Tampereen yliopisto

Tuomas Eko

PAPERIKONEEN KIERTOVESIJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Prof. Risto Ritala
Prof. Matti Vilkko
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Tuomas Eko: Paperikoneen kiertovesijärjestelmän kehittäminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan DI-ohjelma
Toukokuu 2021

Tässä työssä tutkitaan Kauttuan paperitehtaalla toimivan Jujo Thermal Oy:n Paperikone 1:n tuotantoprosessia ja sen osittain suljettua vesikiertoa. Veden laadulla on merkittävä vaikutus valmiin tuotteen laatuun. Kiertoveden tärkeimmät ominaisuudet ovat kiintoainepitoisuus, lämpötila ja pH. PK1:n prosessissa ei voida hyödyntää kiertovettä riittävästi. Vesitase on ylijäämäinen, mikä aiheuttaa merkittävät jätevesikustannukset.

Työn ensimmäinen tavoite oli kehittää työkalu, jonka avulla voidaan arvioida kiertovesijärjestelmän toimintaa. Työssä mallinnetaan PK1:n tuotantoprosessi ja lasketaan massatase valmiin tuotteen kuiva-ainevirtauksesta taaksepäin. Prosessista kerätyn datan avulla lasketaan massataseet viidelle lajille, joiden neliöpainot ja massasuhteet eroavat toisistaan.

Työn toinen tavoite oli osoittaa mallinnetun prosessin ja laskettujen massataseiden avulla merkittävimmät häiriöt ja niiden aiheuttajat. Työn tulokset osoittavat, että normaaliajossa merkittävin häiriö on vesitaseen ylijäämästä aiheutuva jätevesimäärä. PK1:n kiertovesitornin ylijuoksusta aiheutuva jätevesimäärä on 15–30 % koko tehtaan jätevesien osuudesta. Katkotilanteessa merkittävin häiriö on suihkuveden riittämättömyys ja siitä aiheutuva tuoreveden kulutuksen kasvu.

PK1:n kiertovettä puhdistetaan flotaattorilla. Sen kapasiteetti ei riitä puhdistamaan kaikkea prosessin kiertovettä. Puhdistamaton vesi ja toistuvat katkot lisäävät kiertoveden kiintoainepitoisuutta. Työn kolmantena tavoitteena oli tutkia, millä keinoin häiriöitä voidaan vähentää. Työn tulosten pohjalta todetaan, että lisäämällä kiertoveden puhdistuskapasiteettia voidaan kiertovettä hyödyntää uusissa kohteissa, jolloin tuoreveden käyttö ja jätevesimäärät vähenevät. Viiraosan matalapainesuihkuissa voidaan käyttää kiertovettä, jos sen kiintoainepitoisuus on alle 50 mg/l.

Johtopäätöksenä todetaan, että PK1:n kiertovesijärjestelmässä esiintyy häiriöitä, jotka aiheuttavat tuotannollisia ja taloudellisia haasteita. Jätevesimäärän hallinnalla on merkittävä vaikutus alueen jätevedenpuhdistamon toimintaan. Investoimalla kiertoveden puhdistuskapasiteettiin, voidaan parantaa PK1:n kiertovesijärjestelmän toimintaa ja vähentää jätevesimäärää.

Avainsanat: paperikone, kiertovesi, flotaatio, lyhyt kierto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Tuomas Eko: Improving white water circulation of a paper machine
Master's thesis
Tampere University
Degree Programme in Mechanical Engineering
May 2021

This thesis focuses on the production process and water circulation of the Paper Machine 1 at Jujo Thermal Oy. Water quality has a key role in papermaking process. The main properties of white water are temperature, pH and solids content. Excess white water of the PM1 causes significant wastewater costs.

The first goal of the thesis was to develop a tool that helps evaluating the state of the water circulation system. The process is modelled, and mass balance is calculated backwards starting from the solid mass flow of finished paper. The mass balance is calculated for five different paper grades with different basis weights.

The second goal was to find disturbances of the process and causes of the disturbances were studied by using mass balances. The results of the thesis show that during the normal run PM1 wastewater causes 15–30 % of the whole paper mill wastewater amount. During a web break the most remarkable disturbance is the lack of shower water and the increased usage of fresh water.

White water of the PM1 is purified with a flotator which capacity is inadequate. Unpurified water and frequent web breaks increase solids content of the white water storage. Third goal of the thesis was to study the tools to reduce aforementioned disturbances. The results of this thesis show that white water usage can be significantly increased by adding capacity to water purification. White water can be used for the low-pressure showers of the wire section if the solids content is lower than 50 mg/l.

As a result, certain disturbances were discovered in the process causing challenges in white water system of the PM1. There could be positive effect for local wastewater purification plant by controlling the amount of wastewater from the paper mill. The better control is possible by investing in modern water purification devices.

Keywords: paper machine, white water, flotation, short circulation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin toimeksiantona Jujo Thermal Oy:lle Kauttuan paperitehtaalle osana PK1:n lyhyen kierron kehittämisprojektia. Matka työn loppuun saattamiseksi oli pitkä, mutta hyvin antoisa ja opettava. Kiitos paperitehtaan väelle mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta kehittää osaamistani paperiteollisuuden parissa.

Kiitos ohjaajilleni professori Risto Ritalalle ja professori Matti Vilkolle työni ohjaamisesta ja korvaamattomista neuvoista työn edetessä.

Ja tärkeintä unohtamatta, kiitos perheelle ja ystäville. Kiitos unohtumattomista kaarella vietetyistä päivistä ja lukemattomista nauruntäyteisistä kahvi- ja lounashetkistä. Ilman niitä tähän asti tuskin olisi päästy.

Kauttualla, 6.5.2021

Tuomas Eko

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1 Jujo Thermal Oy 1
1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet 1
2. PAPERINVALMISTUSPROSESSI 4
2.1 Paperikoneen massankäsittely ja vesikierrot 6
2.2 Kiertoveden puhdistaminen ja uudelleenkäyttö 10
2.3 Rainanmuodostus ja vedenpoisto 12
2.4 Prosessin häiriölähteet 15
3. PAPERIKONEEN PROSESSIN MALLINNUS 17
3.1 Prosessin mallinnus 17
3.2 Prosessidynamiikka 19
4. PK1 VESI- JA MASSATASE 21
4.1 PK1 vesikierto 22
4.2 Simulointimallin rajaus ja virtausverkon mallinnus 23
5. MALLIN TESTAAMINEN PAPERIKONEELLA 25
5.1 Kokeellinen osuus 25
5.2 Dynaaminen tarkastelu 29
6. TULOSTEN TARKASTELU 31
6.1 Virtaukset normaaliajossa 31
6.2 Katkotilanteet 35
7. KIERTOVESIJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN 37
7.1 Kehitysehdotukset 37
7.2 Tuotannollinen näkökulma 38
7.3 Taloudellinen näkökulma 39
7.4 Ympäristövaikutukset 39
8. YHTEENVETO 40
LÄHTEET 42

KUVALUETTELO

Kuva 1. Paperitehtaan virtauskaavio. 2
Kuva 2. Paperikoneen tärkeimmät vaiheet ja virtaukset. [8] 4
Kuva 3. Tasoviirakoneen viiraosa. [9] 5
Kuva 4. Massanvalmistusprosessi. [7] 7
Kuva 5. Lyhyen kierrot virtaukset. [7] 8
Kuva 6. Virtaus pyörrepuhdistimessa. [7] 9
Kuva 7. Flotaation toimintaperiaate. [13] 10
Kuva 8. Kiekkosuodattimen toimintaperiaate. [15] 12
Kuva 9. Retentioaineiden vaikutus kuitujen ja lisäaineiden flokkautumiseen. [17] 13
Kuva 10. Prosessille ominaisia taajuuksia. [21] 18
Kuva 11. Kuivatusosan jälkeinen mittaa paperin ominaisuuksia kuivatusosan jälkeen. 19
Kuva 12. PK1 prosessin virtauskaavio. 21
Kuva 13. PK1:n vesikierto. 22
Kuva 14. PK1 massavirtauskaavio. 24
Kuva 15. PK1 suihkuvesikaavio. 30
Kuva 16. PK1 suihkuvesisäiliön pinta katkotilanteessa ajan funktiona. 35

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CTMP	chemi-thermomechanical pulp
DAF	dissolved air flotation
FPR	first pass retention
JTK	Jujo Thermal Kauttua
JVP	jätevedenpuhdistamo
PK1	Paperikone 1
PK2	Paperikone 2
RDF	retention, drainage and formation

1. JOHDANTO

Metsäteollisuus on ollut kasvava teollisuudenala Suomessa jo 1960-luvulta lähtien. Paperin osuus metsäteollisuuden tuotteista on kuitenkin vähentynyt huomattavasti viimeisen vuosikymmenen aikana merkittävästi [1]. Tähän syynä on digitalisaation aiheuttama painopaperin kysynnän lasku. Tiukat ympäristövaatimukset, kova kilpailu pienentyneillä markkinoilla ja kasvavat laatuvaatimukset ovat asettaneet paperitehtaita kovien haasteiden eteen [2].

1.1 Jujo Thermal Oy

Tässä työssä tutkitaan paperikoneen kiertovesijärjestelmää ja sen merkittävimpiä häiriöitä. Työn tavoitteena on kehittää vesikierron arviointimenetelmä, jota voidaan käyttää työkaluna kiertovesijärjestelmän kehittämisessä. Työ tehdään Kauttuan paperitehtaalle osana Paperikone 1:n (PK1) lyhyen kierron kehittämisprojektia. Kauttualla on pitkät perinteet paperinvalmistuksesta. Nykyisin tehtaalla toimii japanilaisomisteinen Jujo Thermal Oy. Erikoispapereihin keskittynyt Jujo Thermal valmistaa lämpöherkkää paperia ja päällystettyjä etikettipapereita.

Kauttualla on kaksi 1900-luvun alkupuolella rakennettua paperikonetta, joita on myöhemmin modernisoitu vastaamaan nykypäivän tarpeita. PK1:n kiertovesiprosessissa syntyy runsaasti jätevettä, mikä aiheuttaa suuria kustannuksia. Yrityksen näkökulmasta tutkimuksen merkittävin motiivi on tavoite pienentää jätevesi- ja raakavesikustannuksia. Vähentämällä jätevesi- ja raakavesimääriä voidaan vähentää kustannuksia ja ympäristön kuormitusta.

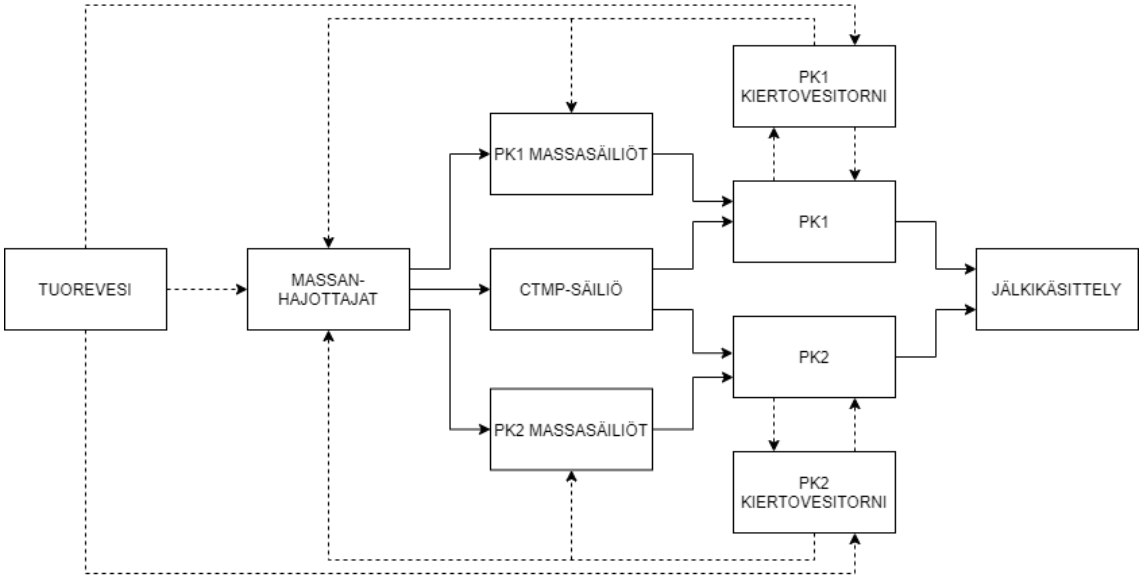
1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Vesi on yksi paperinvalmistuksen tärkeimmistä raaka-aineista. Veden laatu vaikuttaa sen käytettävyyteen paperinvalmistusprosessissa. Veden laadun vaihtelu näkyy herkästi paperin laadun häiriöinä. Paperinvalmistuksen näkökulmasta veden tärkeimmät ominaisuudet ovat kiintoainepitoisuus, pH ja lämpötila.

Paperikoneen lyhyt kierto on lähes suljettu vesikierto. Lyhyellä kierrolla tarkoitetaan paperikoneen konesäiliön ja viiraosan välistä prosessia. Perälaatikolta viiraosalle syötetystä massarainasta poistettua vettä kierrätetään laimentamaan viirakaivon

massaa perälaatikkosakeuteen. Loput rainasta poistetusta vedestä kierrätetään käytettäväksi edelleen massanhajotukseen, massan laimennukseen ja paperikoneen vesisuihkuihin. Osa kiertovedestä puhdistetaan flotaation avulla ja kiertovedestä erotettu massajae hyödynnetään koneen hylkysysteemissä. Lähes suljettu vesikierto tarkoittaa kiertovesijärjestelmää, jossa osa vedestä kierrätetään uusiokäyttöön ja osa ajetaan jätevesiin ja korvataan tuorevedellä. Tuorevesi on tehtaan raakavesilaitoksen tuottamaa puhdistettua jokivettä.

Kauttuan tehtaan kahdella paperikoneella on molemmilla omat vesikierrot. PK1:n ja PK2:n massat hajotetaan yhteisissä massapulppereissa ja koneet käyttävät samaa CTMP-säiliötä (chemi-thermomechanical pulp). CTMP-massa hajotetaan PK2:n kiertoveteen, sillä PK1:n kiertovesi sisältää kemikaaleja, joita ei saa joutua PK2:n järjestelmään. Näiden massojen mukana PK1:n prosessiin tulee vettä yli tarpeen ja kiertovesitornin vesitase on reilusti ylijäämäinen. Kiertovettä lasketaan ylijuoksuna jätevesijärjestelmään, mistä aiheutuu merkittävät jätevesikustannukset. Kuvassa 1 on esitetty tehtaan virtauskaavio, jossa massavirtaukset ovat yhtenäisillä viivoilla ja vesivirtaukset katkoviivoilla.



Kuva 1. Paperitehtaan virtauskaavio.

Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Millä keinoin voidaan arvioida paperikoneen kiertovesijärjestelmän toimintaa?
2. Mitkä ovat PK1:n kiertovesijärjestelmän merkittävimmät häiriöt ja mistä ne aiheutuvat?
3. Miten järjestetään PK1:n vesikierto siten, että taloudellisia ja tuotannollisia haittoja vähennetään merkittävästi?

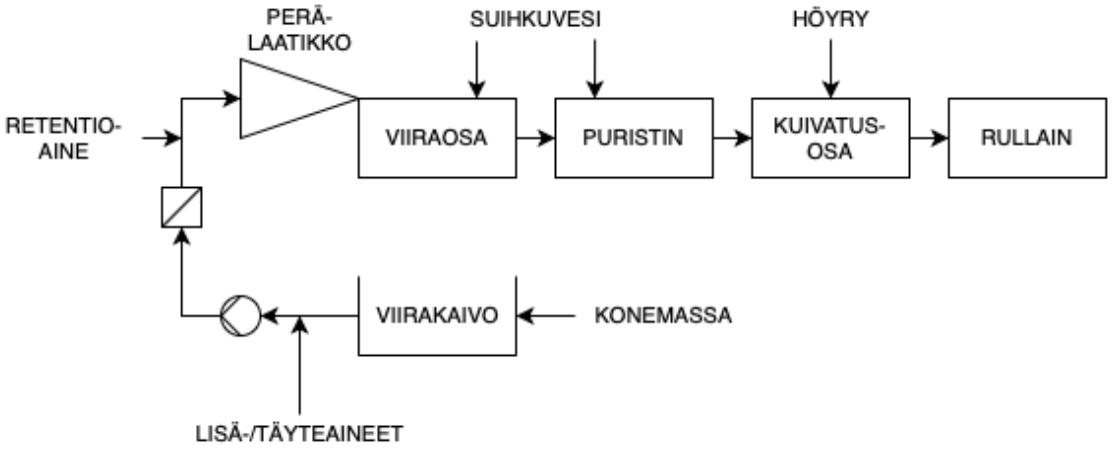
Tutkimuksessa kehitetään työkalu, jolla voidaan arvioida paperikoneen vesikiertoa ja löytää tärkeimmät kehityskohteet. Tarkoituksena on tutkia PK1:n kiertovesijärjestelmää ja hyödyntää tutkimusta lyhyen kierron kehittämisessä. Työ on case-tutkimus PK1:lle, mutta työn periaatteita voi hyödyntää muidenkin koneiden vesikierron tarkastelussa ja kehittämisessä. Työn tutkimusmenetelmät ovat simulointi ja kerätyn datan analyysi.

