

LUT-yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
LUT Kone  
BK10A0402 Kandidaatintyö

TYÖKALUN PINNAN VAIKUTUS KITKAOMINAISUUKSIIN  
KARTONKISOVELLUKSISSA

EFFECT OF TOOL SURFACE ON FRICTION PROPERTIES IN PAPERBOARD  
APPLICATIONS

Lappeenrannassa 13.5.2021

Samu Virtanen

Tarkastaja TkT Panu Tanninen

Ohjaajat TkT Panu Tanninen, DI Antti Pesonen

## **TIIVISTELMÄ**

LUT-yliopisto  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT Kone

Samu Virtanen

### **Työkalun pinnan vaikutus kitkaominaisuuksiin kartonkisovelluksissa**

Kandidaatintyö

2021

35 sivua, 17 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: TkT Panu Tanninen

Ohjaajat: TkT Panu Tanninen, DI Antti Pesonen

Hakusanat: pinnankarheus, kitka, kitkakerroin, kartonki

Kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia metallipinnan pinnankarheuden vaikutusta kartongin kitkaominaisuuksiin. Työssä tarkasteltiin erilaisia teräs- sekä kartonkipintoja, joilla suoritettiin pinnankarheus- ja kitkamittauksia. Pää tavoitteena oli saada lisää ymmärrystä metallipinnan pinnankarheuden vaikutuksesta kitkakertoimeen kartongin ja metallipinnan välillä. Lisäksi selvitettiin, miksi kitkakertoimella on merkitystä kartonkisovelluksissa.

Kirjallisuuskatsauksessa etsittiin tietoa pinnankarheus- sekä kitkamittauksista ja kartongin käytöstä ruokapakkauksissa. Mittaukset suoritettiin kirjallisuuskatsauksessa saatujen tietojen perusteella. Saadut tulokset esiteltiin ja analysoitiin Microsoft Excelin avulla, joista voitiin todeta, että pinnankarheudella on merkitystä kitkakertoimeen kartonkisovelluksissa.

Työssä saatiin vastattua tutkimuskysymyksiin ja asetetut tavoitteet täyttyivät. Työn merkittävimmät johtopäätökset olivat, että työkalun pinnankarheus vaikuttaa kartonkisovelluksissa muun muassa vuokien muovattavuuteen sekä pussimateriaalin liikkeen sulavuuteen pakkauskonikäytössä. Lisäksi havaittiin, että työkalun pinnankarheus ei vaikuta kitkaominaisuuksiin niin yksiselitteisesti.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Samu Virtanen

### **Effect of tool surface on friction properties in paperboard applications**

Bachelor's thesis

2021

35 pages, 17 figures and 1 table

Examiner: D. Sc. (Tech.) Panu Tanninen

Supervisors: D. Sc. (Tech.) Panu Tanninen, M. Sc. (Tech.) Antti Pesonen

Keywords: surface roughness, friction, coefficient of friction, paperboard

The aim of the bachelor's thesis was to study the effect of metal surface roughness on the friction properties of paperboard. Various steel and paperboard surfaces were examined, with which surface roughness and friction measurements were performed. The main goal was to gain a better understanding of the effect of metal surface roughness on the coefficient of friction between paperboard and metal surface. In addition, it was investigated why the coefficient of friction is important in paperboard applications.

The literature review sought information on surface roughness- and friction measurements and the use of paperboard in food packaging. Measurements were performed based on data obtained in the literature review. The obtained results were presented and analyzed using Microsoft Excel, from which it could be stated that the surface roughness has a great role in the coefficient of friction in board applications.

The thesis answered the research questions, and the set goals were met. The most significant conclusions of the work were that the surface roughness of the tools in board applications affects the forming process of trays, and the smoothness of movement of the bag material when used in a packaging machine. In addition, it was found that the surface roughness of the tools did not affect the friction properties so unambiguously.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO .....</b>	<b>4</b>
<b>SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>6</b>
<b>2 KIRJALLISUUSKATSAUS .....</b>	<b>8</b>
2.1 Kitka.....	8
2.2 Kitka metallin ja kartongin välillä .....	9
2.3 Kitkanmittaus.....	10
2.4 Pinnankarheus .....	12
2.5 Pinnankarheuden mittaaminen.....	12
2.5.1 Pinnankarheuden mekaaninen mittaaminen .....	13
2.5.2 Pinnankarheuden optinen mittaaminen.....	13
2.6 Kartonki pakkausikäytössä .....	14
2.6.1 Kartongin käyttö ruokapakkauksissa .....	15
2.6.2 Vuokamateriaalin muovaus .....	15
2.6.3 Kitkan vaikutus vuokamuovausprosessissa .....	17
2.6.4 Pussimateriaali ja VFFS-prosessi .....	18
<b>3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....</b>	<b>20</b>
3.1 Teräspinnat.....	20
3.2 Pakkausmateriaalit .....	21
3.3 Pinnankarheusmittaukset .....	21
3.4 Kitkamittaukset.....	22
<b>4 TULOKSET JA ANALYYSI.....</b>	<b>25</b>
4.1 Pinnankarheusmittaukset .....	25
4.2 Kitkamittaukset.....	27
<b>5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....</b>	<b>32</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>34</b>

**SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

$F_N$	Normaalivoima [N]
$F_\mu$	Kitkavoima [N]
$L$	mittausjakson pituus [mm]
$n$	huomioon otettujen profiilipoikkeamien lukumäärä
$R_a$	Pinnankarheuden profiilipoikkeamien aritmeettinen keskiarvo [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	Pinnankarheuden neliöllinen keskipoikkeama [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	Pinnankarheuden maksimiprofiilinsyvyys [ $\mu\text{m}$ ]
$\mu$	kitkakerroin
ASTM	American Society for Testing and Materials (standardisoimisjärjestö)
CD	Cross direction (poikkisuunta)
MD	Machine direction (konesuunta)
PE	Polyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
VFFS	Vertical form fill sealing (pakkauskonetyyppi)

## 1 JOHDANTO

Kartongin käyttö erilaisten tuotteiden pakkausmateriaalina yleistyy jatkuvasti, kun muovin ja metallien käyttöä pakkauksissa pyritään vähentämään. Esimerkiksi ruoka- ja elintarvikepakkaukset ovat vaihtumassa vauhdilla kartonkisiin. Kartonkipakkauksien yksi merkittävä hyöty muovi- ja metallipakkauksiin verrattuna on niiden ympäristöystävällisyys. (Vishtal, A., Retulainen, E. 2012, s. 4424–4450) Muutosprosessi ei ole helppo, sillä kartonkipakkauksien valmistaminen on kartongin ominaisuuksien takia haastavaa. Tämän vuoksi kartonkimateriaaleja, kartonkipakkauksia sekä niiden valmistusta kehitetään ja tutkitaan jatkuvasti.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan neljän erilaisen metallipinnan ja erään kartonki- sekä paperimateriaalin välistä liikekitkaa. Tutkittavana kartonkimateriaalina on Stora Enson valmistama Trayforma 350+PET40 -vuokamateriaali sekä paperimateriaalina Koehlerin valmistama NexPlus Seal Pure 65 -pussimateriaali, joita molempia käytetään ruokapakkausissa. Lisäksi määritetään tutkittavien metallipintojen pinnankarheus. Se vaikuttaa kitkaominaisuuksiin kartongin ja metallikappaleen välillä. Tarkastellaan siis erilaisia metallipinnan ja paperimateriaalin yhdistelmiä sekä tutkitaan niiden käyttäytymistä. Työn kokeellisen osan tavoitteina on mitata metallipintojen pinnankarheus mahdollisimman tarkasti sekä suorittaa kitkamittaukset siihen tarkoitetulla laitteistolla. Kitkamittauksen tuloksista on tarkoitus kartoittaa lisää ymmärrystä kartonkimateriaalien kitkakäyttäytymisestä, sillä tutkimalla vanhempia kitkamittauksia voi todeta, että tulokset eivät ole yksiselitteisiä. Tärkeimpinä tutkimuskysymyksinä ovat: Miksi työkalun pinnankarheudella on merkitystä kartonkisovelluksissa? Miten työkalun pinnankarheus vaikuttaa kitkaominaisuuksiin kartonkisovelluksissa?

Työhön sisältyy myös kirjallisuuskatsaus, jossa etsitään tietoa kartongin muovausprosessista, kitkasta, pinnankarheudesta ja niiden mittaamisesta. Saatua tietoa hyödynnetään varsinaisen tutkimuksen aikana sekä tuloksia analysoitaessa. Itse tutkimus suoritetaan LUT-yliopistolla pakkaustekniikan laboratoriossa sijaitsevalla laitteistolla. Tutkimuksesta saatuja tuloksia on tavoitteena hyödyntää kartonkipakkauskoneiden materiaalivalintojen suunnittelussa sekä mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

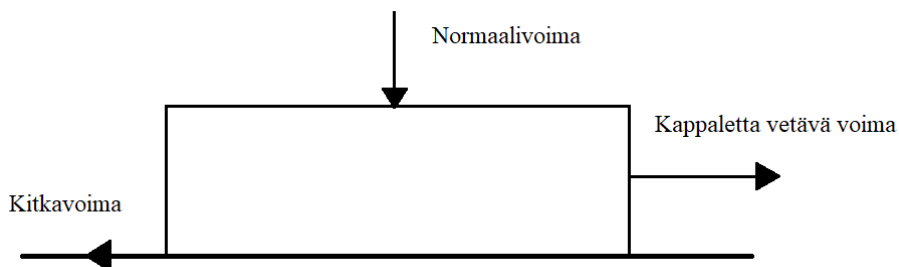
Kirjallisuuskatsausta rajataan keskittymään kartonkipakkausten valmistukseen eikä itse kartongin valmistukseen. Pakkausten valmistusmenetelmien tarkastelu rajataan koskemaan vain niitä valmistusmenetelmiä, joissa käytetään kahta edellä mainittua kartonkilaatua. Tutkimukseen saatavissa olevilla mittauslaitteilla ei kyetä suorittamaan tarkastelua mikro- eikä nanotasolla, joten ne rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Lisäksi kitkatutkimuksessa keskitytään ainoastaan liikekitkaan.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä luvussa esitetään taustatietoa varsinaisen tutkimuksen tueksi. Tietojen avulla kartoitetaan kitka- ja pinnankarheusmittauksen tapoja, kartongin käyttöä pakkauksissa sekä kartongin muovausprosessia. Kirjallisuuskatsauksesta sekä mittauksista saadut informaatiot yhdistämällä voidaan tutkimuskysymyksiin vastata sekä teorian että käytännön kautta.

### 2.1 Kitka

Monet ovat yrittäneet rakentaa ikiliikkujaa, eli kuviteltua laitetta tai systeemiä, joka kerran käynnistettynä pysyisi käynnissä ilman, että siihen tuodaan lisää energiaa. Nämä yritykset ovat kuitenkin epäonnistuneet kitkan vuoksi. Kuvassa 1 esiteltynä miten kitka ilmenee toisiaan vasten liukuvien kiinteiden kappaleiden välissä kitkavoimana, joka vastustaa kappaleiden välistä liikettä.



