

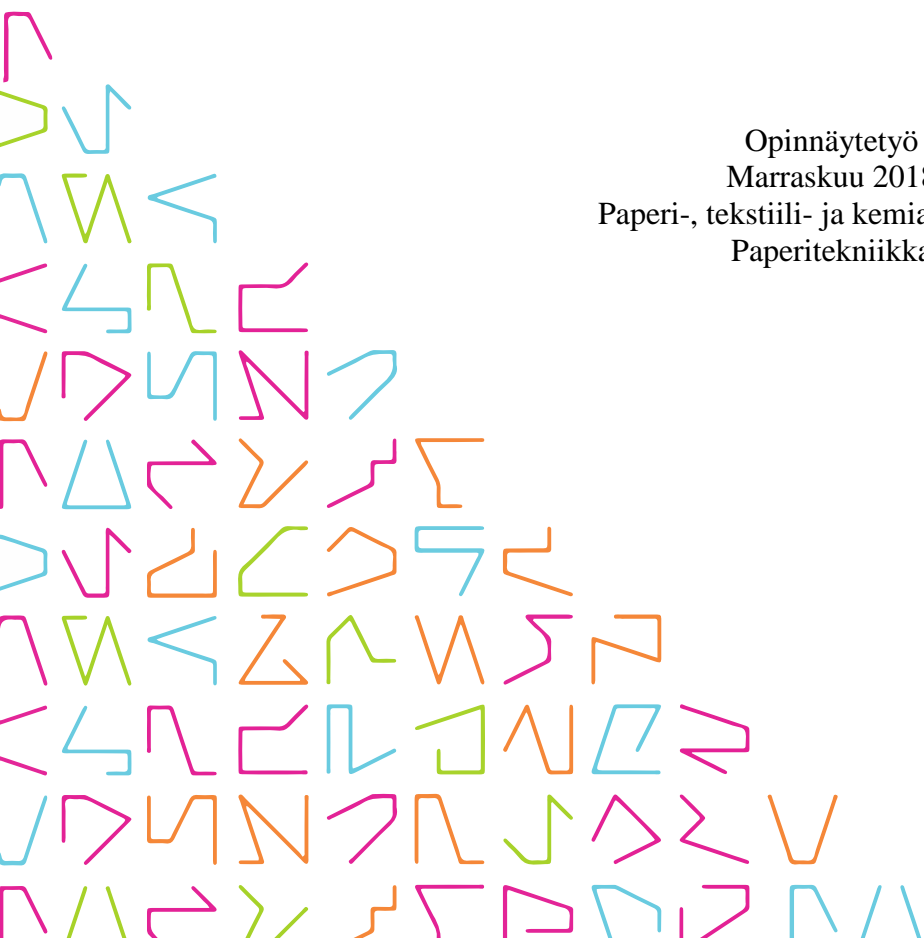


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Kirjallisuusselvitys paperin kitkasta

Teemu Hannula

Opinnäytetyö
Marraskuu 2018
Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikka
Paperitekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikka
Paperitekniikka

HANNULA, TEEMU:
Kirjallisuusselvitys paperin kitkasta

Opinnäytetyö 24 sivua
Marraskuu 2018

Opinnäytetyössä tutkittiin paperin kitkaan vaikuttavia paperinvalmistusprosessin raaka-aineita ja olosuhteita sekä paperin kitkan vaikutusta paperiteollisuuden jalostusprosesseihin. Työssä tutkittiin myös paperin kitkan mittaamisen menetelmiä, laitteita sekä olosuhteiden vaikutuksia mittaustuloksiin.

Paperin valmistuksessa eniten vaikuttavana kitkana pidetään kahden paperin välistä kitkaa. Nykyisissä teorioissa paperin kitka muodostuu adheesiovoimista pintojen välissä ja muodonmuutoksista rajapinnoissa. Paperin kitkaan vaikuttaa todellinen kontaktipinta-ala, joka on vain pieni osa silmällä nähtävästä näennäisestä kontaktipinta-alasta.

Paperin kitkan muodostumiseen on huomattava vaikutus valmistusolosuhteilla sekä valmistuksessa käytettävillä raaka-aineilla. Paperin kosteudella oli suora vaikutus paperin kitkaan, sillä kosteusarvojen noustessa paperissa, kasvoi myös kitkakerroin lineaarisesti samanaikaisesti. Puun uuteaineiden poistaminen massanvalmistuksessa kasvatti paperin kitkakerrointa, mutta ligniinin poiston sellumassasta ei todettu vaikuttavan paperin kitkaan alhaisissa uuteainepitoisuuksissa. Uusiomassan vaikutus paperin kitkaan määräytyi siistausmenetelmän mukaan vaahdotussiistauksen laskiessa paperin kitkaa ja pesussiistauksen kasvattaessa sitä.

Täyteaineista erityisesti saostetun kalsiumkarbonaatin käyttö kasvatti paperin kitkaa, kun taas kaoliinin ja talkin käyttö laski kitkaa. Erikoispigmentit, kuten kalsioitu kaoliini, synteettiset silikaatit ja titaanidioksidi kasvattivat paperin kitkaa. Lisäaineista voiteluaineet ja vaahdonestoaineet laskivat paperin kitkaa samoin kuin AKD-massaliimat. Massaliimoista paperin kitkaa kasvattava vaikutus todettiin tärkkelyksellä ja polyakryyliamidilla.

Paperin kitkalla oli vaikutus useissa eri jälkikäsittelyprosesseissa. Rullauksessa ongelmia aiheutti paperin kerrosten välinen liukuminen, joka aiheutui usein konerullan huonosta rakenteesta. Pituusleikkauksessa liian alhainen kitkakerroin aiheutti helposti kreppiryngkyjä ja puhkeamia, kun taas liian suuri kitkakerroin rullien pomppimista ja tärinää.

Paperin kitkan mittaaminen on herkkä prosessi olosuhteiden muutoksille. Peräkkäiset mittaukset samansuuntaisina ja testikappaleiden tartunta aiheuttivat kitkakertoimen pienenemisen.

Asiasanat: kitka, paperi, valmistus, jälkikäsittely

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Paper, Textile and Chemical Technology
Paper Technology

TEEMU HANNULA:
Literature Survey of Paper Friction

Bachelor's thesis 24 pages
November 2018

The goal of this thesis was to study the manufacturing conditions and raw materials that affect paper friction in papermaking process and how paper friction has an effect on different finishing processes. Measurement methods and the effect of measuring conditions on results were also studied.

Paper-to-paper friction is considered to be the most influential form of friction in papermaking. Modern theories suggest that paper friction consists of the adhesive forces between surfaces and deformations in interlayers. Paper friction is affected by the real contact area, that is not the apparent contact area visible to the eye.

Manufacturing conditions and raw materials used in the paper making process have a significant effect on paper friction. Moisture content of paper had a direct influence to paper friction. Paper friction increased linearly with the moisture content. Wood extractive extraction from pulp had an increasing effect on paper friction. Extraction of lignin from pulp did not have an effect on paper friction in low wood extractive contents. Effects of de-inked pulp to paper friction depended on the de-inking method used in the process. Flotation de-inking method decreased paper friction and washing de-inking increased it.

The usage of precipitated calcium carbonate as a filler had an noticeable increase in paper friction. Fillers such as kaolin and talc had a decreasing effect on the frictional properties of paper. Special pigments such as calcined kaolin, synthetic silicates and titanium oxide increased paper friction. Additives such as lubricants and defoamers had a decreasing effect on friction. From surface sizing agents starch and polyacrylamide had an increasing effect and AKD sizes a decreasing effect on paper friction.

