

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Petri Asikainen

OHUTKALVO-OPTIIKAN PINNOITUSMENETELMÄT

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2017



**Karelia**  
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2017  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä  
Petri Asikainen

Nimeke  
Ohutkalvo-optiikan pinnoitusmenetelmät

Toimeksiantaja  
Nanocomp Oy ltd.

#### Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena on ohutkalvo-optiikan pinnoitusmenetelmät. Työ on tehty yhteistyössä Nanocomp Oy:n ja Itä-Suomen yliopiston kanssa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä pinnoituksen paksuuden hallittavuuteen ja sen vakaana pitämiseen. Opinnäytetyö esittelee muutamia yleisiä rullalta rullalle valmistusmenetelmiä, joita voidaan hyödyntää filmin päällystysprosessissa. Opinnäytetyön pääpaino kuitenkin pysyy syväpainopinnoitusprosessissa, sillä tätä menetelmää Nanocomp käyttää.

Opinnäytetyö esittelee myös pinnoitusteollisuudessa käytettyjä syväpainotelan pintakuviointeja, kuviointien valmistusmenetelmiä ja kuviointien mukanaan tuomia etuja. Lisäksi esitellään rainan pintakäsittelymenetelmiä pintaenergian nostamiseksi ja adheesion parantamiseksi. Tämän opinnäytetyön tutkimisosiossa selvitettiin testien avulla myös syväpainotelan rakenteen koon vaikutusta pinnoituksen paksuuteen. Aiheeseen perehtymisen tavoitteena oli luoda pohjaa syväpainotelan pintarakenteen muodon sekä pintarakenteen koon valinnalle, kun valmistusmenetelmänä käytetään rullalta rullalle pinnoitusta.

Tulokset osoittavat, että syväpainotelan kuvioinnin tilavuuden kasvu lisää pinnoituksen paksuutta odotetusti. Nanocompin rullalta rullalle prosessissa pinnoitteen kaulitseminen ja siinä käytetty paine määrää lopullisen paksuuden tuotteessa.

Kieli  
suomi

Sivuja 47

Asiasanat  
syväpainotela, kalvon pinnoitus, R2R



THESIS  
December 2017  
Degree Programme in Mechanical and Production  
Engineering  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+358 13 260 600

Author  
Petri Asikainen

Title  
Coating methods of thin film optics

Commissioned by  
Nanocomp Oy Ltd.

Abstract

The subject of this thesis was coating methods of thin film optics. It was done in collaboration with Nanocomp Oy Ltd. and University of eastern Finland. The objective of this thesis was to explore thickness of coating and find out how to control it and keep it stable. In this thesis, some common methods which are used in Roll to Roll (R2R) processes, which can be utilized in film coating process are introduced. Production in Nanocomp is based on gravure coating and that is the reason why the main focus will be kept in this method.

Additionally most common gravure cell shapes, methods for cell creation and advantages of the different cell shapes are introduced. Furthermore, some substrate treatment methods for increasing surface energy and improving the adhesion are presented. Gravure cell volume effect to coating thickness was researched with tests in the experimental part of the thesis. The Aim of the research and fact collecting was to create basis for the selection of the gravure cell shape and volume when R2R coating is used as a processing method.

As expected, the results prove that increasing the cell volume also increases the thickness of the coating layer. The pressure of rolling nip determined the thickness of the coating in Nanocomp's final product.

Language  
Finnish

Pages 47

Keywords  
gravure, film coating, R2R

## Sisältö

1	Johdanto .....	6
1.1	Nanocomp Oy .....	6
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus .....	6
2	Yleiset rullalta rullalle pinnoitusmenetelmät .....	8
2.1	Ilmakaavin .....	9
2.2	Teräpäällystys .....	10
2.3	Mayer-kaavin .....	11
2.4	Telapäällystys .....	11
2.5	Rakosuulakepäällystys .....	12
2.6	Verhopäällystys .....	13
2.7	Syväpainopäällystys .....	14
2.7.1	Direct gravure .....	14
2.7.2	Offsetmenetelmä .....	15
2.7.3	Sipaisupäällystys .....	16
2.7.4	Reverse gravure .....	16
3	Syväpainotela ja pintakuviointi .....	18
3.1	Mekaaninen kaiverrus .....	18
3.2	Laserkaiverrus .....	21
3.3	Elektroninen kaiverrus .....	22
4	Parametrit .....	24
4.1	Kosketuspinta-ala .....	25
4.2	Syväpainotelan pyörimisnopeus .....	25
4.3	Lakan lämpötila ja viskositeetti .....	26
4.4	Syväpainotelan lämpötila .....	26
4.5	Linjanopeus .....	27
4.6	Raakeli .....	27
5	Rainan pintakäsittely .....	29
5.1	Pintaenergia ja sen mittaus .....	29
5.2	Korona .....	31

5.3	Plasma.....	33
5.4	L liekki .....	34
6	Tutkimus .....	35
7	Tulokset .....	38
8	Pohdinta.....	45
9	Lähteet.....	46

# 1 Johdanto

## 1.1 Nanocomp Oy

Mikro- ja nanofotoniikan edelläkävijä

Nanocomp on maailmanlaajuinen edelläkävijä mikro- ja nanofotoniikan suunnittelussa ja valmistuksessa. Yritys on yksityisomistuksessa oleva teknologian alan yritys, joka on perustettu 1997 ja jolla on kahden vuosikymmenen kokemus maailmanlaajuisesta toiminnasta. Nanocomp keskittyy mikro- ja nanofotoniikan tuotteiden asiakaslähtöiseen valmistukseen elektroniikan, laser, havainto ja erikoisvalaistuksen alueilla. Tuotanto perustuu rullalta rullalle valmistusmenetelmään, joka on kustannus- ja aika tehokkuudeltaan sopivin kalvo-optiikan massatuotantoon. (Nanocomp 2017)

Maailmanlaajuinen lähde kalvo-optiikalle

Vaikka Nanocompilla on päätoimipaikka, tuotekehitys ja tuotanto Suomessa, niin kuitenkin yrityksen liikevaihdosta yli 95% tulee kansainvälisiltä markkinoilta. Nanocomp tarjoaa palvelua asiakkaiden lähelle. Yrityksen toimistot on sijoitettu USA:han, Japaniin ja Hong Kong:iin, joissa kokeneet tuki-insinöörit tarjoavat tukea paikanpäällä. (Nanocomp 2017)

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi rullalta rullalle pinnoitusmenetelmiä ja pinnoitusprosessia. Pinnoitusmenetelmien osalta keskitytään sellaisiin, joilla voidaan saavuttaa riittävän ohut pinnoitepaksuus. Työn tavoitteena on myös tutkia syväpainopinnoitusmenetelmää, jossa syväpainotela pyörii vastakkaiseen

suuntaan pinnoitettavan rainan kulkusuuntaan nähden, sekä säädeltävien parametrien vaikutusta prosessiin. Tämä pinnoitusmenetelmä on englanninkieliseltä nimeltään reverse gravure. Syväpainotelapinnoitukseen kuuluu monenlaisia pinnoitusmenetelmiä. Suomen kielessä ei löydy läheskään kaikille menetelmille omaa nimeä ja usein puhutaan vain syväpainopäälylystyksestä. Tästä johtuen osa näistä menetelmistä on tässä opinnäytetyössä englanninkielisinä, kuten jo edellä mainittu reverse gravure.

Tavoitteena on löytää parametrit, joilla saadaan aikaisiksi mahdollisimman tasainen pinnoite sekä hallita pinnoituksen paksuutta. Tässä opinnäytetyössä keskitytään rullalta rullalle pinnoitusmenetelmiin ja erityisesti reverse gravure syväpainomenetelmään. Periaatekuvat reverse gravure pinnoitusmenetelmistä löytyvät sivulta 17.

Syväpainotelalla ja sen pintakuviointilla on suuri rooli, kun halutaan päästä johonkin tiettyyn pinnoituspaksuuteen. Syväpainotela on tela, johon on työstetty erilaisia pintakuvioita käyttötarkoituksen mukaan ja kuvioiden tehtävänä on siirtää esimerkiksi painomuste tai muu pinnoitusaine, tämän opinnäytetyön tapauksessa lakka, materiaalin pinnalle. Kuviointin muoto, sekä rakenteen syvyys määräävät kuinka paljon pinnoitusainetta siirtyy rainalle. Tarkoituksena onkin löytää tietoa, jota voitaisiin käyttää hyväksi syväpainotelan kuppikoon ja rakenteen muodon valinnassa, jotta päästäisiin haluttuun lopputulokseen pinnoituksen paksuuden suhteen.

Tutkimus suoritetaan valmistamalla kevennetyllä työkalulla kappaleita, joissa lakkapaksuus on sama kuin mitä syväpainotela lakkaa rainalle luovuttaa. Eli lakkakerrosta ei kaulita ollenkaan rainan ja työkalun väliin, jolloin saadaan mitattua, kuinka paksu kerros syväpainotelalta rainalle todellisuudessa siirtyy.