Työn teoriaosuudessa käsitellään paperinvalmistusprosessia sekä prosessin mallintamista, simulointia ja dynamiikkaa. Työssä kerätään PK1:n prosessista dataa ja prosessista tehdyn virtauskaavion avulla lasketaan paperikoneen massavirtauksia ja tarkastellaan prosessiin liittyvää vesikiertoa. Laskennallista mallia verrataan todellisen tuotannon virtausmittauksiin mallin laskentatarkkuuden selvittämiseksi. Tulosten avulla pyritään löytämään prosessin tärkeimmät häiriölähteet ja kehityskohteet. Työn lopuksi pohditaan tulosten luotettavuutta ja verrataan niitä muihin vastaaviin tutkimuksiin.

Bajpain [3] mukaan paperitehtaiden keskimääräinen tuorevedenkulutus on 33,3 m^3 tuotettua tonnia kohden. Nuortila-Jokisen et al. [4] mukaan tuorevedenkulutus vaihtelee 10–40 m^3 välillä riippuen tuotettavasta paperilajista ja paperitehtaan teknisestä iästä. Kauttuan paperitehtaan tuoreveden kulutus on 10–20 m^3 tuotettua tonnia kohden. Kauttuan paperitehtaan haasteena on jätevesien määrä, niiden puhdistus ja siitä aiheutuvat kustannukset. Alueen jätevedet puhdistetaan kunnan jätevedenpuhdistamossa (JVP) ja lasketaan kunnan läpi virtaavaan Eurajokeen, jonka virtaama on 2–20 m^3/s [5]. Joen virtaama on pieni suhteessa siihen laskettavaan puhdistetun jäteveden määrään. Sen vuoksi joki on herkkä päästöille ja JVP:n puhdistetun veden laadun vaihtelulle. Vuosina 2012–2020 paperitehtaan jätevesien osuus oli yli 60 prosenttia JVP:lle tulevasta jätevedestä [6]. PK1:n prosessin tuottamien jätevesien osuus on keskimäärin kolmannes koko tehtaan jätevesimäärästä. Parantamalla paperikoneen osittain suljettua vesikiertoa, voidaan vähentää jäteveden määrää ja sitä kautta vaikuttaa merkittävästi alueen vesistöjen kuormitukseen. Työn tavoitteena on selvittää, millaisilla vesikierron muutoksilla voidaan vaikuttaa jätevesimääriin ja vähentää niistä aiheutuvia kustannuksia. Panostamalla kestävään tuotantoon voidaan taata JVP:n kyky prosessoida kaikki sille tuleva vesimäärä tehokkaasti myös tulevaisuudessa.

2. PAPERINVALMISTUSPROSESSI

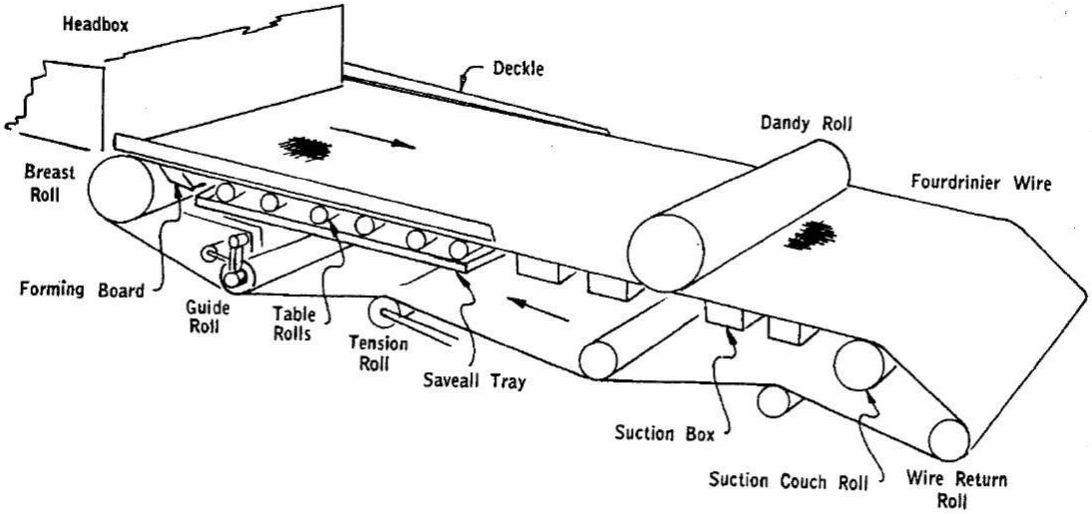
Luvussa käsitellään paperivalmistusprosessia massanvalmistuksesta valmiiksi rullaksi. Kuvassa 2 on yksinkertaistettu malli paperikoneen tyypillisistä prosessin vaiheista. Paperinvalmistuksen teoriaosuuden lähteenä on käytetty pääosin Hannu Paulapuron kirjaa [7] paperinvalmistuksesta, ellei muita lähteitä erikseen mainita.



Kuva 2. Paperikoneen tärkeimmät vaiheet ja virtaukset. [8]

Paperia valmistetaan puukuiduista, joita tuotetaan puusta kemiallisella tai mekaanisella prosessilla. Paperinvalmistus on laaja kokonaisuus, joka muodostuu useasta pienemmästä prosessista. Paperikoneen prosesseja ovat rainanmuodostus, vedenpoisto, puristaminen ja kuivattaminen. Ennen rainanmuodostusta perälaatikkoon syötettävä massa valmistellaan tuotantoon sopivaksi. Massanvalmistelussa massan joukkoon sekoitetaan lisä- ja täyteaineita, joilla parannetaan massan ominaisuuksia paperikoneen ajettavuuden ja lopputuotteen laadun varmistamiseksi.

Valmis massa syötetään perälaatikosta paperikoneen viiraosalle, jossa paperiraina muodostetaan. Massan koostumus on alkuvaiheessa pääosin vettä ja perälaatikolle syötettävän massan sakeus on tasoviirakoneella 0,3–0,6 %. Viiraosan imulaatikoiden avulla paperirainasta poistetaan vettä ja puristinosalle saapuessaan rainan kuiva-ainepitoisuus on 18–23 % [9].



Kuva 3. Tasoviirakoneen viiraosa. [9]

Puristinosa koostuu imu- ja puristinteloista, jotka kuljettavat puristinhuopia. Puristinosalla teloja puristetaan yhteen muodostaen telanippejä, joiden välistä paperiraina kuljetetaan. Rainasta puristetaan vettä, jonka imutelat poistavat huovasta takaisin kiertoon.

Kuivatusosalle saapuessaan massan kuiva-ainepitoisuus on 35–55 % [9]. Kuivatusosa koostuu kuivatussylintereistä, joita lämmitetään höyryllä. Sylinterin pinnasta johtuva lämpö haihduttaa paperiradasta vettä kuivattaen paperia sen tavoitekosteuteen, joka on tyypillisesti noin 2 %. Paperikoneella voi lisäksi olla yksi tai useampi päällystysasema sekä kalanterointiasema, joilla voidaan muokata paperin ominaisuuksia.

Lämpöherkän paperin valmistus ei prosessina eroa tavallisen paperin valmistusprosessista. Paperikoneella lämpöherkän pohjapaperin pintaan lisätään esipäällystekerros, joka tasoittaa paperin epätasaisuuksia [10], ja siten vähentää kalliin lämpöherkän päällysteen tarvetta. Päällystyskoneella esipäällystettyyn paperiin lisätään lopullinen päällystekerros. Loppukäytössä päällyste reagoi lämpöön muuttamalla väriään. Lämpöherkän päällysteen ansiosta paperia voidaan painaa lisäämättä mustetta paperin pintaan.

Lämpöherkän paperin valmistus on tarkkaa lopputuotteen laadun varmistamiseksi. Sileydellä, vaaleudella, epäpuhtauksien määrällä on tärkeä merkitys paperin loppukäytön kannalta. Lämpöherkkää paperia käytetään esimerkiksi etiketeissä, pääsylipuissa ja kassakuiteissa. Lämpöherkät paperit ovat tyypillisesti arvokkaampia tavalliseen paperiin verrattuna johtuen niiden valmistuksen haastavuudesta ja raaka-ainekustannuksista.

2.1 Paperikoneen massankäsittely ja vesikierrot

Massankäsittelyn ja vesikiertojen osaprosesseja ovat massanvalmistus, kiertovesi-, kuidun talteenotto-, hylky-, lämminvesi- ja suihkuvesisysteemi. Paperikoneen massankäsittelyn ja vesikiertojen kolme päätarkoitusta ovat tuottaa

- riittävä määrä massaa vastaamaan paperikoneen tuotantokapasiteettia,
- tasalaatuista massaa paperikoneen korkean tuottavuuden saavuttamiseksi ja
- riittävän laadukasta massaa, jotta lopputuote vastaa tavoiteltuja laatuparametreja.

Jotta tuotanto olisi taloudellisesti kannattavaa, prosessin käyttö- ja ylläpitokustannusten on oltava riittävän alhaiset. Suurimmat kustannukset syntyvät raaka-aineista ja energiankulutuksesta. Jos tuotanto ei saavuta asetettuja laatutavoitteita, syntyy hylkyä, mikä aiheuttaa ylimääräisiä raaka-aine- ja energiakustannuksia. Paperikoneiden tuotanto on jatkuva prosessi ja tuotantoajan hukka aiheuttaa merkittäviä taloudellisia tappioita. Paperinvalmistuksessa syntynyt hylky voidaan monesti hyödyntää uudelleen tuotannossa annostelemalla sitä tuoremassan joukkoon.

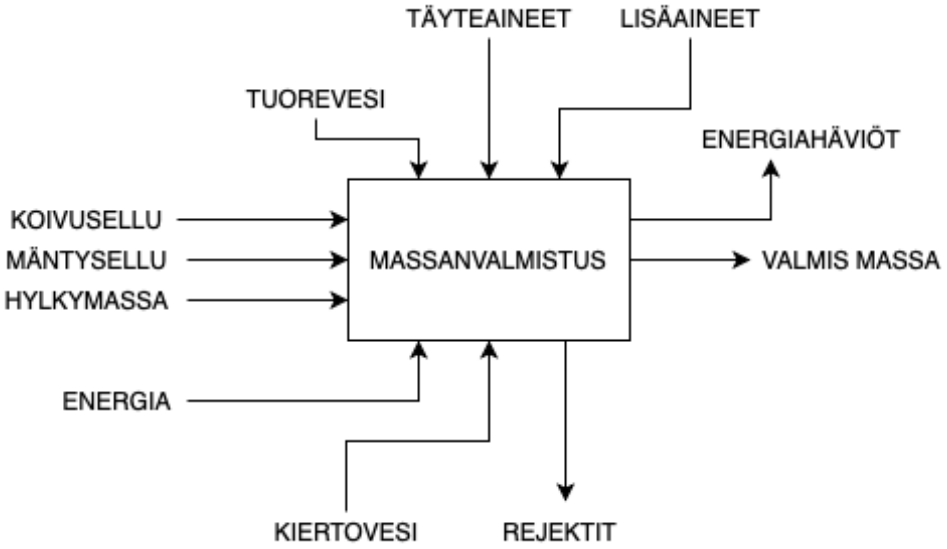
Prosessiveden laatuvaatimukset vaikuttavat veden käyttöön liittyviin kustannuksiin. Prosessissa käytetään kiertovettä, tuorevettä sekä lämmintä vettä. Lämpimän veden lämmityskustannukset ovat suurimmat ja sillä on tarkimmat laatuvaatimukset, koska sitä käytetään suihkuvetenä. Mitä enemmän voidaan hyödyntää kiertovettä, sitä vähemmän joudutaan käyttämään tuorevettä ja lämmintä vettä. Toisaalta mitä enemmän vettä prosessoidaan ja siihen lisätään kemikaaleja, sitä enemmän se aiheuttaa kustannuksia. Paperikoneella ajetaan useita lajeja, joiden massasuhteet ja neliöpainot voivat vaihdella paljon, joten vesikierron järjestäminen kaikille lajeille yhtä tehokkaaksi on haastavaa. Vesikierto on järjestettävä siten, että se on tehokkain niillä lajeilla, joiden tuotantovolyymit ovat suurimmat.

Paperikoneen vesikierto voi olla avoin, suljettu tai osittain suljettu. Suljetusta vesikierrosta ei synny jätevettä. Todellisuudessa täysin suljettu vesikierto aiheuttaisi veden laadun heikkenemistä siihen kertyvien lisäaineiden vuoksi. Tästä syystä vesikierrot ovat vain osittain suljettuja ja prosessissa muodostuu aina jätevettä. Jätevesimäärien ja ympäristötavoitteiden vuoksi vesikiertoja on pyritty muokkaamaan aiempaa enemmän suljetuiksi. Tavoitteena on vähentää tuoreveden käyttöä ja jätevesiä sekä vähentää kustannuksia ja ympäristön kuormittumista. Veden laatuvaatimukset vaihtelevat sen käyttökohteen mukaan. Paperikoneen suihkuvesien tulee olla puhtaita, mutta massanhajotukseen voidaan käyttää kuitupitoista vettä. Kiertoveden

puhdistukseen on kehitetty paljon erilaisia ratkaisuja, joista yleisimpiä ovat suodatus ja mikroflotaatio.

2.1.1 Massankäsittely

Massankäsittely on paperinvalmistuksen ensimmäinen vaihe. Sellupaalit hajotetaan veteen ja laimennetaan, massa jauhetaan, pääraaka-aineet yhdistetään reseptin määrittämässä suhteessa ja annostellaan eteenpäin sekoitussäiliön kautta konesäiliölle. Valmis massa on sekoitus koivu- ja mäntymassaa, hylkymassaa sekä lisä- ja täyteaineita. Konesäiliön valmiin massan sakeus on tavallisesti 3–4 %, eli massasta suurin osa on vettä. Häiriöttömän tuotannon kannalta massanvalmistuksen tärkein tehtävä on tuottaa tasalaatuista massaa ja pitää sakeus vakiona. Massanhajotukseen ja -laimennukseen käytetään paperikoneen kiertovettä. Kiertovesi on viiran läpi virrannutta vettä ja sen kuitu- ja lisäainepitoisuus riippuu viiraosan retentiosta. Kuvassa 4 on havainnollistettu massanvalmistuksen periaate virtauskaaviona.



Kuva 4. Massanvalmistusprosessi. [7]

2.1.2 Hylkysysteemi

Hylyllä tarkoitetaan tuotannon laatutavoitteista poikkeavaa tuotantoa ja usein hylky voidaan hyödyntää uudelleen tuotantoprosessissa. Hylky on tärkeä massanvalmistuksen komponentti ja sillä voidaan korvata osa tuoremassasta [11]. Paperinvalmistusprosessissa syntyy hylkyä kahdella tavalla. Paperikoneen viiraosalla ja ennen rullainta raina kavennetaan haluttuun leveyteen, ja reunanauhat ajetaan pulpperiin. Myös ratakatkossa paperirata ajetaan pulpperiin, jossa massa laimennetaan

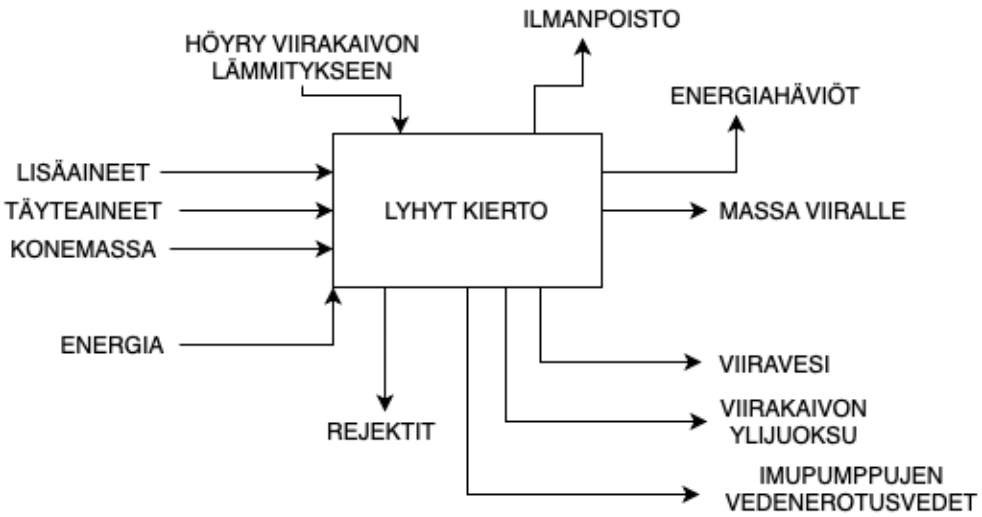
noin 4 % sakeuteen ja pumpataan eteenpäin hylkysakeutimelle, joka erottelee massan hylkyvarastoon ja veden kiertovesivarastoon. Hylkyä syntyy myös valmiista paperirullista, jotka eivät heikon laadun takia kelpaa toimitettavaksi asiakkaalle. Hylätty rulla voidaan pulpperoida ja pumpata hylkytorniin, josta hylkymassa annostellaan tuoremassan joukkoon. Massan jatkokäsittely riippuu paperikoneen hylkysysteemistä ja hylyn käyttökohteesta. Tarpeen mukaan hylkyä voidaan myös kuiduttaa, suodattaa tai puhdistaa [11].

