

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KARTONKIKONEEN HÖYRY- JA LAUHDEJÄRJESTELMÄN SUORITUS- KYVYN TUTKIMINEN

Valmet Technologies Oy

TEKIJÄ/T Juho Kääriäinen

| | |
|---|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma | |
| Työn tekijä(t) Juho Kääriäinen | |
| Työn nimi Kartonkikoneen höyry- lauhdejärjestelmän suorituskyvyn tutkiminen | |
| Päiväys 23.5.2022 | Sivumäärä/Liitteet 27/7 |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Valmet Technologies Oy | |
| Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä käytiin läpi kartongin valmistusprosessi, kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmän rakennetta ja toimintaa, sekä tarkastellaan järjestelmän suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Työn toimeksiantaja oli Valmet Technologies Oy. Työn tavoitteena oli tarkastella simulointien perusteella millainen paineprofiili olisi paras kartongin kuivatukselle.</p> <p>Työssä perehdyttiin aluksi kartongin valmistusprosessiin, kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmän toimintaan ja sen suorituskykyyn. Tieto näille kappaleille tuli pääosin kirjallisuudesta, mutta järjestelmän suorituskykyyn liittyvistä asioista keskustelin enemmän Valmetin työntekijöiden kanssa. Työssä tehtiin simuloiteja Matlab Simulink- ohjelmalla. Simuloinneissa simuloitiin kartonkikoneen alkupään toimintaa, sillä se vaikuttaa koneen suorituskykyyn kaikista eniten. Simulointeihin oli valittu seitsemän erilaista paineprofiilia. Simulointien tuloksista tarkasteltiin höyrynkulutusta, syntyvän jäännöshöyryn määrää, lauhteessa olevan energian määrää, sekä läpipuhallushöyryn virtausta kuivatussylintereiltä lauhdetankeille ja lauhdetankeilta kuivatussylintereille.</p> <p>Simulointien tuloksista huomattiin, että mitä matalampi paine ensimmäisellä höyryryhmällä oli, sitä matalampi oli höyrynkulutus. Tosin kun ensimmäisellä höyryryhmällä oleva paine oli matala, joudutaan loppupään painetta nostamaan ja tämä pienensi kuivatuskapasiteettia. Tuloksista nähtiin myös, että ensimmäisen ryhmän paine vaikuttaa syntyvän jäännöshöyryn määrään, sekä päälauhetankkiin menevän lauhteen energiamäärään. Kartonkikoneen paineprofiilit ovat aina konekohtaisia, mutta yleisesti profiiliin olisi hyvä olla tasainen, jotta ensimmäisillä höyryryhmällä paine ei kasvaisi korkeaksi ja kuivatuskapasiteetti olisi riittävä. Asia mikä vaatii jatkotutkimusta, oli kuivatuksesta ylitsejäävän energian talteenotto. Eli kuinka jäännöshöyryssä ja lauhteessa olevaa energiaa voitaisiin hyödyntää paremmin kuivatusprosessin jälkeen.</p> | |
| Avainsanat kartonkikone, höyry- ja lauhdejärjestelmä, suorituskyky | |

| | |
|---|--------------------------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | |
| Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering | |
| Author(s) Juho Kääriäinen | |
| Title of Thesis Examination of the Performance of the Steam and Condensate System of a Board Machine | |
| Date 23 May 2022 | Pages/Appendices 27/7 |
| Client Organisation /Partners Valmet Technologies Oy | |
| <p>Abstract</p> <p>The thesis covered the board manufacturing process, structure and operation of the board machine's steam and condensate system. Also the factors affecting the system's performance were examined. The thesis was commissioned by Valmet Technologies Oy. The aim of the thesis was to review what kind of pressure profile would be the best for drying cardboard based on simulations.</p> <p>At first the manufacturing process of board, structure and the operation of the steam and condensate system of the board machine were studied. Also the factors affecting the system's performance were examined. This study was mainly a literature study, but also discussion with Valmet employees provided a lot of information. Simulations in this thesis were performed with Matlab Simulink. The simulations simulated the operation of the board machine's wet end as it affects the performance of the machine the most. Seven different pressure profiles were selected for the simulations. From the results of the simulations, steam consumption, amount of residual steam generated, amount of energy in the condensate, and also flow of blow-through steam from drying cylinders to the condensate tanks and from condensate tanks to the drying cylinders were examined.</p> <p>The results of the simulations show that the lower the pressure was in the first steam group, the lower was the steam consumption. However, when the pressure in the first steam group was low, the pressure of the later steam groups needed to be higher. Increase of the pressure in later groups reduced the drying capacity. The results also show that the pressure of the first steam group affects the amount of residual steam generated as well as the amount of energy that is in condensate that goes to the main condensate tank. The pressure profiles of board machines are always machine-specific, but in general the profile should be uniform so that the pressure does not increase too high in first steam group and the drying capacity is sufficient. The recovery of energy left over from drying needs to be studied further. That is, how the energy in residual steam and condensate could be better utilized after the drying process.</p> | |
| <p>Keywords</p> <p>board machine, steam- and condensate system, performance</p> | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | VALMET TECHNOLOGIES OY | 7 |
| 3 | KARTONGIN VALMISTUS..... | 8 |
| 3.1 | Kartonkikoneen rakenne..... | 8 |
| 3.2 | Kartonkikoneen energiankulutuskohteet | 8 |
| 3.3 | Monisyylinterikuivatus | 9 |
| 3.4 | Kosteussäätö | 10 |
| 4 | HÖYRY- JA LAUHDEJÄRJESTELMÄN TOIMINTA | 13 |
| 4.1 | Höyry- ja lauhde järjestelmän rakenne | 13 |
| 4.2 | Höyry- ja lauhdejärjestelmätyypit..... | 14 |
| 4.2.1 | Kaskadijärjestelmä..... | 14 |
| 4.2.2 | Termokompressorijärjestelmä..... | 15 |
| 4.3 | Höyryn paineen säätö | 15 |
| 4.4 | Höyryn paine-eron säätö | 16 |
| 4.5 | Lauhteenpoisto kuivatussylinteristä | 16 |
| 4.6 | Lauhteen palautus voimalaitokselle | 17 |
| 5 | HÖYRY- JA LAUHDEJÄRJESTELMÄN SUORITUSKYVYN TUTKIMINEN | 18 |
| 5.1 | Höyry- ja lauhdejärjestelmän suorituskykyyn vaikuttavat tekijät..... | 18 |
| 5.2 | Höyryn paineen valinta..... | 18 |
| 5.3 | Höyryn paine-eron valinta | 18 |
| 5.4 | Höyry- ja lauhdeputken mitoitus | 18 |
| 5.5 | Lauhteenpoisto höyryputkistosta | 19 |
| 5.6 | Lämpöhäviöt..... | 20 |
| 5.7 | Likaantuminen | 20 |
| 6 | SIMULOINNIT | 21 |
| 6.1 | Simulointiohjelmat | 21 |
| 6.2 | Simulointimalli | 21 |
| 6.3 | Simulointien tulokset..... | 22 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 26 |
| | LÄHTEET | 27 |
| | LIITTEET | 28 |

KUVALUETTELO

| | |
|---|----|
| KUVA 1. Kaksiviiravienti. (Slätteke 2006) | 9 |
| KUVA 2. Yksiviiravienti. (Slätteke 2006) | 10 |
| KUVA 3 Valmetin mittaraami. (Valmet 2022) | 11 |
| KUVA 4 Paineprofilinmukainen asetusarvolaskenta. (Slätteke 2006) | 11 |
| KUVA 5. Kaskadijärjestelmän toimintaperiaate. (AEL 2003) | 14 |
| KUVA 6. Termokompressorijärjestelmän toimintaperiaate. (AEL 2003) | 15 |
| KUVA 7. Höyryputken vesitys. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen, 2013) | 19 |
| KUVA 8 Kaskadimalli simulointitilanteesta. (Kääriäinen 2022) | 21 |
| KUVA 9 Höyryn paineen ja höyryn kulutuksen suhde. (Kääriäinen 2022) | 23 |
| KUVA 10 Lauhduttimelle kulkeutuvan jäännöshöyryn määrä ensimmäiseltä höyryryhmältä. (Kääriäinen 2022) | 23 |
| KUVA 11 Lauhdetankki 2:lta päälauhdetankille kulkeutuvan lauhteen sisältämä energia. (Kääriäinen 2022) | 24 |

1 JOHDANTO

Asetetut kansainväliset ilmastotavoitteet ja nouseva energian hinta luovat paineita energiatehokkuuden ja suorituskyvyn parantamiseen. Kartongin valmistuksen vuotuiset energiakustannukset ovat noin 24-39 miljoonaa euroa. Jos vuosittaista energiankulutusta saataisiin laskettua 1 % vuosittaiset säästöt voisivat olla jopa 400 000 euroa. Uusien konelinjojen osalta voidaan energiatehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi sillä millainen konsepti valitaan. Olemassa olevien konelinjojen osalta energiatehokkuutta voidaan parantaa varmistamalla, että siihen suunnitellut järjestelmät, kuten höyry-lauhde järjestelmä, toimivat suunnitellusti ja optimaalisesti. Jos näin ei ole, voidaan järjestelmä viritellä energiatehokkaaksi tuotanto huomioiden tai tarjota energiankulutusta parantavaa uusinta tietoa ja teknologiaa.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kuinka kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmä toimii, sekä käsitellään sen suorituskyvyn vaikuttavia tekijöitä. Kartonkikoneen toiminnan kannalta on välttämätöntä, että kartonkikoneen höyry- lauhde järjestelmä toimii oikein. Kun kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmä, sekä kuivatusosa toimivat oikein ja suunnitellusti saadaan koneen tuotantoa ja energiatehokkuutta nostettua.

Kartonkikoneiden höyry- ja lauhdejärjestelmät ovat aina konekohtaisia, kuten ovat myös suorituskyvyn vaikuttavat tekijät. Kartonkitehtaan sijainnilla on myös vaikutus höyry- ja lauhdejärjestelmien toimintaan. Työssä ei tarkastella minkään tietyn kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmän suorituskykyä, vaan käydään yleisesti läpi järjestelmän toimintaan vaikuttavia tekijöitä.

Työssä tehdään simulointeja käyttämällä Matlab Simulink- ohjelmaa. Simuloinneissa simuloidaan kuivatusosan toimintaa eri paineprofiileilla. Simulointien tuloksista on tarkoitus tutkia miten erilaiset paineprofiilit vaikuttavat kuivatukseen ja millainen paineprofiili on suorituskyvyn ja energiatehokkuuden kannalta paras kuivatukselle.