## 2 Yleiset rullalta rullalle pinnoitusmenetelmät

Rullalta rullalle menetelmä, josta käytetään myös nimitystä R2R, soveltuu hyvin tuotteisiin, joiden valmistusmäärät ovat suuria. R2R on lyhenne, joka tulee englanninkielisistä sanoista: Roll to roll. Tämä valmistusmenetelmä on hyvin yleinen painoteollisuudessa. R2R tarjoaa mahdollisuuden valmistaa suuria kappalemääriä saannon pysyessä korkeana. Rullalta rullalle menetelmässä materiaali lähtee valmistusprosessiin rullalle kelattuna, kulkee yhtenäisenä prosessin läpi ja prosessin lopuksi kelautuu rullalle.

Pinnoitettava rullalla oleva materiaali on yleisimmin paperia, muovikalvoa tai metallifoliota. Lisäksi R2R menetelmällä voidaan pinnoittaa lähes kaikkea taipuisaa materiaalia kuten esimerkiksi kangasta ja kuituja. (Energy Department 2015) Syväpainotelapinnoitukseen kuuluu monenlaisia pinnoitusmenetelmiä. Suomenkielessä ei löydy läheskään kaikille menetelmille omaa nimeä ja usein puhutaan vain syväpainopäällystyksestä. Tästä johtuen osa näistä menetelmistä on tässä opinnäytetyössä englanninkielisinä.

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti osa yleisimmistä pinnoitusmenetelmistä, joita voidaan käyttää rullalta rullalle pinnoitusprosessissa. Nanocompin massatuotannon tarpeisiin parhaiten soveltuvaksi on kuitenkin havaittu reverse gravure-pinnoitus, joten tässä työssä keskitytään pääasiassa siihen. Menetelmän nimi kertookin, että kyseessä on syväpainotela, joka pyörii vastakkaiseen suuntaan pinnoitettavaan rainaan nähden.

Nanocomp oli kuitenkin kiinnostunut reverse gravure:n lisäksi myös muista vaihtoehtoisista pinnoitusmenetelmistä, joilla päästään riittävän pieneen pinnoituspaksuuteen, niin esittelen tässä lyhyesti muutamia sellaisia. Esitellyt pinnoitusmenetelmät on valittu taulukosta (Taulukko 1) Nanocompilla käytössä



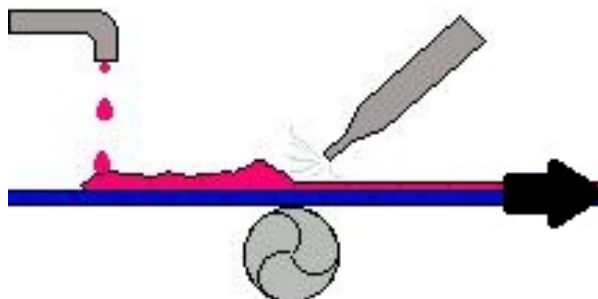
olevan lakan viskositeetin sekä tuotteeseen tavoitellun pinnoituspaksuuden perusteella. Lakan viskositeetti huoneen lämpötilassa on noin 500 cP ja tavoiteltu pinnoitteen paksuus on 8-15 µm.

Method	Viscosity Range (cP)	Line speed (ft/min)	Wet coverage (µm)	Uniformity (%)	Cost Category	Number of layers	Substrate effect
			Premetered				
Curtain, precision	5 - 5 000	200 - 1 000	5 - 500	2	HIGH	1 -- 18	N
Curtain, standard	150 - 2 000	300 - 1 300	25 - 250	5	INTERMEDIATE	1	N
Extrusion	50 000 - 300 000	125 - 1825	13 - 523	5	HIGH	1 -- 5	N
Slide	1 - 500	20 - 1 000	25 - 250	2	HIGH	1 -- 18	N
Slot die	15 - 20 000	20 - 1 700	10 - 250	2	HIGH	1 -- 3	N
Spray	10 - 300	50 - 400	50 - 340	10	LOW	1	S
			Self-Metered				
Comma direct/indirect	1 000 - 300 000	30 - 1 000	20 - ?	10	LOW	1	N
Direct roll hot melt	2 000 - 250 000	20 - 1 220	1 100	5	INTERMEDIATE	1	N
Forward roll	20 - 2 000	100 - 1 500	10 - 200	10	LOW	1	N
Reverse roll	200 - 50 000	20 - 1 700	14 - 450	10	INTERMEDIATE	1	N
Reverse roll hot melt	2 000 - 250 000	20 - 1 220	1 100	5	HIGH	1	N
Reverse roll precision	200 - 50 000	20 - 1 700	14 - 450	2	HIGH	1	N
Dip	40 - 1 500	45 - 600	10 - 150	10	LOW	1	N
Nip roll	100 - 500	100 - 2 000	70 - 170	5	INTERMEDIATE	1	N
			Doctored				
Air-knife metering mode	1 - 500	40 - 400	0.1 - 200	5	LOW	1	L
Air-knife squeegee mode	5 - 500	125 - 2 000	10 -- 50	5	LOW	1	S
Blade/knife	500 - 40 000	350 - 5 000	10 - 750	10	LOW	1	L
Dip & scrape	25 - 500	50 - 600	45 - 250	10	LOW	1	S
Dip & squeeze	10 - 3 000	50 - 1 000	45 - 450	10	LOW	1	S
Floating knife	500 - 1 500	10 - 2 000	50 - 250	10	LOW	1	S
Kiss coater	50 - 1 000	100 - 1 100	5 - 75	10	LOW	1	N
Knife over blanket	500 - 10 000	10 - 200	50 - 250	10	LOW	1	N
Knife over roll	100 - 50 000	8 - 400	26 - 750	10	LOW	1	N
Mayer rod	50 - 1 000	10 - 1 000	4 - 80	10	LOW	1	N
			Hybrid		LOW	1	N
Gravure direct, chamber doctor blade	10 - 200	25 - 2 300	1 -- 75	2	INTERMEDIATE	1	N
Gravure, direct	1 - 500	25 - 2 300	3 -- 65	2	INTERMEDIATE	1	N
Gravure, offset	50 - 13 000	10 - 1 000	3 - 206	2	INTERMEDIATE	1	N
Meniscus	1 - 50	3 - 170	6 -- 25	10	LOW	1	N
Microgravure™	1 - 4 000	1 - 330	0.8 - 80	2	HIGH	1	N
	RIITTAVA		EPAVARMA		EIKELPAA		

**Taulukko 1.** Pinnoitusmenetelmien raja-arvot. (Guttoff & Cohen 2006, 322)

## 2.1 Ilmakaavin

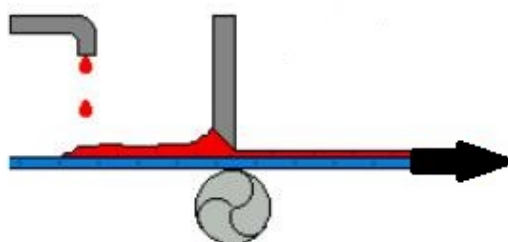
Ilmakaavin on yksinkertainen pinnoitusmenetelmä, jossa pinnoitusainetta lasketaan reilusti pinnoitettavan materiaalin pinnalle ja ylimääräinen pinnoitusaine puhalletaan pois ilmaveitsen eli paineilman avulla. (Kuvio 1) Tätä pinnoitusmenetelmää käytetään yleensä juokseville pinnoitusaineille. Ilmakaavin pinnoitusmenetelmänä koetaan meluisana. (Technical Coating International 2017) Tällä menetelmällä saavutettava pinnoituspaksuus on 0,1-200 µm. (Guttoff & Cohen 2006, 322)



**Kuvio 1.** Ilmakaapimen toiminnan periaate. (Technical Coating International 2017)

## 2.2 Teräpäällystys

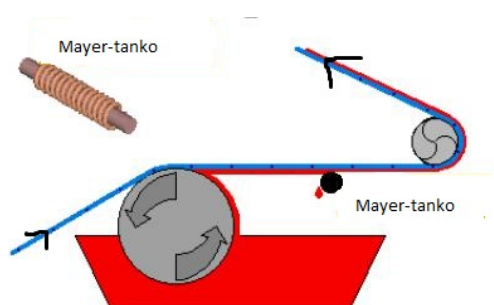
Kuviossa 2 on esillä teräpäällystys, joka on yleinen valmistusmenetelmä R2R-pinnoituksessa ja soveltuu pienille tuotantomäärille. Pinnoituksen paksuus määräytyy materiaalin pinnan, pinnoituspastan viskositeetin ja työstögeometrian mukaan. Työstögeometriassa merkitsevin tekijä on terän kulma. (TiMaTEC 2017) Tällä menetelmällä saavutetaan 10-750 mikrometrin pinnoituspaksuus (Guttoff & Cohen 2006, 322).



