

Polyuretaanin ja teräksen välistä kitkaa alentavan käsittelyn kehittäminen

Riikka Anttila

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Biotuote- ja prosessitekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuote- ja prosessitekniikka

ANTTILA, RIIKKA:

Polyuretaanin ja teräksen välistä kitkaa alentavan käsittelyn kehittäminen

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Toukokuu 2020

Opinnäytetyö toteutettiin Valmet Technologies Oy:lle Tampereen Kaukajärven yksikössä, jossa valmistetaan paperikoneen kenkäpuristinhihoja. Polyuretaanisen kenkäpuristinhihnan ja kenkäpuristimen välistä kitkaa pyritään vähentämään öljykerrolla ja kuivavoiteluaineella. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kitkaomaisuuksiltaan parhaiten polyuretaanin pinnan käsittelyyn soveltuva väritön kuivavoiteluaine. Kokeellisessa tutkimuksessa kuivavoiteluaineen ominaisuuksiin pyrittiin vaikuttamaan ruiskutusparametreilla ja lisäämällä kuivavoiteluaineeseen titaanidioksidipigmenttiä. Käsitellyistä polyuretaanipinnoista määritettiin pinnankarheus sekä niiden kitkakerroin vasten teräspintaa. Kuivavoiteluaineen levitymistä ja sen partikkelikokoa tutkittiin mikroskopian avulla.

Kitkan vähentäminen on tärkeää, sillä se aiheuttaa liikkuvien koneenosien ylikuumenemista, kulumista ja pahimmillaan kiinnileikkautumisen. Erilaisten pintojen välistä kitkaa kuvataan dimensiottomalla kitkakertoimella. Kitkavoimaan vaikuttavat toisiinsa kosketuksissa olevien pintojen ominaisuudet, kuten pinnankarheus, adheesiovoimat ja pintoja yhteen puristavan voiman suuruus. Voiteluaineiden tarkoitus on estää mikroskooppisten pinnanmuotojen korkeimpien kohtien takertuminen toisiinsa muodostamalla kalvo pintojen välille. Kenkäpuristinhihnan sisäpinnalle tehtävä kuivavoiteluainekäsittely yhdessä öljykierron kanssa takaa hihnan lähes kitkattoman pyörimisen kenkäpuristintelan ympärillä.

Kuivavoiteluaineella saavutettu pinnankarheus ei ole yksiselitteisesti verrannollinen polyuretaanin ja teräksen välisen kitkakertoimen suuruuteen. Kitkakertoimeen vaikuttavat myös muut tekijät, kuten pinnan partikkeleiden orientaatio, muoto, ympäristötekijät ja mittaustapa. Mikroskooppisiin pinnanmuotoihin voidaan jonkin verran vaikuttaa ruiskutusparametreilla ja erilaisilla pigmentin ja kuivavoiteluaineen seoksilla. Pienet pigmenttipartikkelit täyttävät pinnan epätasaisuuksia ja alentavat pinnankarheutta. Liian alhainen pinnankarheus tuo kuitenkin ongelmia muissa prosessivaiheissa. Suuremmat partikkelit kuivavoiteluaineessa pienentävät polyuretaanin ja teräksen todellista kosketuspinta-alaa ja näin ollen myös parantavat pintojen välisiä kitkaominaisuuksia. Tulosten perusteella valittiin kuivavoitelumenetelmä käytettäväksi tuotantokappaleessa. Luottamuksellista tietoa sisältävät osiot on poistettu opinnäytetyön julkisesta versiosta.

Asiasanat: kitkakerroin, pinnankarheus, kuivavoiteluaine

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Bioproduct and Process Engineering

ANTTILA, RIIKKA:

Development of a Low-Friction Treatment Between Polyurethane and Steel

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 6 pages
May 2020

The thesis was carried out for Valmet Technologies Ltd in Tampere where shoe press belts are manufactured. Friction between the polyurethane shoe press belt and steel shoe press is reduced with a dry lubricant sprayed on the surface of the polyurethane. The properties of the two different dry lubricants were studied by physical tests such as surface roughness and friction measurement. The properties of the dry lubricant-treated polyurethane surface were sought to be influenced by spraying parameters and the addition of titanium dioxide pigment to the dry lubricant.

The friction between two different types of surfaces is described by a dimensionless coefficient of friction. The friction is affected by the properties of the surfaces in contact such as surface roughness, adhesion forces, the orientation and shape of surface particles and the magnitude of the force that compresses the surfaces. The purpose of lubricants is to prevent the highest points of the microscopic surface shapes from sticking together by forming a film between the surfaces.

The surface roughness achieved with the dry lubricant is not unambiguously proportional to the coefficient of friction between the polyurethane and the steel. The microscopic surface roughness can be influenced to some extent by spraying parameters and various mixtures of pigment and dry lubricant. Small pigment particles fill the surface irregularities and reduce the surface roughness. Larger particle size in the dry lubricant reduces the actual contact area of the polyurethane and steel and improves the friction properties between the surfaces. Based on the results the dry lubrication method was selected for use in shoe press belt. The sections containing confidential information has been removed from the public version of the thesis.

Key words: coefficient of friction, dry lubrication, surface roughness

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	POLYURETAANIELASTOMEERI	7
	2.1 Yleistä	7
	2.2 Rakenne ja valmistus	7
3	KITKA	9
	3.1 Kitka ilmiönä	9
	3.2 Mittaaminen	10
	3.3 Kitkaan vaikuttavat tekijät	10
	3.4 Polyuretaanin ja teräspinnan välinen kitka	11
4	KITKAN VÄHENTÄMINEN	13
	4.1 Voitelu	13
	4.2 Kiinteät voiteluaineet	13
5	KOKEELLINEN TUTKIMUS	15
	5.1 Tutkimuksen tarkoitus	15
	5.2 Tutkimusmenetelmät	15
	5.2.1 Ruiskutusmenetelmät	16
	5.2.2 Kitkamittaus	17
	5.2.3 SEM-kuvaus	18
	5.2.4 EDX-analyysi	19
	5.2.5 Pinnankarheus	19
	5.2.6 Lankamurskain	20
6	TULOKSET	21
7	TULOSTEN TARKASTELU	37
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	41
	LÄHTEET	43
	LIITTEET	45
	Liite 1. Mittauspöytäkirja 1	45
	Liite 2. Mittauspöytäkirja 2	49

LYHENTEET JA TERMIT

EDX	energiadisersiivinen röntgenspektrometri
flokki	partikkeleiden yhteenkeskittymä
HVLP	hajotusilmapaineruisku, jossa ilmamäärä on suurempi ja ilman paine pienempi
nippi	telojen välinen puristus
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskooppi

1 JOHDANTO

Kahden toisiinsa nähden suhteellisessa liikkeessä olevaan pintaan vaikuttaa aina liikettä vastustava kitkavoima. Kitkavoima on tarpeellinen niin arkielämässä kuin teollisuudessa, mutta sillä on myös haittavaikutuksensa. Pyörivissä koneenosissa kitka saa aikaan lämpöenergiaa, joka ylikuumentaa ja kuluttaa osia. Kitkan vähentäminen on laaja sovellusala, joka käsittelee tekniikoita kitkan vähentämiseksi aina laakeroinnista kuiva- ja nestevoiteluun. Kitkaan vaikuttaa muun muassa toisiinsa vuorovaikutuksessa olevien pintojen ominaisuudet, kuten pinnankarheus, pintojen välinen kemiallinen vuorovaikutus sekä pintoja yhteen puristava voima. Karkeilla pinnoilla on yleensä suurempi kitkakerroin kuin sileillä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Valmet Technologies Oy:n Tampereen toimipiste Valmet Fabrics, jossa valmistetaan paperikonekudoksia, kuten kenkäpuristinhihnoja, puristinhuopia ja kuivatusviiroja. Kenkäpuristin on paperikoneen puristinosan elementti, jonka tehtävä on poistaa vettä paperirainasta. Kenkäpuristinhihna eli belt valmistetaan polyuretaanielastomeerista ja se pyörii teräksisen kenkäpuristintelan ympärillä tehokkaan vedenpoiston takaamiseksi. Polyuretaanielastomeerin ja kenkäpuristimen välistä kitkaa alennetaan kuivavoiteluaineen ja öljyvoitelun avulla.

Työn tarkoituksena oli kehittää beltin sisäpinnan kuivavoitelua erilaisten fysikaalisten testien, kuten kitka- ja pinnankarheusmittausten avulla. Kuivavoiteluaineen ruiskutuksessa syntyvää pintaa pyrittiin kehittämään ominaisuuksiltaan optimaaliseksi säätämällä ruiskutusparametreja ja lisäämällä kuivavoiteluaineeseen valkoista pigmenttiä erilaisilla seossuhteilla. Voiteluaineen levittymistä ja pinnan rakennetta tutkittiin mikroskopian avulla.

Opinnäytetyön sisältää salassa pidettävää aineistoa, jonka vuoksi työssä käsitellyt tuotenimet esitetään kirjaimina A, B, C, X ja Y. Kirjaimia vastaavat tuotenimet kerrotaan luottamuksellisessa liitteessä, joka on poistettu julkisesta versiosta.

2 POLYURETAANIELASTOMEERI

2.1 Yleistä

Polyuretaanit ovat laajasti käytettyjä polymeerejä. Polyuretaanin ominaisuudet vaihtelevat kertamuoveista uudelleen muotoiltaviin kestomuoveihin. Suurin osa polyuretaaneista on kertamuoveja, joita ei voida muotoilla uudelleen lämmön avulla, sillä kovettuessaan polymeeriketjut muodostavat uretaaniin silloitettuja kemiallisia sidoksia. (Prisacariu 2011, 3.)

Polyuretaanelastomeerit kehitettiin alun perin kumin korvaajaksi toisen maailmansodan aikana. Ne osoittautuivatkin ominaisuuksiltaan kumia paremmaksi lujuuden, kovuuden ja hyvän työstettävyyden takia. Niistä tulikin tärkeä raaka-aine niin vaate-, kuljetus-, kuin koneteollisuudelle. Polyuretaanelastomeerista valmistetaan nykyään esimerkiksi renkaita, tiivisteitä ja kuljetinhihnoja. (Prisacariu 2011, 1.)

2.2 Rakenne ja valmistus

Polyuretaanelastomeerit ovat orgaanisia polymeerejä, joiden nimi on seurausta niiden rakenteessa esiintyvistä uretaanisidoksista. Polyuretaanelastomeerin ominaisuudet vaihtelevat valmistuksessa käytetyn di-isosyanaatin ja diolin perusteella pehmeästä elastomeeristä kovaan, muoviseen rakenteeseen. Elastomeeriset ominaisuudet ovat tiiviisti sidoksissa polyuretaanelastomeerin kemialliseen rakenteeseen. Reaktiossa muodostuu niin sanottuja kovia ja pehmeitä segmenttejä. Kovat segmentit muodostuvat di-isosyanaatista ja ketjunjatkajista ja pehmeät segmentit taas polyolista. (Clemitsen 2015, 3; Prisacariu 2011, 10.)

Isosyanaatti ja polyoli muodostavat esipolymeerin, joka reagoi ketjunjatkajan kanssa muodostaen pitkäketjuisen polyuretaanelastomeerin. Mitä pidemmäksi muodostuvat polymeeriketjut kasvavat, sitä mukaa kasvaa myös polyuretaanelastomeerin viskositeetti, kunnes siitä tulee lopulta kiinteää. Lämpökäsittely

saattaa loppuun kemiallisten sidosten muodostumisen ja tuo polyuretaanielastomeerille sen lopulliset ominaisuudet. (Clemitson 2015, 99-100.)

Nestemäinen polyuretaanielastomeeri valetaan muotoonsa esimerkiksi pyörö-, keskipako tai vakuumivalun avulla. Keskipakopyörövalussa lämmitettyä muottia pyöritetään ja polyuretaanielastomeeri valetaan sylinterimäisen muotin pohjalle. Muotin nopeuden, muotin halkaisijan ja seoksen viskositeetin täytyy olla täsmälleen oikeat, jotta koko muotti saadaan valettua ennen kuin seoksen jähmettyminen alkaa. Pyörövaletun polyuretaanielastomeerin pinta on sileä ja peilikirkas. Kun jähmettynyt polyuretaanielastomeeri on kovettunut tarpeeksi, se poistetaan muotista ja leikataan haluttuun muotoon. (Clemitson 2015, 125.)