2.1.3 Lyhyt kierto

Lyhyt kierto on paperikoneen konesäiliön ja perälaatikon välinen prosessi, jossa massasta valmistetaan tasalaatuista syötettäväksi perälaatikolta viiraosalle. Perälaatikosta viiralle muodostetusta massarainasta poistettua vettä kierrätetään edelleen massan laimennukseen. Lyhyen kierron tärkeimmät tehtävät ovat

- massan laimennus perälaatikkosakeuteen,
- epäpuhtauksien ja ilmanpoisto,
- lisä- ja täyteaineiden hallinta ja
- tasalaatuisen massan syöttö perälaatikolle.

Lyhyessä kierrossa massaa puhdistetaan pyörrepuhdistuksen ja konesihdin avulla. Kuvassa 5 on esitetty lyhyen kierron prosessiin liittyvät virtaukset.

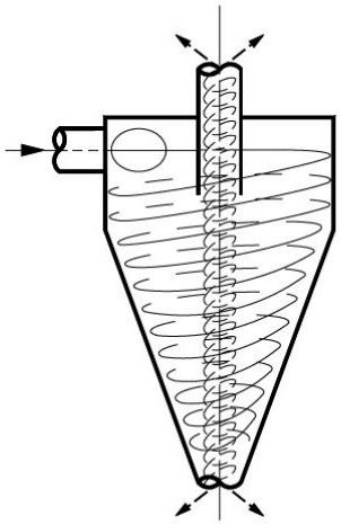


Kuva 5. Lyhyen kierrot virtaukset. [7]

Pyörrepuhdistus on lyhyen kierron osa, jossa laimennetusta massasta erotetaan epäpuhtaudet. Epäpuhtauksia voivat olla esimerkiksi hiekka, tikut ja muut massaa tiheämmät partikkelit. Pyörrepuhdistuksen periaate on esitetty kuvassa 6. Laimennettu

massa pumpataan pyörrepuhdistimen eli syklonin yläosasta tangentin suunnassa ja massa lähtee kiertämään suppilon reunaa muodostaen pyörteen.

Virtausnopeus kasvaa syklonin kaventuessa moninkertaiseksi verrattuna syöttönopeuteen. Pohjalla kuitua tiheämmät epäpuhtaudet erottuvat ja ne huuhdellaan rejektinä pois massan joukosta. Sykloniin jäävä puhdas massa muodostaa sisemmän pyörteen, joka poistuu akseptina syklonin yläosasta.



Kuva 6. Virtaus pyörrepuhdistimessa. ***[7]***

Pyörrepuhdistukseen vaikuttavia parametreja ovat syötettävän massan virtaus ja paine, syöttösakeus, rejektointiaika ja rejektin vastapaine. Paperikoneen pyörrepuhdistus koostuu yleensä noin neljästä vaiheesta, jolloin puhdistusteho paranee. Vaiheet on kytketty sarjaan siten, että ensimmäisen vaiheen rejekti syötetään toisen vaiheen syöttöön, toisen vaiheen rejekti syötetään kolmannen vaiheen syöttöön ja niin edelleen. Vasta viimeisen vaiheen rejekti huuhdellaan jätevesiin. Ensimmäisen vaiheen aksepti johdetaan viirakaivoon, josta se syötetään perälaatikolle. Tällä pyritään varmistamaan tuotannon tasalaatuisuus. Pyörrepuhdistuksen sakeus- ja paineheitot näkyvät perälaatikon massavirran häiriöinä ja sitä kautta paperin laadun vaihteluna. Pahimmillaan häiriöt voivat aiheuttaa ratakatkon [12].

Pitkä kierto tarkoittaa koko paperikoneen vesisysteemiä. Paperikoneen kiertovesitorniin pumpataan viiraosalta poistettu vesi, jota ei voida hyödyntää lyhyessä kierrossa. Pitkän kierron vettä käytetään massankäsittelyssä esimerkiksi massojen hajotukseen ja hylkymassatornien massan laimennukseen. Lisäksi kiertovesitorni toimii puskurina paperikoneen katkon varalta. Ratakatkossa paperia ajetaan pulppereihin, joissa paperimassaa laimennetaan kiertovedellä. Laimennettu massa pumpataan sakeuttimelle, joka erottelee massan hylkysysteemiin ja veden kiertovesitorniin. [7]

2.2 Kiertoveden puhdistaminen ja uudelleenkäyttö

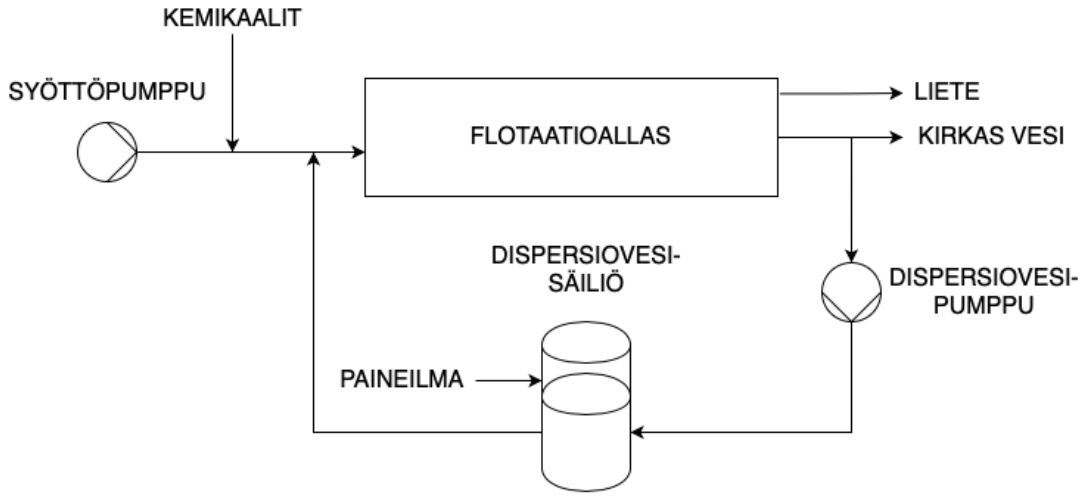
2.2.1 Flotaatio

Flotaatiota käytetään teollisuudessa jäteveden puhdistukseen. Paperitehtaalla flotaation avulla voidaan puhdistaa kiertovettä. Flotaatiolla tarkoitetaan vaahdotukseen perustuvaa kiintoaineen tai öljyn erottamista nesteestä. Wangin [13] mukaan flotaation neljä perusvaihetta ovat

- kuplan muodostus,
- kuplan saattaminen puhdistettavaan nesteeseen,
- kiintoaineen tarttuminen kuplaan ja
- kuplan ja kiintoaineen nousu nesteen pinnalle.

Flotaatiossa neste syötetään avoimeen altaaseen. Nesteen joukkoon johdetaan kuplia, jotka saavat aikaan flotaation. Kuplat nostavat kiintoaineen altaan pinnalle, josta se kaavitaan pois.

Tässä työssä tarkastellaan DAF-flotaatiota. DAF (dissolved air flotation) tarkoittaa flotaatiota, jossa paineistettua veden ja ilman sekoitusta eli dispersiovettä syötetään kiertoveteen. Dispersiovedessä olevat pienet kuplat tarttuvat kiertovedessä oleviin kuituihin muodostaen kuitukimppuja eli flokkeja. Ilmakuplien avulla flokit nousevat altaan pintaan muodostaen kuitupatjan, joka kaavitaan veden pinnasta ja hyödynnetään paperikoneen hylkysysteemissä. Puhdistettu vesi kierrätetään edelleen prosessin käyttöön.



Kuva 7. Flotaation toimintaperiaate. [13]

Kuvassa 7 on esitetty flotaation toimintaperiaate, joka voidaan selittää Stoken lain avulla seuraavasti.

$$V_t = \frac{g * D^2 * (\rho_a - \rho_o)}{18 * \mu}, \tag{1}$$

missä V_t flokkien nousunopeus nesteessä, cm/s

g gravitaatiovakio, 980 cm/s^2

D kasautuneiden partikkelien halkaisija, cm

ρ_a kasautuneiden partikkelien tiheys, g/cm^3

ρ_o ympäröivän nesteen tiheys, g/cm^3

μ ympäröivän nesteen viskositeetti.

Tärkeimmät flotaatioon vaikuttavat tekijät ovat dispersioveden määrä ja laatu, dispersiovedessä olevien kuplien koko, flotaattorin muoto ja siellä virtaavan nesteen laminaarisuus, eroteltavan kiintoaineen määrä ja laatu, lämpötila, pH ja kemikaalit. Kaasun liukenevuus nesteeseen lasketaan kaavalla

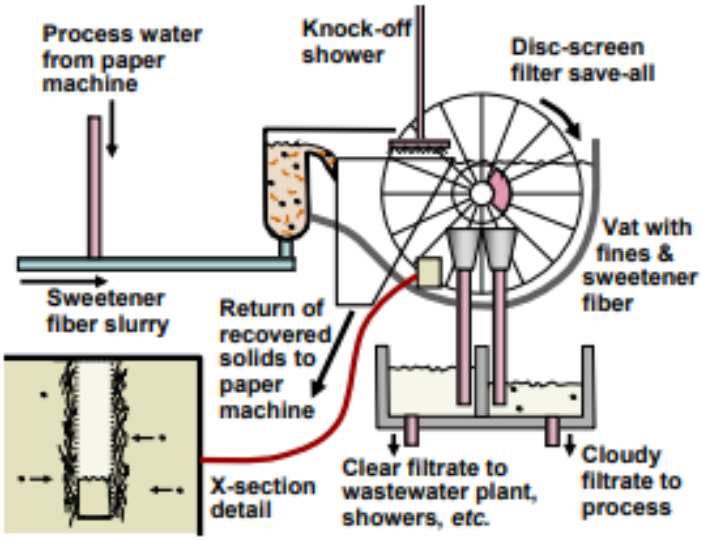
$$p = k * C \tag{2}$$

missä p on kaasun paine, C on liuenneen kaasun konsentraatio ja k on Henryn lain vakio. Ilman liukeneminen kiertoveteen on suoraan verrannollinen kiertoveden lämpötilaan. Mitä matalampi lämpötila, sen paremmin veteen liukenee ilmaa. Haapalan et al. [14] mukaan kiertoveden puhdistamisen tiedetään parantavan paperikoneen ajettavuutta ja laatua.

2.2.2 Kiekkosuodatus

Kiekkosuodatin on laite, jossa on useita suodatinkiekkoja peräkkäin. Kuitupitoinen vesi pumpataan kiekkosuotimen läpi. Kiekkojen määrä ja suodatinkiekkojen verkon tiheys vaihtelevat riippuen syötettävän veden sakeudesta sekä puhdistetun veden laadun tavoitearvoista. Kiekkoja voi olla jopa 30 peräkkäin.

Kiekkosuodattimelle pumpattavaan kiertoveteen sekoitetaan apumassaa, jolla pyritään vakioimaan suotimelle syötettävän kiertoveden kiintoainemäärä. Apumassan avulla myös vedessä olevat täyteaineet sitoutuvat massaan paremmin ja ne pystytään suodattamaan vedestä [15]. Suodattimeen jäävä massakakku suihkutetaan vesisuihkun avulla irti suodatinkiekoista kuidun keräilylinjaan. Kiekkosuodattimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Kiekkosuodattimen toimintaperiaate. [15]

Kiekkosuodattimesta erotetaan massajakeen lisäksi vesijakeita, jotka jaotellaan niiden kiintoainepitoisuuden mukaan. Kirkkainta vesijaetta käytetään paperikoneen vesisuihkuissa. Kuitupitoinen vesijae hyödynnetään massanhajotuksessa ja massanlaimennuksessa. Prosessissa tapahtuvat muutokset aiheuttavat häiriöitä kiekkosuodattimella ja häiriöt näkyvät paperin laadussa. Pahimmillaan häiriöt aiheuttavat ratakatkoja.

Merkittävin häiriöiden aiheuttaja on tulevan veden ja apumassan sakeuden vaihtelu. Suodosmassan sakeuden vaihdellessa konemassan sakeussäätö vaikeutuu ja aiheuttaa laadun vaihteluita. Viira- ja puristinosan vesisuihkut käyttävät kirkasta vesijaetta, joten vesijakeeseen jäävä kiintoaine tai ylimääräiset partikkelit voivat tehdä paperiin reikiä ja aiheuttaa ratakatkoja.

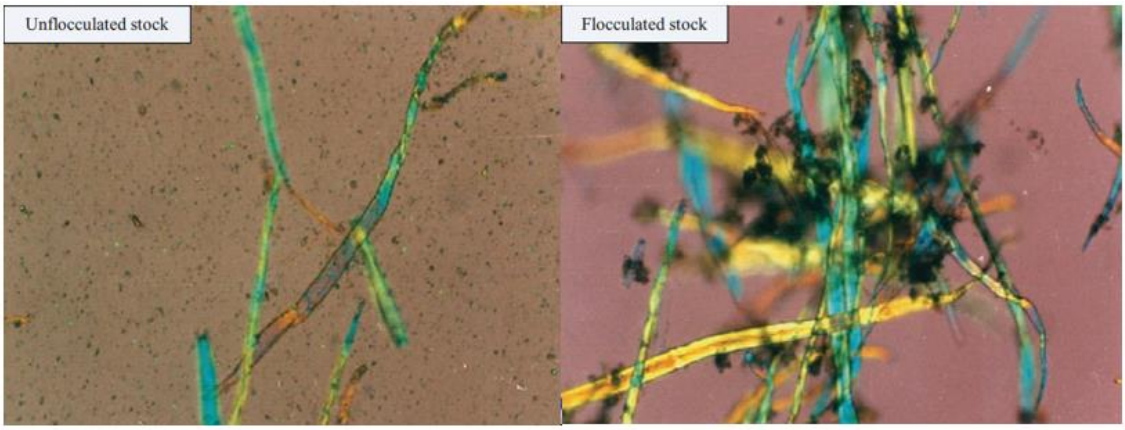
2.3 Rainanmuodostus ja vedenpoisto

Retentiolla on merkittävä vaikutus paperikoneen lyhyen kierron toimintaan [16]. Tuotantonopeuden kasvu asettaa haasteita retentiolle ja vedenpoistolle paperikoneilla. Vesikierron sulkemisesta seuraava lämpötilan nousu heikentää retentioaineiden kykyä sitoa kuituja ja lisäaineita toisiinsa. Sulkeminen aiheuttaa paitsi kiertovesien lämpiämistä, myös lisä- ja täyteaineiden konsentraation kasvua. Lisäaineiden konsentraation kasvu puolestaan vaatii, että retentioaineet sitovat entistä enemmän lisäaineita. Retentiota, vedenpoistoa ja rainanmuodostumista kutsutaan lyhenteellä RDF (retention, drainage and formation). Tehokkaalla RDF:n hallinnalla voidaan parantaa tuotantotehokkuutta ja laatua [17].