2 VALMET TECHNOLOGIES OY

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Valmet Technologies Oy. Valmet on kansainvälinen yritys, joka toimittaa ja kehittää teknologian sekä automaation palveluita sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle ja tarjoaa asiakkailensa erilaisia palveluita muun muassa kunnossapitoon, automaatoratkaisuihin ja voimalaitosten parannuksiin liittyen. Yritys on toiminut teollisuuden alalla yli 200 vuotta ja työllistää kansainvälisesti yli 14000 henkilöä. Valmetin liikevaihto vuonna 2021 oli noin 3,9 miljardia euroa ja sen pääkonttori sijaitsee Espoossa. (Valmet, 2022)

Maantieteellisesti Valmetin liiketoiminta on jaettu viiteen alueeseen. Nämä alueet ovat Pohjois-Amerikka, Etelä-Amerikka, EMEA (Eurooppa, Lähi-itä ja Afrikka), Kiina, sekä Aasian ja Tyynenmeren alue. Yrityksen neljä liiketoimintalinjaa näillä alueilla ovat Paperi-, Sellu ja energia-, Automaatio-, sekä Palvelut- liiketoimintalinja. (Valmet, 2022)

Paperit-liiketoimintalinja toimittaa kartonki-, pehmopaperi- ja paperikoneita, sekä niihin liittyvien laitteiden ja koneiden uusintoja maailmanlaajuisesti. Laitteet ja ratkaisut on pyritty suunnittelemaan niin että asiakkaat voivat tehdä tuotantoon liittyvät muutokset nopeasti ja keskittyä lopputuotteiden tuottamiseen. (Valmet, 2022)

Sellu ja energia -liiketoimintalinja koostuu tehtaiden ja prosessilaitteiden toimittamisesta kemialliseen ja mekaaniseen massanvalmistukseen, sekä biopolttoaineita kuten biomassaa tai jätettä polttoaineena käyttävien voimalaitosten ympäristöjärjestelmien toimittamiseen. Massanvalmistuksen ratkaisut on suunniteltu tehostamaan raaka-aineiden käyttöä ja vähentämään kemikaalien ja veden kulutusta sellun valmistuksessa. Valmetin energiatuotteisiin kuuluvat kattilat, kaasutinlaitteet, ympäristöjärjestelmät ja näihin liittyvien teknologioiden uusinnat. Valmet myös toimittaa biomassaan ja jätteenpolttoon perustuvia lämpö- ja voimalaitoksia. (Valmet, 2022)

Automaatio-liiketoimintalinjan päätuotteita ovat hajautetut ohjausjärjestelmät (DCS), ja laadunhallintajärjestelmät (QCS), sekä erilaiset analysointilaitteet ja mittaukset. Liiketoimintalinja toimittaa ja kehittää erilaisia automaation ja tiedonhallinnan järjestelmiä, sovelluksia sekä palveluita eri teollisuuden alojen yrityksille. Valmetin automaatoratkaisut parantavat tuotannon suorituskykyä sekä kustannus-, materiaali-, ja energiatehokkuutta. Tämä maksimoi asiakkaiden liiketoimintojen kannattavuutta ja vastuullisuutta. (Valmet, 2022)

Valmetin Palvelut-liiketoimintalinjalla on noin 100 palvelukeskusta ja ne työllistävät yli 6000 huollon työntekijää maailmanlaajuisesti. Palveluita tarjotaan pääasiassa sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Tarjottaviin palveluihin kuuluvat muun muassa varaosat ja kulutusosat, kunnossapito- ja seisokkipalvelut, ulkoistuspalvelut, sekä prosessien optimointia ja tehtaiden ja laitosten parannuksia. Nämä palvelut auttavat asiakkaita energian ja resurssien käytön tehostamisessa, sekä päästöjen vähentämisessä. (Valmet, 2022)

3 KARTONGIN VALMISTUS

Kartongin valmistus on yksinkertaistettuna veden poistoa rainasta. Kartongin valmistusprosessissa tarkoituksena on saada veden avulla yksittäisistä kuiduista yhtenäinen massa. Muut käytettävät raaka-aineet vaihtelevat kartongille haluttujen ominaisuuksien mukaan, mutta tärkeimmät raaka-aineet ovat kuidut, jotka ovat yleisemmin puukuituja. Kartongin valmistuksessa käytettävä massa on pääsääntöisesti mekaanista-, kemiallista-, tai uusiomassaa. (Hägglom-Ahnger, Komulainen 2003, s.14, s.112)

Käsitellyt raaka-aineet sekoitetaan vesipitoiseksi massaksi. Tämä seos levitetään tasaiseksi massarainaksi, jonka jälkeen siitä poistetaan vettä aluksi suotautamalla, jotta rainasta saadaan lujaa. Loppu vesi poistetaan rainasta puristamalla ja haihduttamalla. Kuivatuksessa kuitujen välille syntyy vetysidoksia, jotka pitävät kartongin koossa. Lopuksi kartonki rullataan, leikataan asiakasrulliksi ja pakataan, sekä toimitetaan asiakkaille. (KnowPap 2022)

3.1 Kartonkikoneen rakenne

Kartonkikone voidaan jakaa neljään pääosaan. Osat ovat kartonginvalmistus prosessijärjestyksessä perälaatikko, viiraosa, puristinosa ja kuivatusosa. Kartonkikoneen märkápääksi kutsutaan koneen alkupuolta, jossa raina muodostetaan. Kartonkikoneen märkápähän kuuluvat perälaatikko, viiraosa ja puristinosa. Kartonkikoneen kuivapään muodostavat kuivatusosa, päällystys/kalanteri ja rullain. (Hägglom-Ahnger, Komulainen 2003, s.249.)

Perälaatikon tehtävä on levittää syöttöputkessa tuleva kuitumassa viiran levyiseksi tasalaatuiseksi suihkuksi. (Hägglom-Ahnger, Komulainen 2003, s.131). Se myös tasaa syöttövirtauksessa olevat painevaihtelut ja korjaa poikkisuuntaisia virtaushäiriöitä, mikäli niitä ilmenee. Lopuksi perälaatikon täytyy tuottaa massasuspensiosuihku viiraosalle. Viiraosalla poistetaan perälaatikon suihkuttamasta massasuspensiosta vettä viirakudoksen läpi. Vedenpoisto tapahtuu ns. vedenpoistoelementtien avulla, joissa voidaan käyttää alipainetta. Vettä kartonkirainasta poistuu viiraosalla noin 95 %. (Knowpap 2022.) Puristamisen tavoitteena on saada rainalle mahdollisimman korkea kuiva-ainepitoisuus. Tällä tavoin säästetään höyryenergiaa kuivatusosalla. Kuivatusosassa raina kuivataan haluttuun loppukosteuteen. Raina kulkee metallisylinterien päällä, joita lämmitetään höyryllä. Sylintereistä lämpö siirtyy rainaan ja haihduttaa siinä olevan veden. (Hägglom-Ahnger, Komulainen 2003, s.16, 155.) Kuivatuksen jälkeen kartonki kalanteroida tai päällystää. Kalanteroinnin päätehtäviin kuuluu, kartongin ominaisuuksien kuten sileyden ja kiillon parantaminen tai kartongille haluttujen ominaisuuksien aikaansaaminen, sekä paksuuden säätö ja paksuusprofiilin muokkaus. Päällystämällä vaikutetaan lopputuotteen lujuteen ja pintaominaisuuksiin. Lopuksi paperi rullataan rullainosalla isoiksi konerulliksi. (Knowpap 2022.)

3.2 Kartonkikoneen energiankulutuskohteet

Kartongin valmistuksen sähköenergiatarve on noin 200-500 kWh/tuotettua kartonki tonnia kohden. Höyryä kartonkikone kuluttaa keskimäärin 1400 kWh/tuotettua kartonki tonnia kohden. Höyryllä tuotetaan lämpöä, joten kartonkikoneen lämmönkulutus on melkein sama kuin höyrynkulutus. (2020 Fluting energy efficiency survey.) Energian kulutus vaihtelee kartonkilajin, kartongin

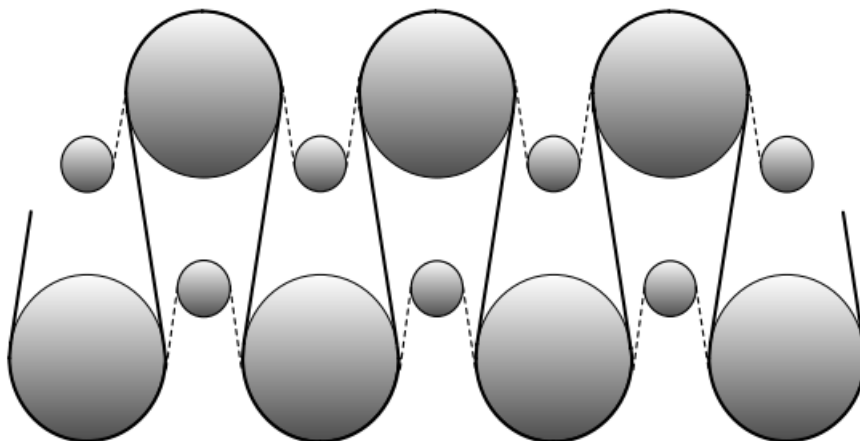
kuivatustekniikan, massan raaka-aineiden ja jalostusasteen mukaan. Kartonkitehtaan sijainnin paikalliset olosuhteet vaikuttavat kanssa kartonkikoneen energiankulutukseen. (Hägglom-Ahnger, Komulainen, s.257.)

Kuivatusosa on kartonkikoneen suurin lämpöenergian kulutuskohte, muita kulutuskohteita ovat höyrylaatikko, ilmastointi ja veden lämmitys. Kuivatuksessa käytettävä lämpöenergia voidaan jakaa kahteen ryhmään: primääri- ja sekundäärilämpö. Primäärilämpö on yleensä matalapainehöyryä, joka tulee pähöyrylinjalta ja sitä käytetään lämmönlähteenä. Sekundäärilämpö on kartonkikoneen eri osilta talteen otettua lämpöä. Sekundäärilämpöä syntyy kartonkikoneella paljon, mutta sitä on vaikea hyödyntää suurissa määrin sen matalan alle 100°C lämpötilan takia. (Karlsson, 2010 s.340.)

Sähköenergiaa kuluu eniten sähkökäyttöihin, massan valmistukseen ja alipainejärjestelmään. Sähkökäyttöillä tarkoitetaan käyttöryhmiä, puhaltimia ja pumppuja pyörittäviä sähkömoottoreita. (Karlsson, 2010 s.22.)

3.3 Monisynterikuivatus

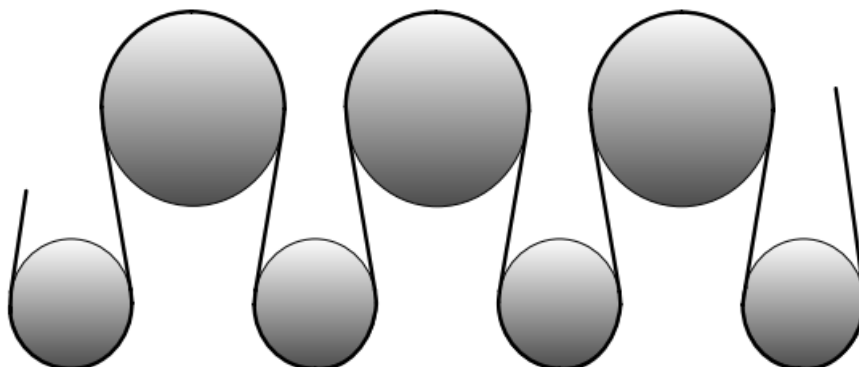
Monisynterikuivatus on yleisin kartongin kuivatusmenetelmä. Monisynterikuivatuksessa sylintereihin johdetaan höyryä, joka lämmittää sylintereiden pintaa. Sylintereiden pinnat johtavat lämpöä rainaan, kun raina on kosketuksissa sylintereihin. Sylintereissä syntyvä lauhde imetään synteristä lauhdetankkiin sifonin avulla. Normaalisti kuivatusosa on jaettu sylintereiden mukaan erillisiin kuivatusryhmiin. Kuivatusryhmiä on yleensä viidestä kymmeneen ja jokaisessa ryhmässä on useita sylintereitä. Jokaisella kuivatusryhmällä nopeudensäädin ja höyrynpaineita voidaan säätää ryhmäkohtaisesti. (Karlsson, 2010 s.80.)



KUVA 1. Kaksiviiravienti. (Slätteke 2006)

Tyypillisimmät konseptit toteuttaa kuivatus ovat kaksiviiravienti ja yksiviiravienti. Kuvassa 1 näkyy kaksiviiraviennin periaate. Kuvassa höyryllä lämmitettäviä sylintereitä on kahdessa kerroksessa. Raina on merkitty kuvaan paksulla mustalla viivalla, joka kulkee sylintereiden pinnoilla. Katkoviivat kuvaavat kuivatusviiraa, jolla rainaa painetaan kuumia kuivatussyntereitä vasten. Kaksiviiraviennissä kaikki sylinterit ovat höyryllä lämmitettyjä ja osallistuvat kuivatukseen. Tämä pitää kuivumisen tasaisena ja parantaa lämmönsiirtoa rainaan. Koska kaksiviiraviennissä rataa ei ole tuettu, sen ajettavuus huononee ja sitä ei voida käyttää suurilla ajonopeuksilla etenkin kuivatusosan alussa. Kaksiviiravientiä käytetään hitaasti ajettavissa koneissa tai nopeasti ajettavien koneiden loppupäässä,

joiden alkupää on toteutettu yksiviiraviennillä. Syy tälle on se, että kartonkiraina on kuivempana lujempaa loppupäässä, joten sitä voi ajaa ilman tuentaa suuremmalla nopeudella ilman katko vaaraa. (Karlsson, 2010 s.23, 80-81.)