3 KITKA

3.1 Kitka ilmiönä

Liikkuvaan kappaleeseen kohdistuu aina ympäristön aiheuttama liikettä vastustava voima eli kitka. Kitkavoima vastustaa kahden kappaleen liikettä toisiinsa nähden. Kitka on moninainen ilmiö, jonka tutkiminen on haastavaa. Perusperiaatteina voidaan kuitenkin pitää, ettei kitkavoima riipu koskettavien pintojen pinta-alasta tai niiden nopeudesta toisiinsa nähden. Sen sijaan kitka on verrannollinen pintoja vasten toisiaan puristavaan voimaan, kuten painovoima tai normaali-voima. (Inkinen & Tuohinen 2006, 106.)

Pinnankarheuden vähentämisen on todettu vähentävän kitkaa. Pinnankarheutta voidaan vähentää esimerkiksi hionnalla tai pintakäsittelyllä. Jossain vaiheessa tilanne kuitenkin kääntyy päinvastaiseksi ja kitka alkaa uudelleen kasvaa. Erittäin tasaiset pinnat eivät olekaan toisiinsa nähden kitkattomat. Pinnankarheus ei selitäkään kuin pienen osan kitkasta. Sen sijaan merkittävää on pintojen väliset adheesiovoimat eli tartuntavoimat. Kun kappaleet liikkuvat vasten toisiaan syntyy niiden pinnalle molekyylien välisiä sidoksia, jotka murtuvat ja syntyvät taas uudelleen. Lepokitkavoima eli staattinen kitkavoima on vastakkaissuuntainen verrattuna voimaan, joka pyrkii saamaan kappaleen liikkeelle ja se on suurimmillaan juuri liikkeellelähdessä. Lepokitkavoiman suurin arvo on esitetty kaavassa 1

$$f_{s,\max} = \mu_s N \quad (1)$$

jossa $f_{s,\max}$ on lepokitkan suurin arvo (N), μ_s on lepokitkakerroin ja N (N) on kappaleeseen vaikuttava normaalivoima. (Inkinen & Tuohinen 2006, 107.)

Liikekitkavoima alkaa vaikuttaa, kun kappale on lähtenyt liikkeelle ja se on vastakkaissuuntainen kappaleen liikesuuntaan verrattuna. Liikekitka voi olla joko liukukitkaa tai vierimiskitkaa. Jos kappaletta liikkeellä pitävä voima on suurempi kuin liikekitkavoima, on kappale kiihtyvässä liikkeessä. Liikekitkavoima voidaan määrittää kaavan 2 avulla

$$f_k = \mu_k N \quad (2)$$

jossa f_k on liikekitkan suurin arvo (N), μ_k on liikekitkakerroin ja N (N) on kappaleeseen vaikuttava normaalivoima. (Inkinen & Tuohinen 2006, 107-108.)

Kitkakertoimet ovat dimensiottomia arvoja ja ne on määritelty toisiaan koskeville pintapareille. Liikekitkakerroin on yleensä pienempi kuin lepokitkakerroin. Kitkakertoimille on annettu taulukkoarvoja, mutta koska arvoihin vaikuttaa muun muassa pintojen karheus, puhtaus, lämpötila ja kosteus, on niiden verrannollisuus ja kokeellinen määrittäminen vain suuntaa antavaa. (Inkinen & Tuohinen 2006, 108.)

3.2 Mittaaminen

Kitkaa mitataan vetämällä voima-anturilla, yksinkertaisimmillaan jousivaa'alla, kappaletta vaakasuoraan pitkin haluttua pintaa. Anturi näyttää tällöin kappaleen liikkeelle saamiseksi tarvittavan voiman eli lepokitkavoiman. Kun kappaleen vetämistä jatketaan tasaisella nopeudella, antaa anturi arvon liikekitkavoimalle. Mittauksessa täytyy olla tiedossa kappaleeseen vaikuttava normaalivoima eli kappaleen paino. Yleensä tyypillisessä mittauksessa voimat vuorottelevat, sillä tapahtuu pintojen välistä vuorovaikutusta eli pintojen irrottautumista ja kiinnittymistä molekyylyllisellä tasolla. Tehtäessä kitkamittauksia laboratoriossa, anturi on yleensä yhteydessä tietokoneohjelmaan, joka piirtää kuvaajan esimerkiksi kitkavoiman ajan tai siirrytyn matkan funktiona. (Hautala & Peltonen 2011, 33.)

3.3 Kitkaan vaikuttavat tekijät

Tribologia tutkii pintojen välistä vuorovaikutusta, kuten kitkaa ja kulumista. Pintojen välisiin kitkavoimiin vaikuttavat monet tekijät, erityisesti pintojen materiaali ja niihin kohdistuva normaalivoima. Aikaisemmin luultiin, että kitkavoiman aiheuttaa ainoastaan pintojen epätasaisuuksien mekaaninen hankaus ja lukittuminen kiinni toisiinsa. Se ei kuitenkaan selittänyt hyvin sileiden pintojen keskinäistä kitkaa. Pintojen välinen vuorovaikutus riippuu myös niiden kemiallisista ominaisuuksista

toisiinsa nähden. Adheesio on pintojen välinen vuorovaikutus, joka saa ne tarttumaan toisiinsa. Karkeilla pinnoilla adheesio merkitys pienenee, sillä pinnat ovat vähemmän kosketuksissa toisiinsa. Mekaanisen ja kemiallisen vuorovaikutuksen merkityksestä kitkaan on olemassa lukuisia monimutkaisia matemaattisia malleja. Nykytiedon valossa kitkavoima on yhdistelmä kumpaakin vuorovaikutusta riippuen pintojen materiaalista ja niiden pinnankarheudesta. Myös pintojen suunnalla toisiinsa nähden on merkitystä, sillä pinnanmuodot ovat erilaiset eri suunnista, mutta myös molekylaariset voimat vaikuttavat eri suuntiin eri tavoin. (Zeng 2013, 20-26.)

Käytännössä täydellisen tasaista pintaa ei ole olemassa. Pinnassa on aina jonkinasteista epätasaisuutta, huippuja ja laaksoja. Mikroskooppisen pienet pinnanmuodot määrittelevät pitkälti pinnan tribologisen käyttäytymisen. Pintojen kohdassa vain pinnasta ulkonevat osat koskettavat toisiaan. Tästä johtuen todellisuudessa toisiaan koskettava pinta-ala on paljon näkyvää pinta-alaa pienempi. Kosketuksessa pinnan korkeimmat kohdat saattavat muuttua muotoaan, kun voima pyrkii jakaantumaan suuremmalle alalle. Kun pintoja toisiaan kohti painavaa voimaa lisätään, myös pintojen välinen kontaktipinta kasvaa ja se voi saada aikaan muodonmuutosta pinnan lisäksi myös syvemmällä materiaalissa. Vastaavasti toisiaan koskettavan näkyvän pinta-alan kasvattaminen ei vaikuta kitkavoimaan, sillä voima jakautuu tällöin suuremmalle alueelle ja entistä harvemmat kohdat pääsevät koskettamaan toisiaan. (Zeng 2013, 37.)

Pinnankarheus voidaan määritellä useammalla arvolla. R_a tarkoittaa aritmeettista keskimääräistä pinnankarheutta eli profiilin keskiviivasta poikkeavien huippujen ja laaksojen absoluuttisten arvojen keskiarvoa. Koska R_a -arvo on koko pinnankarheusprofiilin keskiarvo, siihen eivät juuri vaikuta yksittäiset mittausarvot. R_z -arvo taas kuvaa viiden korkeimman huipun ja syvimmän laakson keskiarvon etäisyyttä toisistaan. (Ylimys 2020; Mitutoyo n.d., 4.)

3.4 Polyuretaanin ja teräspinnan välinen kitka

Kitkakertoimen ja sitä myötä kitkavoiman on todettu olevan suurempi pehmeillä, kuin kovilla pinnoilla. Tämä johtuu siitä, että pehmeillä pinnoilla toisiaan koskeva

todellinen pinta-ala on suurempi, kun pinnat mukautuvat toistensa muotoihin. Kova materiaali ei muuta muotoaan yhtä helposti. Valetun polyuretaanielastomeerin käsittelemätön pinta on myös hyvin sileä, mikä osaltaan lisää kitkaa teräspintaa vasten. Polyuretaanielastomeerin rakenteen vuoksi kitka voi saada aikaan muodonmuutoksia materiaalissa. Tämä voi johtaa materiaalin sisäosien kuumenemiseen, vaurioihin ja ulkopinnan halkeiluun. Polyuretaanin arvioidaan saavan suurimman kitkakertoimen arvonsa lämpötilassa 60 °C. (Clemitsen 2015, 176, 192.)

Polyuretaanin ja teräksen välisen kitkakertoimen on arvioitu olevan kuivalla pinnalla 0,3 – 0,8 Shore A-asteikon kovuudella 95, joka on tässä yhteydessä käsiteltävän polyuretaanielastomeerin kovuus. Kitkakertoimen arvo riippuu siis ympäristötekijöiden ja vaikuttavan normaalivoiman lisäksi myös polyuretaanin pehmeystä ja pinnankarheudesta, sekä teräksen pinnankarheudesta, joka on tulosta sen työstötavasta. Kitkakerroin myös alenee hieman ajan myötä polyuretaanin ollessa kuormituksen alaisena. Polyuretaanin ja teräksen välisen kitkan kokeellinen määrittäminen on vain suuntaa antavaa, sillä siihen vaikuttavat niin suuresti ympäristön olosuhteet, kuten pöly ja kosteus. Kitkaa voidaan pyrkiä vähentämään voiteluaineilla ja pintakäsittelyllä, jolloin pintojen toisiaan koskettava todellinen pinta-ala pienenee. Myös polyuretaanin esipolymeeriä voidaan muokata tai siihen voidaan lisätä kitkaa vähentäviä aineita, mutta sellaiset toimenpiteet voivat vaikuttaa polymeerin ketjunmuodostuskykyyn. (Sunray Inc 2013; Clemitsen 2015, 192.)

4 KITKAN VÄHENTÄMINEN

Liikkuvien pintojen ollessa kosketuksissa toisiinsa niiden välinen kitka aiheuttaa lämpöenergiaa ja pintojen kulumista. Siksi teollisuudessa on tärkeää vähentää liikkuvien koneenosien välistä kitkaa, jotta osat eivät ylikuumentune ja hitsaudu kiinni toisiinsa. Tyypillisin tapa vähentää kitkaa on voitelun ja laakeroinnin avulla. Laakeroinnin tarkoitus on muuttaa kappaleiden välinen liukukitka vierimiskitkaksi, jolloin kitkan voittamiseksi vaadittavan työn määrä pienenee. Voiteluaineita käytetään sovelluksesta riippuen yksinään tai osana laakerointia. (Aho 1985, 44.)

4.1 Voitelu

Voitelussa kahden liikkuvan pinnan väliin pyritään muodostamaan kalvo, joka estää pintojen mikroskooppisten huippujen kosketuksen ja niiden yhteen hitsautumisen. Voiteluun ja sen tehokkuuteen vaikuttavat pintojen ominaisuudet, voiteluaineen viskositeetti ja koostumus, kosketuksen muoto, liikenopeus sekä ympäristötekijät. Voitelumekanismit voidaan jakaa kahteen luokkaan, neste- ja kosketusvoiteluun eli kiinteillä aineilla voiteluun. Nestevoitelussa voiteluneste aiheuttaa koneenosien välille paineen, joka erottaa liikkuvat koneenosat toisistaan. Tällöin osien pintojen ulokkeet eivät pääse lainkaan kosketuksiin keskenään, eikä kitkaa synny muuten kuin voiteluaineen sisäisestä kitkasta eli leikkausvoimista. Nestevoitelussa voiteluaineen kemiallinen koostumus ei ole oleellista, vaan tärkeintä ovat sen sisäiset kitkaominaisuudet. Jos kuitenkin pinnat voivat päästä kosketuksiin toistensa kanssa, voiteluaineeseen voidaan lisätä kemiallisilta ominaisuuksiltaan erityisiä lisäaineita, jotka estävät pintojen kosketuksen. Esimerkiksi pinnoille voidaan lisätä poolisia molekyylejä, jotka saavat aikaan kosketuksia estävän kalvon. (Piirilä 1985, 237; Tabor 1995a, E4.1.)