**Kuva 1.** Kitkavoima vaikuttaa liukuvien kappaleiden välissä

Kappaleen tietyn nopeuden ylläpitämiseksi tarvitaan ulkoinen voima, joka on samansuuruinen kuin vaikuttava kitkavoima mutta vastakkaisuuntainen (Kivioja, S., Kivivuori, S., Salonen, P. 2007, s. 63). Kahden kappaleen pinnan välistä kitkaa kuvataan kitkakertoimella  $\mu$ . Sillä tarkoitetaan kitkavoiman ja kappaleeseen vaikuttavan normaalivoiman suhdetta, joka saadaan kaavalla:

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{F_N} \quad (1)$$

Kaavassa 1  $F_{\mu}$  on kitkavoima ja  $F_N$  kappaleen normaalivoima. Kaavan 1 perusteella systeemin kitkakerroin ei ole riippuvainen kappaleiden pinta-alasta. Tämä johtuu



kappaleiden todellisesta pinnanmuodosta, jota ei voi paljain silmin havaita. Kaikilla pinnoilla on virheitä, eikä mikään pinta ole täydellisen sileä, joten todellinen kosketusala on eri kuin silmin nähtävä pinta-ala. (Budinski, Kenneth, G. 2007, s. 95)

Kiinteitä kappaleita tutkittaessa on yleisesti todettu, että liikkeen aikaansaamiseksi vaadittava voima kahden kappaleen välillä on erisuuruinen, kuin liikkeen tasaiseen ylläpitämiseen vaadittava voima (Budinski et al. 2007, s. 95). Tämän vuoksi kitka jaetaan usein lepo- ja liikekitkaan, joista lepokitka vaikuttaa liikkeelle lähdössä ja liikekitka liukumistilanteessa. Toisaalta erotetaan myös sisäinen ja ulkoinen kitka. Sisäinen kitka muodostuu, kun kappaleen sisällä tarvitaan voimaa molekyylien siirtämiseen pois tasapainoasemasta. Voiman poistuttua osa molekyylien siirtämiseen tarvittavasta energiasta ei palaudu, vaan muuttuu lämmöksi tai muodonmuutokseksi. Ulkoista kitkaa kutsutaan yleensä vain kitkaksi ja se on kappaleiden pintakerrosten vuorovaikutuksesta johtuvaa. Sisäistä ja ulkoista kitkaa esiintyy Kiviojan, Kivivuoren ja Salosen (2007, s. 63) mukaan esimerkiksi auton renkaassa: ”Renkaan vierieessä syntyvä kitkavoima on pääasiassa peräisin kumin sisäisestä kitkasta ja jarruttaessa esiintyy kumin ja tienpinnan välinen kitkavoima.”. (Kivioja et al. 2007, s. 63)

Kitkasta aiheutuu sekä haittoja että hyötyjä. Yleensä haitat, eli energiahäviöt ja kuluminen, ovat hyvin tiedossa ja niihin on pyritty vaikuttamaan monin keinoin. Kitkakerrointa voidaan pienentää materiaalivalinnoilla, erilaisilla pinnoitteilla tai käyttämällä pintojen välillä voiteluaineita. Lisäksi liukuva kosketus voidaan muuttaa vieriväksi käyttämällä apuna esimerkiksi rullalaakereita. (Kivioja et al. 2007, s. 63) Kitkaa voidaan toisaalta myös hyödyntää monissa paikoissa. Näistä hyviä esimerkkejä ovat auton jarrut sekä kitkahitsaus.

## 2.2 Kitka metallin ja kartongin välillä

Tarkasteltaessa kitkaa metallin ja kartongin välillä, tilanne ei ole niin yksinkertainen kuin esimerkiksi tarkasteltaessa sitä kahden metallipinnan välillä. Tämän voi todeta tarkastelemalla raporteja tehdyistä kitkanmittauksista kartongin ja metallin välillä, sillä niistä saadut tulokset eroavat toisistaan. Tuloksiin vaikuttaa merkittävästi käytetty mittaustapa ja -laitteisto. Nämä seikat on huomioitava vertaillessa vanhoja testituloksia omissa mittauksissa saatuihin tuloksiin. Tarkastellaan seuraavaksi raporteista saatuja tuloksia.

Martti Toroi mittasi kartongin ja metallin välistä kitkaa vaakasuoralla menetelmällä ja totesi, että toistettavien tuloksien saaminen kitkamittauksissa on haastavaa. (Toroi, 1975, s. 12) Hänen saamansa tuloksien mukaan kitkakertoimeen vaikuttaa muun muassa metallin pinnankarheus, puhtaus, lämpötila sekä kartongin kosteus. Saaduissa tuloksissa metallin pinnankarheuden tai kartongin kosteuden kasvaessa myös systeemin kitkakerroin kasvaa. Kuitenkin kartongin sileydellä ei ole merkitystä kitkakertoimeen. Metallin pinnalla olevilla epäpuhtauksilla sekä niiden puhdistamiseen käytettävällä liuottimella on vaikutusta kitkaan, ja ne vaikuttavat myös toistettavien tulosten saamiseen. (Toroi, 1975, s. 16–17) Lisäksi lämpötilan noustessa kitkakerroin pienenee ja saavuttaa tietyn vakiotason noin 80°C lämpötilassa. (Toroi, 1975, s. 16–17)

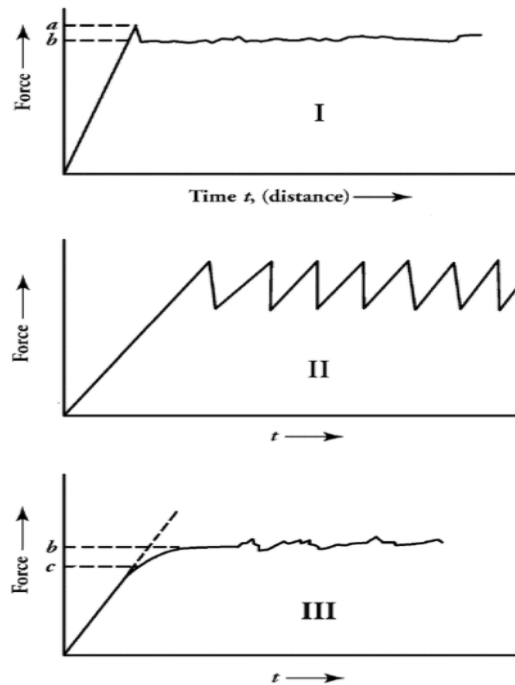
Eräässä toisessa tutkimuksessa koejärjestelyissä keskityttiin mittaamaan kitkaa erityisesti kartonkimuovauksen syvävetoprosessissa. Tutkimuksissa saatujen tulosten mukaan kitkaan kartongin ja metallin välillä vaikuttaa muun muassa niiden lämpötila sekä suhteellinen nopeus. Pieniä näytekappaleita käytettäessä ja nopeuden pienentyessä, kitkakerroin kasvoi. Kuitenkin suuremmilla näytekappaleilla nopeuden kasvaessa myös kitkakerroin kasvoi. Kasvavan lämpötilan todettiin tässäkin tutkimuksessa laskevan kitkakerrointa tiettyyn pisteeseen asti. Lisäksi todettiin, että kartongin sulavan liikkeen aikaansaamiseksi metallipinnan tarvitsee olla sileä. (Lenske, A., Müller, T., Penter, L., Schneider, M., Hauptmann, M. & Majschak, J. P. 2017, s. 8354–8355)

### 2.3 Kitkanmittaus

Yleinen ongelma kitkasta puhuttaessa on toteamus, että jollakin materiaalilla on alhainen kitkakerroin. Todellisuudessa materiaalilla ei voi olla kitkakerrointa vaan se on aina systeemikohtainen. Tarvitaan siis vähintään kaksi materiaalia, joiden välistä kitkakerrointa voidaan mitata ja esittää. (Budinski et al. 2007, s. 95)

Kitkamittauksia on erilaisia riippuen mitattavasta systeemistä ja kitkalajista. Mittauksia voidaan suorittaa esimerkiksi kaltevalla tasolla, suoralla tasolla kelkan avulla tai tukipyörää käyttäen pystysuoraan. Mikäli keskitytään liukuvan liikkeen liikekitkan tutkimiseen ilman voiteluaineita, käytetään suoran tason menetelmää. Mittauksessa vedetään tasaisella nopeudella haluttua kappaletta haluttua pintaa vasten ja mitataan tähän vaadittava voima. Voima voidaan mitata esimerkiksi voima-anturin avulla, jolloin tulokseksi saadaan kuvaaja,

jonka y-akselilla on mitattu voima ja x-akselilla aika. Saadusta kuvaajasta saadaan poimittua voiman arvoja, joilla voidaan laskea kitkakerroin sekä lepo- että liikekitkalle. Kuvaajia on esitelty kuvassa 2.



**Kuva 2.** Esimerkkejä kitkavoimamittauksista (Budinski et al. 2007, s. 102)

Kuvassa 2 on kolme erilaista voimamittausta. Tapauksessa I on liukusysteemi, jonka liikkeelle saamiseksi vaaditaan isompi voima kuin liikkeen ylläpitämiseksi. Eli pisteen a voiman arvoa käytettäisiin lepokitkan kitkakertoimen laskemiseksi ja pisteen b arvoja taas liikekitkan kitkakertoimen laskemiseksi. Kuitenkaan systeemillä ei välttämättä ole selkeää lepokitkapiikkiä, kuten tapauksessa III. Tällöin lepokitkan arvo otetaan pisteestä c ja liikekitkan arvo käyrän tasoittuessa pisteessä b. Toisinaan kitkamittauksen kuvaajaksi saadaan värähtelymäistä liikettä, jossa voiman arvo vaihtelee kuten tapauksessa II. Tätä kutsutaan stick-slip-ilmiöksi, jota kuvaillaan kitkan sykliseksi vaihteluksi kahden elementin kitkavoiman ja suhteellisen nopeuden välillä. Usein näistä mittauksista ei lasketa kitkan arvoja lainkaan, vaan raportoidaan saatuja tuloksia stick-slip-käyttäytymiseksi. Kuitenkin näistä tuloksista on mahdollista laskea kitka tietyllä aikavälillä tai tietyllä matkalla keskiarvon avulla. (Budinski et al. 2007, s. 101)

## 2.4 Pinnankarheus

Kuten edellä jo mainittiin, materiaaleilla ei ole todellisuudessa täysin tasaista pintaa. Vaikka materiaali näyttäisi ihmissilmään täysin sileältä, tarkemmalla tarkastelulla voidaan todeta tämä oletus vääräksi. Todelliset pinnat ovat aaltomaisia ja karheita, koska millään valmistusmenetelmällä ei saada aikaan täysin tasaista pintaa (Kivioja et al. 2007, s. 24). Tätä epätasaisuutta kuvataan pinnankarheudella, jonka suurena käytetään yleensä keskipoikkeamaa  $Ra$ . Keskipoikkeama saadaan kaavalla:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (2)$$

jossa  $L$  on mittausjakson pituus. Keskipoikkeaman voi laskea myös profiilin ja keskiviivan välisten etäisyyksien keskiarvona:

$$Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3)$$

jossa  $n$  on huomioon otettujen profiilipoikkeamien lukumäärä. Näiden sijasta voidaan käyttää myös neliöllistä keskipoikkeamaa  $Rq$  eli RMS-arvoa. Neliöllinen keskipoikkeama  $Rq$  saadaan yhtälöstä:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (4)$$

Edellisten suureiden lisäksi on käytössä maksimiprofiilinsyvyys  $Rz$ , joka on profiilin korkeimman kohdan ja matalimman kohdan välinen etäisyys mittausjaksolla (Valtanen, E. 2019, s. 543). Näistä yleisimmin käytetty on keskipoikkeama  $Ra$  (Kivioja et al. 2007, s. 24). Huomioitavaa on kuitenkin, että kaavat on kehitetty suoran pinnan mittaamiseen. Pinnan ollessa kaareva tai kallellaan, käytetään yleisesti paikallista karheutta keskimääräisen karheuden sijaan.