KUVA 2. Yksiviiravienti. (Slätteke 2006)

Yksiviiravienti on yleisin nykypäivänä käytettävä kuivauskonsepti. Kun kartonki- ja paperikoneiden konenopeudet alkoivat nousta ei kaksiviiravientiä voitu käyttää. Kuvassa 2 on esimerkki yksiviiraviennistä. Yksiviiraviennissä kuivatussylinterit ovat yhdessä rivissä ja raina kulkee vuorotellen alate- lan ja kuivatussylinterin ympäri. Kuvassa kuivatussylintereitä kuvaavat ylhäällä olevat suuret ympyrät ja alapuolella sylintereiden pareina toimivat alatelat, jotka eivät osallistu rainan kuivatukseen. Alate- loissa oleva alipaine tukee rainaa imemällä sen kiinni alatelaan. (Karlsson, 2010 s.81.)

Kuivatustehokkuus yksiviiraviennillä on heikompaa kaksiviiravientiin verrattuna ja kuivatusosat kasva- vat pitkiksi, mikäli ne toteutetaan vain yksiviiraviennillä. Yksiviiraviennillä toteutetaan nykyään kuiva- tusosan märkää eli alkupää ja kaksiviiraviennillä loppupää. (Karlsson, 2010 s.81.)

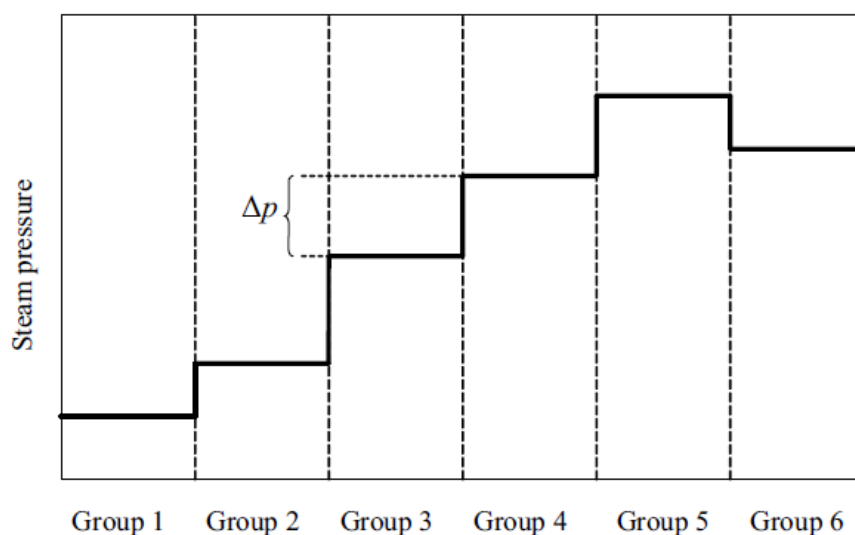
3.4 Kosteussäätö

Kartonkiradan laatusäätöjärjestelmällä (QCS) hallitaan tuotteen laatuominaisuuksia radan poikki- suunnassa (CD) ja konesuunnassa (MD). Laatuominaisuuksien mittaaminen tapahtuu kuvan 3 mu- kaisella mittaraamilla, jossa mittapää traversoi edestakaisin raamin läpi kulkevan radan molemmin puolin. Mittaustavasta johtuen mitattavan suureen poikkisuuntaiset- ja konesuuntaiset- komponentit sekoittuvat ja ne on eroteltava ohjelmallisesti. Mittaraami on yleensä asennettu etukuivaosan lop- puun ja ennen rullainta. Mittaraamilta saadaan radan kosteuden MD - ja CD - suuntainen mitta- aus, joka säädetään halutuksi valituilla toimilaitteilla.



KUVA 3. Valmetin mittaraami. (Valmet 2022)

Radan kosteuden konesuuntainen säätö tapahtuu päänhöyryryhmän kautta. Laatusäätöjärjestelmä vertaa mitattua kosteutta asetettuun ja jos ne poikkeavat toisistaan, niin järjestelmä laskee erotuksen perusteella uuden asetusarvon päänhöyryryhmälle. Päänhöyryryhmän paineen asetusarvon perusteella lasketaan asetusarvot muille höyryryhmille halutun profiilin mukaan. Asetusarvolaskenta muille höyryryhmille voi tapahtua esim. alla olevan kuvan mukaisesti paine-ero profiilia hyödyntäen.



KUVA 4 Paineprofiilinmukainen asetusarvolaskenta. (Slätteke 2006)

Radan kosteuden CD - säätö voidaan tehdä höyrylaatikolla, kostuttimella tai esim. IR-kuivaimella. CD - kosteusmittauksen perusteella höyrylaatikko puhalttaa höyryä märkiin kohtiin ja kostutuslaite suihkuttaa vettä liian kuiviin kohtiin. Märät konesuuntaiset juovat voidaan poistaa myös kuivaosalla olevalla IR-kuivaimella.

Höyrylaatikko sijaitsee kartonkikoneessa ennen kuivatusosaa. Sen tehtävänä on poistaa rainan kosteusprofiilissa olevia kosteita vanoja poikkisuunnassa, eli tasoittaa rainan kosteusprofiilia. Näin laskeaan rainassa olevan veden viskositeettia. Viskositeetin laskeminen parantaa veden kykyä haihtua rainasta ja parantaa kuivattavuutta. Höyrypuristuksessa höyrylaatikon lohkoja säädetään manuaalisesti tai automaattisesti tuottamaan lisää höyryä kuivaamista tarvitsevalle alueelle. (Knowpap 2022)

Liiallista kosteutta rainasta poistetaan myös infrapunasäteilyn avulla. Kaasutoiminen infrapunajärjestelmä asennetaan tyypillisesti kuivatusosan märempään päähän ja sähkötoiminen kuivatusosan

kuivempaan päähän. Tällä järjestelmällä rainan kosteustasoa voidaan pudottaa jopa neljä prosenttiyksikköä. (Knowpap 2022)

Rainan kosteutta pystytään myös nostamaan, mikäli siinä esiintyy liian kuivia kohtia. Tämä onnistuu uudelleenkostutusjärjestelmällä, joka kohdistaa vesisuihkun kuivattavaan alueeseen. Järjestelmän käyttö pienentää jännitys ja kireysvaihteluita radassa, joista voi seurata ratakatkoja ja kartongin käyristymistä. (Knowpap 2022.)

4 HÖYRY- JA LAUHDEJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

Kartonkikoneiden höyry- ja lauhdejärjestelmä on aina suunniteltu yksilöllisesti ja sen rakenne vaihtelee hieman kartonkikoneen mukaan. Järjestelmät suunnitellaan tuotettavan kartonkilajin, käytettävissä olevan höyrynpaineen, kartongin tuotantonopeuden, neliömassa-alueen ja puristusosan jälkeisen rainan kosteuden mukaan. (Karlsson, 2010 s.376,377.)

Höyry- ja lauhdejärjestelmän päätehtävät:

- Toimittaa riittävästi höyryä kuivatusosalle
- Nostaa kuivatussylinterien pintalämpötilat riittävälle tasolle
- Hallita höyrynpaineita (kuivatusryhmät ja paine- erot)
- Lauhteen poisto kuivatussylintereistä ja sen varastointi
- Lauhtumattomien kaasujen poisto kuivatussylintereistä
- Olla helppokäyttöinen operaattoreille

(Valmet, Steam and Condensate System Improvements 2012 s.3)

4.1 Höyry- ja lauhde järjestelmän rakenne

Kaikki höyry- ja lauhdejärjestelmän suunnitteluun vaikuttavat tekijät vaikuttavat myös sen rakentamiseen. Yleisimmät höyry- ja lauhdejärjestelmän osat ovat paineen, lämmön ja pinnankorkeuden mittarit, erilaiset venttiilit, suodattimet ja pumput, lämmönsiirtimet, lauhdepumput, tyhjiöpumput ja lauhdepoistimet. Nämä instrumentit ovat vakio komponentteja höyry- ja lauhdejärjestelmässä, mutta pääkomponentit kuten lauhdutin, lauhdetankit ja lauhdepumput täytyy valita usein tapauskohtaisesti. (Karlsson, 2010 s.380.)

Lauhetankit voivat olla pysty- tai vaakasuoran asennettavia. Lauhetankin päätehtävät ovat erottaa lauhde ja läpipuhallushöyry toisistaan ja pumpata lauhde päälauhetankkiin, sekä ohjata läpivirtaushöyry seuraavaan käyttökohteeseen tai lauhduttimeen (Valmet, Steam and Condensate System Improvements 2012). Lauhetankkien valintaan vaikuttaa höyryn ja lauhteen virtaus, saatavilla oleva tila, liitinten määrä ja koko, sekä että käytetäänkö lauhteen poistossa lauhdepumppua vai poistuu lauhde paine-eron avulla. (Karlsson, 2010 s.381.)

Käytetyimmät lauhdutintyypit ovat U-putki- ja suoraputki lauhduttimet. Näissä tyypeissä jäähdytysvesi kiertää putkistossa jäädyttäen tankissa olevaa höyryä. Levylämmönvaihtimet myös yleistyvät lauhduttimien käytössä. Lauhdutinta valittaessa täytyy ottaa huomioon mm. puhdistusvaatimukset, tuuletuksen järjestely, minimi ja maksimitehot, joilla höyry tulee lauhduttimelle ja lauhduttamisessa käytettävän veden ja ilman lämpötila ja sen muutokset. (Karlsson, 2010 s.382.)

Lauhdepumppuina toimii yleensä keskipakoispumput. Pumppujen valintaan vaikuttavat muun muassa: lauhteen maksimipaine, lauhdetankin paine, lauhteen virtaus ja nostokorkeus. (Karlsson, 2010 s.382.)

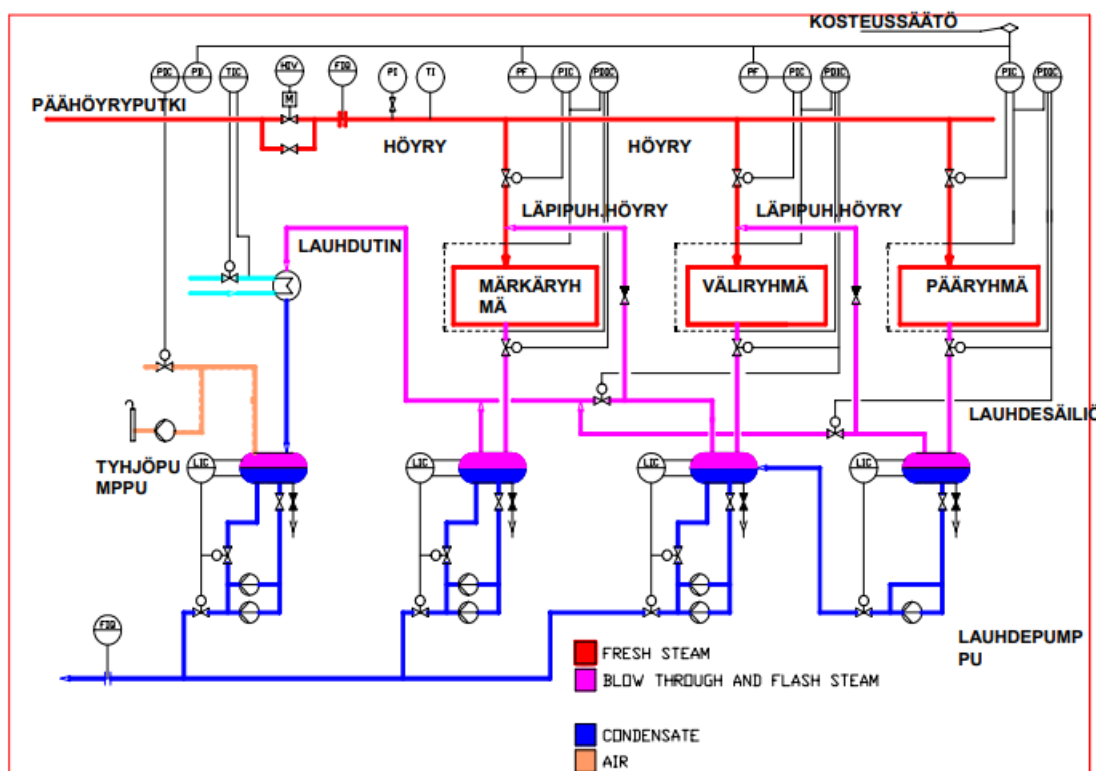
Tyhjiöpumpun tehtävänä on imeä lauhtumattomia kaasuja järjestelmästä. Tyhjiöpumpun maksimi alipaineen tulisi olla noin 60-80kPa. Imuvaikutuksen tällä tasolla tulisi olla ainakin 3 m³/s. (Karlsson, 2010 s.383.)

