

Henna Mäkinen

KARTONKIKONEEN KOSTEUSSÄÄTÖ- RATKAISUJEN SUORITUSKYKYVER- TAILU

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkistaja: Veli-Pekka Pyrhönen
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Henna Mäkinen: Kartonkikoneen kosteussäätöratkaisujen suorituskykyvertailu
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2023

Kosteuden säätö on tärkeä osa kartongin valmistusta ja kartonkikoneen toimintaa, sillä kosteus määrää kartongin tärkeimmät ominaisuudet ja vaikuttaa kartonkikoneen toiminnan tehokkuuteen. Tässä työssä tutkitaan kahta erilaista kosteussäätöratkaisua ja vertaillaan niiden säätötarkkuutta. Työn tavoite on selvittää, voidaanko kolmea rinnakkaista mallia hyödyntävällä kosteussäätöratkaisulla parantaa säätötarkkuutta verrattuna kahden rinnakkaisen mallin ratkaisuun.

Työ on jaettu kahteen osaan: kirjallisuustutkimusosaan ja kokeelliseen osaan. Kirjallisuustutkimusosa esittelee kartonkikoneen toiminnan ja kartongin valmistusprosessin. Tämän lisäksi työssä esitellään malliprediktiivinen säätö eli MPC (engl. Model Predictive Control), jolla kosteutta säädetään kartonkikoneessa, sekä säätöön vaikuttavat merkittävimmät häiriötekijät. Kokeellisessa osuudessa hyödynnetään kirjallisuusselvitysosassa esiteltyjä teorioita ja lasketaan molempien kosteussäätöjen ennustamat kartongin kosteuden arvot. Kartonkin kosteuden arvoilla lasketaan keskimääräiset virheet molemmille säädöille ja vertaillaan säätöjen tarkkuutta. Työssä havaittiin, että kartongin valmistusprosessia ja kartongin kosteuden säätöä on tutkittu paljon, mutta säädöistä ei ole samanlaisia tutkimuksia ja mittaustuloksia.

Tutkimuksen kokeellinen osuus osoittaa, että kolmea rinnakkaista mallia hyödyntävällä säätöratkaisulla on mahdollista parantaa tarkkuutta kahden rinnakkaisen mallin ratkaisuun verrattuna. Tutkimuksessa huomattiin kuitenkin, että uuden kosteussäätöratkaisun kolmannen vahvistuksen arvo vaikuttaa merkittävästi säätöratkaisuun. Mikäli kolmas vahvistus on valittu huonosti, kolmen rinnakkaisen mallin säätöratkaisusta tulee epätarkempi kuin kahden mallin ratkaisusta. Tutkimuksessa löydettiin kolmannelle vahvistukselle sellainen arvo, jolla uusi säätöratkaisu on mahdollisimman tarkka.

Avainsanat: kartonki, kartonkikone, kosteussäätö, malliprediktiivinen säätö, MPC

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö tehtiin Valmet Automation OY:lle ja haluaisin kiittää Juho Vuorista, joka on tarjonnut minulle materiaaleja työn tueksi sekä auttanut minua työn rakenteen suunnittelussa.

Tampereen yliopistolta haluaisin kiittää kandidaatintyön ohjaajaani Veli-Pekka Pyrhöstä rakentavista kommentteista ja palautteesta, jotka auttoivat minua työssä eteenpäin.

Tampereella, 3. huhtikuuta 2023

Henna Mäkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KARTONKIKONE	2
2.1 Toimintaperiaate	2
2.2 Rainanmuodostusprosessi	3
2.3 Puristus ja kuivatus	3
2.4 Jälkikäsitteily	4
2.5 Lajinvaihto	4
3. KOSTEUSSÄÄTÖ	6
3.1 Mallipredktiivinen säätö	6
3.2 Märkäpään säätö	8
3.3 Kuivapään säätö	9
3.4 Kosteuteen vaikuttavat häiriötekijät	10
3.4.1 Neliömassa	10
3.4.2 Nopeus	11
3.4.3 Hylkyosuus	11
3.4.4 Kartongin vaaleus	11
4. KOKEELLINEN OSUUS	13
4.1 Nykyinen kahden mallin kosteussäätöratkaisu	13
4.2 Uusi kolmen mallin kosteussäätöratkaisu	14
4.3 Kartongin kosteuden laskenta	15
4.4 Tulosten virhearvot	19
4.5 Tulosten vertailu	19
5. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CD	engl. Cross Direction, poikkisuunta
CV	engl. Controlled Variables, hallittavat muuttujat
DC-vahvistus	engl. Direct Current -gain
FOTD	engl. First Order Time Delay, ensimmäisen kertaluvun viiveellinen malli
GRG	engl. Generalized Reduced Gradient, ongelmanratkaisumenetelmä
MD	engl. Machine Direction, konesuunta
MG	engl. Machine Glasing, kiillotus
MIMO	engl. Multiple-Input and Multiple-Output System, usean sisäänmenon ja usean ulostulon monimuuttujajärjestelmä
MPC	engl. Model Predictive Control, mallipredktiivinen säätö
MV	engl. Manipulated Variables, ohjausmuuttujat
PI-säädin	engl. Propotional Integral, vahvistava ja integroiva säädin
$c_{STP,i}^0$	Lajin i toimintapiste siinä höyrynpaineessa, jossa vahvistuksen $g_{1,i}$ määrittäykokeet ovat tehty.
$c_{STP,i}$	Lajin i toimintapiste nykyisessä höyrynpaineessa
d	Viive
$g_{1,i}$	Lajin i vahvistus höyrynpaineen ja kartongin kosteuden välillä
g_2	Vahvistus massavirran ja kartongin kosteuden välillä
g_3	Vahvistus kuivapainon ja kartongin kosteuden välillä
h	Arvojen määrä
K	Staattinen DC-vahvistus
k_i	Kompensointiparametri vahvistuksen g_1 arvolle -6,5
k_{i-1}	Lajia i edeltävän lajin kompensointiparametri
Δk	Kartonkilajien kompensointiparametrien keskiarvo muutostilanteessa
$med_{parillinen}$	Mediaani, kun arvoja on parillinen määrä
$med_{pariton}$	Mediaani, kun arvoja on pariton määrä
N	Prediktiohorisontti
ΔOD	Kuivapainon muutos
p_{STP}^0	Höyrynpaine, jossa vahvistuksen $g_{1,i}$ määrittäykokeet ovat tehty
$p_{STP,i}$	Kartonkilajin i höyrynpaineiden mediaani
pm_i	Kartonkilajin i todellinen kosteus

pm_{i-1}	Kartonkilajia i edeltävän lajin todellinen kosteus
$pm_{i,n}$	Nykyisen kahden mallin säädön kartongin kosteuden tasapainotilan ennusteet
$pm_{i,u}$	Uuden kolmen mallin säädön kartongin kosteuden tasapainotilan ennusteet
ΔSTP	Höyrynpaineen muutos
t	Ajanhetki
τ	Aikavakio
ΔTSF	Massavirtauksen muutos
$u(t + k t)$	Tuleva ohjaussignaali, $k = 0, \dots, N-1$
$\hat{y}(t + k t)$	Ennustettu ulostulo, $k = 1, \dots, N$

1. JOHDANTO

Paperikoneita on ollut Suomessa käytössä vuodesta 1842 asti [1]. Melko pian tämän jälkeen Suomessa otettiin käyttöön myös ensimmäiset kartonkikoneet vuonna 1897 [2]. Laadunvalvonta ja varsinkin sen avulla kosteuden säätäminen on oleellinen osa kartonkikoneen toimintaa. Mahdollisimman hyvä kosteuden säätö on vuosikymmenien ajan ollut kartonkikoneiden valmistajien tavoitteena, sillä sen avulla voidaan välttää monia kartongin laatuun vaikuttavia ongelmia. Jos kosteutta ei säädettäisi, niin esimerkiksi kosteuden vaihtelu kartongissa huomataan vasta valmiista tuotteesta, jolloin ongelmaa ei ole enää mahdollista korjata. Haitalliset ominaisuudet kartongissa, kuten kartongin liiallinen kutistuminen tai käyristyminen kuivatusvaiheessa estävät kartongin käytön. [3]

Kartongin kosteuden säätäminen kosteusmittauksien perusteella koko valmistusprosessin ajan on tärkeää, sillä kartongin kosteudella on merkittävä vaikutus muun muassa energiankulutukseen ja koneen ajettavuuteen. Kosteussäädöstä halutaan siis mahdollisimman tarkka. [4] Tässä työssä tarkastellaan kosteussäätöratkaisua, jonka käytön aikana on huomattu, että säädöstä on mahdollista saada tarkempi. Työn tavoitteena on tutkia, onko nykyisestä kosteussäätöratkaisusta mahdollista saada tarkempi ja luotettavampi.