## 2.5 Pinnankarheuden mittaaminen

Pinnankarheuden mittaamiseen on kaksi fysikaalisesti erilaista tapaa. Voidaan käyttää mekaanista tapaa, jossa ohut neulamainen kärki kulkee mitattavan kappaleen pinnalla ja pinnankarheus tallentuu neulan liikkeestä. Pinnankarheutta voidaan myös mitata optisesti. Optisessa mittauksessa tason pinnasta sironneesta valosta voidaan laskea pinnankarheus.

### 2.5.1 Pinnankarheuden mekaaninen mittaaminen

Mekaanisessa mittauksessa mittaaminen perustuu piikkimäisen kärjen liikuttamisen pitkin analysoitavaa pintaa. Kärjen pystysuorasta liikkeestä voidaan laskea haluttu pinnankarheus. Kärkenä käytetään yleisesti timanttia, jonka säde on muutaman mikrometrin luokkaa. Mittauslaite vetää kärkeä hitaasti pitkin mitattavaa pintaa ja kärjen pystysuora liike tallentuu sähkömekaaniseen anturiin. Mittaus on suoritettava käytännössä laboratorio-olosuhteissa, jossa ei esiinny häiriötekijöitä ja mittausnopeus on pieni. Mekaanisen mittaamisen huonona puolena on mahdolliset materiaalin jäävät urat, jotka terävä kärki jättää pinnalla liikkueensa. Mittaus ei siis sovi herkille materiaaleille eikä mittauksia voi suorittaa tuotannossa, jossa esiintyy tärinää ja mittauspinnan nopeus on suuri. Pinnan profiili saadaan mittauksessa kaksiulotteisena, joten mitattava osuus koko kappaleesta on todella pieni. Tämän vuoksi mekaaninen mittaus ei sovellu koko tuotteen pinnan analysointiin. Mittakappaleen muoto saattaa myös rajoittaa mittauksia, sillä mittaustapa vaatii kappaleeseen fyysisen kosketuksen. (Cielo, 1997, s. 3)

### 2.5.2 Pinnankarheuden optinen mittaaminen

Optiset mittalaitteet perustuvat useimmin sironneen valon tai geometrisen optiikan hyödyntämiseen. Sironnaan perustuvan mittalaitteen ei tarvitse olla lähellä mitattavaa pintaa ja ympäristön häiriötekijät kuten tärinä ei vaikuta juurikaan mittauksiin. Se siis soveltuu hyvin käytettäväksi tuotannossa. Vähemmän yleisiä optisia mittalaitteita ovat esimerkiksi interferenssiin perustuvat järjestelmät. Niitä käytetään erityisesti sileiden pintojen kuten optisten peilien ja linssien tarkasteluun. Näitä järjestelmiä voidaan kuitenkin käyttää pääosin vain laboratorio-olosuhteissa, sillä ne ovat herkkiä esimerkiksi tärinälle. (Cielo, 1997, s. 54)

Optisella mittauksella on monia etuja mekaaniseen mittaukseen verrattuna. Esimerkiksi mittauksia on mahdollista suorittaa ahtaissa paikoissa ja äärimmäisissä olosuhteissa. Lisäksi mitattavaan pintaan ei vaadita fyysistä kosketusta, jolloin pinta ei vaurioitu mittauksessa. Merkittävä hyöty on myös mitattavasta pinnasta saatava 3D-malli, joka mahdollistaa huomattavasti suuremman alueen tarkastelun kuin mekaanisessa mittauksessa. (Cielo, 1997, s. 54)

## 2.6 Kartonki pakkausikäytössä

Merkittävä osa maailman pakkauksista valmistetaan paperista ja kartongista. Muovin ja metallin käytön vähentyessä on paperi- ja kartonkipakkausten käytöllä suurta potentiaalia kasvaa tulevaisuudessa. Kartongin selkeänä kilpailijana pakkausten valmistuksessa on muovi. Siihen verrattuna kartonki on uusiutuvaa, kierrätettävissä sekä ympäristöystävällisempi valinta. Kartongin etuina ovat myös sen suhteellisen edulliset valmistuskustannukset sekä hyvä raaka-aineiden saatavuus ympäri maailmaa, joten sitä voidaan valmistaa missä päin maailmaa tahansa. Kuitenkin kartongin käytöllä on merkittäviä haasteita, jotka rajoittavat sen käyttöä pakkausmateriaalina. Näitä ovat esimerkiksi sen huonot muovattavuus- tai eristysominaisuudet. Nämä haasteet on ratkaistava, jotta muovilla ei olisi niin selkeää kilpailuetua pakkausmarkkinoilla. (Andersson, 2008, s. 339–373) Tässä tutkimuksessa keskitytään kartongin käyttöön erityisesti ruoka- ja elintarvikepakkausissa.

Kartongin pääraaka-aineena on selluloosakuitu, jota saadaan pääosin puista. Kuidun sekaan sekoitetaan erilaisia lisäaineita, joilla kartongin valmistusta saadaan paremmin ohjattua ja ominaisuuksia paranneltua. (Emblem, A., Emblem, H. 2012, s. 178) Kuten edellä mainittiin, kartongin käyttöön pakkausmateriaalina liittyy haasteita. Kartonki on käsittelemättömänä altis kosteudelle ja se on huono suojaamaan pakkauksen sisältöä ulkopuolisilta tekijöiltä. Kyseisiä heikkouksia voidaan eliminoida käyttämällä kartongissa erilaisia pinnoitteita. Pinnoitteena voidaan käyttää esimerkiksi polyeteeniä eli PE muovina tai polyeteenitereftalaattia eli PET muovina. Tällöin kartongin eristysominaisuudet paranevat ja kartonki soveltuu paremmin käytettäväksi esimerkiksi ruokapakkauksissa. (Andersson, 2008, s. 339–373)

Kartongin huono muovattavuus on kuitenkin sen suurin heikkous. Se rajoittaa huomattavasti kartonkipakkausten muotoja ja malleja. Kartonkipakkaukset ovat selvästi yksinkertaisempia kuin vastaavat muovipakkaukset, sillä kartonki ei kestä samanlaisia muodonmuutoksia muovauksessa muoviin verrattuna. Muovin muovaaminen on useimmiten helpompaa ja siitä voidaan tehdä melkein millaisia muotoja tahansa, jolloin muovipakkausista saadaan visuaalisesti monimutkaisempia. Toisaalta kartonkipakkauksen ympäristöystävällinen imago on sen selkeä kilpailuetu. Huonon muovattavuuden

voittaminen onkin tärkein tavoite kartonkipakkausten kehittämisessä. (Svensson, A., Östlund, S., Lindström, T., Ankerfors, M. 2013, s. 602)

### 2.6.1 Kartongin käyttö ruokapakkauksissa

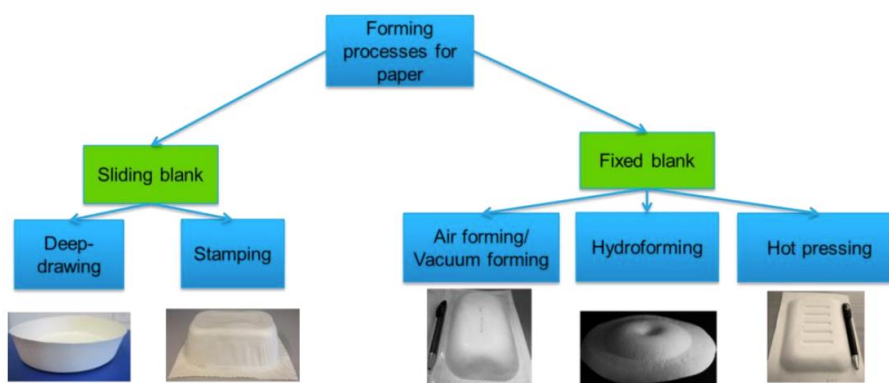
Toimivalla ruokapakkauksella on paljon vaatimuksia. Pakkauksen on välitettävä tietoa sen sisältämästä tuotteesta, oltava houkuttelevan näköinen ja suojata tuotetta toimitusketjun aikana. Pakkauksen on suojattava sisältöä esimerkiksi kosteudelta, valolta ja fyysisiltä kontakteilta. Kaikki nämä vaikuttavat sisältävän tuotteen laatuun ja elinikään. Pakkauksesta ei saa jäädä sisältöön haju, maku, koostumus tai värimuutoksia. Kartonkipakkausilla on hyvä mekaaninen vahvuus ja joustavuus pakkausten valmistuksessa, joilla saadaan suojattua pakkausta fyysisiltä iskuilta. Haasteita tuottaa kuitenkin kartongin eristysominaisuudet, joilla on vaikutusta ruoan laatuun ja säilyvyyteen. Eristävyyttä parannetaan pinnoitteilla ja lisäaineilla. Tällöin pakkaus pysyy tiiviinä ja tuote säilyy käyttökelpoisena pidempään. (Andersson, 2008, s. 339–373)

### 2.6.2 Vuokamateriaalin muovaus

Kartonkivuoan muovausprosessissa pyritään valmistamaan vuoka, joka on hyvin muotoutunut, jäykkä sekä oikean mittainen. Sen kulmissa ei voi olla repeytymiä eikä sileillä pinnoilla saa esiintyä ei-toivottuja taitoksia. Lisäksi jos vuoasta halutaan tehdä kaasutiivis suljettavalla kannella, on sen reunojen oltava tasaiset ja homogeeniset, jotta saadaan muodostettua tiivis liitoskohta.

Muovausprosessit voidaan jakaa kahteen pääryhmään perustuen aihion kiinnitykseen: liukuvan (sliding blank) sekä liukumattoman aihion (fixed blank) prosesseihin. Nämä prosessit ja niistä saatavat muodot on eritelty kuvassa 3. Pääsääntöisesti liukuvassa prosessissa valmistetut astiat eivät ole suljettavissa tiiviisti muodostuvien ryppejen vuoksi, mutta ovat rakenteeltaan suhteellisen syviä. Liukumattoman aihion tapauksessa saatavat astiat taas ovat suljettavissa, mutta ovat muodoltaan matalampia. Kartongin muovautuminen perustuu liukuvan aihion tapauksessa kartongin muottiin liukumiseen ja sivusuuntaiseen supistumiseen. Liukumattoman aihion prosessissa taas kartonki muotoutuu siihen kohdistetun venyttävän rasituksen seurauksena. Kuitenkin on huomioitava, että aihion kiinnitysvoimaa voidaan muuttaa, jotta saavutetaan valitulla materiaalilla haluttu muoto.