Paper friction affected many finishing processes. Slippage between inner paper layers in reeling resulted mainly from the bad structure of the parent roll. Overly low coefficient of friction in winding caused crepe wrinkles and bursts as too high coefficient of friction caused reels to bounce and vibrate in the winding process.

Paper friction measurements are sensitive processes to changes in conditions. Sequential measurements from same direction and contamination of test pieces had a noticeable decrease in paper friction.

Key words: friction, paper, manufacturing, finishing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KITKA.....	6
2.1	Kitka fysikaalisena ilmiönä.....	6
2.2	Adhesiivinen kitka	6
2.3	Todellinen kontaktipinta	7
2.4	Paperin kitka	7
3	PAPERIN RAAKA-AINEIDEN VAIKUTUS KITKAAN	8
3.1	Puukuidut	8
3.2	Kosteus.....	9
3.3	Täyteaineet.....	10
3.3.1	Talkki ja kaoliini	10
3.3.2	Kalsiumkarbonaatit	10
3.3.3	Erikoispigmentit.....	11
3.4	Lisäaineet	11
3.4.1	Voiteluaineet	11
3.4.2	Vaahdonestoaineet	12
3.5	Massaliimat	12
4	PAPERIN KITKAN MITTAAMINEN	13
4.1	Mittausmenetelmät.....	13
4.2	Mittauslaitteet	14
4.3	ISO 15359	15
4.4	Mittausolosuhteet.....	16
5	PAPERIN KITKAN VAIKUTUS JÄLKIKÄSITTELYSSÄ	18
5.1	Rullaus	18
5.1.1	Konerullaus	18
5.1.2	Pituusleikkaus	19
5.1.3	J-linjatesti	20
5.2	Superkalanterointi	20
5.3	Muut jälkikäsitteilyprosessit	20
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	21
	LÄHTEET	23

1 JOHDANTO

Kahden paperin välinen kitka on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista onnistuneessa paperin valmistuksessa. Paperin kitkan ollessa hyvin tärkeä osa useita eri valmistusprosesseja, on sitä silti tutkittu tähän päivään mennessä suhteellisen rajoitetusti. Hyvällä paperin kitkan hallinnalla mahdollistetaan tehokas rullien käsittely paperikoneelta asiakkaalle saakka.

Paperin kitkan muodostumiseen ja määrään voidaan vaikuttaa heti paperinvalmistusprosessin alussa tehtävillä valinnoilla, sillä raaka-aineet ja valmistusolosuhteet ovat suuressa roolissa paperin kitkan muodostumisessa. Paperin kitkan näkyvimmit vaikutukset tulevat ilmi eri jälkikäsittelyprosesseissa rullauksesta aina kuljetukseen asti.

Tämä opinnäytetyö on toteutettu kirjallisuusselvityksenä paperin kitkasta. Työn tavoitteena oli tutkia kirjallisuudesta paperin kitkaan vaikuttavia asioita, sekä paperin kitkan vaikutusta eri jalostusprosesseihin. Työn ensimmäisessä osuudessa käsitellään kitkaa fysikaalisella tasolla, sekä paperissa. Toisessa osiossa käydään läpi paperin valmistuksessa käytettävien eri raaka-aineiden ja valmistusolosuhteiden vaikutuksia paperin kitkaan. Tämän jälkeen tutkitaan paperin kitkan mittaamista menetelmien, laitteiden ja olosuhteiden kautta. Paperin kitkan vaikutusta eri jälkikäsittelyprosesseihin käydään läpi omassa kappaleessaan.

2 KITKA

2.1 Kitka fysikaalisena ilmiönä

Kitka määritetään fysikaalisesti voimana, joka vastustaa kahden toisiaan vasten liukuvan kappaleen liikettä. Kitkakerroin on kitkavoiman ja normaalivoiman välinen suhde. Kitkavoimassa erotellaan lepokitka, joka vaikuttaa kappaleen liikkeelle lähdössä, ja liikekitka, joka vaikuttaa liukumistilanteessa. Monesti tämän lisäksi erotellaan vielä ulkoinen ja sisäinen kitka toisistaan. Ulkoinen kitka aiheutuu pintojen kerrosten välisistä vuorovaikutuksesta, kun taas sisäinen kitka muodostuu materiaalin sisällä tapahtuvista molekyylien siirtymisistä pois tasapainoasemasta ja hystereesistä, joka tapahtuu, kun osa molekyyleistä ei palaudu vaan muuttaa muotoaan. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 63). Kitkasta puhuttaessa, usein keskitytään kitkasta aiheutuviin haittoihin. Kitkaa kuitenkin tarvitaan monissa toiminnoissa, kuten esimerkiksi auton renkaiden toiminnassa, naulan pysymisessä seinässä ja viulunsoitossa.

2.2 Adhesiivinen kitka

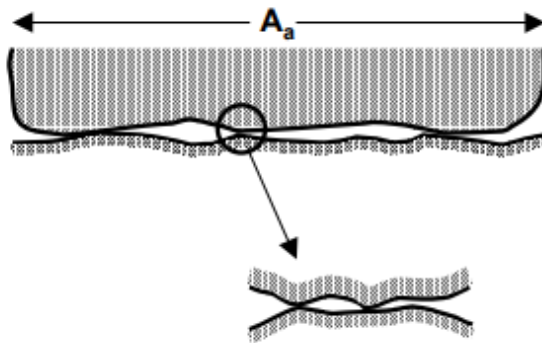
Kitkateoriat nykyään perustuvat olettamukseen, että todellinen kontaktipinta-ala on vain osa näennäistä kontaktipinta-alasta. Todellinen kontaktipinta-ala kasvaa samaan aikaan normaalivoiman kasvaessa. (Kivioja ym. 2007, 64). Adheesio syntyy kahden pinnan molekyylien välisistä voimista ja adhesiivisen sidoksen leikkauslujuus riippuu paljolti materiaalista. Näiden voimien kantamien ollessa hyvin lyhyitä, ovat adhesiiviset sidokset mahdollisia vain alueilla, joissa tapahtuu molekyyllitason kontaktia. Olettaen, että τ on adhesiivisen sidoksen leikkauslujuus ja A_r on todellinen kontaktipinta, saadaan kitkavoima F laskettua käyttämällä kaavaa 1. (Alava 2008, 105-106).

$$F = \tau A_r , \quad (1)$$

Adheesioon perustuva kitkateoria täyttää Kivioja, Kivivuori ja Salosen (2007, 64) mukaan myös kitkalait, koska kitkavoima on syntyneiden kosketuskohtien leikkautumiseen tarvittavan leikkausjännityksen ja todellisen kosketusalan tulo, ja kosketusala taas on suoraan verrannollinen normaalivoimaan eli kuormaan.

2.3 Todellinen kontaktipinta

Kaikkien kiinteiden aineiden pinnat ovat hyvin karheita atomitasolla. Tuotaessa kaksi pintaa kontaktiin toisiaan vasten, todellinen kontaktipinta on vain hyvin pieni osa näennäisestä kontaktipinnasta, joka on mahdollista silmällä havaita. Tämä johtuu siitä, että karheat pinnat ovat kontaktissa vain tietyissä kohdissa. Näiden liitospintojen summasta koostuu todellinen kontaktipinta, kuten esitetään kuvassa 1. (Garoff 2002, 5).



KUVA 1. Todellinen kontaktipinta (Garoff 2002, 5).

Todellinen kontaktipinta on riippuvainen pinnan rakenteesta, materiaalin ominaisuuksista ja liitoskohtien kuormituksesta. Kahden pinnan liikkuesssa toisiaan vasten, kitkavoima aiheutuu adheesiosta liitoskohtien ja muiden pinnan reaktioiden kanssa. (Garoff 2002, 5).