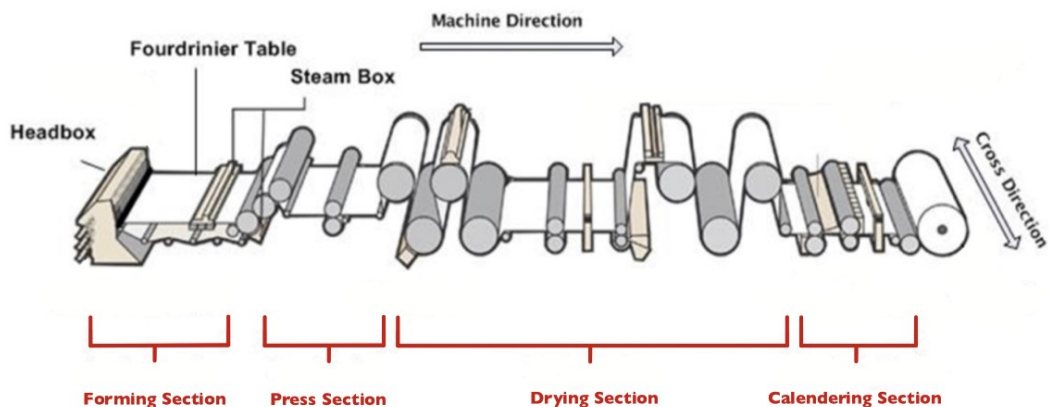
Tässä työssä on selvitetty kartonkikoneen toimintaa, sen keskeisiä osaprosesseja sekä sen nykyistä kosteussäätöä, jota tarkastellaan työn toisessa luvussa. Toisessa luvussa käsitellään lisäksi, missä kaikissa prosesseissa kartongin kosteuteen voidaan vaikuttaa ja miten. Kolmannessa luvussa tarkastellaan kosteuden säätömenetelmiä ja merkittävimpiä kosteuteen vaikuttavia häiriötekijöitä. Neljännessä luvussa tarkastellaan tarkemmin nykyistä ja uutta kosteussäätöratkaisua ja vertaillaan niiden suorituskykyä. Viidennessä eli viimeisessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät havainnot neljännen luvun laskelmista ja tehdään havainnoista johtopäätökset.

2. KARTONKIKONE

Kartonkikoneen toiminta perustuu paperikoneen toimintaperiaatteeseen. Merkittävimpinä eroina kartongin ja paperin välillä ovat kerrosten lukumäärä ja neliömassa; kartongilla on yleisesti enemmän kerroksia kuin paperilla ja siten suurempi neliömassa. [4]

2.1 Toimintaperiaate

Kartongin valmistusprosessi aloitetaan sekoittamalla sopiviksi käsitellyt raaka-aineet vesipitoiseksi massaseokseksi, minkä jälkeen seos kuljetetaan muokattavaksi kartonkikoneen eri osiin [4][5, s. 131–146]. Kuvassa 1 on paperikoneen rakennekaavio, jolla voidaan havainnollistaa kartonkikoneen osien järjestystä sekä massaseoksen ja rainan eli kartonkiarkin liikkumista koneessa. Rakennekaavio kuvaa paperikonetta, mutta sitä voidaan käyttää myös kartonkikoneelle.



Kuva 1. Kaavioesitys paperikoneesta, muokattu lähteestä [7, katso 6]

Ensimmäisenä massaseos pumpataan rainanmuodostusprosessiin (engl. Forming Section), joka kartonkikoneessa koostuu yhdestä tai useammasta rainanmuodostusyksiköstä. Rainanmuodostusyksikössä massaseos levitetään tasaiseksi massarainaksi. Rainanmuodostusprosessin jälkeen rainaa lujitetaan poistamalla siitä vettä puristusosalla (engl. Press Section) ja kuivatusosalla (engl. Drying Section). Kartonkikoneen lopussa melkein valmis kartonkiraina loppukäsittellään. Loppukäsittely sisältää kartonkirainan kiilottamisen kalanterissa (engl. Calendering Section) sekä kartongin valmistelun ja leikkaamisen asiakkaan haluamalla tavalla. [4][5, s. 131–146]

2.2 Rainanmuodostusprosessi

Rainanmuodostusprosessi etenee rainanmuodostusyksikön tai yksiköiden sisällä. Yksi yksikkö koostuu perälaatikon putkistosta, perälaatikosta sekä viiraosasta. Kartongin kerrosten lukumäärä määrittää, montako rainanmuodostusyksikköä kartonkikoneessa on. Paperikoneessa yksiköitä on yksi. [4][5, s. 131–146] Perälaatikko, sen osat sekä viiraosa sijoittuvat kartonkikoneen alkupäähän (kuva 1).

Ensimmäisenä rainanmuodostusprosessissa on perälaatikon putkisto sekä perälaatikko (engl. Headbox). Niiden tehtävinä on levittää massasuspensio tasaisesti kartonkikoneen poikkisuunnassa (engl. Cross Direction) sekä tuottaa siihen sopiva turbulenssi, jotta siihen muodostuneet kuituflokkit eli yhteen paakkuuntuneet kuitukimput saadaan hajotettua. Niiden täytyy myös stabiloida syöttövirtauksen paineen vaihtelut ja pulseeraus sekä poikkisuuntaiset virtaushäiriöt, jos sellaisia on. Lopuksi perälaatikon täytyy tuottaa rainanmuodostusprosessin seuraavalle komponentille, viiraosalle, massasuspensiosuihku, jolla on haluttu sakeus, nopeus ja suunta. [4][5, s. 131–146]

Perinteisesti viiraosa on tasoviirakone (engl. Fourdrinier Table). Tasoviirakoneessa vettä poistetaan rainasta ainoastaan sen alapuolelta. Uudempia viiramalleja ovat erilaiset kaksoisviirarainaimet, jotka poistavat vettä rainan molemmilta puolilta. Veden poiston tarkoituksena on poistaa perälaatikon tuottamasta massasuspensiosta vettä suotauttamalla massaa, jolloin massasta muodostuu kartonkirainaa. Suotauttaminen tehdään viirakudoksella. Koska suurimmaksi osaksi kartongin rakenteelliset ominaisuudet määrää viiraosuus, viiran täytyy varmistaa, että kuitu- ja täyteaineretentiot ovat tasaiset. Varmistukseksi viiraosalla aiheutetaan hydrodynaamisia voimia rainaan. Hydrodynaamiset voimat ehkäisevät flokkien muodostumista rainaan sekä hajottavat jo muodostuneita flokkeja. Näiden lisäksi hydrodynaamisilla voimilla hallitaan vedenpoisto sopivaksi. Lopuksi viiraosa asettaa rainan kuiva-ainepitoisuuden tarpeeksi korkeaksi, jotta se saadaan siirrettyä rainanmuodostusprosessilta puristimille. Tarpeeksi korkea kuiva-ainepitoisuus takaa myös rainan hyvän ajettavuuden. [4][5, s. 131–146]

2.3 Puristus ja kuivatus

Rainanmuodostusprosessin jälkeen tavoitteena on lujittaa kartonkirainaa poistamalla siitä vettä. Vettä voidaan poistaa sekä puristamalla että kuivattamalla rainaa. Kosteuden hallinta on tärkeä osa kartongin valmistusta, sillä kosteus vaikuttaa melkein kaikkiin kartongin ominaisuuksiin. [4][5, s. 80–81] Kosteutta voidaan säädellä myös höyrylaatikolla (engl. Steam Box), joka sijaitsee puristinosan alkupäässä tai viiraosalla. Höyrylaatikolla

puhalletaan lähellä lauhutumispistettä olevaa höyryä paperirainaan. [4] Puristus- ja kuivatusosat sijoittuvat kartonkikoneen keskelle. (kuva 1)

Ensimmäisenä rainanmuodostusprosessin jälkeen kartonkiraina ohjataan puristinosaan, jossa rainaa halutaan tiivistää poistamalla siitä mahdollisimman paljon vettä. Koska rainaa halutaan siirtää puristinosalta kuivatusosalle katkotta, pyritään sille saamaan riittävän suuri märkälujuus. Märkälajuudella tarkoitetaan märän paperin mekaanista lujuutta. Puristinosalla rainan märkäpuristus tapahtuu aina joko yhden tai kahden puristinhuovan ja sileän telan välissä. Kun rainaa puristetaan näin, sen tilavuus pienenee, jolloin vedelle ei jää tilaa ja se poistuu huopaan tai huopiin. Märkäpuristuksella on suuri vaikutus kartongin ominaisuuksiin, joten puristuksen komponentit, esimerkiksi telat ja niiden pinnoitteet sekä huovat, täytyy valita huolellisesti. [4][5, s. 80–81]

Puristinosan jälkeen kartonkikoneessa on kuivatusosuus, jonka tehtävänä on haihduttaa vettä pois rainasta. Kuivatusmenetelmissä on kolme yleistä menetelmää, joilla kaikilla on sama toimintaperiaate: rainaan tuodaan ulkoa energia, joka haihduttaa rainasta vettä pois. Kuivatuksella on vaikutusta muun muassa pituussuuntaiseen kosteusprofiiliin sekä kartongin vaaleuteen. [4][5, s. 80–81]

2.4 Jälkikäsitteily

Kartongin jälkikäsitteilyssä tehdään lopullisia parannuksia melkein valmiiseen kartonkiin. Kartonkikoneen lopussa kuivatuksen jälkeen on kiillotussylinteri eli MG (engl. Machine Glasing), päällystysyksiköt, mahdollinen kalanterointi sekä lopullisen kartongin valmistelu asiakastoimitusta varten. [4] Jälkikäsitteily sijoittuu aivan kartonkikoneen loppuosaan (kuva 1).