**Kuvio 2.** Teräpäällystykseen periaate. (Technical Coating International 2017)

### 2.3 Mayer-kaavin

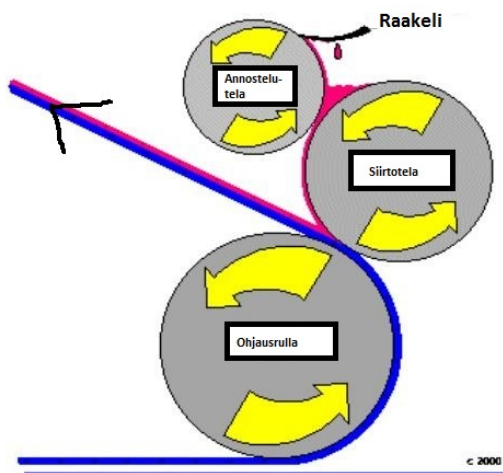
Tässä valmistusmenetelmässä tela nostaa pinnoitusaineen rainan pinnalle ja metallilangalla päällystetty Mayer-tanko poistaa ylimääräisen pinnoitusaineen pinnoitettavan materiaalin pinnalta. (Kuvio 3) Pinnoituksen paksuuden määrittää tangon ympäri kieritetyn metallilangan halkaisija. Pinnoituspaksuuden tarkkuudeltaan tämä menetelmä ei ole parhaimmasta päästä. (Technical Coating International 2017) Tällä menetelmällä voidaan saavuttaa pinnoituspaksuus 4-80  $\mu\text{m}$  (Guttoff & Cohen 2006, 322).



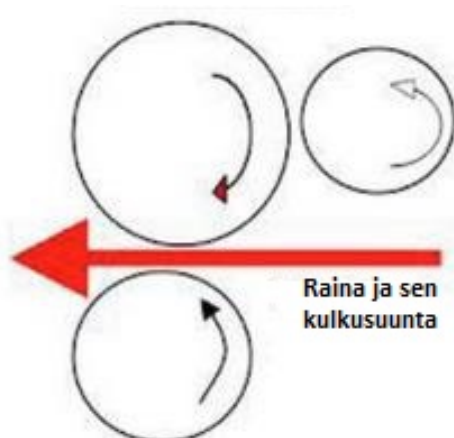
**Kuvio 3.** Mayer-kaapimen toimintaperiaate ja Mayer-tangon rakenne. (Technical Coating International 2017)

### 2.4 Telapäällystys

Pinnoitettavan aineen siirto rainalle tapahtuu kahden telan välityksellä. Ylintä telaa ja sen etäisyyttä pinnoitusainetta siirtävään telaan säätämällä hallitaan pinnoituksen paksuutta. Pinnoitusainetta rainalle siirtävä tela voi pyöriä joko samaan tai vastakkaiseen suuntaan rainan kulkusuuntaan nähden. (TiMaTEC 2017) Telapäällityksellä saavutettu pinnoituksen paksuus on siirtotelan pyöriessä vastakkaiseen suuntaan rainan kulkusuuntaan nähden (Kuvio 4) 14-450  $\mu\text{m}$  ja siirtotelan pyöriessä samaan suuntaan (Kuvio 5) voidaan saavuttaa 10-200  $\mu\text{m}$  paksu pinnoite (Guttoff & Cohen 2006, 322).



**Kuvio 4.** Telapäällystys (Reverse roll), jossa pinnoitusainetta siirtävä tela pyörii vastakkaiseen suuntaan pinnoitettavan materiaalin kulkusuuntaan nähden. (Anthavale 2011)

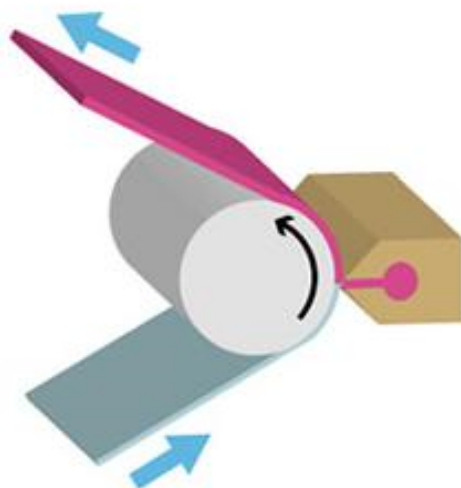


**Kuvio 5.** Telapäällystys (Forward roll), jossa pinnoitusainetta siirtävä tela pyörii samaan suuntaan pinnoitettavan materiaalin kulkusuuntaan nähden. Annosteleva tela pyörii vastakkaiseen suuntaan siirtotelaan nähden. (ResearchGate 2017)

## 2.5 Rakosuulakepäällystys

Rakosuulakepäällystys on kehitetty paremman ja tehokkaamman pinnoitusmenetelmän tarpeisiin. Tällä pinnoitusmenetelmällä voidaan hallita pinnoitusaineen lämpötilaa, tasaista annostelua sekä pinnoitusalueen leveyttä.

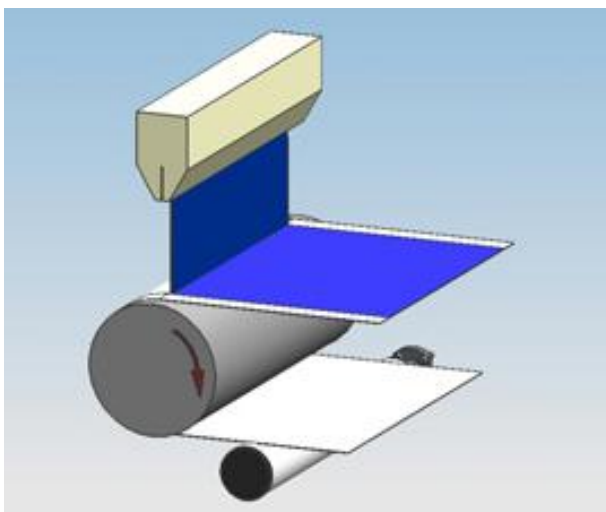
Rakosuulakepäälystyksellä (Kuvio 6) päästään suurin linjanopeuksiin, jopa 500 m/s asti. Tämä pinnoitusmenetelmä mahdollistaa useamman kerroksen pinnoittamisen samanaikaisesti. (Miller 2014) Rakosuulakepäälystyksellä pinnoituksen voi olla 3-100  $\mu\text{m}$  (Gutoff & Cohen 2006, 322).



**Kuvio 6.** (Fuji Kikai Koyo co., LTD. 2017)

## 2.6 Verhopäälystys

Verhopäälystys on perustekniikaltaan rakosuulakepäälystyksen tapainen. Suurimpana erona on se, että verhopäälystys perustuu siihen, että pinnoitus tapahtuu ilman kontaktia. (Kuvio 7) Verhopäälystyksessä kuluvien osien määrä on vähäinen, linjanopeudet voivat olla suuret sekä lisäksi voidaan pinnoittaa useampi kerros samanaikaisesti. Rajoittavina tekijöinä verhopäälystys prosessin käyttöön ovat pinnoitusaineen viskositeetti sekä hitaat linjanopeudet. (Volpot 2012)



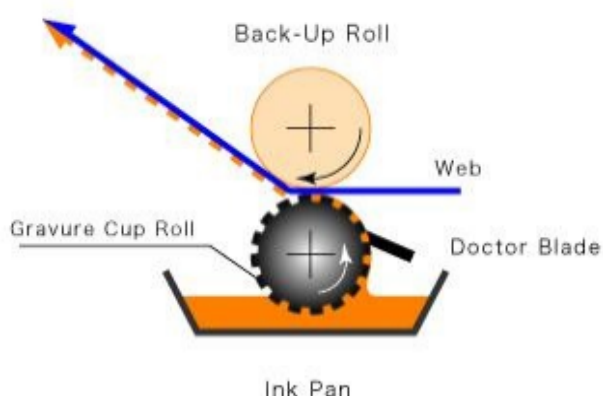
**Kuvio 7.** Verhopäällystys (Kroenert 2017)

## 2.7 Syväpainopäällystys

Syväpainopäällystyksessä pinnoitusaine annostellaan syväpainotelalla. Sivulla 18 on käsitelty syväpainotelan toimintaperiaate tarkemmin. Pinnoitusaine voi annostelun jälkeen siirtyä joko suoraan pinnoitettavalle materiaalille tai siirtyä materiaalille yhden tai useamman telan välityksellä.