Tällöin liukuvan menetelmän muovauksessa saattaa esiintyä kartongin venyvää rasiitusta, kun taas sivusuuntaista supistumista voi esiintyä liukumattoman aihion menetelmässä. (Vishtal, 2015, s. 21–22) Keskitytään tarkemmin liukuvan aihion muovausprosessiin ja erityisesti siihen lukeutuvaan puristusprosessiin.



**Kuva 3.** Muovausprosessit jaoteltuna aihion kiinnityksen perusteella (Vishtal, 2015, s. 22)

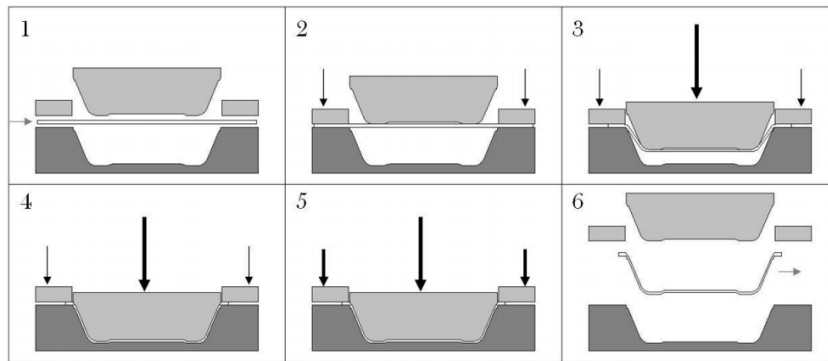
Liukuvan aihion prosessi voidaan jakaa syvävetoprosessiin (deep-drawing) ja puristusprosessiin (stamping). Jälkimmäinen on käytössä teollisuustasolla, kun taas ensin mainittu on vasta kehitysasteella (Vishtal, 2015, s. 21). Puristusprosessin alussa kartonki syötetään koneesta riippuen joko rullasta tai arkeissa. Tämän jälkeen kartonki leikataan halutun kokoisiksi aihioiksi ja niihin tehdään halutut nuutaukset. Nuuttauksen avulla muovausprosessia pystytään ohjaamaan sekä saadaan vuoka taipumaan helpommin halutun muotoiseksi (Leminen, V., Tanninen, P., Mäkelä, P., Varis, J. 2013, s. 5704). Tyypillinen nuuttausasennelu aihion kulmassa on nähtävillä kuvassa 4.



**Kuva 4.** Nuutatun aihion sekä puristetun vuoan kulma-alue (Leminen et al. 2013, s. 5706)



Aihion valmistelun jälkeen ne puristetaan vuokamuotoon metallityökalulla joko sähkömekaanisesti tai hydraulisesti. Puristusprosessi on tarkemmin kuvailtu kuvassa 5.



**Kuva 5.** Vuoan puristusprosessi (Leminen et al. 2013, s. 5707)

Kuvassa 5 vaiheessa 1 kartonkiaihio asetetaan muovaustyökalujen väliin. Vaiheessa 2 kiinnitysvoima puristaa aihion reuna- ja naarastyökalun väliin. Urostyökalu painaa aihion naarastyökalussa olevaan muottiin vaiheessa 3. Vuoan reunojen taipumista ohjataan kiinnitysvoiman suuruudella. Vaiheessa 4 urostyökalua pidetään ala-asennossa ennalta määritetyn ajan verran, jolloin kartongin muovipinnoite pehmenee ja nurkkien rypytykset tiivistyvät yhteen. Vaiheessa 5 vuoan reuna suoristetaan reunatyökalun voimasta. Vaiheessa 6 muodostunut vuoka poistetaan ja uusi aihio voidaan asettaa muovaustyökaluun. (Leminen et al. 2013, s. 5707)

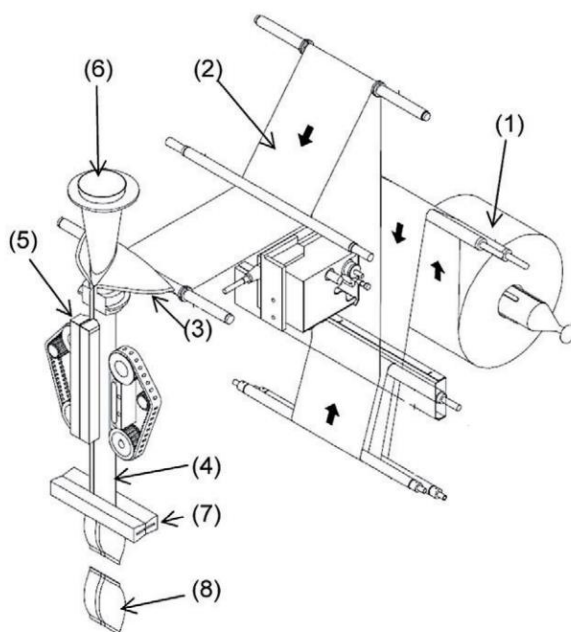
### 2.6.3 Kitkan vaikutus vuokamuovausprosessissa

Metallin ja kartongin välinen kitka vaikuttaa edellä mainituissa vuokamuovausprosesseissa pääosin aihion muovattavuuteen. Kitkaa esiintyy metallisissa muoteissa ja aihion reunojen kiinnityksissä. Liukumattoman aihion prosessissa kitkalla on vaikutusta vuokien ehjänä pysymiseen muovauksen aikana. Liian suuri kitkakerroin aiheuttaa tarpeetonta kireyttä aihiossa, jolloin halkeamien muodostumisen mahdollisuus kasvaa. Lisäksi kitka vaikuttaa negatiivisesti muotojen syvyyden muodostumiseen. (Vishtal, 2015, s. 60) Liukuvassa aihiossa suurempi liikekitka parantaa vuoan ulkomuotoja, kun muodostuvien rypyjen määrä kasvaa, mutta rypyt ovat pienempiä ja tasaisempia. Kuitenkin kitkan kasvaminen nostaa halkeamien todennäköisyyttä sekä saattaa aiheuttaa kartongissa värinmuutosta ei-halutulla tavalla. Värjäntyminen johtuu kartongin ylikuumenemisestä muovausprosessissa. (Vishtal, 2015, s. 62)

### 2.6.4 Pussimateriaali ja VFFS-prosessi

Pussimateriaalia voidaan käyttää esimerkiksi muoto-, täyttö- ja sinetöintikoneessa (VFFS), jota voidaan käyttää ruoan pakkaamiseen. Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin kyseisen pakkauskoneen toimintaa.

VFFS-pakkauskone toimii joko jaksottaisesti tai jatkuvalla liikkeellä. Tarkastellaan jaksottaisesti toimivan koneen toimintaperiaatetta. Kartonkimateriaali on rullassa, joka sijaitsee koneen takaosassa. Rullasta materiaali pujotetaan kiristimen ja useiden rullien kautta muodostusputkiasetelmalle, joka on kuvassa 6 komponentti numero 3. Asetelmassa oleva kaulus ohjaa materiaalia putken ulkoreunoille, jossa se saumataan pitkittäisessä suunnassa lämmön avulla. Materiaalia vedetään tyypillisesti koko prosessin läpi kahdella kitkahihnalla, jotka sijaitsevat putken molemmilla puolilla. Seuraavaksi materiaali saumataan poikittaissuunnassa kuvan 6 kohdassa 7, kun kuumat saumausleuat puristuvat yhteen. Tällöin muodostuu yhden pussin yläsauma ja seuraavan alasauma. Sinä aikana pakattava tuote pudotetaan putken sisäpintaa pitkin pussiin ja seuraavassa syklistä leuassa oleva terävä veitsi leikkaa pussin. Tällöin pussi putoaa esimerkiksi liukuhihnalle ja muodostaa yhden kokonaisen syklin. Koneesta ja pussista riippuen pakkauskone voi tehdä jopa 150 sykliä minuutissa. (Viking Masek, Inc. 2021.)



**Kuva 6.** Tyypillinen VFFS-pakkauskoneen asetelma (Desoki, A., Morimura, H., Hagiwara, I. 2010, s. 32)

Metallin ja kartongin välinen kitka vaikuttaa VFFS-koneessa pääosin kauluksessa sekä kauluksen sisässä olevassa putkessa. Kartonkimateriaalin ulkopuoli on kosketuksessa kaulukseen ja saumaosuus taas putkeen, erityisesti kitkahihnojen kohdalla. (Pesonen, A. suullinen tiedonanto, 26.4.2021) Liiallinen kitka haittaa prosessin sulavaa liikettä, varsinkin jatkuvan liikkeen VFFS-koneessa. Tällöin koneen sykli saattaa vääristyä, jolloin pussi katkaistaan väärästä kohtaa tai siitä tulee väärän kokoinen. Myös materiaalin repeytyminen on riskinä, jos kitkakerroin on liian suuri edellä mainittujen komponenttien välillä.

### 3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi pinnankarheus- ja kitkamittauksissa tutkittavia materiaaleja sekä tarkastellaan, miten mittaukset suoritettiin. Materiaalit oli valittu etukäteen LUT-yliopiston pakkaustekniikan laboratorion toimesta ja mittauksissa käytettiin siellä saatavilla olevaa laitteistoa.

#### 3.1 Teräspinnat

Pinnankarheus- ja kitkamittauksissa käytettiin neljää erilaista teräspintaa, jotka työn tilaaja oli ennalta määritellyt testattavaksi. Kuvassa 7 on esimerkki mittauksissa käytetystä teflonpinnoitetusta teräskappaleesta. Mittauksissa käytettiin kappaleen toista puolta, jonka pinnassa ei ole merkintöjä. Käytetyt neljä teräspintaa olivat:

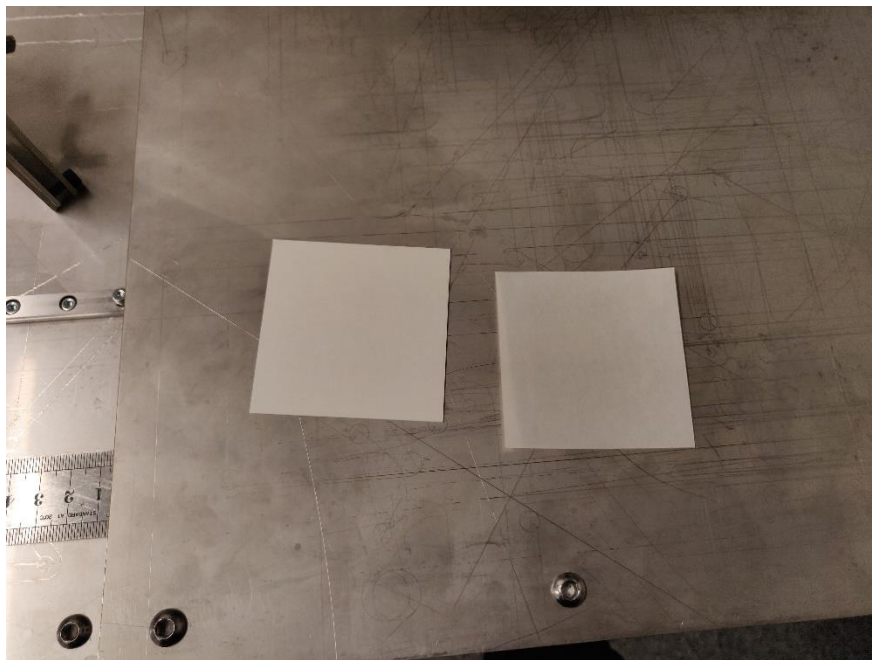
- 1) Käsittelemätön teräspinta
- 2) Karkeasti hiottu teräspinta
- 3) Teflonpinnoitettu teräspinta
- 4) Kiillotettu teräspinta (peilipinta)



**Kuva 7.** Mittauksissa käytetty teflonpinnoitettu teräskappale

### 3.2 Pakkausmateriaalit

Kitkamittauksissa käytettiin kahta erilaista pakkausmateriaalia: Stora Enson valmistama vuokamateriaaliksi tarkoitettu Trayforma 350+PET40 sekä Koehlerin valmistama pussimateriaaliksi tarkoitettu NexPlus Seal Pure 65. Ne ovat esillä kuvassa 8. Molemmissa on toisella puolella muovipinnoite. Trayforma on PET-pinnoitettu ja koostuu kolmesta kuitukerroksesta (Stora Enso Oyj. 2021). NexPlus on taas PE-pinnoitettu ja kuumasaumattavissa (Koehler Paper Group. 2021.). Kartonkikappaleet leikattiin 63,5 mm x 63,5 mm kokoisiksi neliöiksi kitkanmittausstandardin mukaan (ASTM D 1894 2001).