4.2 Kiinteät voiteluaineet

Voiteluolosuhteet voivat olla sellaiset, etteivät nestemäiset voiteluaineet tule kysymykseen tai ne eivät yksinään riitä. Kiinteille voiteluaineille on vaatimuksena

esimerkiksi kitkaa alentavat ominaisuudet, kiinnittyminen voideltavaan pintaan, terminen ja kemiallinen stabiilisuus sekä korkea sulamispiste. Kiinteiden voiteluaineiden ongelma on voitelukalvon uusiutumattomuus, koska voiteluainekerros kuluu helposti pois toisiaan koskettavilta pinnoilta. Yleensä kiinteiden voiteluaineiden kiinnittyminen haluttuun pintaan on riittävän hyvä, mutta sitä voidaan parantaa lisäaineilla. Kiinteille voiteluaineille yhteistä on korkea puristuslujuus ja merkittävästi voideltavaa pintaa alhaisempi leikkausvoima. Metallipinnat voidaan päällystää hyvin ohuella kerroksella pehmeää metallia, jolloin alla olevan kova metalli määrittää koskettavien pintojen alan, mutta leikkausvoimia esiintyy vain pehmeässä kerroksessa. (Piirilä 1985, 248; Tabor 1995a, E4.2.)

Kiinteinä voiteluaineina käytetään usein liuskaisia, kerroshilarakenteisia aineita, kuten molybdeenisulfidia ja grafiittia. Niitä kumpaakin voidaan käyttää voiteluvana kerroksena sellaisenaan tai hyvin hienojakoisena sekoitettuna voiteluöljyihin. Grafiitin voitelukyky riippuu ympäristöstä ja se toimii huomattavasti paremmin kosteassa ilmanalassa kuin kuivassa. Molybdeenisulfidi onkin nykyään laajemmin käytössä juuri sen monipuolisempien käyttöolosuhteiden takia, sillä sen voiteluominaisuudet ovat hyvät jopa inerteissä kaasuissa ja tyhjiössä. Korkein lämpötila, jossa molybdeenisulfidi säilyttää voiteluominaisuutensa on ilmassa noin 400 °C. Grafiitin korkein käyttölämpötila on noin 600 °C. Kummankin kitkakertoimet teräspintaa vasten ovat noin 0,07 – 0,13. (Piirilä 1985, 248-250; Tabor 1995b, E5.1-5.3.)

Teflon eli polytetrafluorieteeni on paljon käytetty materiaali erityisesti laakereissa. Polytetrafluorieteeni on kemiallisesti inertti ja kulutusta kestävä polymeeri, jonka kitkakerroin vasten terästä on alimmillaan 0,05. Usein sitä sekoitetaan grafiittiin, molybdeenisulfidiin tai kupariin, jolloin sen lämmönjohtokyky paranee ja sitä voidaan käyttää erittäin vaativissa olosuhteissa. Polytetrafluorieteenin alhainen kitkakerroin johtuu sen pitkien hiiltä ja fluoria sisältävien polymeeriketjujen alhaisesta leikkauslujuudesta. Epäorgaanisia kiinteitä voiteluaineita ovat booritrioksidi, sinkkisulfidi, talkki eli magnesiumsilikaatti ja lyijyoksidi. (Gheisari, Nunez & Polycarpou 2018, 92-93.)

5 KOKEELLINEN TUTKIMUS

5.1 Tutkimuksen tarkoitus

Paperikoneen kenkäpuristimessa kenkäpuristinhihna pyörii teräksisen telan ympärillä. Polyuretaanin ja teräksen välistä kitkaa on pyritty vähentämään ruiskuttamalla polyuretaanin pintaan kuivavoiteluaine. Tutkimuksessa vertailtiin käytössä olevan mustan ja kahden värittömän kuivavoiteluaineen ominaisuuksia. Voiteluaineen levittymistä polyuretaanin pintaan tutkittiin lisäämällä siihen kahta erilaista valkoista pigmenttiä, jotka sisälsivät titaanidioksidia. Tutkimuksen tarkoituksena oli erilaisten fysikaalisten menetelmien avulla selvittää, millaisen kuivavoiteluaineen avulla sen kyky vähentää kitkaa olisi optimaalinen. Tarkoituksena oli myös selvittää kuivavoiteluaineiden kemiallista koostumusta, jotta osattaisiin valita sovellukseen parhaiten sopiva kuivavoiteluaine.

5.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimukseen käytettiin värittömiä kuivavoiteluaineita A ja B. Niihin lisättiin kahta erilaista titaanidioksidia sisältävää pigmenttiseosta X ja Y. Pigmenttiseosten lii-säys kuivavoiteluaineeseen tehtiin niin, että kuivavoiteluaineseoksen titaanidioksidin kokonaispitoisuus oli 3 %, yhtä testiä lukuun ottamatta, jossa pitoisuus oli 5 %. (Mattaus ja infrapunakäsittely 2020)

Kuivavoiteluaineen levittymiseen pyrittiin vaikuttamaan ruiskutusparametrien säädöllä. Kuivavoiteluaineen levittymistä tarkasteltiin visuaalisesti sekä silmä-määräisesti, että valomikroskoopin avulla. Käsitellyn polyuretaanin pinnankar-heus mitattiin pinnankarheusmittarilla ja tutkittiin sen vaikutusta pinnan kitkaker-toimeen. Kuivavoiteluaineen koeruiskutuksessa polyuretaaniaihio jaettiin kah-deksaan eri osaan, joihin kokeiltiin erilaisia ruiskutusparametreja ja valkoisen pig-mentin pitoisuuksia. Lopuksi kokonainen tuotantokappale käsiteltiin tulosten kautta parhaaksi määritellyllä menetelmällä.

pääsee suuri määrä ilmaa. Ilmanpaine on noin puolet vähemmän kuin perinteisessä tekniikassa. Alasäiliöruiskussa maalin imemiseen säiliöstä kuluu paljon paineilmaa ja pitkän syöttöputken painehäviö on suuri. Usein paineilmaruiskussa on ilmanpainemittari, josta voidaan säätää hajotusilmanpaine suuttimessa. (Jokinen & ym. 2012, 126-127.)

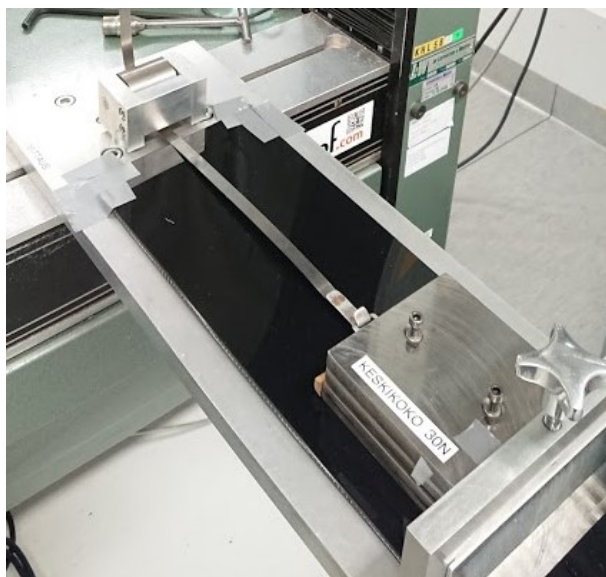
Hajotusilmaruiskutuksen onnistumiseksi ilmavirran ruiskuun täytyy olla tasainen. Oikein toimivan ruiskun ruiskutuskuviot ovat tasainen, I:n muotoinen ja keskeltä hieman leveämpi. Ruiskutuskuviota säädetään ilman- ja maalivirtausten sekä maalilevittimen pyörösäätimien avulla. Jos maalia tulee katkonaisesti, on maalisuutin todennäköisesti tukossa, maalisuutin on liian pieni tai maalilla on liian suuri viskositeetti. Ruiskussa on maalineulalle palautusjousi, joka estää maalin valumisen suuttimen ulkopuolelle, kun maalipistoolilla ei ruiskuteta. Suuttimessa oleva roska tai likainen maalineula voi estää neulan palautumisen, jolloin maaliumun sekaan joutuu pisaroita. Ruiskun puhtaus onkin erittäin tärkeää ruiskutustuloksen kannalta. Pesu tulee suorittaa heti ruiskutuksen jälkeen ja pesuliuotimen tulisi olla sopiva käytetylle maalille. Pelkkä maalin ohenne ei usein riitä tarvittavaan puhdistukseen. Maali tulisi suodattaa ennen ruiskutusta ja paineilmalinjastossa tulisi olla suodatin, joka estää ilman mukana tulevan mahdollisen öljyn tai veden pääsyn maaliruiskuun. (Jokinen & ym. 2012, 128-130.)

Ruiskutustulokseen pyrittiin vaikuttamaan paineilman säädöllä ja ruiskun siirtymällä. Suuremmalla siirtymällä ruiskutustuloksesta tulisi harsomainen ja epätasainen, mikä kasvattaisi ruiskutetun pinnan karheutta. Vastaavasti jos siirtymä on pienempi, menevät kuivavoiteluainekerrokset hieman päällekkäin ja käsitellystä pinnasta tulee sileämpi.

5.2.2 Kitkamittaus

Kitkamittaus perustuu teräksisen kelkan vetämiseen pitkin polyuretaanin pintaa. Mittaus suoritettiin Oy Lorentzen & Wettre AB:n valmistamalla Alwetron TCT vetolaitteella laboratorioissa vakioilmasto-olosuhteissa (kuva 1). Kitkamittauksessa normaalivoima tarkoittaa vedettävän kelkan massaa muutettuna siihen kohdistu-

vaksi voimaksi eli mittauksessa normaalivoima oli 30 newtonia. Mittauksessa vetolaitteen ohjelmaan on määritelty kelkan kulkema matka ja ohjelma laskee metallin ja polyuretaanielastomeerin välisen liikekitkakertoimen kaavojen 1 ja 2 pohjalta. Ohjelma myös piirtää mittauksesta kuvaajan kitkavoima siirtymän funktiona, josta voidaan lukea suurin kitkavoima mittauksessa eli lepokitka. Kitkamittauksia tehtiin jokaisesta näytteestä kaksi rinnakkaista ja mittaukset suoritettiin kone- eli pituussuuntaan. (Anttila 2016, 47.)



KUVA 1. Kitkamittauslaitteisto

5.2.3 SEM-kuvaus

SEM eli Scanning Electron Microscope on pyyhkäisyelektronimikroskooppi, jossa kuva saadaan aikaan korkeaenergisien elektronisuihkun avulla. SEM soveltuu erityisen hyvin kappaleen pinnanmuotojen tutkimiseen. Elektronimikroskoopilla saavutetaan parempi erotuskyky ja terävyys kuin valomikroskoopilla, jossa valon aallonpituus asettaa rajoitteet resoluutiolle. Elektronien avulla saavutetaan lyhyempi aallonpituus ja näin ollen parempi resoluutio. (Nanoscience 2020.)

Elektronit tuotetaan termisen emission avulla ja ne kiihdytetään jännitteellä kato-diputkessa. Muodostuva elektronisuihku kavennetaan keilamaiseksi ja kohdistetaan oikeaan suuntaan kolonnissa linssien avulla. Riippuen elektroneiden kiihty-

vydestä ja näytteen koostumuksesta elektronit tunkeutuvat muutamien mikrometrien syvyydelle näytteeseen. Elektronien vuorovaikutuksessa näytteen kanssa aiheutuu joukko erilaisia signaaleja, joista muodostuu ilmaisimen avulla kuva tietokoneen näytölle. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saavutettu suurenos ja sen resoluutio riippuu useista tekijöistä, kuten elektronisuihkun keilauspisteen koosta ja sen vuorovaikutuksesta näytteen kanssa. Tyypillisesti pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saavutetaan noin 1-20 nanometrin resoluutio, kun valomikroskoopin teoreettinen resoluutio on noin 250 nanometriä. (Nanoscience 2020.)

5.2.4 EDX-analyysi

EDX eli energiadiispersiivinen röntgenspektrometri on analyysilaitte, jolla voidaan määrittellä aineiden alkuainekoostumusta SEM:n avulla. EDX:llä voidaan havaita alkuaineet, joiden järjestysluku on suurempi kuin 5 ja joiden pitoisuus näytteessä on suurempi kuin 0,1 %. Kun näyte on vuorovaikutuksessa elektronisuihkun kanssa, näytteen atomiytimet tuottavat niille ominaisia röntgensäteitä. Koska jokaisella alkuaineella on sille ominainen röntgenemissiospektri, ne voidaan spektrin avulla tunnistaa ja määrittellä kunkin alkuaineen pitoisuus näytteessä. (Ismail, Jaafar, Mutalib, Othman & Rahman 2017, 167.)

5.2.5 Pinnankarheus

Pinnankarheus mitattiin kuvan 2 mukaisesti Mitutoyon pinnankarheusmittarilla. Näytteistä otettiin kymmenen rinnakkaista mittausta konesuuntaan. Lisäksi mitattiin kitkamittauksessa käytettävän teräksisen kelkan pinnankarheus kymmenellä rinnakkaisella mittauksella. Mittalaite piirtää näytteestä pinnankarheusprofiilin pintaa vasten liikkuvan mittaneulan avulla. Laite laskee sekä näytteen Ra-arvon, että Rz-arvon. (Ylimys 2020.)