### 2.7.1 Direct gravure

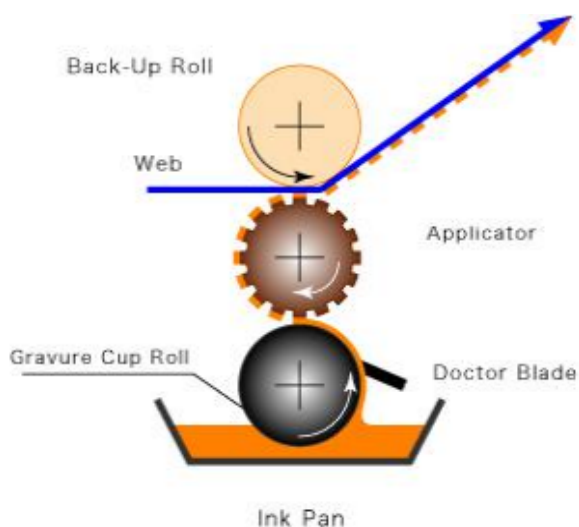
Direct gravure on menetelmä, jossa syväpainotela nostaa pinnoitusaineen kaukalosta, raakeli kaaveroi ylimääräiset pois ja pinnoitusaine kaulitaan rainalle syväpainotelan kuvioinnin mukaisesti. Syväpainotela ja rulla, joka toimii kaulimena, pyörivät samaa nopeutta kuin mitä pinnoitettava materiaali liikkuu eteenpäin. (Kuvio 8)



**Kuvio 8.** Direct gravuren toimintaperiaate. (YURI ROLL MACHINE Co.,Ltd. 2017)

### 2.7.2 Offsetmenetelmä

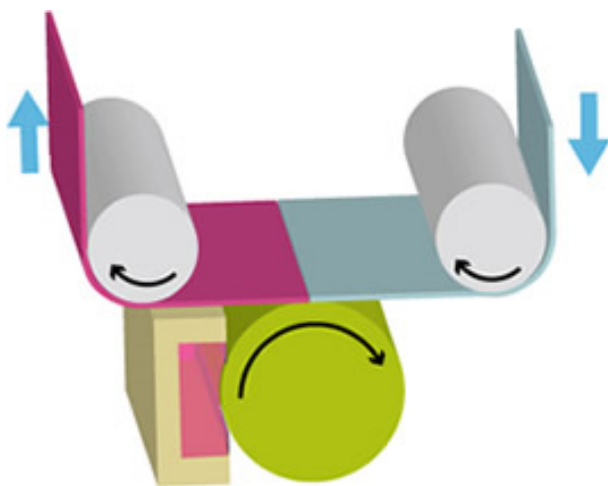
Offsetmenetelmässä syväpainotela nostaa pinnoitusaineen kaukalosta. Ylimääräisen pinnoitusaineen poistamiseen käytetään raakelia. Pinnoitusaine siirtyy syväpainotelalta mahdollisesti kuviodulle siirtotelalle, joka siirtää pinnoitusaineen kuviointinsa mukaisesti rainan pinnalle. (Kuvio 9) (TiMaTEC 2017) Kaikki kolme rullaa synkronoidaan pyörimään samaa nopeutta. Offsetmenetelmällä voidaan saada aikaan pinnoite, joka on paksuudeltaan 3-206  $\mu\text{m}$  (Guttoff & Cohen 2006, 322).



**Kuvio 9.** Periaatekuva offsetmenetelmästä. (YURI ROLL MACHINE Co.,Ltd. 2017)

### 2.7.3 Sipaisupäälylysty

Materiaali on tangentiaalisessa kosketuksessa pinnoittavan rullan kanssa. Soveltuu vain matala-viskositeettisille nesteille. Kuviossa 10 on näkyvissä sipaisupäälylysty, jossa pinnoitusaineella on suljettu kierto. Sipaisupäälylystyksellä saavutettu pinnoituksen paksuus on 5-75  $\mu\text{m}$ .



**Kuvio 10.** Sipaisupäälylystyksen toimintaperiaate. (Fuji Kikai Koyo co., LTD. 2017)

### 2.7.4 Reverse gravure

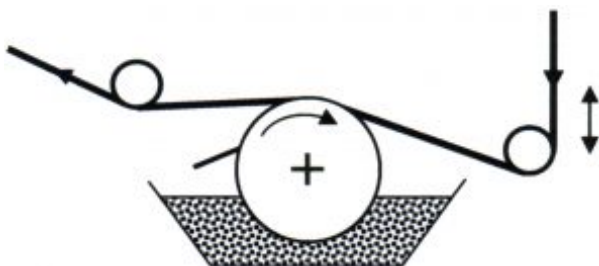
Reverse gravure pinnoituksessa syväpainotela pyörii vastakkaiseen suuntaan rainan kulkusuuntaan nähden. Reverse gravure-pinnoitus voidaan toteuttaa kahdella eri tapaa, joko direct reversenä (Kuvio 11) tai sipaisupäälylystyksenä. (kuvio 12). Molempia tapoja kuitenkin yhdistää se, että pinnoitusaine siirtyy syväpainotelantelan välityksellä rainan pintaan, syväpainotelan pyöriessä vastakkaiseen suuntaan rainan kulkusuuntaan nähden. Sipaisupäälylystyksessä



on kaksi ohjausrullaa, jotka määräävät kuinka suurelta alalta raina on kosketuksissa syväpainotelaa vasten. Direct reversessä kuminen tela painaa rainan syväpainotelaa vasten, jotta raina ja syväpainotela pysyvät kontaktissa toisiinsa.



**Kuvio 11.** Kuviossa on toimintaperiaate direct reversestä, jossa on suljettu kaaverointiyksikkö. (Fuji Kikai Koyo co., LTD. 2017)



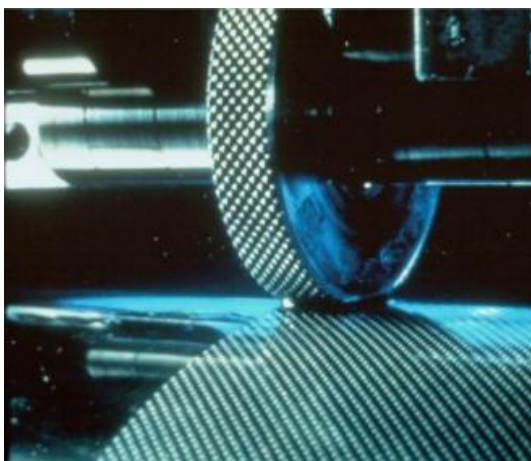
**Kuvio 12.** Sipaisupäällystyksen periaate. (RK Print 2017)

### 3 Syväpainotela ja pintakuviointit

Syväpainotelan kuvioinnin tarkoitus on siirtää pinnoitusainetta haluttu määrä rainan pinnalle. Kuvioinnin koko ja rakenne antavat pohjan siirtyvälle pinnoitusaineen määrälle. Yksinkertaisimmat kuvioinnit, kuten suorakulmaiset pyramidimuodot, ovat edullisempia tehdä, mutta niiden irrotuskyky ei ole yhtä hyvää luokkaa kuin kehitetyimmillä kuvioinneilla. Tämä tarkoittaa sitä, että kun syväpainotelan rakenne täyttyy pinnoitusaineesta, niin siirtotapahtumassa pinnoitusainetta jää suurempi määrä kiinni syväpainotelan rakenteeseen, eli se ei tyhjene yhtä tehokkaasti.

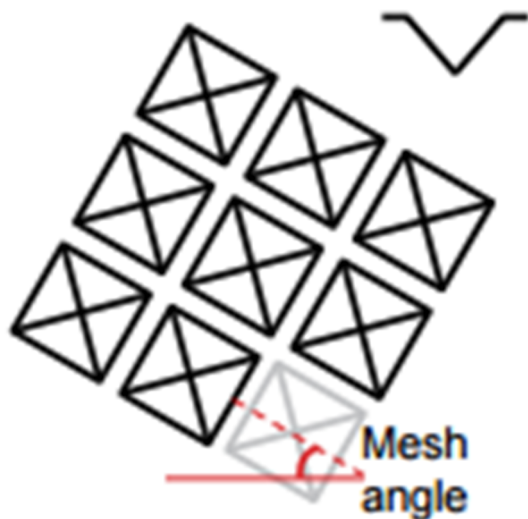
#### 3.1 Mekaaninen kaiverrus

Tässä on esiteltyinä yleisimpiä mekaanisella kaiverruksella valmistettuja syväpainotelan pintakuviointeja. Yleisimmin mekaanisessa kaiverruksessa rakenteen kulmat ovat 45 astetta, mutta kulmaa suurentamalla saadaan pinnoitusaineen siirtymistä syväpainotelalta pinnoitettavalle materiaalille parannettua. Mekaanisessa kaiverruksessa ei poisteta materiaalia, vaan teräsytimen päälle laitettu pehmeä kuparipinnoite muotoillaan uudelleen. (Kuva 1) Kuviointi päällystetään kromipinnoituksella kulutuksen kestävyuden lisäämiseksi. Mekaanisesti kaiverrettu pintakuviointi luovuttaa pinnoitusaineesta pinnoitettavalle materiaalille noin 40-50% omasta tilavuudestaan. (Looser 2014)



**Kuva 1.** Mekaaninen kaiverrus. (Looser 2014)

Kuviossa 13 on esillä perinteisin ja alkuperäinen pintakuviointi, jota on käytetty syväpainoteloissa eli pyramidirakenne. Kuviointi on yksinkertainen ja voidaan valmistaa mekaanisesti kaivertamalla. (Kapur, Hewson, Sleigh, Summers, Thompson & Abbott 2011, 57.) Pyramidin muotoisen rakenteen etuna muihin kuviointeihin verrattuna ovat sen alhaiset valmistuskustannukset.