Kiillotusvaihetta käytetään kartongin sileyden ja kiillon parantamiseen. Kartonki voidaan vielä päällystää päällystysyksiköissä, joita on 1–3 kappaletta. Päällystysen jälkeen voidaan kartongille tehdä mahdollinen kalanterointi, jossa kartonkia kiillotetaan puristamalla sitä kahden tai useamman telan välissä. Viimeisenä kartonki valmistellaan asiakastoimitusta varten pakkaamalla se rulliksi tai leikkaamalla arkeiksi. [4]

2.5 Lajinvaihto

Lajinvaihdossa vaihdetaan halutun kartongin laatua esimerkiksi valkoisesta kartongista ruskeaan. Tällöin Häggblom-Ahngerin ja Komulaisen [5, s. 252] mukaan kartonkikoneen ajoreseptiä muutetaan, jolloin myös koneeseen sisään menevä massavirta ja koneen nopeus muuttuvat. Kun ajoreseptiä muutetaan, kulkee koneen läpi koko lajinvaihdon ajan vaihtuvalla nopeudella kartonkirainaa, jonka neliömassa, kosteus sekä koostumus

muuttuvat. Tällainen tilanne aiheuttaa keskeisen ongelman: kuivatusosa on epälineaarinen ja vaikeasti hahmotettava lajinvaihdon aikana. [5, s. 252]

Lajinvaihdossa pystytään erottamaan kaksi erilaista lajinvaihtotapahtumaa, jotka vaikuttavat kartonkikoneen ajotapaan. Ensimmäisellä lajinvaihtotapahtumalla päätavoite on minimoida lajinvaihtohylyn määrä ja samalla maksimoida uuden kartonkilajin määrä. Tässä tapahtumassa uuden ja vanhan kartonkilajin ero ei ole kovin suuri. Toisessa lajinvaihtotilanteessa päätavoitteena on saada muuttuvat suureet uuden kartonkilajin haluttuihin arvoihin mahdollisimman nopeasti. Tällöin uuden ja vanhan kartonkilajin erot ovat huomattavan suuret ja lajinvaihto on hankalaa. [4]

3. KOSTEUSSÄÄTÖ

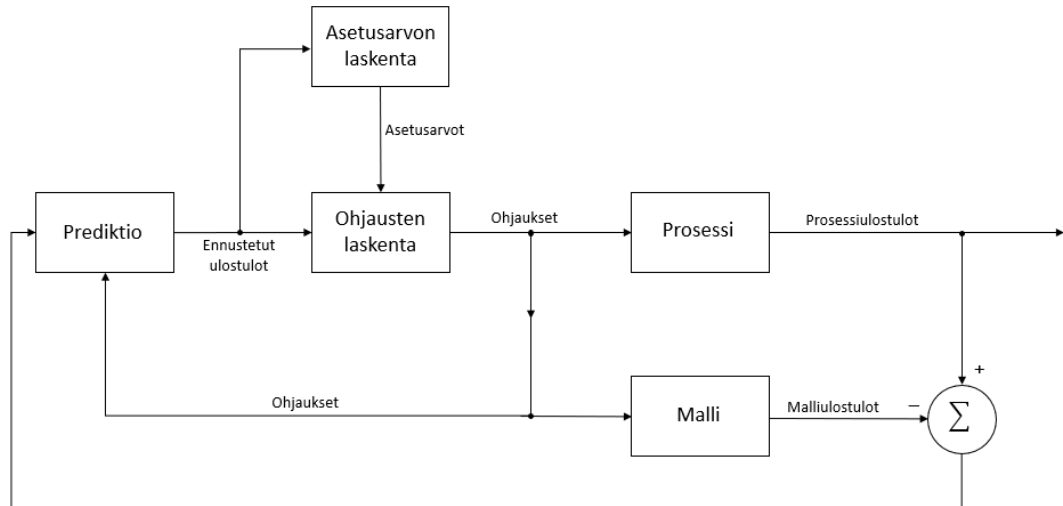
Kosteussäätö on kartongin kosteuspitoisuuden säätämistä. Kartongin kosteus vaikuttaa sen lopullisiin ominaisuuksiin sekä kartonkikoneen ajettavuuteen. Tärkein säädettävä suure kosteussäädössä on höyrynpaine. Alan kirjallisuudessa [4][8, s. 83] esitetään, että kosteussäätöön vaikuttaa voimakkaasti myös neliömassan säätö, sillä kosteuden ja neliömassan välillä voidaan huomata voimakkaita ristikkäisvaikutuksia; kun toisessa säätöpiirissä tapahtuu muutos, niin se häiritsee myös toista säätöpiiriä. Täten kosteussäädön yhteydessä voidaan tutkia myös neliömassan säätöä. Kartongin kosteussäätö voidaan jakaa kahteen tarkasteltavaan osioon. Nämä kaksi osiota ovat märkäpäässä tapahtuva säätö ja kuivapäässä tapahtuva säätö. Molemmissa osioissa kosteutta voidaan säätää malliprediktiivisellä säädöllä. [4]

3.1 Malliprediktiivinen säätö

Kosteutta voidaan säätää erilaisilla säätömenetelmillä. Menetelmän valintaan vaikuttaa säädön lopullinen käyttökohde. Yksi keskeisimmistä kosteuden säätömenetelmistä on malliprediktiivinen säätö eli MPC (engl. Model Predictive Control). [7, katso 6] Monessa MPC:hen liittyvässä alan kirjallisuudessa [7, katso 6][9, s. 1–2][10, s. 3][11, s. 535] korostetaan, että MPC on yksi nykyajan menestyksekkäimmistä säätömenetelmistä, sillä se mahdollistaa käyttäjälle monia hyödyllisiä etuja, kuten varman rajoitteiden toteuttamisen sekä mahdollisuuden ottaa suorituskykyvaatimukset heti huomioon.

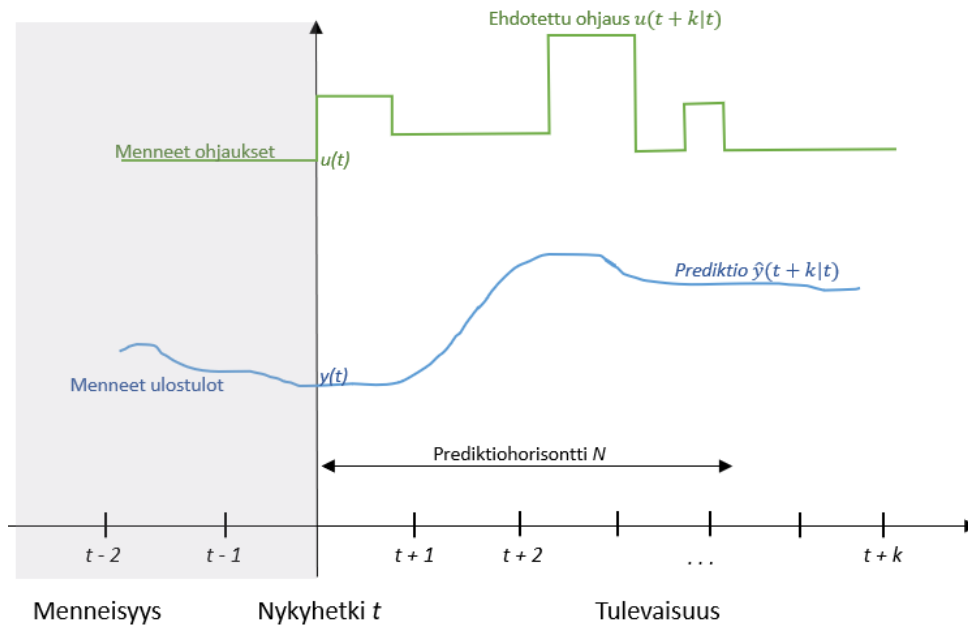
MPC:tä voidaan käyttää monimuuttujajärjestelmien eli MIMO-järjestelmien (engl. Multiple-Input and Multiple-Output) säätämiseen. MPC-säädin laskee ohjausmuuttujia, MV (engl. Manipulated Variables), jotka ovat järjestelmän herätteitä. Säädettävän järjestelmän ulostulot ovat hallittavia muuttujia, CV (engl. Controlled Variables). Lisäksi MPC-menetelmää tarvitaan kuvaamaan näiden kahden muuttujan välistä vuorovaikutusta. [11, s. 534, 536][12]

MPC:n toiminta-algoritmi voidaan karkeasti jakaa kolmeen osaan: tulevien ulostulojen ennustaminen prediktiohorisontille, tulevien ohjaussignaalien laskeminen optimoinnilla ja näiden ohjaussignaalien lähettäminen todelliselle prosessille. MPC on siis algoritmi, joka pyrkii ennustamaan järjestelmän käyttäytymistä tulevaisuudessa mittausten, estimaattien sekä mallikokoelman avulla. [9, s. 1–3][10, s. 5–6][11, s. 534, 536] MPC-säätimen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Malliprediktiivisen säädön lohkokaavio, mukailtu lähdettä [11, s. 535]