4.2 Höyry- ja lauhdejärjestelmät

Höyry- ja lauhdejärjestelmä toteutetaan kartonkikoneella kahdella toimintaperiaatteella: kaskadijärjestelmällä tai termokompressorijärjestelmällä. Höyry- ja lauhdejärjestelmä on myös mahdollista toteuttaa hybridijärjestelmällä, joka on kaskadi- ja termokompressorijärjestelmän yhdistelmä. (AEL-koulutusaineisto, 2003.)

4.2.1 Kaskadijärjestelmä

Yleisimmät käytössä olevat höyry- ja lauhdejärjestelmät ovat kaskadijärjestelmiä. Järjestelmän periaatteena on uudelleenkäyttää läpipuhallushöyry kuivaajan pienemmissä paineryhmissä. Tämä tapahtuu johtamalla läpipuhallushöyry aikaisempaan höyryryhmään, joka on matalapaineisempi. Viimeisimmästä höyryryhmästä läpipuhallushöyry johdetaan pintalauhduttimelle. (AEL-koulutusaineisto, 2003.)



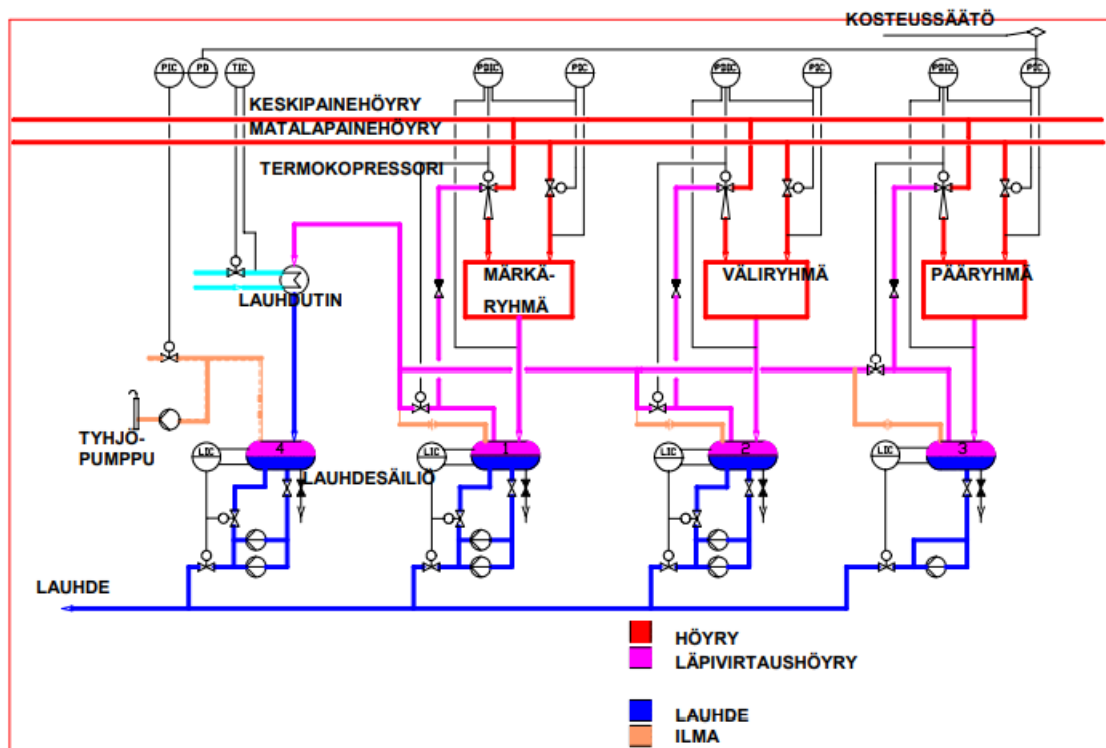
KUVA 5. Kaskadijärjestelmän toimintaperiaate. (AEL 2003)

Kuvassa 5 on havainnollistettu kaskadijärjestelmän toimintaperiaate. Kuvassa kuivatusosan sylinterit ovat jaettu kolmeen eri ryhmään: pää-, väli-, ja märkärühmään. Pääryhmä saa kaiken höyryn päähöyryputkesta ja sen höyrynpainetta ohjataan automaattisesti säätöventtiilillä. Pääryhmältä syntyvä lauhdevesi johdetaan sifonin kautta pääryhmän lauhdetankkiin. Sifonin kautta lauhdetankkiin poistuu sylinteristä myös höyry, tätä höyryä kutsutaan läpipuhallushöyryksi. Lauhdetankki toimii höyryn ja lauhteen erottimena. Pääryhmän lauhdetankista läpipuhallushöyry johdetaan väliryhmän kuivatussylintereille. Pää- ja väliryhmän höyrynpaineiden paine-ero täytyy olla hieman suurempi, kuin pääryhmän höyry ja lauhdepuolen paine-ero. Tämä paine-ero mahdollistaa läpipuhallushöyryn kulkeutumisen päähöyryryhmän lauhdetankilta väliryhmän kuivatussylintereille. Tämä toimintaperiaate toistuu väli- märkärühmän välillä. Mikäli paine-eroja ei ole, ei läpivirtaushöyry pääse virtaamaan seuraavalle sylinteriryhmälle. Tässä tilanteessa läpipuhallushöyry ohjataan lauhduttimelle. Kuivatusosassa

syntynyt lauhde kerätään päälauhetankkiin ja pumpataan takaisin voimalaitokselle. (AEL-koulutusaineisto 2003.)

4.2.2 Termokompressorijärjestelmä

Termokompressorijärjestelmä sisältää termokompressorin, joka koostuu runko-osasta, diffuserista, suuttimesta, venttiilinelusta ja toimilaitteesta. Termokompressorin päätarkoituksena on nostaa höyryn painetta.



KUVA 6. Termokompressorijärjestelmän toimintaperiaate. (AEL 2003)

Termokompressorijärjestelmässä läpivirtaushöyryä ei johdeta muille kuivatusryhmille kuten kaskadijärjestelmässä, vaan läpivirtaushöyryä kierrätetään uudelleen samalle höyryryhmälle. Kuvassa 6 on höyry- lauhdejärjestelmä, joka on toteutettu termokompressorilla. Kuivatusryhmien sylintereille tulee höyryä matalapainehöyrylinjasta, sekä termokompressorilla tuotetusta läpivirtaushöyryn ja keskipainehöyrylinjalta tulevan motiivihöyryn sekoituksesta. Keskipainelinjalta tulevan motiivihöyryn avulla saadaan diffuserissa aikaan alipaine, joka mahdollistaa kuivatusryhmältä tulevan läpivirtaushöyryn imemisen termokompressorille. Tämä termokompressorilta tuleva höyry ja putkelta tuleva matalapainehöyry lämmittävät kuivatussylintereitä. Sylintereiltä tuleva läpivirtaushöyry ohjataan lauhdetankkiin, jossa läpivirtaushöyry ja lauhde erotetaan toisistaan. Lauhde kulkeutuu tankista takaisin voimalaitokselle ja läpivirtaushöyry imetään takaisin termokompressorille. (AEL-koulutusaineisto, 2003.)

4.3 Höyryn paineen säätö

Höyryn painetta voidaan säätää höyryryhmäkohtaisesti tai sylinterikohtaisesti, jotta saadaan haluttu paineprofiili ensimmäisestä kuivatusryhmästä viimeiseen. Höyryn paineen säädön päätehtävä on kontrolloida kuivatusta. Höyryn paineen säätö ohjaa pääasiassa kuivatusosan lämpötilaa ja lämpötilaeroja. Kuivatusosan paine ja lämpötila kasvavat konesuunnassa loppua kohden.

Ensimmäisillä kuivatussylinterillä pyritään pitämään matalaa painetta ja nostamaan painetta varovasti, ettei raina pääse kuivumaan kiinni sylintereiden pintaan. Tämä saavutetaan käyttämällä ensimmäisellä ryhmällä matalia höyrynpaineen asetusarvoja. Yleisesti tietokone säätelee pääryhmän höyrynpainetta rainan kosteudelle asetetun ohjearvon mukaan. Muuten kuivatusosalla höyryn paine lasketaan pääryhmän höyryn mukaan. (Hägglom-Ahnger, Komulainen, s.163.)

4.4 Höyryn paine-eron säätö

Höyryn paine-eroa säädetään säätöventtiilillä. Tapa jolla paine-eroa säädetään riippuu siitä minne säätöventti on sijoitettu. Kolme yleisintä tapaa säätää höyryn paine-eroa ovat: säätää päähöyryputkelta suoraan seuraavalle höyryryhmälle tulevaa tuorehöyryn määrää, säätämällä seuraavaan höyryryhmään menevää läpivirtaushöyryn määrää tai säätämällä höyryryhmältä lauhdetankkiin menevän lauhteen ja läpipuhallushöyryn määrää. Edellä luetelluista tavoista yleisin on läpipuhallushöyryn ja lauhteen määrän säätäminen höyryryhmän ja lauhdetankin välillä. Tässä järjestelyssä säätöventtiili sijaitsee putkessa, joka on höyryryhmän ja lauhdetankin välillä. Etuna järjestelyssä on mahdollisuus syyttää lauhde useilta höyryryhmiltä samaan lauhdetankkiin ja silti säätää haluttu paine-ero jokaiseen höyryryhmään. (Karlsson, 2010 s.403.)

4.5 Lauhteenpoisto kuivatussylinteristä

Kuivatuksessa kuivatussylinterin sisälle puhalletaan tuorehöyryä, josta osa lauhtuu sylinterissä ja sylinteriin kertyy lauhdetta. Kuivatussylinteriä pyritään pyörittämään sellaisella nopeudella, että sylinterissä oleva lauhde saadaan kehäytymään sylinterin sisäpinnalle ohueksi kerrokseksi. Lauhdekerros luo suuren lämpövastuksen lämmönsiirrolle. (AEL-koulutusaineisto, 2003.)

Lämmönsiirtoa höyryn ja rainan välillä voidaan parantaa asentamalla sylintereihin lämpölistoja. Lämpölistat luovat turbulenssia ja rikkovat lauhdekerrosta, mikä parantaa sylinterin lämmönsiirtoa ja rainan kosteusprofiilia. (AEL-koulutusaineisto,2003.)

Kuivatussylinterissä syntynyt lauhde poistetaan sylinteristä sifonin avulla. Höyry- ja lauhdetukin välillä täytyy olla paine-ero, jotta lauhteen poistosta saadaan tehokasta ja läpivirtaushöyry pääsee virtaamaan sylinterin läpi. Läpivirtaushöyry poistaa sylinteristä myös ilmaa ja lauhtumattomia kaasuja. Sifonputki sijoitetaan kuivatussylinterin sisälle sifonin suuaukko sylinterin pyörimissuuntaa päin. (AEL-koulutusaineisto, 2003.)

Sifoneita on kahdenlaisia: pyörivä sifoni ja seisova sifoni. Pyörivä sifoni pyörii kuivatussylinterin mukana. Koska sifoni pyörii sylinterin mukana, siihen kohdistuu keskipakovoima, joka vaikeuttaa lauhteenpoistoa. Tästä syystä höyry- ja lauhdetukin välistä paine-eroa täytyy kasvattaa lisäämällä läpipuhallushöyryä, jotta lauhteenpoistosta saadaan tehokasta. Tämä paine-ero on yleensä 30-70 kPa. Paine-eron kasvattaminen lisää höyrynkulutusta. Suuren paine-eron takia pyörivää sifonia käytetään matalilla noin 1200 m/min nopeuksilla. (Karlsson, 2010 s.397.)