KUVA 2. Pinnankarheuden mittaaminen (muokattu)

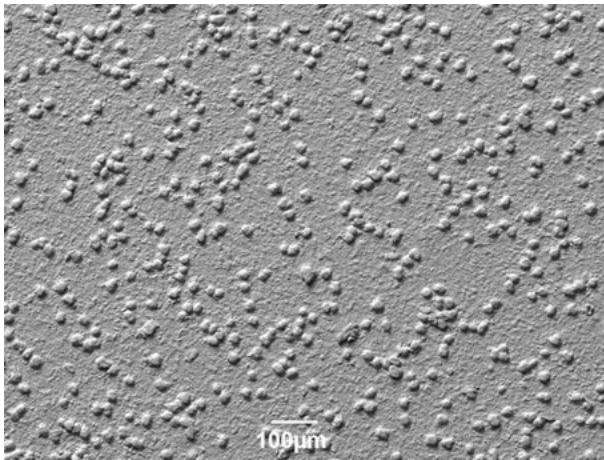
5.2.6 Lankamurskain

Lankamurskain simuloi polyuretaanihihnan olosuhteita paperikoneella ja sen avulla voidaan arvioida polyuretaanin kestävyyttä ja sen pinnassa tapahtuvia muutoksia äärimmäisen rasituksen aikana. Kenkäpuristinhihna joutuu kulutuksen ja taivutuksen kohteeksi paperikoneen nipissä. Paperi- ja kartonkikoneissa nippikuorma on noin 500 – 1300 kN/m, joka vastaa noin 3 – 8 MPa:n painetta. Lankamurskaimessa käytetään suurempaa kuormitusta ja taivutusta, jotta saadaan nopeammin käsitys kenkäpuristinhinnan käyttäytymisestä ääriolosuhteissa. Kuormituspainella 1,0 bar on vastaava nippipaine noin 20,4 MPa ja kuormituspainella 1,25 nippipaine on noin 25,5 MPa. (Honkanen 2020.)

Lankamurskaintestiä varten polyuretaanihihiosta leikataan 98 mm leveä lenkki, joka asetetaan lankamurskainkoneeseen. Nippiin lisätään kuormitus paineen-säätöventtiilistä. Ajo kytketään päälle, jolloin lenkki liikkuu nipin läpi. Aihiolenkin lämpötila ja venymä mitataan tasaisin väliajoin. Kun haluttu nippien lukumäärä on saavutettu, ajo lopetetaan ja lenkki arvioidaan visuaalisesti ja tutkimalla näytteen murtolujuuden alenemaa verrattuna uuteen. Tässä tapauksessa suoritettiin vain visuaalinen tarkastelu. (Rökman 2020.)

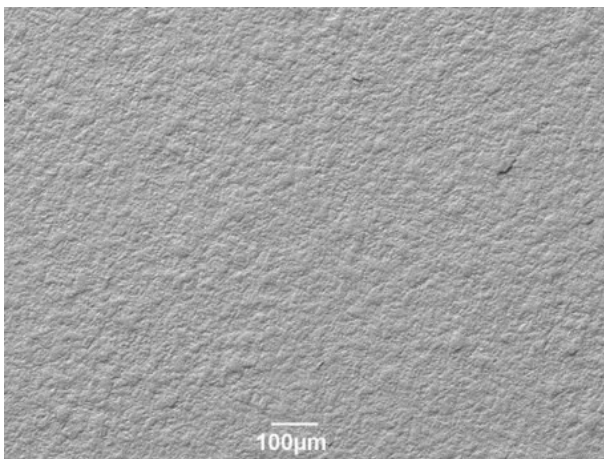
6 TULOKSET

Mustalla kuivavoiteluaineella käsitellyistä pinnoista otettiin SEM-kuvat, jotta voitiin vertailla niiden pintaominaisuuksia värittömiin kuivavoiteluaineisiin. Mustan kuivavoiteluaineen pinta kuvattuna 100-kertaisella suurennoksella on esitetty kuvassa 3. Pinnasta erottuvat selkeästi pyöreätköt partikkelit, joiden uskotaan vaikuttavan voiteluaineen kitkaominaisuuksiin. Kuvasta 3 voi nähdä partikkeleiden halkaisijan olevan noin 20 – 30 µm.



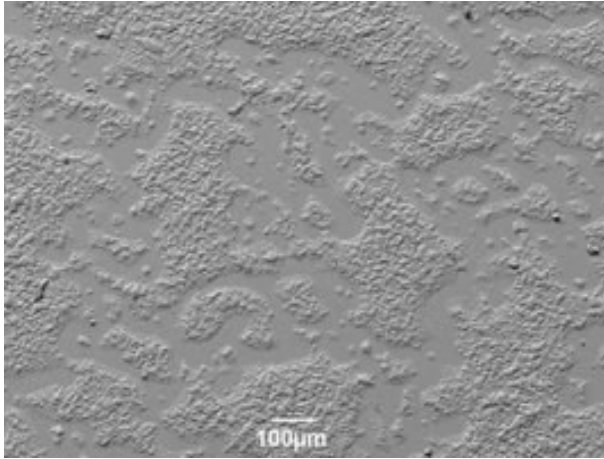
KUVA 3. SEM-kuva mustasta kuivavoiteluaineesta (Valmet 2020)

Vastaavassa kuvassa värittömästä kuivavoiteluaineesta, johon oli lisätty titaani-dioksidipigmenttiä ei näy samoja partikkeleita kuin mustassa kuivavoiteluaineessa. Kuva 4 on värittömästä kuivavoiteluaineesta A, johon on lisätty valkoista titaanidioksidipigmenttiä X.



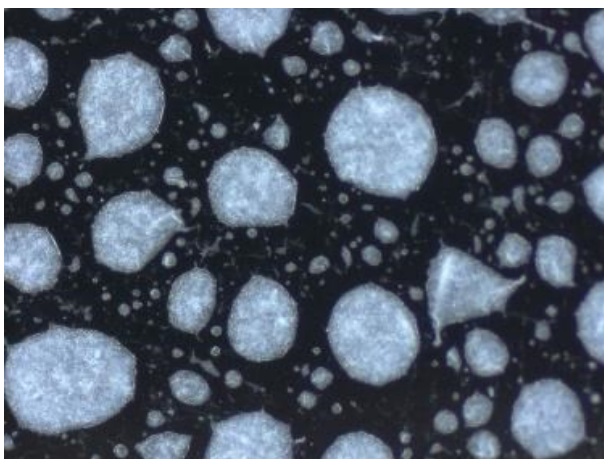
KUVA 4. SEM-kuva kuivavoiteluaineella A käsitellystä pinnasta, johon on lisätty pigmenttiä X (Valmet 2020)

Partikkeleiden mahdollinen peittyminen pigmentin alle haluttiin varmistaa ottamalla SEM-kuva kuivavoiteluaineesta A myös ilman pigmenttiä. Kuvasta 5 voidaan nähdä, ettei myöskään siinä näy vastaavia partikkeleita, kuin mustassa kuivavoiteluaineessa.



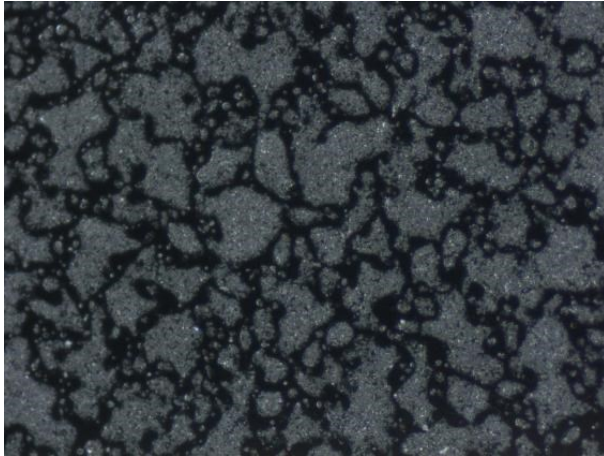
KUVA 5. Kuivavoiteluaine A ilman pigmenttiä (Valmet 2020)

Kuivavoiteluaineita A ja B vertailtiin ruiskuttamalla niitä yksi kerros käsivaraisesti käsittelemättömälle polyuretaanipinnalle. Välittömästi huomattiin, ettei voiteluaine B levity kunnolla, vaan jää erillisiksi pisaroiksi. Mikroskooppikuvassa (kuva 6) näkyy selvästi, miten voiteluaine ei muodosta yhtenäistä kalvoa polyuretaanin pinnalle.



KUVA 6. Mikroskooppikuva kuivavoiteluaineen B pinnasta viisinkertaisella suurennoksella

Kuivavoiteluaine A muodosti heti peittävämmän kerroksen jo yhdellä ruiskutus-kerralla (kuva 7). Sen sitoutuminen ja levittyminen polyuretaanin pinnalle vaikutti paremmalta kuin kuivavoiteluaineella B.



KUVA 7. Mikroskooppikuva voiteluaineen A pinnasta viisinkertaisella suurennok-sella

Jatkotutkimuksiin valittiin kuivavoiteluaine A. Kuivavoiteluaineesta A ja pigmen-teistä X ja Y laadittiin kahdeksan ominaisuuksiltaan erilaista ruiskutusmenetel-mää ja kuivavoiteluaineseosta, jotka on esitetty taulukossa 1. Kaikki näytteet kä-siteltiin yhden kerran, paitsi näyte 2, joka käsiteltiin kahdesti, ensin pigmenttiä Y sisältävällä kuivavoiteluaineella ja sen jälkeen pigmenttiä X sisältävällä kuivavoi-teluaineella. Pigmentin kokonaispitoisuus kaikissa seoksissa oli 3 %, paitsi näyt-teessä 8 se oli 5 %. Paine on ruiskun paineilmamittarista luettu lukema, jolloin todellinen ruiskutuspaine on noin 0,5 bar:a alhaisempi.

TAULUKKO 1. Kuivavoiteluaineseosnäytteiden ominaisuudet

nro	pigmentti- pitoisuus (%)	pigmentin X osuus (%)	pigmentin Y osuus (%)	paine (bar)	muotti
1	3	0	100	5	M5
2	3	1.krs 0, 2.krs 100	1.krs 100, 2 krs 0	3	M5
3	3	50	50	3	M5
4	3	50	50	4	M5
5	3	50	50	3	M8
6	3	50	50	3	M4
7	3	70	30	3	M5
8	5	50	50	3	M5

Koeruisutukset tehtiin tuotantomittakaavan aihioon. Sylinterimäinen polyuretaaniaihio käsiteltiin ruiskuttamalla kahdeksan osiota valituilla parametreilla. Jokainen osio oli noin metrin levyinen. Kuvassa 8 käsitelty polyuretaaniaihio on halkaistu ja levitetty näytteiden leikkaamista varten. Osioiden välillä voi nähdä selkeitä värieroja ja eroavaisuuksia kuivavoiteluaineen peittävydessä ja levittyvydessä.



KUVA 8. Erilaisilla kuivavoiteluaineseoksilla käsitelty polyuretaaniaihio

Aihiosta leikattiin näytteitä, joille suoritettiin mittauksia ja niitä tarkasteltiin mikroskoopilla. Ruiskutustulosta vertailtiin kuvassa 9 keskellä olevaan, mustalla kuivavoiteluaineella käsiteltyyn polyuretaanikappaleeseen.



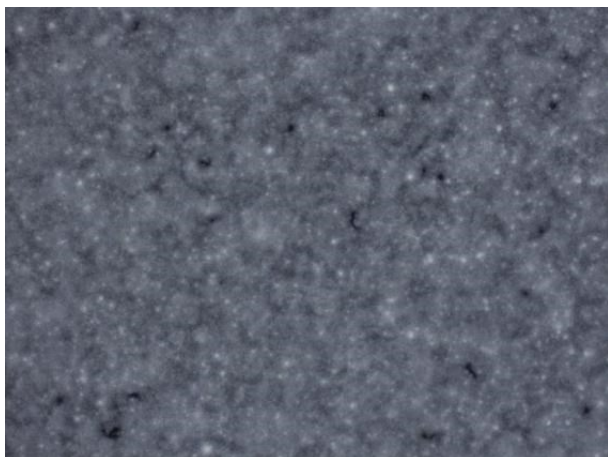
KUVA 9. Erilaisilla parametreilla käsitellyt näytteet

Näytteet kuvattiin valomikroskoopilla, jotta voitiin tarkastella kuivavoiteluaineen levittymistä. Kuvat on otettu 2,5-kertaisella suurennoksella. Kuvassa 10 on esitetty näyte 1, joka on käsitelty yhdellä kerroksella pigmenttiä Y sisältävää kuivavoiteluainetta. Ruiskutusaine oli 5 bar:a.