**Kuva 8.** Kitkamittauksissa käytettävät kartonkikappaleet Trayforma 350+PET40 (vas.) ja NexPlus Seal Pure 65 (oik.)

### 3.3 Pinnankarheusmittaukset

Tavoitteena oli suorittaa metallipintojen pinnankarheustarkastelu mahdollisimman tarkasti kahdella tavalla: mekaanisella mittauksella sekä 3D-profilometrillä. Profilometrillä saadaan kappaleen pinnasta kolmiulotteinen kuva, josta pystytään tulostamaan halutut mittaustulokset. Kuitenkin mittauksia tehdessä todettiin, ettei saatavilla olevan profilometrin Keyence VR-3200 tarkkuus riitä mittausten suorittamiseen. Tämän vuoksi pinnankarheudet määritettiin mekaanisesti kannettavalla Mitutoyo SJ-201P mittalaitteella, jolla saadaan mitattua pinnalle arvot Ra, Rz sekä Rq. Mittalaite on esillä kuvassa 9.



**Kuva 9.** Mitutoyo SJ-201P (Travels Tool Co. 2021.)

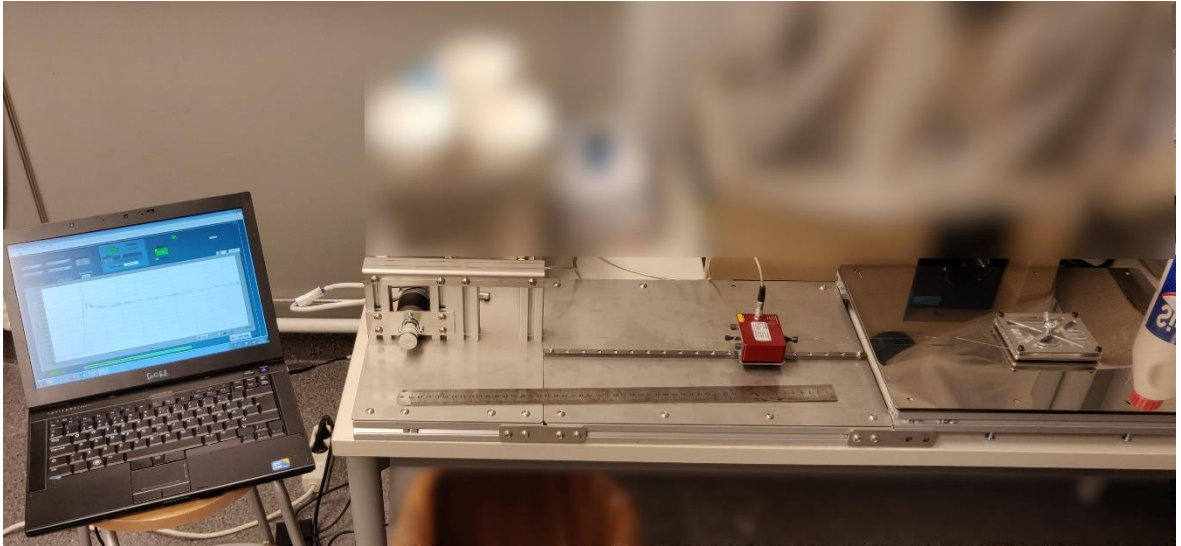
Mittaukset suoritettiin kitkamittauksessa tapahtuvan liikkeen suuntaisesti pakkaustekniikan laboratoriossa, jossa häiriötekijöitä kuten värinää ei esiinny. Ennen mittauksia laite kalibroitiin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Laitteen mittauspää asetettiin mitattavan pinnan päälle ja laite käynnistettiin. Suoritettua mittauksen jälkeen mittalaite esitti saadun tuloksen näytöllä, josta tulos kirjattiin ylös. Mittaus toistettiin jokaisen metallikappaleen kohdalla kuusi kertaa eri kohdista. Saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo käyttäen Microsoft Exceliä ja ne on esitelty seuraavassa luvussa.

### 3.4 Kitkamittaukset

Kitkamittauksessa tavoitteena oli mitata liikekitkaa ja löytää saaduista tuloksista mahdollisia eroavaisuuksia kitkaominaisuuksissa edellä mainittujen kartonki- ja metallikappaleiden välillä. Eroavaisuuksien oletettiin pääasiassa johtuvan metallipintojen eri pinnankarheuksista. Eroja etsittiin kuitenkin myös mittaamalla kitkaa kartongin molemmiin puolin eli muovi- ja kuitupuolilta. Lisäksi kitkakäyttämistä tutkittiin kartongin konesuuntaan (MD) ja poikkisuuntaan (CD).

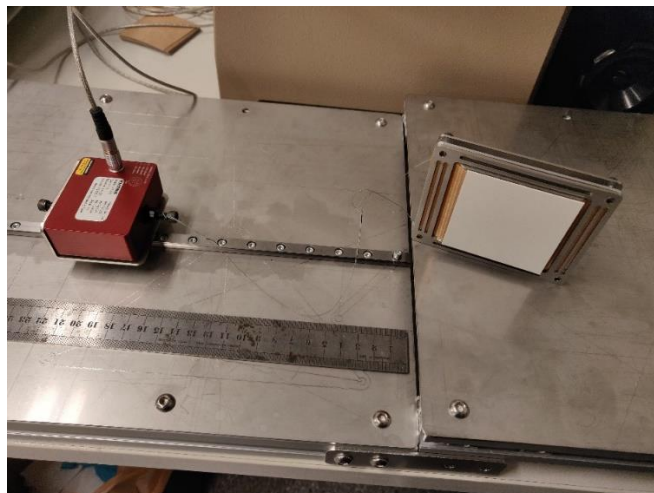
Mittauksessa käytettiin pakkaustekniikan laboratoriossa olevaa laitteistoa, joka näkyy kuvassa 10. Sähkömoottori on kiinnitetty kelaan, johon on kiedottu siimaa. Siiman toinen pää kiinnitetään kuvassa näkyvään punaiseen voima-anturiin. Anturi liikkuu mittauksen aikana kiskolla, joka oletetaan kitkattomaksi. Metallinen mittauskelkka, jonka pohjaan kartonginkappaleet kiinnitetään, yhdistetään siimalla voima-anturin toiseen päähän. Mittauksen käynnistyessä, sähkömoottori alkaa pyöriä vakionopeudella ja pyörittää siimaa

kelan ympärille. Tällöin kelkka alkaa liukua valitun metallikappaleen päällä ja voima-anturi aistii liikuttamiseen vaadittavan voiman eli kitkavoiman. Vetämistä jatkettiin, kunnes kelkka oli liikkunut noin 130 mm. Tiedot siirtyvät reaaliajassa tietokoneeseen, joka tallentaa mitatut arvot. Mittaus toistettiin jokaisen eri kartonkipinnan kohdalla kuusi kertaa ja mitattava kartonkikappale vaihdettiin aina mittausten välissä uuteen.



**Kuva 10.** Mittausjärjestelyt

Kitkanmittausstandardin mukaisesti mittauksissa käytetyn kelkan massa on siihen kiinnitetyn kartonkikappaleen kanssa 200 g ja liikkuu tasaisella nopeudella 150 mm/min (ASTM D 1894 2001). Kartonginpala on kiinnitetty kelkkaan kaksipuolisella teipillä, mikä nähdään kuvassa 11. Voima-anturi mittaa vetämiseen vaadittavan voiman 50 ms näytteenottovälillä.



**Kuva 11.** Analysoitava kartonginpala kiinnitettynä kelkkaan

Mittaus suoritettiin standardin mukaisissa olosuhteissa, eli mittaushuoneen lämpötila oli 23°C ja suhteellinen kosteus 50 % (ASTM D 1894 2001). Kartonki- ja metallikappaleet oli tuotu huoneeseen jo kahta päivää ennen mittauksia, jotta ne ehtivät sopeutua huoneen olosuhteisiin. Mahdollisia epäpuhtauksia mittauspinoilla ehkäistiin puhdistamalla metallipinnat etanolilla ennen mittauksia sekä käyttämällä suojakäsineitä koko toimenpiteen ajan. Tällöin käsissä olevat rasvat ja muut epäpuhtaudet eivät pääse mittauspinoille vaikuttamaan mittaustuloksiin.

Kitkamittauksesta saatu voima-arvo analysoitiin Microsoft Excelillä, jossa siitä muodostettiin kitkavoiman kuvaaja ajan suhteen. Liikekitkan keskiarvo haluttiin mitata 50 mm matkalta. Näytteenottovälin ollessa 50 ms ja kelkan nopeuden ollessa 150 mm/min, tarvitaan liikekitkan määrittämiseksi 400 mittapistettä. Muodostetuista kuvaajista nähtiin millä ajanhetkellä lepo- ja liikekitka vaikuttaa, jolloin saatiin poimittua liikekitkan arvot oikeista kohdista. Näistä pisteistä laskettiin voiman keskiarvo kaikissa kuudessa mittauksessa. Kelkan normaalivoima  $G$  saatiin kaavalla:

$$G = m_{kelkka} * g \quad (5)$$

Kaavassa 5 on kelkan massa  $m_{kelkka} = 200$  g sekä putoamiskiihtyvyyys  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>. Nyt mitatun kitkavoiman ja lasketun kelkan normaalivoiman avulla voidaan laskea lepokitkan kitkakerroin  $\mu$  kartongin ja metallin välillä kaavalla:

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{G} \quad (6)$$

Kaavassa 6  $F_{\mu}$  on kokeen aikana vaikuttavan kitkavoiman keskiarvo ja  $G$  kelkan normaalivoima. Jokaisesta kuudesta toistosta laskettiin kitkakerroin, niiden keskiarvo sekä virhetarkastelusyistä niiden keskihajonta. Saadut tulokset on esitelty seuraavassa luvussa.