Suurin osa uusista kartonkikoneista käyttävät seisovaa sifonia. Seisova sifoni hyödyntää kehäytyneen lauhteen liike-energiaa lauhteenpoistossa. Tästä syystä lauhdetta voidaan poistaa sylinteristä pienemmillä paine-eroilla, jotka ovat noin 15-20 kPa. Läpivirtaushöyry tarvitsee paine-eron lauhtekaasujen poistoon. (Karlsson, 2010 s.391)

4.6 Lauhteen palautus voimalaitokselle

Kartonkitehtaalla lauhde kerätään päälauhdetankkiin, josta se pumpataan takaisin voimalaitokselle. Palautuvan lauhteen määrä, lämpötila ja puhtaus mitataan voimalaitoksella. Mikäli tietyltä tehtaasta osalta tulevan lauhteen mittauksessa ilmenee epäpuhtauksia, voidaan tämän osan lauhde ohjata muualle. Vaatimukset lauhteen puhtaudelle saattavat vaihdella voimalaitoksen mukaan, mutta yleisimmin puhtauden mittauksen kohteena ovat lauhteen pH, rautapitoisuus, konduktiivisuus ja happimäärä. (Karlsson, 2010 s. 430-431.)

5 HÖYRY- JA LAUHDEJÄRJESTELMÄN SUORITUSKYVYN TUTKIMINEN

5.1 Höyry- ja lauhdejärjestelmän suorituskykyyn vaikuttavat tekijät

Kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmän suorituskykyyn vaikuttaa useat erilaiset tekijät, jotka vaikuttavat joko suorasti tai epäsuorasti. Tässä kappaleessa on lueteltu yleisimpiä suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Täytyy kuitenkin muistaa, että suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ovat aina ko-nekohtaisia ja yksittäisen kartonkikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmän suorituskyvyn tutkiminen vaatii perusteellisempia tutkimuksia.

5.2 Höyryn paineen valinta

Höyryn paine on suurin suorituskykyyn vaikuttava tekijä, sillä se määrittää kuivatusosan lämpötilan ja lopulta kartonkirainan lämpötilan. Vaatimukset voimalaitokselta tulevalle tuorehöyryn paineelle vaihtelevat kartonkitehtaiden ja kartonkikoneiden mukaan. Vaihtelut johtuvat pääasiassa valmistet-tavasta kartonkilajista, kartonkikoneen kuivatusosan pituudesta tai höyryryhmien määrästä ja niiden koosta. Pääryhmän sylintereiltä tulevalle läpipuhallushöyrylle tulee olla määritelty tietty paine, jotta sitä voidaan hyödyntää seuraavilla pienempi paineisilla höyryryhmillä. Paine-ero höyryryhmien välillä tulee olla vähintään 30-40 kPa. Liian pieni paine-ero ryhmien välillä aiheuttaa sen, että kaikki läpipu-hallushöyry ei pääse kulkeutumaan lauhdetankilta pienempi paineiselle höyryryhmälle, vaan se joh-detaan lauhduttimelle. Höyryn paineen valinnassa on otettava myös huomioon käyttökohteen vaa-tima lämpötila ja lämmönsiirtopinnoissa tapahtuvat lämpöhäviöt. Höyryn paineprofililla on merkit-tävä vaikutus höyrynkulutukseen ja kuivatuskapasiteettiin. Näitä asioita käsitellään enemmän kappala- leessa 6.

Höyryn tulistusasteen tulisi olla 5-30 °C voimalaitokselta lähtiessä. Höyryn tulistamisella ei ole mer-kittävää vaikutusta kuivatussylinterien pintalämpötilaan, vaan sillä pyritään vähentämään höyryn kondensoitumista höyryputkissa. Tavoitearvo tulistusasteelle on noin 10 °C. Höyryn pitää olla kui- vaa, sillä liika kosteus höyryssä laskee sen tehoa ja massavirtaa.

5.3 Höyryn paine-eron valinta

Tehokas lauhteenpoisto kuivatussylinteristä vaatii paine-eron höyry- ja lauhdetukin välille. Liian pieni paine-ero aiheuttaa kuivatussylinterin tulvimisen. Lauhdetta kertyy sylinterin sisälle, mikä heikentää lämmönsiirtoa ja nostaa ajokuormaa höyryryhmässä, jossa sylinteri sijaitsee. Liian korkea paine-ero aiheuttaa liian kovan virtausnopeuden sifonin sisälle, korkean läpipuhallushöyrysuhteen vuoksi. Tämä takia sifonit kuluvat nopeammin. Suositeltu suhde läpipuhallushöyrylle on 10-15%. Se takaa hyvän lauhteenpoiston ja sopivan virtausnopeuden sifonille. Sopiva paine-eron arvo riippuu mm. si-fonin koosta, höyryn paineesta ja lauhteen määrästä. Paine-eroon vaikuttaa myös lauhdeputkissa olevan aukkolevyn koko, mikäli putkeen on suunniteltu sellainen.

5.4 Höyry- ja lauhdeputken mitoitus

Höyry- ja lauhdeputkien oikea mitoitus on tärkeää suorituskyvyn kannalta. Oikein mitoitettut höyry-putket toimittavat höyryn kulutuskohteelle riittävällä paineella ja höyryputket eivät saa olla liian suu- ria, sillä se lisää lämpöhäviöitä putkistossa ja luo enemmän lauhdetta putkistoon. Putket eivät saa olla myös liian pieniä, sillä liian pienillä putkilla kuivatusosa ei saa tarpeeksi höyryä.

Höyryputket voidaan mitoittaa joko höyryn nopeuden tai höyryputkiston painehäviön mukaan. Nopeuden mukaan mitoittamista käytetään, kun höyryn paineen häviöllä ei ole suurta merkitystä. Suositeltava höyryn virtausnopeus on 25-35 m/s. Yli 35 m/s nopeudet aiheuttavat melua ja putkiston kulumista. Höyryputkisto voidaan mitoittaa painehäviön mukaan, jos höyryn paineelle ja lämpötilalle halutaan ennalta määritetyt arvot käyttökohteessa.

Painehäviön mukaan mitoittamisessa käytetään seuraavaa kaavaa:

$$\frac{P_1 - P_2}{L} = F \quad (1)$$

missä:

P_1 = paine putken alkupäässä

P_2 = paine putken loppupäässä

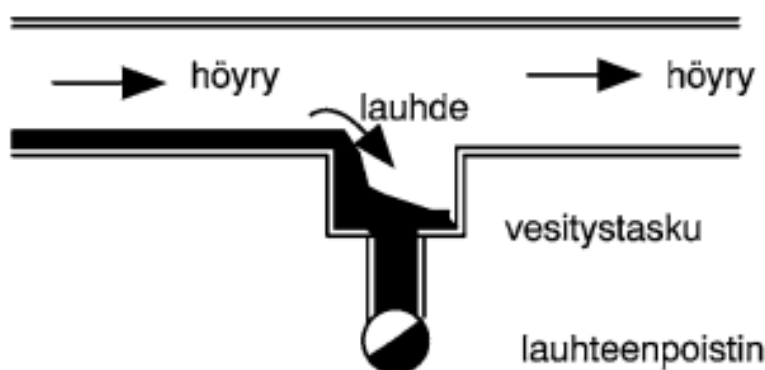
L = Putken pituus kertavastuksineen

F = Painehäviötekijä

Lauheputkiston mitoituksessa täytyy ottaa huomioon, että putkessa on tilaa kuivatussylinteriltä lauhetankkiin kulkeutuvalla lauhteella sekä läpipuhallushöyrylle. (Spirax Sarco, julkaisuaika tuntematon, s.3)

5.5 Lauhteenpoisto höyryputkistosta

Lauhdetta kerääntyy myös höyryputkiin, joissa se voi aiheuttaa vaurioita putkelle tai siihen liitetyille laitteille, mikäli sitä ei poisteta. Lauhde voi aiheuttaa myös vesitulpan putkeen. Vesitulppa vähentää höyryvirtausta ja heikentää lämmönsiirtoa tai jopa tukkii höyryputken.



KUVA 7. Höyryputken vesitys. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen, 2013)

Höyryputkesta lauhdetta poistetaan vesityksellä. Vesityksessä putkistoon on tehty vesitystaskuja, jotka keräävät putkessa syntyvän lauhteen. Vesitystaskujen yhteyteen on liitetty lauhteenpoistin, joka poistaa taskuihin kertyneen lauhteen. Vesitykset asennetaan yleensä höyryputken nousukohtiin, ettei lauhde pääse aiheuttamaan vesi-iskuja putkistoon. Vesitystaskut täytyy rakentaa riittävän suuriksi putken kokoon nähden, että lauhde kerkeää kääntyä lauhteenpoistimelle menevään putkeen

kuten kuvassa 7. Höyryputkistot tulisi suunnitella siten, että se olisi kallistettu höyryvirtauksen suuntaan. Tällöin lauhteenpoisto vesipisteiden avulla onnistuu paremmin.

5.6 Lämpöhäviöt

Höyryputket ja niissä olevat komponentit kuten venttiilit ja laipat tulee eristää lämpöhäviöiden välttämiseksi. Hyvä eristäminen vähentää lauhteen syntymistä putkistoon. Eristämisen tehokkuus riippuu eristysmateriaalista ja kuinka eriste asennetaan. Laipoille ja venttiileille on olemassa teollisesti valmistettuja avattavia eristeitä, jotka helpottavat huoltotoimenpiteitä. Eristeet tulee tarkastaa säännöllisesti ja uusia vaurioituneet tai kostuneet eristeet. (Spirax Sarco, julkaisuaika tuntematon, s.9)

5.7 Likaantuminen

Höyry- ja lauhdeputkiston asennuksen jälkeen sille on hyvä tehdä höyrypuhallus. Höyrypuhalluksessa höyryputkiin puhalletaan tuorehöyryä, joka poistaa putkistosta kasauksessa sinne kertyneen lian. Putkisto esilämmitetään ennen höyrypuhallusta, että mahdollisista lämpölaajenemisista tuleva metallihilse irtoaa. Lika putkistossa voi vaurioittaa putkistoa tai siihen liitetyjä komponentteja ajotilanteessa ja aiheuttaa ruostumista putkessa. Kaikkea likaa ei höyrypuhalluksella saada pois, joten putkistoon saattaa muodostua likakerrostumia. Likakerrostumat voivat aiheutua myös kattilavedestä höyryn mukaan lähteneistä epäpuhtauksista.

Ajossa kartonkirainaa saattaa palaa kiinni kuivatussylintereiden ulkopinnoille. Tästä syystä ulkopinnat tulisi puhdistaa ajoittain, sillä kiinni jäänyt raina heikentää lämmön siirtymistä sylinteristä rainaan. Sylintereiden sisäpinnoille voi myös muodostua likakerrostumia. Lika pääsee sylinteriin höyryn mukana ja kertyy sylintereiden sisäpinnoille kehäytyneen lauhteen alle.

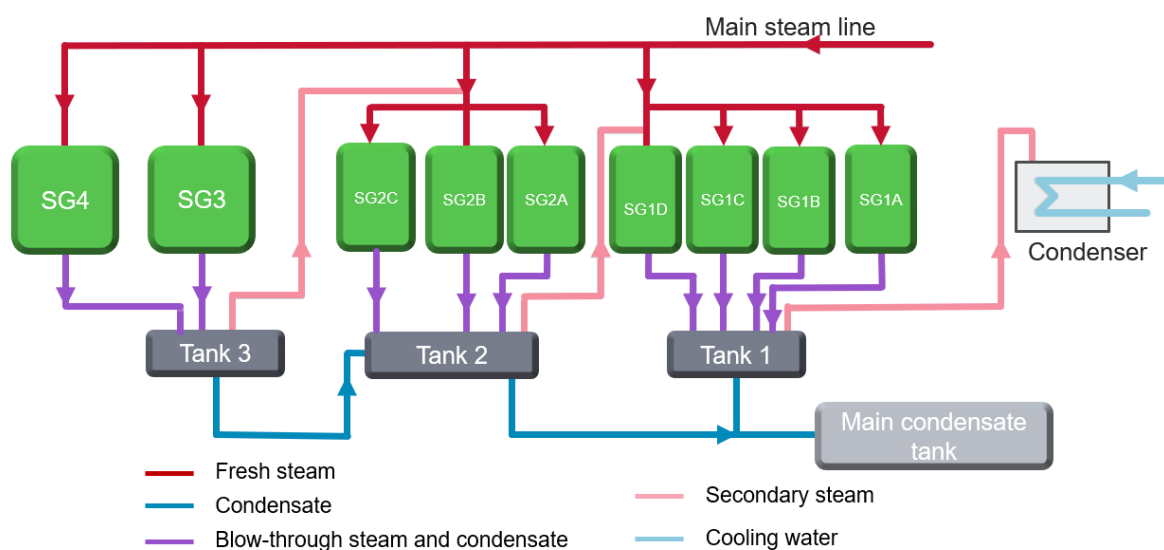
6 SIMULOINNIT

6.1 Simulointiohjelmat

Työssä tehtävät simuloinnit ovat tarkoitettu suorittaa Simulinkilla, joka on Matlabin lisäohjelma. Simulinkissa on graafinen käyttöliittymä, jota käytetään järjestelmien mallintamiseen. Käyttöliittymän avulla luodaan lohko-kaavioita, jotka koostuvat lohkoista ja niitä yhdistävistä suuntaviivoista. (Simulink 5.0 aloitusopas 2005) Simulointimallissa kuivatusosan mallintamiseen on käytetty kahta ohjelmointityökalua, Steamuxia ja PaperSimiä. Steamux on Valmetin kehittämä ohjelmistotyökalu, joka on tarkoitettu uusien paperi- ja kartonkikoneiden höyry- ja lauhdejärjestelmien mitoittamiseen. Steamuxia käytetään myös jo olemassa olevien koneiden tuotantoa rajoittavien tekijöiden mallintamiseen ja tuotantoa rajoittavien instrumenttien uudelleen mitoittamiseen. Steamux simulointiohjelmaan on yhdistetty kuivatussimulointi ja höyrysimulointiohjelmat, jotka ovat olleet Valmetilla käytössä aiemmin.