MPC ennustaa jokaisella hetkellä t tulevaisuuden ulostulot prediktiohorisontille N (engl. prediction horizon). Ennustetut ulostulot $\hat{y}(t+k|t)$, jossa $k = 1, \dots, N$, riippuvat tiedossa olevista eli menneistä sekä nykyisistä ohjaussuureista ja ulostuloista sekä tulevista ohjaussignaaleista $u(t+k|t)$, jossa $k = 0, \dots, N-1$. Tämän jälkeen MPC laskee herätteille optimaaliset trajektorit, jotka minimoivat MPC-algoritmin kustannusfunktion. Kustannusfunktion on painokertoimilla painotettujen ennustusvirheiden ja sakoilla rajoitettujen ohjausmuutosten summa. Lopuksi MPC lähettää hetken t säätösignaalin $u(t|t)$ todelliselle prosessille. Jokaisella kierroksella MPC laskee uudet trajektorit herätteille ja kierroksen toiminnot toistetaan alusta. Näiden trajektorien ensimmäisten arvojen avulla ohjataan todellisia prosesseja sekä prosessimalleja, jotka ennustavat ulostuloja. Seuraavalla prediktio kierroksella hyödynnetään edellisen prediktion aikana laskettua todellisen ulostulon ja ennustetun ulostulon erotusta, joka ilmenee ennustevirheenä. [11, s. 536][12] Kuvassa 3 havainnollistetaan, kuinka jokaisella kierroksella tarvittavat ulostulot, ohjaukset ja prediktio käytäytyvät MPC:ssä.



Kuva 3. MPC:n signaalit menneisyydessä, nykyhetkessä ja tulevaisuudessa, mukailtu lähde [9, s. 6]

MPC voi käyttää matalan kertaluokan prosessimallirakenteita herätteiden ja ulostulojen välisten vuorovaikutusten kuvaamiseen. Yksi käytetyimmistä matalan kertaluokan prosessimalleista on FOTD (engl. First Order Time Delay) eli ensimmäisen kertaluokan viiveellinen malli. FOTD-mallia voidaan kuvata siirtofunktiolla

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-ds}, \quad \tau > 0, d > 0, K \neq 0, \quad (1)$$

jossa parametri K on systeemin staattinen DC-vahvistus (engl. Direct Current), τ on aikavakio ja d on viive. [12] Viive huomataan systeemin käyttäytymisessä, kun tarkastellaan, kauanko systeemillä kestää reagoida herätteeseen. [13, s. 286] Aikavakio kuvaa sitä aikaa, joka systeemiltä kuluu saavuttaa 63,2 % askelvasteen muutoksen lopullisesta arvosta. DC-vahvistus on järjestelmän vahvistus vakiosignaaliille tai vakiosignaalikomponentille nollataajuudella. Se siis kertoo, kuinka paljon systeemi vahvistaa vakiosignaaleita tai -komponentteja tasapainotilassa. [14, s. 99–100]

3.2 Märkápään säätö

Kartonkikoneen märkápää on se osa konetta, jossa käsitellään märkää kartonkirainaa. Siellä pystytään säätämään kartongin neliömassaa ja kosteutta konesuuntaisella eli MD-suuntaisella laatusäädöllä (engl. Machine Direction) sekä poikkisuuntaisella säädöllä eli CD-säädöllä (engl. Cross Direction). Märkápäässä kosteutta säädetään tekemällä muutoksia määrän kartonkirainan laatuominaisuuksiin. [4]

Konesuuntaiseen säätöön vaikuttavat prosessin pitkät viiveet, pitkät aikavakiot, säädettävien suureiden keskinäiset vuorovaikutukset sekä muuttuva dynamiikka. Nämä tekijät asettavat erityisiä vaatimuksia konesuuntaiselle säädölle. Yksi merkittävä viive on esimerkiksi kulkuaikeviive, joka syntyy koneen märkä- ja kuivapään välille. Suureiden keskinäiset vuorovaikutukset näkyvät perussuureissa esimerkiksi ristikkäisvaikutuksina. [8, s. 83] Kartonkikoneen konesuuntaista säätöä voidaan tehdä muun muassa malliprediktiiivisellä säädöllä [12].

Poikkisuuntaisessa säädössä verrataan koneessa mitatun profiilin muotoja tavoiteprofiilin muotoihin. Säädöllä pyritään pitämään profiilien muotojen erot mahdollisimman pieninä. Jos muotojen erot ovat suuret, säädetään mitattua profiilia tarvittavien toimilaitteiden avulla. Profiilin muodoilla tarkoitetaan muun muassa profiilin kosteutta ja neliömassaa. Poikkiprofiilin säädössä kosteuden säädin on CD-kosteus ja sen tyyppillisiä toimilaitteita ovat kostutin, infrapunakuivain, höyrylaatikko sekä taskutuuletin. Korjausliikkeitä neliömassalle ja kosteussäädölle tehdään vähintään jokaisen poikkaismittauksen jälkeen. [8, s. 83] Myös koneen poikkisuuntaista säätöä voidaan tehdä malliprediktiiivisellä säädöllä. Tällöin MPC ottaa neliömassan ja kosteuspitoisuuden herätteinä ja säätää muun muassa edellä mainittuja toimilaitteita niiden perusteella. [15]

3.3 Kuivapään säätö

Kartonkikoneen kuivapäässä käsitellään kuivempaa kartonkirainaa. Siellä säädetään kartongin loppukosteus kuivatusosan avulla eli muodostetaan kartongille haluttu kosteusprofiili. Kuivatus täytyy tehdä siten, ettei kartongin laatuominaisuudet kärsi, mikä edellyttää sitä, että kuivatuslämpötilan on oltava kohtuullinen. Sopiva kuivatuslämpötila voidaan saavuttaa esimerkiksi digitaalisilla eli diskreettiaikaisilla säätöalgoritmeilla. [8, s. 82]

Sopivan kuivatuslämpötilan lisäksi halutaan, että kuivatusosassa höyry- ja lauhdejärjestelmä toimivat ilman häiriöitä ja siten, että ne toteuttavat halutut tavoitteet kuivaukselle. Tavoitteet höyry- ja lauhdejärjestelmän ideaaliselle toiminnalle ovat sylinterien sopiva pintalämpötila, jottei märkä paperi syty palamaan, sekä sopiva paine-ero sifonien yli. [8, s. 83] Sopiva lämpötila sylintereihin saadaan lauhduttamalla kylläistä tai vähän tulistettua höyryä sylintereissä. Höyryn paineen halutaan olevan noin 1–5 bar:ia. [16, s. 811]

Höyry- ja lauhdejärjestelmän toiminnan takaamiselle on olemassa erilaisia säätöratkaisuja, joista yleisin on vakiopaine-erosäätö. Perinteisessä vakiopaine-erosäädössä mitataan höyry- ja lauhdetukin välillä oleva paine-ero, jonka perusteella voidaan asettaa paine-ero vakioksi. Tämä paine-ero aiheuttaa lauhteen poistumisen sylinteristä. Muita

uudempia säätöratkaisuja ovat esimerkiksi virtaussäätö (engl. Flow-Control) ja minimi paine-eron säätö (engl. Minimum Differential Control). Virtaussäätö perustuu siihen, että vakio paine-ero höyryputkessa olevan mittalaipan yli asetetaan siten, että läpivirtaushöyrymäärä on tarpeeksi suuri lauhteen poistamiseksi maksimituotannossa. Minimipaineerosäätöratkaisu perustuu jatkuvaan ryhmäkohtaiseen lauhtemäärän mittaukseen. Jatkuvista mittauksista syötetään tietoa mikroprosessorille, joka asettaa ryhmän paineerosäätimelle sopivan asetusarvon. [4]

Nämä molemmat säätötavoitteet saadaan toteutettua kaskadisäädöllä, jossa pääsäätäjänä on kosteuden säätäjä ja aläsäätäjänä on painesäätäjä. Pääsäätäjän eli kosteussäätäjän ulostulona on aläsäätäjän eli paineen säätäjän asetusarvo. Paineen säätäjä pystyy nopeasti korjaamaan höyryjärjestelmän häiriöt ja kosteuden säätäjä pystyy korjaamaan konesuuntaista kosteustasoa siten, ettei stokastinen kosteusvaihtelu tai mittauksen vaihtelut vaikuta säätöön. Lopullinen tieto kartongin loppukosteudesta saadaan mitattua traversoivalla mittavaunulla, jolla saadaan tietoa sekä kartongin poikkisuuntaisesta että konesuuntaisesta kosteusprofiilista. [8, s. 82–83]

3.4 Kosteuteen vaikuttavat häiriötekijät

Kartongin kosteuteen ja sen säätöön vaikuttavia häiriötekijöitä on monia. Muun muassa jauhatustaso, jo kuivattu massa, huuван kosteus, kosteus puristinosalla, höyrynpaine, neliömassa, kartongin paksuus ja tiheys, nopeus, hylkymassan osuus sekä kartonkimasan laji täytyy ottaa huomioon kosteuden säätöä suunniteltaessa. [4]

Häiriötekijöitä on liian monia, jotta niitä kaikkia voitaisiin käsitellä tässä työssä tarkasti. Siksi käsitellään tarkemmin vain niitä, joilla on suurin vaikutus työssä tutkittavan asian kannalta. Alla olevissa kappaleissa käsitellään näitä häiriötekijöitä tarkemmin.