2.4 Paperin kitka

Paperinvalmistuksessa paperin kitkaa mitataan kahden paperin välisenä kitkana. Tätä kahden paperin välistä kitkaa pidetään usein tärkeämpänä suurena, kuin paperin kitkaa ulkoisia materiaaleja, kuten metallia kohtaan. Paperin kitkakertoimen määrittäminen normaalivoiman, eikä paineen kautta on tärkeää, joten tässä tapauksessa näennäisellä kontaktipinnalla ja kappaleen muodolla ei ole vaikutusta. Nykyisissä teorioissa paperin kitka muodostuu kahdesta tekijästä, joita on adheesiovoimat pintojen välissä ja muodonmuutokset rajapinnoissa. Adheesiota pidetään tärkeämpänä vaikuttajana, ja se on paremmin tutkittua, kuin muodonmuutokset rajapinnoissa. Muodonmuutosten rajapinnoissa tiedetään olevan tärkeä tekijä siirryttäessä lepokitkasta liikekitkaan, tosin tämän kitkan ala on vielä puutteellisesti tunnettua. (Alava 2008, 104-105).

3 PAPERIN RAAKA-AINEIDEN VAIKUTUS KITKAAN

Paperin valmistuksessa käytettävät raaka-aineet ja niiden sekoitukset vaihtelevat hyvin paljon paperituotteen loppukäytön mukaan. Paperilajeilta vaaditaan hyvin erilaisia ominaisuuksia ja nämä vaikuttavat vahvasti raaka-aineiden valintaan. Painopaperit esimerkiksi tarvitsevat hyviä optisia ominaisuuksia, kun taas pakkauspapereilla lujuus- ja jäykkyysominaisuudet ovat tärkeämpiä. Jokainen eri paperilaji on yksilöllinen sekoitus kuituja, lisäaineita ja kemikaaleja. Suurella osalla paperinvalmistuksessa käytetyistä raaka-aineista on suora vaikutus paperin kitka-arvoihin.

3.1 Puukuidut

Puulajit jaetaan usein havupuihin ja lehtipuihin. Havupuihin kuuluu esimerkiksi mänty ja kuusi, ja lehtipuihin koivu ja leppä. Molempia havupuita, että lehtipuita käytetään paperinvalmistuksessa raaka-aineena. Puun kuidun rakenne koostuu pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä, sekä pienistä määristä puun uuteaineita.

Sellun valmistuksessa puumassasta poistetaan ligniiniä kemiallisin keinoin. Kappanumeroa käytetään mittarina, joka kuvaa paperimassan ligniinipitoisuutta kemiallisen ligniininpoiston jälkeen. Kappanumeron muutoksella ei ole nähty olevan vaikutusta paperin kitkakertoimeen, kun puun uuteainepitoisuus oli alhainen havupuulaaduilla. (Bäckström, Fellers, Htun 1999, 1,4.)

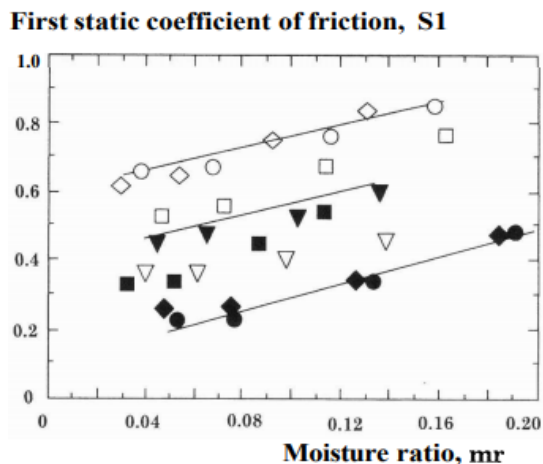
Puun uuteaineiden tiedetään vaikuttavan paperin kitkaominaisuuksiin (Broughton 1952; Inoue ym. 1990; Back 1991; Gurnagul ym. 1992 mukaan, Bäckström ym. 1999, 1). Erilaiset puun uuteaineet vaikuttavat kitka-arvoihin eri tavoin. Rasvahapot alentavat kitkakerrointa, kun taas risiinihapot nostavat sitä (Back 1991 mukaan, Bäckström ym. 1999, 1). Puun uuteaineiden koostumus puulajeissa, kuten lehtipuissa ja havupuissa, vaihtelee ja tämä vaihtelu vaikuttaa paperin kitkaan (Sjöström 1981 mukaan, Bäckström ym. 1999, 1.) Puun uuteaineiden poistaminen massasta kasvattaa paperin kitkakerrointa (Bäckström ym. 1999, 4; Garoff 2002, 50.) Tämän perusteella voidaan päätellä, että puun uuteaineilla on voiteleva vaikutus paperiin. (Bäckström ym. 1999, 4).

Paperinvalmistuksen raaka-aineena käytetään paljon uusiomassaa, eli keräyspaperista valmistettua paperimassaa. Uusiomassa on tärkeä raaka-aine muun muassa sanomalehti-

ja pehmpaperilajeilla. Painetusta keräyspaperista poistetaan painoväri käyttämällä siistausta. Siistauksessa painovärin poistaminen paperista tapahtuu vaahdotussiistauksena tai pesussiistauksena. Vaahdotussiistauksella on todettu olevan paperin kitkakertoimeen laskeva vaikutus, kun taas pesussiistausta käyttämällä paperin kitkakerroin kasvaa huomattavasti. (Airola ym. 2010, 266).

3.2 Kosteus

Paperin kosteus vaikuttaa likimain kaikkiin paperin ominaisuuksiin. Paperin kosteudella tarkoitetaan paperinäytteen massan vähenemistä sillä aikaa, kun paperinäyte kuivatetaan vakiopainoiseksi. Kosteuspitoisuus paperissa määritetään paperin painohäviönä jakamalla poistunut vesi paperin alkuperäisellä massalla. (Knowpap A). Paperin kosteudella on myös selvä vaikutus paperin lepokitkan kitkakertoimeen (Fellers, Bäckström, Htun, Lindholm 1998, 6), kuten esitetään kuviossa 1.



KUVIO 1. Kosteussuhteen vaikutus paperin lepokitkan kitkakertoimeen (Fellers ym.1998, 5).

Kuviosta 1 voidaan selkeästi havaita paperin lepokitkan kitkakertoimen kasvu melkein lineaarisesti samassa suhteessa, kuin paperin kosteuden suhde (Fellers ym. 1998, 6). Kuitujen pehmeneminen, pinnan energian kasvu ja hemiselluloosaketjujen jaksottainen diffuusio ovat muutamia syitä tälle ilmiölle (Inoue ym. 1990 mukaan, Fellers ym. 1998, 8). Muutoksia pinnan energiassa on pidetty osasyynä paperin kitkakertoimen muuttumiselle, mutta tutkimusten mukaan se ei pelkästään yksinään riitä selittämään paperin kitkakertoimen muutosta (Fellers ym. 1998, 8, Bäckström ym. 1999, 4).

3.3 Täyteaineet

Täyteaineita käytetään täyttämään kuitujen välisiä huokosia ja tyhjiä tiloja paperissa. Täyteaineet valmistetaan suoraan luonnon mineraaleista tai kemiallisia keinoja käyttämällä. Täyteaineet ovat aina valkoisia hienojakoisia jauheita, ja jokaisella täyteainelajilla on omanlaisensa partikkelikokojakauma. Partikkelikokoihin voidaan vaikuttaa käyttämällä jauhatus- tai seulomisprosesseja. Paperin valmistuksessa täyteaineet lisätään prosessiin valmiina lietteenä, tai ne lietetään veteen ennen prosessiin lisäämistä. Täyteainemäärät paperinvalmistusprosessissa vaihtelevat paljon eri paperilajien välillä. Täyteaineet ovat myös keskimäärin edullisempia käyttää prosessissa selluun verrattuna, joten niiden käyttö prosessissa on ajan myötä lisääntynyt. Paperin kitkaan täyteaineilla on erilaisia vaikutus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 37).