PaperSim on ohjelma, jolla simuloidaan paperi- ja kartonkikoneiden kuivatusosien toimintaa. PaperSimillä simulointimallissa voidaan muuttaa kartonkirainan syöttöparametreja, kun se kulkee kuivatusosalla. Näihin syöttöparametreihin kuuluvat mm. höyryn paine, koneen nopeus ja alkukuivapitoisuus. Työssä tehdyissä simuloinneissa muutetaan vain höyryn paineita valitun paineprofiilin mukaan ja muut parametrit pidetään samoina. PaperSim laskee kuivatusosalta tulevan kartongin lopullisen kuivapitoisuuden ja Steamux laskee kuivatuksen vaativan kokonaishöyryn kulutuksen. Kun simulointi on ajettu, Steamux luo simuloinnista raportin, joka avataan Notepadilla. Ohjelma luo raportin jokaisen simuloinnin jälkeen ja näistä raporteista voi vertailla höyryn ja lauhteen arvoja jokaisella höyryryhmällä ja lauhdetankilla simuloinnin jälkeen. Steamux luo myös raportin, josta näkee höyryryhmille tulevan tuorehöyryn määrän, niiltä lähtevän läpipuhallushöyryn määrän ja syntyvän lauhteen määrän. Tiedostossa on lähes samat tiedot lauhdetankeille.

6.2 Simulointimalli



KUVA 8. Kaskadimalli simulointitilanteesta. (Kääriäinen 2022)

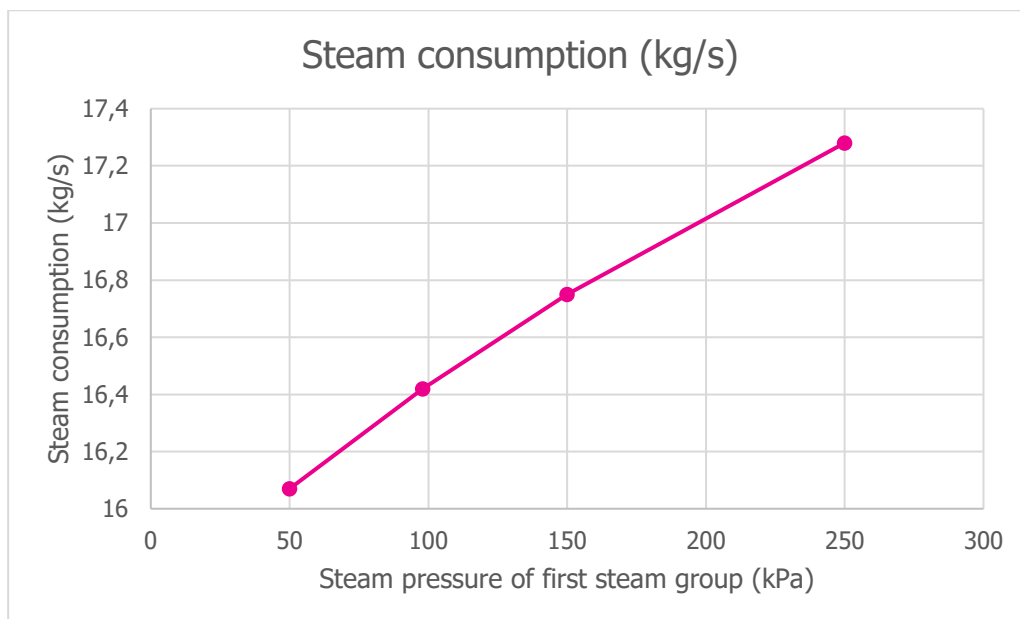
Tässä työssä simuloidaan kartonkikoneen kuivatusosan alkupään toimintaa, koska alkupää usein rajoittaa koneen kuivatuskapasiteettia. Alkuosa on jaettu kuvan 8 mukaisesti neljään höyryryhmään ja sylintereiden mukaan vielä yhdeksään alaryhmään, joissa jokaisella alaryhmällä on eri paineet. Kuvassa konesuunta on oikealta vasemmalle. Höyryryhmissä on yhteensä 49 kuivatussylinteriä. Höyryn paineet ovat rajattu siten että ensimmäisten sylintereiden paine saa olla minimissään -50 kPa ja viimeisten sylintereiden paine maksimissaan 700 kPa. Lopullinen kuiva-ainepitoisuus on tarkoitus pitää noin 90%: ssa. Simulointeja on tarkoitus tehdä seitsemän, jokainen eri höyryn paineprofiililla ja samalla kuivatuskapasiteetilla. Simulointien tuloksista tarkastellaan höyryn kulutusta, lauhdetankkien paineita ja virtausnopeutta, lauhteessa olevan energian määrää ja jäännöshöyryn määrää. Lopuksi simulointien tuloksia vertaillaan keskenään.

6.3 Simulointien tulokset

TAULUKKO 1. Simulointien tulokset. (Kääriäinen 2022)

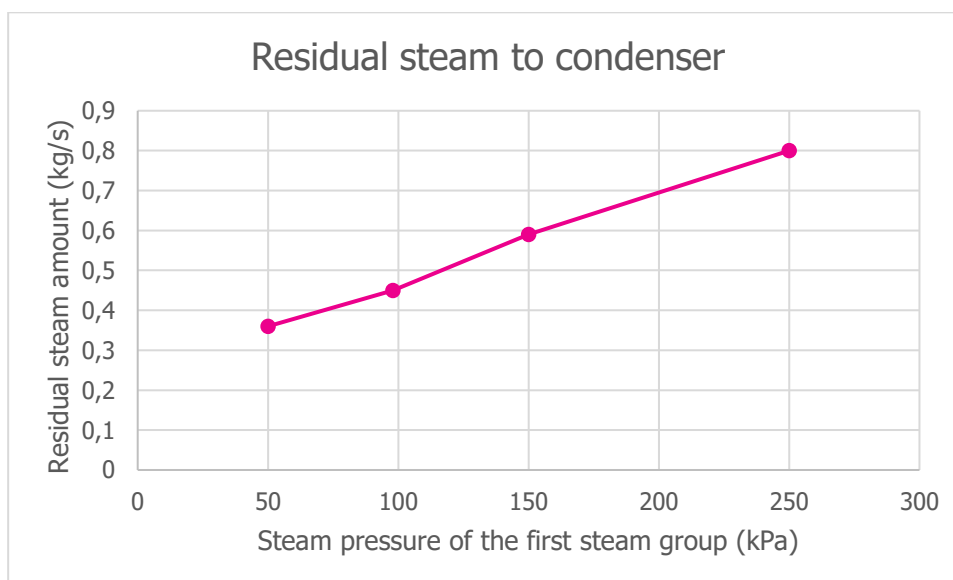
| | Mill data | Trial point1 | Trial point 2 | Trial point 3 | Trial point 4 | Trial point 5 | Trial point 6 |
|--|-----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SG1A (kPa) | -14 | -14 | -30 | 0 | 0 | -30 | 100 |
| SG1B (kPa) | 3 | 3 | -20 | 50 | 50 | -20 | 150 |
| SG1C (kPa) | 37 | 37 | 0 | 100 | 100 | 0 | 200 |
| SG1D (kPa) | 98 | 98 | 50 | 150 | 150 | 50 | 250 |
| SG2A (kPa) | 523 | 250 | 250 | 250 | 320 | 320 | 350 |
| SG2B (kPa) | 525 | 360 | 360 | 360 | 430 | 430 | 400 |
| SG2C (kPa) | 525 | 450 | 450 | 450 | 500 | 500 | 440 |
| SG3 (kPa) | 577 | 670 | 700 | 635 | 600 | 665 | 555 |
| SG4 (kPa) | 576 | 670 | 700 | 635 | 600 | 665 | 555 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Steam consumption (kg/s) | 16,40 | 16,42 | 16,07 | 16,76 | 16,75 | 16,17 | 17,28 |
| Specific evaporate rate (kg steam/kg water evaporated) | 1,18 | 1,18 | 1,16 | 1,21 | 1,21 | 1,17 | 1,25 |
| Tank 2 pressure (kPa-a) | 198 | 198 | 150 | 250 | 250 | 150 | 350 |
| Tank 2 condensate flow out (kg/s) | 0,74 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,65 | 0,65 | 0,62 |
| Enthalpy of saturated condensate(KJ/kg) | 503,7 | 503,7 | 467,7 | 535,6 | 535,6 | 467,7 | 584,3 |
| Energy in condnesate from tank 2 (kW) | 372,74 | 302,22 | 280,62 | 315,99 | 348,12 | 304,01 | 362,27 |
| Residual steam amount (kg/s) | 0,45 | 0,45 | 0,36 | 0,59 | 0,59 | 0,36 | 0,80 |

Yllä olevassa taulukossa näkyy simulointien tulokset, sekä simuloinneissa käytettyjen seitsemän eri paineprofiilin paineet kilopascalina. Tärkein asia mikä tuloksista nähdään, on mitä matalampi paine ensimmäisellä höyryryhmällä on, sitä pienempi on kokonaishöyrynkulutus. Tämä on vielä esitetty kuvassa 9, johon on havainnollistettu ensimmäisen höyryryhmän paineen ja höyryn kulutuksen suhde. Kuvassa on trial point 1:n, 2:n, 3:n ja 6:n paineet. Näiden pisteiden paineita tullaan käyttämään myös myöhemmissä kuvissa, joissa käsitellään ensimmäisen höyryryhmän paineita. Kuvissa paineet ovat järjestyksessä trial point 2, 1, 3, 6. Lauhetankki 2:n paine määrätty myös ensimmäisen höyryryhmän paineen mukaan, jotta lauhdetankissa oleva läpipuhallushöyry pystytään ohjaamaan ensimmäisen höyryryhmän sylintereille.