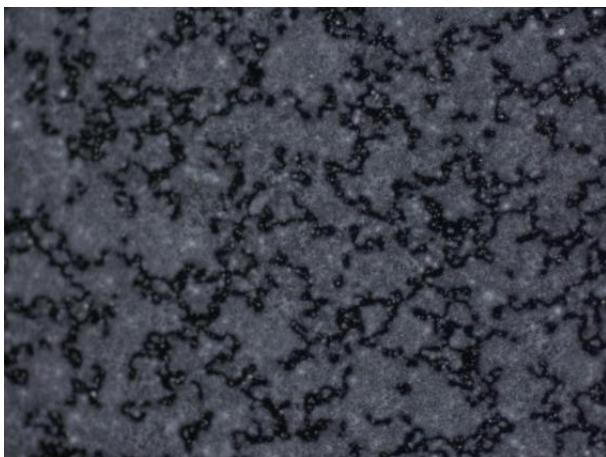
KUVA 10. Näyte 1

Näyte 2 (kuva 11) käsiteltiin ensin pigmenttiä Y sisältävällä kuivavoiteluaineella kerran, jonka jälkeen käsiteltiin toinen kerros pigmenttiä X sisältävällä kuivavoiteluaineella. Ruiskutusaine huomattiin liian suureksi ja se alennettiin 3 bar:iin.



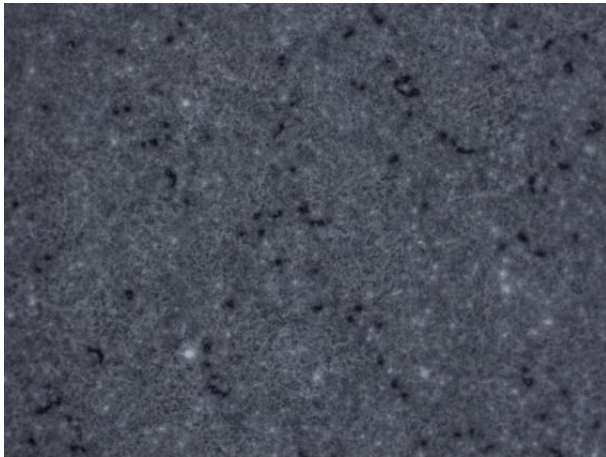
KUVA 11. Näyte 2

Näyte 3 (kuva 12) käsiteltiin yhden kerran kuivavoiteluaineella, jossa oli pigmenttiä X ja Y suhteessa 50/50.



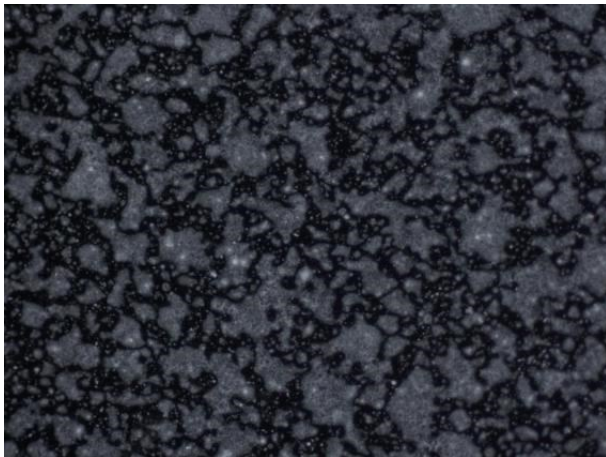
KUVA 12. Näyte 3

Näyte 4 (kuva 13) käsiteltiin samalla pigmenttien suhteella, mutta ruiskutusainetta nostettiin 4 bar:iin.



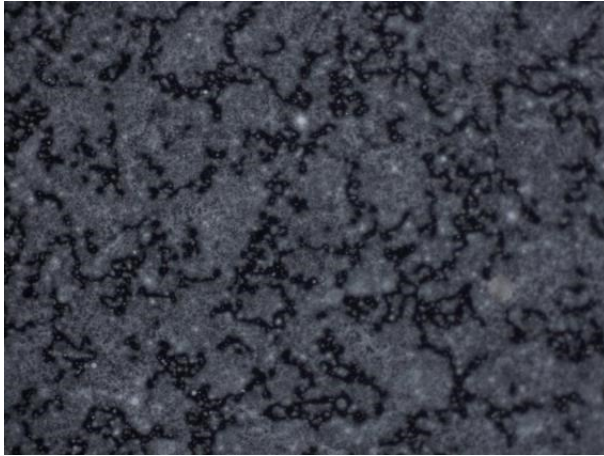
KUVA 13. Näyte 4

Näyte 5 (kuva 14) ruiskutettiin käyttämällä normaalia suurempaa ruiskun siirtymää yhden muotin pyörimän kierroksen aikana vaihtamalla ohjelmaan muotiksi M8. Pigmenttien suhde oli edelleen 50/50. Ruiskutusaine palautettiin 3 bar:iin.



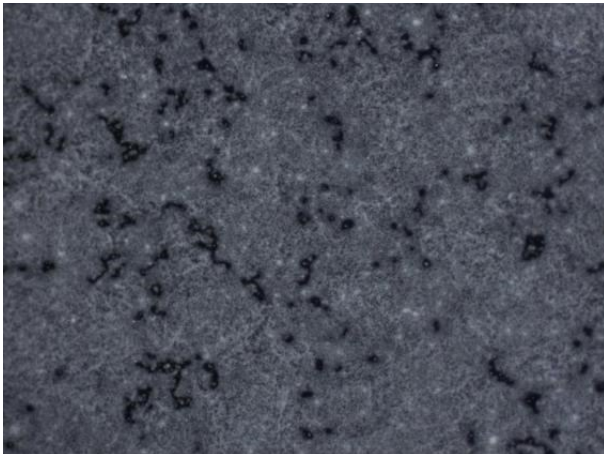
KUVA 14. Näyte 5

Näyte 6 (kuva 15) ruiskutettiin muotin M4 parametreilla, jolloin ruiskun siirtymä oli hieman normaalia pienempi. Ruiskutusaine oli 3 bar:a.



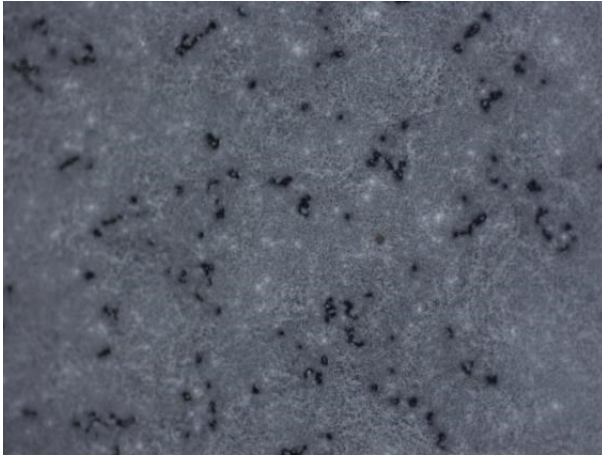
KUVA 15. Näyte 6

Näyte 7 (kuva 16) ruiskutettiin kuivavoiteluaineella, jossa oli 70 % pigmentistä pigmenttiä X ja 30 % pigmenttiä Y. Ajo-ohjelmaan palautettiin alkuperäinen muotti M5 ja ruiskutusaine oli 3 bar:a.



KUVA 16. Näyte 7

Näytteessä 8 (kuva 17) pigmentin kokonaispitoisuutta nostettiin 5 %:iin. Pigmenttien välinen suhde oli 50/50.



KUVA 17. Näyte 8

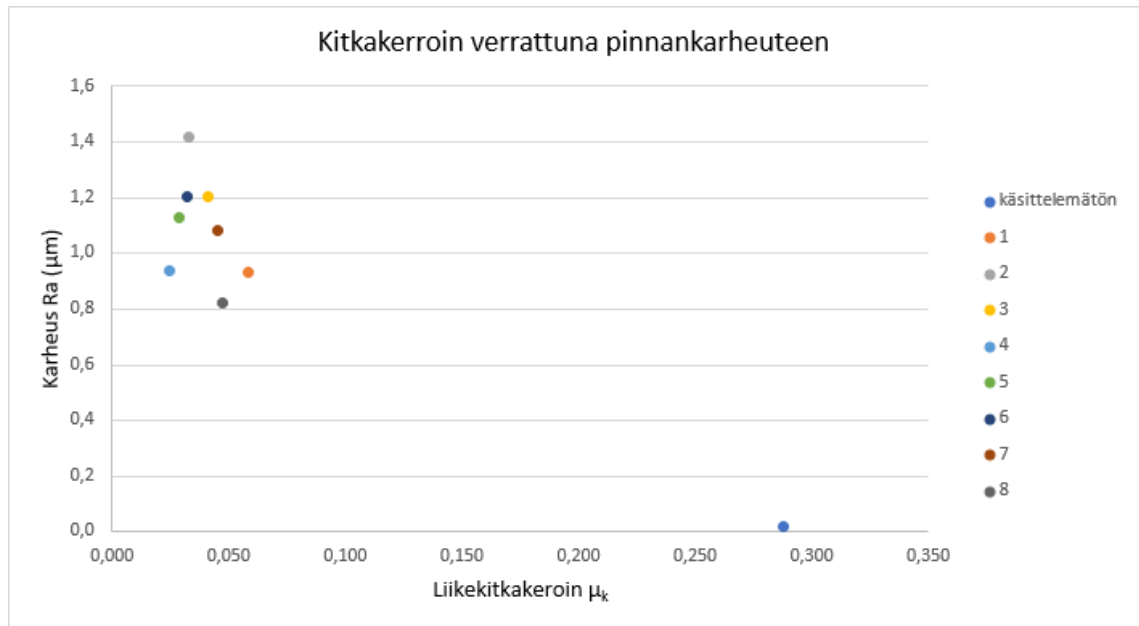
Näytteistä mitattiin pinnankarheudet sekä kitkakertoimet, jotka on esitetty taulukossa 2. Kaikki mittaustulokset ovat liitteessä 1. Kuivavoiteluaineella A ilman pigmenttiä käsitellyn pinnankarheudet ovat liitteessä 2. Teräksisen kitkamittauskelkan pinnankarheus oli 0,4 μm . Pinnankarheus on kymmenen mittauksen keskiarvo ja kitkakerroin kahden määrittelyn keskiarvo. Tuloksia verrattiin käsittelemättömään polyuretaanipintaan.

TAULUKKO 2. Näytteiden mittaustulokset

nro	pinnankarheus Ra (μm)	pinnankarheus Rz (μm)	liikekitkakerroin
käsittelemätön	0,017	0,159	0,288
1	0,931	6,781	0,058
2	1,417	10,357	0,033
3	1,203	7,506	0,041
4	0,936	6,694	0,025
5	1,131	6,963	0,029
6	1,205	7,416	0,032
7	1,085	7,173	0,046
8	0,821	5,109	0,047

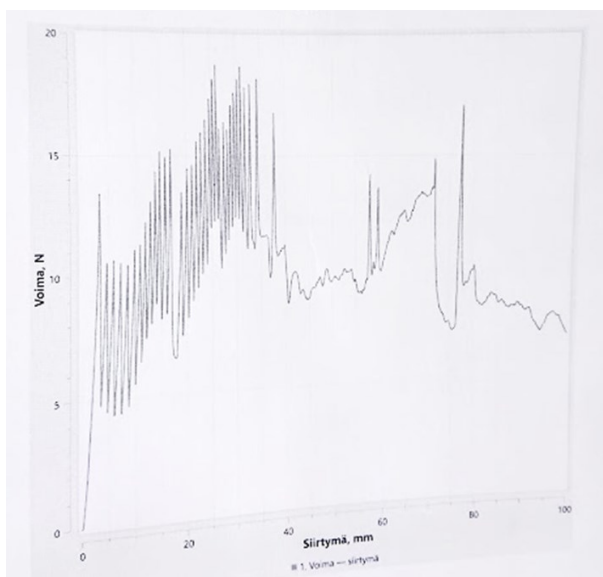
Tuloksista laadittiin kaavio (kuvio 2), jossa on esitetty liikekitkakerroin verrattuna Ra-pinnankarheuteen. Käsittelemätön pinta poikkeaa huomattavasti käsitellyistä pinnoista suurella kitkakertoimella ja alhaisella pinnankarheudella. Kaikki

käsittellyt pinnat siis alentavat kitkaa huomattavasti verrattuna käsittelemättömään pintaan.



