



HYLYN KÄYTÖN HAASTEET PAPERINTUOTANNOSSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2022

Anttoni Haapa-aho

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja, Katja Kuukka

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Kemiantekniikka

Anttoni Haapa-aho

Hylyn käytön haasteet paperintuotannossa

Kemiatekniikan kandidaatintyö

30 sivua, 7 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja, Katja Kuukka

Avainsanat: paperikemia, hylky, paperi, hyllyn käsittely, paperikone, white pitch, layer by layer, hylkyjärjestelmä

Paperin tuotannossa syntyy runsaasti hylkymassaa, joka käytetään uudelleen paperin raaka-aineena. Hyllyn uudelleenkäyttö on kestävää sekä taloudellisesta näkökulmasta välttämätöntä.

Työn tavoitteena oli selvittää hyllyn käyttöön liittyviä ongelmia ja haasteita, joita paperihyllyn prosessointi sisältää. Lisäksi etsittiin keinoja, joilla löydettyjä ongelmia voitaisiin välttää. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena käyttäen mahdollisimman tuoreita lähteitä.

Selvisi, että hylkysuhteen nopea kasvattaminen laskee paperin lujuutta ja nostaa paperikoneen katkon todennäköisyyttä. Hidas hylkysuhteet nosto on paras vaihtoehto prosessin kannalta. Hylkyjärjestelmän mikrobit käyttävät ravinnokseen paperiin lisättävää tärkkelystä, jolloin muodostuu erilaisia kaasuja ja paperin laatu heikkenee. Mikrobeja voidaan ehkäistä biosideilla. Päällystetyn hyllyn sisältämien päällystysaineiden todettiin muodostavan prosessiin saostumia, jotka kasaantuvat paperikoneen pinnoille ja heikentävät paperin laatua. Hylkykuitujen päällystämisen ja niiden pintavarauksen muuttaminen lisää hylkymassaa sisältävän paperin lujuutta. Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että hyllyn käyttö on monimutkainen prosessi, jossa yhden ongelman korjaaminen voi aiheuttaa toisen pahenemisen.

LYHENNELUETTELO

A-PAM	anioninen polyakryyliamidikopolymeeri
CaSO ₄	kalsiumsulfaatti
CMC	karboksimeetyliselluloosa
C-PAM	kationinen polyakryyliamidikopolymeeri
LWC	light weight coated
MWC	medium weight coated
PAC	polyalumiinikloridi
PAE	polyamidiamiini-epikloorihydriini
PAH	poly(allyyliamiinihydrokloridi)
PEI	polyetyleni-imiini
poly-DADMAC	polydiallylidimetyyliammoniumkloridi
PSS	poly(natriumstyreenisulfonaatti)
PVA	polyvinyliasetaatti
SB	styreenibutadieeni

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

Kuva- ja taulukkoluetelo

1	Johdanto.....	6
2	Paperin valmistus.....	7
2.1	Paperimassan valmistus.....	8
2.1.1	Toiminnalliset kemikaalit	9
2.1.2	Täyteaineet	10
2.1.3	Prosessikemikaalit.....	10
2.2	Viiraosa.....	11
2.3	Puristinosa.....	12
2.4	Kuivatusosa	12
2.5	Kalanteri	13
2.6	Kiinnirullain	14
2.7	Päällystys.....	14
3	Hylky.....	15
3.1	Hylyn syntyminen ja prosessointi	15
3.2	Hylyn käytön haasteet.....	16
3.2.1	Hylkymassan kuidut	18
3.2.2	Hylyn annostelu.....	19
3.2.3	Mikrobit.....	22
3.2.4	Tahmeat materiaalit ja white pitch -ilmiö.....	24
3.2.5	Hylkyjärjestelmään päätyneet epäpuhtaudet	26
4	Johtopäätökset.....	27
	Lähteet	29

Kuvaluettelo

Kuva 1: Paperin valmistusprosessi

Kuva 2: Fourdrinier-paperikoneen rakenne

Kuva 3: Paperimassan koostumus

Kuva 4: Paperikoneen viiraosan rakenne

Kuva 5: Lbl-menetelmällä päällystettyjen hylkykuitujen käytön vaikutus paperin vetolujuuteen

Kuva 6: Kahden hyllyn syöttötavan vaikutus perälaatikon stabiiliuteen sanomalehtipaperia tuottavalla paperikoneella

Kuva 7: Paperikoneen katkon todennäköisyys hyllyn syötön funktiona

Taulukkuuettelo

Taulukko I: Hyllyn sisältämiä aineita

Taulukko II: Koeajojen parametrit

Taulukko III: Tutkimuksessa löydetyt mikrobit sekä niiden esiintyvyyden todennäköisyydet

1 Johdanto

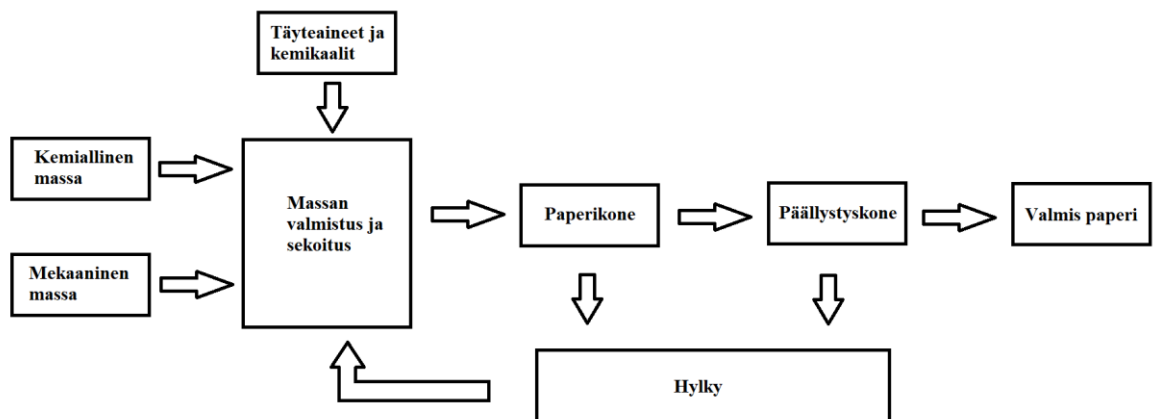
Paperin tuotannossa syntyy hylkyä, joka prosessoidaan ja käytetään uudelleen yhtenä paperin raaka-aineena. Paperin tuotannosta jopa 20 % voi olla hylkyä, jolloin sen uudelleenkäyttö on taloudellisesta näkökulmasta katsottuna välttämätöntä (Alén 2007, s. 94). Hyllyn käytön ansiosta kaikista prosessiin tulevista kuiva-ainevirroista vain noin 0,24 % luokitellaan jätteeksi (Korpunen ja Paltakari 2013, s. 151). Jatkuva paine maksimoida tuotannon tehokkuus ja minimoida sen kuluja pakottavat löytämään keinoja hyllyn syntymisen vähentämiseksi sekä sen tehokkaalle hyödyntämiseksi. Myös ympäristöä ja jätteitä koskevat säädökset ohjaavat tuotantoa raaka-aineiden perusteelliseen hyödyntämiseen.

Hyllyn määrä ja sen käyttö vaikuttavat merkittävästi valmiin paperin ominaisuuksiin, erityisesti lujuteen, sillä hylkymassan kuidut ovat jo osittain prosessoituja, jolloin niiden ominaisuudet eroavat huomattavasti tuoreista kuiduista. Hylkykuitujen sisältämät aineet alkavat myös akkumuloitua prosessiin, mikä johtaa paperikoneen ajettavuusongelmiin. Tästä syystä hyllyn ominaisuudet ja sen käytön vaikutukset prosessiin on syytä tuntea. Koska hylkyä syntyy runsaasti, on syytä löytää myös keinoja lisätä hyllyn osuutta paperissa menettämättä kuitenkaan liikaa paperin lujuusominaisuuksia.

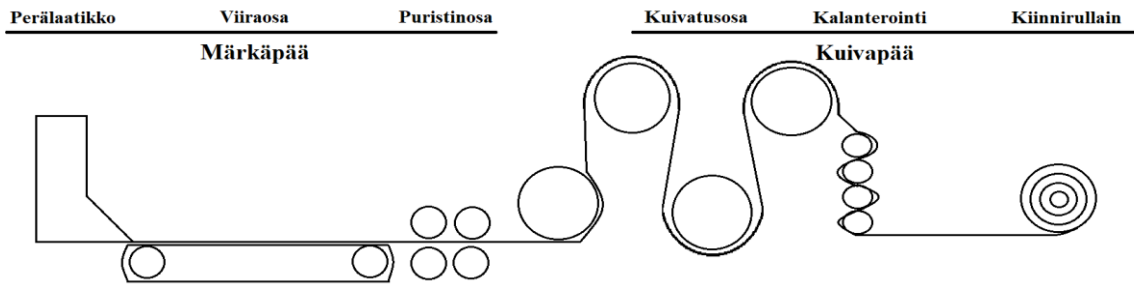
Tämän työn tavoitteena on selvittää hyllyn käyttöön liittyviä ongelmia ja löytää keinoja, joilla hillitä niitä. Työn pääpainona ovat *fourdrinier*-paperikoneella valmistettavien kevyesti päällystetyn (engl. light weight coated, LWC), keskiraskaasti päällystetyn (medium weight coated, MWC) paperin sekä sanomalehtipaperin prosessointi ja niistä syntyvä hylky. Työssä esitellään ensin paperin valmistusprosessi, jonka jälkeen perehdytään hyllyn syntymiseen, sen prosessointiin sekä sen tuomiin haasteisiin.

