

**TEOLLISUUSENDOSKOOPIN
KÄRJEN HYDROFOBISUUDEN
KEHITTÄMINEN NANOPINNOIT-
TEEN AVULLA**

Aki Murrola

Opinnäytetyö
Marraskuu 2014
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

MURROLA, AKI

Teollisuusendoskoopin kärjen hydrofobisuuden kehittäminen nanopinnoitteen avulla

Opinnäytetyö 64 sivua
Marraskuu 2014

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin nanopinnoitteiden hyötyjä, kun halutaan ehkäistä teollisuusendoskooppien linssien likaantuminen nestemäisten aineiden vuoksi. Linssihin tarttuneet nestemäiset aineet ovat sumentaneet endoskooppien tuottamaa kuvaa siinä määrin, että tähystyksiä on jouduttu keskeyttämään laitteiden kärkien puhdistamista varten. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Okulaari Oy, joka tarjoaa tähystyspalveluita laitteiden myynnin ja maahantuonnin ohella.

Ongelman kartoittamista ja aihealueeseen tutustumista varten toteutettiin kaksi asiantuntijoiden teemahaastattelua ja pintojen kastumisilmiöön perehdyttiin kirjallisuuden avulla. Pinnoitteiden vaikutuksia teollisuusendoskooppien kärkien sekä muiden materiaalien kastuvuuteen tutkittiin opiskelijaryhmässä ideoitujen laboratoriokokeiden kautta.

Opinnäytetyön laboratoriokokeiden sekä kirjallisuuslähteiden perusteella päädyttiin sellaiseen johtopäätökseen, että nanopinnoitteiden avulla on mahdollista parantaa erityisesti teollisuusendoskooppien vedenhylkivyyttä, mutta myös öljynhylkivyyteen pinnoitteet vaikuttavat suotuisasti. Työn tulokset ovat samansuuntaisia kirjallisuus- sekä asiantuntijalähteistä saatujen tietojen kanssa. Opinnäytetyössä esitetään tulosten lisäksi kehitysehdotuksia sekä olemassa oleviin että tulevaisuudessa valmistettaviin laitteisiin.

Asiasanat: teollisuusendoskooppi, nanopinnoitus, hydrofobisuus, pintojen kastuminen

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering
Product Development

MURROLA, AKI

Developing hydrophobicity of industrial endoscope's tip with nanocoating

Bachelor's thesis 64 pages

November 2014

This bachelor's thesis studied the benefits of nanocoatings in prevention of water and oil induced wetting of industrial endoscopes' lenses. Liquid substances have been blurring the image produced by the equipment to such an extent, that the investigation with the endoscope has had to be seized for the cleanup of the lens. The ordering company of this bachelor's thesis is Okulaari Oy. Okulaari offers remote visual inspection services alongside selling and importing the equipment needed for the job.

In order to acquaint oneself with the problem, two expert interviews were conducted. Wetting theory of surfaces was studied from literature and experimental testing of the subject by test methods developed by students took place in the laboratories of Tampere University of Applied Sciences.

The conclusion of this thesis is that nanocoated hydrofobic surfaces do help especially in reducing the adhesion of water and a little less in reducing the adhesion of oils. The conclusions in other literature are parallel to the ones made by this thesis. This thesis also presents ideas for developing the industrial endoscopes currently in use and the ones manufactured in the future.

Key words: industrial endoscope, nanocoating, hydrofobicity, wetting of surfaces

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TYÖN TAUSTA	7
	2.1 Okulaari Oy.....	7
	2.2 Opinnäytetyön tutkimusongelma ja menetelmät sen ratkaisemiseksi	7
	2.3 Rikkomaton aineenkoetus	9
	2.4 Endoskopia.....	9
3	TUTKIMUSONGELMA: ENDOSKOOPIN LIKAANTUMINEN	13
4	PINTOJEN KASTUMISEN TEORIAA	15
	4.1 Koheesio ja adheesio sekä niiden tekemä työ.....	15
	4.2 Pintajännitys ja pinnan vapaa energia.....	15
	4.2.1 Rajapintajännitys sekä rajapintojen vapaa energia	18
	4.3 Pintajännityksen komponentit.....	18
	4.4 Nestepisara kiinteän aineen pinnalla.....	19
	4.4.1 Youngin sekä Young-Dupré:n yhtälöt	21
	4.4.2 Pintojen kastuminen	22
	4.5 Pinnan topografian vaikutus kontaktikulmaan.....	23
	4.6 Hydrofobisuus ja -fiilisyys sekä superhydrofobisuus ja -fiilisyys.....	24
	4.6.1 Öljy ja pinta-aktiiviset aineet superhydrofobisilla pinnoilla	25
5	NANOPINNOITTAMINEN	26
	5.1 Nanoteknologia pähkinänkuoressa	26
	5.2 Nanopinnoitteet.....	28
	5.3 Pinnoitusmenetelmät.....	28
	5.3.1 Sooli-geeli-menetelmä	29
	5.4 Hydrofobiset ja superhydrofobiset pinnoitteet.....	31
6	KOKEELLISET MITTAUKSET.....	32
	6.1 Testauksista yleisesti.....	32
	6.2 Jäännösnesteen määrä koekappaleiden pinnassa	32
	6.2.1 Silmämääräinen tarkastelu	34
	6.3 Jäännösnesteen vaikutus endoskoopin kuvanlaatuun	34
7	TULOKSET	38
	7.1 Tulosten esittämisessä käytetyt tunnusluvut ja kuvaajat	38
	7.1.1 Boxplot-kaavio.....	39
	7.2 Jäännösnesteen määrä koekappaleiden pinnassa	41
	7.2.1 Tilastollinen testaus.....	42
	7.2.2 Terästangot.....	44
	7.2.3 Lasilevyt.....	47

7.2.4	Endoskooppien kärkien lasi- ja teräsosat	50
7.2.5	Yhteenveto jäännösnesteen määrän mittauksista	53
7.3	Jäännösnesteen vaikutus endoskoopin kuvanlaatuun	54
7.3.1	Öljyisellä laitteella otetut kuvat	55
7.3.2	Kärjen ravistamisen vaikutus öljyisen endoskoopin kuvanlaatuun	57
7.3.3	Yhteenveto nesteiden vaikutuksesta endoskoopin kuvanlaatuun	58
8	PINNOITTAMISELLE VAIHTOEHTOISIA MENETELMIÄ.....	60
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	61
	LÄHTEET	62

1 JOHDANTO

Nykyaikaiset tähystyslaitteet ovat mahdollistaneet näkemisen sinne, minne muuten ei nähtäisi. Alun perin lääketiedettä varten kehitetyt endoskoopit ovat löytäneet monia sovelluskohteita niin teollisuudesta ilmailuun kuin turvallisuusosalta energiantuotantoon. Teollisuuden ja lääketieteen tähystyksiä yhdistää kuitenkin myös samankaltainen ongelma, jota on molemmilla aloilla yritetty ratkaista erilaisin keinoin: endoskooppien linssit likaantuvat erilaisten nesteiden vaikutuksesta ja heikentävät näkyvyyttä merkittävästi. Lääketieteessä edellä mainitut nesteet ovat esimerkiksi verta ja kudoksenesteitä, teollisuudessa puolestaan esimerkiksi öljyjä ja erilaisia prosessinesteitä.

Lääketieteellisissä tähystyksissä kohdetta ympäröi aina pehmeä kudos, johon linssiä on mahdollista yrittää puhdistaa. Toisaalta myös erilaisia huuhtelutekniikoita käytetään suonensisäisissä tähystyksissä kohteen (ja linssin) puhdistukseen. Teollisuuden tähystyksissä pehmeitä pintoja ei juurikaan ole hyödynnettävissä. Joissakin endoskooppimalleissa on sisäänrakennettuna kanavat paineilman ohjaamiseksi linssille puhdistusta varten, mutta ulkopuolisten paineilmaletkujen lisääminen valmiisiin laitteisiin tekisi niistä kömpelöitä.

Nanopinnoitteet ovat uudehkona materiaalitekniikan sovellutuksena tarjonneet ratkaisuja muun muassa erilaisten pintojen veden hylkivyyden parantamiseen. Myös öljyn hylkivyyttä voidaan parantaa tietyin varauksin. Ongelmana tehokkaampien pinnoitteiden kanssa on ollut kuitenkin niiden kestävyys öljykosketuksessa ja mekaanisen kulutuksen kestävyys. Toisaalta kehitys hylkivien pinnoitteiden saralla on ollut voimakasta, ja niiden kestävyuden paraneminen lienee vain ajan kysymys.

Opinnäytetyössä haluttiin ensisijaisesti tutkia nanopinnoitteilla saavutettavia hyötyjä, kun halutaan parantaa teollisuusendoskooppien kykyä hylkiä nesteitä, erityisesti vettä ja öljyä. Myös muita ongelman ratkaisuvaihtoehtoja haluttiin kartoittaa. Yksi työn ohjeistavoitteista oli saada tietoa nanopinnoitteista ja endoskopiasta samojen kansien väliin. Opinnäytetyö tehtiin Okulaari Oy:lle, joka on Pohjanmaalla ja Tampereella toimiva teollisuusendoskopiaan erikoistunut yritys. Opinnäytetyötä varten suoritettiin sarja erilaisia testauksia TAMKIn laboratorioissa kevään 2014 aikana. Työtä varten toteutettiin myös kaksi asiantuntijoiden temahaastattelua.

2 TYÖN TAUSTA

2.1 Okulaari Oy

Okulaari Oy myy, markkinoi, maahantuo ja vuokraa teollisuusendoskooppeja sekä tarjoaa tähystyspalveluita eri teollisuuden aloille. Se järjestää myös laitteiden käyttöön liittyviä koulutus- sekä huoltopalveluita. Yritys on perustettu vuonna 2011 ja toimintaa sillä on Tampereella ja Koskenkorvalla. Liiketoiminta-alueena on koko Suomi. (Okulaari Oy) (J. Talvitie 2013)

Yritykselle kehitettiin vuonna 2013 palvelumalli tähystyspalveluiden tarjoamiseksi koko maan laajuisesti. Sen ideana on koota eri puolilla Suomea sijaitsevat tähystyksiä suorittavat tahot verkostoksi, jonka toimintaa Okulaari ohjaa oman tähystystoimintansa ohessa. Verkoston avulla eri puolilla maata sijaitsevien asiakkaiden tähystystarve saadaan täytettyä nopeasti hyödyntämällä lähimpänä olevan toimijan laitteistoa ja asiantuntemusta. Verkosto mahdollistaa myös monipuolisen laitekannan saatavilla olon. (Okulaari Oy) (J. Talvitie 2013)

Yrityksen keskeisin kumppani on tällä hetkellä Saksalainen endoskooppivalmistaja IT Concepts, jonka laitteita Okulaari tuo maahan ja markkinoi. IT Concepts vastaa myös valmistamiensa laitteiden huolloista. Kyseisen valmistajan laitteet ovat toiminnan keskiössä myös tähystyspalveluiden tuottamisessa, sillä Okulaarin käytössä oleva kalusto koostuu pitkälti heidän laitteistaan. Mahdollisuutta hyödyntää muidenkin valmistajien tuotteita ei ole kuitenkaan haluttu sulkea pois. (V. Talvitie 2014) (J. Talvitie 2013)

2.2 Opinnäytetyön tutkimusongelma ja menetelmät sen ratkaisemiseksi

Opinnäytetyön tutkimusongelmaksi rajautui opinnäytetyön tilaajayrityksen kanssa käytyjen keskustelujen, opinnäytetyön sidosryhmien kanssa toteutettujen neuvotteluiden sekä kirjoittajan toteuttaman tiedonhaun perusteella seuraava kysymys: ”Voiko nanopinnoituksella tai muulla menetelmällä ehkäistä endoskoopin sisäänvientipään likaantumista (ja helpottaa sen puhdistamista)?” Tilaajayritys toivoi haastatteluiden ja laboratorioympäristössä toteutettavien kokeiden sisällyttämistä opinnäytetyöhön, joten ne oli-

vat lähtökohtia työn suunnittelussa. Kokeiden ja haastatteluiden sisällön, toteutustavan sekä lukumäärän määrittely tapahtui opinnäytetyön tekijän toimesta.

Teoriataustan koostamisessa ja jäsentelyssä, endoskopiaan ja nanopinnoitteisiin perehtymisessä, esiintyvien ongelmien ja niiden syy-seuraussuhteiden taustoittamisessa sekä ratkaisuiden etsimisessä hyödynnettiin kahta teemahaastattelua. Teemahaastattelu on Pitkärannan (2010) mukaan haastateltavan vastauksien pohjalta joustavasti etenevä haastattelutyyppi, jonka teemat ja aihepiirit haastatteli on määrittänyt. Pitkärannan mukaan haastatteluiden avulla on mahdollista kerätä sekä kvantitatiivista että kvalitatiivista aineistoa. Haastatteluista opinnäytetyöhön kerätty aineisto edustaa näistä jälkimmäistä, eli laadullista. (Pitkäranta 2010)

Työssä suoritettujen laboratoriokokeiden avulla saatiin empiiristä tietoa juuri tutkimuksen kohteena olleista aiheista. Kokeiden tarkoituksena oli tutkia haastatteluiden sekä kirjallisuuslähteiden pohjalta saavutetun tiedon yleistettävyyttä tutkittavaan kohteeseen. Toisaalta on syytä nähdä asia myös toisinpäin, eli teoriatiedon merkitys empiiristä tietoa tukemassa ja vahvistamassa. Kokeista saatu aineisto edustaa kvantitatiivista, eli määrällistä, mitattavaa aineistoa.

Opinnäytetyön tutkimusmetodina on käytetty suunnittelutieteellistä tutkimusotetta. Se vastaa Järvisen (2004, 103 - 113) mukaan kysymyksiin esimerkiksi siitä, onko jokin innovaatio toteutettavissa tai kuinka hyödyllinen kyseinen innovaatio on. Jos tutkimusongelmaa voidaan kuvailla esimerkiksi seuraavilla verbeillä: rakentaa, muuttaa, parantaa, vahvistaa, huoltaa jne., on tutkimus Järvisen mukaan todennäköisesti suunnittelutieteellinen. Järvinen (2004, 113) esittää Y. Engeströmin (1987) laatiman kehittämistutkimuksen viisivaiheisen metodologian, jota tämän opinnäytetyön toteuttamisessa on pyritty pääpiirteissään noudattamaan:

1. Kuvailu ja hahmottelu
2. Kohteen analyysi
3. Uusien välineiden hahmottelu
4. Uusien välineiden soveltaminen kohteen toiminnan muuttamiseksi
5. Raportointi

Kohteella tarkoitetaan Engeströmin listauksessa kehittämiskohdetta, eli tässä yhteydessä teollisuusendoskoopin pintojen ominaisuuksia. Uusilla välineillä tarkoitetaan tämän opinnäytetyön puitteissa erilaisia pinnoitteita. (Järvinen 2004, 103-113)

2.3 Rikkomaton aineenkoetus

Materiaalien testausmenetelmät voidaan jakaa rikkovaan aineenkoetukseen (DT) sekä rikkomattomaan aineenkoetukseen (NDT). Rikkomattomalla aineenkoetuksella tarkoitetaan nimensä mukaisesti sellaisia testimenetelmiä, jotka eivät riko tutkittavaa kappaletta ja kappale on tutkimuksen jälkeen käyttökelpoinen. Rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmiä voidaan käyttää komponentin valmistuksessa laaduntarkkailun välineenä tai sen käyttöänsä aikana kunnonvalvonnan työkaluna. Jos komponentissa havaitaan kunnonvalvonnan yhteydessä esimerkiksi särö, voidaan rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmillä selvittää asiaa laajemmin. Tutkituista vioista saatuja tietoja voidaan hyödyntää komponenttien turvallisuuden ja luotettavuuden arvioinnissa sekä mahdollisten rakennemuutosten lähtökohtana suunnittelussa. (Raman 2007, 256-257)

Rikkomaton aineenkoetus voidaan jaotella pinta- ja volymetrisiin testausmenetelmiin, joista toisella saadaan selville kappaleen pinnalla olevat viat ja toisella kappaleen sisäiset viat. Pintamenetelmiä ovat esimerkiksi silmämääräiset tarkastukset sekä tunkeumanestetarkastukset. Volymetrisiä menetelmiä puolestaan ovat esimerkiksi ultraääni- sekä radiografiset tarkastukset. Silmämääräinen tarkastus on hyvin yleinen ja yleensä se suoritetaan tutkittaville kappaleille ennen siirtymistä tarkempiin - mutta usein myös kalliimpiin menetelmiin. Silmämääräinen tarkastus on yksinkertaisimmillaan kappaleen tutkimista paljailla silmillä, mutta myös erilaisia apuvälineitä kuten peilejä ja suurentavia linssejä käytetään. (Prakash 2012) (Raman 2007, 256-260)

2.4 Endoskopia

Endoskopia lasketaan ainetta rikkomattomiin testimenetelmiin ja silmämääräisen tarkastuksen apuvälineeksi peilien, suurennuslasien, mikroskooppien ym. ohella. Endoskooppeja käytetään kun halutaan tutkia kappaleiden ja rakenteiden sisäpuolisia pintoja. Niiden halkaisija on Prakashin (2012, 107) mukaan tyypillisesti 5 - 10 millimetriä ja pituus

tyypillisesti 150 - 1000 millimetriä. Niillä voidaan tutkia pienen halkaisijan ja mahdollisesti pitkänkin varren ansiosta kohteita, jotka sijaitsevat etäällä katsojasta ja monimutkaisten reittien päässä, joihin ei muuten päästäisi näkemään.

Endoskooppien kehitys sai alkunsa 1800-luvun alussa lääketieteen saralla, mutta teollisuusendoskopian kehitys lähti kunnolla käyntiin vasta toisen maailmansodan jälkeen. Ensimmäisillä teollisuuskäyttöön tarkoitetuilla laitteilla pystyi tutkimaan tarkasteltavaa kohdetta silmämääräisesti ilman mahdollisuutta kuvaamiseen. Ne olivat jäykkiä putkimaisia laitteita, joilla pystyi tähystämään vain suoraviivaisesti endoskooppiin nähden sijainneita kohteita. Kuvanottomahdollisuus endoskooppeihin tuli 60-luvulla 35 mm:n kameroiden myötä. Videokuvauksen kehittyminen korvasi myöhemmin valokuvakamerat, ja kuituoptiikka mahdollisti esteiden taakse tähystämisen kuitujen avulla saavutettavan taipuisan rakenteen ansiosta. (Laffont 2011)

Nykyiset endoskoopit voidaan jaotella kolmeen pääryhmään: videoendoskooppeihin (kuva 1), jäykkiin boreskooppeihin (kuva 2) sekä fiberoskooppeihin (kuva 3). Videoendoskoopeissa kuva välitetään käyttäjälle sähköisesti kameran avulla, kun taas muissa se välittyy optisesti. Jäykkien boreskooppien toiminta perustuu valon heijastamiseen prismojen avulla kun taas fiberoskoopeissa valo välitetään käyttäjälle kuituja pitkin. Jäykillä boreskoopeilla tarkastellaan suoraan edessäpäin olevia kohteita, sillä nimensä mukaisesti ne eivät taivu, tosin tähänkin on olemassa poikkeuksia. Videoendoskoopit ja fiberoskoopit ovat puolestaan kokonaan taipuisia laitteita, joiden avulla voidaan nähdä monimutkaistenkin reittien päässä sijaitsevia kohteita. Niissä on tyypillisesti käyttäjän käänneltävissä oleva kärki. Kaikkiin laitteisiin on mahdollista liittää valonlähde, jonka tuottama valo välitetään tarkasteltavaan kohteeseen. Myös muita lisälaitteita on saatavilla. (V. Talvitie 2014) (IT Concepts GmbH)

Teollisuusendoskoopeille on löydettävissä käyttökohteita useilla eri aloilla. Ilmailualalla endoskooppi on lähes jokapäiväinen työkalu ja sieltä teollisuusendoskopian voidaan katsoa saaneen alkunsa. Tyypillinen kohde on lentomoottorien kunnonvalvonta, ja moottorivalmistajat ovatkin usein ohjeistaneet tietyt tarkistukset tehtäviksi tietynkokoisella ja -tyyppisellä laitteella, usein boreskoopilla. Muita yleisiä endoskopian sovelluskohteita ovat esimerkiksi metalliteollisuuden kunnossapito ja laadunvarmistus, prosessi- ja elintarviketeollisuuden kunnossapito sekä energiantuotannon koneiden ja laitteiden

kunnonvalvonta. Endoskopiaa hyödynnetään myös autoteollisuudessa, meriteollisuudessa, rakennusalalla, turvallisuusalalla, ym. (V. Talvitie 2014) (IT Concepts GmbH)

Tähystämällä on mahdollista saada tietoa koneiden ja laitteiden kunnosta vaihtoehtona ylimääräiselle purkamiselle, mikä saattaa esimerkiksi lentomoottoreiden tapauksessa olla aikaavievä työ. Näkemällä osien kunto, voidaan tehdä päätös korjauksen lykkäyksestä sopivampaan ajankohtaan tai tarvittaessa sen aikaistamisesta. Korjaustyötä voidaan myös valmistella etukäteen hankkimalla kuluneiden tai vaurioituneiden osien tilalle uudet varaosat. Systemaattisella, toistuvalla tähystystoiminnalla on kaiken lisäksi mahdollista havaita osien poikkeava kuluminen, joka voi tulla kyseeseen esimerkiksi koneen elinkaaren alkuvaiheessa. (V. Talvitie 2014) (Wuolio 2013)



KUVA 1: Erilaisia videoendoskooppeja ja oheislaitteita. [c] IT Concepts GMBH.



KUVA 2: Fiberoskooppi. [c] IT Concepts GMBH.



KUVA 3: Jäykkiä boreskooppeja. [c] IT Concepts GMBH.