3.3.1 Talkki ja kaoliini

Talkkia ja kaoliinia käytetään edelleen runsaasti paperin täyteaineina. Kaoliini on melko helposti veteen lietettävä täyteaine, jota käyttämällä saadaan parannettua puupitoisen paperin vaaleutta. Samalla se antaa superkalanteroitaessa paperille korkean kiillon ja hyvän sileyden. Talkki on fysikaalisilta ominaisuuksiltaan hyvin lähellä kaoliinia, mutta toisin kuin kaoliini, se on vettä hylkivää. (Knowpap B). Talkki ja kaoliini ovat molemmat levymäisiä partikkeleja, joilla on alhainen pinnan energia ja huokoisuus. Näiden ominaisuuksien vuoksi niillä on paperin kitkakerrointa pienentävä vaikutus. (Alava 2008, 107).

3.3.2 Kalsiumkarbonaatit

Kalsiumkarbonaatit ovat täyteaineena jo ohittaneet käyttömäärissä kaoliinin ja talkin. Kalsiumkarbonaatteja lisäämällä saadaan muun muassa lisättyä paperin pinnan mikrohuokoisuutta, vaaleutta ja opasiteettia, sekä kestoja kaupunki-ilman rikkidioksidia vastaan. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 39-40). Kalsiumkarbonaattia voidaan käyttää täyteaineena saostettuna, jauhattuna tai näiden sekoituksena. Seos, joka sisältää pääasiassa saostettua kalsiumkarbonaattia, kasvattaa paperin lepo- ja liikekitkakerrointa huomattavasti. Jauhetun kalsiumkarbonaatin lisääminen seokseen taas aiheuttaa sen, että kitkakertoimet pienenevät. Tämän on arveltu johtuvan siitä, että saostetun kalsiumkarbonaatin partikkelikoko ja muoto ovat erilaisia verrattuna jauhattuun

kalsiumkarbonaattiin. Partikkelien muodon vaikutus pinnan makrotason karheuteen on päätelty aiheuttavan eroja kitkakertoimissa. (Enomae, Yamaguchi, Onabe 2005, 5).

3.3.3 Erikoispigmentit

Erikoispigmenttejä ovat synteettiset tai pitkälle jalostetut pigmentit. Erikoispigmenttejä käytetään niiden prosessiin vaikuttavan suuren tehokkuuden vuoksi, vaikka niiden hinta on usein suurempi kuin kuidulla. Tämä vuoksi erikoispigmenttejä käytetäänkin usein vain pienenä osana pigmenttiseosta pääpigmentin ohessa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 40-41). Erikoispigmenttejä voivat olla esimerkiksi kalsioitu kaoliini, synteettiset silikaatit ja titaanidioksidi (Laine 2007, 35). Kaikilla kolmella edellä mainitulla erikoispigmentillä on paperin kitkaa kasvattava vaikutus (Komulainen 2015, 12,25).

3.4 Lisäaineet

Funktionaalisia lisäaineita ovat aineita, jotka vaikuttavat paperin ominaisuuksiin enemmän kuin laatuun ja valmistusprosessiin. Usein kuitenkin on mahdollista, että paperinvalmistusprosessiin vaikuttavien aineiden sivuaineina tulee usein paperin ominaisuuksiin vaikuttavia aineita. Lisäaineita lisätään liimapuristimella tai massan joukkoon. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 42-43).

3.4.1 Voiteluaineet

Voiteluaineita lisätään prosessiin parantamaan päällystysseoksen juoksevuutta, kalanteroitavuutta ja lisäämään päällysteen plastisuutta. Polyetyleeniglykolia ja sulfonoituja öljyjä käytetään parantamaan juoksevuusominaisuuksia, siinä missä erilaisia stearaatteja ja vahoja kalanteroituvuutta. (Knowpap C). Kaikki edellä mainitut voiteluaineet alentavat paperin kitkakerrointa. Voiteluaineita käyttämällä paperin liikekitkan kitkakerroin pienenee tehokkaammin kuin paperin lepokitkan kitkakerroin. Erityisesti vahatyypiset voiteluaineet voivat tiputtaa kitkakerrointa yli 40 prosentilla. (Enomae ym. 2005, 5).

3.4.2 Vaahdonestoaineet

Paperinvalmistuksessa vaahtoamista kontrolloidaan valmistusprosessiin lisättävillä vaahdonestoaineilla. Yleisimpiä ominaisuuksia kaikilla vaahdonestoaineilla on se, että ne ovat pinta-aktiivisia aineita, mutta eivät helposti liukene veteen. Vaahdonestoaineet lisätään prosessiin pieninä pisaroina, jotta ne saadaan sekoitettua prosessiin tehokkaasti. Vaahdonestoaineet pintaliimassa tai päällystyksessä pysyvät paperin pinnassa ja vaikuttavat huomattavasti paperin kitkakertoimeen. Vaahdonestoaineet yleensä pienentävät paperin kitkakerrointa. Vaahdonestoaineissa on kuitenkin eroavaisuuksia, joten niiden vaikutustenkin on mahdollista olla erilaisia. (Komulainen 2015, 25).

3.5 Massaliimat

Paperinvalmistusprosessissa liimauksella voi olla useita tavoitteita, kuten esimerkiksi nesteabsorption vähentäminen tai paperin lujuuden lisääminen. Liimaus on paperin kemiallista käsittelyä ja liima-aineet lisätään prosessissa yleensä massan joukkoon ennen perälaatikkoa. Liimat voidaan pääpiirteittäin jaotella kolmeen eri liimatyyppiin. Näitä ovat märkälujaliimat, kuivalujaliimat ja hydrofobiliimat. (Knowpap D). Massaliimojen osalta vaikutuksia paperin kitkaan on tutkittu vain vähän, mutta tiedetään, että kuiva-aineliimoista tärkkelys ja polyakryyliamidi nostavat paperin kitkaa (Komulainen 2015, 12,24). Hydrofobiset aineet kuten AKD-liimat taas laskevat paperin kitkakerrointa (Airola ym. 2010, 180).

4 PAPERIN KITKAN MITTAAMINEN

Paperin kitkan mittaaminen vaatii hyvin paljon huolellisuutta. Mittausprosessi on hyvin herkkä ulkoisille muuttujille, joten pienetkin muutokset mittausprosessissa voivat vaikuttaa tuloksiin huomattavasti. Riittävää huolellisuutta harrastamalla on kuitenkin mahdollista saavuttaa tarkkoja ja luotettavia mittaustuloksia.

4.1 Mittausmenetelmät

Paperin kitkamittausmenetelmät jaetaan pääpiirteittäin kahteen kategoriaan, jotka ovat mittaus vaakatasossa ja kaltevassa tasossa. Molemmat mittausmenetelmät alkavat niin, että ensimmäinen testikappale kiinnitetään pinnalle, joka on vaakatasossa. Toinen testikappale kiinnitetään kelkan alapuolelle. Kelkkaa käytetään tuomaan tasainen painepinta paperien välille ja kelkan painon tulee ylittää normaalivoima F_n . Tämän jälkeen kelkka lasketaan vaakatasossa olevan pinnan päälle, jolloin testikappaleet tulevat kontaktiin keskenään. (Levlin 1999, 157-158).