2 Paperin valmistus

Tässä kappaleessa perehdytään paperin valmistukseen tyypillisellä *fourdrinier*-paperikoneella alkaen paperimassan valmistuksesta päättyen paperin kiinnirullaukseen ja päällystykseseen. Paperin valmistus on esitetty pääpiirteittäin kuvassa 1. Fourdrinier-paperikone on paperikone, jossa on vaakatasossa liikkuva kuituverkko eli viira, jolle paperimassa syötetään perälaatikon kautta (engl. flat wire machine) (Pratima 2018, s. 211). Fourdrinier-paperikoneen rakenne on esitettyä kuvassa 2. Lisäksi kappaleessa esitellään yleisimmät valmistusprosessissa käytettävät lisäaineet ja kemikaalit.



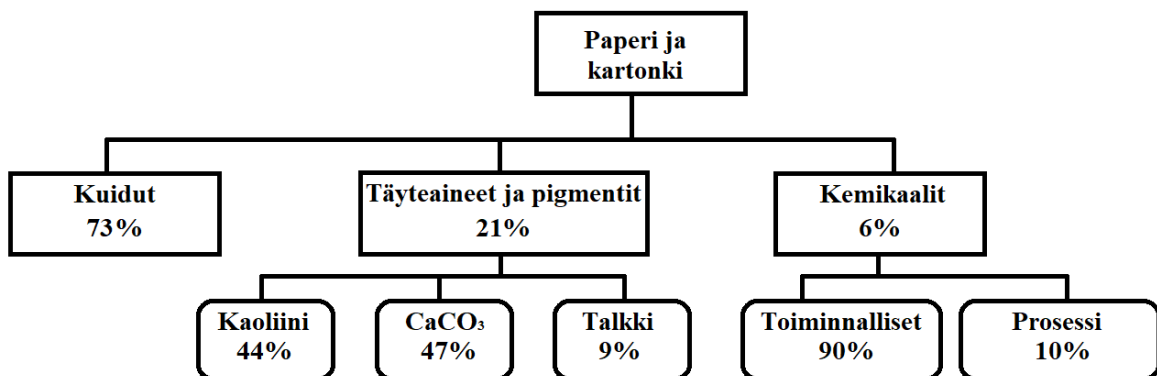
Kuva 1 Paperin valmistusprosessi. Paperin tuottaminen alkaa paperimassan valmistuksella, jossa kemiallinen ja mekaaninen massa sekoitetaan muiden aineiden ja veden kanssa. Valmistunut massa syötetään perälaatikon kautta paperikoneelle ja päällystyskoneelle, jossa myös hylky syntyy. Lopputuloksena on valmista paperia.



Kuva 2 Fourdrinier-paperikoneen rakenne. Paperin kulkusuunta kuvassa vasemmalta oikealle. Märkääpäästä puhuttaessa tarkoitetaan paperikoneen perälaatikkoa, viira- ja puristosaa. Kuivapäällä tarkoitetaan kaikkea paperikoneen kuivatusosasta eteenpäin.

2.1 Paperimassan valmistus

Paperin tuottaminen alkaa paperimassan valmistuksella. Paperimassan valmistukseen voidaan käyttää puuhioketta, hierrettä tai sellua, jolloin puun kuidut erotetaan toisistaan kemiallisesti keittokemikaaleilla. Puukuitujen lisäksi paperimassaan lisätään erilaisia sidos- ja täyteaineita, joilla muokataan paperin ominaisuuksia haluttuun suuntaan. Puukuidut, sidos- ja lisäaineet sekoitetaan veden kanssa yhtenäiseksi massaksi sekoitussäiliössä (engl. blend chest). (Paulapuro 2008, s. 158.) Paperimassan koostumus on esitettyä kuvassa 3.



Kuva 3 Paperimassan koostumus. Suomessa paperinvalmistukseen vuonna 2003 keskimäärin käytetyt raaka-aineet. Paperimassasta 73 % on puukuituja, loput ovat täyte- ja väriaineita sekä erilaisia kemikaaleja. (Alén 2007, s. 116).

Kun paperista poistetaan vettä, sen kuiva-ainepitoisuus prosessin eri vaiheissa voidaan laskea kaavalla (1).

$$x = \frac{m_{ka}}{m_{pm}} \times 100 \% \quad (1)$$

jossa	x	paperimassan kuiva-ainepitoisuus
	m_{ka}	kuiva-aineiden massa
	m_{pm}	paperimassan kokonaismassa.

2.1.1 Toiminnalliset kemikaalit

Toiminnalliset kemikaalit vaikuttavat suoraan paperin ominaisuuksiin ja laatuun kuten lujuuteen, opasiteettiin eli läpinäkymättömyyteen ja väriin (Thorn ja Au 2009, s. 3-5).

Puukuidut ja vesi muodostavat keskenään vetysidoksia, jolloin paperin lujuus heikkenee. Kun paperimassaan lisätään kemikaaleja, jotka vähentävät veden absorboitumista paperiin, paperin ja veden väliset vetysidokset vähenevät ja paperin kuitujen väliset sidokset lisääntyvät, jolloin lujuus kasvaa. (Bajpai 2015, s. 145.)

Paperiin lisätään myös erilaisia väri- ja pigmenttiaineita, joiden käyttö määräytyy lähinnä paperin loppukäytön mukaan. Väriaineet luokitellaan suoriin ja perusväreihin, happo-, rikki- sekä pigmenttiväreihin. (Bajpai 2015, s. 138.)

Tärkkelys on veden, puukuitujen ja täyteaineiden jälkeen eniten käytetty paperin raaka-aine. Vuotuinen kulutus maailmanlaajuisesti on noin 5 miljoonaa tonnia. (Thorn ym. 2009, s. 171.) 20 % tärkkelyksestä sekoitetaan suoraan paperimassaan määrässä päässä lisäämään paperin lujuutta, 62 % käytetään pintaliimana, 3 % suihkutetaan määrän rainan päälle ja 15 % lisätään parantamaan päällystysaineiden kiinnittymistä. Mitä enemmän paperi sisältää mineraalisia täyteaineita, sitä enemmän siihen lisätään tärkkelystä parantamaan lujuutta. (Bajpai 2015, s. 82-86.) Koska tärkkelys sisältää useita karboksyyliiryhmiä (-COOH), kykenee se muodostamaan vetysidoksia. Kun paperista poistetaan vettä ja se tiivistyy, muodostaa tärkkelys vetysidoksia kuitujen ja täyteaineiden välille. (Alén 2007, s. 80.) Paperin lujuutta parantamalla mahdollistetaan paperikoneen suuremmat ajonopeudet, jolloin tuotannon tehokkuus paranee.

2.1.2 Täyteaineet

Täyteaineiden tarkoituksena on parantaa tuotantoprosessin sujuvuutta sekä lopullisen paperin ominaisuuksia. Mineraaliset täyteaineet täyttävät nimensä mukaisesti kuitujen välisiä rakoja ja aukkoja. Ne myös tasoittavat paperin pintaa, parantavat sen paino-ominaisuuksia sekä formaatiota viiraosalla, opasiteettia, kiiltoa ja kirkkautta. Täyteaineiden käyttö vähentää tuotantokustannuksia, sillä ne ovat usein halvempia kuin puukuidut. (Alén 2007, s. 56-57.)

Useimmin käytettäviä täyteaineita ovat kaoliini, talkki, kalsiumkarbonaatti, titaanidioksidi ja erilaiset amorfiset silikaatit (Thorn ym. 2009, s. 114-122).

2.1.3 Prosessikemikaalit

Prosessikemikaaleilla pyritään vaikuttamaan itse tuotantoprosessiin tavoitteena parantaa tehokkuutta ja laskea tuotantokustannuksia (Thorn ym. 2009, s. 2).

Retentiota ja massan kuivumista viiraosalla parantavat kemikaalit ankkuroivat massan viiraan ja parantavat sen vedenpoistoa. Näin ollen viiraosan ajonopeutta voidaan kasvattaa. Mitä enemmän viiraosalla saadaan poistettua vettä, sitä pienempi on höyrynkulutus kuivausosalla (Bajpai 2015, s. 108.)

Fiksatiivit ovat epäorgaanisia koagulantteja ja polymeerejä, joiden tehtävänä on poistaa prosessista tahmeita aineita ja jäämiä, jotka muutoin akkumuloituisivat prosessiin ja laitteisiin. Toisin sanoen ne siis puhdistavat prosessia. (Bajpai 2015, s. 112-113.) Yleisin nykypäivänä käytetty fiksatiivi on aluna (Alén 2007, s. 105).