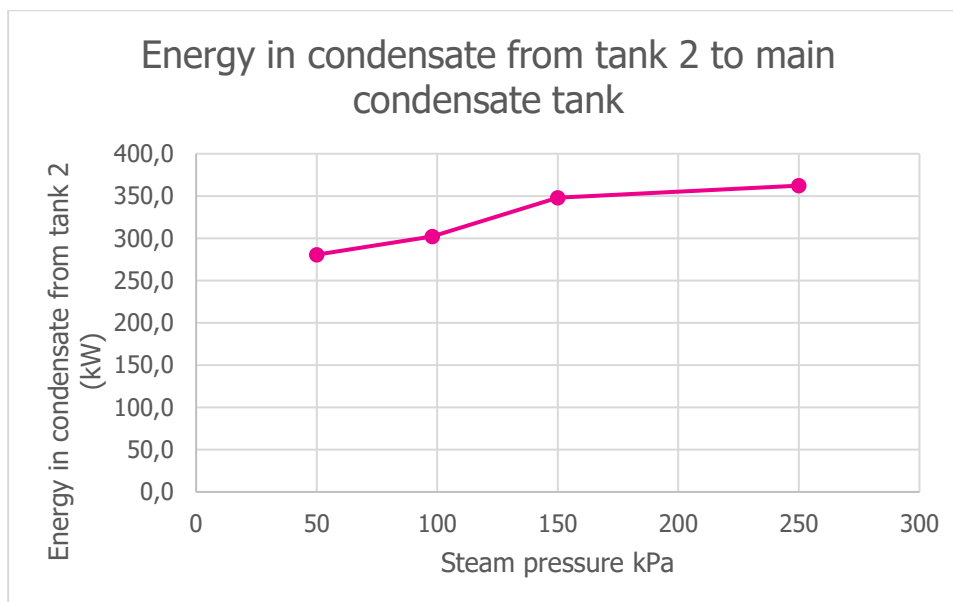
KUVA 9. Höyryn paineen ja höyryn kulutuksen suhde. (Kääriäinen 2022)

Tuloksista tarkastellaan myös jäännöshöyryn määrää. Tavoite on, että jäännöshöyryä pääsisi synty-mään mahdollisimman vähän, sillä se joudutaan ohjaamaan lauhduttimelle ja siinä oleva energia menee hukkaan. Kuvassa 10 nähdään kuinka ensimmäisen höyryryhmän paine vaikuttaa syntyvän jäännöshöyryn määrään. Ensimmäiseltä höyryryhmältä tuleva jäännöshöyry joudutaan ohjaamaan lauhduttimelle, sillä ei ole enää höyryryhmiä, joissa sitä voitaisiin hyödyntää.



KUVA 10. Lauhduttimelle kulkeutuvan jäännöshöyryn määrä ensimmäiseltä höyryryhmältä. (Kääriäinen 2022)

Mitä korkeampi paine ensimmäisellä höyryryhmällä on, sitä korkeampi on lauhdetankki 2:ssa lauhteen lämpötila. Lauhdetankki 2:ssa olevan lauhteen energia saadaan laskettua kertomalla kylläisen lauhteen entalpia lauhteen määrällä. Kuvassa 11 on käyrä, joka näyttää lauhdetankki 2:ssa olevan lauhteen sisältämän energian ensimmäisten höyryryhmien paineilla. Lauhteen lämpötila tulisi olla mahdollisimman matala sillä siinä oleva energian menee hukkaan, koska lauhde joudutaan ohjaamaan päälauhdetankille.



KUVA 11. Lauhetankki 2:lta päälauhetankille kulkeutuvan lauhteen sisältämä energia. (Kääriäinen 2022)

Trial point 2:n ja 5:n paineet ensimmäisellä höyryryhmällä ovat kaikista alhaisimmat, mikä on kokonaishöyrynkulutuksen kannalta hyvä. Tässä tapauksessa toisen höyryryhmän paine on kuitenkin liian korkea, minkä takia toiselta höyryryhmältä tulee liikaa läpivirtaushöyryä ja ensimmäinen höyryryhmä ei voi käyttää sitä kaikkea. Käyttämätön höyry joudutaan ohjaamaan lauhteen poistoon ja siinä oleva energia menee hukkaan. Tämä näkyy taulukoissa 2 ja 3, joihin on kerätty tiedot trial point 5 simuloinnin tuloksista. Taulukossa 3 lauhetankki 2:lle tulee 2,05 kg/s läpivirtaushöyryä, mutta ensimmäinen höyryryhmä voi käyttää vain 1,95 kg/s höyryä kuivatukseseen. Tämän takia 0,10 kg/s läpipuhallushöyryä joudutaan ohjaamaan lauhduttimelle. Tavoite on että höyryä ei pääse vuotamaan lauhetankeista lauhduttimelle kuivatusprosessin aikana yhtään. Pois lukien jäännöshöyry, joka ohjataan lauhduttimelle tarkoituksella. Ensimmäiselle höyryryhmälle ei ole tarvetta ottaa tuorehöyryä päähöyrylinjalta, tämä näkyy taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Höyryn ja lauhteen arvot trial point 5:n höyryryhmissä. (Kääriäinen 2022)

| Steam group | Steam pressure (kPa) | Steam into the group (kg/s) | | | Condensate and blow through steam out of the group (kg/s) | |
|-------------|----------------------|-----------------------------|-------------|-------------|---|--------------------|
| | | Total steam | Fresh steam | Flash steam | Condensate | Blow through steam |
| SG1 | 50 | 1,95 | 0,00 | 1,95 | 1,65 | 0,30 |
| SG2 | 500 | 5,26 | 3,45 | 1,81 | 4,61 | 0,65 |
| SG3 | 665 | 7,99 | 7,99 | 0,00 | 7,00 | 0,99 |
| SG4 | 665 | 4,73 | 4,73 | 0,00 | 4,13 | 0,59 |

TAULUKKO 3. Höyryn ja lauhteen arvot trial point 5:n lauhdetankeissa. (Kääriäinen 2022)

| Tank | Into tank(kg/s) | | Out of tank(kg/s) | | | |
|--------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------|---------------------|--------------|
| | Condensate | Blow through steam | Condensate | Flash steam | To next steam group | To condenser |
| Tank 1 | 1,65 | 0,30 | 1,58 | 0,36 | 0,00 | 0,36 |
| Tank 2 | 15,52 | 0,65 | 14,12 | 2,05 | 1,95 | 0,10 |
| Tank 3 | 11,13 | 1,58 | 11,10 | 1,18 | 1,81 | 0,00 |

Ensimmäisen höyryryhmän paine voidaan nostaa korkeaksi, kuten trial point 6 simuloinnissa. Tämä lisää kuivatuskapasiteettia, sillä pähöyryryhmän paine on vain 555 kPa ja keskiryhmän höyrynpaine 440 kPa. Jos näyttää siltä että, kuivatuskapasiteetti ei näytä riittävän tulee pähöyryryhmän tai keskiryhmän paineita nostaa ensimmäisenä kapasiteetin lisäämiseksi, sillä kapasiteetin lisääminen nostamalla ensimmäisen höyryryhmän painetta nostaa höyrynkulutusta paljon. Höyrynkulutus on trial point 6 simuloinnissa kaikista korkein ensimmäisen höyryryhmän korkeimman paineen takia.

Trial point 2:n simuloinnissa pääryhmän höyrynpaine on 700 kPa, joka on maksimi arvo höyrynpaineelle näissä simuloinneissa. Ensimmäisellä höyryryhmällä paine on 50 kPa ja keskiryhmällä 450 kPa. Tämä tarkoittaa, että jos kuivatuskapasiteetti ei riitä, joudutaan nostamaan ensimmäisen höyryryhmän painetta ettei höyrynpaineen paine-ero ensimmäisen ja keskimmäisen höyryryhmän välillä kasva liian suureksi.

Trial point 4:n paineprofiili on hyvä esimerkki tasaisesta paineprofiilista, jossa voidaan höyrynpaineen nosto toteuttaa pää- tai keskiryhmällä. Ensimmäisen höyryryhmän paine on suhteellisen korkea 150 kPa, joka näkyy höyrynkulutuksessa, mutta kulutus on kuitenkin pienempi kuin trial point 6:ssa ja kuivatuskapasiteetti voidaan tarvittaessa nostaa.

7 YHTEENVETO

Simulointien perusteella matalampi paine kuivatusosan alkupäässä johtaa pienempään höyrynkulutukseen. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisen höyryryhmän matala paine vähentää lauhduttimelle menevää jäännöshöyryn määrää ja päälauhdetankkiin menevän lahteen lämpötilaa. Ensimmäisten kuivatussylintereiden matala pintalämpötila auttaa myös sylintereiden pintoja pysymään puhtaana. Keskiryhmän höyrynpaine ei vaikuta höyrynkulutukseen, mikäli kaskadijärjestelmä ensimmäisen ja keskimmäisen höyryryhmän välillä toimii ja läpivirtaushöyryä ei vuoda lauhduttimelle. Jos kuivatuskapasiteettia halutaan nostaa, täytyy ensimmäiseksi pyrkiä nostamaan päänhöyryryhmän ja keskimmäisen höyryryhmän paineita.

Kartonkikoneissa kuivatuskapasiteetti usein rajoittaa tuotantoa. Kuivatuskapasiteettia voidaan lisätä nostamalla ensimmäisen höyryryhmän painetta. Tämän takia ensimmäisen höyryryhmän paine saattaa nousta 200 kPa tai korkeammaksi. Tässä tilanteessa syntyy paljon jäännöshöyryä ja lahteen lämpötila on korkea. Jottei jäännöshöyryssä ja lauhteessa oleva energia menisi hukkaan, pyritään sillä lämmittämään prosessivettä tai ohjaamaan se kartonkikoneen ilmastointiin. Prosessivesi tai koneen ilmastointi ei välttämättä kuitenkaan tarvitse niin paljoa energiaa mitä kuivatusosalta jää ylitse. Kuivatuksesta ylitse jäävän energian talteenotto on asia mitä tulisi tutkia jatkossa.

LÄHTEET

AEL (2003). Höyryn ominaisuuksia. Koulutusmateriaali.

Huhtinen, Markku; Korhonen, Risto; Pimiä, Tuomo; Urpalainen, Samu (2013), Voimalaitostekniikka. Opetushallitus.

Hägglom-Ahnger, Ulla & Komulainen, Pekka (2003), Paperin ja kartongin valmistus. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy

Karlsson, Markku (2010), Papermaking Part 2, Drying. Porvoo: WS Bookwell Oy

Knowpap (2022). Kalanterointi – yleistä. Haettu osoitteesta. http://www.knowpap.com/www/suomi/paper_technology/6_calendering/0_introduction/frame.htm?zoom_highlightsub=kalanterointi

Knowpap (2022). Kosteuden säätö. Haettu osoitteesta. http://www.knowpap.com/www/suomi/automation/12_control_strategies/4_dry_end_controls/2_moisture/frame.htm?zoom_highlightsub=kosteus%E4%E4t%F6

Knowpap (2022). Paperin ja kartongin valmistus – tiivistelmä. Haettu osoitteesta. http://www.knowpap.com/www/suomi/paperboard_technology/general/frame.htm

Lähteenmäki, Matti (2005). SIMULINK 5.0 Aloitusopas. Haettu osoitteesta. https://mlahteen.fi/arkistot/mlab_pdf/simulink_opas.pdf

Slätteke, Ola (2006). Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section. Doctoral thesis. Department of Automatic Control. Lund University.

Spirax Sarco. (julkaisuaika tuntematon). Höyry- ja lauhdejärjestelmien suunnittelu: Spirax Sarco opas.

Valmet (2012). Steam & condensate system improvements. Haettu osoitteesta. https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_steamcondensate.pdf

Valmet. (2020). Fluting energy efficiency survey.