3.4.1 Neliömassa

Neliömassa tarkoittaa paperin tai kartongin massaa grammoina neliometriä kohti ja se sisältää sekä kartongin kuiva-ainemassan että veden massan. Tavallisesti kartongin neliömassa on 100–600 g/m². Neliömassalla on suuri vaikutus kartongin moneen laatuun, kuten kartongin lujuuteen, opasiteettiin ja tiivyyteen. [5, s. 78] Neliömassaa voidaan yleisesti käyttää paperin tai kartongin hyvyyskriteerinä silloin, kuin samoja materiaaleja ja niiden erilaisia valmistusprosesseja vertaillaan keskenään. Neliömassaa voidaan käyttää hyvyyskriteerinä juuri sen takia, että sillä on suuri vaikutus moneen laatuun ja sitä kautta sillä on vaikutus myös kartongin tasaisuuteen ja stabiiliuteen. [8, s. 2, 83]

Neliömassa vaikuttaa häiriönä kosteuteen. Jotta häiriö saataisiin eliminoitua, voidaan neliömassan ja kosteuden säätöpiirien välillä käyttää myötäkytkentää. Esimerkiksi, jos neliömassaa nostetaan, niin myös kuivatustehoa on nostettava. [4]

Neliömassasta saadaan laskettua kartongille myös kuivapaino. Kuivapaino sisältää vain kartongin kuiva-ainemassan eli se saadaan vähentämällä neliöpainosta veden massa. Kuivapainoa voidaan käyttää neliömassan sijasta, jos halutaan välttää neliömassan ja kosteuden ristikkäisvaikutukset. [4]

3.4.2 Nopeus

Kartonkikoneen nopeus on yksi neliömassan suuruuteen vaikuttavista tekijöistä ja sitä kautta nopeudella on vaikutusta kartongin kosteuteen. Koneen nopeuden vaikutus neliömassaan näkyy viiran ja perälaatikon kautta, sillä viiran nopeuden ja perälaatikon massasuihkun nopeuden suhde määrää syntyvän kartongin neliömassan. [16, s. 834, s. 867]

Nopeuden vaikutus häiriötekijänä kosteussäätöön näkyy varsinkin kuivatusrajoitteisissa kartonkikoneissa. Tällaisilla koneilla kuivatuskapasiteetti pidetään koko ajan maksimaalisena, jonka takia kartongin loppukosteutta säädetään koneen nopeutta muuttamalla. [8, s. 83]

3.4.3 Hylkyosuus

Alan kirjallisuudessa [4][5, s. 270][16, s. 1275] esitetään, että kartonkihylky on kartongin valmistuksessa ja jalostamisessa syntyvä tähde, jota voidaan hyödyntää uudelleen kartongin valmistuksessa. Tavoitteena on, että kun hylkyä uudelleenkäytetään kartongissa, se ei aiheuttaisi rainalle laatuongelmia eikä kartonkikoneelle ajettavuusongelmia. Hylkyosuus vaikuttaa kartongin kosteuteen, sillä kertaalleen kuivattua kartonkia ei tarvitse kuivata yhtä paljon kuin ensimmäistä kertaa käytössä olevaa kartonkimassaa. [4]

Hylkyä syntyy muun muassa silloin, kun kartongin laatu on huonoa. Huonolaatuinen kartonki ajetaan pulperoitavaksi ja siten hylkyyn. Se, kuinka suuresta osasta kartonkia syntyy hylkyä, riippuu muun muassa kartonkilajista, jälkikäsitelyssä leikattavien rullien koosta sekä arkkileikkurin rakenteesta ja kunnosta [16, s. 1275].

3.4.4 Kartongin vaaleus

Kartongin vaaleus kuvaa sitä, kuinka hyvin kartongin pinta heijastaa ja absorboi valoa. Täyspeitteisen painetun pinnan ja kartongin pinnan tummuusero halutaan maksimoida, mikä saadaan toteutettua, kun kartongin vaaleus on suuri ja pysyvyys riittävä. [4]

Kartongin halutulla vaaleustasolla on vaikutusta kartongin kosteuteen. Mitä pienempi valonsironta kartongilla on, sitä enemmän vaaleus laskee. Valonsirtontaan vaikuttaa kartonkirainan märkäpuristus, koska siitä poistuu vettä ja kuitujen sitoutuneisuus kasvaa, jolloin kartonkiraina tiivistyy. Kun raina tiivistyy ja sitoutuneisuus kasvaa, muodostuu kuitu-kuitu-rajapintoja, jotka pienentävät valonsirontaa. [4]

Myös kuivatusosalla on vaikutusta kartongin vaaleuteen. Kuivatusosassa kartonkirainasta poistetaan lisää vettä ja raina tiivistyy vielä lisää, joka vähentää valonsirontaa ja siten kartongin vaaleutta. Kuivatuksessa tapahtuu rainan kuitujen kuivumiskutistumaa, joka vähentää valonsironnan voimakkuutta. [4]

4. KOKEELLINEN OSUUS

4.1 Nykyinen kahden mallin kosteussäätöratkaisu

Nykyisessä kosteussäätöratkaisussa säädetään kartongin kosteutta kahdella rinnakkaisella mallilla: sakean massan virtauksesta kosteuteen sekä höyrynpaineesta kosteuteen. Sakealla massalla tarkoitetaan massaa, josta on poistettu vesi. Koska mallit ovat käytössä rinnakkain, riippuu kosteuden muutos molemmista malleista jatkuvasti.

Nykyisen säätöratkaisun ongelma ilmenee lajinvaihtotilanteissa, kun kartonkilajia halutaan vaihtaa ja samalla pitää tuotanto samana kuin aikaisemmin. Lajia vaihdettaessa koneen läpi ajettava kartonkimassa muuttuu. Tällöin täytyy muuttaa myös läpi menevää neliömassaa, jotta tuotanto pysyy samana. Kun neliömassa muuttuu, täytyy myös kartonkikoneen nopeutta muuttaa. Nämä muutokset vaikuttavat kartongin kosteuteen. Nykyinen säätöratkaisu ei ennakolta havaitse muuttuvan neliömassan vaikutusta kosteuteen, mistä aiheutuu säädön myöhästyminen.

Nykyisen säädön kartongin kosteuden (engl. paper moisture) tasapainotilan ennusteet lajille i lasketaan yhtälöllä

$$pm_{i,n} = g_{1,i}\Delta STP + g_2\Delta TSF + pm_{i-1}, \quad (2)$$

jossa ΔSTP on kahden peräkkäisen lajin höyrynpaineen (engl. steam pressure) erotus eli höyrynpaineen muutos lajin i ja sitä edeltävän lajin välillä, $g_{1,i}$ on vahvistus höyrynpaineen ja kartongin kosteuden välillä lajille i , ΔTSF on massan virtauksen (engl. thick stock flow) muutos lajin i ja sitä edeltävän lajin välillä, g_2 on vahvistus massavirtauksen ja kartongin kosteuden välillä ja pm_{i-1} on kartongin todellinen kosteus kartonkilajia i edeltävälle lajille. Kosteus lajille i lasketaan aina kahden peräkkäisen lajin välille, esimerkiksi muutoksena lajista yhdeksän lajiin kymmenen.

Vahvistuksella $g_{1,i}$ on jokaiselle lajille vakioarvo ja g_2 on vakio kaikille lajeille. Molemmat vahvistukset ovat määritetty tietyillä askelvastekokeilla. Kokeen avulla on määritetty vahvistukselle $g_{1,i}$ alustava arvo -6,5 ja vahvistukselle g_2 arvo 480. Koe on tehty 280 kPa:n höyrynpaineessa, mikä täytyy ottaa huomioon vahvistuksessa $g_{1,i}$ kertomalla sitä vähän numerosta yksi poikkeavalla arvolla. Jos koe olisi tehty esimerkiksi 120 kPa höyrynpaineessa, poikkeaisi kertoimen arvo merkittävästi sen nykyisestä arvosta -6,5. Luvussa 4.3 esitellään tarkemmin, miten kerroin lasketaan jokaiselle lajille.

Höyrynpaineen ja massavirtauksen muutokset lasketaan lajikohtaisista mediaaneista. Jokaisen kartonkilajin höyrynpaineelle, massavirtaukselle, kuivapainolle ja todelliselle

kartongin kosteudelle lasketaan kaikista kerätystä arvoista mediaanit. Kuten Hughes kirjoittaa kirjassaan [17, s. 2761], mediaani on lukujen tai näytteiden tyypillisin arvo, joka saadaan laittamalla näytteet suuruusjärjestykseen ja ottamalla tästä järjestyksestä keskellä oleva arvo. Mediaani lasketaan hieman eri tavalla riippuen siitä, onko arvoja pariton vai parillinen määrä. Kun arvoja on parillinen määrä, saadaan mediaani laskettua kaavalla

$$med_{parillinen} = \frac{h}{2}, \quad (3)$$

jossa h on arvojen määrä. Kun arvoja on pariton määrä, lasketaan mediaani kaavalla

$$med_{pariton} = \frac{h + 1}{2}, \quad (4)$$

jossa h on arvojen määrä. Kaavoilla lasketaan, mikä arvoista on mediaani, kun arvot ovat järjestyksessä. [17, s. 2761] Taulukkoon 1 on laskettu jokaisen lajin mediaanit kaavoilla (3) ja (4).