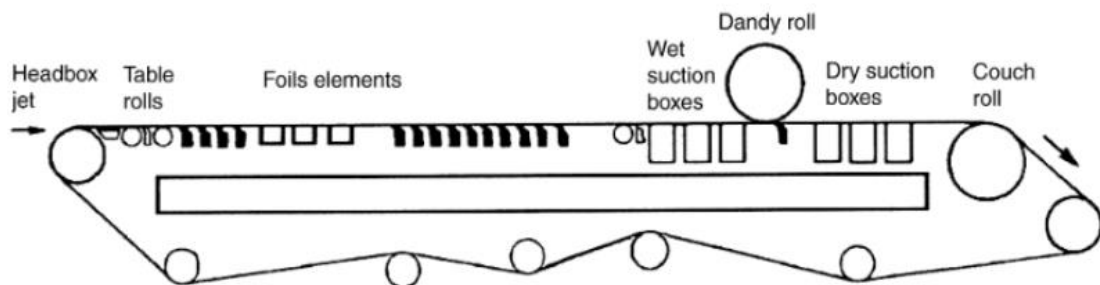
Biosidien tehtävä on estää mikrobien kuten liman muodostuminen prosessipinnoille. Biosideilla on pääasiassa kaksi toimintaperiaatetta: ne voivat tuhota mikrobien solukalvon tai ne voivat reagoida mikrobin solun välttämättömien osien kanssa. (Alén 2007, s. 113.) Mikrobien muodostuminen voi johtaa paperin reikiintymiseen ja jopa homehtumiseen. Myös paperikoneen katkot ovat mahdollisia. (Bajpai 2015, s. 116.)

Johtuen voimakkaasta sekoittamisesta, paperimassaan tulee paljon ilmaa, joka aiheuttaa vaahoutumista. Vaahoutuminen taas aiheuttaa paperikoneen ajettavuusongelmia sekä heikentää paperin laatua ja ominaisuuksia. Jo pienikin määrä ilmaa vaikuttaa merkittävästi, sillä

paperimassa, jossa on 0,4 % ilmaa, kuivuu kaksi kertaa hitaammin ja sen märkäluku on 30 % normaalia huonompi. Vaahdonestoaineilla pyritään pääsemään eroon massaun sekoituksesta ilmasta siten, ettei se muodosta kuplia massaun. Vaahdonestoaineet voivat olla öljypohjaisia, silikoneja, pinta-aktiivisia aineita tai emulsioita. (Alén 2007, s. 111-113.)

2.2 Viiraosa

Kun paperimassa on valmistettu, se syötetään viiralle perälaatikon kautta. Perälaatikon tavoitteena on jakaa paperimassa vaakatasossa kulkevalle viiralle tasaiseksi matoksi, jolloin paperimassaa kutsutaan rainaksi. Perälaatikolta tullessaan paperimassa on suurimmaksi osaksi vettä ja sen kiintoainepitoisuus on noin 0,3–0,6 %. Viiraosan tavoitteena on veden erottaminen vesi-kuituseoksesta eli rainasta ja kuitujen haluttu asettuminen viiralle. (Pratima 2018, s. 209-214.) Paperikoneen viiraosa on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4 Paperikoneen viiraosan rakenne. Paperimassan liikkuminen kuvassa vasemmalta oikealle. (Paulapuro 2008, s. 252.)

Veden poisto rainasta voi tapahtua hydrostaattisesti, jolloin rainan oman massan aiheuttama paine saa veden siirtymään viiran läpi. Usein viiran alapuolelle on asetettu erilaisia imulaitteita, jotka luovat alipaineen viiran alle ja imevät näin vettä viiran läpi. Raina voidaan myös ajaa sylinterirullan yli kahden eri viiran välissä, jolloin mekaaninen paine puristaa vettä rainasta. Dandy-rullaa (engl. dandy roll) käytetään viiraosalla tasoittamaan rainan pintaa yläpuolelta. Viiraosan jälkeen rainan kuiva-ainepitoisuus on 18–23 %. (Holik 2006, s. 268-271; Pratima 2018, s. 209.)

2.3 Puristososa

Puristososan tehtävänä on poistaa paperirainasta vettä mahdollisimman paljon puristamalla sitä mekaanisesti nippien (engl. nip) eli kahden vastakkain asetetun telan tai telan ja kengän (engl. shoe) välissä. Veden poistaminen parantaa paperin lujuutta ja vähentää höyrynkulutusta tulevassa kuivatusosassa. Ennen puristosaa märkä paperi siirtyy viiralta huovalle pick-up-telan välityksellä. Puristosassa paperia voidaan puristaa nippien välissä joko yhtä huopaa vasten tai joissain tapauksissa kahden huovan välissä. Paperista huopaan siirtynyt vesi poistetaan erityisillä imuputkilla. Joissain tilanteissa voidaan käyttää myös imeviä puristusteloja, jolloin veden poisto paperista tehostuu. Perinteinen puristososa koostuu yleensä kolmesta tai neljästä peräkkäin asetetusta puristusnipistä. Nippien välissä on tyypillisesti noin 20–150 N:n suuruinen voima ja joskus jopa 300 N joissain erikoismalleissa. Puristososan jälkeen paperin kuiva-ainepitoisuus on noin 50–55 %. (Holik 2006, s. 275-277.)

2.4 Kuivatusosa

Kuivatusosan tavoitteena on nostaa paperin kuiva-ainepitoisuus mahdollisimman korkeaksi – yleensä noin 90–98 prosenttiin. Yleisin kuivatustapa on kuljettaa puristosalta tuleva raina viiran ohjaamana paperikoneen huuvasa (engl. dryer hood), jossa kuumaa ilmaa kierrätetään useiden höyrylämmitteisten sylinterien ja viiran välistä. Sylinterit jaetaan usein muutamien sylinterien muodostamiin ryhmiin. Painopaperia tuottavissa paperikoneissa kuivatusosa koostuu usein noin kuudestakymmenestä höyrylämmitteisestä sylinteristä, joiden halkaisijat nykypäivänä ovat 1,8 metriä. (Holik 2006, s. 280-285.)

Sylinterien sisällä virtaava kuuma höyry tiivistyy sylinterien sisäpintaan, jolloin sylinterin ulkopinnalla oleva raina kuumenee ja vesi haihtuu. Kuivatusosassa tapahtuu näin ollen sekä aineen- että lämmönsiirtoa. Höyrystynyt vesi poistetaan lopuksi huuvasta. (Holik 2006, s. 280-281.)

Veden haihtumiseen rainasta vaikuttavat sylinterissä kiertävän höyrylämpötila sekä massavirta, sylinterin sisäpinnalle muodostuvan kondenssiveden poistaminen, sylinterin ja paperirainan kosketuspinta-ala, -aika sekä paine. Lämmönsiirtoa ja näin ollen

kuivatusprosessia heikentävät kuivatussylintereiden pinnalla olevat epäpuhtaudet, kuten paperipöly. Myös kuivatusviirojen kunto ja tyyppi vaikuttavat prosessiin. (Bajpai 2018, s. 137.)

Aluksi vesi haihtuu kuitujen viherhiukkasten yhteyttämiskalvostoista ja kuidut alkavat puristua, kun kuiva-ainepitoisuus muuttuu 50–55 prosentista 60–65 prosenttiin. Kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa 80–85 prosenttiin kuidut kutistuvat poikittaissuuntaisesti, kun kuitusolun sisältämä vesi haihtuu. Tällöin kuitujen väliset vetysidokset lisääntyvät ja paperin lujuus kasvaa. (Karlsson 2010, s. 238-240.)

2.5 Kalanteri

Kalanteroinnissa paperiin kohdistetaan mekaanista painetta sen kulkiessa kahden tai useamman sylinterirullan välistä. Paineen vaikutuksesta paperi ohenee ja sen ominaisuudet muuttuvat. Tässä vaiheessa prosessia paperista on poistettu jo lähes kaikki vesi, jolloin paperiin voidaan kohdistaa suuriakin paineita kalanteroinnin aikana ilman, että paperi repeää ja syntyy katkoja. (Rautiainen 2010, s. 15.)

Kalanteroinnin tarkoituksena on muokata paperin pinnan ominaisuuksia sen loppukäyttötarkoituksen mukaan esimerkiksi paperin pinnoitusta ja painettavuutta ajatellen. Kalanteroinnin avulla voidaan muokata paperin kiiltoa, karheutta, tiheyttä, kirkkautta sekä opasiteettia eli paperin läpinäkyvyyttä. Kalanteroinnilla päästään myös eroon paperiin aiemmin prosessissa syntyneistä ongelmista. Näitä ei-toivottuja jälkiä ovat esimerkiksi paperikuitujen huono formaatio viiraosalla, viiran jättämät jäljet paperissa ja pienet kokkareet. (Holik 2006, s. 294; Pratima 2018, s. 248; Rautiainen 2010, s. 14.)