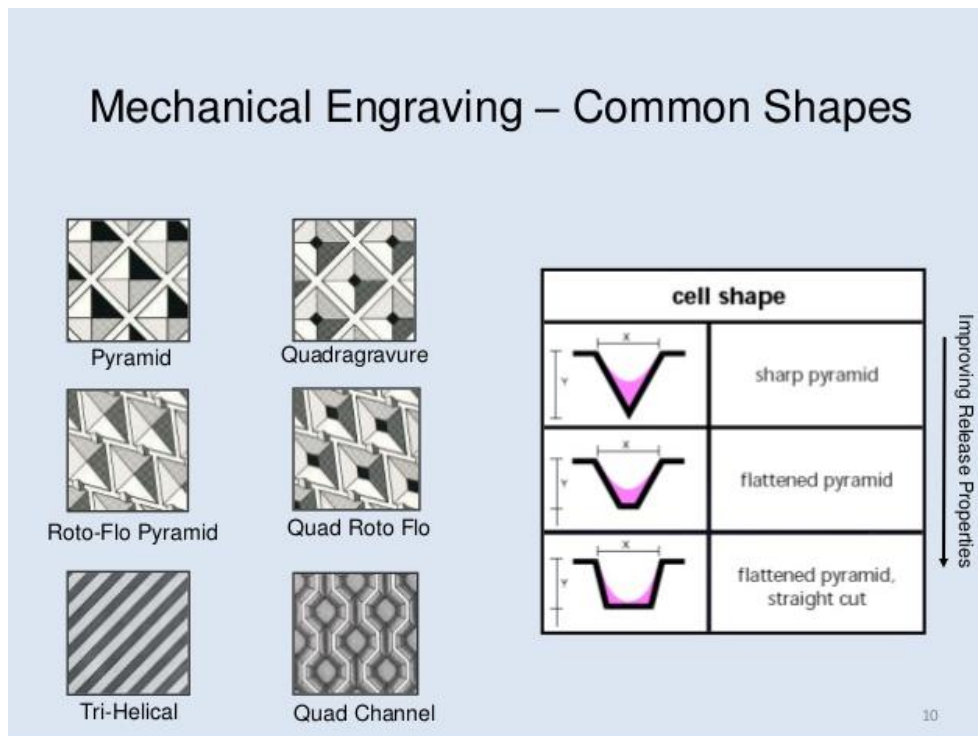
**Kuvio 13.** Syväpainotelan pyramidimuoto. (Kapur ym. 2011, 57.)

Kuviossa 14 on esitelty yleisimmät mekaanisesti kaivertamalla valmistetut pintakuviointit. Näistä yksinkertaisimmat ovat pyramidimuoto ja tasapohjainen pyramidimuoto. Tasaisen pohjan tarkoituksena on parantaa pinnoitusaineen

siirtymistä syväpainotelalta pinnoitettavan materiaalin pinnalle. Näistä molemmista on edelleen kehitetty kuvioinnit, joissa pyramidinrakenne on suunnikkaan muotoinen, pyramidin sivut ovat eri kulmassa rullan keskiakseliin nähden ja solut ovat kanavoitu toisiinsa. Kanavoidut kuvioinnit ovat nähtävillä kuviossa 14 ja tunnistaa Roto Flow nimestä. Tällä ratkaisulla on pyritty sekä lisäämään syväpainotelan luovutuskykyä, että myös vähentämään uurteiden syntymistä pinnoitettavaan tuotteeseen. (Looser 2014) Suunnikkaan muotoinen ja kanavoinnilla yhdistetty pyramidimuoto on suosittu painoteollisuudessa korkean volyymin ja hyvän luovutuskykynsä johdosta. (Kapur ym. 2011, 57.)

Syväpainotelojen pintakuviointissa on myös käytössä kolmion mallinen viistourarakenne, joka on kehitetty korkean viskositeetin omaaville pinnoitusaineille sekä suuren pinnoitusvolyymien vaativiin tuotteisiin. Luovutuskyvyltään tämä on huomattavasti pyramidimuotoa parempi, siirtäen pinnoitusainetta jopa 80 % tilavuudestaan tuotteeseen (New Era Converting Machinery 2017). Nanocompin tuotannossa tämän kuvioinnin on kuitenkin havaittu aiheuttavan sellaista ongelmaa, että pinnoitusainetta kertyy pinnoitettavan materiaalin toiselle reunalle enemmän.

Kennomaisella rakenteella on erinomainen pinnoitusaineen luovutuskyky. Tämän johdosta sen käyttö syväpainopinnoitus- ja laminoititeollisuudessa on yleistä. (Kapur ym. 2011, 57.)

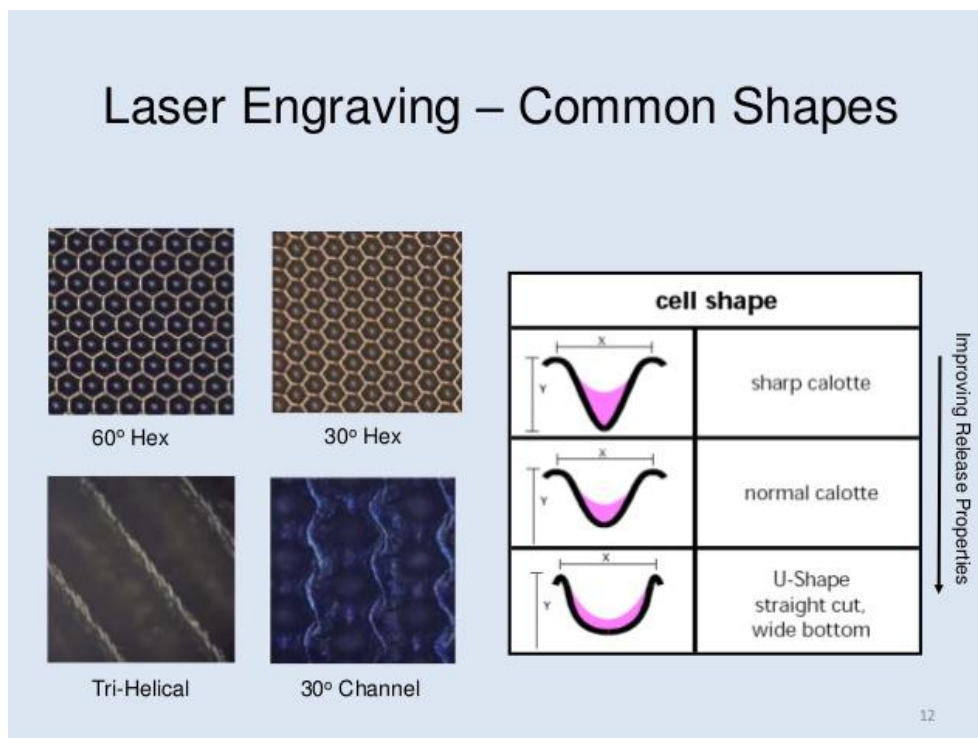


**Kuvio 14.** Yleisimmät mekaanisesti kaiverretut syväpainotelan pintakuviointit. (Looser 2014)

### 3.2 Laserkaiverrus

Kun kuviointi tehdään laserilla, niin telan pinta ensiksi valmistellaan keraamista materiaalia sisältävällä lämpösuihkeella. Sen jälkeen korkeatehoista laseria käytetään halutun pintakuviointin mukaisesti ja laser höyrystää materiaalia pinnalta tarkasti halutuista kohdista. (Looser 2014) Keraami on kovaa ja se tarjoaa erinomaisen kulutuskestävyyden. Mekaaninen kaivertaminen usein yhdistetään pyramidimuotoon sekä kolmion malliseen viistouraan. Kun käytetään laserkaiverrusta, saadaan myös kuusikulmainen muoto mahdolliseksi. Määrällisesti rakenne kuvaillaan keskimääräisen rakenteen tilavuuden ja urituksen tiheyden mukaan tietyllä matkalla. Laserkaiverruksessa kuusikulmisen rakenteen kuviointi on jossain tietyssä kulmassa rullan keskiakseliin nähden. Tämä tunnetaan paremmin verkkona tai kaiverruskulmana, joka tyypillisesti vaihtelee  $30^\circ$  ja  $60^\circ$  välillä. (Kapur ym. 2011, 57.)