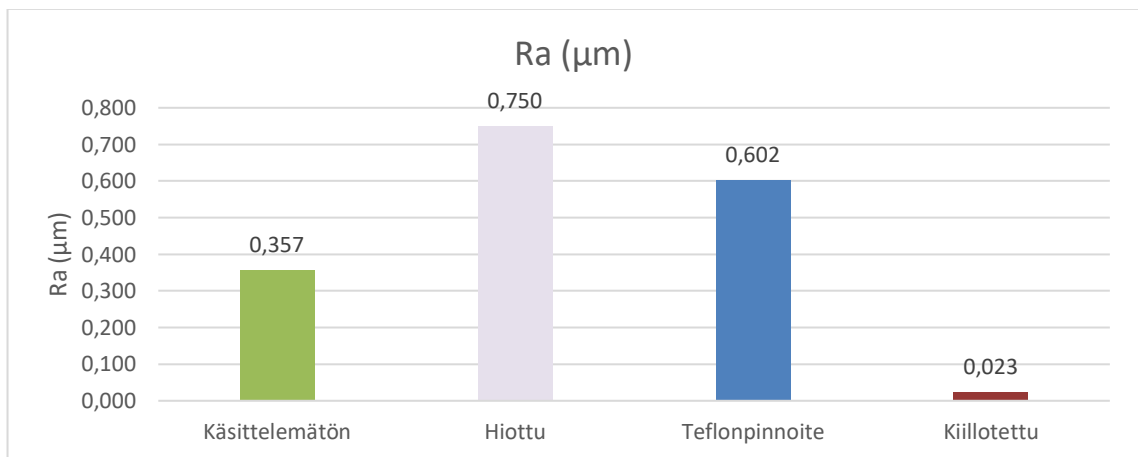


## 4 TULOKSET JA ANALYYSI

Tässä luvussa esitellään suoritetuissa mittauksissa saatuja tuloksia, tarkastellaan niiden oikeellisuutta ja pohditaan mahdollisia kehityskohtia. Pohditaan myös, miten mittauksia voitaisiin jatkojalostaa ja vastataan tutkimuskysymyksiin löydetyn kirjallisen tiedon sekä saatujen mittausarvojen avulla.

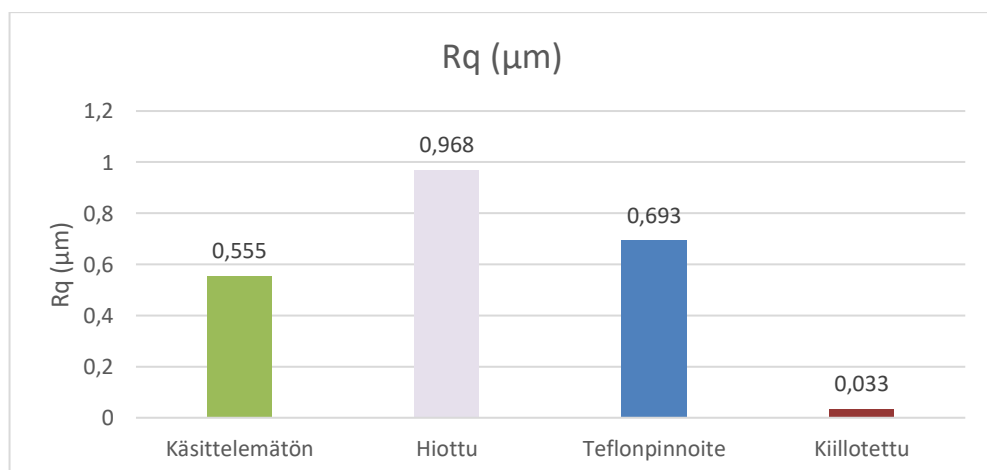
### 4.1 Pinnankarheusmittaukset

Kuvassa 11 on pinnankarheusmittauksessa saadut Ra arvot eri teräspinnoille.



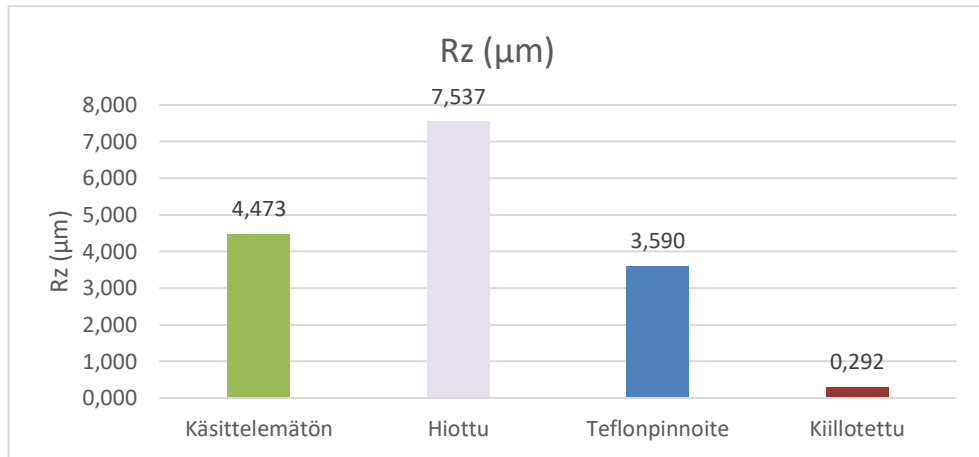
**Kuva 11.** Teräspintojen Ra arvot

Kuvassa 12 on pinnankarheusmittauksessa saadut Rq arvot eri teräspinnoille.



**Kuva 12.** Teräspintojen Rq arvot

Kuvassa 13 on pinnankarheusmittauksissa saadut Rz arvot eri teräspinnoille.



**Kuva 13.** Teräspintojen Rz arvot

Metallikappaleiden pinnankarheudet saatiin määriteltyä käyttämällä mekaanista mittaustapaa. Tuloksista voidaan nähdä selviä eroja kappaleiden pinnankarheuksien välillä. Tarkasteltaessa saatuja keskipoikkeaman  $Ra$  arvoja kuvasta 11, voidaan todeta, että hiottu teräspinta omaa kaikista suurimman  $Ra$  arvon. Vastaavasti kiillotetulla teräspinnalla keskipoikkeaman arvo on kaikista pienin. Käsittelemätön sekä teflonpinnoitettu teräspinta asettuvat näiden väliin, teflonpinnan ollessa karheampi. Saadut neliöllisen keskipoikkeaman  $Rq$  tulokset kuvassa 12 ovat samassa suuruusjärjestyksessä, kuin edellä mainitut  $Ra$  arvot.  $Rq$  arvot ovat kuitenkin 13–36 % suuremmat verrattuna saatuihin  $Ra$  arvoihin. Mitatut maksimiprofiilinsyvyys  $Rz$  arvot ovat kuvassa 13. Tuloksista voidaan nähdä, että mittausalueella hiotun teräspinnan matalimman ja korkeimman kohdan etäisyys on kaikista suurin, kun taas kiillotetun teräspinnan kaikista pienin. Käsittelemätön sekä teflonpinnoitettu teräspinta asettuvat jälleen näiden väliin, mutta nyt kuitenkin toisinpäin. Käsittelemättömän teräspinnan matalimman ja korkeimman kohdan etäisyys on suurempi kuin teflonpinnoitetulla.

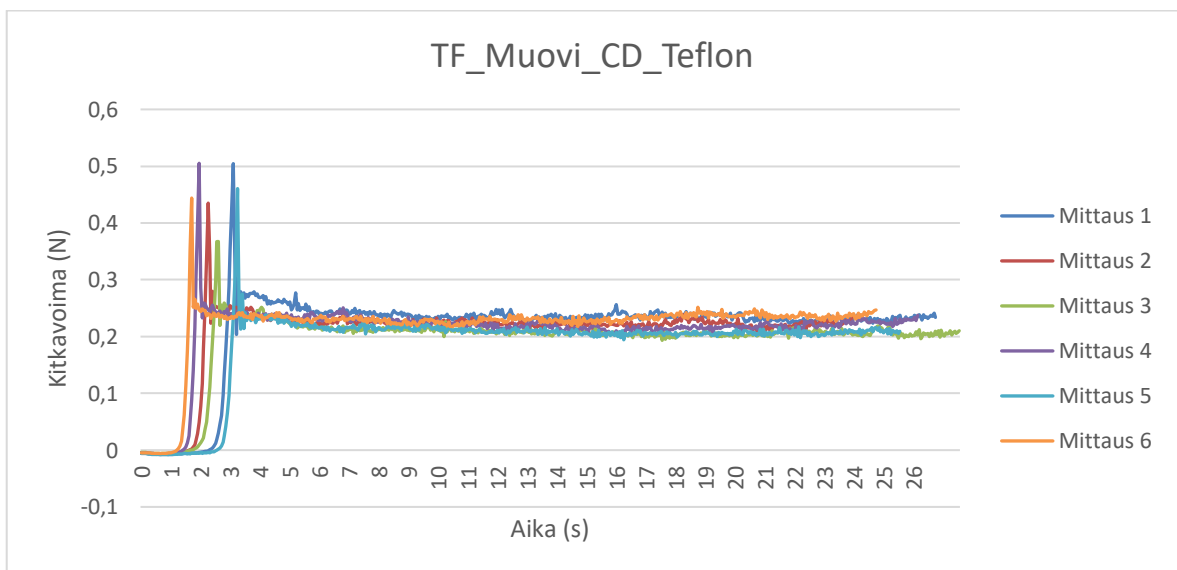
Pinnankarheusmittauksissa saadut tulokset vaikuttavat järkevältä. Pintoja tarkasteltiin myös koskettamalla sekä silmämääräisesti ja päästiin samaan karheusjärjestykseen. Yllätyksenä tuli kuitenkin, että käsittelemättömän teräspinnan  $Rz$  arvo oli suurempi kuin teflonpinnoitetun pinnan. Mahdollisena syynä tähän voi olla teflonpinnan tasainen pinnanlaatu, eli siinä ei ole korkeita huippuja tai matalia laaksoja vaan tasaista

pinnanvaihtelua. Käsittelemättömässä taas saattaa esiintyä korkeita huippuja ja matalia laaksoja siellä täällä, mutta on kuitenkin keskimääräisesti  $Ra$  arvoltaan sileämpi.

Mahdollisia mittausvirheitä pyrittiin ehkäisemään pintojen silmämääräisellä tarkastelulla ennen mittauksia. Eli tarkastettiin ettei materiaalissa ole selvää näkyvää naarmua mittausalueella, mikä vääristäisi mittaustulosta. Lisäksi pinnat puhdistettiin huolellisesti ennen mittausta, jottei epäpuhtaudet vaikuta mittaustuloksiin. Mekaanisessa mittauksessa kyetään tarkastelemaan vain murto-osa koko pinnasta, vaikka mittauksia otetaankin eri kohdista. Lisäksi tulokset ovat keskiarvoja erikohdista pintaa otetuista mittauksista, joten vaikka pinnat näyttivät silmämääräisesti homogeenisiltä, saattaa paikallisia eroja esiintyä. Optinen mittaus olisi ollut ratkaisu tähän ongelmaan, sillä optisesti pystyttäisiin tarkastelemaan isompia alueita kappaleesta. Tulevaisuuden mittauksissa pinnakarheuden määrittäminen optisesti olisi suotavaa, jolloin myös kappaleen pinnasta saadaan 3D-malli. Tästä huolimatta saatujen tuloksien avulla voidaan tutkia pinnankarheuden ja materiaalin profiilin vaikutusta kitkaominaisuuksiin.