Taulukko 1. Jokaisen kartonkilajin kuivapainon, höyrynpaineen, massavirtauksen sekä todellisen kosteuden mediaanit.

Kartonkilaji	Kuivapainon mediaani (g/m ²)	Höyrynpaineen mediaani (kPa)	Massavirtauksen mediaani (kg/s)	Todellisen kosteuden mediaani (g/s)
1	102,2	218,9	16,6	1208,4
2	116,1	274,0	17,4	1258,0
3	125,3	260,7	17,5	1292,2
4	148,2	310,0	17,9	1315,7
5	162,8	328,4	18,0	1319,4

Vahvistukseen $g_{1,i}$ liityvissä kaavoissa (2) ja (5–9) täytyy käyttää höyrynpaineen absoluuttisia arvoja, minkä takia höyrynpaineen arvoihin täytyy lisätä ilmakehän paine eli noin 101 kPa. Tämä lisäys on tehty taulukon 1 höyrynpaineen arvoihin.

4.2 Uusi kolmen mallin kosteussäätöratkaisu

Uusi kosteussäätöratkaisu perustuu nykyiseen ratkaisuun. Uudessa ratkaisussa kosteussäätöön lisätään kahden aikaisemman mallin rinnalle vielä kolmas malli. Kolmas malli on kuivapainosta kosteuteen. Uuden säädön kartongin kosteuden tasapainon ennustetut arvot lajille i voidaan laskea yhtälöllä

$$pm_{i,u} = g_{1,i}\Delta STP + g_2\Delta TSF + g_3\Delta OD + pm_{i-1}, \quad (5)$$

jossa ΔOD on kuivapainon (engl. oven-dry weight) mediaanien muutos lajin i ja sitä edeltävän lajin välillä ja g_3 on vahvistus kuivapainosta kartongin kosteuteen. Yhtälö pohjautuu nykyisen kosteussäädön kaavaan (2), mutta siihen on lisätty malli kuivapainosta kosteuteen kolmanneksi parametriksi. Vahvistus g_3 on vakio jokaiselle kartonkilajille.

Kartongin kuivapaino on verrannollinen kartongin paksuuteen. Mitä paksumpaa kartonki on, sitä suurempi kuivatustarve sillä on. Nykyinen säätö ei havaitse sitä, jos kartonki on paksua ja täten säätö ei pysty huomioimaan kuivatustarvetta. Kun kolmanneksi parametriksi otetaan kuivapaino, saadaan säätö havaitsemaan myös kartongin paksuus ja suuremmat kuivatustarpeet.

4.3 Kartongin kosteuden laskenta

Jokaiselle tutkittavalle kartonkilajille lasketaan nykyisellä säädöllä kartongin kosteuden ennuste ja vastaavasti uudella säädöllä kartongin kosteuden ennuste. Lasketaan kartongin kosteuden ennusteet kaavoilla (2) ja (5) viidelle eri kartonkilajille. Laskut suoritetaan Excel-taulukkolaskentaohjelmalla ja laskuista saatavat tulokset taulukoidaan. Kaikissa taulukoissa arvot ovat pyöristetty yhden desimaalin tarkkuudella, jotta ne voidaan esittää taulukoissa siistimmin. Laskut Excelissä on suoritettu tarkoilla arvoilla. Ennen kosteuden laskemista lasketaan vahvistukselle $g_{1,i}$ arvot.

Kokeelliseen osuuteen on valittu tarkasteltavaksi kartonkilajit 1–5. Lajit on valittu niiden neliömassan perusteella. Kartonkilajien numerot ja lajia vastaavat neliömassat ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Kartonkilajit ja niiden neliömassat

Kartonkilaji	Neliömassa (g/m ²)
1	90
2	100
3	110
4	125
5	135

Kyseiset lajit ovat valittu, koska niiden neliömassat poikkeavat toisistaan vain vähän, 10 tai 15 g/m²:n verran (taulukko 2). Koska neliömassavaihtelu on melkein yhtä suurta kaikkien lajien välillä, on niiden tuottamia tuloksia helpompi tulkita ja vertailla.

Vahvistus $g_{1,i}$ lajille i lasketaan kaavalla

$$g_{1,i} = (-6,5) \cdot k_i, \quad (6)$$

jossa k_i on parametri, jolla kompensoidaan arvon -6,5 vaikutusta vahvistukseen. Arvo -6,5 on saatu suorittamalla erilaisia kokeita kartonkikoneella 280 kPa:n höyrynpaineessa. Kokeen tuloksista on muodostettu kylläisen höyrynpaineen ja lämpötilan muutoksen käyrä. Kaava (6) on sovite tästä muutosten käyrästä. Arvo -6,5 olisi huomattavasti eri suuruinen, jos kokeet tehtäisiin erisuuruudessa höyrynpaineessa. Parametri k_i voidaan laskea lajille i yhtälöllä

$$k_i = \frac{c_{STP,i}^0}{c_{STP,i}}, \quad (7)$$

jossa $c_{STP,i}^0$ on lajin i toimintapiste (engl. operating point) siinä höyrynpaineessa, jossa kokeet vahvistuksien määrittämiseksi ovat tehty ja $c_{STP,i}$ on lajin i toimintapiste nykyisessä höyrynpaineessa. Toimintapiste $c_{STP,i}^0$ lasketaan yhtälöllä

$$c_{STP,i}^0 = 0,084 \cdot (p_{STP,i}^0)^{0,814}, \quad (8)$$

jossa $p_{STP,i}^0$ on höyrynpaine, jossa kokeet suoritettiin. Kaikki kokeet suoritettiin samassa höyrynpaineessa, joten kaikille lajeille saadaan yksi, yhteinen arvo, joka on noin $8,2464 \text{ kPa}^{0,814}$. Toimintapiste $c_{STP,i}$ 280 kPa:n paineessa ratkaistaan kaavalla

$$c_{STP,i} = 0,084 \cdot (p_{STP,i})^{0,814}, \quad (9)$$

jossa $p_{STP,i}$ on kartonkilajin i höyrynpaineen mediaani.

Kahden lajin välisessä muutostilanteessa käytetään kertoimen k approksimointiin kahden lajin välistä keskiarvoa. Muutostilanteessa keskiarvo lajin i ja $i-1$ välillä saadaan laskettua kaavalla

$$\Delta k = \frac{k_{i-1} + k_i}{2}, \quad (10)$$

jossa k_i on lajin i kompensoiva parametri ja k_{i-1} on lajin i edeltävän lajin kompensoiva parametri [17, s. 2759]. Molempien lajien kertoimet lasketaan yhtälöllä (7).

Taulukkoon 3 on listattu parametrin $c_{STP,i}$ arvot laskettuna kaavalla (9) ja millä höyrynpaineella ne ovat laskettu sekä taulukkoon 4 on listattu kertoimen Δk arvot laskettuna kaavalla (8).

Taulukko 3. Nykyisen toimintapisteen arvot, höyrynpaineet, joilla ne ovat laskettu sekä kertoimen Δk arvot.

Laji	$p_{STP,i}$ (kPa ^{0,814})	$c_{STP,i}$ (kPa ^{0,814})	Δk
1	218,9	6,7	1,3
2	274,0	8,1	1,4

3	260,7	7,8	1,3
4	309,9	9,0	1,3
5	328,4	9,4	1,2

Taulukko 4. Kertoimen k approksimoitut arvot muutostilanteissa.

Lajivälit	Δk
1 \rightarrow 5	1,3
2 \rightarrow 1	1,4
3 \rightarrow 2	1,3
4 \rightarrow 3	1,3
5 \rightarrow 4	1,2

Lajilla 1 ei ole sitä edeltävää lajia, joten sen kohdalla kertoimen k approksimoitu arvo on laskettu lajin 1 ja 5 välille. Näin voidaan tehdä, koska normaalisti lajikierron aikana voi tulla isompia muutoksia kartonkimassojen välillä. Käyttämällä lajien 1 ja 5 erotusta, voidaan mallintaa tällaista suurempaa muutosta. Taulukon 4 kertoimien Δk arvoilla lasketaan vahvistukselle $g_{1,i}$ arvot kaavalla (4), mitkä ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Vahvistukselle $g_{1,i}$ lasketut arvot

Laji	$g_{1,i}$
1	-8,8
2	-9,4
3	-8,7
4	-8,3
5	-7,5

Nykyisellä säädöllä lasketut kartongin kosteuden ennusteet

Lasketaan kartongin kosteuden ennustetut arvot $pm_{i,n}$ nykyisellä säädöllä kartonkilajeille 1–5. Taulukossa 6 on listattuna kaavalla (2) lasketut arvot.