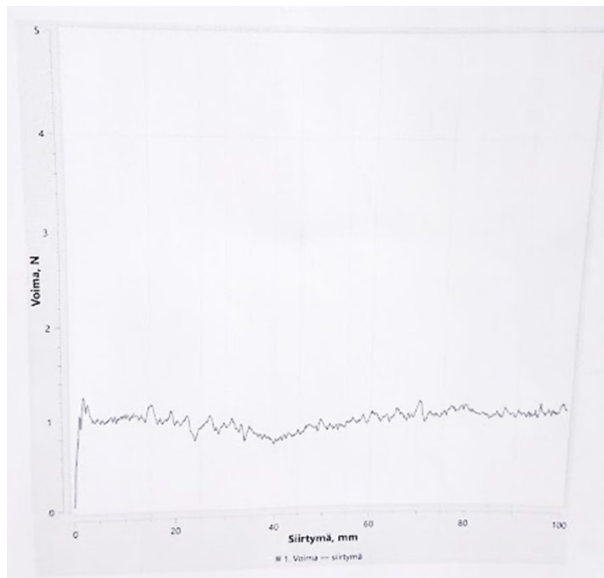
KUVIO 2. Liikekitkakerroin verrattuna pinnankarheuteen

Käsittelemättömän pinnan kitkakuvaaja on nähtävissä kuviossa 3. Vaaka-akselilla on kelkan kulkema matka millimetreinä ja pystyakselilla vastaava kitkavoima. Kun kuvaaja saavuttaa huippunsa, on myös kitka korkeimmillaan. Erittain sileälle käsittelemättömälle pinnalle on kuvaajassa havaittavissa tyypillistä voimakasta kitkavoimien vaihtelua.



KUVIO 3. Käsittelemättömän pinnan kitkakuvaaja

Vastaava kitkakuvaaja kuivavoiteluaineella käsitellylle pinnalle (kuvio 4) on mitattu näytteestä numero 2. Kitkakuvaaja on huomattavasti käsittelemätöntä pintaa tasaisempi ja alhaisemmalla tasolla. Kuvaajan alussa eli kelkan liikkeellelähdessä ei myöskään ole tyypillistä korkeaa piikkiä, jolloin kitka on yleensä korkeimmillaan.



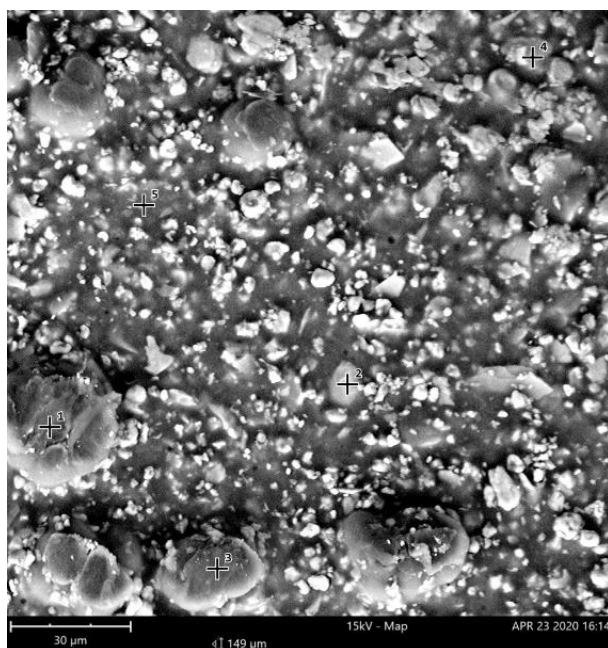
KUVIO 4. Näytteen 2 kitkakuvaaja

Lankamurskaintesti tehtiin näytteen numero 2 mukaisella menetelmällä käsitelyyn aihiolenkkiin. Lenkissä ei ollut 4000 ajatun nipin jälkeen ulkoisia muutoksia (kuva 18), eikä kuivavoiteluaine lähtenyt irtoamaan. Käsitely menetelmällä 2 kesti testin hyvin sekä 1,0 bar:n että 1,25 bar:n kuormituksella. Näkyvät vaakasuuntaiset raidat tulivat telan pintakuviointista.



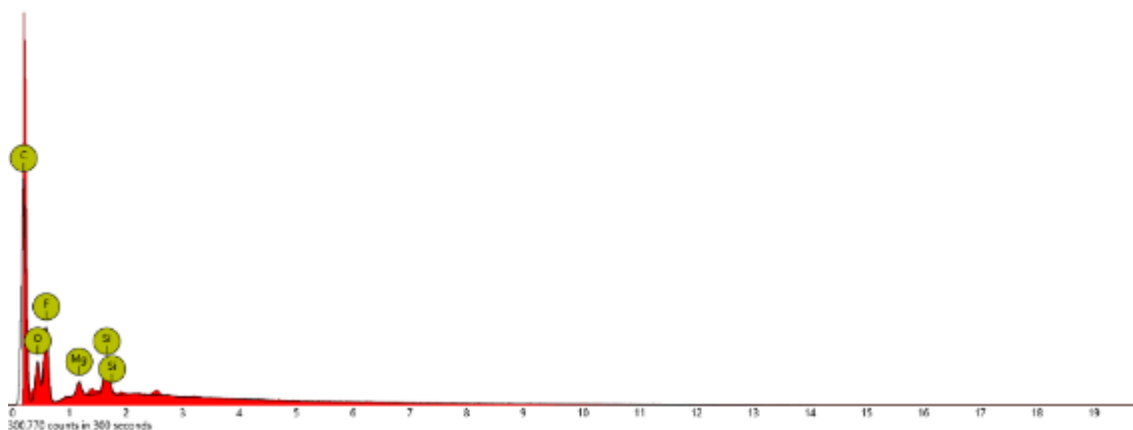
KUVA 18. Lenkki ajon jälkeen kuormituksella 1,25 bar 4000 nipin jälkeen

EDX:llä tutkittiin kuivavoiteluaineiden sisältämiä alkuaineita. Erityisesti haluttiin tutkia fluorin esiintymistä kuivavoiteluaineessa, sillä siitä voi päätellä kuivavoiteluaineen sisältävän myös polytetrafluorieteeniä. Näytteen kanssa vuorovaikutuksessa olevan elektronisuihkun halkaisija on noin 1 μm ja se uppoaa noin 1 – 2 μm :n syvyyteen näytteessä. Näytteestä saadaan tällöin tietoa hyvin pieneltäkin alueelta. Kuva 18 on SEM-kuva mustasta kuivavoiteluaineesta 1800-kertaisella suurennoksella. Kuvassa näkyvät pyöreähkö partikkelit, kuten aiemmin kuvassa 3. Pieni rasti partikkelin päällä kertoo analysoitavan kohdan.



KUVA 19. SEM-kuva EDX-analysista mustasta kuivavoiteluaineesta (Valmet 2020)

EDX-analyysi antaa tulokseksi spektrin, jossa analysiikohdan sisältämät alkuaineet näkyvät piikkeinä (kuvio 5). Vaaka-akselilla on ionisaatioenergia ja piikit vastaavat niitä energiatasoja, joilla vastaanotetaan eniten röntgensäteitä. Mitä korkeampi piikki on, sitä suurempi on sen pitoisuus kyseisessä näytekohdassa.



KUVIO 5. EDX-spektri mustasta kuivavoiteluaineesta kohdasta 1

Analyysistä saatiin siis tulokseksi alkuaineen lisäksi sen suuntaa antava pitoisuus atomien kokonaismäärästä ja massasta. Nämä on ilmoitettu taulukossa 3 sarakkeissa *Atomic Conc.* ja *Weight Conc.* *Element number* tarkoittaa aineen järjestyslukua. Taulukossa on esitetty tulokset EDX-analyysistä mustasta kuivavoiteluaineesta kohdasta 1.

TAULUKKO 3. EDX-tulokset mustasta voiteluaineesta kohdasta 1 (Valmet 2020)

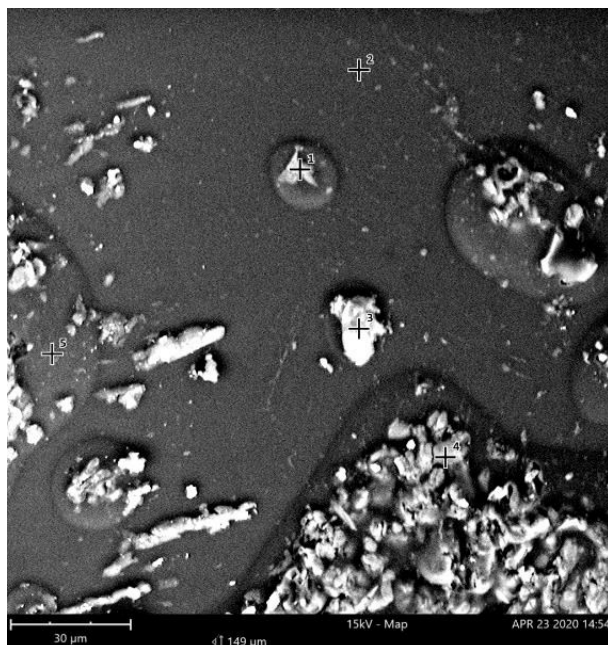
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	69.16	59.95
9	F	Fluorine	15.16	20.79
8	O	Oxygen	14.16	16.35
14	Si	Silicon	0.89	1.80
12	Mg	Magnesium	0.63	1.11

Taulukossa 4 on tulokset EDX-analyysistä kohdasta 2. Tulokset eroavat kohtien 1 ja 2 välillä. Vertailuun valittiin toisistaan selkeämmin eroavia analyysikohtia.

TAULUKKO 4. EDX-tulokset mustasta voiteluaineesta kohdasta 2 (Valmet 2020)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	41.45	40.22
6	C	Carbon	33.83	24.65
12	Mg	Magnesium	8.20	12.09
9	F	Fluorine	8.84	10.19
14	Si	Silicon	4.40	7.49
13	Al	Aluminium	3.28	5.37

EDX-analyysi tehtiin myös läpinäkyvälle kuivavoiteluaineelle sekä pigmentin kanssa, että ilman. Kuvassa 20 on analysoitavat kohdat kuivavoiteluaineesta A ilman pigmenttiä.



KUVA 20. SEM-kuva EDX-analyysistä kuivavoiteluaineesta A 1800-kertaisella suurennoksella (Valmet 2020)

Taulukossa 5 on esitetty EDX-analyysin tulokset kuivavoiteluaineesta A ilman pigmenttiä kohdassa 1.

TAULUKKO 5. EDX-tulokset kuivavoiteluaineesta A ilman pigmenttiä kohdasta 1 (Valmet 2020)

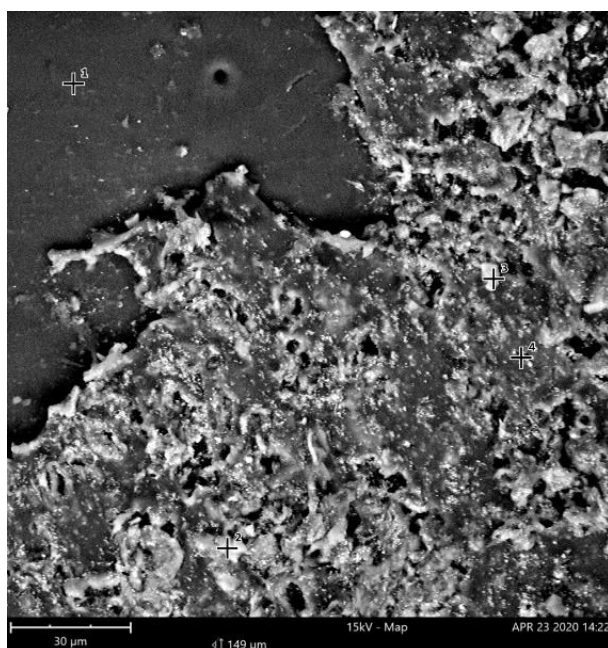
Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	37.01	39.05
6	C	Carbon	35.89	28.43
7	N	Nitrogen	17.31	15.99
12	Mg	Magnesium	3.26	5.23
14	Si	Silicon	1.91	3.53
17	Cl	Chlorine	1.25	2.91
9	F	Fluorine	2.20	2.76
13	Al	Aluminium	1.18	2.10

Taulukossa 6 on esitetty EDX-analyysin tulokset kuivavoiteluaineesta A ilman pigmenttiä kohdassa 4.

TAULUKKO 6. EDX-tulokset kuivavoiteluaineesta A kohdasta 4 ilman pigmenttiä (Valmet 2020)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	62.03	51.26
9	F	Fluorine	18.28	23.89
8	O	Oxygen	16.77	18.46
17	Cl	Chlorine	1.72	4.20
14	Si	Silicon	0.70	1.35
12	Mg	Magnesium	0.51	0.85

Kuvassa 22 on analysoidut kohdat kuivavoiteluaineesta A pigmentin kanssa.