Valmet (2022). Valmet IQ scanners. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Liiketoiminnat. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Liiketoiminnat. Paperit. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/paperit/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Liiketoiminnat. Sellu ja energia. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/sellu-ja-energia/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Liiketoiminnat. Automaatio. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/automaatio/>

Valmet (2022). Valmet lyhyesti. Liiketoiminnat. Palvelut. Haettu osoitteesta. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/palvelut/>

LIITTEET

LIITE 1: MILL DATA SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 86,0 | 20,0 | 0,18 | | | 0,15 | 0,03 | 14,9 |
| 1,2 | 103,0 | 20,0 | 0,38 | | | 0,32 | 0,06 | 14,8 |
| 1,3 | 137,0 | 20,0 | 0,81 | | | 0,69 | 0,12 | 15,0 |
| 1,4 | 198,0 | 20,0 | 0,93 | | | 0,79 | 0,14 | 15,2 |
| 1 | 198,0 | | 2,30 | 0,31 | 1,99 | 1,95 | 0,35 | 15,1 |
| 2,1 | 623,0 | 20,0 | 3,11 | | | 2,73 | 0,38 | 12,3 |
| 2,2 | 625,0 | 20,0 | 1,67 | | | 1,46 | 0,22 | 12,9 |
| 2,3 | 625,0 | 20,0 | 1,10 | | | 0,96 | 0,14 | 12,6 |
| 2 | 625,0 | | 5,89 | 4,37 | 1,52 | 5,15 | 0,74 | 12,5 |
| 3, | 677,0 | 20,0 | 7,38 | 7,38 | 0,00 | 6,47 | 0,91 | 12,3 |
| 4, | 676,0 | 20,0 | 4,34 | 4,34 | 0,00 | 3,81 | 0,54 | 12,4 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | SEC kg/s | |
| 1 | 50,0 | 1,95 | 0,35 | 1,84 | 0,45 | 0,00 | 0,45 |
| 2 | 198,0 | 15,35 | 0,74 | 14,10 | 1,99 | 1,99 | 0,00 |
| 3 | 625,0 | 10,27 | 1,45 | 10,21 | 1,52 | 1,52 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,40 kg/s

TO HEAT EXCHANGER : 1,05 MW

COOLING WATER CONSUMPTION : 12,51 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,18 kg steam/kg water evaporated
1,04 kg steam/kg paper

LIITE 2: TRIAL POINT 1 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 86,0 | 20,0 | 0,18 | | | 0,15 | 0,03 | 14,9 |
| 1,2 | 103,0 | 20,0 | 0,38 | | | 0,32 | 0,06 | 14,8 |
| 1,3 | 137,0 | 20,0 | 0,81 | | | 0,69 | 0,12 | 15,0 |
| 1,4 | 198,0 | 20,0 | 0,93 | | | 0,79 | 0,14 | 15,2 |
| 1 | 198,0 | | 2,30 | 0,70 | 1,60 | 1,95 | 0,35 | 15,1 |
| 2,1 | 350,0 | 20,0 | 2,32 | | | 2,04 | 0,29 | 12,3 |
| 2,2 | 550,0 | 20,0 | 1,59 | | | 1,39 | 0,20 | 12,5 |
| 2,3 | 460,0 | 20,0 | 0,93 | | | 0,82 | 0,11 | 12,1 |
| 2 | 460,0 | | 4,85 | 2,95 | 1,90 | 4,25 | 0,60 | 12,3 |
| 3, | 770,0 | 20,0 | 8,02 | 8,02 | 0,00 | 7,03 | 0,99 | 12,3 |
| 4, | 770,0 | 20,0 | 4,74 | 4,74 | 0,00 | 4,15 | 0,60 | 12,6 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | SEC kg/s | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | | |
| 1 | 50,0 | 1,95 | 0,35 | 1,84 | 0,45 | 0,00 | 0,45 |
| 2 | 198,0 | 15,12 | 0,60 | 14,12 | 1,60 | 1,60 | 0,00 |
| 3 | 550,0 | 11,18 | 1,58 | 10,87 | 1,90 | 1,90 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,42 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 1,05 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 12,51 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,18 kg steam/kg water evaporated
 1,04 kg steam/kg paper

LIITE 3: TRIAL POINT 2 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 70,0 | 20,0 | 0,16 | | | 0,13 | 0,02 | 15,9 |
| 1,2 | 80,0 | 20,0 | 0,32 | | | 0,27 | 0,05 | 15,8 |
| 1,3 | 100,0 | 20,0 | 0,67 | | | 0,57 | 0,10 | 14,9 |
| 1,4 | 150,0 | 20,0 | 0,80 | | | 0,67 | 0,12 | 15,3 |
| 1 | 150,0 | | 1,95 | 0,07 | 1,87 | 1,65 | 0,30 | 15,3 |
| 2,1 | 350,0 | 20,0 | 2,36 | | | 2,06 | 0,29 | 12,4 |
| 2,2 | 550,0 | 20,0 | 1,60 | | | 1,40 | 0,20 | 12,4 |
| 2,3 | 460,0 | 20,0 | 0,94 | | | 0,82 | 0,11 | 12,1 |
| 2 | 460,0 | | 4,89 | 2,91 | 1,99 | 4,29 | 0,60 | 12,3 |
| 3, | 800,0 | 20,0 | 8,23 | 8,23 | 0,00 | 7,21 | 1,02 | 12,4 |
| 4, | 800,0 | 20,0 | 4,86 | 4,86 | 0,00 | 4,25 | 0,61 | 12,5 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | COND kg/s | IN | | OUT | | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | SEC kg/s | |
| 1 | 50,0 | 1,65 | 0,30 | 1,58 | 0,36 | 0,00 | 0,36 |
| 2 | 150,0 | 15,39 | 0,60 | 14,12 | 1,87 | 1,87 | 0,00 |
| 3 | 550,0 | 11,46 | 1,63 | 11,10 | 1,99 | 1,99 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,07 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 0,84 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 10,03 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,16 kg steam/kg water evaporated
 1,01 kg steam/kg paper

LIITE 4: TRIAL POINT 3 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 100,0 | 20,0 | 0,20 | | | 0,17 | 0,03 | 15,7 |
| 1,2 | 150,0 | 20,0 | 0,48 | | | 0,41 | 0,08 | 15,7 |
| 1,3 | 200,0 | 20,0 | 1,00 | | | 0,85 | 0,15 | 15,2 |
| 1,4 | 250,0 | 20,0 | 1,04 | | | 0,88 | 0,16 | 15,4 |
| 1 | 250,0 | | 2,72 | 1,37 | 1,35 | 2,30 | 0,42 | 15,4 |
| 2,1 | 350,0 | 20,0 | 2,29 | | | 2,01 | 0,28 | 12,2 |
| 2,2 | 550,0 | 20,0 | 1,58 | | | 1,38 | 0,20 | 12,6 |
| 2,3 | 460,0 | 20,0 | 0,93 | | | 0,81 | 0,11 | 12,3 |
| 2 | 460,0 | | 4,80 | 3,01 | 1,79 | 4,21 | 0,59 | 12,3 |
| 3, | 735,0 | 20,0 | 7,79 | 7,79 | 0,00 | 6,83 | 0,96 | 12,4 |
| 4, | 735,0 | 20,0 | 4,59 | 4,59 | 0,00 | 4,02 | 0,57 | 12,4 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | SEC kg/s | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | | |
| 1 | 50,0 | 2,30 | 0,42 | 2,14 | 0,59 | 0,00 | 0,59 |
| 2 | 250,0 | 14,80 | 0,59 | 14,04 | 1,35 | 1,35 | 0,00 |
| 3 | 550,0 | 10,85 | 1,53 | 10,59 | 1,79 | 1,79 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,76 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 1,35 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 16,19 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,21 kg steam/kg water evaporated
 1,06 kg steam/kg paper

LIITE 5: TRIAL POINT 4 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 100,0 | 20,0 | 0,20 | | | 0,17 | 0,03 | 15,7 |
| 1,2 | 150,0 | 20,0 | 0,48 | | | 0,41 | 0,08 | 15,7 |
| 1,3 | 200,0 | 20,0 | 1,00 | | | 0,85 | 0,15 | 15,2 |
| 1,4 | 250,0 | 20,0 | 1,04 | | | 0,88 | 0,16 | 15,4 |
| 1 | 250,0 | | 2,72 | 1,19 | 1,53 | 2,30 | 0,42 | 15,4 |
| 2,1 | 420,0 | 20,0 | 2,53 | | | 2,21 | 0,32 | 12,5 |
| 2,2 | 600,0 | 20,0 | 1,65 | | | 1,44 | 0,21 | 12,9 |
| 2,3 | 530,0 | 20,0 | 1,00 | | | 0,88 | 0,13 | 12,5 |
| 2 | 530,0 | | 5,19 | 3,56 | 1,62 | 4,53 | 0,65 | 12,6 |
| 3, | 700,0 | 20,0 | 7,55 | 7,55 | 0,00 | 6,61 | 0,94 | 12,5 |
| 4, | 700,0 | 20,0 | 4,44 | 4,44 | 0,00 | 3,90 | 0,55 | 12,3 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | SEC kg/s | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | | |
| 1 | 50,0 | 2,30 | 0,42 | 2,14 | 0,59 | 0,00 | 0,59 |
| 2 | 250,0 | 14,91 | 0,65 | 14,03 | 1,53 | 1,53 | 0,00 |
| 3 | 600,0 | 10,51 | 1,49 | 10,37 | 1,62 | 1,62 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,75 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 1,35 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 16,19 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,21 kg steam/kg water evaporated
 1,06 kg steam/kg paper

LIITE 6: TRIAL POINT 5 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 70,0 | 20,0 | 0,16 | | | 0,13 | 0,02 | 15,9 |
| 1,2 | 80,0 | 20,0 | 0,32 | | | 0,27 | 0,05 | 15,8 |
| 1,3 | 100,0 | 20,0 | 0,67 | | | 0,57 | 0,10 | 14,9 |
| 1,4 | 150,0 | 20,0 | 0,80 | | | 0,67 | 0,12 | 15,3 |
| 1 | 150,0 | | 1,95 | 0,00 | 1,95 | 1,65 | 0,30 | 15,3 |
| 2,1 | 420,0 | 20,0 | 2,58 | | | 2,27 | 0,31 | 12,1 |
| 2,2 | 600,0 | 20,0 | 1,67 | | | 1,46 | 0,21 | 12,7 |
| 2,3 | 530,0 | 20,0 | 1,01 | | | 0,89 | 0,12 | 12,3 |
| 2 | 530,0 | | 5,26 | 3,45 | 1,81 | 4,61 | 0,65 | 12,3 |
| 3, | 765,0 | 20,0 | 7,99 | 7,99 | 0,00 | 7,00 | 0,99 | 12,4 |
| 4, | 765,0 | 20,0 | 4,73 | 4,73 | 0,00 | 4,13 | 0,59 | 12,6 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | SEC kg/s | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | | |
| 1 | 50,0 | 1,65 | 0,30 | 1,58 | 0,36 | 0,00 | 0,36 |
| 2 | 150,0 | 15,52 | 0,65 | 14,12 | 2,05 | 1,95 | 0,10 |
| 3 | 600,0 | 11,13 | 1,58 | 10,91 | 1,81 | 1,81 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 16,17 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 1,07 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 12,85 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,17 kg steam/kg water evaporated
 1,02 kg steam/kg paper

LIITE 7: TRIAL POINT 6 SIMULOINNIN TULOKSET

STEAM SECTIONS

=====

| SEC NO | PRESSURE | | TOT kg/s | IN | | COND kg/s | OUT | |
|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|---------|
| | P kPa-a | DP kPa-a | | FRESH kg/s | BT kg/s | | BT kg/s | BT % |
| 1,1 | 200,0 | 20,0 | 0,30 | | | 0,25 | 0,05 | 15,1 |
| 1,2 | 250,0 | 20,0 | 0,63 | | | 0,53 | 0,10 | 15,8 |
| 1,3 | 300,0 | 20,0 | 1,22 | | | 1,03 | 0,19 | 15,6 |
| 1,4 | 350,0 | 20,0 | 1,23 | | | 1,04 | 0,19 | 15,2 |
| 1 | 350,0 | | 3,37 | 2,33 | 1,04 | 2,85 | 0,52 | 15,5 |
| 2,1 | 450,0 | 20,0 | 2,57 | | | 2,25 | 0,32 | 12,3 |
| 2,2 | 540,0 | 20,0 | 1,53 | | | 1,34 | 0,18 | 12,0 |
| 2,3 | 500,0 | 20,0 | 0,96 | | | 0,84 | 0,12 | 12,1 |
| 2 | 500,0 | | 5,06 | 3,48 | 1,57 | 4,44 | 0,62 | 12,2 |
| 3, | 655,0 | 20,0 | 7,22 | 7,22 | 0,00 | 6,33 | 0,89 | 12,3 |
| 4, | 655,0 | 20,0 | 4,25 | 4,25 | 0,00 | 3,72 | 0,53 | 12,4 |

CONDENSATE TANKS

=====

| TANK NO | P kPa-a | IN | | OUT | | SEC kg/s | EX kg/s |
|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | | COND kg/s | BT kg/s | COND kg/s | BT kg/s | | |
| 1 | 50,0 | 2,85 | 0,52 | 2,57 | 0,80 | 0,00 | 0,80 |
| 2 | 350,0 | 14,33 | 0,62 | 13,91 | 1,04 | 1,04 | 0,00 |
| 3 | 540,0 | 10,05 | 1,42 | 9,90 | 1,57 | 1,57 | 0,00 |

USE OF FRESH STEAM : 17,28 kg/s
 TO HEAT EXCHANGER : 1,85 MW
 COOLING WATER CONSUMPTION : 22,15 kg/s

SPECIFIC STEAM CONSUMPTION : 1,25 kg steam/kg water evaporated
 1,09 kg steam/kg paper