Taulukko 6. Kartongin kosteuden arvojen ennusteet nykyisellä säädöllä.

Laji	$pm_{i,n}$ (g/s)
1	1599,9
2	1074,3
3	1449,3
4	1062,4
5	1221,9

Uudella säädöllä lasketut kartongin kosteuden ennusteet

Uuden säätöratkaisun yhtälössä (5) esiintyvä vahvistus g_3 ratkaistaan Excelin Solver-toiminnolla. Solver-toiminnolle syötetään luku, joka halutaan minimoida tai maksimoida, tieto siitä, halutaanko minimoida vai maksimoida kyseinen luku ja mitä toista lukua muuttamalla se voidaan tehdä. Microsoft [18] on kirjoittanut tukisivuillaan, että Solver-toiminto käyttää ratkaisumenetelmään kolmea erilaista algoritmia. Eri ratkaisutavat perustuvat erilaisiin ongelmiin ja ongelman tyyppi määrittää ratkaisussa käytettävän algoritmin. Epälineaarille silleille ongelmille käytetään GRG Nonlinear -algoritmia (engl. Generalized Reduced Gradient Nonlinear). Sileä ongelma on sellainen ongelma, jonka funktioiden kaikki derivaatat ovat jokaisen ongelman muuttujan suhteen jatkuvia [19]. Lineaariset ongelmat ratkaistaan LP Simplex -algoritilla. Jos ongelma ei ole kumpaakaan näistä, käytetään sen ratkaisuun Evolutionary-algoritimia. Algoritmeille ei ole suomenkielisiä vastineita. [18]

Vahvistuksen g_3 ratkaisemisessa halutaan minimoida säädön ennusteen ja kosteuden todellisen arvon välinen ero ja sen ratkaisemiseen käytetään GRG Nonlinear -algoritmia. Keskimääräinen virhe uudelle säädölle lasketaan yhtälöllä

$$virhe = \sum_{i=1}^5 \frac{|pm_{i,u} - pm_i|}{5}, \quad (11)$$

jossa $pm_{i,u}$ on kaikkien lajien kartongin kosteuden ennustetut arvot uudella säädöllä ja pm_i on kaikkien lajien kartongin todellinen kosteus. Tämän lisäksi valitaan vahvistukselle g_3 jokin lähtöarvo, joka syötetään Solver -toiminnolle muuttettavana arvona. Solver -toiminnolla lasketaan lajien yhteenlasketuksi virheeksi noin 83,9 g/s, jolla saadaan vahvistuksen g_3 arvoksi noin 6,5.

Vahvistuksen g_3 arvolla saadaan taulukon 7 mukaiset tulokset kartongin kosteudelle uudella säätöratkaisulla.

Taulukko 7. Kartongin kosteuden ennustetut arvot uudella säädöllä.

Laji	$pm_{u,i}$ (g/s)
1	1208,4
2	1164,2
3	1509,3
4	1210,5
5	1315,5

Vahvistus g_3 olisi mahdollista selvittää myös lajikohtaisesti, mikä olisi parempi ratkaisu. Lajikohtaisia vahvistuksia ei kuitenkaan ole selvitetty muille vahvistuksille, joten vain yhdelle vahvistukselle tätä ei voida tehdä. Vaikka lajikohtaiset vahvistukset antaisivat parempia tuloksia, ei se ole muuten kannattavaa. Lajikohtaiset vahvistukset vaatisivat huomattavasti enemmän viritystä kuin yleiset vahvistukset, mikä vie huomattavasti paljon enemmän aikaa ja rahaa.

4.4 Tulosten virhearvot

Molempien säätöratkaisuiden antamia tuloksia voidaan vertailla kosteuksien välisten virheiden avulla. Lajikohtaiset virheet lasketaan säädön antaman kosteuden arvon ennusteen $pm_{i,n}$ ja todellisen kosteuden arvon pm_i erotuksena. Nykyiselle säädölle virhe lasketaan kaavalla

$$virhe_{n,i} = pm_{i,n} - pm_i. \quad (12)$$

Uudelle säädölle lajikohtaiset virheet lasketaan kaavan (12) mukaisesti, mutta erotus tehdään uuden säätöratkaisun antaman kosteuden arvon ennusteen $pm_{i,u}$ ja todellisen kosteuden pm_i välillä. Uuden säädön virhe lasketaan siis kaavalla

$$virhe_i = pm_{i,u} - pm_i, \quad (13)$$

jossa $pm_{i,u}$ on lajin i kartongin kosteus uudella säädöllä ja pm_i on kartonkilajin i todellinen kosteus. Kaavoilla (12) ja (13) lasketut virheet on listattu taulukossa 8.

4.5 Tulosten vertailu

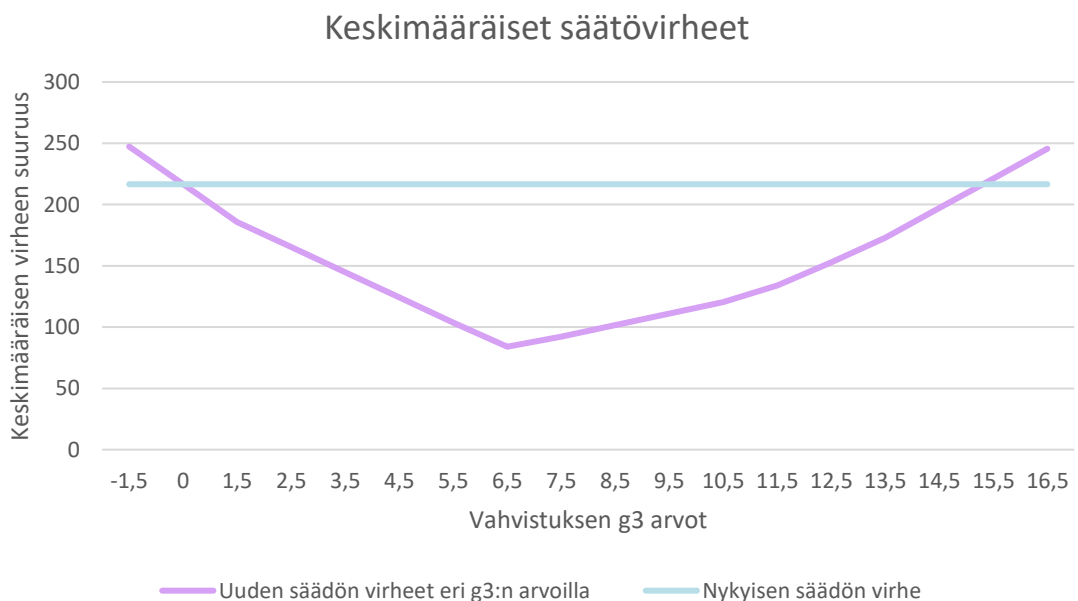
Tässä alaluvussa kootaan kaikki merkittävimmät tulokset yhteen, jotta niitä on helpompi tulkita ja vertailla. Taulukkoon 8 on koottu jokaisen lajin nykyisen säädön ennusteiden arvot ja virheet sekä uuden säädön ennusteiden arvot ja virheet. Taulukon viimeiselle riville on laskettu keskimääräiset virheet molemmille säädöille kaavalla (11).

Taulukko 8. Nykyisen ja uuden säädön kosteusarvot ja virheet

Laji	$pm_{i,n}$ (g/s)	$pm_{i,u}$ (g/s)	pm_i (g/s)	Virhe nykyisellä säädöllä (g/s)	Virhe uudella säädöllä (g/s)
1	1599,9	1208,4	1208,4	391,5	0,0
2	1074,3	1164,2	1258,0	-183,6	-93,8
3	1449,3	1509,3	1292,2	157,1	217,0
4	1062,4	1210,5	1315,4	-252,9	-104,8
5	1221,9	1315,5	1319,4	-97,5	-3,9
Keskimääräinen virhe				216,5	83,9

Taulukon arvoista huomataan, että ennustuksen virhe uudella säädöllä on huomattavasti pienempi kuin nykyisellä säädöllä, sillä nykyisen säädön virhe on yli kaksinkertainen uuden säädön virheeseen nähden. Uudella säädöllä on siis päästy tavoitteiseen eli on saatu tarkempi säätö. Myös kosteuden ennustetut arvot tukevat tätä päätelmää. Kun verrataan uuden säädön ennustamia kosteuden arvoja todellisiin kosteuden arvoihin, huomataan, että kosteuden arvot eivät eroa toisistaan yhtä paljon, kuin nykyisen säädön arvot eroavat todellisista arvoista. Lajin 1 uudella säädöllä ennustettu arvo on sama kuin todellinen kosteusarvo. Myös muiden lajien ennustetut kosteudet ovat lähempänä oikeaa uudella säädöllä, lukuun ottamatta lajia 3. Lajin 3 ennustettu kosteus on lähempänä todellista kosteutta nykyisellä säätöratkaisulla. On vaikea arvioida, mistä yhden lajin poikkeama johtuu, kun muilla tarkasteltavilla lajeilla ennusteet tarkentuivat uudella säädöllä.