Looser on diaesityksessään kuvannut solun muodon vaikutusta syväpainotelan luovutuskykyyn pinnoitusaineen suhteen. (Kuvio 15) Tästä voidaan nähdä, että rakenteen seinämämuodon muuttuessa jyrkemmäksi ja rakenteen pohjan laajemmaksi, pinnoitusaineen luovutuskyky kasvaa. Pintajännitys telassa jää kohtalaiseksi, mutta pinnankarheus laserkaiverruksen jäljiltä on suhteellisen suuri. Pinnoitusaineen luovutuskyky laserkaiverruksen jäljiltä syväpainotelalla on keskimäärin 50-60 % rakenteen tilavuudesta. (Looser 2014)

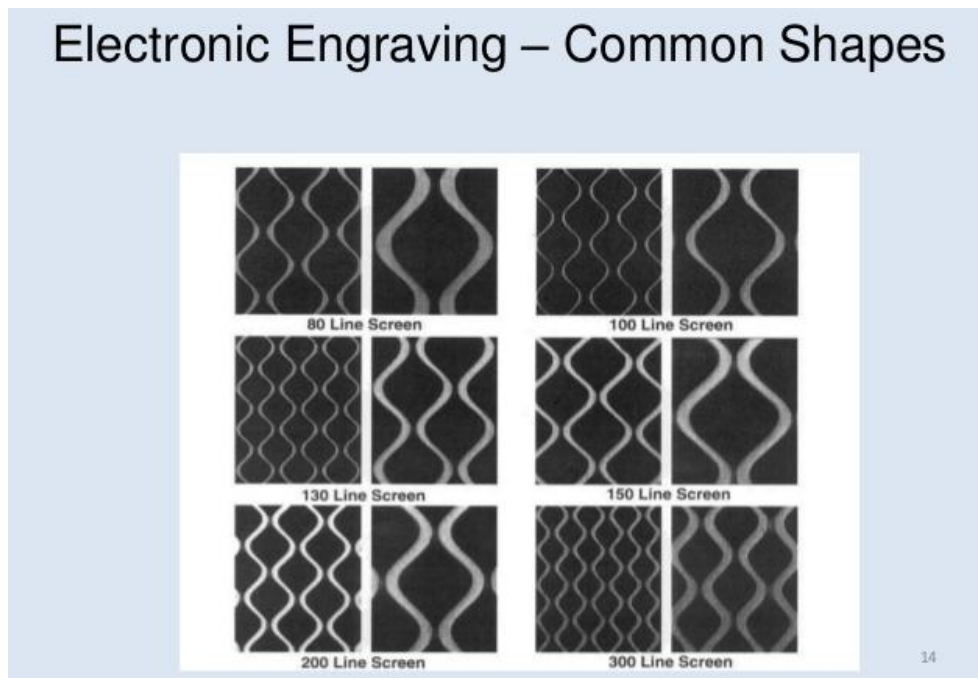


**Kuvio 15.** Laserkaiverruksessa yleisimmin käytetyt muodot ja niiden vaikutus syväpainotelan pinnoitusaineen luovutuskykyyn. (Looser 2014)

### 3.3 Elektroninen kaiverrus

Elektroninen kaiverrus tehdään kuparipinnoitetulle teräsytimelle. Kaiverruksessa käytetään elektronisesti paikoitettua timanttikärkistä kaiverrinta. Materiaali

poistetaan hyvin tarkasti ja siten saadaan muodostettua syväpainotelan pintarakenne. Elektronisesti kaiverretun syväpainotelan pintakuviointi eroaa paljon edellä esitellyistä kuvioinneista (Kuvio 16). Valmiiksi kaiverrettu syväpainotela päällystetään kromipinnoitteella, jotta saadaan telalle kulutuskestävyyttä. Elektronisen kaiverruksen jäljiltä syväpainotelan pintajännitys on alhainen. Keskimääräinen pinnoitusaineen luovutuskyky elektronisesti kaiverretulla rakenteella on hyvä, pinnoitusainetta siirtyy jopa 65-75 % rakenteen tilavuudesta pinnoitettavalle materiaalille. (Looser 2014)



**Kuvio 16.** Elektronisella kaiverruksella yleisimmin valmistettavat syväpainotelan pintarakenteen muodot. (Looser 2014)

Syväpainotelan pintakuviointin määrittäminen on ratkaisevaa, jotta onnistuttaisiin prosessissa, jossa käytetään syväpainotelalla pinnoittamista. Pintakuviointin muoto ja koko määrittävät telan toimivuuden pinnoitusprosessissa. Pintakuviointi voidaan jakaa kahteen selvästi erillään olevaan ryhmään. Kuviointi voi olla spiraalin muodossa syväpainotelan ympäri tietyssä kulmassa kiertävä ura tai kuviointi voi muodostua erillisistä soluista, jotka täyttävät syväpainotelan pinnan.

Kuppimaisen kuvioinnin valmistaminen voidaan jakaa kahteen ryhmään: mekaaniseen kaiverrukseen tai etsaamiseen. Mekaanisessa kaiverruksessa työstetään kuvio telan pintaan. Tämä voidaan tehdä kuparipinnoitetulle telalle käyttämällä timanttikärkistä kaiverrinta tai pyällystyökalua. Telan pinta muodostuu useista pienistä kupeista, jotka ovat jokainen yksitellen työstettyjä. Molemmissa tapauksissa tela viimeistellään kromipinnoituksella, jotta saadaan työkalulle kulutuskestävyyttä.

Syväpainotelan kaivertaminen voidaan myös tehdä kemiallisesti syövyttämällä tai laserilla. Näistä kahdesta laser on yleisemmin käytetty menetelmä

Keskimääräisellä rakenteen tilavuudella tarkoitetaan kuppien tilavuutta jollain tietyllä pinta-alalla. Yleisesti käytetty yksikkö on BCM. 1 BCM on SI-yksikköihin muutettuna yhtä kuin  $1,55 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ . Keskimääräinen rakenteen volyyymi on sama kuin keskimääräinen pinnoitteen paksuus, mikäli neste on levittänyt tasaisesti telan pinnalle. (Kapur ym. 2011, 57.)

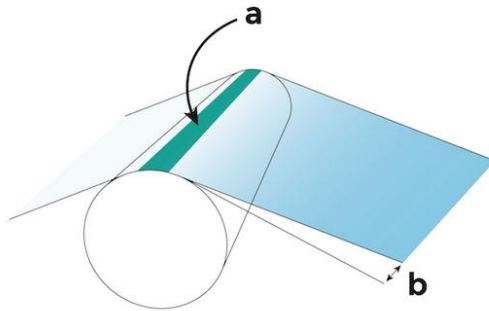
## 4 Parametrit

Reverse gravure pinnoituksessa säädeltävissä olevia parametreja ovat: kosketuspinta-ala, syväpainotelan pyörimisnopeus, lämpötila, syväpainotelan pintakuviointi ja -materiaalit, linjanopeus, rainan kireys, rainan pintakäsittely, lakka ja sen viskositeetti sekä erilaiset kaaverointiterät eli raakelit.



#### 4.1 Kosketuspinta-ala

Kosketuspinta-ala tarkoittaa sitä pinta-alaa, jonka raina on kosketuksissa syväpainotelaan (Kuvio 17). Tämä saadaan laskettua syväpainotelan halkaisijan ja rainan kulman avulla. Kosketuspinta-alaa voidaan hallita säätämällä rainan kulmaa, sekä vaihtamalla halkaisijaltaan erikokoinen syväpainotela. Syväpainotelan halkaisijan ollessa pieni ja rainan kulman ollessa suuri saadaan vakaampi pinnoitusprosessi. (MIRWEC 2017)



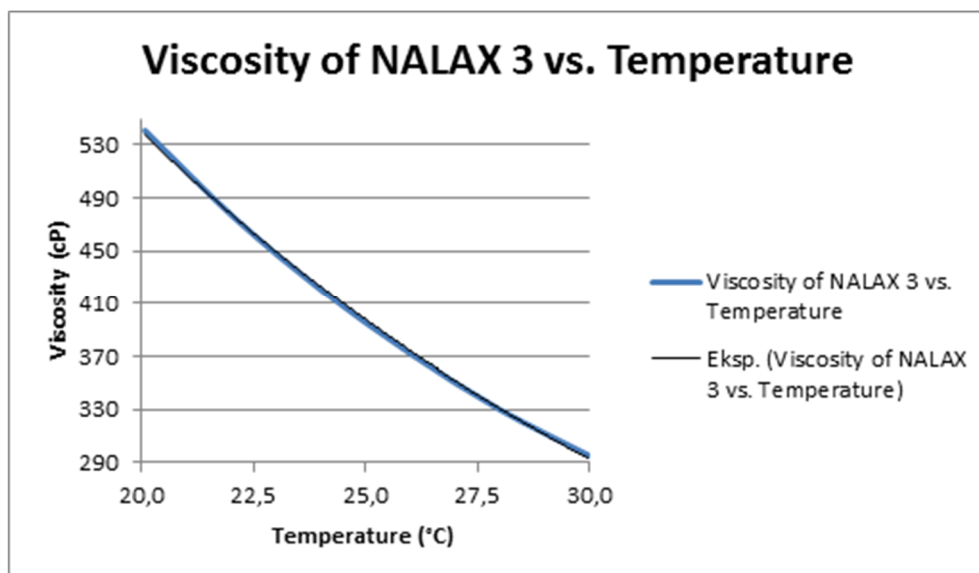
**Kuvio 17.** Kosketuspinta-ala rainan ja syväpainotelan välillä. (MIRWEC 2017)