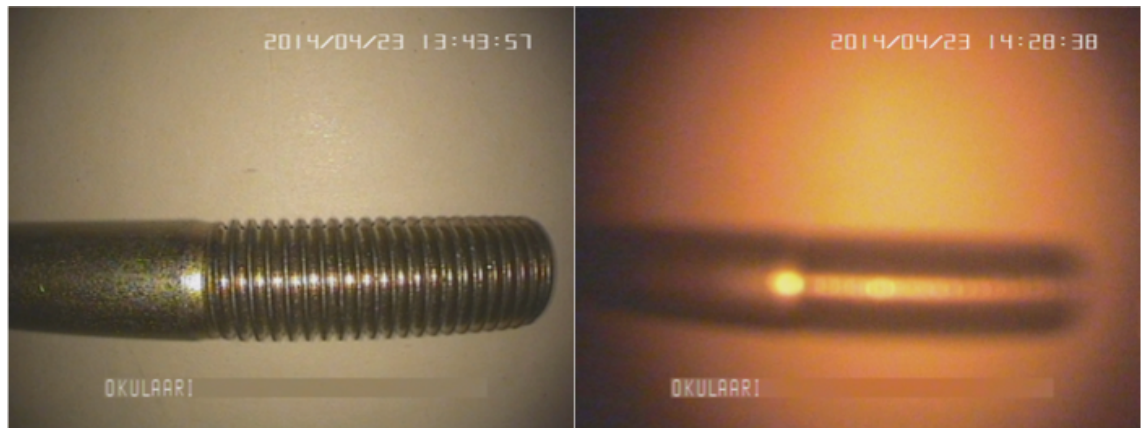
3 TUTKIMUSONGELMA: ENDOSKOOPIN LIKAANTUMINEN

Okulaarin suorittamia tähytyksiä on V. Talvitien (2014) mukaan haitannut nesteen tarttuminen endoskoopin kärkeen, jolloin laitteen avulla saatavan kuvan laatu on heikentynyt osittain tai kokonaan. Tästä johtuen tähyttäminen on jouduttu keskeyttämään, poistamaan laite kohteesta puhdistusta varten ja yrittämään uudelleen useammankin kerran. Endoskooppi tai tähytettävä kohde eivät tästä vahingoitu, mutta työhön tulee viivästyksiä ja mahdollisesti monimutkainen kärjen kohteeseen vieminen joudutaan suorittamaan uudelleen. (V. Talvitie 2014)

Linssin likaantumisella tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä nesteen tarttumista endoskoopin kärkeen ja termiä käytetään aihetta käsiteltäessä tästä eteenpäin. On toki mahdollista, että linssi sotkeutuu jonkin muun kuin nestemäisen aineen vaikutuksesta, esimerkiksi noesta moottoreiden tähytyksen yhteydessä. Nesteiden aiheuttama likaantuminen on ollut kuitenkin suurin käytönaikainen ongelma, joten työssä keskitytään siihen.

Likaantuminen tapahtuu pääsääntöisesti vietäessä endoskooppia tähytyskohteeseen, harvemmin itse tähytystapahtuman aikana. Sisäänviennin yhteydessä laitteen kärki voi osua esimerkiksi öljyisiin koneenosiin tai vaikkapa tähytettävän kohteen pohjalla olevaan nestelammikkoon. Tyypillisimmillään linssin likaantumisongelma esiintyy teollisuuden kunnossapitotöiden, esimerkiksi vaihdelaatikon tähytyksen yhteydessä. Toinen esimerkki kohteesta, jossa linssi likaantuu herkästi, on auton moottoritila. Molempia paikkoja yhdistää öljyisyys ja vähäinen vapaa tila, jossa endoskooppi voi edetä. (V. Talvitie 2014)

Ongelmia aiheutuu linssin eteen kerääntyvän nesteen taittaessa endoskoopista lähtevää valoa, jolloin endoskoopin oma valonlähde on nesteen peitossa, tai siihen tulevaa valoa, jolloin endoskoopin linssi on nesteen peitossa. Nämä kaksi tilannetta voivat esiintyä yhdessä tai erikseen. Ongelmia aiheuttaa valon taittumisen lisäksi myös nesteen mahdollinen väri tai sakeus. Tällaisia nesteitä ovat esimerkiksi erilaiset prosessinesteet ja käytetyt öljyt. Puhtaan ja likaisen endoskoopin kuvanlaatuja eroa esittää kuva 4.



Kuva 4: Ero puhtaan ja likaantuneen endoskoopin kuvanlaaduissa. Tässä linssin likaantumisen aiheuttanut neste on käytetty moottoriöljy.

Tähystyskohteita pyritään puhdistamaan ennen toimenpidettä siellä missä se on mahdollista. Tietyillä aloilla, kuten esimerkiksi prosessiteollisuudessa, tähystyskohteen huuhtelu saattaa olla jopa välttämätöntä tähystyskohteen ollessa sakean aineen peitossa. Kaikkia kohteita ei voida kuitenkaan puhdistaa niitä purkamatta eikä puhdistamiseen aina olisi aikaakaan. Tällöin endoskoopin käyttäjältä vaaditaan taitoa ja tähystyskohteen tuntemusta likaavimpien paikkojen kiertämisessä. Kiertäminenäkään ei ole kuitenkaan aina välttämättä mahdollista, joten tilanteita, jolloin tähystystä ei ole voitu viedä loppuun linssin likaantumisen vuoksi, on esiintynyt. (V. Talvitie 2014)

Okulaari Oy:lle keväällä 2014 tehdyn, eri alojen yritysten endoskopian käyttöä kartoittaneen opinnäytetyön puitteissa selvitettiin yritysten kokemuksia myös laitteiden linssien likaantumisesta. Suominen (2014) mukaan likaantumisongelma kyllä tunnistetaan yritysten sisällä, mutta toimialasta riippuen siihen suhtautumisessa on eroja. Sisäänviemisreittien tuntemuksella oli erään haastateltavan mukaan mahdollista välttää pahimmat paikat. Toista toimialaa edustavan vastaajan mukaan tähystyksiä on jouduttu keskeyttämään laitteen puhdistusta varten. Suominen opinnäytetyössään keräämät kokemukset olivat siis hyvin samansuuntaisia kuin V. Talvitien (2014) haastattelussa esiintuomat ongelmat. (Suominen 2014, 31-44)

4 PINTOJEN KASTUMISEN TEORIAA

4.1 Koheesio ja adheesio sekä niiden tekemä työ

Koheesio kuvaa samanlaisten ja adheesio erilaisten molekyylien välisen vuorovaikutuksen voimakkuutta. Koheesiovoima on ainetta koossa pitävä voima ja adheesiovoima kahta eri ainetta toisissaan kiinni pitävä voima. Koheesio tekemällä työllä tarkoitetaan sitä työmäärää, joka vaaditaan saman aineen erottamiseksi kahteen osaan siten, että työssä muodostuu kaksi uutta, tasapainoasemissaan ja toisistaan erillään olevaa pintaa. Adheesio tekemällä työllä tarkoitetaan sitä työmäärää, joka vaaditaan kahden eri aineen erottamiseksi niiden välisestä rajapinnasta siten, että työssä muodostuu kaksi uutta, pinnoiltaan tasapainoasemassa ja toisistaan erillään olevaa pintaa. (Erbil 2006, 194)

4.2 Pintajännitys ja pinnan vapaa energia

Pintajännitys (γ) aiheuttaa nesteelle joustavan, kalvomaisen pinnan, jonka johdosta nestepisara pysyy koossa ja pyrkii pienentämään pinta-alaansa. Se on ominaisuus, joka esiintyy sekä kiinteillä että nestemäisillä aineilla, mutta se määritetään niille eri tavoin. Myös toisiinsa kosketuksessa olevien mutta sekoittumattomien faasien välillä esiintyy jännitystä, jolloin puhutaan rajapintajännityksestä (γ_{12}). (Erbil 2006, 85)

Pinnan vapaa energia (γ tai G_S) on ylimääräistä energiaa, jota aineella on pinnan molekyylien voimaepätasapainon vuoksi. Sitä merkitään usein samalla gamma-kirjaimella kuin pintajännitystäkin, sillä pinnan vapaa energia sekä pintajännitys ovat puhtaassa nesteessä sekä lukuarvoltaan että yksiköltään samat. Kiinteille aineille tämä yhtäläisyys ei kuitenkaan päde niiden pintajännityksen poikkeavan määritelmän vuoksi, joten niille käytetään kirjallisuudessa vapaan pinta-energian tunnusta G_S . Myös kahden faasin rajapinnan vapaata energiaa merkitään tunnuksella γ_{12} . (Erbil 2006, 85, 90)

Pintajännitys voidaan selittää kyseisen aineen molekyylien välisten koheesiovoimien avulla. Nestepisaran sisällä oleva molekyyli on voimatasapainossa ympäröivien molekyylien kanssa. Pisaran pinnalla olevassa molekyylissä tilanne on kuitenkin toinen, sillä pisaraa ympäröivässä kaasussa, esimerkiksi ilmassa, molekyylit ovat harvassa. Kaasun

molekyyleistä aiheutuu pisaran pinnalla olevaan molekyyliin vain pieni vetovoima. Tästä johtuen pisaran sisällä olevat molekyylit vetävät pinnalla olevaa molekyyliä kohtisuorasti pisaran sisään, ulkoisen vastavoiman puuttuessa tai ollessa hyvin vähäinen. (Erbil 2006, 86-90)

Molekyyliä välinen vetovoima vaikuttaa myös pisaran pinnan suuntaisesti. Kun pinnalla oleva molekyyli on imeytymässä pisaran sisälle, sen ja muiden pinnan molekyyliä välinen voima aiheuttaa vetoa pinnan molekyyliä välille. Tästä aiheutuu pisaran pintaan jännitys, joka pyrkii pienentämään pinnan alaa. Tätä jännitystä kutsutaan pintajännitykseksi ja sen yksikkö on Joulea per neliometri [J / m^2]. Yksikkö voidaan kirjoittaa myös muotoon Newtonia per metri [N / m], mutta käytännön syistä useimmiten käytetään yksikköä millinewtonia per metri [mN / m]. Nesteiden pintajännityksen määrittämiseksi on kehitetty lukuisia erilaisia testejä, kuten esimerkiksi Sessile Drop- tai Du Noyn menetelmä. (Erbil 2006, 86-90) (Ebnesajjad 2006, 19-20)

Kaikki mekaaniset systeemit pyrkivät luontaisesti tasapainotilaan, jossa niiden energia on pienin mahdollinen. Nesteillä tämä esiintyy pyrkimyksenä kohti mahdollisimman pientä pinta-alan ja tilavuuden suhdetta pintajännityksen avustamana. Pienet pisarat saavuttavat tällaisen suhteen pallomaisen muodon kautta. Erbilin mukaan pisaran pinta-alan spontaani pieneneminen pintajännityksen vuoksi on osoitus siitä, että pisaralla on potentiaalienergiaa. Tätä energiaa kutsutaan pinnan vapaaksi energiaksi ja se voidaan määrittellä työksi, joka on tehtävä pintajännitystä vastaan nestemolekyyliä tuomiseksi kappaleen pintaan sen sisältä. (Erbil 2006, 86-90) (Shukla 2006, 140-142)

Määritelmän mukaan pinnan vapaalla energialla tarkoitetaan sitä työmäärää, jolla aineen sisäosien molekyyleistä saataisiin luotua pinta-alayksikön suuruinen uusi pinta. Tämä pätee sekä nesteille että kiinteille aineille, vaikkakin kiinteillä aineilla tapahtuma on mahdoton. Pinnan vapaan energian yksikkö on Joulea per neliometri [J / m^2] SI-järjestelmässä, mutta yleisemmin käytetään yksikköä millijoulea per neliometri [mJ / m^2]. Yksikkö J / m^2 on yhtenevä pintajännityksen yksikön kanssa ja nesteillä vapaa pinta-energia sekä pintajännitys ovat numeerisestikin samat. (Shukla 2006, 141-142)

Kiinteillä aineilla pintajännitys voidaan määrittellä Erbilin (2006, 284) mukaan voimaksi, joka vaaditaan muodostuneen pinnan palauttamiseksi tasapainotilaansa. Nesteillä molekyylit pääsevät liikkumaan vapaasti kohti tavoiteltavaa, pienintä mahdollista ener-

giatilaa, mutta suuren viskositeetin omaavilla nesteillä tämä liike luonnollisesti hidastuu. Kiinteillä aineilla molekyylit eivät pääse liikkumaan vapaasti, joten tasapainotilan saavuttaminen kestää hyvin pitkään, ellei jopa äärettömän kauan. Poikkeavan määrittelyn vuoksi kiinteiden aineiden pintajännitys ja vapaa pintaenergia eivät ole numeerisesti vertailukelpoisia, toisin kuin nesteillä. Kiinteiden aineiden vapaata pintaenergiaa ei voi mitata suoraan kuten nesteillä, vaan epäsuoria menetelmiä käytetään. Tyypillisesti tutkitaan pintajännitykseltään tunnetun nesteen kontaktikulmaa kiinteän pinnan päällä esimerkiksi goniometriä hyödyntäen. Myös erilaisia pinnalle levitettäviä musteita on kehitetty nopeaan vapaan pintaenergian määrittämiseen. (Erbil 2006, 284, 313) (Boussey Control 2010)

Opinnäytetyön kannalta olennaisimpia nesteitä ovat vesi sekä voiteluöljyt. Veden pintajännitys on Hanin (2014, 75) mukaan $72,8 \text{ mJ} / \text{m}^2$. Kokeellisen testauksen osioissa käytettyjen öljyjen pintajännityksiä ei mitattu, mutta Rizvin (2009, 536) mukaan mineraaliöljyjen pintajännitys on tyypillisesti välillä $30 - 35 \text{ mJ} / \text{m}^2$. Tämä on hyvä arvio myös opinnäytetyössä käytettyjen öljyjen pintajännitysten maksimisuuruusluokasta. On kuitenkin huomioitava, että pinta-aktiivisilla aineilla on mahdollista vaikuttaa nesteiden pintajännityksiin niitä pienentävästi, kuten voiteluöljyissä on usein asian laita. Rizvi (2009, 536) antaa esimerkin $0,1$ massaprosentin suuruisen silikonilisän vaikutuksesta mineraaliöljyn pintajännityksen pienentymiseen lähes lisäaineen pintajännityksen tasolle. Vedellä samanlainen vaikutus saadaan aikaan saippuaa lisäämällä.

Ebnesajjadin (2006, 13-25) mukaan kiinteät materiaalit voidaan luokitella sekä korkean että matalan vapaan pintaenergian materiaaleihin. Hänen mukaansa korkean pintaenergian ($200 - 500 \text{ mJ} / \text{m}^2$) materiaaleja ovat metallit sekä epäorgaaniset yhdisteet kuten esimerkiksi oksidit ja silikaatit. Matalan pintaenergian (alle $100 \text{ mJ} / \text{m}^2$) materiaaleihin kuuluvat puolestaan orgaaniset yhdisteet kuten muovit. Muovit voidaan luokitella vielä matalan ($10 - 30 \text{ mJ} / \text{m}^2$), keskikorkean ($30 - 40 \text{ mJ} / \text{m}^2$) ja korkean (yli $40 \text{ mJ} / \text{m}^2$) pintaenergian kategorioihin. Esimerkki matalan pintaenergian muovista on polytetrafluorietyleni PTFE, jonka pinta-energia on vain $18-19 \text{ mJ} / \text{m}^2$. Opinnäytetyössä tutkituista kiinteistä materiaaleista Ritschkoffin ym. (2005, 21) mukaan rakenneteräksen pintaenergia on kirjallisuuslähteiden mukaan $n. 33 \text{ mJ} / \text{m}^2$ ja ruostumattoman teräksen $n. 38 \text{ mJ} / \text{m}^2$. Lasille kirjallisuusarvoja ei työn kirjoittajan etsinnöissä löytynyt, mutta kun tiedetään veden kastelevan lasipinnan täysin, lasin pintaenergian voidaan päätellä olevan yli $72,8 \text{ mJ} / \text{m}^2$.

4.2.1 Rajapintajännitys sekä rajapintojen vapaa energia

Yllä esitetyt nesteen ja kiinteän aineen pintajännitykset sekä vapaat pinta-energiat ovat tosiasiaassa nestemäisen ja kaasumaisen, nestemäisen ja kiinteän sekä kiinteän ja kaasumaisen faasin välisiä rajapintajännityksiä ja rajapintojen vapaata pinta-energiaa. Vaikka kiinteä sekä nestemäinen faasi eivät juurikaan vuorovaikuta tyypillisen kaasumaisen faasin, ilman, molekyylien kanssa, sitä ei voi kuitenkaan jättää huomioimatta. Jos kaasumaisen faasin koostumuksessa tai paineessa tapahtuu muutoksia, vaikuttaa se myös esimerkiksi myöhemmin määriteltävän kontaktikulman arvoihin. (Cosgrove 2010, 200)

Myöhemmin tässä opinnäytetyössä puhuttaessa nesteen tai kiinteän aineen pintajännityksestä tai vapaasta pintaenergiasta, tarkoitetaan termeillä rajapintajännityksiä sekä rajapintaenergioita, joissa kaasumainen faasi on huomioitu.

4.3 Pintajännityksen komponentit

Pintajännitys ja pintaenergia voidaan jakaa komponentteihin kaavan 1. mukaan siten, että

$$\gamma = \gamma^p + \gamma^d \quad 1.$$

jossa γ on pintajännitys, γ^p on sen polaarinen ja γ^d sen dispersiivinen komponentti. (Cosgrove 2010, 210-212)

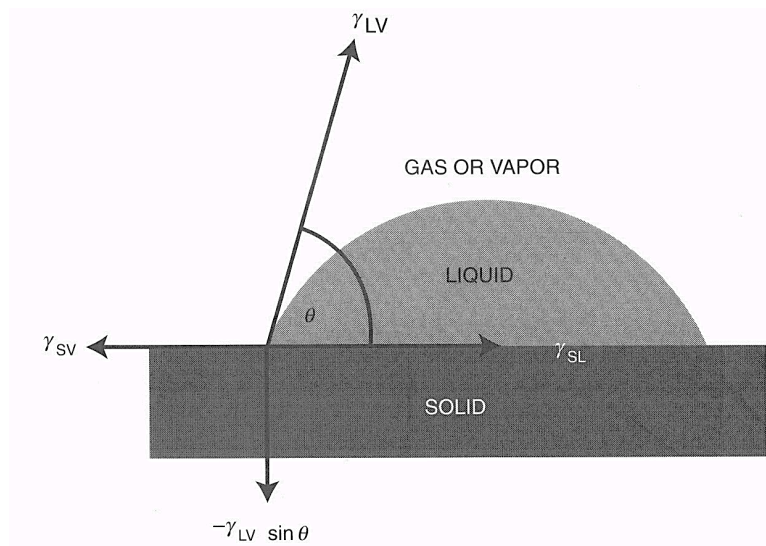
Pintajännityksen dispersiivinen osuus pitää sisällään poolittomien molekyylien välisten dispersiovoimien ja polaarinen osuus poolisten molekyylien välisten sidosvoimien vaikutuksen. Materiaali voi olla luonteeltaan enemmän dispersiivinen kuin polaarinen tai päinvastoin. Taulukossa 1 on havainnollistettu joidenkin muovilaatujen pintaenergioiden arvoja sekä niiden muodostumista komponenttiensa summana Cosgroven (2010) mukaan.

Taulukko 1: Muovien pintajännityksien arvoja sekä niiden komponentteja (Cosgrove 2010, 212)

Surface	γ (mN m ⁻¹)	γ^d (mN m ⁻¹)	γ^p (mN m ⁻¹)
PTFE	18–22	18–20	0–2
Polyethylene	33	33	0
PMMA	41	30	11
PET	44	33	11

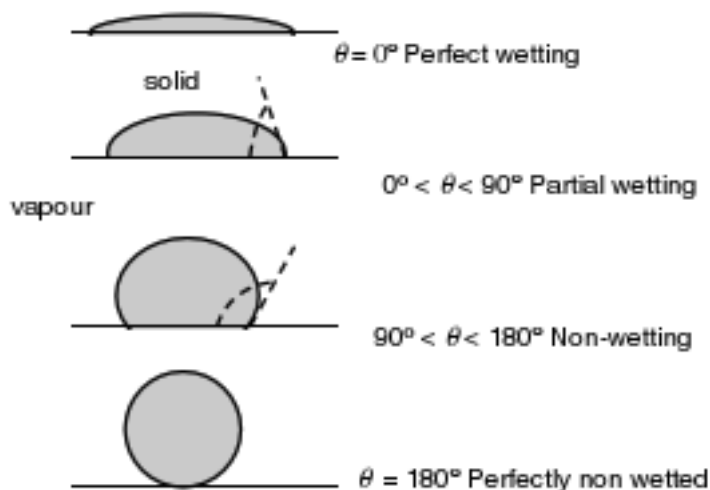
4.4 Nestepisara kiinteän aineen pinnalla

Jos vaakatasossa olevalle kiinteälle pinnalle asetetaan paikallaan oleva nestepisara, nähdään sen poikkileikkauksessa kaksi pistettä, joissa kolme faasia (neste, kaasu ja kiinteä) kohtaavat. Näitä pisteitä kutsutaan kolmen faasin kontaktipisteiksi. Kun pisara on tasapainossa siihen kohdistuvien voimien suhteen, asetetaan toiseen näistä pisteistä rajapintajännityksiä kuvaavat vektorit kuvan 5 mukaisesti. Nesteen ja höyryn välinen vektori γ_{LV} on tangentiaalisesti pisaraan nähden, kiinteän ja höyryn välinen vektori γ_{SV} sekä kiinteän ja nesteen välinen vektori γ_{SL} kulkevat kiinteän pinnan suuntaisesti ja vektorin γ_{LV} vastavektori $-\gamma_{LV}\sin\theta$ osoittaa suoraan alaspäin. (Erbil 2006, 308 - 309)



Kuva 5: Voimatasapainossa paikallaan oleva nestepisara kiinteän aineen pinnalla sekä siihen kohdistuvat rajapintajännitysten voimavektorit γ_{LV} (neste-höyry), γ_{SV} (kiinteä-höyry), γ_{SL} (kiinteä-neste) ja $-\gamma_{LV}\sin\theta$ (γ_{LV} :n pystysuuntainen vastavektori). (Erbil 2006, 309)

Vektorin γ_{LV} sekä nestepisaran alla olevan kiinteän pinnan välillä on kulma θ , jota nimitetään staattiseksi kontaktikulmaksi. Sitä käytetään nesteen kastelukyvyn mittarina kiinteällä pinnalla. Jos kulma on 0° , pinta kastuu täydellisesti. Kulman ollessa alle 90° , neste kastelee pinnan osittain ja kulman arvoilla 90° ja yli, neste ei kastele pintaa. Kun staattinen kontaktikulma saavuttaa suurimman arvonsa 180° , on kyseessä tilanne, jossa pinta täydellisesti vastustaa kyseisen nesteen aiheuttamaa kastumista (Erbil 2006, 308 - 309). Erilaisia kastumisen lajeja esittää alla oleva kuva 6.