Kalanterit jaetaan usein kahteen ryhmään: esikalantereihin (engl. precalender) ja viimeistelykalantereihin (engl. final calender). Esikalantereiden tarkoituksena on muokata paperia jatkokprosessia varten, esimerkiksi päällystystä varten. Kalanterointi ennen päällystystä vähentää paperin karheutta, mikä taas vähentää päällystysaineiden käyttöä. Esikalanterit ovat usein yksinippisiä, kun taas viimeistelykalanterit ovat multinippikalantereita, jolloin kalanterite-loja on useita. (Rautiainen 2010, s. 15.) Kuvassa 2 esitetty kalanteri on multinippikalanteri.

Mikäli paperikoneessa itsessään ei ole päällystysosaa, on viimeisenä vaiheena paperikoneella kiinnirullaus. Mahdollinen päällystys suoritetaan myöhemmin päällystyskoneella.

2.6 Kiinnirullain

Kiinnirullaus (engl. reeling) on paperikoneen viimeinen työvaihe, jossa paperikoneelta tuleva paperi pyöritetään suuren kelan ympärille. Valmiin konerullan eli tampusuurin halkaisija voi olla jopa 4,5 metriä. Rullaus on keskeytymätön toimenpide, jossa tampusuurin valmistuttua alkaa uusi tyhjä kela kelaamaan paperia välittömästi. Paperi siirtyy vanhalta tampusuurilta uudelle kelalle paineilman avustamana. (Holik 2006, s. 309.)

Tampusuurista syntyy hylkyä niin kutsuttuna pinta- ja pohjahylkynä. Kun konerulla valmistuu, täytyy siitä poistaa päällimmäiset kerrokset, jotka eivät ole yhtä kireitä kuin muualla rullassa. (Holik 2006, s. 309.)

2.7 Päällystys

Päällystyskoneet ovat itsenäisiä koneita, jotka avaavat paperikoneelta tulleen tampusuurin, päällystävät, kuivaavat ja viimeistelevät paperin, jonka jälkeen paperi rullataan uudelleen tampusuuriksi. Yleisin tapa viimeistellä paperi päällystyskoneen jälkeen on superkalanterointi. (Paltakari 2009, s. 19.)

Päällystyskoneen tavoitteena on parantaa paperin pinnan laatua. Ominaisuuksia voidaan muokata kahdella periaatteella: joko optisia tai fyysisiä ominaisuuksia muokkaamalla. Optisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi paperin kiilto, kirkkaus ja opasiteetti. Fyysisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi paperin sileys. Lisäämällä paperin pintaan päällystysaineita sen pinta tasoittuu, jolloin painomuste ei leviä ja painatuksesta tulee siistimpi. Myös käytetyn musteen tarve vähenee. (Holik 2006, s. 309)

Päällystyskoneella päällystys tapahtuu usein jatkuvatoimisesti, jolloin vanhan rullan perään liitetään vauhdista uusi rulla. Vanhaan kelaan jätetään aina vähän paperia eli niin kutsuttua konerullan pohjahylkyä, sillä paperin kireys keskellä rullaa ei ole sama kuin pohjalla. Äkillinen muutos päällystyskoneella ajettavan paperin kireydessä johtaa ajettavuusongelmiin.

3 Hylky

Tässä kappaleessa käsitellään paperin tuotannossa syntyvää hylkyä, sen jatkokäsittelyä, sen vaikutuksia paperin ominaisuuksiin, hyllyn käytön haasteita sekä keinoja niiden vähentämiseen.

Hyllyn osuus paperin tuotannosta on noin jopa 20 %, jolloin hyllyn käsittely ja uudelleen käyttö paperin valmistuksessa on välttämätöntä taloudellisista syistä (Alén 2007, s. 94). Hyllyn uudelleenkäytön ansiosta häviöt paperikoneella ovat vain noin 0,24 % kaikista kuiva-ainevirroista alkaen paperimassan valmistuksesta päättyen valmiisiin asiakasrulliin (Korpuinen ym. 2013, s. 151). Hyllyn käyttö siivousmassan (puhdistettu keräyspaperi) ohella on edelleen suurin paperin laadun vaihteluun vaikuttava tekijä, joten hyllyn käsittelyyn ja käyttöön liittyvät ilmiöt on syytä tuntea (Leiviskä 2009, s. 204).

3.1 Hyllyn syntyminen ja prosessointi

Hylkyä syntyy paperikoneen käynnistyksessä, paperilajien vaihtojen yhteydessä, valmiiden konerullien eli tampoerien pohjista, paperikoneen katkojen aikana sekä paperin pituusleikkauksesta (Bajpai 2018, s. 148). Jos valmistettu paperi ei vastaa sille asetettuja vaatimuksia, se pulperoidaan hylkyksi. Esimerkiksi paperin väärä kosteus- ja paksuusprofiili tai paperin epätasainen kireys tampoerissa johtavat sen pulperointiin. (Rautiainen 2010, s. 154.)

Prosessin vaihe, jossa paperihylky syntyy vaikuttaa luonnollisesti siihen, mikä on paperin koostumus. Esimerkiksi märkápään katkossa syntynyt hylky vaatii vähemmän prosessointia, sillä siitä ei ole ehditty poistaa vielä paljoa vettä, eikä paperin sisältämien kuitujen välille ole muodostunut merkittävästi sidoksia. Toisaalta taas päällystyskoneella syntynyt hylky on jo kuivattu ja se sisältää erilaisia kemikaaleja, jolloin se käsitellään erikseen. Päällystetyn hyllyn prosessointi (sen keräys, sakeutus ja säilöntä) tapahtuu erillään päällystämättömästä hylystä ja normaalisti systeemiin kuuluu pH:n kontrollointi, sillä säilöittäessä päällystetyn hyllyn sisältämät aineet voivat aiheuttaa pH-vaihteluita. (Bajpai 2018, s. 148; Paulapuro 2008, s. 189.) Monet eri tekijät (esimerkiksi täyteaineet, päällystys, kalanterointi ja märkälujuuutta parantavat aineet) vaikuttavat siihen, kuinka paljon energiaa paperin pulperointi vaatii

(Paulapuro 2008, s. 80). Märkäpäässä syntynyttä hylkyä kutsutaan märkähylyksi, kun taas kuivahylyllä tarkoitetaan missä tahansa muussa vaiheessa syntynyttä kuivaa paperihylkyä.

Syntynyt hylky siirtyy joko automaattisesti tai manuaalisesti lähimpiin pulppereihin, jotka sijaitsevat paperikoneen alla. Paperikoneella voi olla useita pulppereita, kuten esimerkiksi kalanterin, reunanauhaleikkurin ja puristinosan pulpperi. Pulpperissa paperin rakenne ja sen sidokset hajotetaan niin hyvin, ettei näkyviä paperipaloja tai kuitukasaantumia ole. Lopuksi hylky laimennetaan veden avulla pumpattavaksi massaksi ja pumpataan hylkytorneihin, joista se siirtyy lopulta sekoitussäiliön kautta takaisin tuotantoprosessiin. Hylkytorneissa olevan hylyn kiintoainepitoisuus on usein 2–5 % riippuen pulperoinnista ja ne ovat usein varustettu pumpuilla, jotka kierrättävät hylkymassaa tornin sisällä. Näin vältetään kuitujen kasaantumiselta ja pidetään hylyn ominaisuudet mahdollisimman vakiona. Hylkytornien kapasiteetti mitoitetaan usein vastaamaan paperikoneen 2–4 tunnin nettotuotantoa. (Paulapuro 2008, s. 79, 181-186.)

Hyllylle voidaan lisäksi suorittaa muita prosesseja kuten hylyn sakeutus, jolloin hylkymassasta poistetaan ylimääräistä vettä. Hylkyä voidaan tarvittaessa myös seuloa ja puhdistaa hajoamattomista paperin paloista sekä muusta liasta. (Holik 2006, s. 205.)

3.2 Hylyn käytön haasteet

On huomioitavaa, että jo kerran kuivatut paperin kuidut ovat ominaisuuksiltaan heikompia kuin uuden ja tuoreen paperimassan kuidut. Kerran kuivattujen kuitujen vedenpoisto- ja kuivausominaisuudet ovat erilaiset verrattuna neitseellisiin kuituihin. Koska kuitujen sisällä olevan veden haihduttaminen on vaativaa, muuttaa kuivatus kuidun rakennetta pysyvästi (Fardim 2011, s. 636.). Tästä syystä paperikoneen katko on sitä todennäköisempi mitä enemmän prosessoitua hylkyä käytetään uuden paperimassan rinnalla.

Hylky vaikuttaa myös paperin lopullisiin ominaisuuksiin. Ongelmallista tässä on se, että laatuvaihtelut voidaan havaita vasta valmiista tuotetusta paperista, jolloin laatuvaihteluiden kontrollointi viivästyy. Hylky sisältää myös täyteaineita ja kemikaaleja, jolloin niiden määrä paperimassassa lisääntyy. (Ropponen, Ritala ja Pistikopoulos 2011.) Hylyn sisältämät aineet on esitetty taulukossa I.

Taulukko I Hylyn käytön seurauksena lisääntyvät aineet (Alén 2007, s. 29).

