvu.

Työn aihe ja tutkimus herättää tarvetta lisätutkimuksille. Tutkimus antaa viitteitä, että viilun kuivauskoneen säätöjärjestelmän kehityksessä olisi potentiaalia parantaa säätötulosta alkukosteuden mittauksen pohjalta. Tätä tulisi testata todellisella kuivauskoneella ja verrata tuloksia tässä tutkimuksessa saatuihin tuloksiin. Telakuivauskoneen prosessimalli toteutettiin generoidun datan pohjalta, joten prosessin mallintaminen todellisen mittausedatan pohjalta jäi tekemättä. Mallintamisessa tulisi tehdä analyysi asioista, joita kannattaa ja pystytään mittaamaan saadakseen hyvän ennustettavuuden lopputuloksesta mallilla.

LÄHTEET

- Abonyi J., Balazs F. (2007). Cluster analysis for data mining and system identification, Birkhäuser Basel, 306 p.
- Billings S.A. (2013). Nonlinear system identification: Narmax methods in the time, frequency, and spatio-temporal domains, Wiley, 607 p.
- Camacho E.F., Bordons C. (2007). Model Predictive control, Springer London, 405 p.
- Didriksen H. (2002). Model based predictive control of a rotary dryer, in: Chemical Engineering Journal, Vol 86, Elsevier, pp.53-60.
- Dufour P. (2006). Control engineering in drying technology: Review and trends, Drying Technology, Taylor & Francis, Vol 24, Issue 7, pp. 889-904.
- Hanhijärvi A., Hukka A., Paajanen T., Pulkkinen P., Sundman S. (2003). Experimental investigation of jet drying of birch and spruce veneers and modelling with a simplified approach, in: European Journal of Wood and Wood Products, Vol 61, Issue 2, Springer pp. 83-88.
- Keesman K.J. (2011). System Identification: An introduction, Springer, 334 p.
- Koponen H. Puutuoteteollisuus 4: Puulevytuotanto, Opetushallitus, 2002, 201 p.
- Kuusela J. (1984). Puun kuivauksen erikoismenetelmät, VTT, 54 p.
- Ławryńczuk, M. (2014). Computationally efficient model predictive control algorithms: A neural network approach, Springer, 316 p.
- Levine W.S. (2010). Control system advanced methods, Second Edition, CRC Press, 1798 p.
- Liu Q. Bakker-Arkema F.W. (2001). Automatic control of crossflow grain dryers, Part 2: Design of a model-predictive controller, in: Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 80, Issue 2, pp. 173-181.
- Ljung L., Glad T. (1994). Modeling of dynamic systems, PTR Prentice Hall, 361 p.
- Mansor H., Mohd Noor S.B., Raja Ahmad R.K., Taip F.S., Lutfy O.F. (2010). Intelligent control of grain drying process using fuzzy logic controller, in: Journal of Food, Agriculture & Environment, Vol. 8, Issue 2, WFL Publisher, pp 145-149.

- Pang S., Riley S.G., Haslett A.N. (1997) Simulation of Pinus Radiata veneer drying: moisture content and temperature profiles, in: Forest Products Journal, Vol 47, No. 7/8, ProQuest, pp. 51-58.
- Passino K.M., Yurkovich S. (1998) Fuzzy Control, Addison-Wesley, 502 p.
- Pulkkinen P., Hanhijärvi A., Rohumaa A., Sundman S., Hyttinen P., Sokka K., Paajanen T. (2000). Viilun kuivaus: Puumateriaalin ja kuivausprosessin vaikutukset tuoteominaisuuksiin, Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, Puutekniikan laboratorio, tiedonanto 84, 60 p.
- Raute (2016). Rauten sisäiset materiaalit
- Sokolowski J.A., Banks C.M. (2009). Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach, Wiley, 275 p.
- Söyriälä P., Salin J.G., Tuominen M. (1983). Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982: Viilunkuivauksen optimointi, VTT, 117 p.
- Söyriälä P., Siimes H., Salin J.G. (1988). Nykyisten viilunkuivausmenetelmien kehittäminen, VTT, 43 p.
- Takagi T., Sugeno M. (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, in: IEE transactions of systems, man, and cybernetics, vol. SMC-15, No 1, pp. 116-132.
- Thant A., Yee S., Htike T. (2009). Modeling Drying Time during Veneer Drying and Comparison with Experimental Study, in: International MultiConference of Engineers & Computer Scientists, Vol 2, IMECS, 4 p.
- Tschernitz, J.L. (1985). Empirical equations for estimating drying times of thick rotary-cut veneer in press and jet dryers, Forest Service, Forest products laboratory, 17 p.
- Walker J.C.F. (2006). Primary wood processing: Principles and practice, Springer, 596 p.
- Wilamowski B.M., Irwin J.D. (2011). The industrial electronics handbook: Intelligent systems, Second edition, CRC press 610 p.
- Wolfgang A., Macdonald D., Mackay S. (2005). Practical process control for engineer and technicians, Newnes, 290 p.
- Åström K.J., Murray R.M. (2009) Feedback Systems: An introduction for scientists and engineers, Princeton university press, 396 p.