#### 4.2 Syväpainotelan pyörimisnopeus

Syväpainotelan pyöriessä vastakkaiseen suuntaan rainan kulkusuuntaan nähden saavutetaan se etu, että pinnoitusaine ei siirry rainalle peilautuen syväpainotelan kuvioinnin mukaan. Tämä mahdollistaa myös sen, että pinnoituksen paksuutta voidaan säätää syväpainotelan pyörimisnopeuden avulla. Reverse gravure pinnoituksessa syväpainotelan pyörimisnopeuden tulisi olla 90-120 % linjanopeudesta, jotta pinnoituksesta saataisiin mahdollisimman tasainen. (Looser, John 2014)

### 4.3 Lakan lämpötila ja viskositeetti

Lakan lämpötilalla on vaikutusta sen viskositeettiin, mistä johtuen lämpötila pyritään pitämään mahdollisimman tasaisena, jottei liian matalaksi laskenut viskositeetti ohentaisi pinnoituspaksuutta. Kun lakka kaulitaan nippitelalla rainan ja työkalun väliin, niin sitä enemmän lakkaa ehtii siirtymään pois välistä mitä juoksevampaa lakka on. Kuvaajasta voidaan huomata, että viskositeetti muuttuu huomattavan paljon lämpötilan kohotessa 20°C:sta 30°C:seen. (Kuvio 18)



**Kuvio 18.** Tuotannossa käytetyn lakan viskositeetti suhteessa lämpötilaan

### 4.4 Syväpainotelan lämpötila

Syväpainotelan lämpötilaa olisi mahdollista kontrolloida toteuttamalla vesikierto syväpainotelan sisälle. Tuotannossa lakka ei kuitenkaan lämpene johtuen siitä, että lakka kiertää koko ajan ja huoneen lämpötila pitää sen kurissa. Syväpainotelan lämpötila vaikuttaa pinnoitusaineen viskositeettiin. Käytännössä

kuitenkin pinnoitusaineet on valmistettu niin, että niiden viskositeetti soveltuu juuri huoneen lämpöön.

#### **4.5 Linjanopeus**

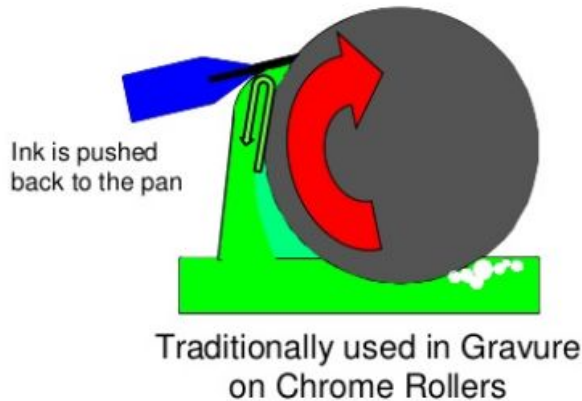
Linjanopeudella on hyvinkin monenlaisia vaikutuksia pinnoitusprosessiin, mutta tässä tapauksessa tarkastellaan vain sen vaikutusta pinnoituksen paksuuteen. Linjanopeuden laskeminen antaa lakalle enemmän aikaa poistua rainan ja työkalun välistä, jolloin pinnoitteen paksuus voi ohentua liiankin paljon.

Käytössä olevalla rullapainokoneella linjanopetta voidaan säädellä välillä 1-30 m/s. Lakka kovetetaan UV-valolla rainan ollessa työkalun kohdalla, jolloin työkalun kuviointi kopioituu peilikuvana rainaan. Linjanopeutta rajoittaa siis myös lakan vaatima kuivumisaika, ja näin ollen linjanopeudet Nanocompin tuotannossa ovat alle 10 m/s.

#### **4.6 Raakeli**

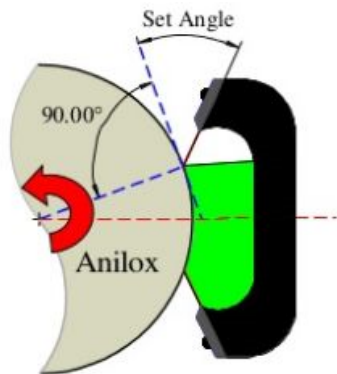
Raakeli on kaaveroinnissa käytettävän terän nimitys. Toiminnallisesti terän tarkoitus on kontrolloida painotyökalulle siirtyvän pinnoitusaineen määrää. Tehtävänä on siis poistaa syväpainotelan pinnalta ylimääräinen lakka vahingoittamatta telan pintaa, jolloin lakkaa jää vain telan kuppeihin tai viistourarakenteeseen. Tällä tavoin kuviointi solujen koko määrittää pinnoituspaksuuden (Looser 2014). Kaaverointi voi tapahtua joko "myötä- tai vastakarvaan". Myötäkarvaan kaaverointi soveltuu hyvin tuotantoon, jossa syväpainotelan halkaisija saattaa vaihdella erilaisten tuotteiden mukaan. Tällöin myös terän kulma ja paikoitus täytyy olla säädeltävissä. Tyypillisesti pinnoituksessa käytetty terän kulma telan tangettiin nähden on 40°-55°. Terän osoittaessa pyörimissuuntaa kohden terä saa paremmin voitellua ja samalla

kuluttaa vähemmän telan pintaa ja itse terää. (Kuvio 19) Pyörimissuuntaan tapahtuva kaaverointi toimii parhaiten matalan viskositeetin omaaville pinnoitusaineille.



**Kuvio 19.** Syväpainotelan pyörimissuunnan mukaisesti tapahtuva kaaverointi. (Donato, Tony 2014)

Keraamisesti pinnoitetut syväpainotelat mahdollistavat kaaveroinnin myös terän osoittaessa pyörimissuuntaa vastaan. Tällöin hyvin usein käytetään myös suljettua kaaverointiyksikköä. (Kuvio 20) Telan pyörimissuuntaa vasten tapahtuva kaaverointi tuottaa tarkemman lopputuloksen kuin pyörimissuuntaisesti toteutettu ylimääräisen pinnoitusaineen poistaminen. Myös tahmeiden pinnoitusaineiden käyttö on mahdollista, mikäli kaaverointiterä on asetettu osoittamaan pyörimissuunnan vastaisesti. (Kuvio 20) Huonoina puolina mainittakoon, että vastakarvaan tapahtuva kaaverointi kuluttaa terää, sekä irrottaa partikkeleita pinnoitusaineen sekaan. Terän kulumisen vaikuttaa myös kaaverointikulmaan, mikä taas johtaa siihen, että teriä on vaihdettava säännöllisin väliajoin. Yleisimmät kaaverointiterän materiaalit ovat hiiliteräkset, työkaluteräkset, ruostumattomat teräkset, pinnoitetut teräkset, muovit ja komposiitit. (Donato, Tony 2014)



**Kuvio 20.** Kuvassa suljettu kaaverointiyksikkö, jossa kaaverointi tapahtuu syväpainotelan pyörimissuuntaa vasten. (Donato, Tony 2014)

## 5 Rainan pintakäsittely

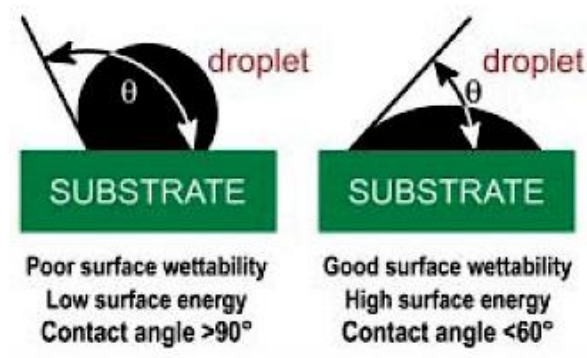
Muovimateriaaleilla on matala pintaenergia ja sen kasvattamiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä. Yleisimmät käytössä olevat menetelmät ovat koronointi, plasmakäsittely, liekkikäsittely ja primerointi. Rainan pintakäsittelyllä on suuri merkitys pinnoitusaineen tarttumiseen rainalle. Nanocompin tuotannossa käytetty lakka ei sisällä liuottimia, mikä lisää entisestään pintakäsittelyn tarvetta.

### 5.1 Pintaenergia ja sen mittaus

Pintaenergian kasvattaminen pienentää kontaktikulmaa ja edesauttaa rainan kastumista. Eli toisin sanoen pintaenergian kasvaessa nestepisara levittyy laajemmalle alalle, jolloin kontaktikulma  $\theta_c$  pienenee. Mikäli neste levittyy tasaiseksi kalvoksi kiinteälle pinnalle kontaktikulma saa arvon 0.