Paperikoneella puhutaan kokonaisretentiosta ja viiraretentiosta. Thornin ja Aun [17] mukaan kokonaisretentio voidaan määritellä valmiin tuotteen kuiva-aineen painon suhteena konesäiliöltä syötetyn massan kuiva-aineen painoon. Kokonaisretentio on siis prosessissa tapahtuva kuiva-ainehävikki pitkään kiertoon. Viiraretentiolla puolestaan tarkoitetaan valmiin tuotteen kuiva-aineen painon ja perälaatikolta syötetyn massan kuiva-aineen painon suhdetta. Viiraretentio on siis viiralta viiraveteen tapahtuva kuiva-ainehävikki. Viiraretentio voidaan jakaa kuitu-, lisäaine- ja täyteaineretentioon. Mitä suurempi retentio, sitä paremmin massa ja lisäaineet sitoutuvat perälaatikosta muodostuvaan paperirataan.

Paperimassan kuidut ovat pidempiä suhteessa viiran kudoksessa oleviin reikiin. Kuidut jäävät viiralle, koska ne eivät mahdu virtaamaan viiran läpi. Normaalisti kuituretentio on yli 90 %. Lisä- ja täyteaineiden luonnollinen retentio puolestaan on hyvin lähellä nollaa, sillä ne ovat partikkelikooltaan pieniä ja virtaavat viiran läpi helposti. Retentiota voidaan parantaa retentioaineilla, joilla voidaan parantaa flokkautumista (kuva 9). Varaustilaa muuttamalla pyritään sitouttamaan kuidut toisiinsa ja lisäaineet kuituihin. [16, 17]

Kuvassa 9 on esitetty retentioaineen vaikutus lisä- ja täyteaineiden käyttäytymiseen. Kuvassa vasemmalla pienet partikkelit leijailevat vedessä erillään kuiduista, kun taas oikealla pienet partikkelit ja kuidut ovat sitoutuneet toisiinsa. Toisiinsa sitoutumalla flokkien koko kasvaa, jolloin niiden suodattuminen viiran läpi vähenee.



Kuva 9. Retentioaineiden vaikutus kuitujen ja lisäaineiden flokkautumiseen. [17]

Paperikoneen retentio vaikuttaa merkittävästi viiraosan ja lyhyen kierron toimintaan. Mitä vähemmän viiran läpi virtaavassa vedessä on kuituja, sitä vähemmän lyhyen kierron puhdistuskapasiteettia tarvitaan. Retention nopea vaihtelu näkyy paperin neliöpainon vaihteluna [17].

Onnistuneella retention ja vedenpoiston hallinnalla voidaan luoda merkittäviä tuotannollisia hyötyjä ja säästöjä prosessissa. RDF:n hallinnan tärkeimmät hyödyt ovat

- korkea retentio
- tehokas vedenpoisto
- paperirainan tasainen formaatio
- korkea tuotantonopeus
- korkea tuotantotehokkuus
- lisäaineiden korkea hyötysuhde
- vakaa toiminta kaikilla lajeilla. [17]

Biermann [9] esittää kaksi tapaa laskea retentiota. Viiraretentio voidaan laskea kuiva-aineen painojen suhteena seuraavasti:

$$R_T = \frac{Q_{pr}}{Q_{hb}} * 100\ \% = \frac{Q_{rl}}{Q_{hb}} * \frac{l_{sl}}{l_{pr}} * 100\ \% \tag{1}$$

missä R_T todellinen retentio, %

Q_{pr} valmiin tuotteen kuiva-aineen virtaus, kg/s

Q_{hb} kuiva-aineen virtaus perälaatikosta viiralle, kg/s

Q_{rl} tuotantonopeus rullaimella ennen reunaleikkausta, kg/s

l_{sl} perälaatikon huulen leveys, mm

l_{pr} trimmileveys puristinosalla, mm.

Viiraretentio voidaan laskea myös sakeuksien suhteiden avulla. Se voidaan jakaa kuitu- ja tuhkaretentioon. Näiden partikkelikoot eroavat toisistaan ja pienikokoiset partikkelit virtaavat helpommin viiran läpi. Kuitujen FPR on 95–98 % riippuen kuidun rakenteesta ja laadusta. Lisäaineretentio on usein heikompi, joten sitä pyritään parantamaan erilaisten retentioaineiden avulla. FPR lasketaan syötetyn massan sakeuden ja viiraosalta talteen otetun kiertoveden kiintoaineen suhteen avulla seuraavasti

$$R_{FP} = \frac{C_{HB} - C_{ww}}{C_{HB}} * 100\% \tag{2}$$

missä R_{FP} retentio, %

C_{HB} perälaatikon massan kiintoainepitoisuus, g/l

C_{ww} kiertoveden kiintoainepitoisuus, g/l.

2.4 Prosessin häiriölähteet

Paperinvalmistus on laaja ja monivaiheinen ja siksi hyvin häiriöaltis prosessi. Pienetkin muutokset prosessissa voivat näkyä valmiin tuotteen laadun vaihteluna. Häiriöitä voi aiheutua sekä normaalissa ajossa että lajinvaihdossa. Katkotilanteet ovat kiertoveden ja massavirtausten kannalta merkittävimpiä häiriöitä [18]. Kuusisto [8] nostaa esiin kaksi tärkeää prosessin häiriölähdettä: massan koostumuksen vaihtelun ja mekaanisen ja kemiallisen massan suhteen muutoksen. Massan koostumukseen hallintaan vaikuttaa hylyn annostelu. Tuoremassan sekaan annostellaan hylkyä tavallisesti 5–20 prosenttia riippuen koneen hylkyjärjestelmän tilasta [18].

Jos katkoja esiintyy usein, koneen hylkyvarastot täyttyvät. Hylkyä annostelua voidaan lisätä, jos hylkyä on paljon. Annosteltavan hylyn koostumuksen vaihtelu voi vaikuttaa massasuhteisiin sekä lisäainepitoisuuksiin [8]. Häiriöiden ehkäisemiseksi hylyn koostumus tulee huomioida massanvalmistuksessa. Hylkymassa koostuu usein monista eri lajeista, joten sen tarkkaa koostumusta ja lisäainepitoisuutta on vaikea määrittää. Korkean tuhkapitoisuuden hylky voi moninkertaistaa konemassan tuhkan määrää ja heikentää ajettavuutta sekä valmiin tuotteen laatua ja ominaisuuksia. Hylyn annostelussa merkittävin riski on lyhyen kierron kemian tilan vaihtelu. Hylkymassaksi hajotettava paperi voi olla päällystettyä ja päällysteessä olevat kemikaalit voivat sekoittaa lyhyen kierron kemiaa heikentäen retentiota. Hylyn koostumuksen aiheuttamat häiriöt huomataan usein massan varaustilan muutoksena [17]. Retention häiriöt aiheuttavat vaihtelua valmiin tuotteen neliöpainossa [19].

Mekaanisen ja kemiallisen massan suhteen muutos tapahtuu yleensä lajinvaihdossa [8]. Muutos voi vaikuttaa retentioon ja paperin kuivumiseen. Lisäksi retentioaineilla ja niiden annostelulla on merkittävä vaikutus paperikoneen toimintaan. Vaikka retentioaineiden virtaus pysyisi vakiona, voi retentioaineen laimennusveden määrän vaihtelu vaikuttaa retention hallintaan aiheuttaen häiriöitä lyhyen kierron prosessissa. Retention heiketessä viirakaivon tuhkasakeus kasvaa. Retention heikkenemisen vaikutukset ovat merkittävimpiä koneilla, joiden tuotteilla on korkea tuhkapitoisuus.

Paperin täyteaineella eli tuhkalla voidaan alentaa paperin valmistuskustannuksia. Yksi yleisimmistä täyteaineista on kalsiumkarbonaatti ($CaCo_3$) [17]. Korkea tuhkapitoisuus voi heikentää paperin lujuusominaisuuksia, mikä näkyy katkojen määrän nousuna. Thornin [17] mukaan korkea tuhkapitoisuus vaikuttaa merkittävästi retentioon, vedenpoistoon ja tuotantonopeuteen. Sopivalla tuhkapitoisuudella säästetään kuitenkin raaka-ainekustannuksissa ja testaamalla voidaan määrittää pitoisuus ajettavuuden ja raaka-ainekustannusten kannalta sopivaksi. Retention ja tuhkapitoisuuden äkilliset vaihtelut

vaikeuttavat lyhyen kierron hallintaa. Lyhyen kierron vakaa toiminta takaa tasalaatuisen paperin tuotannon.

3. PAPERIKONEEN PROSESSIN MALLINNUS

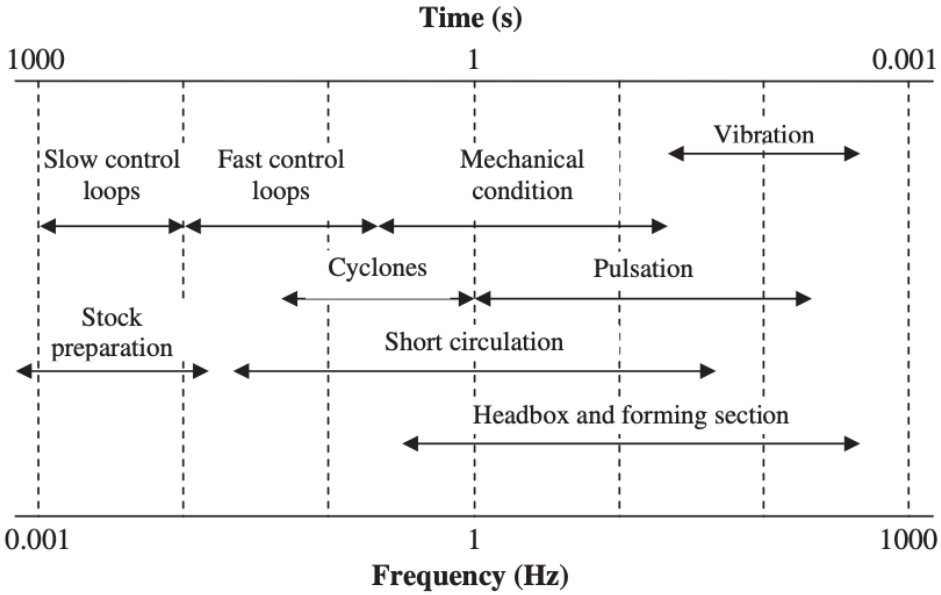
Blanco et al. [20] mukaan simuloinnilla tarkoitetaan jonkin asian jäljittelemistä matemaattisen mallin avulla. Tehdasympäristössä simulointi on hyvä vaihtoehto laajoille ja kalliille kokeille todellisessa tuotannossa. Paperiteollisuudessa ryhdyttiin ensimmäisenä mallintamaan ja simuloimaan sellun tuotantoprosessia. Myöhemmin mallintamista on hyödynnetty erityisesti lyhyen kierron tarkastelussa.

Simulointi on työkalu, jonka avulla voidaan tarkastella ja kehittää prosessia ilman käytännön kokeita [20]. Paperikoneen tuotantonopeus, paperin neliöpainot ja massan koostumus vaihtelevat paljon. Erityisesti pienempien koneiden tuoteportfolio on laaja ja joustava. Simulointi auttaa ymmärtämään koneen eri prosesseja ja niiden häiriöitä sekä säätöpiirien vaikutuksia. Simulointi tuottaa monesti sellaista dataa, jota ei voida mitata [20]. Simuloimalla voidaan kehittää paperikoneen toimintaa. Lajinvaihtojen nopeuttaminen, laadun parantaminen, prosessin kemian ymmärtäminen ja hallinta sekä ajettavuuden parantaminen ovat asioita, joita onnistuneella simuloinnilla voidaan saavuttaa [19].

Yap et al. [2] mukaan hyvällä simulointimallilla voidaan löytää prosessin puutteet, tuotannon pullonkaulat ja säätöpiirien ongelmakohdat. Linnala et al. [19] tutkivat dynaamisen simuloinnin todellisia säästöjä paperitehtaassa. Tutkimuksessa mallinnettiin prosessin päätoiminnot ja niiden avulla parannettiin prosessia. Massan ja lisäaineiden virtausten PI-säätöä muutettiin simulointimallin avulla ja huomattiin, että retention muutoksen aiheuttamat häiriöt tuotteen laadussa vähenivät. Samoja parametreja säätämällä pyrittiin vähentämään laadun vaihteluja lajinvaihdossa. Tulokset osoittivat, että simulointimallin avulla tehdyllä säädöllä oli suuri merkitys prosessin kehittämisessä.

3.1 Prosessin mallinnus

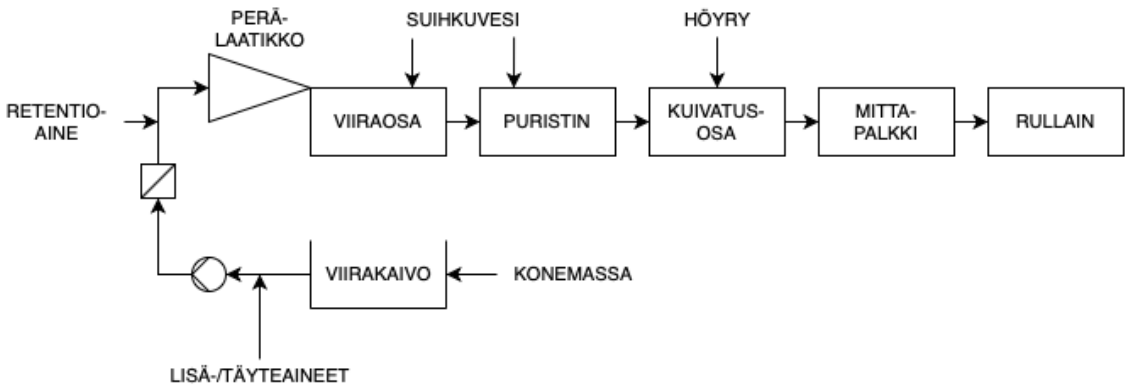
Paperinvalmistusprosessi on häiriöaltis siinä tapahtuville pienillekin muutoksille. Ne näkyvät valmiin paperin laadun vaihteluna. Prosessissa on säätöpiirejä, joilla pyritään vakioimaan virtauksia ja estämään häiriöitä. Cutshallin [21] mukaan tärkeimpiä häiriöiden aiheuttajia ovat raaka-aineiden laadun vaihtelu ja monivaiheinen valmistusprosessi. Näiden lisäksi on tärkeä ymmärtää häiriön laajuutta, suuntaa ja esiintyvyyttä. Kuvassa 10 on esitetty paperinvalmistusprosessin tyypillisiä taajuuksia.



Kuva 10. Prosessille ominaisia taajuuksia. [21]

Simuloinnin kannalta merkittäviä taajuuksia ovat prosessin ohjaukseen käytetyt taajuudet. Prosessissa on nopeita ja hitaita säätöpiirejä, joiden taajuudet ovat tyypillisesti 0,001–1000 Hz. Korkeataajuiset muutokset, kuten putkien värähtely jäävät helposti tarkastelun ulkopuolelle. Toisessa ääripäässä ovat hitaat ilmiöt, kuten massan valmistus. Dynaaminen simulointimalli voidaan rakentaa käyttämällä staattisia osakokonaisuksia nopeataajuisten ilmiöiden osalta. Tällaisilla ei ole vaikutusta systeemin dynamiikkaan.

Mallinnus- ja simulointiprojekteissa datan saatavuus on tärkeässä osassa tulosten varmistamiseksi. Tehtaiden automaatiojärjestelmät ovat kehittyneitä ja dataa on saatavilla paljon, mikä helpottaa simulointia. Lindell ja Stenström [22] mallinsivat paperikoneen kuivatusosaa staattisten lohkomallien avulla. Kuivatusosa jaettiin toimintojen mukaan lohkoihin ja niihin vaikuttavien virtausten avulla tutkittiin kuivatusosan energiatasetta. Tässä tutkimuksessa lasketaan PK1:n massatase vastaavan lohkomallin avulla.



Kuva 11. Kuivatusosan jälkeinen mittaa paperin ominaisuuksia kuivatusosan jälkeen.

Hauge ja Lie [23] tutkivat paperikoneen prosessia yksinkertaistetun hybridimallin avulla. Mallin kolme tärkeintä muuttujaa olivat neliöpaino, tuhkasakeus ja viiraveden sakeus. Mallin avulla tutkittiin prosessinhäiriöitä ja dynamiikkaa.