Mittauksissa käytettävän kelkan mitat vaihtelevat usein. Yleinen kelkan pinta-ala on noin 60 mm x 60 mm, ja pinnan paine vaihtelee noin 0,5 kPa ja 6,5 kPa välillä. Mittauksen liukumispituus on yleensä noin yhden kelkanmitan verran ja nopeus vaihtelee noin 0,04 mm/s ja 2,5 mm/s välillä. (Johansson, Fellers, Gunderson, Haugen 1997, 1.)

Vaakatasomittausmenetelmässä kelkkaa vedetään asteittain kasvavalla voimalla vaakatasossa, kunnes se alkaa liukua (Levlin 1999, 158). Mittaamalla kelkan liikkeelle lähtöön vaadittu kitkavoima F , saadaan mitattua testikappaleen lepokitkan ja liikekitkan kitkakerroin μ käyttämällä kaavaa 2,

$$\mu = F \div F_n , \quad (2)$$

jossa F on kitkavoima ja F_n on normaalivoima (Johansson ym. 1997, 1).

Kaltevan tason mittausmenetelmässä kelkka asetetaan myös vaakatasoiselle pinnalle. Tämän jälkeen pintaa kallistetaan, kunnes kelkka alkaa liukua. Kelkan liukumisen alun

jälkeen mitataan kallistuskulma α , jota käyttämällä saadaan laskettua lepokitkan kitkakerroin μ käyttämällä kaavaa 3. (Levlin 1999, 158).

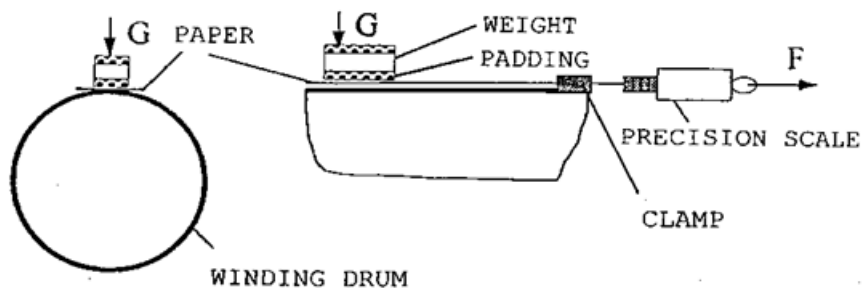
$$\mu = \tan \alpha \quad (3)$$

Vaakatason mittausmenetelmä on paperin kitkamittauksissa paljon laajemmin käytetty menetelmä, sillä kaltevan tason mittauksessa saadaan mitattua vain lepokitkan kitkakerroin.

4.2 Mittauslaitteet

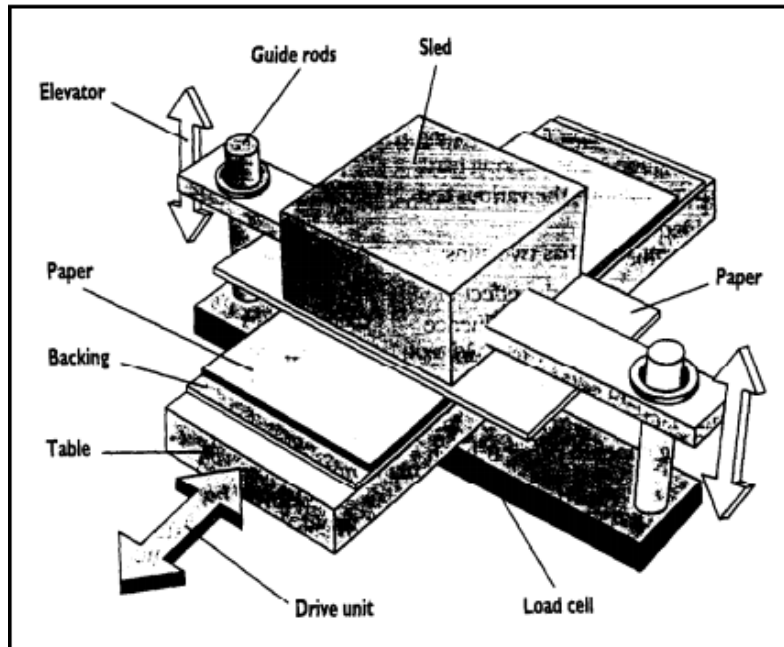
Paperin kitkamittauksiin on kehitetty useita erilaisia laitteita. Kitkaa voidaan mitata esimerkiksi manuaalisella käsin vedettävällä tarkkuusvaa'alla, tai hyvin pitkälle automatisoidulla mittarilla. Mittalaitteilla on tärkeää saada pidettyä mittaukset hyvin tasaisina ja kontrolloituina, jotta on mahdollista saada tarkimmat ja luotettavimmat tulokset.

Manuaalisesta käsin vedettävästä kitkamittarista on esimerkki kuvassa 2 (Kolu 1997). Kuvassa olevalla tarkkuusvaa'alla on mahdollista mitata paperin kitkakerroin paperiarkilta tai rullan päältä. Paperiarkki asetetaan tarkkuusvaakakelkan alle, jonka jälkeen vaa'assa olevasta lenkistä vedetään kelkkaa telan pituusakselin suuntaisesti, kunnes paperiarkki alkaa liikkua. Voima, joka tarvitaan paperin arkin liikkeelle lähdön saamiseksi, mitataan ja kirjataan, jonka jälkeen paperin kitkakerroin on mahdollista laskea käyttämällä kaavaa 2.



KUVA 2. Käsin vedettävä kitkamittari (Kolu, 1997).

Automatisoitujen kitkamittarien hyöty on siinä, että ne eliminoivat mittausvaiheessa esiintyvät inhimilliset virheet. Automatisoidusta kitkamittarista nähdään esimerkki kuvassa 3 (Johansson ym. 1999, 2).



KUVA 3. Automatisoitu paperin kitkamittari (Johansson ym. 1999, 2).

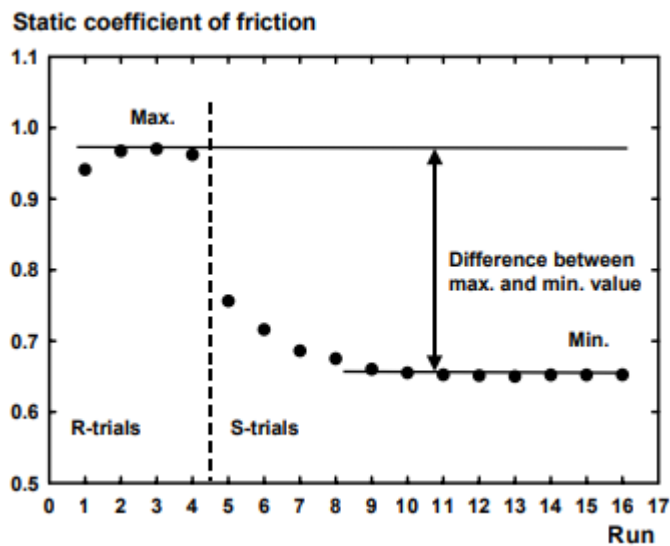
Automatisoidulla kitkamittarilla on mahdollista toistaa mittaukset identtisinä ja luotettavalla tavalla. Tämän kaltaisia kitkamittareita käytetään useimmiten suoritetuissa tieteellisissä kokeissa. Esimerkkinä kuvan 3 kitkamittarissa on ohjaustangot estämässä kelkkaa heilumasta, ohjausyksikkö alustan liikuttamiseksi toistuvalla tasaisella nopeudella ja tietokone tallentamassa mittaustuloksia (Johansson ym. 1999, 2).