PÄÄLLYSTÄMÄTÖN HYLKY	Kationiset polymeerit (C-PAM, poly-DADMAC, PEI, C-tärkkelys, PAE)
PÄÄLLYSTETTY HYLKY	Kaoliini Kalsiumkarbonaatti Talkki Lateksi (SB, PVA) Sideaineet Anioniset polymeerit (A-PAM, CMC) Dispergointiaineet (alkyyilisulfaattit ja -sulfonit)

Paperikoneella tuotetaan lähes aina useampaa eri paperilaatua, jotka eroavat huomattavasti toisistaan. Täten myös eri paperilaatujen valmistuksessa käytettävät kemikaalien ja massojen suhteet ja määrät vaihtelevat. Esimerkiksi keskiraskaasti päällystetty MWC-paperi sisältää pääasiassa mekaanista massaa (hioketta) ja on päällystetty kahteen kertaan, kun taas erikois-kevyet paperit koostuvat pääasiassa kemiallisesta massasta (sellu) eikä niitä päällystetä. (Paulapuro 2000, s. 23.)

Kaikki syntynyt hylky sekoitetaan lopulta tuoreeseen massaan kyypissä (sakean massan säiliö). Koska käytettävän hylyn ominaisuudet, kuten kuitujen ja kemikaalien keskinäiset suhteet, voivat erota tuotannossa sillä hetkellä olevan paperin ominaisuuksista, järkyttää hylyn käyttö täten haluttua massan koostumusta. (Leiviskä 2009, s. 192, 203.)

Hylyn ominaisuudet paperintuotannossa ovat huonosti tunnettuja, sillä hylyn koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat suuresti, eikä ole olemassa yhtä tunnettua hylkyluokkaa. Vaikka hylyn sisältämät ainesosat tunnetaan, ovat niiden ominaisuudet muuttuneet jo aiemmin prosessissa, eivätkä niiden ominaisuudet täten ole samoja kuin neitseellisillä vastineillaan. Eri-tyisesti hienojen kuitujen ja täyteaineiden retentio- ja flokkulaatio-ominaisuudet eroavat tuoreista materiaaleista. (Leiviskä 2009, s. 203.)

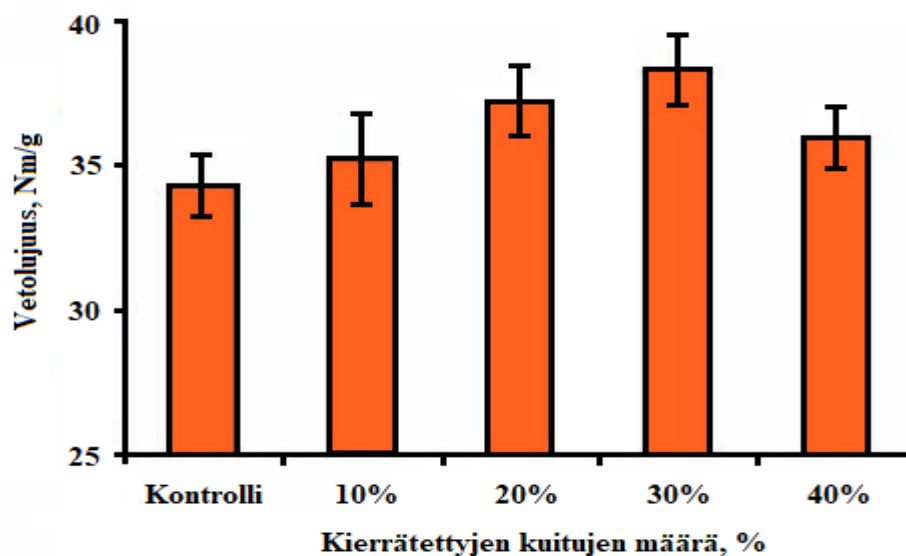
Päällysteaineena käytettävä kalsiumsulfaatti (CaSO_4) kumuloituu paperikoneen vesikiertoon. Kalsiumsulfaatti lisää prosessiveden Ca^{2+} -pitoisuutta. Suurempi Ca^{2+} -pitoisuus tarkoittaa suurempaa johtavuutta, jolloin retentiota parantavien kemikaalien toiminta heikenee. Suurempi kalsiumionien läsnäolo aiheuttaa myös saostumia paperikoneen pinnoille. (Paltakari 2009, s. 132.)

3.2.1 Hylkymassan kuidut

Kuivatusosalla paperimassasta poistetaan vettä, jolloin kuitujen ominaisuudet muuttuvat. Kun kuituseinämässä oleva vesi poistuu, puhutaan kuitujen sarveistumisesta (engl. hornification). Kuidun kuivuessa sen soluseinässä muodostuu vetysidoksia mikrofibrillien välille, joka johtaa soluseinän joustamattomuuteen. Joustamaton soluseinä vähentää kuidun turpoamista. Kun hylkymassaa pulpperoidaan, ei jo-kuivattu kuitu kykene enää turpoamaan samalla tavalla kuin ei kuivattu, tuore, puukuitu. Turpoamattoman kuidun pinta-ala on turvonnutta kuitua pienempi, jolloin se muodostaa vähemmän paperin lujutta kasvattavia, kuitujen välisiä, sidoksia. Näin ollen sarveistuneet hylkymassan kuidut aiheuttavat paperin lujouden heikkenemistä. (Lindström ja Ström 2022.)

Lvov ym. (2006) tutkivat paperihylyn kuitujen päällystämistä *layer by layer*- tekniikalla (lbl). Lbl-menetelmässä hylkykuituja päällystettiin (PAH/PSS) -kerroksilla (poly(allyyliamiinihydrokloridi)/natriumpolystyreenisulfonaatti), joilla vaikutetaan kuitujen pintavarauksiin. Tutkimuksessa mitattiin neutseellisten kuitujen pintavaraus, joka oli -20 ja 40 mV välillä, kun pH oli 3–9. Koska yleensä neutseellisten kuitujen pintavaraus on negatiivinen (Lu ym. 2007), vetävät positiivisen pintavarauksen omaavat lbl-kuidut uusia kuituja puoleensa, jolloin tuloksena syntyy vahvempi paperi.

Kuvassa 5 on esitetty paperin vetolujuuden muutos, kun kierrätettyjen ja päällystettyjen kuitujen määrää paperimassassa kasvatettiin.



Kuva 5 Lbl-menetelmällä päällystettyjen hylkykuitujen käytön vaikutus paperin vetolujuuteen. Verrokkina käytetyn paperin, joka valmistettiin 100 % neitseellisistä kuiduista, vetolujuus oli noin 35 Nm/g. Vetolujuus parani lbl-menetelmällä käsitellyn hyllyn lisäämisen seurauksena aina 30 m-% asti. (Lvov ym. 2006.)

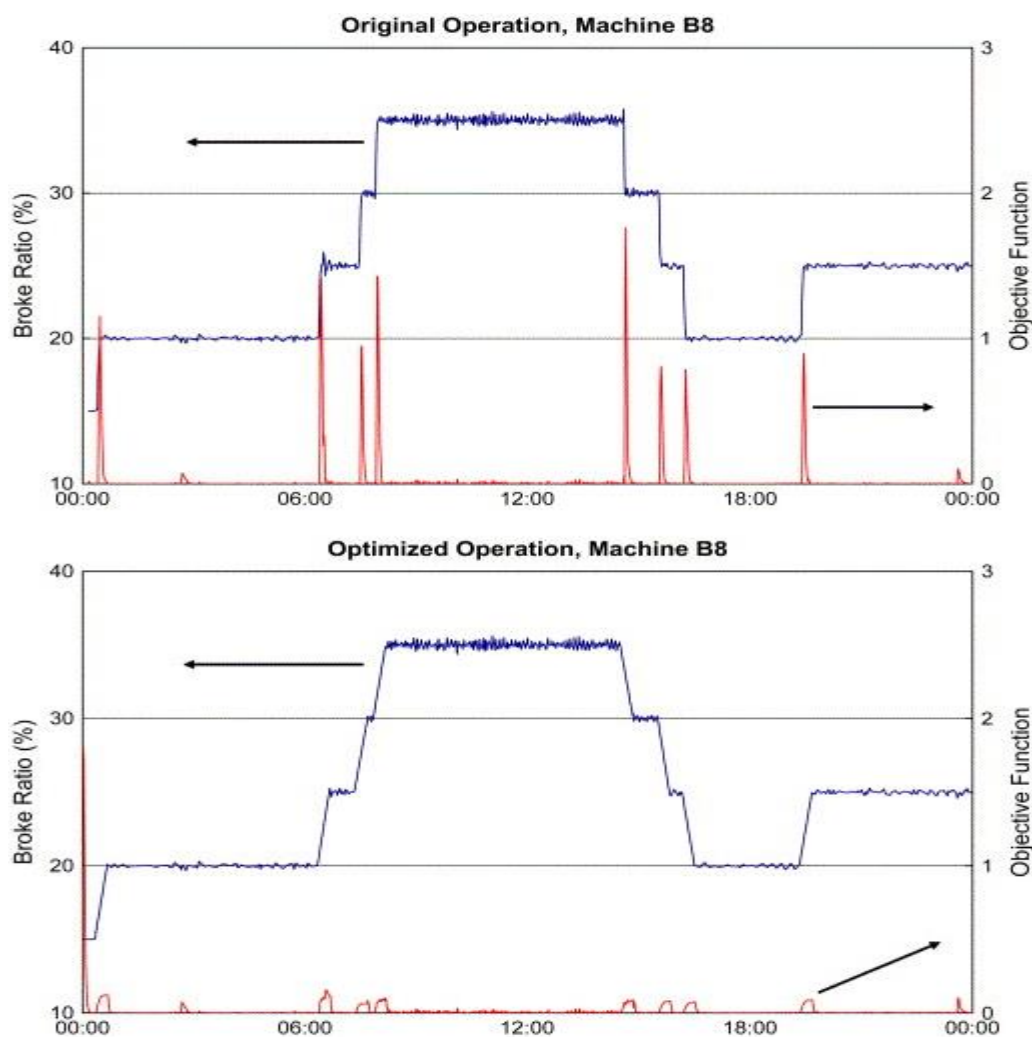
Tutkimuksen mukaan kuitujen väliset vetysidokset lisääntyivät ja paperin vetolujuus kasvoi, kun tuotannossa käytettyä hylkyä käsiteltiin lbl-tekniikalla. Paperin lujuus kasvoi jopa 15 %, kun hyllyn osuus paperimassasta oli 30 m-%. Paperin lujuus laski hylkyosuuden ylittäessä 40 m-%, mutta oli silti edelleen suurempi kuin vertailupaperin lujuus. Verrokkina käytettiin paperia, joka oli valmistettu vain neitseellisistä kuiduista ilman hylkyä. (Lvov ym. 2006.)