Kuva 6: Erilaiset pinnan kastumisen lajit kontaktikulmittain. (Cosgrove 2010, 201)

Kuvissa 5 ja 6 esitetyt kontaktikulmat olivat staattisia kontaktikulmia, jotka esiintyvät pisaran molemmiin puolin lähes yhtä suurina. Tilanne on kuitenkin toinen jos pisara liikkuu, kasvaa tai pienenee. Tällöin pisaralle muodostuu tilanteesta riippuen yhdestä kahteen dynaamista kontaktikulmaa, joista toista nimitetään eteneväksi kontaktikulmaksi θ_a (advancing) ja toista vetäytyväksi kontaktikulmaksi θ_r (receding) kuvan 7 mukaan. Etenevä kontaktikulma on liikesuuntaan nähden pisaran edellä ja vetäytyvä kontaktikulma pisaran perässä. Näiden kulmien erotus $\theta_a - \theta_r$ on tyypillisesti $5 - 20^\circ$ ja tätä eroa kutsutaan kontaktikulmahystereesiksi (H). Erbilin mukaan etenevän kulman arvo on suurempi kuin vetäytyvän kulman arvo. Staattisen kontaktikulman arvo on suuruudeltaan etenevän ja vetäytyvän kulman arvojen välillä. (Erbil 2006, 313-315)

Erbilin (2006, 313) mukaan yhtä ainutta oikeaa staattisen kontaktikulman arvoa ei voida esittää, sillä todellinen kappale on aina heterogeeninen pinnaltaan ja siinä on erilaisia pintavirheitä. Erilaisia staattisen kontaktikulman arvoja voi olla siis useita. Erbilin mu-

kaan suositeltavampaa onkin mitata jompaakumpaa dynaamisista kontaktikulmista, vaikkakin staattisen kontaktikulman mittauksilla saavutetaan joissakin tilanteissa tiettyjä etuja dynaamisen kulman mittauksiin nähden.

Daoudin (2013, 6) mukaan kontaktikulmahystereesi määrää sen, tarttuuko neste kappaleen pintaan vai valuuko se pinnalta pois. Daoud esittää myös dynaamisiin kontaktikulmiin perustuvat laskentakaavat nestepisaran liikkumiseen vaadittavasta energiasta ja kiinteältä alustalta vaadittavasta kallistuskulmasta. Laskentakaavoja ei tässä yhteydessä kuitenkaan esitetä, sillä laskentaan vaadittavia arvoja ei työn puitteissa mitattu.



Kuva 7: Dynaamiset kontaktikulmat. (Daoud 2013, 5)

4.4.1 Youngin sekä Young-Dupré:n yhtälöt

Thomas Young esitti yhtälössä 2. esitetyn yhteyden rajapintajännitysten (rajapintaenergian) sekä staattisen kontaktikulman välillä. Sen mukaan

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (2.)$$

jossa γ_{SV} on kiinteän faasin pintaenergia, γ_{LV} on nestemäisen faasin pintajännitys ja γ_{SL} on kiinteän ja nestemäisen faasin rajapintajännitys. Kulma θ on staattinen kontaktikulma. (Erbil 2006, 309)

A. Dupré yhdisti T. Youngin yhtälössä 2 esittämän yhteyden aikaisemmin esittämäänsä adheesiota kuvaavaan yhtälöönsä, luoden yhteyden staattisen kontaktikulman, nesteen ja kiinteän faasin välisen adheesiotyön sekä kiinteän aineen pintajännityksen välille. Syntynyttä yhtälöä kutsutaan Young-Duprén yhtälöksi ja se esitetään yhtälönä 3. Sen mukaan

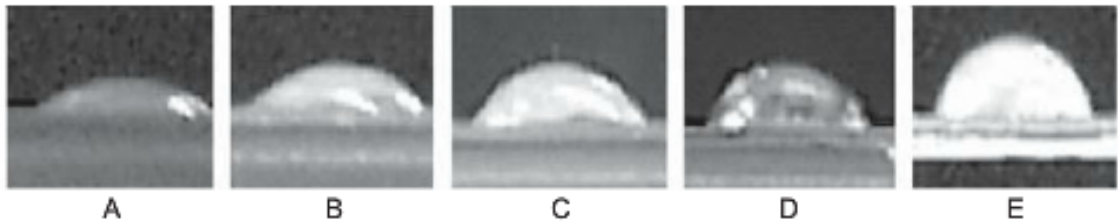
$$-G_{SL} = W_{SL}^a = \gamma_{SV}(1 + \cos \theta) \quad (3.)$$

jossa G_{SL} on kiinteän ja nestemäisen faasin välinen rajapintaenergia, W_{SL}^a on adheesio tekemä työ kiinteän ja nestemäisen faasin rajapinnassa, γ_{SV} on kiinteän faasin pintajännitys ja θ on staattinen kontaktikulma. (Erbil 2006, 310)

4.4.2 Pintojen kastuminen

Erbilin (2006, 310) mukaan silloin kun kontaktikulma $\theta = 0^\circ$, adheesio tekemä työ kiinteän ja nestemäisen faasin välillä $W_{SL}^a = 2\gamma_{LV}$. Kun $\theta = 90^\circ$, $W_{SL}^a = \gamma_{LV}$ ja kun $\theta = 180^\circ$, $W_{SL}^a = 0$. Yllä olevan määritelmän mukaan adheesiotyön ollessa kaksinkertainen nesteen pintajännitykseen nähden, neste kastelee pinnan kokonaan ja kontaktikulma lähenee arvoa 0° . Tällöin nestettä on vaikeaa irrottaa kiinteästä pinnasta. Toisessa ääripäässä adheesiotyön lähestyessä nolaa, neste ei kastele pintaa lainkaan ja kontaktikulma lähenee arvoa 180° . Tällöin nesteen irrottaminen kiinteästä pinnasta ei vaadi lainkaan työtä.

Edellisessä määritelmässä kiinteän pinnan ja nesteen välinen adheesiotyö W_{SL}^a esitetään nesteen pintajännityksen γ_{LV} avulla. Cosgrove (2010, 201) esittää pinnan kastumiselle nyrkkisäännön, jonka mukaan kiinteän faasin vapaan pintaenergian tulee olla suurempi kuin nesteen pintajännityksen. Tällöin kiinteän pinnan molekyylit vetävät nesteen molekyylejä puoleensa suuremmalla voimalla kuin nesteen molekyylit toisiansa. Tätä sääntöä sekä kontaktikulman käyttäytymistä havainnollistaa kuvassa 8 esitetty kuvasarja joukosta nesteitä polypropeenikalvon pinnalla.



Kuva 8: Nesteiden pintajännityksen vaikutus kontaktikulmaan polypropyleenikalvon (pintaenergia $30 \text{ mJ} / \text{m}^2$) pinnalla. Nesteet järjestyksessä A:sta E:hen ovat: dimetyyli-sulfoksidi, etyleeniglykoli, formamidi, glyseroli ja vesi. Pintajännitykset ovat vastaavasti: 44,0; 48,0; 58,2; 63,4 ja $72,8 \text{ mJ} / \text{m}^2$. (Han 2014, 75)

Cosgroven (2010, 204) mukaan kontaktikulma voidaan esittää myös adheesio- ja koheesio-työn suhteena siten, että

$$\cos\theta = -1 + 2 \left(\frac{W_a}{W_c} \right) \quad (4.)$$

jossa θ on kontaktikulma, W_a on adheesio-työ ja W_c on koheesio-työ.

Yhtälön 4 nojalla pinnan kastuminen nesteen vaikutuksesta voidaan mieltää koheesio- ja adheesio-voimien väliseksi 'kamppailuksi'. Nesteen koheesiovoimat yrittävät vetää nesteen molekyylejä kohti toisiaan pisaramaiseen muotoon samalla kun kiinteän pinnan ja nesteen väliset adheesiovoimat pyrkivät levittämään nestemolekyylit kiinteän aineen pintaan "lammikoksi". (Cosgrove 2010, 204)

4.5 Pinnan topografian vaikutus kontaktikulmaan

Pinnankarheudella on suuri vaikutus nesteen kontaktikulmaan kiinteällä pinnalla. Sen vaikutusta voidaan tarkastella kolmen erilaisen tilanteen kautta, joita kuvaavat omat yhtälönsä. Wenzelin tapauksessa neste on täysin kosketuksessa kiinteään pintaan siten, että kaikki pienetkin pinnan epätasaisuudet täyttyvät nesteellä. Tällöin pinnankarheus lisää nesteen kanssa kosketuksissa olevan pinnan alaa samankokoiseen, tasaiseen pintaan verrattuna. Cassien ja Baxterin tapauksessa neste ei täytä pinnankarheudesta johtuvia epätasaisuuksia, vaan ne pitävät sisällään ympäröivää kaasumaista faasia, esimer-

kiksi ilmaa. Tällöin neste lepää pinnankarheushuippujen päällä, jolloin kiinteään pintaan kosketuksissa oleva pinta-ala pienenee. Päinvastaisessa Cassien ja Baxterin tapauksessa pinnan epätasaisuudet täyttyvät esimerkiksi nesteen höyryn vaikutuksesta ennen varsinaista kosketusta nesteeseen. Tästä johtuen neste kokee kiinteän pinnan lähes tasaisena pintana. Pinnankarheudella tarkoitetaan sekä Wenzelin että Cassien ja Baxterin tapauksissa pienempiä kuin mikroskoopilla nähtävissä olevia pinnan topografian vaihteluita. (Daoud 2013, 6-12)

Wenzelin teorian mukaisessa tapauksessa kontaktikulman ollessa tasaisella pinnalla yli 90 astetta, pinnankarheus kasvattaa kulman arvoa entisestään. Alle 90 asteen tasaisen pinnan kontaktikulman arvoa pinnankarheuden mukaantuominen puolestaan pienentää. Tasan 90 asteen tasaisen pinnan kontaktikulman tapauksessa pinnankarheuden lisäämisellä ei ole vaikutusta. Wenzelin teorian mukainen pinnankarheuden vaikutus voidaankin Erbilin mukaan nähdä pinnan ominaisuuksien vahvistajana. Wenzelin tapauksessa kontaktikulmahystereesi kasvaa tasaiseen pintaan nähden. (Erbil 2006, 326)

Cassien ja Baxterin teorian mukaisessa tapauksessa pinnankarheus suurentaa kontaktikulmaa aina, riippumatta kulman arvosta tasaisella pinnalla. Pinnankarheuden johdosta kontaktikulmahystereesi pienenee. Päinvastaisessa Cassien ja Baxterin tapauksessa kontaktikulma pienenee aina, riippumatta sen aikaisemmasta arvosta. Tässä tapauksessa kontaktikulmahystereesi kasvaa. (Daoud 2013, 6-12)

Kuten aikaisemmin mainittiin, kaikki mekaaniset systeemit pyrkivät aina energiaminiimiin, eli tässä tapauksessa pisara asettuu kiinteälle pinnalle sen teorian mukaisesti, jonka kautta sen energia on pienimmillään. Vesipisara, jonka pintajännitys on suuri, saattaa asettua pinnalle Cassien ja Baxterin mukaisen teorian mukaisesti, kun taas öljypisaran pieni pintajännitys saattaa suosia Wenzelin teorian mukaista käyttäytymistä. Siirtymistä tilasta toiseen voi myös tapahtua, eli pisara saattaa aluksi asettua pinnankarheushuippujen päälle ja siirtyä siitä Wenzelin tapauksen mukaiseen tilaan. (Daoud 2013, 11-12)

4.6 Hydrofobisuus ja -fiilisyys sekä superhydrofobisuus ja -fiilisyys

Kiinteän kappaleen taipumusta hylkiä vettä kutsutaan hydrofobisuudeksi ja taipumusta vetää vettä puoleensa hydrofiilisuudeksi. Hydrofobisuus ja -fiilisyys aiheutuu kiinteän

pinnan vapaan pintaenergian sekä nesteen pintajännityksen sopivasta suhteesta toisiinsa nähden. Kuten aikaisemmin mainittiin, nesteen pintajännitystä matalampi kiinteän pinnan vapaa energia tekee pinnasta kyseistä nestettä hylkivän. Vastaavasti nesteen pintajännitystä suurempi pinnan vapaa energia tekee kappaleesta kyseistä nestettä puoleensa vetävän. Pintajännityksen ja vapaan pintaenergian arvot puolestaan määräytyvät aineen molekyylien vuorovaikutuksen suuruuden kautta. Nesteen hylkivyyden rajana on pidetty 90° :n kontaktikulman arvoja. Verhon ym. (2010) mukaan hydrofobisten pintojen kontaktikulmat ovat suurimmillaan n. 120° ilman pinnankarheuden vaikutusta.

Kun sopivan kemiallisen koostumuksen omaava hydrofobinen tai -fiilinen pinta yhdistetään oikeankokoiseen pinnankarheuteen, pinta voi muuttua superhydrofobiseksi tai superhydrofiiliseksi. Superhydrofobisen pinnan kontaktikulma on yli 150° vedellä mitattuna. Superhydrofobisuuteen liittyy myös pieni, kiinteän pinnan ja nesteen väliseksi kitkaksi mielletävä kontaktikulmahystereesi. Tällainen pinta vastustaa esimerkiksi vettä hyvin tehokkaasti. (Daoud 2013, 3-14)

4.6.1 Öljy ja pinta-aktiiviset aineet superhydrofobisilla pinnoilla

Daoudin (2013, 16) mukaan öljy sekä pinta-aktiivisia aineita sisältävät nesteet ovat hankalia superhydrofobisten pintojen kannalta. Niiden matalien pintajännitysten johdosta ne tunkeutuvat helposti esimerkiksi paineen ja lämpötilan vaikutuksesta pinnanmuotojen väleihin ja jäävät sinne, Wenzelin teorian mukaisen tilanteen ollessa energialtaan matalin. Daoudin mukaan pinnat saadaan kyllä tietyillä toimenpiteillä hylkimään öljyjä tehokkaasti Cassien ja Baxterin ilmiön mukaisesti, kuten käyttämällä matalan pintaenergian fluoromuoveja sekä valmistamalla pinnan topografia erityiseen muotoon. Niiden valmistamisen kalleus ja puhdistamisen hankaluus ovat kuitenkin syitä, joiden vuoksi Daoud ei usko niiden olevan kovinkaan tehokkaita ratkaisuita ongelmaan.

Verhon ym. (2010, 1-6) mukaan superhydrofobisten pintojen kulumisenkestävyys on heikko. Kuluminen ilmenee muun muassa kontaktikulmahystereesin kasvuna. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan esimerkiksi hyödyntämällä kahden eri suuruusluokan pinnankarheuden omaavia rakenteita, joista toinen on mikrometrin ja toinen nanometrinen kokoluokkaa. Tällaisten pinnoitteiden kehitystyö on kuitenkin vasta käynnissä ja toistaiseksi useimmat hylkivät pinnoitteet eivät sisällä pinnankarheutta.

5 NANOPINNOITTAMINEN

5.1 Nanoteknologia pähkinänkuoressa

Sanaa ”nano” käytetään kerrannaisyksikön nimenä SI-järjestelmässä ja sen määritelmä on miljardisosa eli 10^{-9} . Viime vuosina sana on tullut tunnetuksi kokonaisen teknologian haaran yleisnimityksenä, jonka sovelluskohteita löytyy esimerkiksi rakennus-, koneenrakennus-, elektroniikka- ja kemianteollisuudesta sekä monilta muilta aloilta kuten lääketieteestä. Kerrannaisyksikkö kuvaa tässä yhteydessä nanomateriaalien ja -rakenteiden kokoluokkaa, joiden mitoista vähintään yksi on välillä 1 - 100 nanometriä. Tekninen spesifikaatio ISO/TS 80004-1 esittelee nanoteknologian ydintermejä ja määritelmiä. Sen tavoitteena on yhtenäistää alalla käytettyä terminologiaa. (Cao 2004, 1-7) (Finnish Nanobusiness) (SFS 2013)

Nanomateriaalit eivät sinänsä ole uusi asia, sillä esimerkiksi Kiinalaiset käyttivät kullan nanopartikkeleita keraamisten kulhojen värjäämiseen yli 1000 vuotta sitten. Nanopartikkeleita syntyy sattuman kautta myös liikenteen päästöjen, hitsaustapahtumassa syntyvien kaasujen ja tulivuoren purkauksien myötä. Vasta erilaisten mikroskooppien, kuten tunnelointimikroskoopin (STM), atomivoimamikroskoopin (AFM) sekä läpivalaisumikroskoopin (TEM) keksiminen ja kehittyminen mahdollisti nanomateriaalien mittauksen 1980-luvun alkupuolella ja myöhemmin myös niiden muokkauksen ja keinotekoisien materiaalien valmistuksen. (Cao 2004, 1-7) (Sellers 2009, 13)

Useat nanomateriaalit ovat tavanomaisia materiaaleja, joiden kanssa olemme tekemisissä päivittäin, kuten esimerkiksi rauta, kulta, titaani ja hopea. Pienen kokonsa vuoksi niiden käyttäytyminen voi kuitenkin olla täysin erilaista kuin mihin olemme tottuneet. Kulta voi olla nanokokoisena väriltään violettiä, vihreää, oranssia tai punaista koosta riippuen ja väriltään valkoisena tunnettu sinkkioksidi on nanokokoisena läpinäkyvää. Poikkeava käyttäytyminen johtuu kahdesta seikasta: nanopartikkelin suhteellisen suuresta pinta-alasta partikkelin massaan nähden, mistä syystä partikkelin pinta-energia on suuri. Toinen seikka on kvanttimekaniikan ilmiöiden vaikutus nanokokoiseen partikkeliin klassisen fysiikan ilmiöiden lisäksi. Tavanomaisista materiaaleista valmistettujen nanomateriaalien lisäksi on olemassa synteettisiä nanomateriaaleja kuten esimerkiksi

hiilinanoputket sekä fullereenit. Nämä ovat täysin ihmisen valmistamia materiaaleja tiettyjä käyttötarkoituksia varten. (Sellers 2009, 17-31)

Termiä nanoteknologia käytetään Sellersin (2009, 41) mukaan yleisnimityksenä nanomateriaalien ja nanorakenteiden valmistukselle, käytölle ja suunnittelulle. Kansallista nanoteknologialakialoitetta Yhdysvaltoihin luomassa ollut tohtori M.C. Roco on esittänyt nanotuotteille neliportaisen sukupolvijaottelun, jonka mukaan tuotteiden kehitys etenee viiden vuoden sykleissä:

1. Ensimmäisen sukupolven tuotteet vuodesta 2000 eteenpäin sisältävät pääosin passiivisia nanorakenteita. Passiivisia nanorakenteita ovat esimerkiksi nanopartikkelit ja nanoputket, jotka on sidottu toisen aineen matriisiin. Näihin tuotteisiin luetaan muun muassa pinnoitteet ja kalvot sekä komposiittirakenteet. Suurin osa nykyisistä kaupallisista nanotuotteista kuuluu tähän kategoriaan.
2. Toisen sukupolven tuotteissa vuodesta 2005 eteenpäin on aktiivisia nanorakenteita, jotka reagoivat johonkin ulkoiseen ärsytykseen, esimerkiksi pH:n muutokseen. Esimerkkejä tällaisesta toiminnallisuudesta ovat lääkeaineen vapauttaminen rakenteesta halutussa osassa ihmiskehoa tai anturina toimiminen osana elektroniikkapiiriä.
3. Kolmannen sukupolven tuotteet vuodesta 2010 eteenpäin käsittävät kolmiulotteisia nanorakenteita, jotka syntyvät erilaisia ohjattuja itsekokoamiskeinoja käyttäen. Näissä keinoissa hyödynnetään mallina esimerkiksi DNA:n rakennetta.
4. Neljännen sukupolven tuotteet vuodesta 2015 eteenpäin rakentuvat heterogeenisistä nanosysteemeistä, joita voidaan muokata ja ohjata molekyyllitasolla. (Sellers 2009, 41)

Pohjimmainen syy nanoteknologian ja -materiaalien käyttöön piilee jo aikaisemmin mainituissa ainutlaatuisissa ominaisuuksissa, joita niiden avulla voidaan saavuttaa. Yhdysvaltalainen Woodrow Wilson Institute pitää yllä nanoteknologiaa sisältävien kuluttajatuotteiden listaa, joka sisältää opinnäytetyön kirjoitushetkellä 1818 tuotetta. Lista on ilmeisen keskittynyt Yhdysvaltalaisiin tuotteisiin, sillä esimerkiksi Suomesta se listaa vain kuusi tuotetta. Tästä huolimatta sen avulla voidaan arvioida nanotuotteiden käytön laajuutta ainakin Yhdysvaltojen alueella. Nanoteknologiaa löytyy nykyään lähes kaikkialta: kosmetiikasta terveystuotteisiin, urheiluvälineistä viihde-elektroniikkaan ja autovahoista vedensuodattimiin. (Woodrow Wilson Institute) (Sellers 2009, 1)

5.2 Nanopinnoitteet

Ramsdenin (2009, 67) mukaan monet materiaalin ominaisuuksista syntyvät sen pinnalla. Tästä johtuen pintoja on kustannustehokasta muuttaa halutunlaisiksi esimerkiksi ohutkalvopinnoituksen keinoin, joka ei muuta kappaleen sisäisiä ominaisuuksia. Nanomateriaalien avulla toteutetuilla ohutkalvopinnoitteilla on Nanobusinessin (2010) selvityksen mukaan mahdollista aikaansaada esimerkiksi nesteitä hylkiviä, itsepuhdistuvia, jäätyttömiä, antigraffiti-, antibakteerisia, kulutusta kestäviä, ruostumattomia ja kitkaa alentavia pintoja sekä pieniin että myös suuriin kappaleisiin.

Tässä opinnäytetyössä tarkastelun kohteena ovat vettä hylkivät eli hydrofobiset pinnoitteet, joten tästä eteenpäin pääpaino on niiden tarkastelussa. Tyypillisimpiä pinnoitusmenetelmiä käydään läpi seuraavassa kappaleessa. Ohutpinnoitteiden valmistuksessa käytettyjen materiaalien kirjo on laaja, eikä tämän opinnäytetyön testeissä käytettyjen pinnoitteiden materiaaleista ole mahdollista saada tietoa. Tästä syystä materiaaleja käsitellään vain pintapuolisesti maininnan tasolla.