KUVA 22. SEM-kuva EDX-analyysistä kuivavoiteluaineesta A pigmentin kanssa 1800-kertaisella suurennoksella (Valmet 2020)

EDX-analyysin tulokset kuivavoiteluaineesta A, johon on lisätty pigmenttiä ovat taulukossa 7. Tulokset on esitetty näytekohdasta 2.

TAULUKKO 7. EDX-tulokset kuivavoiteluaineesta A kohdasta 2 sisältäen pigmenttiä (Valmet 2020)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	45.57	44.58
6	C	Carbon	34.10	25.05
12	Mg	Magnesium	6.27	9.32
9	F	Fluorine	7.02	8.15
14	Si	Silicon	3.71	6.37
13	Al	Aluminium	2.32	3.83
22	Ti	Titanium	0.66	1.94
20	Ca	Calcium	0.09	0.23
17	Cl	Chlorine	0.10	0.22
16	S	Sulfur	0.10	0.20
19	K	Potassium	0.05	0.12

Tulokset kohdasta 4 kuivavoiteluaineen A näytteestä, johon on lisätty pigmenttiä ovat taulukossa 8.

TAULUKKO 8. EDX-tulokset kuivavoiteluaineesta A kohdasta 4 sisältäen pigmenttiä (Valmet 2020)

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	55.71	38.91
22	Ti	Titanium	15.99	33.40
9	F	Fluorine	19.71	16.34
17	Cl	Chlorine	2.85	4.41
14	Si	Silicon	2.27	2.78
13	Al	Aluminium	1.48	1.74
12	Mg	Magnesium	1.34	1.42
19	K	Potassium	0.23	0.40
20	Ca	Calcium	0.22	0.39
11	Na	Sodium	0.21	0.21

7 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimuksen alussa otettiin SEM-kuvat sekä mustasta, että värittömistä kuivavoiteluaineista A ja B. Mustalla kuivavoiteluaineella on huomattu olevan sellaiset kitkaominaisuudet, jotka ovat toimineet erinomaisesti eri prosessivaiheissa. SEM-kuvilla haluttiin selvittää mustan kuivavoiteluaineen pinnan ominaisuuksia verrattuna värittömiin kuivavoiteluaineisiin. Kuvista huomattiin mustan kuivavoiteluaineen pinnassa pyöreähköjä partikkeleja (kuva 3), jotka tuovat sille suuremman pinnankarheuden kuin värittömällä kuivavoiteluaineella käsitellyllä polyuretaanilla. Partikkelit vähentävät pinnan todellista pinta-alaa ja sen myötä kitkaa. Kuvat otettiin värittömistä kuivavoiteluaineista sekä ilman pigmenttiä, että pigmentin kanssa, jotta varmistuttiin siitä, etteivät pigmentit peitä mahdollisia partikkeleita. Näitä partikkeleita ei havaittu värittömissä kuivavoiteluaineissa A ja B (kuvat 4 ja 5).

Värittömien kuivavoiteluaineiden A ja B levittymistä ja sitoutumista polyuretaanin pintaan tutkittiin ensin käsivaraisella koeruiskutuksella. Koeruiskutuksissa huomattiin välittömästi, ettei kuivavoiteluaine B levity olleenkaan polyuretaanin pintaan, vaan jää pisaroiksi (kuva 6). Vielä lämpökäsittelyn jälkeenkin pinta oli yhtä epätasainen. Kuivavoiteluaine ikään kuin hylki polyuretaanin pintaa. Tämä saattoi johtua aineen kemiallisesta koostumuksesta ja sen aiheuttamista pinta-varauksista. Kuivavoiteluaineen B pinnasta mitattiin myös pinnankarheudet, mutta koska pinta oli niin epätasainen, ei tuloksia voida pitää luotettavina ja ne jätettiin pois raportoinnista.

Tutkimuksia jatkettiin kuivavoiteluaineella A. Ruiskutuskokeet päätettiin toteuttaa kokonaiselle polyuretaaniaihioille. Kahdeksan erilaisen näytteen ominaisuuksia vertailtiin ja niistä pyrittiin valitsemaan parhaiten tarkoitukseen sopiva. Parhaiten polyuretaanin pintaan levittyi ja peittävimmän tuloksen antoi menetelmä 2 (kuva 11). Myös näyte 4 oli peittävä, mutta pinnassa oli myös pigmenttiflokkeja, jotka ovat ulkonäöllinen haitta (kuva 13). Näyte 1 levittyi myös hyvin, mutta myös siinä oli flokkeja, johtuen aluksi liian korkeasta ruiskutusaineesta (kuva 10). Näytteillä 1 ja 4 oli lähes sama pinnankarheus, mutta niiden liikekitkakertoimet olivat käsi-

tellyistä näytteistä suurin ja pienin. Näytteessä 4 ilmeisesti suurempi ruiskutus-paine, joka oli mittarin mukaan 4 bar:a, sai aikaan tasaisen sumun. Pigmenttien lisääminen suhteella 50/50 näytti tuovan harsomaisemman lopputuloksen, mihin pyrittiin myös ruiskun siirtymää kasvattamalla näytteessä 5 (kuva 14). Harsomaiselta näyttävä pinta ei kuitenkaan tuottanut mittauksissa suurempaa pinnankar-heutta. Suurempi pigmentin A pitoisuus taas näytti tuovan peittävämmän pinnan näytteessä 7 (kuva 16). Myös näyte 8 (kuva 17) oli peittävä suuremman pigmenttipitoisuuden ansiosta, mutta ruiskutustulos oli myös epätasainen, ikään kuin marmorikuvioinen. Näytteellä 2 taas oli suurin pinnankarheus, mutta keskimää-räinen kitkakerroin. Tämä saavutettiin kahdella kuivavoiteluainekerroksella, joissa oli eri pigmenttiä. Näytteellä 8 oli melko suuri kitkakerroin ja se oli näytteistä silein, joka johtunee suuremmasta pigmenttipitoisuudesta. Peittävän lopputulok-sen saavuttamiseksi kuivavoiteluaineella A ja nykyisillä pigmenttipitoisuuksilla, on pinta käsiteltävä vähintään kahdesti. Tutkimuksessa voitiin osoittaa, etteivät pin-nankarheus ja kitkakerroin ole suoraan riippuvaisia toisistaan.

Mustalla kuivavoiteluaineella käsitellyn pinnankarheuden Ra-arvo on noin 2, kun kuivavoiteluaineella A pinnankarheus on ilman pigmenttiä noin 1 (liite 2). Pig-menttiä sisältävän kuivavoiteluaine A:n pinnankarheudet olivat tutkimuksissa vä-lillä 0,8 – 1,4 μm . Käsittelemätön polyuretaani eroaa merkittävästi kaikista käsi-tellyistä näytteistä liikekitkakertoimen ollessa noin 0,3 ja pinnankarheuden noin 0,02 μm (taulukko 2). Vaikka pinnankarheus ei ole suoraan sidoksissa kitkaker-toimeen, on aiemmin huomattu liian alhaisten pinnankarheuksien tuottavan on-gelmia seuraavissa tuotantoprosesseissa. Siksi pinnankarheudessa pyritään ar-voon 1 tai sen yli. Rz-arvot ovat yleensä sidoksissa Ra-arvoon ja noudattavat sen muutoksia, joten niitä ei tässä erikseen käsitellä.

Kitkamittauksissa kuvaajista (kuviot 3 ja 4) nähdään selvästi, miten käsittely pie-nentää kitkan huippuarvoja. Käsittelemätön polyuretaanipinta on jatkuvassa vuo-rovaikutuksessa metallisen kelkan kanssa, jolloin sen pinta vuoroin takertuu ja irtoaa metallin pinnasta ja kitkavoimat vuorottelevat. Tämä näkyy tiheinä piikkeinä kuvaajassa sekä ylöspäin, että alaspäin. Kuivavoiteluainekäsittelyn ansiosta piikit tasaantuvat ja kitka pienenee huomattavasti. Tuloksiin valittiin tarkasteltavaksi näyte 2, sillä sen kitkakuvaaja oli merkittävästi erilainen verrattuna käsittelemät-tömän pinnan kuvaajaan.

Mittaustilanteesta riippuvista syistä, kuten ympäristöstä ja mittaajasta, tulee rinnakkaisten kitkamittausten välille väistämättä hajontaa. Kitkamittauslaitteen kelkka asetetaan mittaustilanteessa paikoilleen käsivaralla, joten sen asemoinnista voi aiheutua mittavirhettä. Mittaustulokset riippuvat myös mittalaitteesta ja sen anturin herkkyydestä. Kitkamittauksia ja niiden verrattavuutta pinnankarheuteen voidaan pitää suuntaa antavina, mutta on vaikea ennustaa käsitellyn pinnan käyttäytymistä todellisuudessa.

EDX-analyysiin valittiin tulosten esittelyyn toisistaan eroavia näytekohtia. EDX – analyysillä ei saatu näytteen luonteen vuoksi varmuutta siitä, mitä ainetta kuivavoiteluaineen partikkelit olivat. Näyte toimi eristeenä, jolloin määrittämisessä käytettävä korkeaenerginen röntgensäde vahingoitti näytettä ennen kuin saatiin luotettavia tuloksia. Tuloksia ei voida pitää kvantitatiivisesti luotettavina, mutta ne antavat tietoa näytteen sisältämistä aineista. Tulokset riippuvat suuresti kohdasta, josta analyysi on tehty, sillä näytepinta-ala on niin pieni. Saman näytteen kohdalla esiintyi huomattavaa vaihtelua tuloksissa. Tämä on luonnollista, sillä kuivavoiteluaineella käsitelty pinta ei ole yhtenäinen ja kuivavoiteluaine todennäköisesti sisältää useita eri kitkaa alentavia aineita.

Erytisesti haluttiin tutkia, mitä ainetta ovat mustassa kuivavoiteluaineessa olevat suuremmat partikkelit. Jos partikkelit olisivat polytetrafluorieteeniä, niiden tulisi sisältää fluoria. Tuloksista nähdään (taulukot 3 ja 4), että partikkelit sisältävät jonkin verran fluoria, mutta sitä on havaittavissa vaihtelevia määriä myös partikkeleiden ulkopuolella muualla näytteessä. Näytteessä voi olla tapahtunut materiaalin siirtymistä ja myös näytteen kontaminaatoriski on tällä menetelmällä suuri. Tämän perusteella ei voida päätellä, ovatko juuri suuret pyöreähköt partikkelit polytetrafluorieteeniä, vaikka näyte sitä sisältää. Myös kuivavoiteluaine A sisältää fluoria (taulukot 5 ja 6), eikä siinä ole SEM-kuvissa havaittavissa samoja partikkeleita kuin mustassa kuivavoiteluaineessa. Kummatkin näytteet sisältävät lisäksi esimerkiksi magnesiumia ja piitä, mikä viittaa mahdollisesti magnesiumsilikaatin käyttämiseen kuivavoiteluaineena. Pigmenttiä sisältävän näytteen tulokset (taulukot 7 ja 8) ovat hyvin samantapaisia verrattuna aikaisempiin ja poikkeuksen tekivät todennäköisesti pigmentissä olevat titaanidioksidi, kalsium, kalium ja kloori.

Lankamurskaintestissä näytteen 2 menetelmällä käsitelty polyuretaanilenkki kesti erinomaisesti ja pinta säilyi ehyenä. Tyypillisesti lankamurskaintestin jälkeä tutkitaan vielä näytteen menettämää murtolujuutta, mutta se ei ollut tässä oleellista.

Koeruiskutuksessa huomattiin jonkin verran ongelmia kuivavoiteluaineen ruiskutuksessa pigmentin kanssa. Kuivavoiteluaineseosta ei voitu suodattaa, sillä käytettävissä ei ollut paine- tai vakuumsuodatinta. Normaalipaineella suodatettaessa seoksen valuminen kesti liian kauan jopa suurimman reikäkoon eli 260 µm maalisuodattimen läpi. Kuivavoiteluaineen valumista ei voida odottaa useita, jopa kymmeniä minutteja, sillä seos alkaa tällöin reagoida liian aikaisin jo ennen ruiskutusta. Ongelmaan voisi etsiä ratkaisua vakuumilla toimivasta maalisuodattimesta. Suodattaminen olisi tärkeää, jotta kuivavoiteluaineessa tai pigmenteissä mahdollisesti olevat roskat ja pölyhiukkaset saataisiin pois. Pienetkin hiukkaset ja roskat voivat aiheuttaa flokkeja, jotka näkyvät ulkonäköhaittoina ja voivat irrota pinnasta myöhemmin paljastaen polyuretaanin pinnan. Erityisesti suuremmalla ruiskutusaineella pinnalta löytyi myöhemmin tarkasteltuna enemmän flokkeja.