3.2 Prosessidynamiikka

Prosessin automaattiset säätöpiirit muuttavat virtauksia. Käytännössä virtausta voidaan säätää venttiili- tai pumppusäädöllä. Säätöpiirien tavoitteena on pitää prosessin osat tietyssä tilassa tuotannon tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Prosessi säätää itseään online-mittausten perusteella. Prosessissa mitataan säiliöiden pintaa, putkistojen painetta, virtauksia ja massojen sakeutta. Paperinvalmistuksessa laadun ja ajettavuuden kannalta tärkeimpiä muuttujia ovat neliöpaino, tuhka ja kosteus. Normaalissa ajotilanteessa sakeuksien pysyessä vakiona myös säiliöiden väliset virtaukset ja säiliön pinnat pysyvät vakioina. Vakiotilanteessa voidaan ajatella prosessia staattisena tilana, jolloin prosessi on muuttumaton. Staattista mallia voidaan hyödyntää virtauslaskennassa. Tässä työssä paperikoneen massatase lasketaan staattisena tilana luvussa 4.

Orccotoma et al. [18] mukaan kiertoveden dynamiikan merkittävin häiriölähde on ratakatkot. Katkot ovat yleisiä eikä niiden esiintymistä voida ennustaa. Ratakatko aiheutuu, kun paperiin kohdistuva jännitys ylittää paperin suurimman mahdollisen vetolujuuden. Käytännössä katkoja aiheuttavia tekijöitä koneen märässä päässä ovat massan laadun vaihtelu sekä epäpuhtauksien ja vesipisaroiden aiheuttamat reiät.

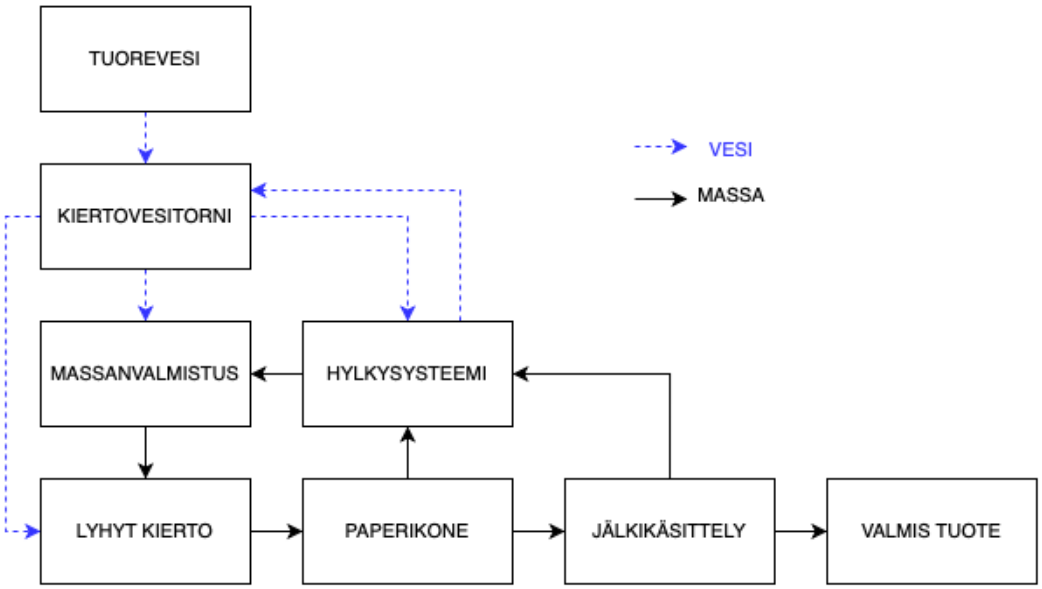
Normaalissa ajotilanteessa kiertovettä käytetään massojen laimennukseen ja pulpperiin ajettavan reunanauhan hajotukseen, joten kiertoveden kulutus pysyy vakiona. Katkotilanteessa rata ajetaan pulpperiin, johon pumpataan kiertovettä massan laimentamiseksi. Massa pumpataan pulpperista koneen hylkysysteemiin. Katkon seurauksena hylkysysteemiin virtaa normaalitilannetta enemmän massaa ja kiertovettä

puolestaan kuluu enemmän. Katkon seurauksena säiliöiden pinnat muuttuvat. Jos katko kestää kauan tai ne toistuvat usein, kiertovesivarasto tyhjenee ja kiertoveden kiintoainepitoisuus kasvaa [18].

Katkot aiheuttavat myös sakeusvaihteluja. Massasta kiertovesitorniin eroteltava vesijae on hyvin kuitu- ja lisäainepitoista. Kiertovedellä laimennetaan massasäiliöitä, joten sen sakeus vaikuttaa tarvittavan laimennusveden määrään. Kaikissa järjestelmissä säätöpiirit eivät ennakoi kiertoveden sakeutta tai lisäainepitoisuutta, joten se voi aiheuttaa laadun vaihteluja ja retentiohäiriöitä, jos lisäainepitoisuus kasvaa liian suureksi. Säätöpiirit perustuvat kuivatusosan jälkeiseen mittapalkin (kuva 11) mittaamaan tietoon paperin ominaisuuksista. Säätötavalla ei pystytä reagoimaan nopeasti märän pään muutoksiin. Lyhyen kierron reaaliaikaisen säädön mahdollistamiseksi on mitattava lyhyen kierron sakeuksia. Sakeuden online-mittauksiin perustuvien säätöjen tavoitteena on parantaa laadunhallintaa ja varmistaa prosessin toimivuus kaikilla lajeilla [24]. Lyhyen kierron hallinnan parantamisella voidaan myös nopeuttaa lajinvaihtoja [8].

4. PK1 VESI- JA MASSATASE

Kuvassa 12 on esitetty PK1:n virtauskaavio, jossa sinisillä katkoviivoilla kuvataan vesivirtauksia ja mustilla viivoilla massavirtauksia.



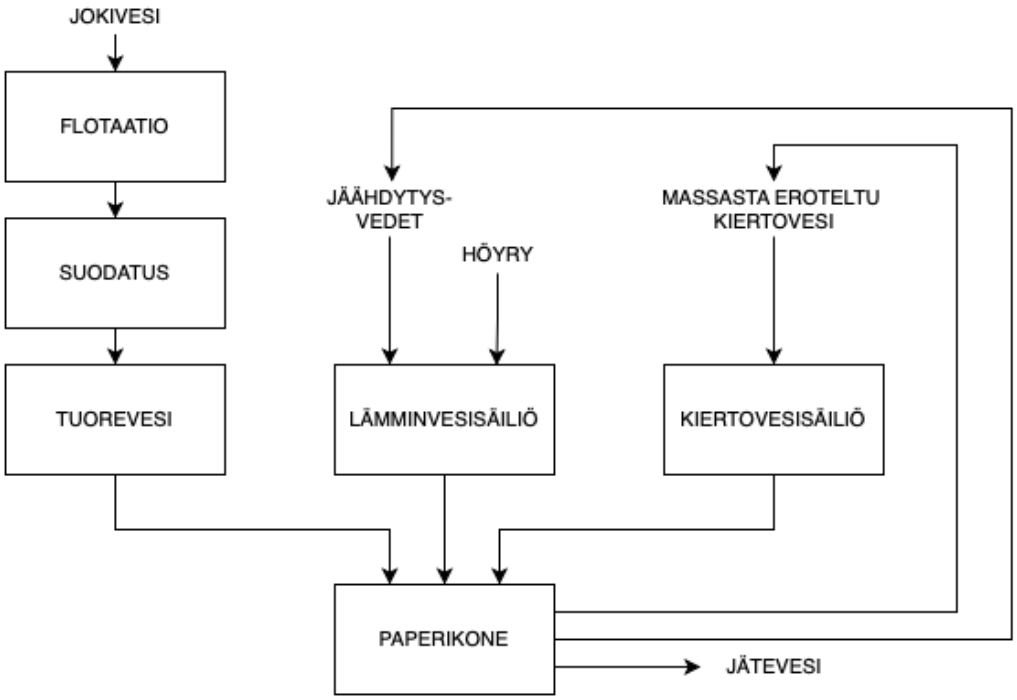
Kuva 12. PK1 prosessin virtauskaavio.

PK1:n massa valmistellaan tehtaan massaosastolla, jossa valmistetaan myös PK2:n massa. Molemmilla koneilla on omat kiertovesivarastot ja pääsääntöisesti massa hajotetaan koneen omaan kiertoveteen käyttökohteensa mukaan. Poikkeuksena ovat PK1:n märkälujat lajit, joiden mukana tulevat kemikaalit eivät saa joutua PK2:n kiertoveteen.

Tiedetään, että PK1:n vesitase on reilusti ylijäämäinen, koska kerättyä kiertovettä ei voida täysin hyödyntää. Kiertovesi puhdistetaan flotaattorilla, josta massajae johdetaan hylkysysteemiin ja puhdistettu vesijae käytetään suihkuvetenä. Flotaattori on kuvassa 12 osana paperikoneen lohkoa. Flotaattorin kapasiteetti ei riitä puhdistamaan kaikkea kiertovettä, joten osa kiertovedestä käytetään puhdistamattomana massanlaimennukseen. PK2:n vesitase on puolestaan reilusti alijäämäinen, koska sen kiertovettä hyödynnetään runsaasti PK1:n massanhajotuksessa. PK2:n kiertovesijärjestelmää joudutaan tankkaamaan raakavedellä, kun taas PK1:n kiertovettä ajetaan jätevesiin.

4.1 PK1 vesikierto

Paperikoneella käytettävät vesijakeet ovat lämminvesi, tuorevesi ja kiertovesi ja jokaisella on oma käyttötarkoituksensa. Veden käyttökohteen kannalta tärkeimmät ominaisuudet ovat kiintoainepitoisuus ja lämpötila. Kuvassa 13 on esitetty PK1:n vesijakeiden kiertokulku. Kiertovesi on kuitu- ja lisäainepitoista prosessista eroteltua vettä ja sitä käytetään massan laimennukseen säiliöissä ja pulppereissa. Tuorevesi on tehtaan vesilaitoksella puhdistettua vettä, jota käytetään tiiviste- ja jäähdytysvetenä sekä monissa toiminnoissa varmistuksena, jos veden saanti ensisijaisesta lähteestä heikkenee.



Kuva 13. PK1:n vesikierto.

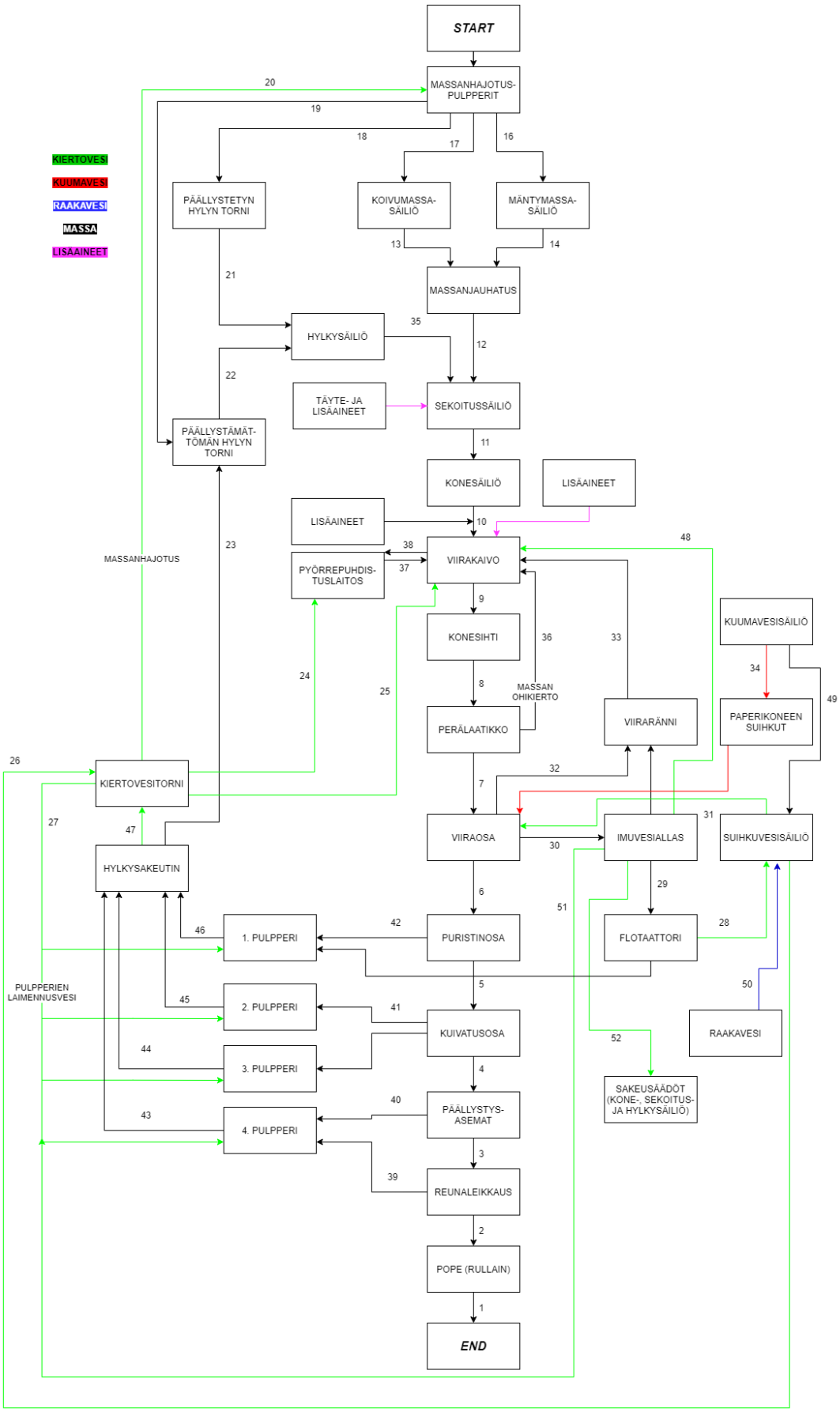
Lämminvesi on jäähdytyskierroista talteen otettua tuorevettä. Lämminvesisäiliön vesi lämmitetään höyryllä 90 asteiseksi. Hyödyntämällä prosessissa lämmennyt jäähdytysvesi säästetään lämmitysenergiaa. Tuorevesi ja lämmin vesi ovat tehtaan puhtaimpia vesijakeita.

Lämmintä vettä käytetään paperikoneen suihkuissa. Paperikoneen suihkuilla veden laatuvaatimukset ovat tarkimmat, sillä suihkuvedessä olevat epäpuhtauden voivat aiheuttaa massarainaan reikiä, jotka aiheuttavat katkoja. Vesisäiliöiden laatua tarkkaillaan online-sameusmittareilla ja laboratoriomittauksilla.

4.2 Simulointimallin rajaus ja virtausverkon mallinnus

Työn tavoitteena on selvittää paperikoneen vesikierron merkittävimmät häiriöt ja niiden aiheuttajat sekä selvittää keinoja vesikierron kehittämiseen. Vesikierron ymmärtämiseksi tarkastellaan prosessin massatasetta. Viira- ja puristinosalla massasta suurin osa on vettä, joten sen laadulla on merkittävä vaikutus tuotannossa. Kaikkein laimeinta massa on perälaatikolla, jossa sakeus on vain puoli prosenttia. Ennen kuivatusosaa rainasta erotettu vesi kierrätetään prosessiin uudelleenkäytettäväksi. Kuivatusosalla loppu vesi haihdutetaan ja puhalletaan ulos tehtaasta. Rullaimella paperin loppukosteus vaihtelee kahden ja viiden prosentin välillä riippuen paperin neliöpainosta. Paksumpien laatujen kuivattaminen vaatii enemmän tehoa ja valmiin tuotteen kosteus on korkeampi verrattuna ohuisiin lajeihin.

Työssä virtausverkko on rajattu massanvalmistuksesta valmiin paperin rullaukseen. Paperinvalmistusprosessi perustuu paljon massan ja veden kierrätykseen ja uusiokäyttöön, mitkä aiheuttavat haasteita mallintamisessa ja virtauksien laskemisessa. Työn kannalta tärkeimmät virtaukset ovat koneen lyhyessä kierrossa ja hylyn käsittelyssä. Kuvassa 14 on esitetty PK1:n massan virtauskaavio sekä prosessiin liittyvä vesikierto. Lohkokaavion avulla on havainnollistettu prosessiin tulevan massan virtausta. Jokaisella lohkolla on tietty tehtävä ja lohkossa virtaus jakaantuu yhteen tai useampaan virtaukseen.



Kuva 14. PK1 massavirtauskaavio.

5. MALLIN TESTAAMINEN PAPERIKONEELLA

PK1:llä ajettavien lajien neliöpaino vaihtelee välillä 30–250 g/m^2. Koneen ajonopeus on 400–800 m/min. Pohjapaperiin lisätään esipäällystekerros, jonka määrä vaihtelee muutamasta grammasta kymmeniin grammoihin. Valmiin tuotteen massavirta tiedetään, joten sitä voidaan käyttää aloitusarvona virtausten laskennassa.