3.2.2 Hyllyn annostelu

Katkon sattuessa paperikoneen tuotantoa ei keskeytetä, vaan se pysyy ennallaan (Bonhivers, Perrier ja Paris 2002). Tämän vuoksi hyllyn annostelun optimointi on tärkeää.

Hylkyä voidaan annostella pääasiassa kahdella eri tavalla: joko pitämällä hyllyn määrä hylkytornissa tai hyllyn osuus paperimassassa vakiona, vaikka jälkimmäinen ei käytännössä useinkaan ole mahdollista. Esimerkiksi paperikoneen ajettavuusongelmien seurauksena hylkyä syntyy runsaasti, jolloin sen käyttöä suhteessa tuoreeseen massaan joudutaan lisäämään. Hyllyn osuus paperimassasta voi vaihdella vuorokaudessa paljonkin, jopa 5 ja 40 prosentin välillä. (Leiviskä 2009, s. 192, 203.)

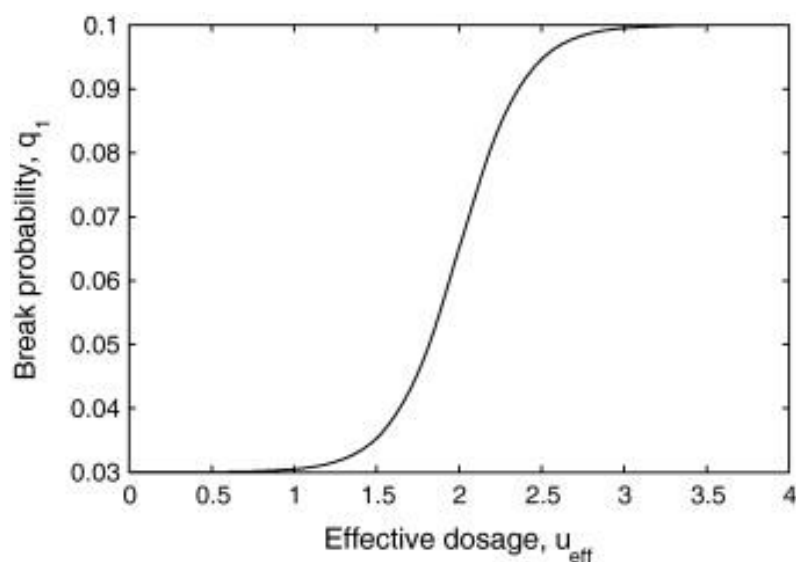
Dabros ym. (2005) selvittivät optimaalisinta hyllyn kierrätyksen strategiaa sanomalehtipaperia valmistavalla tehtaalla. Tutkimus suoritettiin 24 tunnin aikana. Paperikoneelle syötetyn hyllyn suhdetta muutettiin kahdella tapaa: alkuperäisestä hylkysuhteesta (hylkymassan osuus tuoreesta paperimassasta) välittömästi tavoitesuhteeseen ja alkuperäisestä hylkysuhteesta hitaasti kohti tavoiteltua hylkysuhdetta. Hyllyn syöttöä muutettaessa seurattiin perälaatikon stabiiliutta virtauksen, kiintoainepitoisuuden ja lämpötilan perusteella. Myös liuenneiden aineiden osuutta massassa sekä kuitujen pituutta tarkkailtiin. Tulosten perusteella hitaasti muutettu hylkysuhde oli optimaalisin vaihtoehto ja häiritsi vähiten perälaatikon olosuhteita. Tulokset on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6 Kahden erilaisen hyllyn syöttötavan vaikutus perälaatikon stabiiliuteen sanomalehtipaperia tuottavalla paperikoneella. Vasemmalla pystyakselilla on kuvattu hylkysuhde, oikealla perälaatikon stabiiliutta kuvaava suure (Objective function). Vaaka-akselilla on aika. (Dabros ym. 2005.)

Kun hyllyn syöttö pidetään vakiona, syntyy paperimassaan laatuvariaatioita ainoastaan, jos hyllyn laadussa tapahtuu muutoksia. Kuten aiemmin todettiin, syöttöä ei useinkaan voida pitää vakiona, vaan sitä joudutaan muuttamaan hylkytilanteen mukaan. Jos hyllyn tasoa hylkytornissa pidetään vakiona (toisin sanoen, kun hylkysuhdetta muutetaan), aiheutuu paperimassaan enemmän laatuvariaatioita, sillä silloin muuttujia on hyllyn laadun lisäksi hyllyn annostelu. (Leiviskä 2009, s. 203.) Hyllyn annostelun äkillinen nostaminen lisää hieno- ja täyteaineiden määrää määssä päässä, joka johtaa kationisen tarpeen lisääntymiseen (Paulapuro 2008, s. 188).

Mikäli hylkyä on syntynyt paljon esimerkiksi ajettavuusongelmien seurauksena ja halutaan välttää hylkytornien ylivuoto, on hylkyä käytettävä enenevässä määrin. Tällainen tilanne on ongelmallinen, sillä lisääntynyt hyllyn käyttö lisää uuden katkon todennäköisyyttä johtuen hyllyn kuitujen heikkoudesta verrattuna neitseellisiin kuituihin. (Ropponen ym. 2011.) Tällainen tilanne ruokkii helposti itse itseään, joten sitä tulisi välttää. Kuvassa 7 on esitetty paperikoneen katkon todennäköisyys hyllyn syötön funktiona.



Kuva 7 Paperikoneen katkon todennäköisyys hyllyn syötön funktiona. Katkon todennäköisyys kasvaa huomattavasti, kun hyllyn syöttö ylittää 1,5 yksikköä. (Ropponen ym. 2011.)

Croteau ja Roche (1987) tutkivat hylkytornien ylivuodon estämistä muuttamalla sanomalehtipaperia tuottavan paperikoneen hyllyn annostelua ja kuiva-ainepitoisuutta. Koeajoja tehtiin kolme ja ne olivat taulukon II mukaiset.

Taulukko II Koeajojen parametrit (Croteau ym. 1987).

	A	B	C
Hyllyn määrä hylkytornissa alussa (%)	20	20	20
Hylkysuhde (%)	20	10–40	10–40
Hylkysuhteen suurin muutos (% per h)	-	20	20
Hyllyn kuiva-ainepitoisuus (%)	2,5	2,5	3,5

Kaikissa kolmessa kokeessa hyllyn määrä alussa oli 20 % täydestä hylkytornin tilavuudesta. Kokeissa B ja C hyllyn määrän tornissa annettiin vaihdella välillä 20–40 % ennen kuin hylkysuhdetta muutettiin alkuperäisestä 10 prosentista. Hylkytason (hyllyn määrä järjestelmässä) ylittäessä 40 % hylkysuhdetta muutettiin hylkysuhteen suurimmalla muutosnopeudella (5 % per 15 min) 40 prosenttiin. Hylkytason pudotessa 20 prosenttiin hylkysuhde laskettiin takaisin 10 prosenttiin. Koeolosuhteet kokeissa B ja C olivat samat lukuun ottamatta hyllyn kuiva-ainepitoisuutta. Kokeiden mukaan koe C tuotti vähiten hylkytornien ylivuotoa (2 % hylkykapasiteetista). Koe A aiheutti eniten ylivuotoa (70 %) ja koe B asettui näiden välille (27 %). Ylivuodot voidaan välttää parantamalla paperikoneen tehokkuutta tai sakeuttamalla hylkyä, jolloin sen kuiva-ainepitoisuus kasvaa ja hyllyn tilavuus pienenee. (Croteau ym. 1987.)