4.3 ISO 15359

Paperin kitkamittauksille on olemassa oma ISO-standardi. Tämä standardi on käytössä vain vaakatasossa mitattaessa ja se on voimassa paperilajeille, sekä kartonkilajeille. Standardin mukaisissa kitkakertoimen mittauksissa suoritetaan sekä lepokitkan, että liikekitkan mittaus kolme kertaa. Lepokitkan mittaustuloksista tallennetaan ensimmäinen ja kolmas tulos, kun taas liikekitkan mittauksista vain kolmas tulos. (ISO 15359, 1999).

4.4 Mittausolosuhteet

Mittausolosuhteilla paperin kitkamittauksissa on huomattu olevan selviä vaikutuksia lopputuloksiin. Paperin kitkan mittaamisessa ei ole huomattu eroa siinä, suoritetaanko se konesuuntaisesti tai poikkisuuntaisesti (Bäckström ym. 1998, 4). Suoritettaessa peräkkäisiä mittauksia samansuuntaisesti huomattiin, että paperin lepokitkan kitkakerroin pieneni huomattavasti. (Johansson ym. 1999, 5; Garoff 2002, 31). Tämä muutos on esitetty kuviossa 2 (Garoff 2002, 31), jossa neljä ensimmäistä peräkkäistä mittausta on suoritettu aina vastakkaiseen suuntaan ja tämän jälkeen loput peräkkäiset mittaukset samansuuntaisina.



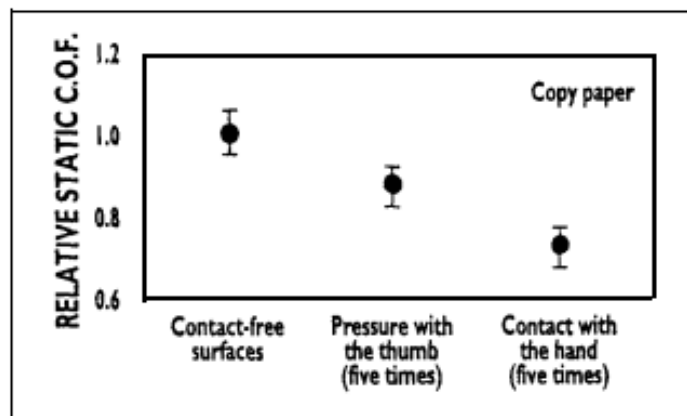
KUVIO 2. Lepokitkan kitkakertoimen muutos samansuuntaisilla mittauksilla (Garoff 2002, 31).

Lepokitkan kitkakertoimen laskun on esitetty johtuvan kuitujen nousemisesta paperin pinnassa ja suuntautumisesta liukumissuuntaan kohden. Peräkkäisiä mittauksia vastakkaisuuntaan suoritettaessa kitkakerroin on paljon korkeampi, sillä kuidut ovat lomittuneet edellisen mittauksen suuntaisesti, ja tällöin ovat vastakkaisuunnassa seuraavaa mittausta kohden. (Garoff 2002, 31-32). Matkan pituuden tiedetään vaikuttavan paperin kitkaan peräkkäisissä mittauksissa, mutta huomattavia muutoksia ei ole kuitenkaan havaittu lyhyillä matkoilla (Johansson ym.1999, 5).

Paperin lepokitkan kitkakertoimeen ei ole havaittu merkitystä siinä, tapahtuuko kelkan asettaminen paikoilleen manuaalisesti vai automaattisesti. Kelkan asettaminen kummassakin tapauksessa täytyy olla täysin samansuuntainen, sillä merkitys ilmenee

kelkan kulman muututtua. Kelkan kulman muuttuminen pienentää kitkakerrointa. Kelkan liikkuminen ennen mittauksen aloittamista vaikuttaa selvästi lepokitkan kitkakertoimeen. Kelkan liikkuminen taaksepäin ennen mittauksen aloittamista kasvattaa lepokitkan kitkakerrointa. (Johansson ym. 1999, 4-6). Kelkan painon vaikutuksesta, ja siitä aiheutuvasta pinnan paineesta, on olemassa ristiriitaisia tutkimuksia. Osan mukaan kelkan painolla ja pinnan paineella ei ole vaikutusta kitkamittauksiin (Johansson ym.1999, 4). Toisaalla on tutkittu, että painon ja pinnan paineen lisääminen vaikuttavat selvästi kitkakertoimen arvoon, erityisesti päällystämättömissä papereissa (Higashijima & Yamauchi 2010, 3).

Paperin testikappaleiden ja pintojen käsittelyllä on huomattava vaikutus mittaustuloksiin. Testikappaleiden saastuminen pelkän ihokosketuksen avulla riittää aiheuttamaan selvän laskun paperin lepokitkan kitkakertoimessa. Kuviossa 3 (Johansson ym.1999, 5) esitetään testikappaleen lepokitkan selvä pieneneminen sen jälkeen, kun testikappaleeseen on koskettu kädellä tai pelkällä peukalolla. (Johansson ym.1999, 5).



KUVIO 3. Testikappaleen saastumisen vaikutus paperin lepokitkan kitkakertoimeen (Johansson ym.1999, 5).

Paperi on siis hyvin herkkä materiaali tartunnoille. Testikappaleet, sekä testissä käytettävät pinnat tulee pitää paperin kitkaa mitattaessa täysin tartuntavapaina. Luotettavimpiin mittaus tuloksiin päästään silloin, kun tartuntoja vältetään sekä valmisteluvaiheessa, että mittausvaiheessa.

5 PAPERIN KITKAN VAIKUTUS JÄLKIKÄSITTELYSSÄ

Paperin kitkan huomattavimmat vaikutukset tulevat esiin eri jälkikäsitteilyprosesseissa. Jälkikäsitteilyksi voidaan kategorioida eri jalostusprosessit, jotka tehdään paperikoneen jälkeen. Näihin kuuluu esimerkiksi rullaus, arkitus, pakkaaminen ja superkalanterointi. Paperin kitkasta tunnistetaan usein sen aiheuttamat ongelmat eri jälkikäsitteilyprosesseissa, mutta se on välttämätön suure onnistuneeseen käsitteilyyn.

5.1 Rullaus

Paperin rullausprosessi voidaan määritellä toimintona, jossa jatkuva litteä paperirata rullataan rullaksi telan tai hylsyn ympärille. Paperin rullaus voidaan jakaa kahteen eri osaan, jotka ovat konerullaus ja pituusleikkaus. Konerullauksessa paperikoneelta valmistetaan suurikokoinen rulla, joka rullataan telan päälle. Tämä konerulla viedään eteenpäin tehtaalle jälkikäsitteilyprosesseihin. Pituusleikkauksessa leikataan konerullasta pienempiä asiakkaalle lähteviä paperirullia lopputuotteina. (Airola ym. 2010, 176,178).

5.1.1 Konerullaus

Paperin kitkan aiheuttamat ongelmat on tärkeää tunnistaa jo konerullausvaiheessa, sillä ne aiheuttavat välittömästi ongelmia pituusleikkauksessa ja muissa jälkikäsitteilyprosesseissa. Konerullan rakenteella on hyvin merkittävä rooli paperin kitkaan. Konerullan ongelmat, jotka löydetään läheltä telaa, ovat peräisin usein paperikerrosten välisestä liukumisesta. Paperin kerrosten välinen liukuminen voi aiheuttaa useita ongelmia rullauksessa, kuten rynkkyjä ja puhkeamia. Konerullassa voimien jotka vastustavat liukumista, tulee olla suuremmat, kuin voimien jotka aiheuttavat sitä. Voimat, jotka aiheuttavat liukumista paperikerrosten välissä, ovat monilta osin peräisin paperin painosta ja konerullan säteestä, kun voimat, jotka estävät liukumista, ovat paperikerrosten välisestä kitkakertoimesta ja asteittaisesta kompressiosta. Rakenteellisesti vahvapohjainen konerulla kykenee pitämään kitkavoiman korkeammalla tasolla verrattuna pehmeäpohjaiseen konerullan rakenteeseen. Rakenteen ollessa liian pehmeä, ylittävät liukumista aiheuttavat voimat herkemmin sitä vastustavat kitkavoimat ja paperin kerrosten välistä liukumista esiintyy. (Airola ym.2010, 199).