Jokaiselle lajille on asetettu taulukon 1 mukaiset lajiparametrit, joiden avulla voidaan laskea lohkojen välisiä virtauksia. Laskennan avulla selvitetään prosessin alkuvaiheen ja erityisesti kiertoveden virtauksia. Tulosten oikeellisuutta verrataan prosessin automaatiojärjestelmän mitattuihin arvoihin. Excel-taulukkolaskentaohjelmaan luodaan laskentamalli, joka laskee kuvan 14 virtaukset. Tuloksen lasketaan viidelle eri lajille, joiden neliöpaino, massasuhteet ja päällystemäärät vaihtelevat.

Laskennassa on hyödynnetty lajille asetettuja tavoiteparametrien lisäksi kirjallisuudessa esiintyviä vakioarvoja. Vakioarvoja on käytetty vain parametreille, joille ei ole asetusarvoa tuotannossa. Vakioarvoja ovat puristimen kosteustavoite ja viiraretentio. Muille arvoille on tuotannossa asetettu lajikohtaiset asetusarvot. Parametrit on listattu taulukkoon, joka on liitteenä A. Työssä käytettyjä parametrien arvoja ei julkaista tässä työssä.

5.1 Kokeellinen osuus

Virtausverkon avulla lasketaan massataseet viidelle PK1:n lajille. Lajien neliöpainot vaihtelevat välillä 60–80 g/m^2. Tarkasteltavilla lajeilla neliöpainon ja ajonopeuden lisäksi myös massasuhteet sekä massan lisäaineet ja niiden määrä vaihtelevat. Neliöpainon ollessa 30–40 g/m^2 tuotantokapasiteetti on noin 4 t/h. Ohuilla lajeilla tuotantokapasiteettia rajoittaa koneen ajonopeus. Paksummilla lajeilla 60–80 g/m^2 tuotantokapasiteetti on noin 8 t/h, joka vastaa koneen maksimikapasiteettia. Näitä paksummilla lajeilla paperin kuivaus rajoittaa tuotantokapasiteettia. Ajonopeuden ja neliöpainon perusteella lasketaan jokaisen lajin massavirta (kg/s), jolloin lajeista saadaan vertailukelpoista toisiinsa nähden.

Tutkimuksessa kerätään dataa lajeista, joiden tuotantonopeudet ovat 6–8 t/h. Lajivalinnat tehdään siten, että tarkastelussa on mahdollisimman moneen eri käyttöön tuotettuja paperilajeja. Valinnan kannalta tärkeä ominaisuus on neliöpaino, koska halutaan tutkia kiertoveden käsittelyn kapasiteettia ja lyhyen kierron virtausten tiedetään nousevan suuremmilla neliöpainoilla. Myös massasuhteiden ja hylkyprosentin

vaihteluilla on tärkeä merkitys valinnassa, koska ne vaikuttavat lyhyen kierron ja kiertoveden käyttäytymiseen.

Jokaisen lajin kohdalla lasketaan massavirtaus prosessissa taaksepäin valmiin tuotteen massavirrasta lähtien paperikoneen rullaimelta virtausverkon mukaisesti. Mallin avulla saadaan laskettua kiertovesi- ja massavirtaukset massankäsittelyyn ja hylkysysteemiin asti. Laskettuja virtauksia verrataan koneen automaatiojärjestelmän virtausmittauksiin, minkä avulla arvioidaan laskentamallin todenmukaisuutta.

Kuvassa 14 esitetty paperikoneen valmiin tuotteen massavirta $\dot{m}_2$ (virtaus 2) voidaan laskea kaavalla

$$\dot{m}_2 = V_p * W_p * L_1 \tag{3}$$

missä V_p koneen ajonopeus, m/min

W_p tuotteen neliöpaino, g/m^2

L_1 paperiradan leveys rullaimella, m.

Tuotteen massavirtaa rullaimella käytetään lähtöarvona laskennassa. Paperirata leikataan lopulliseen leveyteen ennen rullaamista. Reunanauhan leveys vaihtelee 20–100 mm välillä. Reunanauhan virtaus pulpperiin (kuva 14, virtaus 39) voidaan laskea kaavalla

$$\dot{m}_{39} = V_p * W_p * (L_2 - L_1), \tag{4}$$

missä L_2 paperiradan leveys ennen reunaleikkausta, m.

Lisäämällä reunanauhojen osuus kaavalla 4 laskettuun virtaukseen, saadaan massavirtaus ennen reunaleikkausta (kuva 14, virtaus 3) kaavalla

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{39}. \tag{5}$$

Ennen reunaleikkausta paperiin lisätään päällystekerros kahdella teräpäällystysasemalla. Päällystemäärää mitataan neliöpainona samoin kuin paperin paksuutta, joten massavirta ennen päällystysasemia (kuva 14, virtaus 4) saadaan vähentämällä massavirrasta yhteenlaskettu päällystemäärä seuraavilla kaavoilla:

$$\dot{m}_c = V_p * (W_{c1} + W_{c2}) * L_2 \tag{6}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 - \dot{m}_c \tag{7}$$

missä W_{c1} 1. aseman päällystemäärä, g/m^2

W_{c2} 2. aseman päällystemäärä, g/m^2.

Kuivatusosalla höyryllä lämmitetyt kuivatussylinterit haihduttavat paperiradan tavoitekosteuteen. Paperin kuiva-ainevirtaus pysyy samana puristimelta päällystysasemille. Puristimella massavirtauksesta suurin osa on vettä, joten lisäämällä veden osuus kuiva-ainevirtaukseen saadaan puristimen kokonaismassavirtaus (kuva 14, virtaus 5) seuraavasti

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_4}{1 - M_4} \tag{8}$$

missä M_4 paperiradan kosteus puristimella, %.

Viiraosalla paperirata kavennetaan haluttuun leveyteen korkeapainesuihkujen eli reunapillien avulla. Reunanauhan leveys on 40–60 mm ja se ajetaan 1. pulpperiin. Lisäämällä reunanauhan virtaus 42 puristimen virtaukseen 5 saadaan viiraosan massavirtaus viiraosalta puristimelle kaavalla

$$\dot{m}_{42} = V_{HB} * W_{HB} * (L_3 - L_4) \tag{9}$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 + \dot{m}_{42} \tag{10}$$

missä V_{HB} koneen ajonopeus viiralla, m/min

W_{HB} tuotteen neliöpaino viiraosalla, g/m^2.

Kun viiraosan kuiva-ainevirtaukseen lisätään retention mukainen kuiva-ainehäviö, saadaan perälaatikon kuiva-ainevirtaus viiralle. Kun kuiva-ainevirtaukseen otetaan huomioon massan sakeus, saadaan perälaatikon massavirtaus viiralle (kuva 14, virtaus 7).

$$\dot{m}_7 = \frac{\dot{m}_6}{R_1 * C_1} \tag{11}$$

missä R_1 viiraretentio, %

C_1 perälaatikon sakeus, %.

Perälaatikon virtauksesta vain noin 20 % päätyy puristimelle. Viiraosalla on imulaatikoita, joiden tehtävänä on poistaa vettä viiralta. Viiran alkuosassa sen läpi virtaava vesi johdetaan viiraränniin ja takaisin viirakaivoon massan laimennukseen. Alkuosassa suodattuva massa on kaikkein lähinnä viirakaivon sakeutta, joten sitä hyödynnetään viirakaivon massan laimennukseen. Viiran loppuosalla poistuva vesi johdetaan imuvesialtaaseen, josta se pumpataan jatkokäsiteltäväksi. Massavirran lisäksi viiralla olevat suihkuvedet otetaan huomioon virtauslaskennassa. Suihkuveden määrä pysyy vakiona.

Tehtaan laboratoriossa suoritettujen määritysten mukaan imuvesialtaan veden kiintoainepitoisuus on 300–1000 mg/l ja se riippuu ajossa olevasta lajista ja viiraosan retentiosta. Vesi pumpataan hylky-, kone ja sekoitussäiliön massanlaimennukseen (kuva 14, virtaus 52), viirakaivoon (virtaus 48) ja flotaattorille (virtaus 29) puhdistettavaksi. Laimennusveden massavirta riippuu massasäiliöille tulevan massan sakeudesta. Sakeuksien pysyessä vakiona myös laimennusveden määrä pysyy vakiona. Tehtaalla tehdyt mittaustulokset osoittavat, että normaalissa ajotilanteessa laimennusveden määrä on 400–500 l/min. Viirakaivolle pumpattavan veden tehtävänä on pitää viirakaivon pinta vakiona ja virtausta säädetään säätöventtiilin avulla. Normaalissa ajotilanteessa virtaus viirakaivoon pysyy vakiona. Massavirta imuvesialtaalle (virtaus 30) ja flotaattorille voidaan laskea kaavoilla

$$\dot{m}_{30} = 0{,}25 * \dot{m}_7 * M_4 + \dot{m}_s \tag{12}$$

$$\dot{m}_{29} = 0{,}5 * \dot{m}_{30} \tag{13}$$

missä $\dot{m}_s$ suihkuveden massavirta, kg/s.

Kaavojen 3–13 avulla voidaan laskea työn kannalta merkittävimmät massavirrat. Sekoitussäiliön virtaus konesäiliöön (kuva 14, virtaus 11) ja hylkysäiliön virtaus sekoitussäiliöön (virtaus 35) voidaan laskea seuraavasti:

$$\dot{m}_{11} = \frac{\dot{m}_7 * C_1}{C_2} \tag{14}$$

$$\dot{m}_{35} = \frac{(\dot{m}_7 * C_1) * B_1}{C_3} \tag{15}$$

missä C_2 konesäiliön sakeus, %

C_2 hylkysäiliön sakeus, %

B_1 hylkyprosentti, %.

PK1:n kiertovesitornin ylijuoksun tiedetään aiheuttavan jätevesikustannuksia. Ylijuoksun määrää ei mitata, mutta se voidaan laskea, jos tiedetään sen aiheuttaja. Kiertovesisysteemiin tulee ylimäärin vettä, koska osa PK1 massoista hajotetaan PK2 kiertoveteen. PK1 kiertovesitornista jätevesiin laskeva vesimäärä voidaan laskea seuraavasti

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{47} + \dot{m}_{26} \tag{16}$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} + \dot{m}_{25} + \dot{m}_{27} \tag{17}$$

$$\dot{m}_{jv} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \tag{18}$$

missä $\dot{m}_{in}$ massavirta prosessista kiertovesitorniin, kg/s

$\dot{m}_{47}$ massavirta hylkysakeuttimelta kiertovesitorniin, kg/s

$\dot{m}_{26}$ massavirta suihkuvesisäiliöstä kiertovesitorniin, kg/s

$\dot{m}_{out}$ massavirta kiertovesitornista prosessiin, kg/s

$\dot{m}_{20}$ kiertovesi massanjauhatukseen, kg/s

$\dot{m}_{24}$ kiertovesi pyörrepuhdistukseen, kg/s

$\dot{m}_{25}$ kiertovesi viirakaivoon, kg/s

$\dot{m}_{27}$ pulpperien laimennusvesi, kg/s

$\dot{m}_{jv}$ massavirta kiertovesitornista jätevesiin, kg/s.

Kaavan 16 avulla voidaan arvioida PK1:n prosessista aiheutuvia jätevesikustannuksia. Tarkistuslaskennassa verrataan prosessin alkuvaiheen massavirtoja mitattuihin arvoihin. Laskenta suoritettiin viidelle lajille.

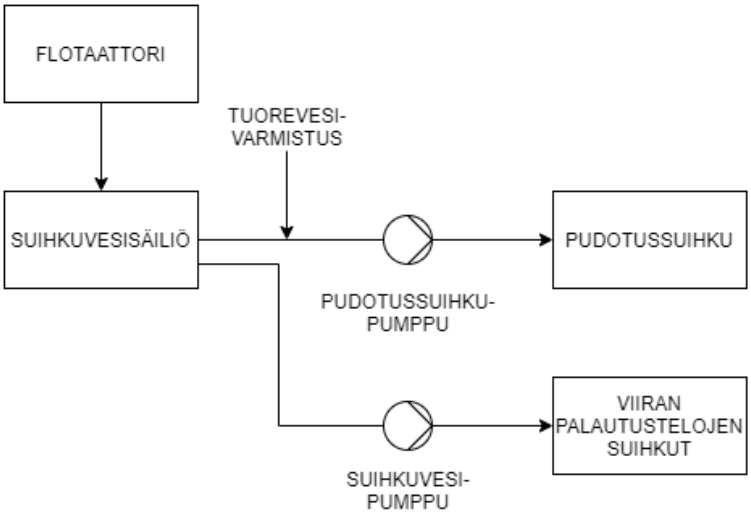
5.2 Dynaaminen tarkastelu

Prosessissa olevien säiliöiden dynamiikalla on merkittävä vaikutus tuotannon tasalaatuisuuteen ja säätöpiirien toimintaan. Työssä tutkitaan kiertovesijärjestelmän häiriöitä, joten dynamiikan kannalta tärkeimpiä säiliöitä ovat imuvesiallas, flotaattori, suihkuvesisäiliö ja kiertovesitorni. Taulukkoon 1 on kerätty säiliöiden dynaamiset parametrit. Säiliön koko ja siihen liittyvät virtaukset vaikuttavat eniten säiliön herkkyyteen esimerkiksi sakeuden muutoksille.

Taulukko 1. Säiliöiden dynamiikka.

Säiliö	Kapasiteetti, m^3	Viipymäaika, min	Tavoitepinta, %	Sakeus, %
Flotaattori	20	15	90	-
Suihkuvesisäiliö	4	7	90	0,01
Imuvesiallas	10	2	80	0,05
Kiertovesitorni	300	-	90	0,05
Viirakaivo	9	4,5	90	0,5
Konesäiliö	30	15	90	3,5–4,5
Sekoitussäiliö	30	15	50	3,5–4,5
Hylkysäiliö	30	40	50	3,5–4,5

Normaaliajossa pudotussuihkua käytetään vain reunanauhan irrottamiseen viirasta. Viiraosalle syötettävä massaraina kavennetaan haluttuun leveyteen reunapillien avulla ja reunanauha suihkutetaan pudotussuihkujen avulla pulpperiin, josta se pumpataan hylkysysteemiin. Puristinosan katkossa suihkuvettä kuluu normaalia ajoa enemmän, koska pudotussuihkupumppu pumppaa vettä koko viiran leveydeltä. Pudotussuihku on viiraosan toiminnan kannalta kriittinen laite ja sen riittävä veden saatavuus on varmistettava. Pudotussuihkuputkelle on oma pumppu, joka ottaa vetensä suihkuvesisäiliöstä. Suihkuvesipumppu käy myös normaalissa ajossa. Suihkuvesisäiliöltä lähtevät suihkuvesivirtauksen on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. PK1 suihkuvesikaavio.

6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Virtaukset normaaliajossa

Luvussa 5 esitetysti voidaan laskea paperikoneen massavirtoja ja niiden perusteella arvioida prosessin virtauksiin liittyviä häiriöitä. Työn kannalta merkittävimmät virtaukset on esitetty taulukoissa 2–6. Virtaukset on laskettu normaalissa ajotilanteessa. Lajeille 3 ja 4 ei ole saatavilla vertailuarvoa. Työssä tutkitaan kiertovesijärjestelmän häiriötekijöitä ja virtaus 30 on sen kannalta merkittävä. Kiertovesitorni saa vetensä massan sakeuttimien vedestä ja suihkuvesisäiliön ylijäämästä.

Lajin 1 laskennalliset virtaukset 7, 11 ja 35 poikkeavat mittausarvosta 0,8–1,5 %. Virtaukset ovat prosessin kannalta tärkeimpiä virtauksia, koska ne määrittävät tuotantokapasiteetin. Ero laskennallisiin arvoihin voi johtua esimerkiksi säätöpiirien aiheuttamista virtausvaihteluista, jotka puolestaan johtuvat säiliöiden sakeusvaihteluista.

Virtauksen 29 laskennallinen ja mitattu arvo eroavat toisistaan 11,3 %. Viiraosan vesi jakautuu viiraränniin, imuvesialtaaseen ja puristimelle massarainan mukana. Kaavan 12 mukaan virtaus viiraränniin ja imuvesialtaaseen jakautuu siten, että imuvesialtaan osuus on 25 % suodattuvasta vedestä. Todellisuudessa osuus voi vaihdella, mikä selittää verrattain suuren virheprosentin. Osuus on laskettu imuvesialtaalle pumpattavasta vedestä suhteessa.