3.2.3 Mikrobit

Mikrobeja tavataan kaikissa paperin tuotantoprosesseissa, sillä kuuma ja kostea paperikone tarjoaa ihanteellisen ympäristön niiden kasvulle. Myös pH-alue on usein suotuisa 4–9. Mikrobit voivat olla viruksia, bakteereja, syanobakteereja, leviä, hiivoja, sieniä ja alkueläimiä. Mikrobeja pääsee prosessiin monesta eri paikasta, sillä paperintuotanto on avoin prosessi. Kontaminaatio voi päästä prosessiin ilmasta, prosessivedestä tai likaisista raaka-aineista. (Alén 2007, s. 182-186.) Mikrobeja pyritään välttämään biosideilla.

Mikrobit viihtyvät hyvin myös hylkyjärjestelmissä ja erityisesti hylkytorneissa niitä tavataan runsaasti, josta ne päätyvät hyllyn käytön seurauksena prosessiin. Mikrobit voivat laskea prosessin redox-potentiaalia ja pH-tasoa, jolloin märän pään kemia häiriintyy ja kemiallinen kerrostuminen on mahdollista. Erityisesti emäksisissä olosuhteissa toimivien paperikoneiden, jotka käyttävät tärkkelystä, hylkyjärjestelmän pH-arvoa tulisi kontrolloida tarkoin, sillä pH:n laskeminen alle 7 voi johtaa hiilidioksidin muodostumiseen, joka taas johtaa lisääntyneeseen massan vaahtoamiseen. Lisäksi Ca^{2+} -ionien määrä kasvaa, zeta-potentiaali muuttuu ja white pitch -ilmiötä, jota käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.4, esiintyy enemmän. (Alén 2007, s. 183, 190.)

Mikrobit käyttävät ravinnokseen erityisesti paperimassaan lisättävää tärkkelystä, jolloin ne tuottavat erilaisia kaasuja. Kaasuista syntyy henkilökunnalle hajuhaittoja ja ne voivat olla jopa vaarallisia. Esimerkiksi hylkytorneissa anaerobiset bakteerit voivat tuottaa rikkivetyä, joka on myrkyllinen ja räjähtävä kaasu. Muodostuneet hajut kulkeutuvat usein myös valmiiseen paperiin asti, jolloin ne pilaavat esimerkiksi elintarvikepaperin. Mikrobit havaitaan usein esimerkiksi tankkien limoittuneena pintana. Tankkien ja muiden rakenteiden pinnalta irrotessaan limapaakut aiheuttavat paperiin jälkiä ja reikiä, jolloin ne voivat johtaa paperikoneen katkoon. (Alén 2007, s. 183, 191.) Ottaen huomioon, että tärkkelyksen muodostamat sidokset ovat elintärkeitä paperin kestävyydelle, on mikrobeilla myös valmiin paperin laatua heikentävä vaikutus.

Mikrobien kasvua voidaan hillitä, kun hylkyä ei seisoteta torneissa liian kauaa. Erityisesti ennen hallittuja paperikoneen alasajoja ja huoltoseisokkeja tulisi hyllyn määrä minimoida nostamalla tuotannon hylkysuhdetta. Mikäli hylkyä kuitenkin joudutaan varastoimaan pitkiä aikoja, tulisi käyttää säilöntäaineita. (Alén 2007, s. 194.)

Chaudhary ym. (1997) selvittivät, mitä mikrobeja päällystetyn hyllyn hylkyjärjestelmästä tavataan. Löydetyt mikrobit on esitetty taulukossa III. Tutkimus suoritettiin keräämällä näytteitä kuukausittain vuoden ajan hylkyjärjestelmästä ja asettamalla näytteet kasvualustoille 48–72 tunniksi.

Taulukko III Tutkimuksessa löydetty mikrobit sekä niiden esiintyvyyden todennäköisyydet (Chaudhary ym. 1997).

Mikrobi	Esiintyvyyden todennäköisyys, %	Eliökunta
<i>B. alvei</i>	83	bakteeri
<i>B. circulans</i>	75	bakteeri
<i>Enterobacter sp</i>	41	bakteeri
<i>Pseudomonas sp</i>	58	bakteeri
<i>Citrobacter sp</i>	58	bakteeri
<i>Rhizopus sp</i>	33	sieni
<i>Alternaria sp</i>	58	sieni
<i>Aspergillus flavus</i>	33	sieni
<i>Rhodotorula sp</i>	91	sieni

Taulukon III perusteella voidaan päätellä, että hylkyjärjestelmässä tavattavat mikrobit ovat pääsääntöisesti bakteereja ja sieniä. Muita mikrobeja tutkimuksessa ei havaittu.

3.2.4 Tahmeat materiaalit ja white pitch -ilmiö

White pitch -ilmiöllä (wp-ilmiö) tarkoitetaan päällystetyn hyllyn sisältämien tahmeiden ja synteettisten sideaineiden aiheuttamia saostumia. Ne ovat usein monimutkaisia agglomeraatioita (kasaantumia) lateksisten päällystysaineiden, kuten styreenibutadieenin (SB) tai polyvinyylisetaatin (PVA) sekä anionisten hienoainesten, välillä. (Neimo 1993.)

Saostumien ehkäisyn kannalta on tärkeää, että päällystetty hylky pulperoidaan perusteellisesti, jolloin hylkymassaan ei jää isompia paloja. Saostumista esiintyy usein paperikoneen puristin- ja kuivatusosien sylinterien pinnoilla, jossa ne aiheuttavat paperiin reikiä ja pinnoitusraitoja. Lisäksi saostumat aiheuttavat huopien tukkiutumista, jolloin nesteenpoisto raihasta heikentyy. Saostumat tukkivat myös viiraosan imulaatikoita sekä aiheuttavat katkoja paperi- ja päällystyskoneella, jolloin tuotannon tehokkuus laskee. Myös kemiallisten lisäaineiden tehokkuus saattaa laskea saostumien myötä. (Neimo 1993; Vähäsalo and Holmbom 2005.)

Vähäsalon ym. (2005) tekemän tutkimuksen avulla selvisi, kuinka wp-ilmiötä voidaan vähentää paperikoneen puristin- ja kuivatusosien pinnoilta. Sen avulla ilmeni, että paljon

sideaineita sisältävien partikkelien ja hienoaineksen välinen suhde oli avaintekijä aggregaattien muodostumiselle. Kun hienoaineksen osuus suhteessa sideaineisiin oli suuri, wp-ilmiön aiheuttamia saostumia oli vähemmän. Tutkimuksen mukaan hienoaines vähentää sideaineiden, kuten lateksin, tahmeutta, jolloin saostumia syntyy vähemmän.

Samaisessa tutkimuksessa huomattiin myös, että saostumien muodostuminen oli voimakkaampaa matalammilla lämpötiloilla (20 °C) kuin korkeammilla lämpötiloilla (50 °C). Havaittiin myös, että paperikoneen ajonopeudella on vaikutusta saostumien muodostumisessa: korkeammilla nopeuksilla saostumia syntyi vähemmän. Koska hitaammilla pyörimisnopeuksilla puristinosalla viiran läpi ehtii poistua enemmän vettä kuin nopeilla ajonopeuksilla, on rainassa vähemmän vettä, kun se saavuttaa nipin. Veden läsnäolon tulkittiin näin heikentävän saostumien muodostumista niin kutsutun imukuppiadheesioin vaikutuksesta. Suurempi vesimäärä myös huuhtoo sideaineita pois sylinteriltä. (Vähäsalo ym. 2005.) Haynes (2013) tutki päällystetyn paperin pulpperoinnin vaikutusta tahmeisiin materiaaleihin. Hayneksen mukaan pidempi pulpperointiaika (yli 15 minuuttia) sekä pieni kiintoainepitoisuus (4 % verrattuna 8 ja 12 prosenttiin) vähensivät tahmeiden materiaalien aiheuttamia saostumia paperikoneella.

Neimo (1993) selvitti, voidaanko päällystetyn LWC-hylyn kiinteä ja kolloidinen hienoaines koaguloida käyttämällä erilaisia suoloja ja/tai kationisia polyelektrolyyttejä. Tällöin wp-ilmiön todennäköisyys prosessissa pieneni. Koepaperi päällystettiin 95-prosenttisesti SB-lateksilla, se pulperoitettiin ja laimennettiin 0,5 % kiintoainepitoisuuteen ja erotettiin kolmeen eri fraktioon, jotka olivat: karkeat kuidut, kiinteä hienoaines ja kolloidinen hienoaines. Kumpikin hienoainesfraktio laimennettiin vielä 0,05 % kiintoainepitoisuuteen. Tutkimalla kunkin fraktion suhteellista sameuden alenemaa koagulantin konsentraation funktiona saatiin selville paras koagulantti. Kun fraktioihin muodostui saostumia, ne alkoivat laskeutua, jolloin neste kirkastui. Kokeiden perusteella alumiinisulfaatti sekä polyalumiinikloridi (PAC) olivat ylivoimaisesti parhaat saostuskemikaalit kolloidiselle fraktiolle, kun taas kiinteälle hienoainesfraktiolle paras saostumien määrä saatiin kationisilla polymeereillä.