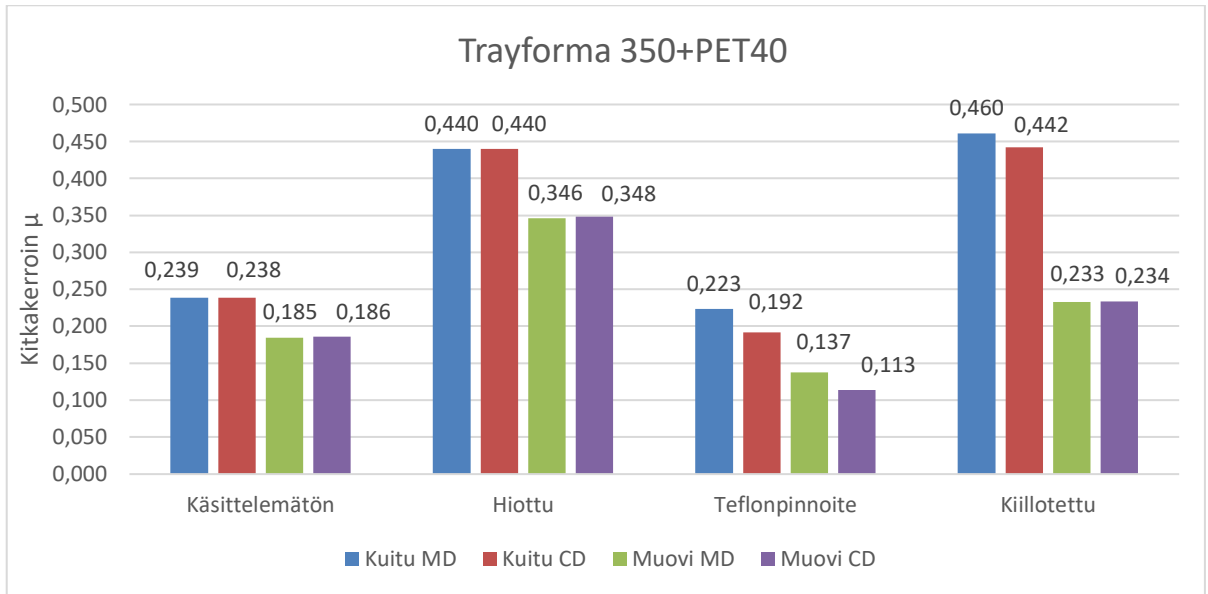
#### 4.2 Kitkamittaukset

Kuvassa 14 on erään mittauksen kitkavoiman kuvaaja ajan suhteen, josta seuraavalla sivulla esiteltävät kitkakertoimet on laskettu.



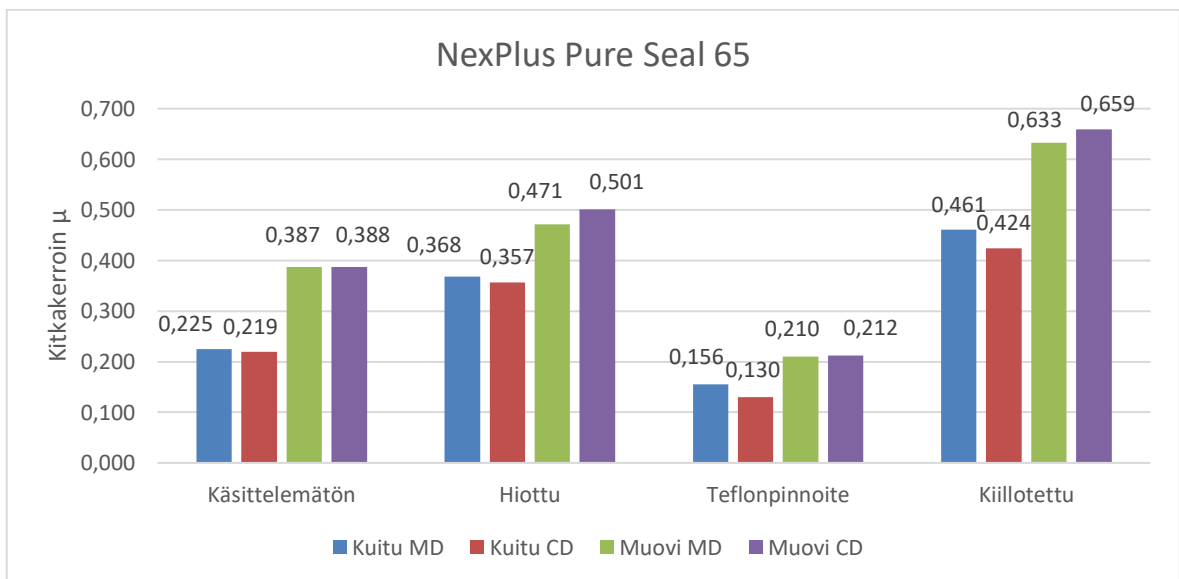
**Kuva 14.** Erään mittauksen kitkavoimakuvaaja

Kuvassa 15 on kitkamittauksista saadut tulokset tutkitulle Trayforma 350+PET40 vuokamateriaalille.



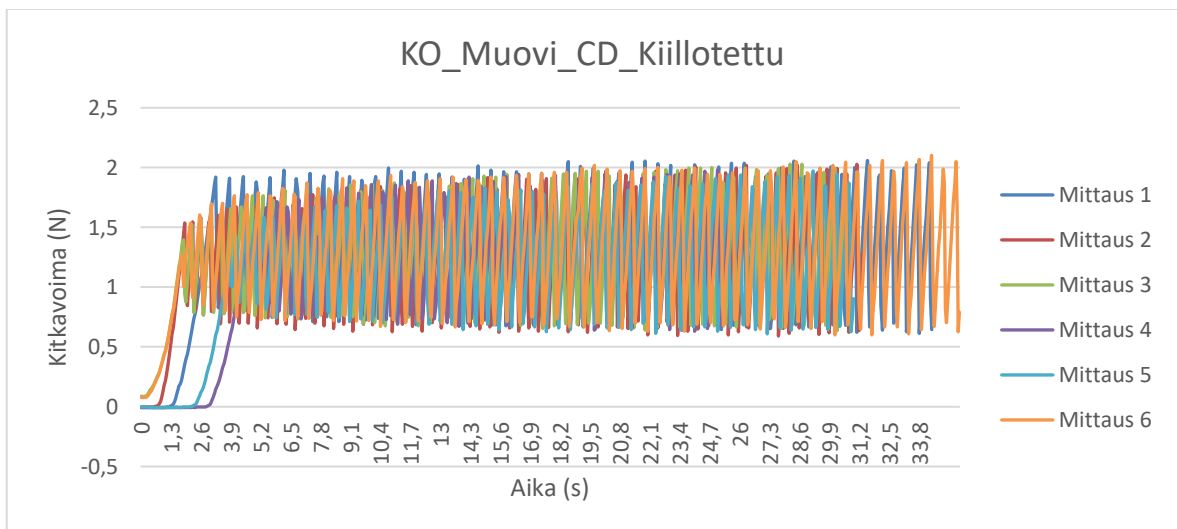
**Kuva 15.** Trayforma 350+PET40 kitkakertoimet eri metallipinnoilla

Kuvassa 16 on kitkamittauksista saadut tulokset tutkitulle NexPlus Pure Seal 65 pussimateriaalille.



**Kuva 16.** NexPlus Pure Seal 65 kitkakertoimet eri metallipinnoilla

Kitkamittaukset suoritettiin suunnitellulla tavalla pakkaustekniikan laboratorioissa olevalla laitteistolla. Kuvassa 14 on eräästä mittauksesta saatu kitkavoimakuvaaja, josta kitkakertoimet on laskettu. Kuvasta nähdään, että piirtynyt kuvaaja on liikekitkan vaikuttaessa melko tasainen. Kuitenkin eräissä mittauksissa esiintyi stick-slip-käyttäytymistä, jonka voi todeta mittauksesta saadun kuvaajan aaltomaisuudesta. Erityisesti kiillotetun teräspinnan mittauksissa tätä käyttäytymistä esiintyi voimakkaasti. Kuvassa 17 on esimerkki NexPuren muovipuolella CD suuntaan tehdystä mittauksesta kiillotettua pintaa vasten. Kuvasta nähdään kuinka stick-slip ilmenee kitkavoimakäyrän aaltomaisena värähtelynä. Tällöin kartonki ei liiku sulavasti teräspinnan päällä vaan liike on niin sanotusti tökkivää.



**Kuva 17.** Mittauksissa esiintynyt stick-slip-ilmio

Lasketuista tuloksista voidaan huomata suuria ja pieniä eroja kitkakertoimissa pintojen välillä. Kuvassa 15 nähdään, että Trayforman kuitupuolta käytettäessä kitkakertoimet ovat selvästi suurempia kuin muovipuolta käytettäessä. NexPuren tuloksissa kuvassa 16 tilanne on päinvastoin, sillä kartongin muovipuolen kitkakertoimet ovat kuitupuolta suurempia. Molemmilla kartongeilla kiillotettu sekä hiottu teräspinta omaavat suurimmat kitkakertoimet, kun taas teflonpinnoitettu pinta omaa pienimmän. MD ja CD suunnalla näyttää tulosten perusteella olevan pieni, ellei jopa mitätön vaikutus pintojen väliseen kitkakertoimeen. Ainoa selkeämpi ero kartongin suunnan vaikutuksessa näkyy Trayforman muovipuolella sekä NexPuren kuitupuolella teflonpinnoitetun teräspinnan kanssa.

Kitkamittauksissa saadut tulokset vaikuttavat todenmukaisilta, sillä toistojen välillä ei ole suurta eroa tuloksessa. Tämän voi todeta taulukoista 1, jossa on esitelty mittausten keskihajonta. Mittaustulosten toistettavuus ei ole optimaalista ja siihen vaikuttaa muun muassa metallipinnan epäpuhtaudet, joita ehkäistiin puhdistamalla metallipinnat ennen mittauksia etanolilla. Lisäksi käytettiin suojakäsineitä, jolloin käsien epäpuhtaudet eivät tartu mittauspinoille. Kartonkipalan kiinnitys kelkkaan tuotti muutamassa mittauksessa hieman ongelmia. Kartonkipalan ollessa väärässä kohtaa, osui kelkassa oleva liimapinta mitattavaan metallipintaan ja aiheutti huomattavasti suuremman kitkakertoimen. Tämä kuitenkin huomattiin heti mittauksia tehdessä, jolloin saatu tulos hylättiin ja kiinnitys varmistettiin. Liikekitkan arvo laskettiin käyttämällä 400 pistettä kitkavoimakäyrältä, jolloin kelkka on liikkunut 50 mm. Tällöin tulos on realistisempi, kuin jos arvo laskettaisiin käyttäen vain yhtä kitkavoiman arvoa.