5.3 Pinnoitusmenetelmät

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti muutamia tyypillisimpiä nanomittakaavan ohutkalvojen valmistusmenetelmiä kokonaisvaltaisen kuvan luomiseksi aihealueesta. Opinnäytetyöhön liittyvissä testeissä hyödynnettiin sooli-geeli-menetelmää, joten sitä käsitellään muita menetelmiä laajemmin omana kappaleenaan.

Caon (2004) mukaan ohutkalvojen kasvatusmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään: kaasufaasipinnoitukseen sekä nestemäisistä lähtöaineista tapahtuvaan kasvatukseen. Kaasufaasipinnoitusmenetelmiin luetaan muun muassa fysikaalinen kaasufaasipinnoitus (PVD), kemiallinen kaasufaasipinnoitus (CVD) sekä atomikerroskasvatus (ALD). Nestemäisistä lähtöaineista tapahtuvan kasvatuksen menetelmiin luetaan muun muassa sooli-geeli-menetelmä. (Cao 2004, 173)

Fysikaalinen kaasufaasipinnoitus (Physical Vapor Deposition, PVD) on yleisnimitys joukolle tyhjiössä tapahtuvia pinnoitusmenetelmiä. Ne perustuvat PVD-reaktorin sisällä kiinteässä muodossa olevan pinnoitusaineen höyrystämiseen esimerkiksi lämmön avulla

(höyrystys) tai törmäyttämällä pinnoitusaineeseen reaktoriin johdetun kaasun ioneita (sputterointi). Höyrystynyt pinnoitusaine kiinnittyy pinnoitettavan kappaleen pintaan muodostaen ohutkalvon. Prosessin lämpötila vaihtelee välillä 150 ja 500 celsiusastetta. (Oerlikon Balzers) (Cao 2004, 182-189)

Kemiallinen kaasufaasipinnoitus (Chemical Vapor Deposition, CVD) on yleisnimitys joukolle pinnoitusmenetelmiä, jotka perustuvat pinnoiteaineen kemiallisiin reaktioihin erilaisten kaasujen kanssa pinnoitettavan kappaleen pinnalla. Näiden reaktioiden johdosta kappaleen pintaan syntyy ohutkalvo. Menetelmässä käytetyistä reaktoreista osa hyödyntää tyhjiötä ja osa toimii normaalissa ilmanpaineessa. Prosessin lämpötila vaihtelee muuttujista ja käytetystä laitteistosta riippuen välillä 200 ja 1400 celsiusastetta. (Cao 2004, 189-199)

Atomikerroskasvatus (Atomic Layer Deposition, ALD) on Suomessa kehitetty pinnoitusmenetelmä, jonka avulla on mahdollista pinnoittaa atomi- tai molekyylikerros kerrallaan. Saavutettavat kalvopaksuudet voivat olla alle nanometrinen luokkaa. Menetelmä on yleisesti käytössä esimerkiksi elektroniikkateollisuudessa. Se perustuu yhden tai useamman lähtöaineen sekvenssittäisiin reaktioihin kappaleen pinnalla. Pinnoiteaine ei reagoi itsensä kanssa, joten syntynyt pinta täytyy aktivoida uudelleen ennen kuin uusi pinnoitekerros voi syntyä. Prosessilämpötila vaihtelee välillä 50 ja 500 celsiusastetta. ALD:n haittapuolena pidetään sen hitautta, mutta se on monissa sovelluksissa siitä huolimatta korvaamaton menetelmä. (Beneq) (Cao 2004, 199-204)

5.3.1 Sooli-geeli-menetelmä

Sooli-geeli-menetelmällä on mahdollista valmistaa erilaisia nanopartikkeleita, -jauheita, -kuituja, -sauvoja, -rakenteita sekä ohutkalvoja. Sen etuina pidetään muita menetelmiä matalampaa valmistuslämpötilaa sekä kykyä tuottaa hyvin homogeenisiä ja puhtaita nanomateriaaleja. Se mahdollistaa myös pinnoitteiden räätälöinnin sovelluskohteen mukaan useiden ominaisuuksien osalta. Jokainen pohjamateriaali vaatii kuitenkin omanlaisensa, sille sopivan pinnoitteen, joten kaikille pinnoille soveltuvaa pinnoitetta on mahdotonta valmistaa. (Theodore 2006, 233-234) (Ritschkoff, ym. 2005, 8-10)

Nanomateriaalien valmistus sooli-geeli-menetelmällä tapahtuu sekoittamalla vesiliuoksen muodossa olevat epäorgaaniset tai metalli-orgaaniset lähtöaineet liuottimen ja katalyyttinä toimivan aineen kanssa. Kemiallisten reaktioiden - hydrolyysin sekä kondensaation tai polymerisoitumisen - kautta muodostuu nanokokoisia partikkeleita sisältävä kolloidinen neste, sooli. Kemiallisten reaktioiden jatkuessa partikkelit jatkavat kiinnittymistä toisiinsa ja soolin viskositeetti kasvaa. Sooli levitetään kappaleen pintaan, jonka jälkeen se kuivataan ja kovetetaan esimerkiksi lämmön avulla. (Theodore 2006, 233-235) (Cao 2004, 82) (Ritschkoff, ym. 2005, 9)

Caon (2004, 220) mukaan spin-pinnoitus ja kastopinnoitus ovat yleisimmin käytettyjä menetelmiä sooli-geelikalvojen muodostamisessa kappaleiden pinnalle, mutta myös esimerkiksi spray-pinnoitusta käytetään. Kastopinnoituksessa kappale upotetaan liuokseen ja vedetään siitä pois tasaista vauhtia, jolloin kappaleen pintaan tarttuu liuosta halutun pinnoitepaksuuden verran. Pinnoitepaksuus muodostuu tällä menetelmällä usein suuremmaksi kappaleen alaosassa kuin yläosassa. Spin-pinnoituksessa kappaleen keskelle asetetaan liuosta, joka leviää kappaleen pintaan sitä pyöritettäessä keskipakoisvoiman vaikutuksesta. Pyöriksen jälkeen kappaleen pinnassa olevan liuoskalvon paksuus edelleen pienenee haihtumisen vaikutuksesta. (Cao 2004, 220)

Sooli-geelipinnoitteiden tarttuminen pohjamateriaaliin perustuu Kolarin (2014) mukaan kemiallisiin sidoksiin pohjamateriaalin kanssa. Sen irrottaminen pinnasta onnistuu vain mekaanisin keinoin. Päällekkäisten kerrosten pinnoittaminen ei menetelmällä onnistu, sillä aine tarttuu itsensä sijasta vain kohtiin, joista aikaisempi kalvo on kulunut pois. Menetelmällä valmistettujen pinnoitteiden paksuus on Caon (2004, 221) mukaan tyypillisesti n. 50 - 100:n nanometrin luokkaa.

Sooli-geeli-pinnoitteilla voidaan pinnoittaa laboratorioympäristössä esimerkiksi veto-kaappia ja tavanomaisia, laboratoriotyöhön kuuluvia suojavarusteita hyödyntäen. Pinnoitteiden nanomateriaalit ovat sitoutuneena nesteliuokseen, joten ne eivät pääse leviämään ympäristöön esimerkiksi ilman mukana. (Kolari 2014)

5.4 Hydrofobiset ja superhydrofobiset pinnoitteet

Superhydrofobisten pinnoitteiden kehitystyö on saanut innoituksensa biologisten esimerkkien pohjalta. Esimerkiksi lotus-kasvin lehdet ovat superhydrofobisia, jolloin vesipisarot vierivät niiden pinnalta pois, vieden likapartikkelit mukanaan. Tällaista itsepuhdistuvuutta hyödynnetään esimerkiksi itsepuhdistuvissa ikkunoissa. Myös joidenkin lintujen ja hyönteisten siivet ovat superhydrofobisia, jolloin ne säilyvät lähes kastumattomina. Sovelluskohteita vedenhylkivyydelle ovat esimerkiksi tekniset pinnat, vaatteet, autojen ikkunat ym. Superhydrofobisuudesta on lisäksi hyötyä muun muassa jäätymisen- ja ruosteenestossa. (Nosonovsky ja Bormashenko 2009, 63-71)

Hydrofobiset pinnoitteet käsittävät vain vettä hylkivän kemiallisen rakenteen ilman pinnankarheuden vaikuttavia tekijöitä. Kun hydrofobinen pinnoite lisätään sopivan karheuden omaavan pinnan päälle, muuttuu pinta superhydrofobiseksi. Pinnoiteaineina on käytetty esimerkiksi titaanioksidia sekä erilaisia polymeerejä. Pinnankarheus voidaan saada aikaan myös lisäämällä pinnoitteen joukkoon partikkeleita, jotka pinnalle päästyään muodostavat siihen oikeanlaisen topografian. Partikkeleita on valmistettu esimerkiksi piistä tai alumiinioksidista. Jo ennestään hydrofobinen pinta on mahdollista saada superhydrofobiseksi myös karhentamalla olemassa olevaa hydrofobista pintaa esimerkiksi etsaamalla. (Nosonovsky ja Bormashenko 2009, 63-71)

6 KOKEELLISET MITTAUKSET

6.1 Testauksista yleisesti

Jo varhaisessa vaiheessa työtä oli selvää, että pinnoitteiden toimintaa tullaan tutkimaan käytännön kokeilla laboratorio-olosuhteissa. Lopullinen päätös siitä, mitä haluttiin tutkia ja miten, syntyi kuitenkin vasta työn edetessä. Testimenetelmiä ideoitiin pienen, neljän opiskelijan ryhmän kesken, jonka jäsenet olivat osallisia Okulaari Oy:lle tehtävissä projekteissa tai opinnäytetöissä. Myös Okulaarin edustajan toivomukset huomioitiin testien suunnittelussa. Opiskelijaryhmän yhden jäsenen estyttyä osallistumaan käytännön osuuteen, osa suunnitelluista testeistä jäi toteuttamatta. Tätä opinnäytetyötä koskevat oleelliset testit saatiin kuitenkin suoritettua.

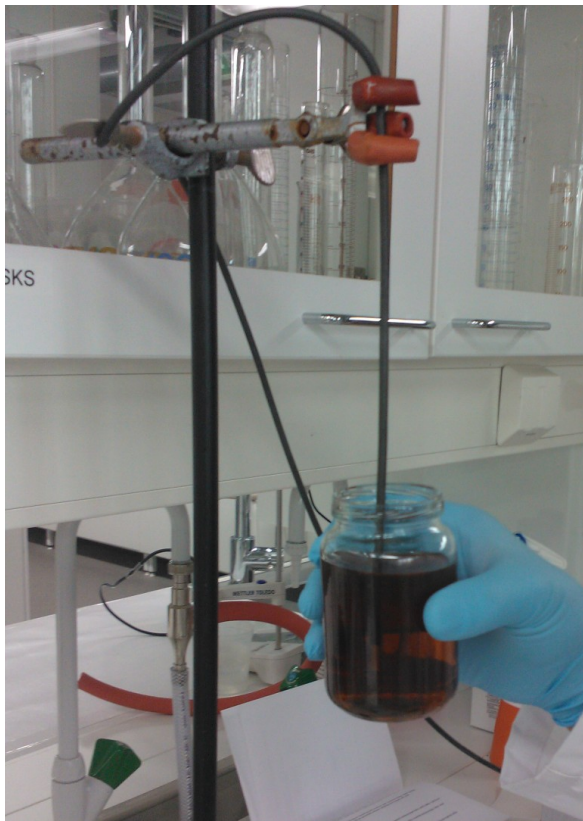
Kantavana ajatuksena tämän opinnäytetyön kokeellisen osuuden kannalta oli saada empiiristä näyttöä pinnoitteiden vaikutuksista likaantumisen estämisessä. Työhön liittyen suoritettiin kaksi erillistä koetta TAMK:n laboratorioissa. Ensimmäisessä kokeessa tutkittiin pohjamateriaalin ja pinnoitteen yhteisvaikutusta nesteiden tarttumisessa kappaleiden pintaan. Toisessa kokeessa tutkittiin pinnoitteen vaikutusta öljyyn kastetun endoskoopin kuvanlaatuun. Koemenetelmät esitetään tässä kappaleessa. Tulokset ja niiden pohjalta tehdyt johtopäätökset esitetään kappaleessa 7.

Vaikka testeillä tutkitaan nanomateriaalien vaikutusta kappaleiden ominaisuuksiin, varsinaisia nanomittakaavan mittauksia ei opinnäytetyön puitteissa tehty. Nanoteknologialla pyritään aikaansaamaan ilmiöitä, jotka ovat usein havaittavissa aistinvaraisesti tai tavanomaisia mittavälineitä käyttäen. Opinnäytetyön testaukset haluttiinkin pitää yksinkertaisina ja helposti toteutettavina ilman kalliita laitteistoja tai erikoisvarusteltuja tiloja. Testimenetelmät eivät perustu mihinkään aikaisemmin suoritettuihin kokeisiin, vaan ne on ideoitu ryhmän kesken.

6.2 Jäännösnesteen määrä koekappaleiden pinnassa

Tällä koejärjestelyllä pyrittiin selvittämään öljyn ja veden tarttumista pinnoittamattomien sekä pinnoitettujen kappaleiden pintaan. Kokeessa kuiva ja puhdas koekappale ripus-

tettiin statiiviin (terästanko sekä endoskooppi) tai pidettiin kädessä (lasilevy). Kappale kastettiin astiassa olleeseen nesteeseen, jonka massa oli punnittu yhdessä astian kanssa. Kun kappale oli poistettu astiasta, kappaleen pintaan tarttuneen ylimääräisen nesteen annettiin valua takaisin minuutin ajan, jonka jälkeen nesteen sekä astian yhteinen massa punnittiin uudelleen. Nesteen pinnan sijainti koekappaleeseen nähden merkattiin kappaleen pintaan ja mitattiin työntömitalla. Jos nestettä tippui muualle kuin astiaan tai tarttui muualle kuin testikappaleen pintaan, ei kyseistä mittausta otettu huomioon. Nesteet ja koekappaleet olivat mittauksia suoritettaessa lämpötilaltaan huoneen- ja kädenlämpöisen välillä. Endoskoopin pintaan tarttuneen öljyn testauksen koejärjestelyä esittää kuva 9.



Kuva 9: Testauksen suoritus tapa endoskoopilla. Kuvan neste on tuoretta öljyä.

Pintaan tarttuneen nesteen massa kastunutta pinta-alaa kohti [g/m^2] saatiin laskettua kaavalla 5, jonka mukaan

$$m_{\text{tarttunut}} = \frac{m_{\text{alku}} - (m_{\text{loppu}} + m_{\text{haihtunut}})}{A_{\text{kastunut}}} \quad (5)$$

jossa $m_{tarttunut}$ on pintaan tarttuneen nesteen massa pinta-alaa kohden, m_{alku} on purkissa olleen nesteen massa ennen koekappaleen kastamista, m_{loppu} on purkissa olleen nesteen massa kastamisen jälkeen, $m_{haihtunut}$ on haihtuneen nesteen massa ja $A_{kastunut}$ on nesteestä kastunut koekappaleen pinta-ala.

Vedellä ilmenevää haihtumista kompensoidaan kaavassa 5 lisäämällä loppumassaan testin suorittamisen aikana haihtuneen veden massa. Haihtunut massa mitattiin grammoina per minuutti, kolmen mittauksen keskiarvona (0,008 g/min). Purkin kansi pidettiin suljettuna koetilanteiden ja mittausten välillä ylimääräisen haihtumisen välttämiseksi. Öljyllä haihtumista ei havaittu, joten haihtumistermi saa arvon nolla. Koejärjestely toteutettiin kullakin kappaleella 6 - 9 kertaa pinnoitus- ja nesteyhdistelmää kohti toistomittausten hengessä.

Terästangot ja lasilevyt valittiin testiin sen vuoksi, että IT Concepts in endoskoopien kärjet koostuvat pitkälti juurikin näistä materiaaleista. Terästanko oli tosin rakenneterästä vaikka endoskoopin kärjen metalliosa lienee ruostumatonta terästä. Ruostumattoman teräksen vapaan pintaenergian arvo on todennäköisesti erilainen.

6.2.1 Silmämääräinen tarkastelu

Jokainen neste- ja koekappaleyhdistelmä valokuvattiin sekä pinnoittamattomana että pinnoitettuna ja nesteen käyttäytymisestä kappaleen pinnalla tehtiin muistiinpanoja. Silmämääräinen tarkastelu suoritettiin siis vain jäännösnesteen määrän mittauksiin liittyen. Mittaukset ja kuvat täydentävät toistensa antamaa tietoa ja niitä tulisikin tarkastella yhdessä. Kuvista on nähtävissä jos neste kerääntyy tiettyyn kohtaan kappaletta tai jos kappaleessa on alueita, joihin neste ei ole tarttunut lainkaan. Neste- ja koekappaleyhdistelmistä otetut kuvat esitetään kappaleessa 7, yhdessä kyseisen yhdistelmän tulosten kuvaajien kanssa.

6.3 Jäännösnesteen vaikutus endoskoopin kuvanlaatuun

Tällä koejärjestelyllä pyrittiin selvittämään pinnoituksen vaikutusta endoskoopin kuvanlaatuun kastamalla sekä pinnoitettu että pinnoittamaton laite käytettyyn öljyyn. Nes-

teeksi valikoitui käytetty moottoriöljy siitä syystä, että erilaiset voiteluöljyt ovat tällä hetkellä tyypillisin ongelmia aiheuttava neste käytännön olosuhteissa. Se on väriltään tummaa, mikä osaltaan pahentaa tähytyksissä havaittavaa kuvanlaadun heikkenemistä, nestepisaran aiheuttaman valon taittumisen lisäksi. On tiedossa, että kokeessa käytetyn öljyn joukkoon oli lisätty pintajännitystä alentavia (ja siten öljyn voiteluominaisuuksia parantavia) lisäaineita. Testissä käytetyn öljyn pintajännitys siis todennäköisesti alittaa kirjallisuusarvot selvästi. Toisaalta, endoskoopin käyttökohteissa esiintyvät öljyt ovat myös todennäköisesti enemmän tai vähemmän seostettuja, joten koeasetelma vastasi siltä osin todellista tilannetta.

Kokeessa endoskoopin kärki kastettiin öljyä sisältäneeseen lasiastiaan, minkä jälkeen endoskooppi siirrettiin testiä varten muokattuun pahvilaatikkoon, mahdollisimman rauhallisin liikkein. Laatikkoon oli asetettu kuvauskohteeksi kuusioruuvi, jonka paikka pidettiin kuvauksien välillä muuttumattomana. Endoskooppi asetettiin jokaisella kuvauskerralla samaan, merkittävään kohtaan, jotta etäisyys ruuviin pysyi mahdollisimman vakiona. Muutaman millimetrin vaihtelua etäisyydessä kuvauskertojen välillä toki oli, mutta etäisyyden vaikutus lopputulokseen ei ollut merkityksellinen, kuten tuloksissa esitetyistä kuvista on nähtävissä. Testi suoritettiin samalla laitteella, ensin pinnoittamattomana ja sitten pinnoitettuna. Pinnoittamattomalla ja pinnoitetulla laitteella suoritettujen kuvaustilanteiden välillä on ajallisesti noin viikon verran eroa, johtuen pinnoitustapahtumasta Millidyne Oy:n tiloissa.

Kuvien otto laatikon sisällä esti suoran auringonvalon osumisen kuvauskohteeseen. Laatikon kantta ei kuvanoton aikana kuitenkaan suljettu, sillä tutkittaessa asiaa koekuvien avulla, ei sulkemisella havaittu olevan vaikutusta niiden valoisuuteen. Ulkopuolista valoa pääsi laatikon sisälle jonkin verran, mutta endoskoopin kärjessä oleva voimakas valonlähde peitti ulkopuolisen valon vaikutukset. Vertailukuvat pinnoittamattomalla ja pinnoitetulla endoskoopilla on esitetty kappaleessa 7 kuvina 17 ja 18 ja kuvausolosuhteiden ym. muutoksia voi vertailla näiden kuvien välillä.

Kuvattaessa käytetyt endoskoopin asetukset pidettiin samoina pinnoitustapahtumien yli. Pyrkimys oli pitää myös linssin tarkennussäätö samana, mutta erehdyksestä johtuen tarkennus pääsi pinnoitustapahtuman aikana muuttumaan. Se säädettiin kuitenkin lähes vastaavaan arvoon aikaisempien kuvien pohjalta vertaamalla ja lopputuloksessa ei ole mainittavaa eroa. Myös tämä on todettavissa jo aikaisemmin mainittujen kuvien 17 ja

18 avulla. Testin suoritustapaa havainnollistaa kuva 10, jossa endoskoopin käyttäjä pitelee laitteen vartta tietyssä kohdassa ja asennossa kuusioruuvun kuvausta varten.

Laitteella otettiin yhdentoista kuvan sarjoja seuraavasti: pinnoittamaton laite puhtaana, pinnoittamaton laite öljyisenä ja pinnoittamaton laite öljyisenä muutaman ravistavan liikkeen jälkeen. Vastaavat kuvasarjat otettiin pinnoitetulla laitteella. Jokainen kuvaustilanne käsitti siis laitteen puhdistamisen ja kuvanoton puhtaana, öljyyn kastamisen ja kuvanoton öljyisenä sekä ravistamisen ja kuvanoton ravistettuna. Tämän jälkeen laite puhdistettiin ja koetta jatkettiin seuraavalla kuvaustilanteella.

Laite pyrittiin nostamaan öljyastiasta jokaisella kerralla aikaisempia kertoja vastaavalla tavalla, vaikkakin pientä vaihtelua esimerkiksi laitteen nostokulmassa varmasti esiintyi. Suuria eroja pinnoitetun ja pinnoittamattoman laitteen käsittelytavan välillä ei kuitenkaan ollut, joten öljyn käyttäytyminen laitteen kärjessä riippui merkittävästi sattumasta.



Kuva 10: Kuusioruuvun kuvauksen suoritustapa pinnoittamatonta ja pinnoitettua endoskooppia käyttäen.