3.2.5 Hylkyjärjestelmään päätyneet epäpuhtaudet

Hylkyjärjestelmään voi päätyä epäpuhtauksia, kun paperia siirretään konetasolla pulperoitavaksi manuaalisesti ihmisen toimesta. Rautin ym. (2005) mukaan paperissa olevista likatahoista 60–65 prosenttia oli peräisin hyllyn joukkoon päätyneestä liasta ja epäpuhtauksista. Näitä epäpuhtauksia olivat esimerkiksi pakkausteippi, kuumaliima ja muut muoviosat. Perinteisen seulonnan avulla epäpuhtauksia oli vaikea poistaa, sillä ne hajoavat pieniksi osiksi pulperoinnin ja pumppauksen seurauksena. Epäpuhtauksista päästiin eroon käyttämällä hyllyn puhdistusjärjestelmää, joka koostui pyörrepuhdistimesta ja kahdesta painelajitimesta.

4 Johtopäätökset

Tässä työssä selvitettiin paperintuotannossa syntyvän hyllyn käyttöön liittyviä haasteita. Hyllyllä tarkoitetaan prosessissa syntynyttä paperia, joka ei esimerkiksi laatupoikkeamien vuoksi kelpaa asiakkaalle. Myös paperikoneen katkojen aikana syntyy runsaasti hylkyä. Työn tavoitteena oli etsiä keinoja, joilla vähentää hyllyn käytön tuomia ongelmia. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Paperin valmistusprosessin aikana puukuidusta haihdutetaan vettä, jolloin sen rakenne muuttuu ja se kykenee muodostamaan vähemmän paperin lujuutta parantavia sidoksia. Tämän vuoksi hyllyn käyttö heikentää paperin lujuusominaisuuksia. Kun hylkymassan kuituja päällystettiin layer by layer -tekniikalla, niiden pintavaraukset muuttui positiiviseksi, jolloin ne muodostivat neitseellisten, pintavaraukseltaan negatiivisten, kuitujen kanssa vahvemman paperin kuin mitä tuoreista päällystämättömistä kuiduista valmistettu paperi oli.

Kun hylkyä syntyy runsaasti, on sitä myös käytettävä nopeasti, jotta vältetään hylkytornien ylivuodolta. Kun hylkyä käytetään, tulee hylkysuhteen äkillistä kasvattamista välttää, jotta vältetään paperikoneen katkoilta.

Erityisesti päällystetyn paperin hylkyjärjestelmässä viihtyvät mikrobit aiheuttavat pH-arvojen muutoksia, jolloin märän pään kemia häiriintyy. Mikrobit voivat olla esimerkiksi leväkasvustoja paperikoneen pinnoilla, josta irrotessaan ne aiheuttavat paperiin jälkiä, reikiä ja mahdollisesti paperikoneen katkon. Mikrobit tuottavat myös runsaasti erilaisia kaasuja käyttäessään ravinnokseen muun muassa tärkkelystä. Kaasut paitsi aiheuttavat paperiin ja tuotantotiloihin hajuhaittoja, ovat osa niistä myös vaarallisia räjähtävyytensä takia. Mikrobin kasvua pyritään estämään erilaisilla biosideilla sekä hylkytornien sekoittamisella.

Tutkimuksen perusteella päällystetty hylky on kaikkein ongelmallisinta sen sisältämien päällystysaineiden vuoksi. Päällystysaineet aiheuttivat paperikoneen vesikierron kautta saostumia ja häiritsivät perälaatikon olosuhteita. Saostumat vähenivät, kun pulpperointia tehostettiin ja kiintoainepitoisuutta laskettiin.

Tutkimuksessa esiteltiin tyypillisimmät hyllyn käyttöön liittyvät ongelmat sekä löydettiin keinoja niiden ratkaisemiseksi. Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että hyllyn käyttö ja sen vaikutukset prosessiin ovat monen muuttujan summa. Vaikka tässä työssä hyllyn käytöstä

aiheutuvia ongelmia tarkasteltiin yksittäin, käytännössä niitä tulee tarkastella suurempana kokonaisuutena, jossa ne ovat sidoksissa toisiinsa. Yhden ongelman korjaaminen voi johtaa toisen kärjistymiseen. Esimerkiksi prosessin hylkysuhdetta ei voida äkisti nostaa, sillä se vaikuttaisi merkittävästi määrän pään olosuhteisiin. Toisaalta hylkyä ei voida myöskään seisottaa pitkiä aikoja hylkytorneissa mikrobien kasvun vuoksi.

Hylkykuitujen heikko kyky muodostaa paperin lujutta parantavia sidoksia on yksi merkittävimmistä asioista, jotka estävät suuremmat hylkysuhteet paperin tuotannossa. Mikäli hylkysuhdetta voitaisiin kasvattaa entisestään, olisi suuresta määrästä hylkyä tarvittaessa helppo päästä eroon. Tutkimuksessa ei otettu kantaa, kuinka yksinkertaista ja taloudellista kuitujen päällystäminen layer by layer -tekniikalla on, joten jatkotutkimuksissa voisi syventyä siihen. Lisäksi voisi etsiä muita menetelmiä parantaa hylkykuitujen sidosten muodostumisominaisuuksia.

Lähteet

- Alén R (2007) *Papermaking Science and Technology. Book 4, Papermaking Chemistry*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- Bajpai P (2018) *Biermann's Handbook of Pulp and Paper.: (Raw Material and Pulp Making)*. : Elsevier.
- (2015) *Pulp and Paper Industry: Chemicals*. Saint Louis: Elsevier.
- BONHIVERS JC, PERRIER M and PARIS J (2002) Management of broke recirculation in an integrated paper mill. *Pulp & Paper Canada* 103(2): 44-49.
- Chaudhary A, Gupta LK, Gupta JK and Banerjee UC (1997) Studies on slime-forming organisms of a paper mill—slime production and its control. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 18(5): 348-352.
- Croteau AP and Roche AA (1987) Analysis of Broke Handling and White Water Management in a TCMP-newsprint Mill using a Dynamic Modular Simulation. *IFAC Proceedings Volumes* 20(13): 41-46.
- Dabros M, Perrier M, Forbes F, Fairbank M and Stuart PR (2005) Model-based direct search optimization of the broke recirculation system in a newsprint mill. *Journal of Cleaner Production* 13(15): 1416-1423.
- Fardim P (2011) *Papermaking Science and Technology. Book 6, Chemical Pulping. Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- Haynes R (2013) Colloidal organic content and tackiness of coated broke and recycled fiber. *TAPPI Press* 12(7): 9-21.
- Holik H (2006) *Handbook of Paper and Board*. Weinheim: Wiley.
- Karlsson M (2010) *Papermaking Science and Technology. Book 9, Papermaking : Part 2, Drying*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- Korpinen H and Paltakari J (2013) Testing an activity-based costing model with a virtual paper mill. *Nordic Pulp & Paper Research* 28(1): 146-155.
- Leiviskä K (2009) *Papermaking Science and Technology. Book 14, Process and Maintenance Management*. Helsinki: Paper Engineers' Association.
- Lindström T and Ström G (2022) Bulking of cellulose fibres – a review. *Nordic Pulp & Paper Research* 37(1): 192-204.
- Lu Z, Eadula S, Zheng Z, Xu K, Grozdits G and Lvov Y (2007) Layer-by-layer nanoparticle coatings on lignocellulose wood microfibers. *Colloids and Surfaces.A, Physicochemical and Engineering Aspects* 292(1): 56-62.

- Lvov YM, Grozdits GA, Eadula S, Zheng Z and Lu Z (2006) Dry and wet strength of paper. *Nordic Pulp & Paper Research* 21(5): 552-557.
- Neimo L (1993) Coagulation of anionic fines and colloids originating in LWC broke. *Nordic Pulp & Paper Research* 8(1): 170-175.
- Paltakari J (2009) *Papermaking Science and Technology. Book 11, Pigment Coating and Surface Sizing of Paper*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- Paulapuro H (2008) *Papermaking Science and Technology. Book 8, Papermaking : Part 1: Stock Preparation and Wet End*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- (2000) *Papermaking Science and Technology. Book 18, Paper and Board Grades*. Helsinki: Fapet.
- Pratima B (2018) *Volume 2. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Paper and Board Making*. In: Anonymous : Elsevier, 1.
- Raut NB and Pendharkar A (2005) Effect of Broke Quality and Chemical Additives on Paper Cleanliness. *IPPTA Journal* (No.3): 69-73.
- Rautiainen P (2010) *Papermaking Science and Technology. Book 10, Papermaking : Part 3, Finishing*. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association.
- Ropponen A, Ritala R and Pistikopoulos EN (2011) Optimization issues of the broke management system in papermaking. *Computers & Chemical Engineering* 35(11): 2510-2520.
- Thorn I and Au CO (2009) *Applications of Wet-End Paper Chemistry*. Dordrecht: Springer.
- Vähäsalo L and Holmbom B (2005) Factors affecting white pitch deposition. *Nordic Pulp & Paper Research* 20(2): 164-168.