*Taulukko 1. Kitkamittausten keskihajonnat*

<b>Trayforma keskihajonta</b>				
	<b>Kuitu</b>		<b>Muovi</b>	
	MD	CD	MD	CD
<b>Käsitlemätön</b>	0,00488	0,00109	0,00535	0,00371
<b>Hiottu</b>	0,01481	0,02089	0,00663	0,00921
<b>Teflonpinnoite</b>	0,01955	0,01580	0,01085	0,00516
<b>Kiillotettu</b>	0,03578	0,00658	0,00682	0,00308
<b>NexPlus keskihajonta</b>				
	<b>Kuitu</b>		<b>Muovi</b>	
	MD	CD	MD	CD
<b>Käsitlemätön</b>	0,00243	0,00148	0,00475	0,00700
<b>Hiottu</b>	0,01156	0,00913	0,04499	0,00694
<b>Teflonpinnoite</b>	0,01083	0,00419	0,00721	0,00669
<b>Kiillotettu</b>	0,03609	0,00099	0,03349	0,02012

Mittauksissa saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että metallin pinnankarheudella ei ole varsinaisesti suoraa yhteyttä kitkakertoimeen, kuten kirjallisuuskatsauksessa esitellyissä tuloksissa mainittiin. Kiillotettu teräspinta omasi kaikista pienimmän pinnankarheuden, mutta sillä mitattiin tästä huolimatta kaikista suurimmat kitkakertoimet. Kuitenkin suurimman pinnankarheuden omaavalla hiotulla teräspinnalla oli toiseksi suurimmat kitkakertoimet. Käsitlemätön sekä teflonpinnoitettu teräspinta asettuvat pinnankarheudessa näiden väliin ja niillä mitattiin pienimmät kitkakertoimet. Tästä voidaan

päätellä, että saavuttaakseen pienen kitkakertoimen kartongin ja metallipinnan välillä, metallipinta ei saa olla liian karkea eikä liian sileä. Kartongin sulavan liikkeen aikaansaamiseksi on löydettävä niin sanottu kultainen keskitie metallipinnan pinnankarheudelle. Esimerkiksi kiillotettu teräspinta voitelemattomana sekä lämmittämättömänä omaa suuren kitkakertoimen kartongin kanssa, jolloin kartongin liike ei ole sulavaa. Lisäksi materiaalivalinnoissa on otettava huomioon, onko metallipinta kosketuksissa kartongin kuitu- vai muovipuoleen. Esimerkiksi Trayforman kuitupuolella kitkakerroin oli suurempi kaikilla metallipinnoilla verrattuna sen muovipuoleen. Mittausten perusteella kartongin MD ja CD suunnalla ei näytä olevan selvää käytännön merkitystä kitkakertoimeen.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voisi kitkamittauksia suorittaa erilaisilla mittausjärjestelyillä, kuten muuttamalla kelkan nopeutta, metallipinnan lämpötilaa tai kartongin kosteutta. Esimerkiksi kelkan nopeutta kasvattamalla voitaisiin tutkia tarkemmin stick-slip-ilmiön esiintymistä kiillotetun teräspinnan kanssa. Metallipinnoilla ei käytetty tässä mittauksessa voiteluainetta, jonka käytön vaikutusta voisi myös tutkia tarkemmin.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin metallipinnan pinnankarheuden vaikutusta kartongin kitkaominaisuuksiin kirjallisesti sekä suorittamalla käytännön kokeita. Tavoitteena oli tutkia kitkaa, pinnankarheutta, niiden mittaamista, kartongin muovausprosessia sekä sen käyttöä ruokapakkauksissa. Päätaavoitteena oli saada lisää ymmärrystä metallipinnan pinnankarheuden vaikutuksesta kitkakertoimeen metallin ja kartongin välillä sekä löytää vastaus seuraaviin tutkimuskysymyksiin: Miksi työkalun pinnankarheudella on merkitystä kartonkisovelluksissa? Miten työkalun pinnankarheus vaikuttaa kitkaominaisuuksiin kartonkisovelluksissa?

Tutkimuksessa tarkasteltiin Trayforma vuokamateriaalia sekä NexPlus pussimateriaalia. Lisäksi tutkittiin näiden kuitu- ja muovipuolen sekä MD- ja CD-suunnan vaikutusta kitkaominaisuuksiin. Tutkittavia teräspintoja oli neljä: käsittelemätön, hiottu, teflonpinnoitettu sekä kiillotettu. Näiden pinnankarheudet määritettiin mekaanisesti, jonka jälkeen kitkamittaukset suoritettiin pakkaustekniikan laboratoriossa. Työssä saatiin vastaukset edellä esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Pinnankarheus- sekä kitkamittaukset suoritettiin onnistuneesti ja niistä saadut tulokset vaikuttivat todenmukaisilta.

Työkalun pinnankarheudella on merkitystä kartonkisovelluksissa, sillä se vaikuttaa kartongin kitkaominaisuuksiin. Kitka kartongin ja metallipinnan välillä vaikuttaa taas erityisesti kartonkivuoan muovausominaisuuksiin sekä pussimateriaalia käytettäessä pakkauskoneiden komponenteissa. Kitkakertoimien on oltava näissä prosesseissa oikealla tasolla, jotta pakkausmateriaalit eivät rikkoudu ja prosessit toimivat halutulla tavalla. Vuokamateriaali saadaan esimerkiksi muovattua haluttuun muotoon ja pussimateriaali liikkuu sulavasti pakkauskoneessa.

Työkalun pinnankarheus ei vaikuta kitkaominaisuuksiin yksiselitteisesti. Käytännön mittauksissa todettiin, että kitkakerroin kasvaa merkittävästi pinnankarheuden ollessa liian suuri, kuten käytetyllä hiotulla teräspinnalla tai liian pieni, kuten käytetyllä kiillotetulla teräspinnalla. Kitkakerroin oli pienempi käytettäessä käsittelemätöntä sekä teflonpinnoitettua teräspintaa, joiden pinnankarheudet asettuvat edellä mainittujen väliin.



Tämä johtuu siitä, että pinnankarheuden ollessa liian suuri, kartonkipinta joutuu kulkemaan teräspinnan korkeita huippuja ja matalia laaksoja pitkin. Tällöin liikuttaminen vaatii enemmän energiaa ja liikkeessä voi tapahtua jopa muodonmuutoksia kartonkiin. Pinnankarheuden ollessa taas liian pieni, kartonkipinnan todellinen kosketusala teräspintaan on suurempi, joka vastustaa niiden välistä liikettä ja vaatii enemmän energiaa liikkeen ylläpitämiseen. Tällöin saattaa esiintyä myös stick-slip-käyttäytymistä, joka todettiin myös käytännön kokeissa. Pinnankarheuden ollessa sopivalla tasolla, liian suuria korkeuseroja ei esiinny ja todellinen kosketuspinta-ala jää pienemmäksi. Tällöin pintojen välisen liikkeen ylläpitäminen vaatii vähemmän energiaa ja liike pysyy sulavana.

Tutkitun vuoka- sekä pussimateriaalin kitkaominaisuudet erosivat käytettäessä niiden kuitu- ja muovipuolta. Tämä johtuu oletettavasti puolien eri pinnankarheuksista, joita ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan määritetty. Kuvassa 17 esitelty stick-slip-ilmiö saattaa esimerkiksi johtua kahden pienen pinnankarheuden omaavan pinnan välisestä käyttäytymisestä. Tällöin kitkakerroin nousee, koska kosketuksessa olevat todelliset pinta-alat ovat suuret. MD ja CD suunnalla ei todettu olevan selvää merkitystä kitkakertoimeen, joka saattaa johtua pintojen homogeenisyydestä. Pakkausmateriaalien pintojen ja suuntien merkitystä voitaisiin tutkia tarkemmin, jos pintoja päästäisiin tarkastelemaan optisella pinnankarheudenmittausmenetelmällä.

Työn merkittävimmät johtopäätökset ovat, että työkalun pinnankarheus vaikuttaa kartonkisovelluksissa muun muassa vuokien muovattavuuteen sekä pussimateriaalin liikkeen sulavuuteen pakkauskonekäytössä. Lisäksi havaittiin, että työkalun pinnankarheus ei vaikuta kitkaominaisuuksiin niin yksiselitteisesti. Tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi suunniteltaessa materiaalivalintoja kartongin muovausprosessissa sekä pakkauskoneissa ja työ osoittaaakin, että metallin pinnankarheudella on merkittävä vaikutus kitkaominaisuuksiin kartonkisovelluksissa.

## LÄHTEET

Andersson, C. 2008. New ways to enhance the functionality of paperboard by surface treatment – a review. *Packaging Technology and Science*, Vol. 21, Iss. 6. s. 339–373

ASTM D 1894 Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting. 2001.

Budinski, Kenneth, G. 2007. *Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing: (MNL 56)*. ASTM International, s. 95–102

Cielo, P. 1997. *Selected Papers on Optical Techniques for Industrial Inspection*. Bellingham (WA): SPIE Optical Engineering Press, s. 3, 54

Desoki, A., Morimura, H., Hagiwara, I. 2010, General design of the forming collar of the vertical form, fill and seal packaging machine using the finite element method. *Packaging Technology and Science*, 24(1) s. 32

Emblem, A., Emblem, H. 2012, *Packaging Technology Fundamentals, Materials and Processes*, s. 178

Kivioja, S., Kivivuori, S., Salonen, P., 2007, *Tribologia – kitka, kuluminen, voitelu*. 5. korj. p. Helsinki: Otatieto, s. 24, 63

Koehler Paper Group. 2021. [Yrityksen www-sivulla]. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: <https://www.koehlerpaper.com/en/products/flexible-packaging-paper/NexPlus/NexPlus-Seal.php>

Leminen, V., Tanninen, P., Mäkelä, P., Varis, J. 2013, Combined effect of paperboard thickness and mould clearance in the press forming process. *Bioresources* 8(4), s. 5704-5707

Lenske, A., Müller, T., Penter, L., Schneider, M., Hauptmann, M. & Majschak, J. P., 2017, Evaluating the Factors Influencing the Friction Behavior of Paperboard during the Deep Drawing Process. *BioResources*, 12(4), s. 8354–8355

Pesonen, A., suullinen tiedonanto, 26.4.2021

Stora Enso Oyj. 2021. [Tuote-esite]. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161165/kandidaatintyo\\_sami\\_markkanen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161165/kandidaatintyo_sami_markkanen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Svensson, A., Östlund, S., Lindström, T., Ankerfors, M., 2013, 3D-shapeable thermoplastic paper materials. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, Vol. 28, No. 4, s. 602

Toroi, M., 1975, Paperin ja kartongin kitka metallipintaa vasten. Helsinki: Keskuslaboratorio. s. 12–17

Travers Tool Co. 2021. [Tuote-esite]. Viitattu [2.5.2021]. Saatavissa: <https://www.travers.com/surftest-sj-201p-portable-shop-floor-surface-roughness-tester/p/57-051-529/>

Valtanen, E. 2019, Tekniikan taulukkirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy, s. 543

Viking Masek, Inc. 2021. [Yrityksen www-sivulla]. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: <https://vikingmasek.com/packaging-machine-resources/packaging-machine-blog/a-guide-to-vertical-form-fill-seal-machines>

Vishtal, A., 2015, Formability of paper and its improvement. Espoo: VTT, s. 21–62

Vishtal, A., Retulainen, E. 2012, Deep-drawing of paper and paperboard: The role of material properties. *BioResources*, 7(3), s. 4424–4450