Kuvanlaatua mittaavassa kokeessa käytetyssä laitteessa oli teräksen ja lasin lisäksi jonkinlaista polymeeriä endoskoopin kärjen linssin ympärillä. Linssin keskusta oli lasia. Polymeereillä on matalat, vapaat pintaenergiat, joten ne soveltuvat yhdeksi laitteen kärjessä käytettävistä materiaaleista hyvin. Syytä polymeerin käyttöön ei tiedetä.

Tässä kokeessa käytetty endoskooppi, kuten myös jäännösnesteen massan testauksessa käytetyt koekappaleet pinnoitettiin Millidyne Oy:n Avalon-tuoteryhmän sooli-geelipinnoitteilla. Jokaiselle endoskoopin ja koekappaleen materiaalityypille (lasi, teräs, volframi) täytyi käyttää juuri sille tarkoitettua pinnoitetta. Tästä syystä erilaisia pinnoitevariaatioita oli käytössä kolme.

Volframia käytetään endoskooppien letkumaisen varren uloimman kuoren pinnoitteena, sisäosan koostuessa polyuretaanista laitteen tiiviyn saavuttamiseksi erilaisia nesteitä ja kemikaaleja vastaan. Opinnäytetyön testeissä varteen ei kohdistettu mielenkiintoa osittain siksi, että linssin kastumiseen vaikuttaa ensisijaisesti laitteen kärjen pintojen ominaisuudet. Suurempi syy oli se, että opiskelijaryhmän vajaista resursseista johtuen varren erilliseen testaamiseen ei ollut aikaa. Nanopinnoitteella voitaisiin ainakin helpottaa varren puhdistamista öljy- ja rasvaliasta, joten se olisi hyödyllinen tutkimuskohde.

7 TULOKSET

7.1 Tulosten esittämisessä käytetyt tunnusluvut ja kuvaajat

Jokaisesta jäännösnesteen määrän mittauksesta saatiin yksi laskennallinen tulos pintaan tarttuneen neste- ja pinnoitusyhdistelmää kohden tuloksia laskettiin siis 6 - 9 kappaletta. Ohessa esitetään tulosten tarkastelussa käytetyt tunnusluvut Holopaisen ja Pulkkisen (2008) mukaan ennen tulosten esittämistä. Tunnuslukujen laskentakaavoja ei tässä yhteydessä kuitenkaan esitetä.

Lukumäärä, josta käytetään usein tunnusta n , ilmaisee aineiston tulosten lukumäärän.

Keskiarvo (aritmeettinen) on yleisesti käytetty keskiluku, joka ottaa huomioon kaikki mittaustulokset. Symmetrisellä aineistolla se esittää jakauman keskikohdan tarkasti, mutta aineiston ollessa vino tai sisältäessä muista merkittävästi poikkeavia arvoja, sen käyttöä tulisi välttää. Yksikin muista poikkeava arvo vääristää keskiarvoa merkittävästi. Jos keskiarvo on sama kuin mediaani, on jakauma todennäköisesti symmetrinen ja vinolla jakaumalla keskiarvon poikkeamissuunta mediaaniin nähden kertoo aineiston vinouden suunnasta.

Virhemarginaali esittää keskiarvon tilastollisesti määritettyä virhettä valitulla luottamustasolla, joka tässä on 95 %. Keskiarvo sijaitsee siis 95 prosentin todennäköisyydellä virhemarginaalin mittaisen etäisyyden päässä keskiarvosta sen jommallakummalla puolella. Virhemarginaali pienenee tulosten lukumäärän (n) kasvaessa.

Keskihajonta on yleisesti keskiarvon kanssa käytetty hajontaluku, joka ilmoittaa kuinka laajasti tai suppeasti mittaustulokset sijoittuvat lukusuoralle. Tarkasteltaessa otosta perusjoukon sijaan, kuten tässäkin opinnäytetyössä on asian laita, käytetään otoskeskihajontaa. Keskihajonta ei paljaana lukuna kerro hajonneisuudesta kuitenkaan riittävästi, vaan sitä pitää verrata esimerkiksi aikaisempaan hajontaan tai johonkin toiseen hajontaan. Se voidaan myös suhteuttaa johonkin toiseen arvoon, esimerkiksi keskiarvoon. Seuraavaksi esitettävä variaatiokerroin onkin keskihajonnan ja keskiarvon osamäärä.

Variaatiokerroin suhteuttaa keskihajonnan aritmeettiseen keskiarvoon ja se lasketaan niiden osamääränä. Variaatiokertoimen avulla voidaan vertailla erilaisten jakaumien hajonnan suuruutta keskenään. Keskiarvo, keskihajonta ja sitä myöten myös variaatiokerroin ovat herkkiä poikkeaville arvoille sekä erilaisille normaalijakaumasta poikkeaville jakaumatyypeille. Tästä syystä vaihtoehtoisina hajonnan mittoina käytetään aineiston neljänneksien sijaintia lukusuoralla sekä niiden etäisyyttä toisistaan.

Pienin kuvaa aineiston pienintä ja *suurin* aineiston suurinta arvoa.

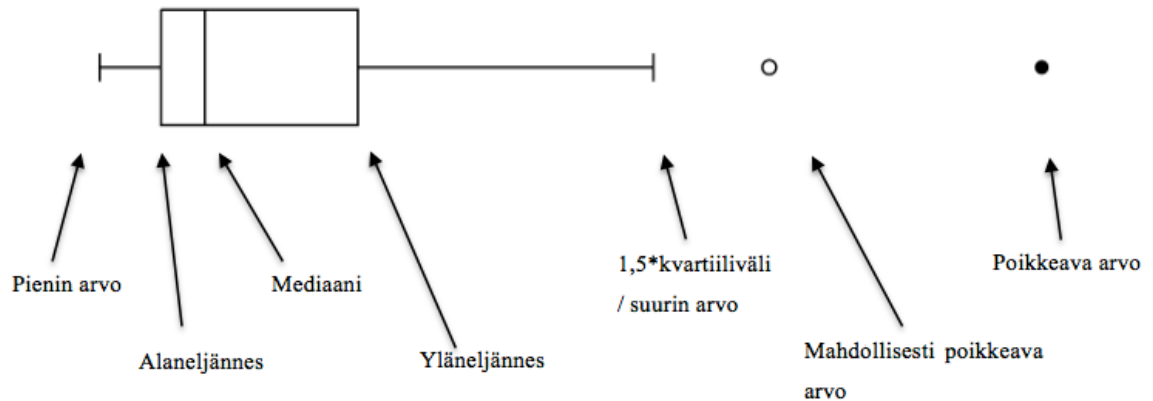
Alaneljännes (alakvartiili) kuvaa arvoa, jonka alapuolelle jää 25% aineiston arvoista.

Mediaani on järjestetyn aineiston keskiluku, joka esittää aineiston keskimmäisen arvon tai aineiston ollessa parillinen, keskimmäisten lukujen keskiarvon. Siihen ei vaikuta muista poikkeavat arvot tai jakauman mahdollinen vinous. Sitä tulisikin käyttää edellä mainittujen tapausten esiintyessä keskiarvon sijasta jakauman keskikohdan kuvaamiseen. Mediaanin ja alaneljänneksen väliin jää 25% aineiston arvoista kuten myös mediaanin ja ylaneljänneksen väliin.

Ylaneljännes (yläkvartiili) kuvaa arvoa, jonka yläpuolella sijaitsee 25% aineiston arvoista. Alaneljänneksen ja ylaneljänneksen väliin jää siten puolet aineiston kaikista arvoista, jotka ovat samalla aineiston keskimmäiset arvot. Tätä väliä kutsutaan myös kvartiiliväliksi. (Holopainen ja Pulkkinen 2008)

7.1.1 Boxplot-kaavio

Tässä opinnäytetyössä valittiin käytettäväksi boxplot-kaaviotyyppiä jäännösnesteen määrän mittaustulosten esittämiseen. Tulokset olisi voitu esittää myös muunlaisilla kaaviotyypeillä, kuten histogrammeilla tai pistekaavioilla, mutta boxplot-kaavion käytöllä saavutetaan tiettyjä etuja muihin kaavioihin nähden: se mahdollistaa useamman ryhmän tulosten vertailun samassa kuvaajassa, siitä näkee suoraan tiettyjä tilastollisia tunnuslukuja ja se on tilankäytöllisesti hyvin tehokas. Haittapuolena sillä on histogrammiin verrattuna se, että se ei kerro jakauman muodosta vinouden tai symmetrisyyden lisäksi mitään. Esimerkiksi jakauman mahdollinen monihuippisuus ei sen avulla selviä. Tyypillinen boxplot-kaavio esitetään kuviossa 1. (Buglear 2013)



Kuvio 1: Boxplot-kaavio

Kuvion 1 vasemmanpuoleisen viiksen päässä oleva pystyviiva esittää aineiston pienintä arvoa. Neliskulmaisen laatikon vasen reuna esittää alaneljännestä, laatikon keskimmäinen viiva esittää mediaania ja laatikon oikea reuna yläneljännestä. Laatikon pituus eli neljännesten välinen etäisyys esittää kvartiiliväliä. Jokaisessa neljänneksessä on siis neljäsosa aineiston havainnoista, riippumatta kyseisen osion pituudesta kuvaajassa. Jos mediaanin viiva on laatikon keskellä, viiksien ollessa yhtä pitkät, jakauma on symmetrinen. Jos toinen mediaanin jakama laatikon sivu on pidempi kuin toinen, jakauma on pidempään suuntaan vino. Kuvion 1 tapauksessa jakauma on oikealle vino. (Buglear 2013)

Laatikon oikean puoleisen viiksen päässä oleva pystyviiva esittää tässä kuviossa puolitoistakertaisen kvartiilivälin rajaa, mutta jos viiksi olisi lyhyempi, se esittäisi suurinta arvoa (tai pienintä kuten vasemman puoleisen viiksen tapauksessa). Arvot, jotka ovat yli puolitoistakertaisen, mutta alle kolminkertaisen kvartiilivälin pituisen etäisyyden päässä jommastakummasta neljänneksestä ovat mahdollisesti poikkeavia arvoja. Poikkeavia arvoja ovat ne arvot, jotka ovat yli kolminkertaisen kvartiilivälin päässä toisesta neljänneksestä. Mahdollisesti poikkeavia arvoja merkitään tyhjällä ja poikkeavia arvoja täytetyllä ympyrällä. (Törmäkangas 2010)

Boxplot-kaaviot voivat olla myös pystysuuntaisia, kuten tässä opinnäytetyössä esitetyt kaaviot ovat. Vierekkäin sijoitetut kuvaajat mahdollistavat aineistojen erojen havaitsemisen yhdellä silmäyksellä, vertaamalla aineistojen eri osien pituuksia ja niiden sijaintia sekä tunnuslukujen eroja.

7.2 Jäännösnesteen määrä koekappaleiden pinnassa

Tässä kappaleessa esitetään terästankojen, lasilevyjen sekä endoskooppien mittaustulokset pinnoittamattomana sekä pinnoitettuna, veteen ja öljyyn kastettuina. Yhden koekappaleityypin mittaustulosten tunnusluvut esitetään yhdessä taulukossa sekä kuvaajassa vertailun helpottamiseksi. Tulosten tunnusluvut on esitetty taulukoina 2 - 4 ja tunnusluvuista laaditut kuvaajat kuvioina 2 - 4.

Tulosten esittelyn yhteydessä esitetään valokuvina nesteen käyttäytyminen pinnoittamattoman sekä pinnoitetun kappaleen pinnalla. Kaikkien mittauskertojen esittäminen valokuvina ei olisi järkevää, joten mukaan on valittu kyseiselle pinnoitus- / nesteyhdistelmälle tyypillistä tilannetta esittävä kuva. Se on otettu noin minuutin kuluttua kappaleen nostamisesta nesteen joukosta. Valokuvat esitetään kuvina 11 - 16

Vedellä toteutettujen mittausten yhteydessä pinnan korkeuden sijainti koekappaleeseen nähden saatiin määritettyä arviolta yhden millimetrin tarkkuudella. Öljyllä toteutetuilla mittauksilla pinnankorkeuden määrittäminen oli tarkempaa, öljyn jättämän selkeän rajaviivan ansiosta. Terästangoilla ja lasilevyillä, jotka upotettiin nesteeseen n. 50 - 60 millimetrin syvyyteen, arvioitu suhteellinen nesteen pinnan korkeuden maksimivirhe oli vedellä n. 2 % lopulliseen tulokseen nähden. Endoskooppien kärjillä, jotka upotettiin nesteeseen vain n. 10 - 12 millimetrin syvyyteen, arvioitu suhteellinen nesteen pinnan korkeuden maksimivirhe oli vedellä n. 8 -10 % luokkaa. Itse mittavälineistä (työntömita, analyysivaaka ja sekuntikello) aiheutuva epävarmuus oli häviävän pieni verrattuna nesteen pinnan sijainnin paikantamisen epätarkkuuteen nähden.

Koska mittauksissa pyrittiin noudattamaan huolellisuutta ja epäonnistuneita mittauksia ei kirjattu ylös, tuloksien vaihtelua voidaan selittää vain tiettyyn rajaan asti mittausepävarmuudella. Tuloksien vaihtelun ollessa ryhmien sisällä arvioitua mittausepävarmuutta suurempaa, voidaan vaihtelun päätellä aiheutuvan satunnaisvirheestä. Tätä otaksumaa tukee myös huomio siitä, että suurin osa mittaustuloksien jakaumista näyttäisi olevan kuvaajien mukaan symmetrisiä ja SPSS:n mukaan normaalijakautuneita. Satunnaisvirhe ilmenee juuri normaalijakautuneisuutena tulosjoukossa. Arvioituihin mittausepävarmuuksiin ei paneuduta työssä sen enempää, vaan virheen arviointi toteutetaan tilastollisin keinoin, satunnaisvirheen merkittävän osuuden vuoksi.

7.2.1 Tilastollinen testaus

Kysymys siitä, että johtuuko muutos eri tavoin pinnoitettujen kappaleiden pintaan tarttuneen nesteen määrässä pinnoitteesta vai sattumasta, vaatii tulkintaa tilastollisten testien avulla. Kuten myöhemmin esitettävistä kuvaajista nähdään, erot pinnoitettujen ja pinnoittamattomien kappaleiden tulosten välillä eivät ole suuria ja aineistojen arvot menevät osin päällekkäin. Kysymys on siis hyvinkin aiheellinen.

Tilastollisessa vertailuasetelmassa tutkittavalle oletukselle esitetään nollahypoteesi ja sille vaihtoehtoinen hypoteesi. Yleensä nollahypoteesina ilmoitetaan konservatiivisesti tilanne, jossa muutosta jonkin asian suhteen ei ole ja vaihtoehtoisena hypoteesina tilanne, jossa muutosta on. Nollahypoteesi pyritään kumoamaan, jolloin vaihtoehtoinen hypoteesi astuu voimaan. Tilastollisen testin avulla saadaan p-arvo, eli merkitsevyystaso. Merkitsevyystaso on riski sille, että tarkastelun kohteena oleva tulos saataisiin sattumalta. Toisaalta se kuvaa myös riskiä väärän johtopäätöksen tekemiselle jos vaihtoehtoinen hypoteesi hyväksytään. Testeissä pyritään luonnollisesti mahdollisimman pieneen p-arvoon. Heikkilä (2008) esittää muistisäännön merkitsevyystason tulkinnalle. ”mitä pienempi riski, sitä merkitsevämpi tulos”. (Heikkilä 2008, 189-199)

Yleisesti käytetty merkitsevyystason raja on 0,05 eli 5 %, jota myös tässä opinnäytetyössä käytetään. Heikkilän (2008) mukaan ero hypoteesien välillä on tilastollisesti merkitsevä välillä $0,001 < p \leq 0,01$, tilastollisesti melkein merkitsevä välillä $0,01 < p \leq 0,05$ ja tilastollisesti suuntaa antava välillä $0,05 < p \leq 0,1$. Vaihtoehtoinen hypoteesi tulee voimaan vain, jos se alittaa valitun merkitsevyystason. Nollahypoteesiksi tämän opinnäytetyön testauksille määriteltiin väite ”Pinnoitus ei alenna koekappaleen pintaan tarttuneen nesteen määrää” ja vaihtoehtoiseksi hypoteesiksi väite ”Pinnoitus alentaa koekappaleen pintaan tarttuneen nesteen määrää”. (Heikkilä 2008, 195)

Opinnäytetyössä käytetyt testit ovat keskiarvotestejä, joiden avulla on mahdollista verrata kahden ryhmän keskiarvojen eroja toisiinsa. Testien valintaan vaikutti kaksi seikkaa: tulosten normaalijakautuneisuus sekä testattavien ryhmien keskinäinen riippumattomuus (tai riippuvuus). Testit voidaan yleisesti ottaen jakaa parametrisiin sekä ei-parametrisiin testeihin, joista parametriset testit edellyttävät tulosten normaalijakautuneisuutta kun taas ei-parametriset eivät sitä edellytä. Ryhmien riippumattomuudella tarkoitetaan nimensä mukaisesti sitä, onko testattavilla ryhmillä jotain keskinäistä yhte-

yttä. Jos samoja kappaleita testataan kahteen otteeseen ennen - jälkeä asetelmassa, ovat ryhmät toisistaan riippuvia. Jos testattavat kappaleet ovat fyysisesti täysin eri kappaleita, ovat ryhmät toisistaan riippumattomia. (Heikkilä 2008, 224)

Opinnäytetyön tilastolliset testit tehtiin SPSS-ohjelmistolla, joka on tarkoitettu tilastotieteelliseen analyysiin. Normaalijakautuneisuuden testaamista varten se tulostaa kahden testin, Kolmogorov-Smirnovin sekä Shapiro-Wilkin testien tulokset. Suurille aineistoille normaalijakautuneisuus voidaan olettaa tietyin edellytyksin ja tarkistaa esimerkiksi histogrammista, mutta etenkin pienillä aineistoilla vastaavaa oletusta ei voi tehdä. Tällöin jakauman muotoa mittaavien testien käyttö on perusteltua. Kyseisten testien tuloksien mukaan normaalijakautuneisuus voidaan olettaa kaikille muille aineistoille paitsi veteen kastetulle pinnoitetulle terästangolle. Kyseisen kappaleen testituloksista toinen kumosi normaalijakaumaoletuksen merkitsevyydellä 0,028, toisen ollessa 0,126. Tarkasteltaessa asiaa histogrammin avulla, kyseisen aineiston huipukkuus näytti olevan negatiivinen. Histogrammia ei tässä yhteydessä kuitenkaan esitetä. (Taanila 2012, 4-8)

Endoskoopeilla suoritetuissa testeissä käytettiin kahta samantyyppistä, mutta fyysisesti erillistä, käytettyä endoskooppia, joten endoskoopeista saatujen mittausten tulokset tulkitaan toisistaan riippumattomiksi otoksiksi. Lasilevyillä suoritetuissa testeissä käytettiin samasta paketista otettuja, mikroskooppikäyttöön tarkoitettuja laseja. Tarkempaa tietoa lasilevyjen valmistusmenetelmistä ei ole, mutta levyjen ollessa fyysisesti erillisiä kappaleita, otaksutaan niitä käyttämällä saadut mittaustulokset toisistaan riippumattomiksi. Terästangot sen sijaan on valmistettu opinnäytetyön kirjoittajan toimesta samasta tankoaihiosta sahaamalla. Tästä syystä tankojen pinnat ovat hyvin suurella todennäköisyydellä samankaltaisia. Terästankoja käyttämällä saadut mittaustulokset oletetaan toisistaan riippuviksi.

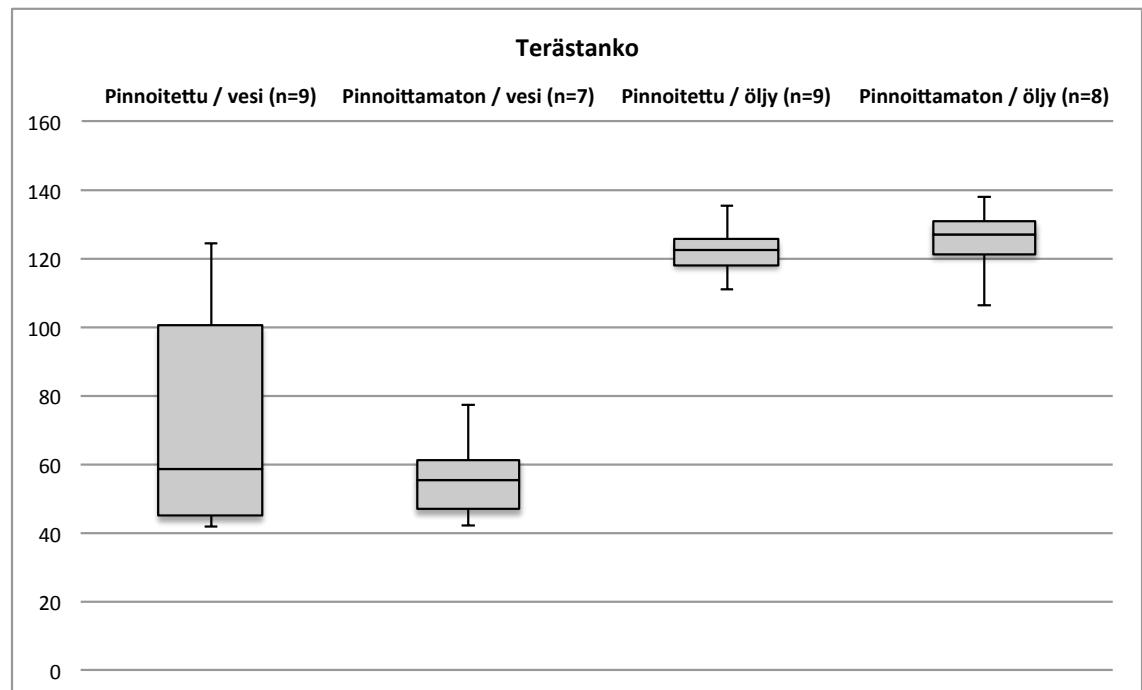
Koska normaalijakautuneisuus voitiin olettaa suurimmalle osalle aineistoja, käytetään riippumattomille otoksille (lasilevyt ja endoskoopit) riippumattomien otosten t-testiä, joka ei edellytä varianssien yhtäsuuruutta. Öljyllä suoritetuille terästankojen mittauksille käytetään riippuvien otosten t-testiä, jonka edellytykset ovat vastaavat kuin edellä. Vedellä suoritetuille terästankojen mittauksille käytetään sen sijaan Wilcoxonin merkittävien sijalukujen testiä, sillä se sopii riippuville otoksille ja ei edellytä normaalijakautuneisuutta. Edellä mainittuja testejä ei käsitellä tarkemmin tämän opinnäytetyön puitteissa. (Taanila 2012, 14-21)

7.2.2 Terästangot

Taulukossa 2 esitetään kooste terästankojen mittaustuloksien pohjalta lasketuista tunnusluvuista. Tunnusluvut esitetään terästangoille pinnoitettuina sekä pinnoittamattomina, öljyyn sekä veteen kastettuina. Kuviossa 2 esitetään taulukon 2 tunnusluvuista laadittu boxplot-kaavio tarkastelluille neste- ja pinnoitusyhdistelmille.