Piirretään uuden ja nykyisen säädön virheistä herkkyyskuvaaja uuden säätöratkaisun tarkkuuden havainnollistamiseksi. Kuvaajaan piirretään oma käyrä nykyisen säädön keskimääräiselle virheelle ja oma käyrä uuden säädön keskimääräiselle virheelle eri vahvistuksen g_3 arvoilla. Valitaan vahvistuksen arvot väliltä $[-1,5, 16,5]$ ja lasketaan näillä arvoilla uuden säädön kosteuden tasapainoarvot kaavalla (5), säätöjen lajikohtaiset virheet kaavalla (13) sekä keskimääräiset virheet kaavalla (11). Näiden laskujen perusteella piirretään herkkyyskuvaaja, jolla havainnollistetaan millä vahvistuksen g_3 arvoilla uusi säätöratkaisu on parempi. Kuvaajassa x-akseli on vahvistuksen g_3 arvot ja y-akseli on keskimääräisen virheen suuruus. (Kuva 4)



Kuva 4. Herkkyyskuvaaja molempien säätöjen keskimääräisistä säätövirheistä

Uuden säädön keskimääräisen virheen minimi saavutetaan vahvistuksen $g_3 = 6,5$ kohdalla, mikä on täysin sama kuin aikaisemmin laskettu vahvistuksen ideaalinen arvo. Kuvaaja laskee lähes lineaarisesti tähän pisteeseen, jonka jälkeen kuvaaja nousee lähes lineaarisesti ylöspäin. Uuden ja nykyisen säädön virheiden kuvaajat leikkaavat toisensa suunnilleen x-akselin kohdissa 0 ja 15. Uusi säätö on siis aina tarkempi näiden arvojen välissä eli kun sen käyrä on nykyisen säädön keskimääräisen virheen käyrän alapuolella. (Kuva 4)

Kuvaaja havainnollistaa hyvin sen, että vahvistuksen g_3 arvon ei tarvitse olla ideaalinen 6,5, vaan se voi poiketa siitä huomattavan paljon ja silti uusi säätöratkaisu tuottaa tarkempia kosteuden ennusteita kuin nykyinen ratkaisu. Uusi säätöratkaisu on tämän ominaisuuden ansioista myös robusti, jota yleensä tavoitellaan myös muissa järjestelmissä. (Kuva 4)

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin uutta kosteussäätöratkaisua lisätyllä rinnakkaisella mallilla sekä tehtiin vertailua sen ja nykyisen säätöratkaisun välillä. Nykyisessä ratkaisussa on käytössä kaksi rinnakkaista mallia eli vertailua tehtiin kahden ja kolmen rinnakkaisen mallin välillä. Tutkimisen ja vertailun lisäksi työssä kuvattiin kartonkikoneen toiminta ja kartongin muodostamisen prosessi. Työssä kuvattiin myös kosteussäätömenetelmiä kartonkikoneen sisällä, missä kartongin valmistusvaiheissa säätöä tehdään ja mitkä ovat tärkeimmät tekijät, jotka säädössä täytyy huomioida.

Työn kokeellisessa osuudessa laskettiin molempien säätöjen ennusteet kartongin kosteudelle. Eri kosteuden ennusteiden avulla laskettiin molempien säätöratkaisuiden sekä lajikohtaisia että keskimääräisiä säätövirheitä ja näiden laskemiseen tarvittavia oleellisia suureita. Säätövirheistä piirrettiin myös tuloksia havainnollistava herkkyysskuvaaja. Säätövirheiden lisäksi kokeellisessa osuudessa tutkittiin uudessa säätöratkaisussa olevan vahvistuksen vaikutusta säädön tarkkuuteen. Tärkeimpänä tuloksena saatiin tieto siitä, että uusi kosteussäätöratkaisu on huomattavasti tarkempi nykyiseen ratkaisuun verrattuna monella eri vahvistuksen arvolla. Vahvistuksen ideaaliseksi arvoksi saatiin 6,5, koska sillä arvolla säätövirhe oli pienin. Kaikki laskennat suoritettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

Työssä haasteellista oli saada laskuihin käytettyä dataa sopivasti ja oikeassa muodossa. Dataa täytyi saada juuri oikeista kohdista kartonkikonetta, jotta säädön laskennat pystyttiin tekemään. Ennen laskennan aloittamista dataa täytyi kerätä tarpeeksi, jotta laskelmista saatavat tulokset olisivat luotettavia. Haasteellista oli myös laskea uuden säätöratkaisun vahvistus, joka hankaloitti myös uuden säädön ennustamien arvojen laskemista.

Kokonaisuutena työ onnistui hyvin. Uudella säätöratkaisulla saatiin tarkempia tuloksia vanhaan ratkaisuun verrattuna. Uusi ratkaisu on myös robusti. Molempien säätöratkaisujen säätövirheitä pystyttiin vertailemaan ja vertailun tukemiseksi pystyttiin piirtämään havainnollistava kuvaaja. Tämän työn tuloksia voisi hyödyntää jatkossa, jos haluttaisiin tutkia, olisiko kosteussäädöstä mahdollista saada vielä tarkempi. Laskentaan käytettyä Excel-pohjaa voitaisiin hyödyntää mahdollisissa jatkotutkimuksissa muokkaamalla sitä tarpeiden mukaisesti.

LÄHTEET

- [1] H. Ranta, Paperitehdas, Arkeologisen kulttuuriperinnön opas, 2022, päivitetty 29.9.2022. Saatavissa (viitattu 8.11.2022): <http://akp.nba.fi/wiki/paperitehdas>
- [2] H. Rautoma, V. Grekula, Metsäteollisuuden maailmanvalloitus alkoi kartonkikoneesta pikkukylässä – 60 metriä pitkä laite mullisti kartongin valmistuksen, Yle, 2022, päivitetty 3.2.2022. Saatavissa (viitattu 8.11.2022): <https://yle.fi/uutiset/3-12300248>
- [3] Valmet, Moisture control changes the game of corrugators, 5.1.2023. Saatavissa (viitattu 8.2.2023) <https://www.valmet.com/media/articles/automation/moisture-control-changes-the-game-for-corrugators/>
- [4] KnowPap, versio 23.0, 2021, päivitetty 2022. Saatavissa (viitattu 11.8.2022): http://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/knowpap.htm
- [5] U. Häggblom-Ahnger, P. Komulainen, Paperin ja kartongin valmistus, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2001, 290 s.
- [6] D. Chu, M. Forbes, J. Backstrom, C. Gheorghe, S. Chu, Model Predictive Control and Optimization for Papermaking Processes, IntechOpen, 5.7.2011. Saatavissa (viitattu 25.11.2022) <https://www.intechopen.com/chapters/16069> doi: 10.5772/18535.
- [7] T. Zheng, Advanced Model Predictive Control, IntechOpen, London, 2011, 432 p.
- [8] Paperikoneen hallittavuuden ja raaka-aine- ja energiahyötysuhteen parantaminen, Kauppa- ja teollisuusministeriö; Energiaosasto, Helsinki, 1988, 106 s.
- [9] E.F. Camacho, C. Bordons, Model Predictive Control, Springer London, London, 2007, 405 p.
- [10] M. Reble, Model Predictive Control for Nonlinear Continuous-Time Systems with and without Time-Delays, Logos Verlag Berlin, Berlin, 2013, 162 p.
- [11] D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003, 713 p.
- [12] L.D. Rippon, Q. Lu, M. Forbes, R.B. Gopaluni, P. Loewen, J. Backström, Machine Direction Adaptive Control on Paper Machine, ACS Publications, 2019. Saatavissa (viitattu 15.12.2022): <https://pubs-acsc-org.libproxy.tuni.fi/doi/10.1021/acs.iecr.8b06067>
- [13] S. Shinnars, Modern Control System Theory and Design, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1992, 855 p.
- [14] B. Lipták, Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization, 4. Edition, CRC Press, 2005, 2464 p.

- [15] Z. Mo, Optimization Methods for Control Systems of The Headbox and The Cross Direction Control on papermaking Machines, Journal of Physics, Conference Series, Vol. 2183, Iss. 1, 2022. Saatavissa (viitattu 20.12.2022): <https://www.proquest.com/docview/2635868515?accountid=14242&parentSessionId=dyfcz%2BwCZPX5wV7udYa8%2Fxc40uvMA57hkEZAL0ae6IY%3D&pq-origsite=primo>, doi: 10.1088/1742-6596/2183/1/012019.
- [16] M. Kankaanpää, J. Karhunen, H. Rautiainen, L. Gräsbeck, N. Ryti, Å. Bergman, et al., Paperin valmistus, teoksessa Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, Oy Turun Sanomat, Turku, 1983, s. 725–1343.
- [17] S. Hughes, The Gale Encyclopedia of Science (Vol. 5. 6th ed.), Gale, 2004.
- [18] Microsoft 365-tuki, Ongelman määrittäminen ja ratkaiseminen Ratkaisimen avulla. Saatavissa (viitattu 3.4.2023) <https://support.microsoft.com/fi-fi/office/ongelman-m%C3%A4%C3%A4ritteleminen-ja-ratkaiseminen-ratkaisimen-avulla-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>
- [19] FrontlineSolvers, Excel Solver Help. Saatavissa (viitattu 3.4.2023) <https://www.solver.com/excel-solver-online-help>