Taulukko 2. Laji 1, 64 g/m²

Virtaus	**Laskennallinen, kg/s** **Normaali ajo**	**Mitattu, kg/s** **Normaali ajo**	**Virhe, %**
7	268,6	272,7	1,5
11	29,8	30,1	0,8
28	18,1	-	-
29	19,2	21,7	11,3
30	38,4	-	-
31	8,3	-	-
35	8,4	9,0	1,5

Lajin 2 neliöpaino on suurempi kuin lajilla 1. Neliöpainon kasvaessa myös vesimäärä nousee. Laskennallisten virtausten virhe suhteessa mitattuihin arvoihin vaihteli välillä 1,5–10,7 %. Korkea virheprosentti voi johtua esimerkiksi retention tai sakeuden vaihtelusta.

Taulukko 3. Laji 2, 80 g/m²

Virtaus	**Laskennallinen, kg/s** **Normaali ajo**	**Mitattu, kg/s** **Normaali ajo**	**Virhe, %**
7	307,2	293,3	1,5
11	34,1	32,8	4,2
28	18,9	-	-
29	20,2	21,7	6,9
30	40,3	-	-
31	8,3	-	-
35	9,6	10,8	10,7

Taulukossa 4 on esitetty lajin 3 laskennalliset virtaukset. Lajeille 3 ja 4 ei ole saatavilla mittaustuloksia, joten laskennallista virhettä ei voida arvioida.

Taulukko 4. Laji 3, 62 g/m²

Virtaus	**Laskennallinen, kg/s** **Normaali ajo**
7	286,2
11	31,8
28	18,5
29	19,7
30	39,3
31	8,3
35	8,9

Taukukossa 5 on esitetty lajin 4 laskennalliset virtaukset. Lajin 3 ja 4 neliöpainot ovat samoja, mutta laskennalliset virtaukset vaihtelevat. Lajien neliöpainossa on huomioitu päällystemäärä, joka voi olla erisuuruinen lajien välillä. Näin massavirtaukset voivat poiketa toisistaan, vaikka valmiin tuotteen neliöpaino olisikin sama. Myös massasuhteet ja hylyn määrä vaikuttavat virtauksiin ja retentioon.

Taulukko 5. Laji 4, 62 g/m2

Virtaus	**Laskennallinen, kg/s** **Normaali ajo**
7	323,4
11	35,9
28	19,2
29	20,6
30	41,2
31	8,3
35	10,1

Taulukossa 6 on esitetty lajin 5 virtaukset. Lajilla 5 virheprosentit ovat suurempia kuin muilla lajeilla, mikä voi selittyä esimerkiksi säiliöiden sakeuksien eroilla. Laskennassa käytettiin tiettyä sakeuden arvoa, mutta todellisuudessa sakeus on voinut vaihdella ja aiheuttaa mittaustuloksen eroa laskennalliseen arvoon.

Taulukko 6. Laji 5, 60 g/m²

Virtaus	Laskennallinen, kg/s Normaali ajo	Mitattu, kg/s Normaali ajo	Virhe, %
7	321,3	293,3	9,5
11	32,1	31,0	3,7
28	17,9	-	-
29	20,5	21,7	5,2
30	37,9	-	-
31	8,3	-	-
35	8,0	9,8	17,6

Tuloksista havaitaan, että perälaatikon massavirta viiralle vaihtelee välillä 257–323,4 kg/s. Perälaatikon sakeuden ollessa 0,5 % kuiva-ainevirtaus on 1,29–1,62 kg/s. Kuiva-aineella tarkoitetaan kuitua ja paperin lisä- ja täyteaineita. Veden osuuden määrä korostaa veden laadun merkitystä paperinvalmistuksessa, vaikka lopputuotteessa vettä on vain 2–6 prosenttia.

Kuvasta 15 havaitaan, että imuvesialtaan vesi pumpataan viirakaivoon, massasäiliöiden sakeussäätöihin ja flotaattorille. Imuvesialtaan sakeus vaihtelee retention mukaan ja sakeus vaikuttaa myös veden käytettävyyteen. Kuidun lisäksi imuvesialtaaseen voi kulkeutua epäpuhtauksia, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä tuotannossa. Imuvesialtaalle virtaavasta vedestä vain pieni osa puhdistetaan ennen jatkokäyttöä. Nykyisen flotaattorin puhdistuskapasiteetin on havaittu olevan 22 kg/s. Imuvesialtaalle tuleva virtaus on 37,9–41,2 kg/s.

Massavirrat kiertovesitorniin ja tornista prosessiin vaihtelevat lajista riippuen. Vedestä suurin osa tulee sakeuttimelta ja loppu tulee suihkuvesisäiliön ylijäämästä. Virtaukset on listattu taulukkoon 8 lajikohtaisesti. Virtauksissa on huomioitu, että CTMP-massan hajotukseen ei käytetä PK1:n omaa kiertovettä. Kiertovesitornin vedenkulutusta ei mitata järjestelmässä, joten laskennallista arvoa ei voida verrata mittauksiin.

Taulukosta 7 havaitaan, että kiertovesitornin virtaus jätevesiin vaihtelee välillä 14,44–22,98 kg/s. Virtaus vastaa 15–30 % koko tehtaan jätevesimäärästä, joten sillä on merkittävä vaikutus tehtaan jätevesimääriin.

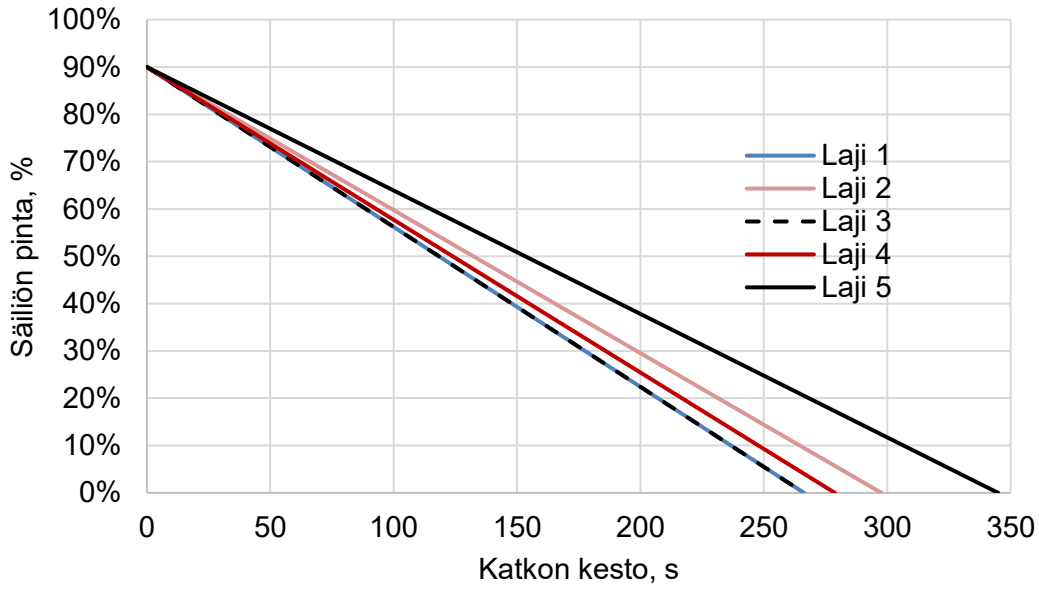
Taulukko 7. Kiertovesitornin ylijuoksu jätevesiin

Virtaus, kg/s	Laji 1	Laji 2	Laji 3	Laji 4	Laji 5
$\dot{m}_{jv}$	14,44	18,60	22,1	22,98	19,0

6.2 Katkotilanteet

Katkotilanne aiheuttaa muutoksia kiertovesisysteemissä. Työn kannalta merkittävin katko on puristinosakatko, koska pudotussuihku käynnistyy ja sen virtaus (kuva 14, virtaus 31) kasvaa. Katkossa pudotussuihkun virtaus on 30 kg/s. Suihkuvesisäiliö täyttyy flotaattorin kirkasteesta ja tuloksista havaitaan, että virtaus vaihtelee välillä 19,2–20,6 kg/s. Suihkuvesisäiliön koko on 4 m^3 ja kulutus ylittää sinne virtaavan veden määrän, minkä vuoksi säiliön pintaa laskee katkon aikana.

Tehtaan tuotannonohjausjärjestelmästä kerätyn tiedon perusteella laskettiin vuosien 2019 ja 2020 keskimääräinen puristinkatkojen kestoksi 41,1 minuuttia. Kuvassa 16 on esitetty suihkuvesisäiliön pinta katkon aikana kaikille viidelle lajille, joita tutkittiin.



Kuva 16. PK1 suihkuvesisäiliön pinta katkotilanteessa ajan funktiona.

Kuvasta 16 havaitaan, että suihkuvesisäiliö tyhjenee 4–6 minuutin aikana puristinosan katkossa. Käytännössä katkotilanteessa suihkuvedeksi voidaan ottaa tuorevettä ja varmistaa suihkuveden saanti.

Keskimääräisen katkon keston perusteella voidaan laskea tuoreveden kulutus. Kahden vuoden aikana paperikoneella oli 150 puristinkatkoa, joiden keskimääräinen kesto oli noin 41 minuuttia. Katkossa vettä kuluu 30 kg/s eli 1800 kg/min. Katkon keskimääräinen tuoreveden kulutus on 73,8 m^3. Kahden vuoden yhteenlaskettu tuoreveden kulutus puristinosan katkoissa oli noin 11 000 m^3, joka vastaa yli kolmen päivän koko tehtaan tuoreveden kulutusta. Tehtaan tuoreveden käytön kannalta määrän voidaan sanoa olevan melko suuri. Tuorevesi aiheuttaa tarpeettomia kustannuksia, koska sen voisi korvata riittävällä määrällä puhdistettua kiertovettä.

Katkossa pulpperiin ajettavaa massaa pitää laimentaa, jotta massan voi pumpata hylkysysteemiin. Laimentamiseen käytetään kiertovesitornin vettä. Kiertovesitornin koko on 300 m^3 ja kiertoveden kulutus nousee katkossa 500–1500 l/min. Puristinosan katkossa tarvitaan vähemmän vettä, koska pulpperiin ajettavan massan kuiva-ainepitoisuus on matala. Kuivan pään katkoissa vettä kuluu enemmän, koska paperin kuiva-ainepitoisuus on jo selvästi yli 90 %.

Katkotilanteessa laimennettu massa pumpataan hylkysakeuttimelle, jonka tehtävänä on sakeuttaa massaa. Massasta erotettu vesi johdetaan kiertovesitorniin ja massa hylkytorniin. Sakeuttimelta tuleva vesi on kuitupitoista. Pitkät ja usein esiintyvät katkot kasvattavat kiertovesitornin kiintoainepitoisuutta. Kiertovesitornin kiintoainepitoisuuden kasvu voi aiheuttaa prosessissa ongelmia. Vedessä oleva kiintoaine alkaa tarttua putkisoihin, mikä aiheuttaa likapilkkuja paperissa. Kiintoainepitoisuuden kasvu voi myös aiheuttaa haasteita sakeussäädöissä, jos kiertoveden ominaisuuksia huomioida. Katkojen seurauksena kiertovesitorniin kulkeutuu myös lisäaineita, jotka voivat sekoittaa prosessin kemiaa ja säätöjä.

Katkojen esiintyvyyttä on vaikea ennustaa, koska niillä on useita aiheuttajia, jotka riippuvat monesta tekijästä. PK1:llä katkojen on havaittu aiheutuvan esimerkiksi epäpuhtauksien aiheuttamista rei'istä tai paperiradan kireyden vaihtelusta. Paperikoneella olevat teräpäällystysasemat ovat herkkiä radassa oleville rei'ille, minkä vuoksi paperin puhtaus on merkittävässä roolissa koneen ajettavuuden kannalta.

7. KIERTOVESIJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

7.1 Kehitysehdotukset

Tulosten perusteella voidaan todeta, että merkittävimmät haasteet PK1:n kiertovesijärjestelmässä ovat puhdistuskapasiteetin riittämättömyys ja suihkuvesisäiliön koko. Flotaattorin kapasiteettia kasvattamalla voidaan taata kiertoveden riittävä saatavuus myös katkon aikana. Puhdistetulla kiertovedellä on kuitupitoista vettä enemmän käyttökohteita.

Normaaliajossa suihkuvesisäiliön vedenkulutus on melko pientä ja suihkuvesisäiliöön virtaa riittävästi kirkasta vettä flotaattorilta. Katkotilanteessa tasapaino häiriintyy, kun pudotussuihkupumppu ottaa vettä säiliöstä enemmän kuin flotaattori ehtii puhdistamaan kiertovettä. Tämä johtaa siihen, että suihkuvesisäiliö tyhjenee nopeasti, kuten kuvassa 16 on esitetty.

Suihkuvesisäiliö toimii katkossa puskurina, mutta sen koko on liian pieni, kun huomioidaan puristinosan katkojen keskimääräinen kestoaika. Kestoajan avulla voidaan arvioida tarvittavan suihkuvesipuskurin kokoa. Katkon kesto vuosina 2019 ja 2020 oli keskimäärin 41 minuuttia ja suihkuveden määrä katkossa on noin 30 kg/s. Flotaattorin puhdistetun veden määrä vaihtelee välillä 19,2–20,6 kg/s. Suihkuveden määrän ja säiliöön tulevan veden erotuksen avulla voidaan laskea, että katkossa kuluu 24–27,5 m^3 vettä. Suihkuvesisäiliön mitoituksessa on huomioitava suihkuveden riittävyys katkon aikana. Katkon keston ylittäessä 41 minuuttia tarvitaan enemmän suihkuvettä, joten lisätään laskettuun vesimäärään 1,5 varmuuskerroin. Näin laskettuna sopiva suihkuvesisäiliön koko olisi 40 m^3. Laskutapa ei kuitenkaan huomioi katkojen keston jakaumaa ja pelkkä keskimääräisen kestoajan käyttäminen ei ole luotettava mitoitustapa. Luotettavan tuloksen saamiseksi katkojen kestoaikojen jakaumaa ja kestoaikaan vaikuttavia tekijöitä tulisi tutkia tarkemmin.

Kiertoveden käytettävyyden kannalta veden puhtaudella on tärkeä merkitys. Vedessä olevat kuidut voivat tukkia suihkuputken suuttimet. PK1:n viira- ja puristinosan suihkuista suurimpaan osaan pumpataan lämmintä vettä. Lämpimän veden voisi korvata suihkuvedellä tietyissä kohteissa, jos kiintoainepitoisuus on riittävän alhainen. Paulapuron [7] mukaan kiintoainepitoisuus suihkuputkissa voi olla enimmillään 50 mg/l.

Kasvattamalla flotaattorin kapasiteettia voidaan tuottaa lisää puhdasta kiertovettä, jolloin vettä voidaan hyödyntää enemmän. Flotaation kapasiteetti perustuu laitteen pinta-alaan. Wangin [13] mukaan nykytekniikalla flotaattorit mitoitetaan jopa 210 l/min/m^2

pintakuormalle. Imuvesialtaaseen tulevan virtauksen tiedetään tulosten mukaan olevan jopa 41 kg/s, joten flotaattorin pinta-alan tulisi olla noin 12 m^2. Teollisuuden laitetoimittajien tiedetään mitoittavan flotaattoreja paljon pienemmälle pintakuormalle toiminnan varmistamiseksi.

Kiertoveden kapasiteettia voidaan lisätä myös esimerkiksi kiekkosuodattimen avulla. Kiekkosuodattimen kirkkaimpia vesijakeita voidaan käyttää suihkuvesissä ja kiintoainepitoisempi jae voidaan hyödyntää massanhajotuksessa. Flotaattori on kiekkosuodinta edullisempi investointi ja sen käyttöönotto vaatii kiekkosuodinta pienempiä muutoksia prosessissa. Koneen nykyisen flotaattorin voi korvata suuremman kapasiteetin flotaattorilla. Kiekkosuodin vaatii toimiakseen alipaineen ja siksi se asennetaan usein konetasoa huomattavasti korkeammalle, jotta alipaine voidaan saada aikaan ilman alipainepumppua.

7.2 Tuotannollinen näkökulma

Korvaamalla suihkuvesiä kiertovedellä voidaan parantaa tehtaan suljettua vesikiertoa. Vesikierron sulkeminen aiheuttaa ajettavuuden kannalta haasteita. Polverarin [25] mukaan kiertoveden lisäaineiden konsentraatio kasvaa ja heikentää kemikaalien tehoa. Konsentraation kasvu tulee huomioida lisäaineiden annostelussa. Kiertoveden lisäainekonsentraatio riippuu retentiosta.