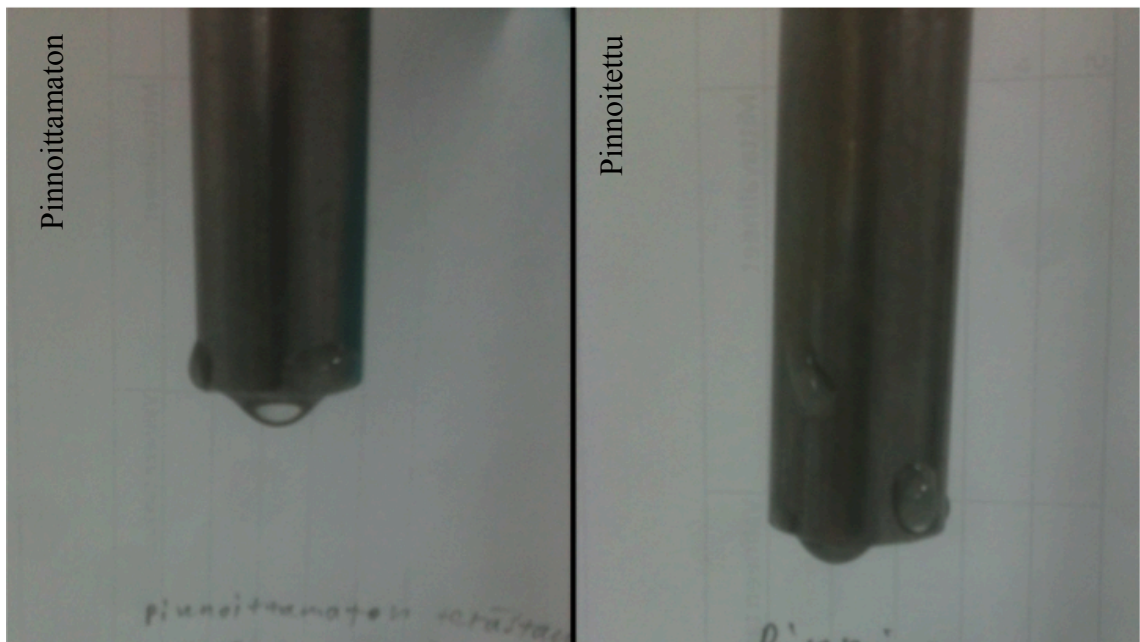
Taulukko 2: Terästankojen mittaustuloksista lasketut tunnusluvut.

Terästanko	Vesi		Öljy	
	Pinnoitettu	Pinnoittamaton	Pinnoitettu	Pinnoittamaton
Lukumäärä (n)	9	7	9	8
Keskiarvo	72,9	55,7	123,4	125,4
Virhemarginaali (95%)	26,1	11,2	6	8,2
Keskihajonta	34,0	12,1	7,9	9,8
Variaatiokerroin	47 %	22 %	6 %	8 %
Mediaani	58,8	55,1	122,6	127,2
Pienin	41,7	42,1	111,0	106,3
Suurin	124,1	77,1	135,0	137,8
Alaneljännes	44,8	46,7	118,1	121,0
Yläneljännes	100,2	61,2	125,4	130,7

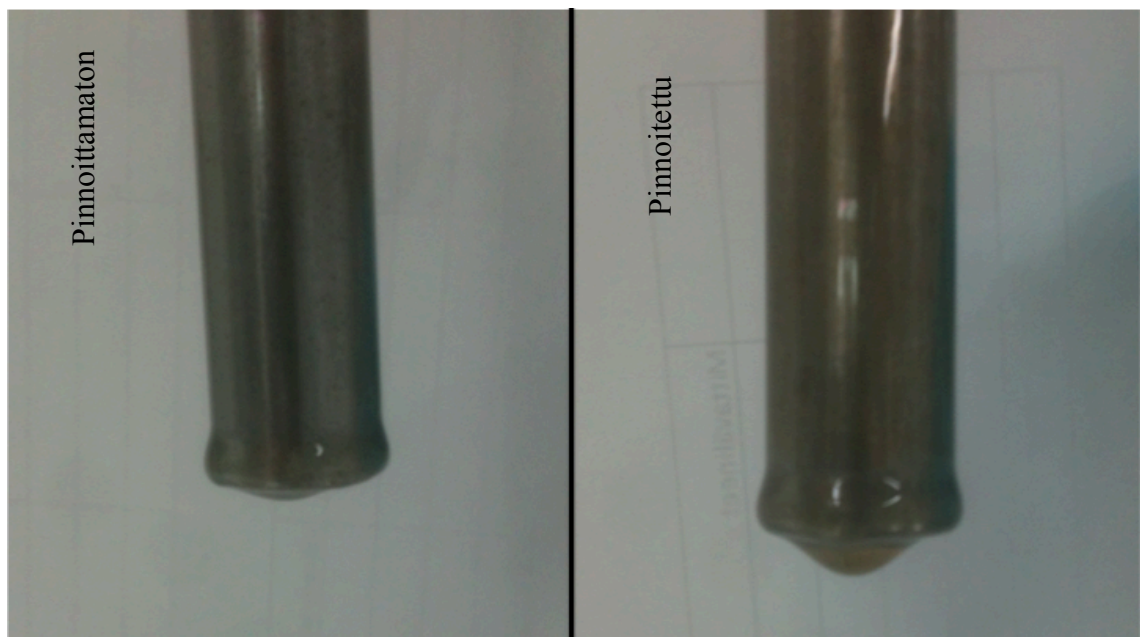


Kuvio 2: Boxplot-kaavio nesteiden tartumisesta pinnoittamattomaan sekä pinnoitettuun terästankoon.

Kuvina 11-12 esitetään tarkastelluista neste- ja pinnoitusyhdistelmistä otetut valokuvat.



Kuva 11: Vettä pinnoittamattoman ja pinnoitetun terästangon pinnalla.



Kuva 12: Öljyä pinnoittamattoman ja pinnoitetun terästangon pinnalla.

Terästankoa ja vettä koskevista tuloksista havaitaan, että veden määrä pinnoitetun terästangon pinnalla on suurempi kuin pinnoittamattoman tangon pinnalla. Kyseinen tulos on päinvastainen odotuksiin nähden. Mediaaneissa ei kuitenkaan havaita niin suurta eroa kuin keskiarvoissa. Pinnoitetun kappaleen variaatiokerroin on suuri yhdessä virhemarginaalin kanssa. Tunnuslukujen ja kuvaajan perusteella olisi helppoa tehdä johtopäätös mittauksista sattuneista virheistä tai pinnoitteen viallisuudesta. Tällä tavoin toimittaessa rajattaisiin pois kuitenkin myös mahdollisuus sille, että kokeen tulokset ovat täysin oikeat ja ilmiö todellakin esiintyy kokeen osoittamalla tavalla.

Terästankoa ja öljyä koskevista tuloksista havaitaan pinnoitetun tangon pintaan tarttuneen öljyn määrän olevan pienempi kuin pinnoittamattomalla sekä keskiarvon että mediaanin mukaan. Kuvaajasta nähdään kuitenkin, että tuloksien kvartiilivälit osuvat päällekkäin, joten luotettavaa johtopäätöstä ei pinnoitteen vaikutuksista voida tällä otoskoollla vielä tehdä. Hajonta näyttäisi olevan pienempää pinnoitetulla kappaleella. Pienet variaatiokertoimet sekä virhemarginaalit kertovat suhteellisen onnistuneista mittauksista.

Pinnoitetun terästangon pintaan tarttuneen veden määrän mediaani oli suoritettujen kokeiden mukaan pinnoittamatonta 7 % suurempi, keskiarvon ollessa 31 % suurempi. Tulos ei ole tilastollisesti merkitsevä ($p=0,306$). Pinnoitetun terästangon pintaan tarttuneen öljyn määrän mediaani oli puolestaan pinnoittamatonta 4 % pienempi, keskiarvon ollessa 2 % pienempi. Tulos ei ole tilastollisesti merkitsevä ($p = 0,264$).

Kuvasta 11 päätellen vesi käyttäytyy samalla tavoin sekä pinnoittamattoman että pinnoitetun terästangon pinnalla. Suurin osa vedestä valuu pois kappaleen pinnalta heti, kun se nostetaan pois vesiastiasta. Kappaleen pintaan jää ohuehko vesikalvo, josta osa valuu tangon päähän muodostaen ison pisaran ja osa haihtuu pois alle minuutissa. Lopuosa vedestä muodostaa kappaleen pintaan toisistaan erillään olevia pisaroita, jotka pysyvät valumatta paikallaan. Pinnoitettu tanko muuttui testien aikana jostain syystä väriltään hieman punertavaksi, mikä on havaittavissa öljyllä tehtyjen testien kuvasta.

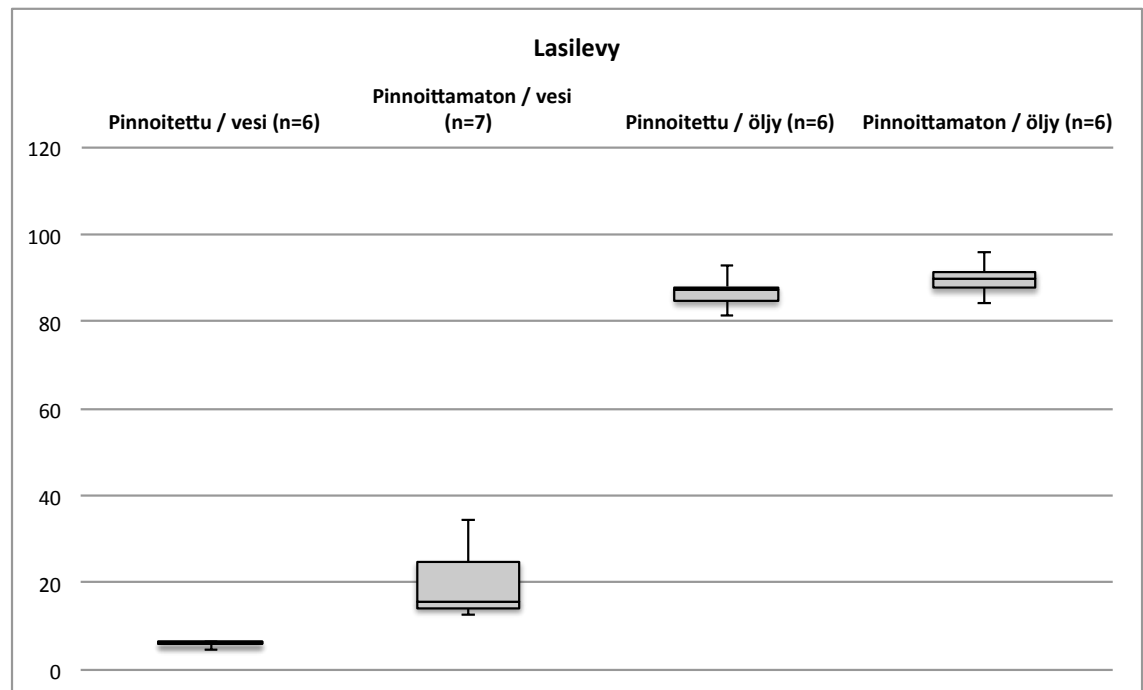
Kuvan 12 mukaan öljy käyttäytyy samalla tavoin sekä pinnoittamattoman että pinnoitetun terästangon pinnalla. Kun tanko nostetaan öljyastiasta, valuu ylimääräinen öljy sen pinnalta pois tasaisena norona. Pintaan jäänyt öljy muodostaa sekä tasaisen kalvon kappaleen pinnalle että myös pakkautuneen kerroksen tangon suorakulmaisen pään ympärille.

7.2.3 Lasilevyt

Taulukossa 3 esitetään kooste lasilevyjen mittaustuloksista lasketuista tunnusluvuista. Samassa taulukossa esitetään tunnusluvut lasilevyistä pinnoitettuna sekä pinnoittamattomana, öljyyn sekä veteen kastettuina. Kuviossa 3 esitetään taulukon 3 tunnusluvuista laadittu boxplot-kaavio tarkastelluille neste- ja pinnoiteyhdistelmille.

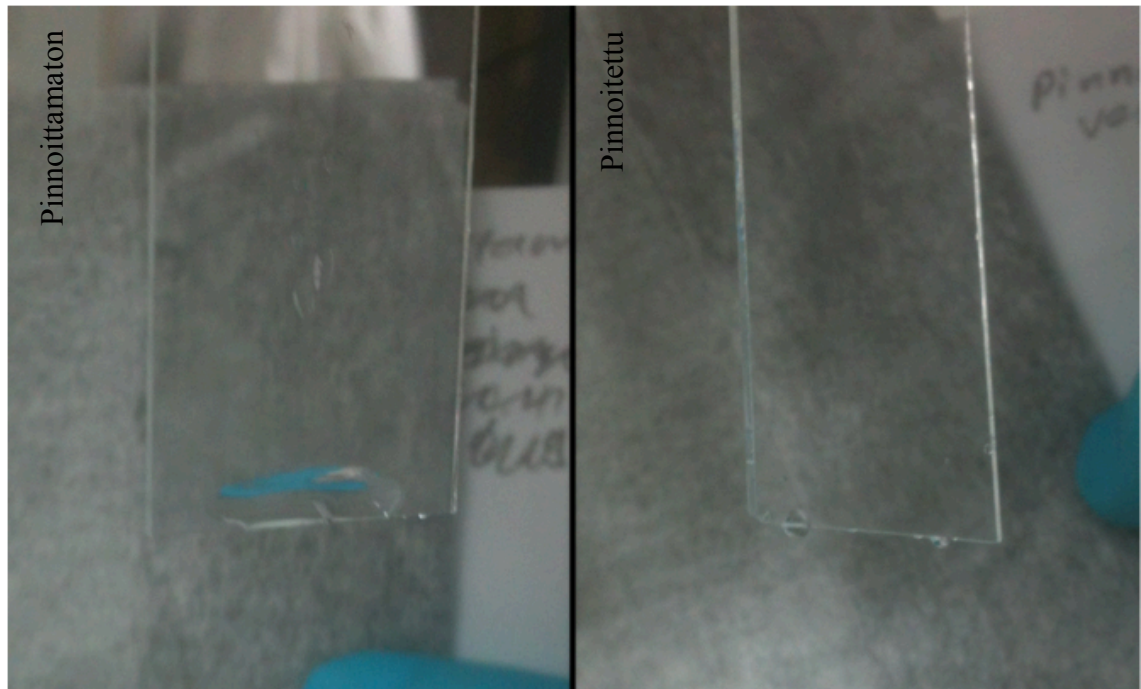
Taulukko 3: Lasilevyjen mittaustuloksista lasketut tunnusluvut

Lasilevy	Vesi		Öljy	
	Pinnoitettu	Pinnoittamaton	Pinnoitettu	Pinnoittamaton
Lukumäärä (n)	6	7	6	6
Keskiarvo	5,9	20,2	86,9	89,8
Virhemarginaali (95%)	0,7	7,7	4,1	4,3
Keskihajonta	0,7	8,3	3,9	4,1
Variaatiokerroin	11 %	41 %	5 %	5 %
Mediaani	6,0	15,7	87,3	89,8
Pienin	4,7	12,7	81,4	84,1
Suurin	6,6	34,4	93,0	95,9
Alaneljännes	5,8	14,4	84,7	87,7
Yläneljännes	6,2	25,0	88,1	91,6

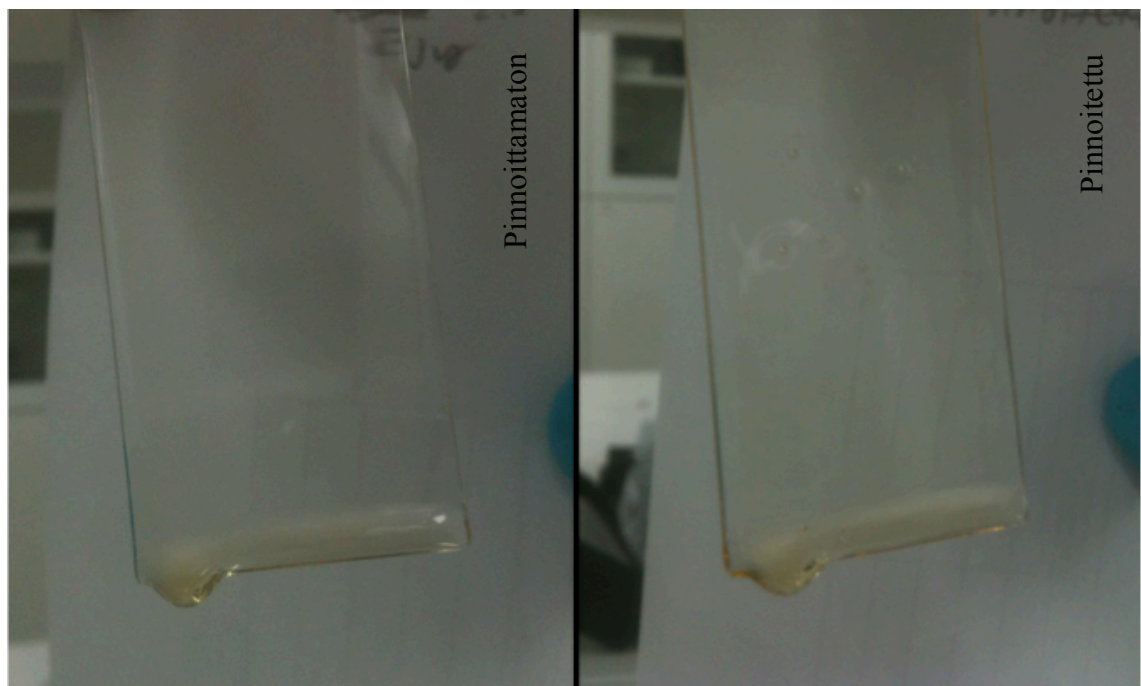


Kuvio 3: Boxplot-kaavio nesteiden tarttumisesta pinnoitettuun sekä pinnoittamattomaan lasilevyyn.

Kuvissa 13-14 esitetään tarkastelluista neste- ja pinnoitusyhdistelmistä otetut valokuvat sekä vedellä että öljyllä. Lasilevyjen taakse pyrittiin valokuvauksen yhteydessä sijoittamaan jotakin sopivan kontrastin tuottavaa materiaalia.



Kuva 13: Vettä pinnoittamattoman ja pinnoitetun lasilevyn pinnalla.



Kuva 14: Öljyä pinnoittamattoman ja pinnoitetun lasilevyn pinnalla.

Lasilevyjen ja veden koetuloksista nähdään, että pinnoitettuun levyyn tarttunut vesimäärä on huomattavasti pinnoittamatonta levyä pienempi keskiarvojen sekä mediaanien mukaan. Tulosjoukot eivät osu miltään osin päällekkäin. Tunnuksien ja kuvaajien perusteella onkin pääteltävissä pinnoituksen vähentävän pinnoitetun levyn pintaan tarttuneen veden määrää merkittävästi. Pinnoitetun levyn pieni virhemarginaali yhdistettynä pieneen variaatiokertoimeen kertoo onnistuneesta mittaustapahtumasta ja pienistä eroista ryhmän sisällä. Pinnoittamattomalla levyllä variaatiokerroin on puolestaan todella suuri, kuten myös virhemarginaali. On siis todennäköistä, että pinnoitetun levyn mittaustapahtumassa on tapahtunut virheitä.

Lasilevyjen ja öljyn tuloksista on nähtävissä, että pinnoitetun levyn öljymäärän keskiarvo sekä mediaani ovat hieman pinnoittamatonta levyä pienempiä. Pinnoitetun levyn tulosten kvartiiliväli on suurimmaksi osaksi pinnoittamattoman levyn kvartiilivälin alapuolella, vaikka ne osuvatkin hieman päällekkäin. Molempien ryhmien silminnähden samanlaiset ja pienet hajonnat kertovat onnistuneista mittaustapahtumista. Tätä tukevat myös lähekkäin olevat, pienet virhemarginaalin, keskihajonnan ja variaatiokertoimen arvot.

Pinnoitetun lasilevyn pintaan tarttuneen veden määrän mediaani oli 62 % pienempi ja keskiarvo 71 % pienempi pinnoittamattomaan verrattuna. Tulos on tilastollisesti merkitsevä ($p=0,002$). Pinnoitetun lasilevyn pintaan tarttuneen öljyn määrän mediaani sekä keskiarvo olivat kumpikin pinnoittamattoman tuloksia 3 % pienempiä. Tulosta ($p=0,119$) voidaan pitää tilastollisesti suuntaa antavana.

Kuvasta 13 on nähtävissä veden erilainen käyttäytyminen pinnoittamattoman sekä pinnoitetun lasilevyn pinnalla. Vesi pakkautuu isoksi pisaraksi pinnoittamattoman levyn alareunan viereen välittömästi levyä astiasta nostettaessa. Myös muualla levyssä on nähtävissä pienempiä vesipisaroita. Pinnoitetun levyn tasaisella pinnalla ei pieniä vesipisaroita sen sijaan ole nähtävissä lainkaan ja levyn alareunan kärkeen on tarttunut kolmesta neljään pientä, toisistaan erillään olevaa vesipisaraa.