Koeruiskutustulosten perusteella valittiin kokonainen asiakkaalle valmistettu tuotantoaihe käsiteltäväksi samalla menetelmällä kuin näyte numero 2. Näytteessä 2 yhdistyi tasainen, peittävä pinta, muihin näytteisiin verrattuna korkeampi pinnan karheus ja alhainen kitkakerroin. Kitkakerroin ei kuitenkaan ollut niin alhainen, että sen olisi ajateltu aiheuttavan ongelmia muissa prosessivaiheissa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kitkan ja pinnankarheuden vaikutusta toisiinsa on vaikea ennustaa. Polyuretaanin elastinen rakenne ja sen muotoutuminen vastakkaisen pinnan muotoihin tekee pintojen välisen kitkan määrittämisestä monimutkaista. Pigmentin lisääminen kuivavoiteluaineeseen parantaa pinnan ulkonäköä ja peittävyttä, mutta samalla alentaa pinnan karheutta. Pigmenttipartikkelit tasoittavat pinnan mikroskooppisia huippuja ja laaksoja. Kuivavoiteluaineen tai pigmentin partikkeleiden tulisikin olla kooltaan suuria, jotta ne muuttavat riittävästi pinnan mikroskooppisia muotoja. Lisäksi pinnankarheuteen vaikuttavat partikkeleiden muoto ja suuntautuneisuus. Kitkaan vaikuttavat pinnankarheuden lisäksi pinnan adheesivoimat sekä ympäristökijät, kuten kosteus ja ilman pölyhiukkaset.

Ruiskutusparametreillä voidaan jonkin verran vaikuttaa mikroskooppisiin pinnan muotoihin. Ruiskutuspaineen nostamisella voidaan saada aikaan kuivavoiteluaineen partikkeleiden tasaisempi levittyminen, mutta se lisää ruiskun toimintahäiriöiden riskiä. Suuttimen ympärille voi päästä kertymään jähmettynyttä seosta, joka suuremman paineen takia päätyy ruiskutettavalle pinnalle. Alhaisempi paine tuo epätasaisemman tuloksen, mutta pinnalle ei päädy yhtä paljon flokkeja. Sopiva ruiskutuspaino on näiden välimaastosta ja se riippuu ruiskutettavan aineen ominaisuuksista ja käytettävästä maalisisäiliöstä.

Paineilmaruiskun ja ympäristön puhtaus on ensiarvoisen tärkeää hyvien pintaominaisuuksien kannalta. Ruisku tulisi valita kohteeseen sopivaksi, eikä yhden seoksen ruiskuttamiseen soveltuva ruisku välttämättä sovi toiselle, erityisesti jos pigmentin määrä ruiskutettavassa seoksessa muuttuu. Viskositeetiltään korkeampi seos tarvitsee suuremman suuttimen ja korkeamman ruiskutuspaineen. Ruisku tulee puhdistaa huolellisesti jokaisen käyttökerran jälkeen, sillä suuttimeen ja maalikanaviin kertynyt ja kuivunut aines voi tukkia ruiskun seuraavalla kerralla tai aiheuttaa ruiskun toimintahäiriöitä. Tätä silmällä pitäen oltiin yhteydessä ruiskupesurivalmistajaan, jonka kanssa tehdään edelleen yhteistyötä sopivan ruiskupesurin toimittamiseksi. Ruiskupesuri toimii joko automaattisesti tai osin manuaalisesti pesten ruiskun kaikki osat pesuaineliuoksella ja tämän jälkeen huuhdellen vedellä. Tämä säästäisi myös työaikaa, kun ruiskua ei tarvitse

pestä käsin. Pesuri olisi erinomainen ratkaisu sekä ruiskutustuloksen, jätteenkäsittelyn että työajan säästämisen kannalta. Myös maalausammiossa mahdollisesti leijuva pöly saattaa päätyä käsiteltävälle pinnalle, mikä aiheuttaa pinnan ulkonäkövirheitä.

Tulevaisuutta ajatellen kuivavoiteluaineen, johon pigmenttiä on lisätty, suodattamista olisi harkittava. Esimerkiksi vakuumsuodatus lyhentäisi suodatusaikaa. Ruiskun toimintavarmuus todennäköisesti paranee ruiskupesurin myötä. Pigmenttien levittymistä ja seoksen homogeenisuutta voisi koittaa vielä parantaa lisäämällä komponenttien sekoitusta esimerkiksi sekoituskoneella. Lupaava kehityssuunta on myös kemikaalitoimittajan kanssa tehty yhteistyö uuden värittömän kuivavoiteluaineen kehittämiseksi.

LÄHTEET

Aho, K. 1985. Koneenosien suunnittelu 3. Tehonsiirto. Werner Söderström Oy: Porvoo.

Anttila, R. 2016. Ohjeita vetokokeisiin. Työohje. Rajoitettu pääsy.

Clemitsen, I. 2015. Castable polyurethane elastomers. E-kirja. 2. painos. Luettu 25.3.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www-taylorfrancis-com.libproxy.tuni.fi/books/9780429154256>

Gheisari, R, Nunez, E & Polycarpou, A. 2018. Tribology International. Tribology review of blended bulk polymers and their coatings for high-load bearing applications. Luettu 20.4.2020. Vaatii käyttöoikeuden.

Hautala, M. & Peltonen, H. 2011. Insinöörin (AMK) fysiikka. Osa 1. 10. painos. Lahden Teho-Opetus Oy: Lahti.

Honkanen, J. Tuotepäällikkö. 2020. Lankamurskaintesti. Sähköpostiviesti. Luettu 4.5.2020.

Jokinen, I, Kuusela, A. & Nikkari, T. 2012. Pinnalla 2. Metallituotteiden maalaus. Opetushallitus: Helsinki.

Inkinen, P. & Tuohinen, J. 2006. Momentti 1. Insinöörifysiikka. 4. painos. Otava: Helsinki.

Ismail, A. F, Jaafar, J, Mutalib, M, Othman, M. H. D, & Rahman, M. A. 2017. Membrane Characteristics. E-kirja. Elsevier B. V: Amsterdam. Vaatii käyttöoikeuden.

Mattaus ja infrapunakäsittely. 2020. Työohje. Rajoitettu pääsy.

Mitutoyo. n.d. Surface Roughness Measuring Tester SJ-210. Käyttöohje.

Nanoscience. 2020. Scanning Electron Microscopy. Luettu 14.4.2020.
<https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>

Piirilä, E. 1985. Koneenosien suunnittelu 4. Erityisalueet. Werner Söderström Oy: Porvoo.

Prisacariu, C. 2011. Polyurethane elastomers: from morphology to mechanical aspects. E-kirja. Luettu 27.3.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=763186>

Rökman, J. Tuotekehitysinsinööri. 2020. Opetuskeskustelu. 14.4.2020. Tampere.

Sunray Inc. 2013. Understanding Polyurethane Coefficient of Friction. Luettu 9.4.2020. <https://www.slideshare.net/SunrayInc/understanding-polyurethane-coefficient-of-friction>

Tabor, D. 1995a. Friction mechanisms, effect of lubricants. Tribology Handbook. E-kirja. 2. painos. Butterworth-Heinemann: Oxford. Vaatii käyttöoikeuden.

Tabor, D. 1995b. Frictional properties of materials. Tribology Handbook. E-kirja. 2. painos. Butterworth-Heinemann: Oxford. Vaatii käyttöoikeuden.

Valmet. 2020. Tutkimusaineistoa. Sähköpostiviestit yrityksen sisällä kevään 2020 aikana.

Ylimys, M. 2020. Pinnan sileyden mittaaminen. Työohje. Rajoitettu pääsy.

Zeng, H. 2013. Polymer adhesion, friction, and lubrication. E-kirja. Hoboken, N.J: Wiley. Vaatii käyttöoikeuden.

LIITTEET

Liite 1. Mittauspöytäkirja 1

Pinnankarheus ja liikekitka eri ruiskutusparametreilla

1.4.2020 Kokeet valkoisen pigmentin eri seossuhteilla
Pinnankarheus Mitutoyo MD-suuntaan

#	Ra	Rz	Liikekitkakerroin μ	
käsittelemätön sp				
	0,018	0,136		
	0,018	0,133		
	0,016	0,124		
	0,015	0,145		0,314
	0,020	0,256		0,261
KA	0,017	0,159	KA	0,288
SD	0,002	0,055		
1.				
	1,000	6,679		
	0,916	7,488		
	1,015	6,580		
	0,873	6,745		
	0,995	7,670		
	0,936	5,943		
	0,957	6,917		
	0,849	6,887		
	0,836	6,646		0,072
	0,937	6,250		0,044
KA	0,931	6,781	KA	0,058
SD	0,063	0,514		
2.				
	1,501	9,548		
	1,391	9,502		
	1,494	11,154		
	1,497	12,439		
	1,252	11,429		
	1,545	9,458		
	1,400	10,361		
	1,339	9,428		
	1,392	9,159		0,032
	1,355	11,092		0,034
KA	1,417	10,357	KA	0,033
SD	0,091	1,113		

3.	1,208	8,009		
	1,319	8,859		
	1,097	10,973		
	1,249	7,790		
	1,131	7,682		
	1,080	6,366		
	1,129	6,528		
	1,431	6,733		
	1,107	6,157		0,042
	1,274	5,966		0,04
KA	1,203	7,506	KA	0,041
SD	0,115	1,537		
4.	0,879	7,001		
	0,993	6,357		
	0,825	6,039		
	0,911	5,135		
	0,919	5,879		
	0,957	7,613		
	1,047	7,004		
	1,032	8,262		
	0,920	7,435		0,024
	0,879	6,211		0,025
KA	0,936	6,694	KA	0,025
SD	0,071	0,938		
5.	1,172	7,509		
	1,171	7,282		
	1,046	5,558		
	1,124	7,181		
	1,139	7,677		
	1,127	6,712		
	0,966	5,800		
	1,153	6,338		
	1,166	8,362		0,026
	1,241	7,212		0,031
KA	1,131	6,963	KA	0,029
SD	0,076	0,866		
6.	1,067	7,304		
	1,340	6,665		
	1,157	7,085		
	1,114	8,308		

		1,133	8,561		
		1,254	5,725		
		1,044	6,165		
		1,345	8,008		
		1,251	9,428		0,034
		1,347	6,914		0,03
		<hr/>			<hr/>
KA		1,205	7,416	KA	0,032
SD		0,117	1,148		
7.		1,114	6,800		
		1,017	8,782		
		0,989	7,073		
		1,074	8,327		
		1,272	6,890		
		0,992	5,676		
		1,133	5,763		
		0,953	7,473		
		1,191	6,881		0,042
		1,113	8,063		0,049
		<hr/>			<hr/>
KA		1,085	7,173	KA	0,046
SD		0,100	1,019		
8.		0,811	4,491		
		0,842	5,884		
		0,754	5,355		
		0,675	4,980		
		0,802	5,014		
		0,933	5,591		
		0,813	4,301		
		0,907	5,613		
		0,931	4,086		0,049
		0,744	5,773		0,045
		<hr/>			<hr/>
KA		0,821	5,109	KA	0,047
SD		0,085	0,641		

Kelkan (30N) pinnankarheus		
	Ra	Rz
	0,542	4,084
	0,378	2,906
	0,400	3,339
	0,380	2,796
	0,345	2,777
	0,397	4,391
	0,315	2,810
	0,576	5,073
	0,269	2,718
	0,372	3,247
KA	0,397	3,414
SD	0,094	0,822

Liite 2. Mittauspöytäkirja 2

Pinnankarheus, kuivavoiteluaineella A käsitelty polyuretaani

Pinnankarheus Mitutoyo (Ra)	yksi lakattu kerros	MD-suunta sama kuin ruiskutussuunta
27.2.2020		
kuivavoiteluaine	MD	CMD
A	0,905	0,942
testi 1	1,146	0,942
	1,135	1,137
	1,166	1,159
	1,193	1,097
	1,092	1,084
	1,074	1,052
	0,953	1,070
	0,992	1,043
	1,186	1,052
KA	1,084	1,058
SD	0,102	0,071
A	0,874	1,047
testi 2	0,783	0,852
	0,791	0,896
	0,847	0,852
	0,889	0,847
	0,825	0,897
	0,976	0,940
	0,997	0,872
	1,003	0,728
	0,861	0,676
KA	0,885	0,861
SD	0,081	0,103