Naicker ja Sithole [26] simuloivat vesikierron sulkemisen vaikutuksia kiertoveden kontaminoitumiseen. Tutkimus osoitti, että kiertoveden laskennallisen kymmenen kierroksen jälkeen kiintoainemäärä kaksinkertaistui ja tuhkapitoisuus kasvoi 50 %. Tämä osoittaa, että vesikiertojen sulkemisella saattaa olla myös negatiivisia vaikutuksia tuotantoon.

Suihkuvesisäiliön vettä käytetään viiraosan palautustelojen suihkuissa. Kiintoainepitoinen suihkuvesi saattaa aiheuttaa reikiä paperiin, mistä voi aiheutua ratakatko. Suihkuveden puhtaudella on siis merkittävä vaikutus katkoihin. Katkoista aiheutuva tuotantoajan hukka vaikuttaa paperikoneen tuotettuihin tonneihin. Tuotantokapasiteetin kannalta on tärkeä pyrkiä vähentämään katkoja, koska ne aiheuttavat vuosittain merkittävät tuotannonmenetykset. Kiertoveden käyttäminen suihkuvetenä vaatii, että flotaattori tuottaa jatkuvasti riittävän puhdasta vettä. Häiriöt vedenpuhdistuksessa näkyvät herkästi paperin laadun heikkenemisenä tai ratakatkoina.

7.3 Taloudellinen näkökulma

Kiertovesijärjestelmän sulkeminen vaikuttaa tarvittavan tuoreveden ja jätevesien määrään. Näiden vesimäärien alentamiselle voidaan laskea suoraan säästetyt kustannukset. Tuoreveden käytöstä aiheutuu puhdistus-, pumppaus- ja lämmityskustannuksia.

Tehtaan jätevesimäärällä ja jäteveden kiintoainepitoisuudella on merkittävä vaikutus jätevedenpuhdistamon toimintaan. Merkittävin kustannussäästöjen mahdollisuus on jätevesien vähentäminen korvaamalla lämpimän veden suihkuvesiä kiertovedellä. Korvaamalla puolet suihkuista kiertovedellä voidaan jätevesimäärää vähentää jopa 1000 m^3 vuorokaudessa. Määrä on tehtaan mittakaavassa suuri ja aiheuttaa vuodessa merkittävät kustannukset. Tehtaan jätevesi on kiintoainepitoista. Jätevesien mukana hukataan paljon kuitua, joka olisi tehokkaalla kiertoveden puhdistuksella mahdollista ottaa talteen ja hyödyntää hylyn joukossa.

Lämminvesisäiliön vesi lämmitetään höyryllä. Veden tarpeen väheneminen laskee merkittävästi veden lämmityskustannuksia. Toisaalta vesikierron sulkeminen voi nostaa kemikaalien kulutusta, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia. Myös puhdistuskapasiteetin kasvattaminen ja säiliöiden suurentaminen vaatii suuria investointeja.

7.4 Ympäristövaikutukset

Kehittämällä paperikoneen kiertovesijärjestelmää voidaan parantaa vesikierron sulkemisastetta. Paperitehtaan tuorevedenkulutus on 10–20 m^3 tuotettua tonnia kohden, kun kirjallisuudessa esiintyvä keskiarvo on 10–40 m^3 tuotettua tonnia kohden. Sulkemalla vesikiertoja voidaan vähentää tehtaan tuorevedenkulutusta.

Paperitehtaan jätevedet puhdistetaan paikkakunnan jätevedenpuhdistamossa, joka laskee puhdistetun veden takaisin jokeen. Joen virtaama 2–20 m^3/s on verrattain pieni suhteessa siihen laskettavan puhdistetun veden määrään. Joen pieni virtaus altistaa sen herkäksi JVP:n häiriöille. Alhaisen virtauksen aikana JVP:n puhdistetun veden osuus voi olla jopa 5 prosenttia joen virtaamasta. Jätevesien riittävällä puhtaudella ja määrällä sekä tasaisella kuormalla voidaan antaa JVP:lle paremmat edellytykset toimia.

8. YHTEENVETO

Thornin [17] mukaan paperikoneet voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin. On suuria ja nopeita koneita, joiden tuoteportfolio on melko kapea ja neliöpaino vaihtelee vain vähän. Toisaalta on olemassa pieniä koneita, jotka ovat hyvin joustavia ja tuoteportfolio on laaja. Pienemmillä koneilla neliöpaino voi vaihdella muutamien tuntien välein ja lajinvaihdot ovat nopeita.

PK1 on pienen tuotantokapasiteetin kone, jolla on laaja tuoteportfolio. PK1:n haasteena on sen aiheuttama jätevesimäärä ja kiertoveden puhdistuskapasiteetti. PK1:n hylky- ja CTMP-massan hajotukseen käytetään PK2:n kiertovettä, minkä vuoksi PK1:n vesitase on reilusti ylijäämäinen. Työn tavoitteena oli selvittää, millaisin keinoin voidaan vaikuttaa prosessin jätevesimääriin ja vähentää niistä aiheutuvia kustannuksia. Työssä tutkimuskysymyksiin löydetyt vastaukset osoittavat, millaisilla keinoilla kustannushaittoja voidaan merkittävästi vähentää.

Työssä tutkittiin viittä lajia, joiden neliöpaino vaihteli välillä 60–80 g/m^2. Työssä kerättiin dataa kyseisten lajien tuotantoprosesseista. Paperikoneen prosessista mallinnettiin virtausverkko, jonka avulla voitiin laskea prosessin massavirtoja valmiin tuotteen massavirrasta. Massavirtojen laskennan parametreina käytettiin prosessissa kullekin lajille asetettuja tavoitearvoja. Jos tavoitearvoja ei ollut saatavilla, käytettiin kirjallisuudessa esiintyvää vakioarvoa. Tällaisia olivat puristimen kosteusprosentti ja viiraretentio. Laskenta suoritettiin Excelissä ja merkittävimmät tulokset listattiin taulukoihin 2–7.

Työn ensimmäinen tutkimuskysymys oli: Millä keinoin voidaan arvioida paperikoneen kiertovesijärjestelmää? Kiertovesijärjestelmän arvioimiseksi tulee tuntea toimivalle kiertovesijärjestelmälle ominaiset piirteet. Toimiva kiertovesijärjestelmä on vesivarasto tuotantoprosessin tarpeisiin. Prosessissa tarvitaan kiertovettä massanhajotukseen ja laimennukseen. Kiertovesivarasto toimii puskurina ratakatkon aikana, kun pulpperit tarvitsevat laimennusvettä paperimassan laimentamiseen.

Kiertovesi on hyvin kuitupitoista, joten järjestelmällä tulee olla riittävä kyky erottaa vedestä kuitua. Lisäksi sen tulee olla riittävän suljettu, jotta prosessista ei aiheudu turhia jätevesikustannuksia. PK1:n kiertovesijärjestelmää arvioitiin mallintamalla PK1:n prosessin virtauskaavio ja laskemalla virtaukset viidellä eri lajilla. Mallin perusteella voitiin todeta, että PK1:n kiertovesijärjestelmästä löytyy toimivalle kiertovesijärjestelmälle ominaiset piirteet.

Työn toinen tutkimuskysymys oli: Mitkä ovat PK1:n kiertovesijärjestelmän merkittävimmät häiriöt ja mistä ne aiheutuvat? Virtausverkon avulla laskettuna todettiin, että normaalissa ajotilanteessa prosessin virtausten ja sakeuksien pysyessä vakiona vesikierron merkittävin häiriö on jätevesimäärä. Kiertovesitornin ylijuoksu aiheuttaa 15–30 % tehtaan jätevesimäärästä. PK2:n vesi, jota käytetään osaan PK1:n massojen hajotukseen, kerääntyy kiertovesitorniin ja kulkeutuu ylijuoksuna jätevesiin.

Toinen merkittävä häiriö on puristinosan katkotilanteessa tapahtuva suihkuveden kulutus. Koneen suihkuvesisäiliö on pieni ja sen sietokyky katkossa on lyhyt, koska pudotussuihkun käynnistyessä vedenkulutus nousee. Suihkuvedenkulutus on suurempaa kuin säiliöön virtaavan veden määrä ja siksi kiertovettä joudutaan korvaamaan tuorevedellä puristinosan katkojen aikana.

Työn kolmas tutkimuskysymys oli: Miten järjestetään PK1:n vesikierto siten, että taloudellisia ja tuotannollisia haittoja vähennetään merkittävästi? Toisen tutkimuskysymyksen häiriöt aiheuttavat tuotannollisia ja taloudellisia haittoja. Tutkimalla ja parantamalla häiriöiden aiheuttajia saadaan aikaan merkittäviä tuotannollisia parannuksia ja taloudellisia säästöjä.

Lisäämällä kiertoveden kulutusta voidaan vähentää jätevesimäärää. Puhtaamman veden myötä käyttöastetta voidaan lisätä esimerkiksi suihkuvesissä. Näin ollen veden puhdistuskapasiteettia lisäämällä voidaan mahdollistaa veden korkeampi käyttöaste. Puhdistamalla kiertovettä saadaan talteen myös kuitua ja voidaan vähentää putkistojen likaantumista.

Puristinosan katkon keskimääräinen pituus vuosina 2019 ja 2020 oli 41 minuuttia. Suurentamalla suihkuvesisäiliötä voidaan katkoissa käyttää pelkkää kiertovettä ja välttää turhaa tuoreveden käyttöä. Ylimääräinen tuoreveden käyttö lisää kierrossa olevan veden määrää ja näkyy jäteveden määrän kasvuna.

Työn perusteella voidaan todeta, että paperikoneella on kehityskohteita, mutta moni niistä vaatii investointeja. Kehityskohteilla on kuitenkin selvä säästöpotentiaali, mikä mahdollistaa usein suuriakin investointeja.

Työn näkökulmasta mielenkiintoisia jatkotutkimusaiheita ovat vesikierron sulkemiseen liittyvät aiheet. Sulkemisasteen lisääminen säästää jätevesikustannuksissa, mutta onko siitä paperikoneen laadun ja ajettavuuden kannalta enemmän haittaa vai hyötyä. Kiertovesiprosessin kehittämisen myötä kiertoveden ominaisuuksia, todellisia säästöjä ja vaikutuksia tuotantoon voisi mitata. Ympäristön kuormittamiseen liittyvät haasteet, tiukentuvat säädökset ja haitallisten kemikaalien ja lisäaineiden käytön rajoittaminen luovat varmasti haasteita paperiteollisuudelle jatkossakin.

LÄHTEET

[1] Metsäteollisuus, Metsäteollisuuden tuotantomäärät 1960-luvulta alkaen, 2021, Available: https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/metsateollisuuden-tuotantomaarat.

[2] E.F. Yap, K.E. Kwok, G.A. Dumont, Dynamic simulation and control of a paper machine wet end, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 79, Iss. 2, 2001, pp. 296-303.

[3] Chapter 5 - Reduction of Water Consumption in Pulp and Paper Mills, Elsevier Inc, 2017, pp. 55-69.

[4] J. Nuortila-Jokinen, M. Mänttäri, T. Huuhilo, M. Kallioinen, M. Nyström, Water circuit closure with membrane technology in the pulp and paper industry, Water science and technology; Water Sci Technol, Vol. 50, Iss. 3, 2004, pp. 217-227.

[5] Valtion ympäristöhallinto Eurajoen virtaama, http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/34/q3402200y/wqfi.html.

[6] JVP Eura Raportit ja tulokset, https://www.jvp-eura.fi/raportit-ja-tulokset.

[7] H. Paulapuro, Papermaking science and technology. Book 8, Papermaking: part 1: Stock preparation and wet end, 2nd ed. Finnish Paper Engineers' Association, Helsinki, 2008.

[8] R. Kuusisto, Paper machine grade changes: closed-loop control, Tampere University of Technology, 2008.

[9] C.J. Biermann, Handbook of pulping and papermaking, 2nd ed. Academic Press, San Diego, 1996.

[10] Jujo Thermal Jujo Thermal, https://www.jujothermal.fi/yritys/.

[11] H. Holik, Handbook of Paper and Board, 1st ed. Wiley-VCH, Weinheim, 2013.

[12] M.P. Burt, P.R. Thomas, Analysis of the hydrocyclone stock cleaning process for wasted fibre in a paper mill, Journal of Cleaner Production, Vol. 10, Iss. 6, 2002, pp. 573-579.

[13] L.K. Wang, N.K. Shammas, W.A. Selke, D.B. Aulenbach, Flotation Technology Volume 12, 1st ed. Humana Press, Totowa, NJ, 2010.

[14] A. Haapala, M. Körkkö, K. Kemppainen, D. MacNeil, J. Niinimäki, Purification of white waters by selective flotation, Bioresources, Vol. 5, Iss. 4, 2010, pp. 2153-2172.

[15] M.A. Hubbe, J.R. Metts, D. Hermosilla, M.A. Blanco, L. Yerushalmi, F. Haghighat, P. Lindholm-Lehto, Z. Khodaparast, M. Kamali, A. Elliott, Wastewater Treatment and Reclamation: A Review of Pulp and Paper Industry Practices and Opportunities, Bioresources, Vol. 11, Iss. 3, 2016, pp. 7953-8091.

[16] Knowpap Retentioaineet, http://www.knowpap.com.

[17] I. Thorn, C.O. Au, Applications of Wet-End Paper Chemistry, 2nd ed. Springer Netherlands, Dordrecht, 2009.

[18] J.A. Orccotoma, J. Paris, M. Perrier, A.A. Roche, Dynamics of white water networks during web breaks, Tappi Journal, Vol. 80, Iss. 12, 1997, pp. 101-110.

[19] M. Linnala, H. Ruotsalainen, E. Madetoja, J. Savolainen, J. Hämäläinen, Dynamic simulation and optimization of an SC papermaking line - Illustrated with case studies, in: Nordic pulp & paper research journal,2010, pp. 213-220.

[20] A. Blanco, E. Dahlquist, J. Kappen, J. Manninen, C. Negro, R. Ritala, Use of modelling and simulation in the pulp and paper industry, Mathematical and computer modelling of dynamical systems, Vol. 15, Iss. 5, 2009, pp. 409-423.

[21] K. Cutshall, The nature of paper variation, Tappi Journal, Vol. 73, Iss. 6, 1990, pp. 81-90.

[22] K. Lindell, S. Stenström, A Modular Process Modeling Tool for the Analysis of Energy Use and Cost in the Pulp and Paper Industry, Drying Technology, Vol. 24, Iss. 11, 2006, pp. 1335-1345.

[23] T.A. Hauge, B. Lie, Paper machine modeling at norske skog saugbrugs: A mechanistic approach, Modeling, identification and control, Vol. 23, Iss. 1, 2002, pp. 27-52.

[24] Valmet Quality control system, https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/controls-applications/.

[25] M. Polverari, L. Allen, B. Sitholé, Effect of system closure on retention and drainage aid performance in TMP newsprint manufacture - Part II, Tappi Journal, Vol. 84, Iss. 3, 2001, pp. 56

[26] D. Naicker, B. Sithole, Using a Rapid-Kothen paper machine to simulate the effect of system closure on the contamination load of whitewater, Nordic pulp & paper research, Vol. 31, Iss. 4, 2016, pp. 600-607.

LIITTEET

LIITE A

Parametri	Tavoite	Vakio	Muuttuja	Yksikkö
Nopeus, pope	x		V_P	m/min
Nopeus, viiraosa	x		V_{HB}	m/min
Neliöpaino, valmis tuote	x		W_P	g/m^2
Neliöpaino, viiraosa	x		W_{HB}	g/m^2
Päällystemäärä 1. asema	x		W_{C1}	g/m^2
Päällystemäärä 2. asema	x		W_{C2}	g/m^2
Rataleveys, pope	x		L_1	m
Rataleveys, 4. pulpperi	x		L_2	m
Rataleveys, perälaatikko	x		L_3	m
Rataleveys, kuivatusosa	x		L_4	m
Kosteus, pope	x		M_1	%
Kosteus, kuivatusosan jälkeen	x		M_2	%
Kosteus, 2. aseman jälkeen	x		M_3	%
Kosteus, puristin		x	M_4	%
Sakeus, perälaatikko	x		C_1	%
Sakeus, konesäiliö	x		C_2	%
Sakeus, hylkysäiliö	x		C_3	%
Sakeus, sekoitussäiliö	x		C_4	%
Sakeus, mäntymassa	x		C_5	%
Sakeus, koivumassa	x		C_6	%
Sakeus, flotaattorin liete	x		C_7	%
Hylyn määrä	x		B_1	%
Massaretentio		x	R_1	%
Tuhkaretentio		x	R_2	%