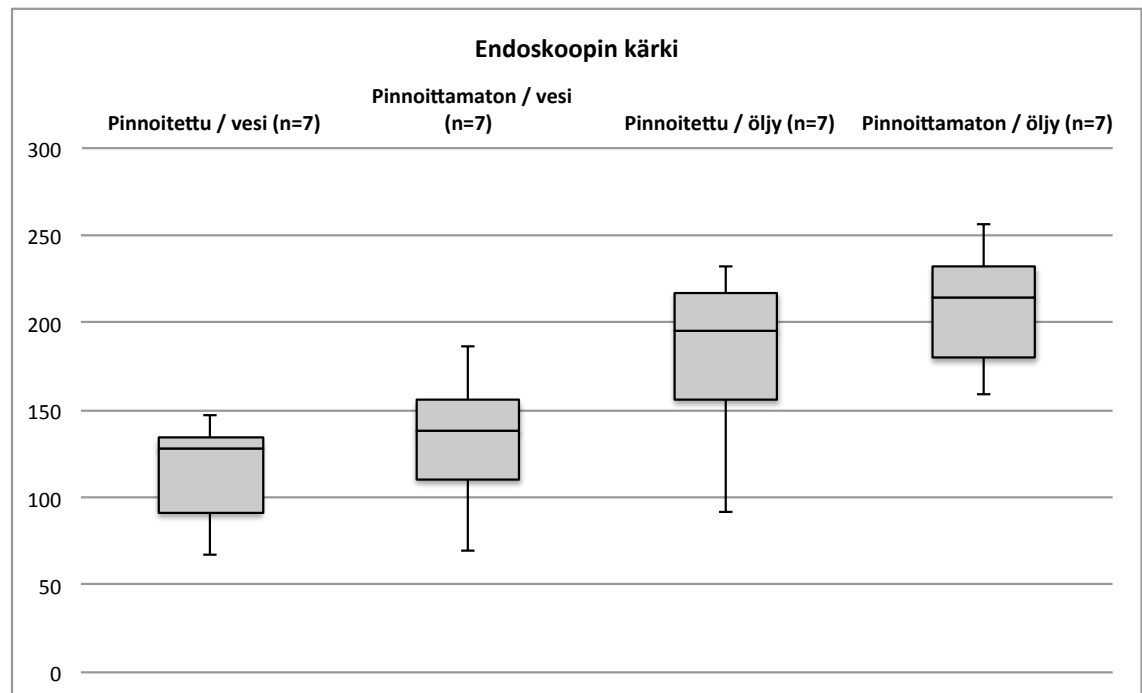
Kuvassa 14 esitetään öljyn käyttäytyminen pinnoittamattoman ja pinnoitetun lasilevyn pinnalla. Öljy käyttäytyy pääosin samalla tavalla kummassakin tapauksessa, muodostaen levyn pintaan tasaisen kalvon sekä levyn kärkeen pakkautuman. Huomioitavaa pinnoitetun levyn pinnalla ovat kuplat, jotka puuttuvat täysin pinnoittamattomasta levystä.

7.2.4 Endoskooppien kärkien lasi- ja teräsosat

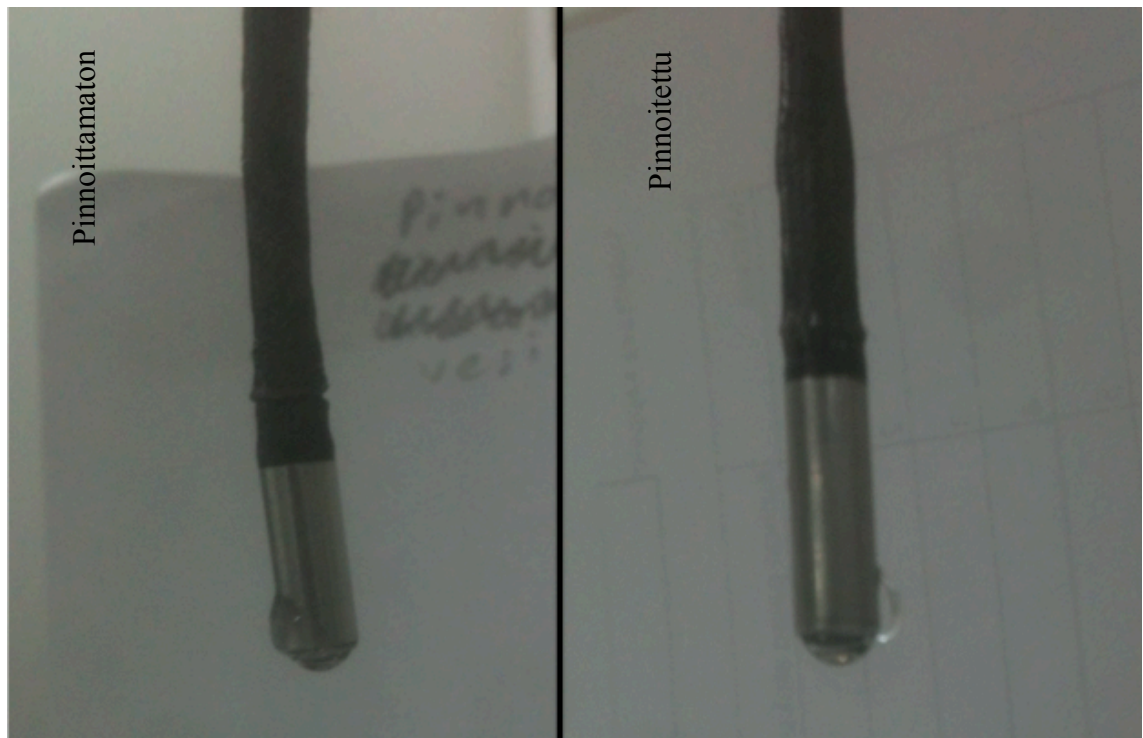
Taulukossa 4 esitetään kooste endoskooppien kärkien mittaustuloksista lasketuista tunnusluvuista. Samassa taulukossa esitetään tunnusluvut endoskoopeista pinnoitettuna sekä pinnoittamattomana, öljyyn sekä veteen kastettuina. Kuviossa 4 esitetään taulukon 4 tunnusluvuista laadittu boxplot-kaavio.

Taulukko 4: Endoskooppien kärkien mittaustuloksista lasketut tunnusluvut

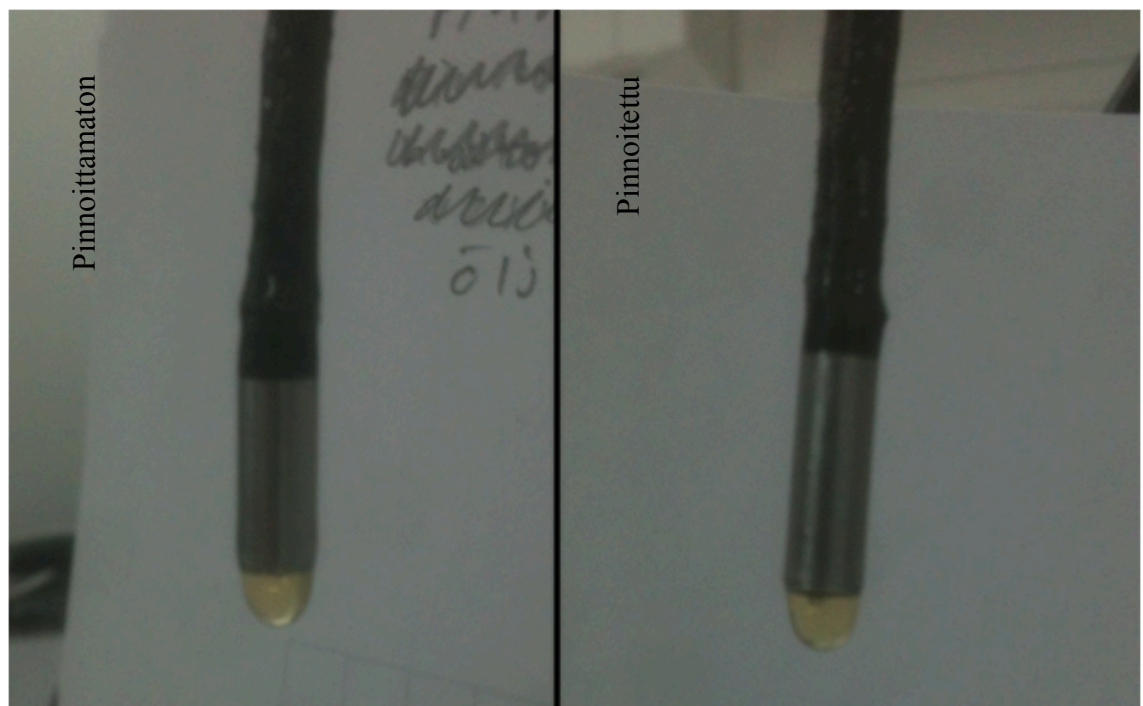
Endoskoopin kärki	Vesi		Öljy	
	Pinnoitettu	Pinnoittamaton	Pinnoitettu	Pinnoittamaton
Lukumäärä (n)	7	7	7	7
Keskiarvo	113,7	132,5	181,0	207,6
Virhemarginaali (95%)	27,7	36,7	49,4	32,8
Keskihajonta	30,0	39,6	53,5	35,5
Variaatiokerroin	26 %	30 %	30 %	17 %
Mediaani	128,5	138,4	195,9	214,5
Pienin	67,3	69,2	91,8	159,2
Suurin	146,9	186,8	232,6	256,0
Alaneljännes	91,8	110,7	156,1	179,9
Yläneljännes	134,7	155,7	217,3	231,8



Kuvio 4: Boxplot-kaavio nesteiden tarttumisesta pinnoitetun sekä pinnoittamattoman endoskoopin kärkeen.



Kuva 15: Vettä pinnoittamattoman ja pinnoitetun endoskoopin kärjessä.



Kuva 16: Öljyä pinnoittamattoman ja pinnoitetun endoskoopin kärjessä.

Endoskooppien kärkien ja veden koetuloksista nähdään, että pinnoitettuun kärkeen tarttunut vesimäärä on pinnoittamatonta pienempi keskiarvojen sekä mediaanien mukaan. Pinnoitetun kärjen kvartiilivälin yläraja osuu pinnoittamattoman kärjen kvartiilivälin puoliväliin. Kvartiilivälit ovat sinänsä samansuuruisia. Tunnuslukujen ja kuvaajien perusteella on pääteltävissä pinnoituksen vähentävän endoskoopin kärkeen tarttuneen veden määrää jonkin verran. Pinnoitetun ja pinnoittamattoman kärjen virhemarginaalit ovat lähes samansuuruisia ja variaatiokertoimien perusteella kohtalaisia, mutta pysyvät silti siedettävissä rajoissa.

Endoskooppien kärkien ja öljyn tuloksista on havaittavissa, että pinnoitetun kärjen öljyn määrän keskiarvo yhdessä mediaanin kanssa on pinnoittamatonta kärkeä pienempi. Pinnoitetun kärjen kvartiilivälin yläraja leikkaa pinnoittamattoman kärjen kvartiilivälin yläosasta kolmanneksen verran. Pinnoitetun kärjen kvartiiliväli on hieman pinnoittamattoman kärjen kvartiiliväliä suurempi. Tunnuslukujen ja kuvaajien perusteella on pääteltävissä pinnoituksen vähentävän tarttuneen öljyn määrää kohtalaisesti. Pinnoitetun kärjen variaatiokerroin on suurempi kuin pinnoittamattomalla, mutta siedettävä.

Pinnoitetun endoskoopin kärkeen tarttuneen veden määrän mediaani on pinnoittamatonta 7 % pienempi ja keskiarvo 14 % pienempi. Tulos ei ole tilastollisesti merkitsevää ($p = 0,169$). Pinnoitetun endoskoopin kärkeen tarttuneen öljyn määrän mediaani on 9 % pienempi ja keskiarvo 13 % pienempi. Tulos voidaan karkeasti määrittellä tilastollisesti suuntaa antavaksi ($p = 0,148$).

Kuvasta 15 nähdään, että vesi käyttäytyy sekä pinnoittamattoman että pinnoitetun endoskoopin kärjissä hyvin vastaavalla tavalla. Linssin eteen kertyy vesipisara, kuten myös laitteen kärjen reunan yläpuolelle. Eri pinnoituksen omaavien laitteiden pisaroiden muotoja on hankalaa verrata otetuista valokuvista, joten kuvien syvempi tulkinta on epävarmaa ja jätetään siksi tekemättä.

Kuvassa 16 esitettyjen, pinnoittamattoman ja pinnoitetun endoskoopin kuvista nähdään öljyn muodostavan samanlaiset pisarat molemmilla tavoilla pinnoitettujen endoskooppien kärkiin. Pinnoittamattoman endoskoopin kuvasta on juuri ja juuri erotettavissa öljyn muodostama pakkautuma laitteen kärjen ympärille. Pinnoitetun endoskoopin kuvasta tämä näyttäisi puuttuvan. Jos tilanteita vertaa terästankojen kuviin, on havaittavissa pakkautuman olevan endoskoopilla pienempi.

7.2.5 Yhteenveto jäännösnesteen määrän mittauksista

Pinnoitus vähensi pintaan tarttuneen nesteen määrää kaikilla muilla nesteiden ja koekappaleiden yhdistelmillä, paitsi vedellä terästangon pinnalla. Tangon pintaan tarttuneen veden määrä kasvoi pinnoituksen myötä. Sooli-geeli-pinnoitteiden vaikutusta teräksien ominaisuuksiin on tutkittu VTT:n projektissa vuonna 2005. Projektin loppuraportin mukaan kolmesta testatusta pinnoitteesta kaksi vaikutti rakenneteräksen pintaenergian arvoihin niitä suurentavasti. Raportin mukaan pinnoitteet nostivat terästen pintaenergioiden polaarisia komponentteja, jotka olivat jo ennestään matalia. Tämä on järkeenkäypä ja todennäköinen selitys myös tässä opinnäytetyössä, sillä terästangoista otetuissa valokuvissa on havaittavissa veden selkeä pisaroituminen niiden pinnoilla - merkki kiinteän materiaalin matalasta pintaenergiasta. (Ritschkoff, ym. 2005)

Tarttuneen nesteen määrän havaittiin pienentyneen eniten vedellä lasilevyn pinnassa, muutoksen ollessa vähäisempää muilla yhdistelmillä. Taulukossa 5 esitetään yhteenvetona pinnoituksen vaikutusten vertailu keskiarvon ja mediaanin muutosprosenttien avulla. Negatiivinen suhdeluku tarkoittaa pienentynyttä nesteen määrää kappaleen pinnassa pinnoituksen myötä ja positiivinen puolestaan kasvanutta. Taulukossa raportoidaan myös tilastollisilla testeillä saadut p-arvot.

Taulukko 5: Pinnoituksen vaikutus nesteen määrään - yhteenveto.

Kappale	Neste	Keskiarvon muutos	Mediaanin muutos	p-arvo
Terästanko	Vesi	31 %	7 %	0,306
Terästanko	Öljy	-2 %	-4 %	0,264
Lasilevy	Vesi	-71 %	-62 %	0,002
Lasilevy	Öljy	-3 %	-3 %	0,119
Endoskoopin kärki	Vesi	-14 %	-7 %	0,169
Endoskoopin kärki	Öljy	-13 %	-9 %	0,148

Jäännösnesteen määrän mittaustuloksista voidaan todeta pinnoitteen vaikuttavan hylki-vyyttä lisäävällä tavalla kaikilla muilla koekappaleiden ja nesteiden yhdistelmillä paitsi vedellä teräksen pinnalla. Keskiarvojen ja mediaanien erot eivät olleet suuria terästangoilla ja lasilevyillä öljyyn kastettuna, mutta ottaen kaikki tulokset huomioon, ne olivat oikeasuuntaisia. Tilastollinen merkitsevyys saavutettiin vain lasilevyillä veteen kastettuna, mutta lasilevyjen ja endoskoopin kärkien tulokset öljyyn kastettuina voidaan ottaa huomioon tilastollisesti suuntaa antavina.

7.3 Jäännösnesteen vaikutus endoskoopin kuvanlaatuun

Tässä kappaleessa esitetään öljyisen endoskoopin kuvanlaatua pinnoitettuna sekä pinnoittamattomana tutkineen kokeen tuloksena saadut kuvat. Ne on järjestetty kollaasin muotoon helpon vertailtavuuden sekä tehokkaan tilankäytön mahdollistamiseksi. Kuvia otettiin sekä pinnoitetulla että pinnoittamattomalla laitteella yhdentoista kuvaustilanteen verran (yhteensä 22 kuvaustilannetta), joista jokainen yksittäinen kuvaustilanne käsitti kolmen kuvan ottamisen. Kuvat on asetettu juoksevan numeroinnin mukaiseen järjestykseen siten, että vasemmassa yläkulmassa on ensimmäisessä tilanteessa otettu kuva, sen oikealla puolella toisessa tilanteessa otettu kuva ja niin edelleen.

Ennen tuloksien esittämistä on vertailun vuoksi syytä todeta lähtötilanteet puhtaalla endoskoopilla. Kuvassa 17 on pinnoittamattomalla ja puhtaalla laitteella otettu kuva ruuvista. Kuvassa 18 on sama ruuvi kuvattuna pinnoitetulla ja puhtaalla laitteella. Vaikka ympäristön valaistusolosuhteissa oli jonkin verran vaihtelua kuvauskertojen välillä, ovat eri kerroilla otetut kuvat lähes identtisiä. Pinnoitetulla laitteella otettu kuva 18 on aavistuksen verran kirkkaampi. Värisävyt ovat molemmissa kuvissa samat. Kummassakin kuvassa ruuvin kierteet näkyvät terävinä ja kierteettömän osan pinnan tekstuuriin voi erottaa.



Kuva 17: Pinnoittamattomalla, puhtaalla endoskoopilla otettu kuva.

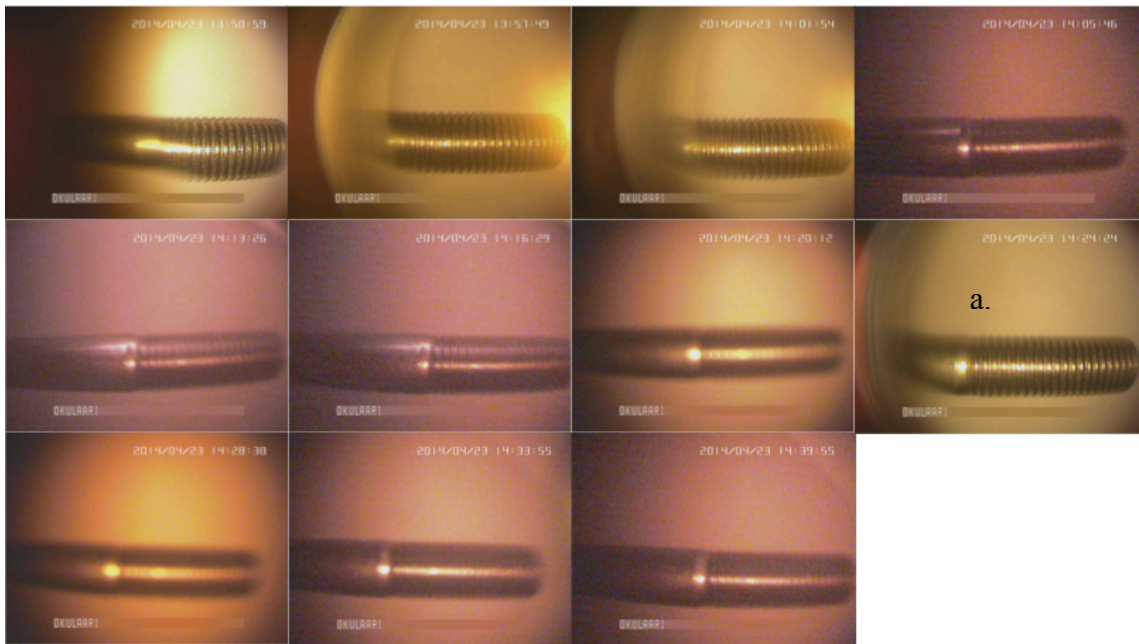


Kuva 18: Pinnoitetulla, puhtaalla endoskoopilla otettu kuva.

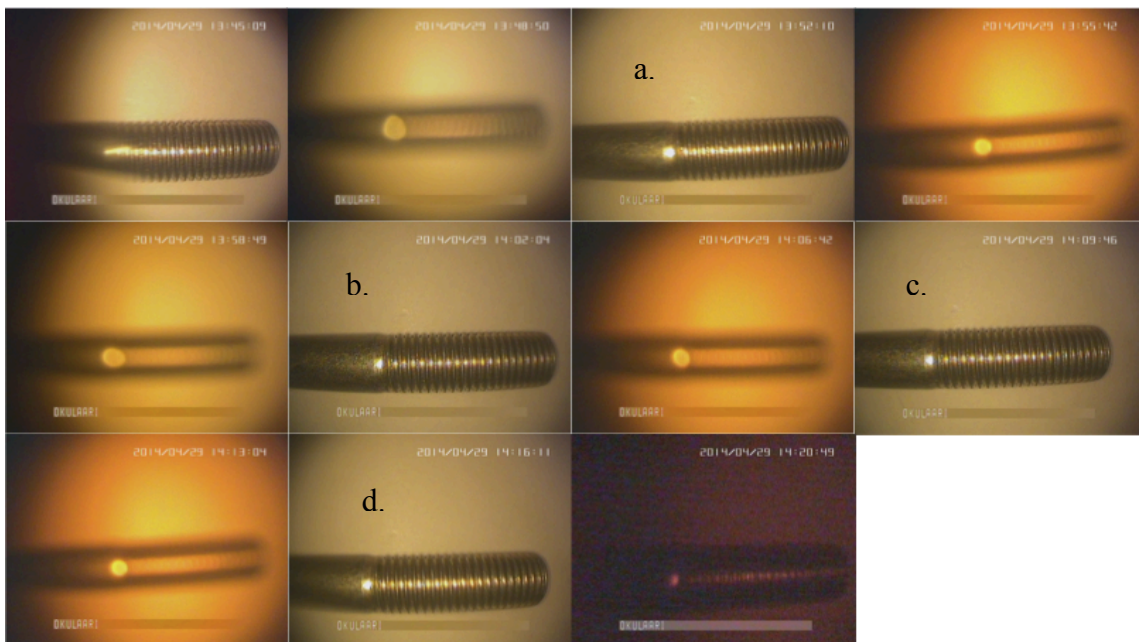
7.3.1 Öljyisellä laitteella otetut kuvat

Öljyastiasta mahdollisimman rauhallisin liikkein nostetulla, pinnoittamattomalla endoskoopilla otetuista kuvista luotu kollaasi on esitetty kuvana 19. Kollaasin kuvista on nähtävissä, että niissä kaikissa öljy on aiheuttanut joko kuvan värisävyjen vääristymistä, ympyrämäisen kehyksen muodostumista kuvan ympärille, kuvan sumentumista tai kaikkia näitä yhdessä. Ainoastaan yksi kuvista (kuva a) lähenee siedettävää laatutasoa, mutta sitäkin vääristää öljyn aiheuttama ympyrä kuvan vasemmassa laidassa sekä kuvan sumentuminen. Sitä ei siis voitaisi hyväksyä todellisessa tähystyksessä.