Huonot koneen poikkisuuntaiset profiilit yhdistettynä korkeaan ajonopeuteen päästävät helposti ilmaa paperiradan sisään, joka laskee paperin kitkakerrointa. Tämä on ominaista erityisesti laaduilla, joilla on korkea sileys. Sisäiset nipin kuormitukset voivat alkaa liikuttamaan paperin välisiä konerullan kerroksia, mikäli konerullan rakenne ei ole tarpeeksi kireä. Tämä voi johtaa siihen, että konerullan kriittiset kohdat eivät ole yhtenäisiä. Kerrosten välinen liukuminen tapahtuu aina siellä, missä konerullan kireys on alhaisimmillaan. (Airola ym. 2010, 206,214).

5.1.2 Pituusleikkaus

Pituusleikkauksessa konerullasta leikataan suunniteltu määrä pienempiä asiakasrullia lopputuotteina. Rullat leikataan annettujen pituus ja leveysohjeiden mukaisesti, ja rullataan hylsykartongin ympärille. Pituusleikkauksessa tarvitaan vääntömomenttia, jotta rullaus saadaan onnistumaan. Vääntömomentti siirtyy rullauksen aikana paperirullan sisemmille kerroksille, jossa kitka mekanismina välittää kuorman ja pitää rullan kasassa. Paine paperin kerrosten välillä tulee olla tarpeeksi suuri, jotta se synnyttää riittävän määrän kitkaa kiihdytykseen ja jarrutukseen, estäen samalla paperin välisten kerrosten liikkumista. Kitka pitää rullan kasassa, ja tärkeänä tekijänä kitkan muodostumiseen on riittävän suuri rullauskireys. (Good & Roisum 2008, 22).

Paperin kitkakerroin yleensä vaihtelee noin 0,25 ja 0,7 välillä (Alava 2008, 106). Ongelmat pituusleikkauksessa esiintyvät kun paperin kitkakerroin joko alittaa tai ylittää normaalin vaihteluvälin. Alhainen kitkakerroin aiheuttaa herkästi kreppirynkkyjä ja puhkeamia (Airola ym. 2010, 180). Kreppirynkkyt ovat kapeita taitoksia paperissa konesuuntaisesti. Kreppirynkkyt, sekä myös puhkeamat, aiheuttavat pituusleikkauksessa ratakatkoja. Ratakatkot täydessä vauhdissa pysäyttävät pituusleikkausprosessin ja aiheuttavat huomattavia tappioita tehokkuudessa. Liian korkea paperin kitkakerroin voi estää paperin luontaista liikkumista sisäkerroksissa liiaksi, jolloin paperiin muodostuu muovisia ominaisuuksia. Muoviset ominaisuudet herkästi johtavat rullien pomppimiseen ja tärinäan pituusleikkauksessa. Rullien hyppiminen ja tärinä tekevät rullista epämuodostuneita.

5.1.3 J-linjatesti

Paperin sisäkerrosten liukumisen tunnistamiseen rullauksessa käytetään apuna J-linjatestiä. J-linjatesti on indikaattori nippivoimista johtuville haitoille rullassa. Testissä rullaan merkataan aluksi suora säteen mukainen viiva rullan kylkeen hylsystä ulkoreunalle. Viivan merkitseminen onnistuu parhaiten rullan ollessa paikallaan, mutta liikkuvaan rullaan viivan merkitseminen on myös mahdollista. Tällöin tosin riskit turvallisuutteen liittyen kasvavat ja erityistä varovaisuutta on harrastettava. Viivan merkitsemisen jälkeen rullan päälle rullataan lisää kerroksia paperia. Suora linja alkaa taipua J-kirjaimen muotoiseksi rullauksen aikana rullan pyörimissuunnan mukaisesti. (Good & Roisum 2008, 326-327). J-linjan suuruudesta voidaan todeta paperin sisäkerrosten mahdollinen liikehdintä ja verrata sitä aikaisempiin tutkimustuloksiin.

5.2 Superkalanterointi

Kalanteroinnin pääasiallinen tehtävä paperinvalmistuksessa on muokata paperin pintaominaisuuksia ja hallita sen paksuusprofiileja. Superkalanterointi on viimeisiä paperinvalmistusprosessin vaiheita, jossa paperin ominaisuuksiin on mahdollista vaikuttaa ja prosessina se suoritetaan paperikoneen jälkeen. Superkalanteroinnissa paperi ajetaan normaalisti noin 12 telan läpi. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204,213). Paperin kitkan vaikutusta kalanterointiin on tutkittu vielä puutteellisesti, mutta tiedetään, että suurikitkainen paperi aiheuttaa herkästi ongelmia kalanteroinnissa. Superkalanteroinnissa liian suuri kitka voi aiheuttaa hilseilyä päällysteessä ja ylimääräistä pölyämistä. (Knowpap D).

5.3 Muut jälkikäsittelyprosessit

Muissakin jälkikäsittelyn prosesseissa on tärkeää, että paperin kitkakerroin on sopivalla tasolla. Tarpeeksi korkea kitkakerroin pitää esimerkiksi arkkipinot paikallaan ja estää niitä romahtamasta. Kuljetuspakkausmateriaaleilla tarvitaan tietty määrä kitkakerrointa, jotta materiaalit eivät liiku kuljettaessa toisten yli. Paperirullalla tarvitsee olla tarpeeksi suuri paperikerrosten välinen kitkakerroin silloin, kun sitä liikutetaan nostovälineillä ylös ja alas.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Paperin valmistuksessa melkein kaikilla raaka-aineilla todettiin olevan jonkinlainen vaikutus paperin kitkaan. Puukuiduissa kitka-arvoihin vaikuttivat huomattavasti puun uuteaineet. Puun uuteaineista rasvahapot alensivat kitkaa, kun taas risiinihapot nostivat sitä. Puun uuteaineilla yleisellä tasolla pääteltiin olevan tietynlainen voiteleva vaikutus paperiin, sillä uuteaineiden poistaminen massasta kasvatti paperin kitkaa. Ligniinin poistosta sellumassasta ei todettu alhaisissa uuteainepitoisuuksissa olevan vaikutusta. Raaka-aineena uusiomassan vaikutus paperin kitkaan riippui huomattavasti sen siistausmenetelmästä. Vaahdotussiistauksella oli paperin kitkaa alentava vaikutus, kun taas pesussiistauksella oli kitkaa kasvattava vaikutus. Paperin kosteus vaikutti selvästi paperin kitkaan, sillä paperin kitkakerroin kasvoi lineaarisesti melkein samassa suhteessa kuin paperin kosteus.

Prosessiin lisätään erilaisia täyteaineita, lisäaineita ja massaliimoja vaikuttamaan paperin ominaisuuksiin ja tehostamaan sen valmistusprosessia. Näillä aineilla todettiin myös olevan hyvin erilaisia vaikutuksia paperin kitkaan. Täyteaineista talkin ja kaoliinin käytön todettiin alentavan paperin kitkaa, kun taas erityisesti saostetun kalsiumkarbonaatin käyttö kasvatti sitä. Erikoispigmenteistä kalsioitu kaoliini, synteettiset silikaatit ja titaanidioksidi prosessissa kasvattivat paperin kitkaa. Voiteluaineiden käyttö alentaa paperin kitkaa, tehokkaimpina vahatyypiset voiteluaineet. Vaahdonestoaineiden käyttö yleensä alentaa paperin kitkaa, mutta vaahdonestoaineissa on eroavaisuuksia, joten on mahdollista, että niiden vaikutuksetkin ovat erilaisia. Massaliimoista tärkkelyksen ja polyakryyliamidin käyttö nosti paperin kitkaa, kun taas AKD-liimojen käyttö laski sitä.