Pinnoitetulla ja öljyisellä laitteella otettujen kuvien kollaasista kuvassa 20 on puolestaan nähtävissä, että kaksi kuvaa (kuvat b ja c) on täysin verrattavissa puhtaalla laitteella otettuihin kuviin. Toiset kaksi kuvaa (kuvat a ja d) pääsivät laadussaan lähelle, mutta niiden vasemmissa reunoissa on havaittavissa hieman öljyn tuottamaa ympyräreunusta ja hienoista kuvan sumenemista. Kuva a on näistä kahdesta sumeampi, kuva d vain lievästi sumea. Molempia sumeammista kuvista olisi voinut siitä huolimatta todennäköisesti käyttää oikean tähystystoiminnan tulosten esittämisessä. Kollaasin 20 kuvista käyttöön voitaisiin hyväksyä siis neljä kuvaa yhdestätoista.



Kuva 19: Pinnoittamattomalla endoskoopilla otettu 11 kuvan kuvakollaasi käytettyyn öljyyn kastamisen jälkeen.



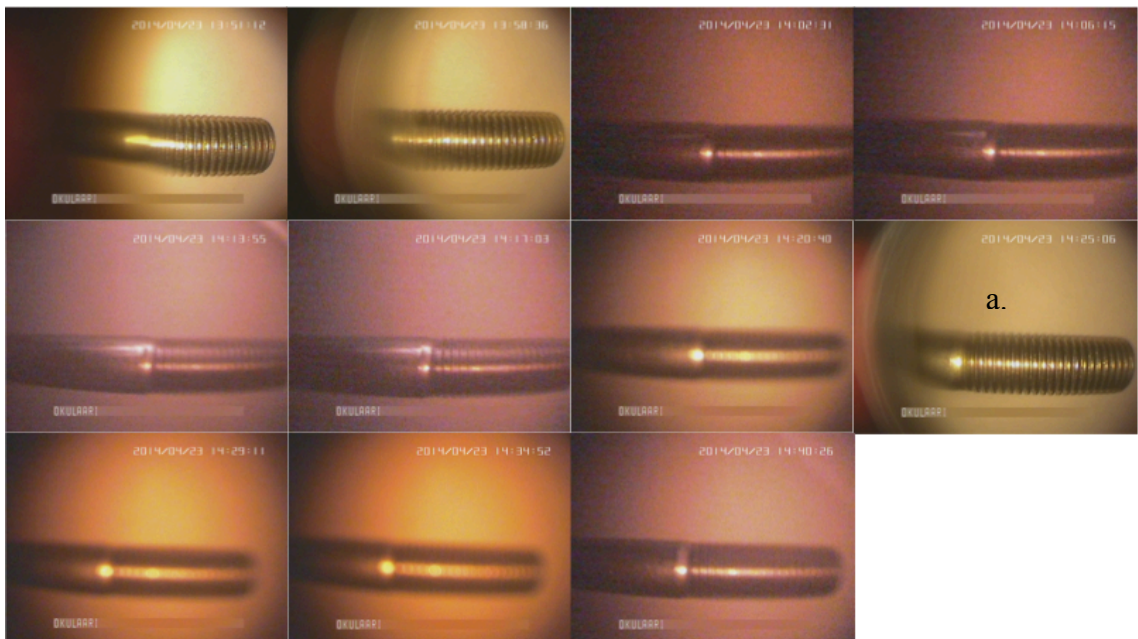
Kuva 20: Pinnoitetulla endoskoopilla otettu 11 kuvan kuvakollaasi käytettyyn öljyyn kastamisen jälkeen.

7.3.2 Kärjen ravistamisen vaikutus öljyisen endoskoopin kuvanlaatuun

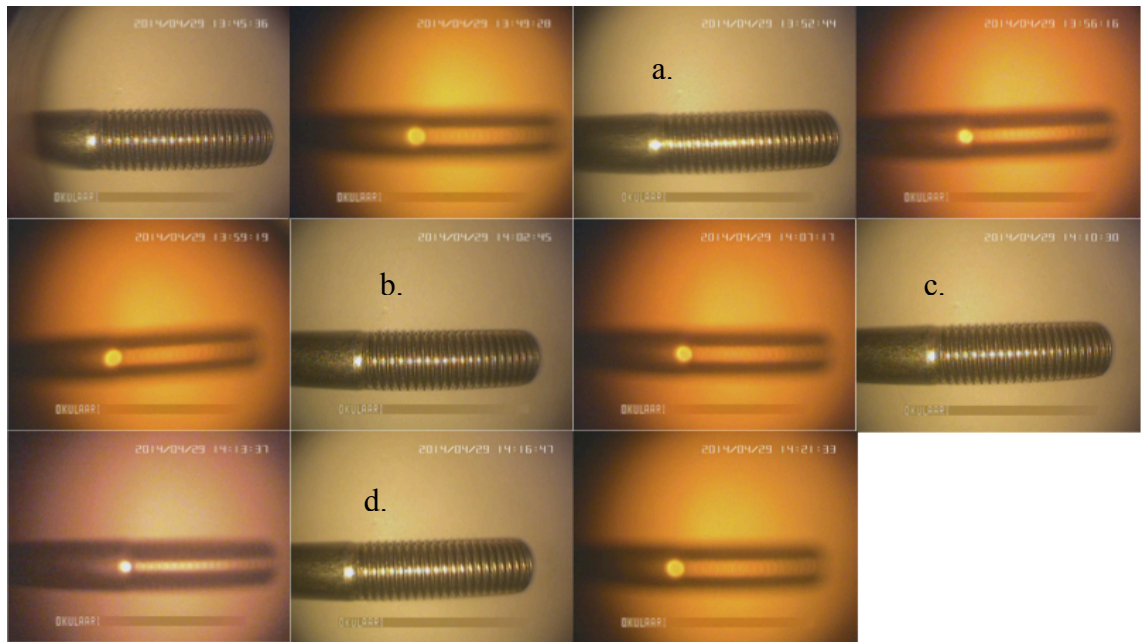
Kuvina 21 ja 22 esitettävissä kollaaseissa endoskoopin kärkeä on ravistettu kuvina 19 ja 20 esitettyjen kollaasien kuvanottojen jälkeen. Kuvakollaasin 21 kuva a on siis ensimmäinen kuva, joka kyseisellä laitteella on otettu kollaasin 19 kuvan a oton jälkeen ja niin edelleen.

Verrattaessa pinnoittamattomalla laitteella öljyisenä otettujen kuvakollaasin 19 kuvia pinnoittamattomalla ja ravistetulla laitteella otetun kuvakollaasin 21 kuviin, ei niiden välillä ole havaittavissa ravistamisesta aiheutunutta merkittävää eroa. Vasemmasta yläkulmasta lukien kolmannen kuvan värisävy on ravistettaessa muuttunut kokonaan, joten siitä on havaittavissa öljyn uudelleenaseoituminen endoskoopin kärjessä. Muissa kuvissa silminnähtäviä eroja ei ole.

Pinnoitetun laitteen ravistamisen myötä ei ole havaittavissa kuvanlaatuun paranemista ravistamattomana otettuihin kuviin verrattuna. Kuvien 20 ja 22 perusteella kuvan a sumeus on hieman lisääntynyt ravistamisen seurauksena, mutta hyväksyttävän laatuun kuviin ravistaminen ei ole vaikuttanut. Joissakin kuvissa on havaittavissa värisävyjen muutoksia, kuten pinnoittamattomankin endoskoopin tapauksessa.



Kuva 21: Pinnoittamattomalla endoskoopilla otettu 11 kuvan kuvakollaasi käytettyyn öljyyn kastamisen ja laitteen kärjen ravistamisen jälkeen.



Kuva 22: Pinnoitetulla endoskoopilla otettu 11 kuvan kuvakollaasi käytettyyn öljyyn kastamisen ja laitteen kärjen ravistamisen jälkeen.

7.3.3 Yhteenveto nesteiden vaikutuksesta endoskoopin kuvanlaatuun

Tämän kokeen pohjalta on pääteltävissä, että pinnoitus vähentää endoskoopin kärkeen tarttuneen öljyn määrää satunnaisesti, mutta merkittävästi. Itse asiassa hyvin vastaavantilaisia tuloksia saavutettiin samanlaisen koeasetelman myötä, joka suoritettiin tässä työssä esiteltyä testiä edeltäneenä päivänä. Edeltäneen päivän testien tuloksia ei ole kuitenkaan mahdollista esittää, sillä ne olivat kadonneet endoskoopin muistikortissa ilmeneen ongelman myötä. Tästä syystä koe jouduttiin uusimaan. Oletus öljyn tarttumisen satunnaisesta luonteesta ilmenee hyvin kollaaseina esitetyjä kuvia tutkittaessa, sillä puhtaan oloiset kuvat esiintyvät pinnoitetulla laitteella otetuissa kuvissa joka toisena. Ravistamisella ei havaittu saavutettavan minkäänlaista hyötyä öljyisen endoskoopin kuvanlaadun parantamisessa edes pinnoitetulla laitteella.

Joissakin kuvissa oli havaittavissa öljystä aiheutuva rengasmainen, tumma ja sumea alue kuvan ulkoreunalla. Tämä ilmiö liittyy mitä todennäköisimmin kuvanlaadun tarkastelussa käytetyn endoskoopin kärjen muotoiluun. Testissä käytetyn endoskoopin kärki oli muodoltaan kuoppamainen, ja linssi sijaitsi sen pohjalla. Nestepisaran asettuessa ”kuopan” nurkkaan, se on kosketuksissa kiinteään pintaan kahdelta kyljeltään. Täl-

löin kiinteän pinnan nesteeseen koskettava pinta-ala ja sitä myöten myös pinnan adheesio ovat huomattavasti suurempia kuin tapauksessa, jossa pisara sijaitsee tasomaisen pinnan päällä. Testissä käytetyn endoskoopin kärjen muotoa esittää kuva 23.



Kuva 23: Testissä käytetyn endoskoopin kärjen muoto.

Okulaarin edustajat päättelivät testituloksissa esiintyvien punertavien kuvien aiheutuneen siitä, että endoskoopin valonlähde oli öljyn peitossa kuvanottohetkellä. Vastaavasti kellertävistä kuvista oli pääteltävissä linssin olleen öljyn peitossa. Kun kuva oli samanaikaisesti sumea ja punainen, sekä linssi että valonlähde olivat öljyn peitossa.

8 PINNOITTAMISELLE VAIHTOEHTOISIA MENETELMIÄ

Opinnäytetyön aikana pyrittiin ideoimaan myös muita mahdollisia ratkaisuja likaantumisongelmaan. Painotus oli nimenomaan ratkaisuissa, joita pystyttäisiin hyödyntämään jo olemassaolevien laitteiden kanssa. Uusiin laitteisiin sisäänrakennettavat ratkaisut olisivat tietysti kestävämpiä, sillä ne voitaisiin rakentaa laitteen kuorien sisälle. Sisäänrakennettavat ratkaisut ovat kuitenkin riippuvaisia laitevalmistajan tuotekehityspanoksesta, joten nähtäväksi jäävät laitekannan kehitysaskleet tulevina vuosina.

On tiedossa, että IT Conceptsin kilpailijan Olympuksen joissakin teollisuusendoskoopeissa on sisäänrakennettuna linssiä kohti suunnattu paineilmasuutin, jonka avulla linssi pysyy puhtaana käytön aikana. Paineilmaan perustuva ratkaisu jälkiasennuksena toteutettuna tuntui kuitenkin hankalalta jo ajatuksenkin tasolla. Ratkaisun vaatimien paineilmanavien kiinnittäminen jo olemassaolevan laitteen pintaan tekisi siitä hankalan käyttää ja alttiin vaurioille.

Varteenotettavana jatkokehitysideana harkittiin neulamaisten osien kiinnittämistä aivan laitteen kärkeen. Piikit voisivat mahdollistaa nesteen poiskulkeutumisen niitä pitkin ja helpottaa pisaran irtoamista piikkien pienen pinta-alan ansiosta. Piikkien tulisi olla taipuisasta materiaalista valmistettuja, jotta ne eivät vaikeuttaisi endoskoopin viemistä tähytyskohteeseen. Ongelmaksi voisi kuitenkin muodostua piikkien kiinnipysyvyys laitteen pinnassa.

Lääketieteessä käytetyissä endoskoopeissa esiintyy samankaltainen likaantumisongelma kuin teollisuusendoskoopeissa, ja sillä saralla ongelmaa on yritetty ratkaista esimerkiksi ihmiskudokseen tähytyskohteen lähelle kiinnitettävän esineen avulla, johon likaantunut laitteen kärkeä voi pyyhkiä tähytyksen aikana. (Virtual Ports Ltd. 2012). Lääketieteen saralla likaantumisen ratkaisemiseksi kehitetyt, käytössä olevat menetelmät eivät kuitenkaan todennäköisesti olisi helposti siirrettävissä teollisuusendoskopian piiriin. Ne kaikki ovat tarkoitettu jäykille tähytyslaitteille, jotka vastaavat ulkomuodoiltaan lähinnä boreskoopeja teollisuusendoskopian saralla. Teollisuusendoskopiassa tähytyslaitteet ovat yleisesti taipuisia videoendoskoopeja tai fiberoskoopeja, joskin boreskoopeille on tietyt, vakiintuneet käyttökohteensa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön puitteissa testattiin nanopinnoitteen vaikutuksia endoskoopin likaantumiseen kahdella eri laboratoriokokeella, perehdyttiin pinnoitteiden toimintaan ja niiden kehityksen nykytilaan kirjallisuuslähteiden kautta sekä toteutettiin kaksi eri alan asiantuntijoiden haastattelua. Osana työtä tehtiin myös katsaus endoskopiaan ja selvitettiin muita mahdollisia keinoja likaantumisongelman ratkaisuun. Vaikka laboratoriokokeet olivat hyvin yksinkertaisia ja suoraviivaisia, saatiin niiden perusteella luotua käsitys yhden pinnoitetyypin toimivuudesta sovelluskohteessa. Mielenkiintoista olisi ollut tutkia pinnoitteiden vaikutusta myös kiinteämmän lian, kuten rasvan ja pienten partikkelien hylkimisessä. Tähän ei opinnäytetyön puitteissa ollut kuitenkaan aikaa.

Laboratoriokokeista ja kirjallisuuslähteistä saatujen tulosten pohjalta näyttäisi siltä, että hydrofobinen pinnoite parantaa teollisuusendoskoopin veden ja öljyn hylkivyyttä jonkin verran. Täydellistä suojaa pinnoitteella ei saavuteta, mutta sen ansiosta todennäköisyys tähystyksen keskeyttämiseen linssin likaantumisen johdosta pienenee. Käytännön sovelluskohteista saatava, kokemusperäinen tieto pinnoitteiden vaikutuksesta linssin likaantumiseen puuttui kuitenkin vielä opinnäytetyön kirjoitushetkellä.

Kestävämät ja useiden erilaisten nesteiden kanssa luotettavasti toimivat nanopinnoitteet ovat tätä työtä kirjoitettaessa vielä tutkimuksen alla. Niistä on saatu kirjallisuuslähteiden valossa lupaavia tuloksia. Kestänee kuitenkin vuosia, että kyseisiä ratkaisuja voidaan hyödyntää kaupallisissa sovelluksissa ja laajemmassa mittakaavassa. Myös erilaiset pinnoitusmenetelmät ovat tutkimuksen kohteena ja niissäkin tapahtunee kehitystä tulevaisuudessa. Mainituista syistä johtuen on perusteltua arvioida, että nanopinnoitteilla voidaan saavuttaa tulevaisuudessa vieläkin parempia tuloksia tässä työssä esitettyjen ongelmien ratkaisuun.

Teollisuusendoskooppien valmistajat eivät nykytilanteessa tietävästi käytä linssin likaantumisen ehkäisyssä muita ratkaisuja kuin paineilmaa. Laittevalmistajat voisivat aivan hyvin hyödyntää nanomateriaaleja jo laitteiden valmistusvaiheessa, jolloin pinnoittaminen olisi helpointa ja tehokkainta. Hydrofobiset pinnoitteet yhdessä vähemmän kulmikkaan kärjen muotoilun kanssa voisivat ehkäistä ongelmien syntyä tehokkaasti, eikä monimutkaisemmille ratkaisuille olisi tarvetta. Kestävien superhydrofobisten pintojen kehittyminen aikanaan tehostaisi tätä vaikutusta entisestään.

LÄHTEET

- Beneq. Atomic Layer Deposition. n.d. Luettu 26.10.2014. <http://www.beneq.com/atomic-layer-deposition.html>
- Boussey Control. Anti static and surface tension. 2010. Luettu 6.4.2014. <http://www.boussey-control.com/en/surface-tension/measure-methods.htm>
- Buglear, J. 2013. Practical Statistics. Iso Britannia: Kogan Page Ltd.
- Cao, G. 2004. Nanostructures and Nanomaterials. Yhdysvallat: Imperial College Press.
- Cosgrove, T. 2010. Colloid Science: Principles, Methods and Applications. 2. painos. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Daoud, W. 2013. Self-Cleaning Materials and Surfaces: A Nanotechnology Approach. New Jersey: Wiley.
- Ebnesajjad, S. 2006. Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding. New York: William Andrew Publishing.
- Erbil, H. 2006. Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces. Oxford: Blackwell Publishing.
- Finnish Nanobusiness. n.d. Luettu 10.8.2014. <http://www.nanobusiness.fi>
- Han, J. 2014. Innovations in Food Packaging. 2. painos. Texas: Elsevier.
- Heikkilä, T. 2008. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Edita.
- Holopainen, M. & ja Pulkkinen, P. 2008. Tilastolliset Menetelmät. 5. – 7. Painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.
- IT Concepts GmbH. n.d. Luettu 20.4.2014. <http://www.itcworld.com/en/>
- Järvinen, P. 2004. Tutkimustyön metodeista. Tampere: Opinpajan Kirja.
- Kolari, Mika. Teknologiapäällikkö. Haastattelut tapaamisissa, sähköpostitse ja puhelimitse, kevät 2014. Haastattelija Aki Murrola.
- Laffont, T. Advances in Remote Visual Inspection. 2011. Aircraft Maintenance Technology 22 (3), 14 – 17.
- Nanoklusteri. 2010. Selvitys tulevaisuuden materiaaleista ja teknologioista koneenrakentajille. Espoo. http://www.nanobusiness.fi/uploads/tulevaisuuden_teknologiat_koneenrakentajille.pdf
- Nosonovsky, M. & Bormashenko, E. 2009. Lotus Effect: Superhydrophobicity and Self-Cleaning. Teoksessa: Favret, Eduardo A. & Fuentes, Nestor O. Functional Properties of Bio-Inspired Surfaces: Characterization and Technological Applications. Singapore: World Scientific Publishing Co.

Oerlikon Balzers. What is PVD coating and how does PVD coating work? n.d. Luettu 26.10.2014. <http://www.oerlikon.com/balzers/en/know-how/coating-technologies/pvd-process/>

Okulaari Oy. n.d. Luettu 16.7.2014. <http://www.okulaari.fi/>

Pitkäranta, A. Laadullisen tutkimuksen työkirja. 2010. https://www.samk.fi/download/13153_Laadullisen_tutkimuksen_tyokirja_APitkaranta.pdf.

Prakash, R. 2012. Non-Destructive Testing Techniques. Kent: New Academic Science.

Raman, A. 2007. Materials Selection and Applications in Mechanical Engineering. New York: Industrial Press.

Ramsden, J. 2009. Applied Nanotechnology: The Conversion of Research Results to Products. Elsevier Inc.

Ritschkoff, A.-C., ym. 2005. Rakennustuotteiden funktionaaliset pinnat. Espoo: VTT.

Rizvi, S. 2009. Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection and Design. ASTM International.

Sellers, M., ym. 2009. Nanotechnology and the Environment. CRC Press.

SFS, Suomen Standardisoimisliitto. 2012. Nanoteknologiat. Sanasto. Osa 1: Ydintermit. Haettu 18.10.2014. www.sfs.fi

Shukla, R. 2006. Practical Physics. Delhi: New Age International.

Suominen, J. 2014. Teollisuusendoskopian käyttö Pirkanmaalla. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Taanila, A. Tilastollinen päättely. 14.4.2012. Haettu 13.10.2014. <http://myy.haaga-helia.fi/~taaak/p/paattely.pdf>

Talvitie, J. 2013. Teollisuusendoskopian palveluliiketoiminnan kehittäminen. YAMK Yrittäjyyden ja liiketoimintaosaamisen koulutusohjelma. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Talvitie, V. Asiantuntija. Haastattelu 6.3.2014. Kysymyksiä Okulaarista, endoskopiasta sekä likaantumisongelmasta ja sen ratkaisuista. Haastattelija: Aki Murrola.

Theodore, L. 2006. Nanotechnology: basic calculations for engineers and scientists. New Jersey: Wiley-Interscience.

Törmäkangas, T. 2010. n.d. Luettu 2014. Tutkimusaineiston analyysi: tilastollis-empiirinen tutkimus. <http://users.jyu.fi/~tatima/TER/Varsin/lm10.pdf>

Verho, T., C. Bower, P. Andrew, S. Franssila, O. Ilkkala, ja Ras. R. 2011. Mechanically Durable Superhydrophobic Surfaces. *Advanced Materials*. 23 (5), 673 – 678. Wiley-VCH.

Virtual Ports Ltd. EndoClear Endocavity Laparoscope Cleaning Station. 2012. Luettu 10.11.2014. <http://www.virtual-ports.com/endoclear.asp>

Woodrow Wilson Institute. Consumer Products Inventory. n.d. Luettu 12.8.2014. <http://www.nanotechproject.org/cpi/>

Wuolio, T. 2013. Teollisuusendoskopia tunkeutuu uusille aloille. Promaint-lehti. (7).