Paperin kitkamittauksissa todettiin olosuhteilla olevan selvä vaikutus mittaustuloksiin. Peräkkäisten mittausten suorittaminen samansuuntaisina antoi huomattavasti alemmat tulokset kitkakertoimelle kuin vastakkaissuuntaan suoritettavat mittaukset. Kitkamittausten aloittamisen todettiin olevan hyvin herkkä prosessi muuttujille. Mittauskelkan asettelu ja sen liikkuminen ennen mittauksen aloittamista vaikuttivat mittaustuloksiin. Kelkan kulman muuttuminen pienensi lepokitkan kitkakerrointa, kun taas kelkan liikkuminen taaksepäin mittausalustalla ennen aloittamista kasvatti lepokitkan kitkakerrointa. Testikappaleiden saastuminen ennen mittauksia ihokosketuksen kautta, pienensi selvästi paperin kitkakerrointa mitattaessa.

Työssä tutkittiin myös paperin kitkan vaikutuksia eri jälkikäsittelyprosesseihin. Paperikoneelta tuotetun konerullan rakenteella on huomattava vaikutus siihen, kuinka paljon paperin kitka vaikuttaa konerullauksessa. Paperin kitka vaikuttaa paperikerrosten väliseen liukumiseen, mikä voi aiheuttaa useita ongelmia rullauksessa. Konerullan rakenteen täytyy pystyä pitämään paperin kitkavoimat, jotka estävät liukumista korkeammalla tasolla kuin voimat, jotka aiheuttavat sitä paperikerrosten välissä. Konerullan tulee olla vahvapohjainen ja riittävän kireä, jotta kerrosten välistä liukumista ei tapahdu. Pituusleikkauksessa paperin kitkaan liittyvät ongelmat usein esiintyvät, kun kitkakerroin poikkeaa yleiseltä vaihteluväliltä. Liian alhainen kitkakerroin aiheuttaa herkästi pituusleikkauksessa kreppiryngkyjä ja puhkeamia, kun taas liian korkea kitkakerroin rullien pomppimista ja tärinää.

Kitkan vaikutusta kalanterointiin on tutkittu vielä vähän, mutta superkalanteroinnissa tiedetään liian suuren kitkan mahdollisesti aiheuttavan pölyämistä ja hilseilyä päällysteessä. Muissa jälkikäsittelyprosesseissa tarpeeksi korkeaa paperin kitkaa tarvitaan pitämään materiaalit helposti käsiteltävinä niin, että ne eivät esimerkiksi romahda pinottuina tai liiku toistensa yli kuljetettaessa.

Tämä työ keskittyi tutkimaan paperin kitkaa kirjallisuuden kautta. Haasteita työssä aiheutti suhteellisen vähäinen määrä kirjallisuutta paperin kitkaan liittyen. Useissa paperitekniikan teoksissa kitkaa sivuttiin vain muutamalla sivulla ja tutkimuksia aiheesta on julkaistu varsin rajallinen määrä tähän päivään mennessä. Tulevaisuudessa aihetta olisi varmasti mielenkiintoista tutkia lisää käytännön mittausten kautta, kuten esimerkiksi paperikoneella tai pituusleikkurilla.

LÄHTEET

Airola, N., Happonen, E., Jorkama, M., Kojo, T., Komulainen, P., Luomi, S., Malinen, U., Paanasalo, J., Rautakorpi, T., Turunen, I., Veräjänkorva, J. 2010. Reeling and winding. Teoksessa Rautiainen P. Papermaking Part 3, Finishing. Porvoo. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 173-284.

Alava, M. 2008. Paper surface and thermal, electrical and friction characteristics. Teoksessa Niskanen, K. Paper Physics. Helsinki. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

Bäckström, M., Fellers, C., Htun, M. 1999. The influence of kappa number and surface energy on paper-to-paper friction. Tukholma. Swedish Pulp and Research Institute (STFI).

Enomae, T., Yamauchi, N., Onabe, F. 2005. Influence of coating properties on paper-to-paper friction of coated paper. Tokio. Japan Wood Research Society.

Garoff, N. 2002. The friction between paper surfaces. Kuninkaallinen teknillinen korkeakoulu. Paperi- ja selluteknologian laitos. Tukholma. Väitöskirja.

Good, J. Roisum, D. 2008. Winding: Machines, mechanics and measurements. Lancaster. DEStech Publications, Inc.

Higashijima, K., Yamauchi, T. 2010. Frictional Contact of Coated Paper and Its Surface Chemical Analysis. Tokio. The Society of Fiber Science and Technology.

Hägglom-Ahnger, U., Komulainen, P. 2003. Paperin ja kartongin valmistus. 5.painos. Jyväskylä. Opetushallitus.

ISO 15359. 1999. Paper and board – Determination of the static and kinetic coefficients of friction – Horizontal plane method.

Johansson, A., Fellers, C. Gunderson D., Haugen, U. 1997. Paper friction – influence of measurement conditions. Tukholma. Swedish Pulp and Paper Research Institute (STFI).

Kivioja, S., Kivivuori S., Salonen, P. 2007. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. 5.painos. Helsinki. Otatieto, Gaudeamus Helsinki University Press, HYY-yhtymä.

Knowpap A. versio 19.0. 2015. AEL/Proledge Oy. Paperin ja kartongin ominaisuudet. http://www.knowpap.com.elib.tamk.fi/extranet/suomi/paper_board_properties/2_general_properties/4_moisture_content/frame.htm. Luettu 16.11.2018. Saatavilla rajoitetusti.

Knowpap B. versio 19.0. 2015. AEL/Proledge Oy. Päälystyskemikaalit. http://www.knowpap.com.elib.tamk.fi/extranet/suomi/raw_materials/6_coating_chemicals/1_coating_pigments/12_pigments/frame.htm. Luettu 17.11.2018. Saatavilla rajoitetusti.

Knowpap C. versio 19.0. 2015. AEL/Proledge Oy. Täyte- ja lisäaineet. Luettu 17.11.2018.

http://www.knowpap.com.elib.tamk.fi/extranet/suomi/raw_materials/6_coating_chemicals/3_additives/1_common/frame.htm?zoom_highlightsub=voiteluaineet. Saatavilla rajoitetusti.

Knowpap D, versio 19.0. 2015. AEL/Proledge Oy. Tuotantoprosessit. Luettu 18.11.2018.

http://www.knowpap.com.elib.tamk.fi/extranet/suomi/paper_technology/6_calendering/3_effect_of_paper_composition_on_calendering/frame.htm?zoom_highlightsub=kitka. Saatavilla rajoitetusti.

Kolu, V. 1997. Valmet. Paperin ja telan välisen kitkakertoimen määrittäminen. Mittausohje.

Komulainen, P. Pele Oy. 2015. Effects of friction in papermaking. Julkaistu 9.12.2015. Luettu 22.11.2018. <https://www.slideshare.net/Peeke/effects-of-friction-in-papermaking>.

Laine, J. 2007. General aspects of papermaking chemistry. Teoksessa Alen R. Papermaking chemistry. Jyväskylä. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. 27-54.

Levlin, J-E. 1999. General physical properties of paper and board. Teoksessa Levlin, J-E. Papermaking part 17, Pulp and Paper Testing. Jyväskylä. Fapet Oy. 137-163.