Kuviossa 21 on esitetty kontaktikulman mittaamisen periaate. Kontaktikulman ylittäessä  $90^\circ$  pinnan energia on alhainen ja pinnan kastuminen vähäistä. Pintaenergian kasvaessa riittävän suureksi ja kontaktikulman alittaessa  $60^\circ$  pinnan kastumista voidaan pitää hyvänä. (Adhesion Bonding 2012)

<http://www.adhesionbonding.com/2012/05/04/surface-wetting/>



**Kuvio 21.** Periaatekuva kontaktikulman mittaamisesta. (Adhesion Bonding 2012)

Pintaenergian mittayksikkönä on käytössä dyne/cm. Yleisimmät ja edullisimmat tavat pintaenergian määrittämiseen ovat tussikynät, joilla piirretään tuotteen pintaan viiva. Mikäli tuotteen pintaenergia ylittää kynään merkityn dyne/cm arvon, neste levittyy tuotteen pinnalle tasaiseksi kalvoksi. Jos tuotteen pintaenergia jää merkityn arvon alle, niin neste jää helmiksi pintaan. (tantec 2017)

Taulukossa 2 on nähtävillä useiden käsittelemättömien polymeerien dyne-arvoja, sekä erilaisten pinnoitusmenetelmien vaatimia dyne-arvoja. Taulukosta voidaankin suoraan nähdä, että yhdenkään taulukossa olevan muovimateriaalin pintaenergia ei ole riittävä sellaisenaan pinnoitukseen, eli pintaenergiaa on saatava nostettua jollain tapaa. Tähän ongelmaan löytyy ratkaisuna erilaisia pintakäsittelyjä, joita tuotteelle voidaan tehdä ennen pinnoitusprosessia.

Typical surface energy of substrate		Required surface energy for adhesion with:	
PTFE	<20 Dyne/cm	UV ink	48–56 Dyne/cm
Silicone	<20 Dyne/cm	Water based ink	50–56 Dyne/cm
PP	30 Dyne/cm	Coatings	46–52 Dyne/cm
PE	32 Dyne/cm	UV adhesive	44–50 Dyne/cm
PS	34 Dyne/cm	Water based adhesive	48–56 Dyne/cm
PC	34 Dyne/cm		
PVC	40 Dyne/cm		
PVC-U	37 Dyne/cm		
PET	42 Dyne/cm		
BOPP	32 Dyne/cm		

**Taulukko 2.** Polymeerien pintaenergian arvoja ja erilaisten pinnoitusaineiden vaatimat pintaenergian arvot. (NarrowWebTech 2015)

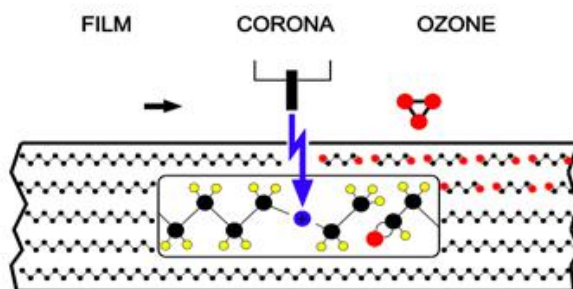
## 5.2 Korona

Muovi on synteettinen materiaali, joka muodostuu pitkistä homogeenisistä molekyyliketjuista. Molekyyliketjut ovat yleensä liittyneet toisiinsa päästä päähän muodostaen vieläkin pidempiä ketjuja, jättäen vain muutamia avoimia molekyyliketjun päitä. Muovin pinnassa näitä mahdollisia sidoskohtia on vieläkin vähemmän. Sidoksohtien vähyys johtaa siihen, että muovilla on huonot tartunta- ja kastumisominaisuudet ja nämä aiheuttavat ongelmia pinnoitusprosessissa. (Vetaphone 2017)

Tanskalainen insinööri Verner Eisby on keksinyt teorian, jonka mukaan korkeataajuuspurkaus voisi mahdollistaa tehokkaan ja kontrolloitavissa olevan metodin adheesion ja kastumisen parantamiseksi muovin pinnassa. Korona-käsittelyssä elektronit kiihdytetään muovituotteen pintaan, jolloin ne rikkovat molekyyliketjuja. Tästä seuraa se, että pinnassa olevien avoimien päiden määrä kasvaa ja vapaita valensseja muodostuu. (Vetaphone 2017)

Otsonipitoinen sähköinen purkaus hapettaa muovin pintaa, johon muodostuu uusia hiiliryhmiä ja hiiliryhmät nostavat pintaenergiaa. Tämä parantaa muovin molekyylien ja lisätyn nesteen kiinnittymistä toisiinsa. Korona ei heikennä tuotteen kestävyyttä, koska koronakäsittely muuttaa vain pinnassa olevia molekyyliketjuja, jotka ovat  $0,00001 \mu\text{m}$  paksuja. (Vetaphone 2017)

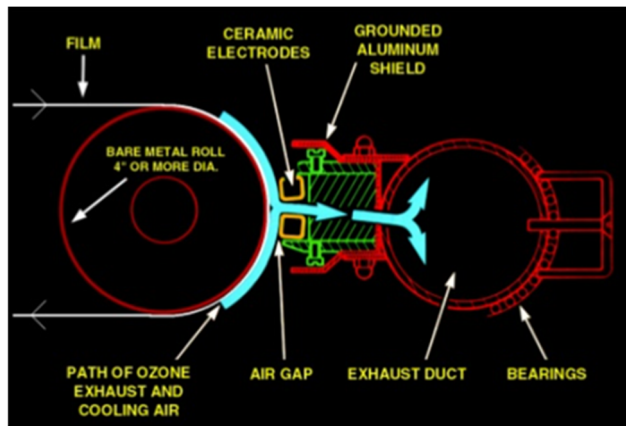
Rainalle on mahdollista suorittaa erilaisia pintakäsittelyjä tartunnan parantamiseksi. Käsittelemällä koronalla rainan pintaan muodostuu pieniä kraattereita. Kuviossa 22 on periaatekuva koronakäsittelystä. Koronointi muuttaa myös pinnan sähkövarausta ja muokkaa sidosryhmiä, jolloin otsonia kiinnittyy rainan pintaan. (Vetaphone 2017)



**Kuvio 22.** Koronan toimintaperiaate. (Vetaphone 2017)

Itse korona muodostuu metallisesta telasta, jonka kautta käsiteltävä materiaali kiertää, keraamisista elektrodeista, maadoitetusta alumiinisuojusta ja poistoputkesta. (Kuvio 23) Sähköinen purkaus muodostuu metallisen telan ja keraamisten elektrodien välille. Kaasut poistuvat poistoputkea pitkin, eivätkä pääse työskentelytilaan.





**Kuvio 23.** Kuva koronan rakenteesta. (Wolf, Rory 2013)

### 5.3 Plasma

Plasma on aineen olomuoto, joka on olemassa positiivisten ionien ja vapaiden elektronien muodossa. Vaikka se on kaasu, joka sähköisesti latautunut vapaasti liikkuvista elektroneista ja ioneista, niin sitä kuitenkin pidetään aineen neljäntenä olomuotona kiinteän, nesteen ja kaasun lisäksi. Plasma saadaan muodostettua, kun plasmageneraattorin korkeataajuisella energialla kuumennetaan kaasua ja kaasun lämpötila ylittää alkuaineen edellyttämän ionisaatioenergiatason. Tähän tapahtumaan vaaditaan noin 1700-7700 °C lämpötila, joka saadaan teollisuudessa aikaiseksi joko valokaarella tai sähkömagneettisella kentällä. (VanTRail 2017)

Plasma soveltuu pintakäsittelynä lähes kaikille materiaaleille. Plasmaa voidaan käyttää moniin tarkoituksiin, kuten pintojen puhdistukseen, pintaenergian nostamiseen, pinnan syövyttämiseen ja pinnoittamiseen. (VanTRail 2017) Plasmapinnoitus voidaan tehdä todella ohueksi, jopa vain 1 nanometrin paksuiseksi. Plasman toiminta pinnoitukseen vaadittavan pintaenergian nostamiseksi perustuu vapaiden radikaalien vaikutukseen ja pyrkimykseen muodostaa pysyviä sidoksia pinnoitettavalla pinnalla. (Fluid Finland 2016)

Plasmakäsittelyllä on paljon etuja muihin pintakäsittelymenetelmiin verrattuna. Plasmalla saadaan aikaan pysyviä vaikutuksia ja ominaisuuksia, jotka eivät ole muilla käsittelymenetelmillä mahdollisia. Menetelmänä plasma on monipuolinen ja automatisoitavissa oleva ja näin ollen soveltuu hyvin myös sarjatuotantoon. Pintakäsittelymenetelmänä plasma on myös ympäristöystävällinen, sen käyttökustannukset ovat alhaiset ja sen käyttö on turvallista työskentelyn kannalta. (VanTRail 2017)

#### **5.4 Liekki**

Liekkikäsittelyä käytetään useiden materiaalien pinnan kemian muokkaamiseen. Tarkoituksena on saada pinta polaariseksi, nostaa sen pintaenergiaa ja saada sen pinta kastuvaksi, jotta se voidaan pinnoittaa. Liekkikäsittelyn etuina muihin pintakäsittelyihin verrattuna ovat vakaammat käsittelyn lopputulokset ja monella materiaalilla saavutetaan korkeampi pintaenergia. (Fraunhofer IAP 2017)

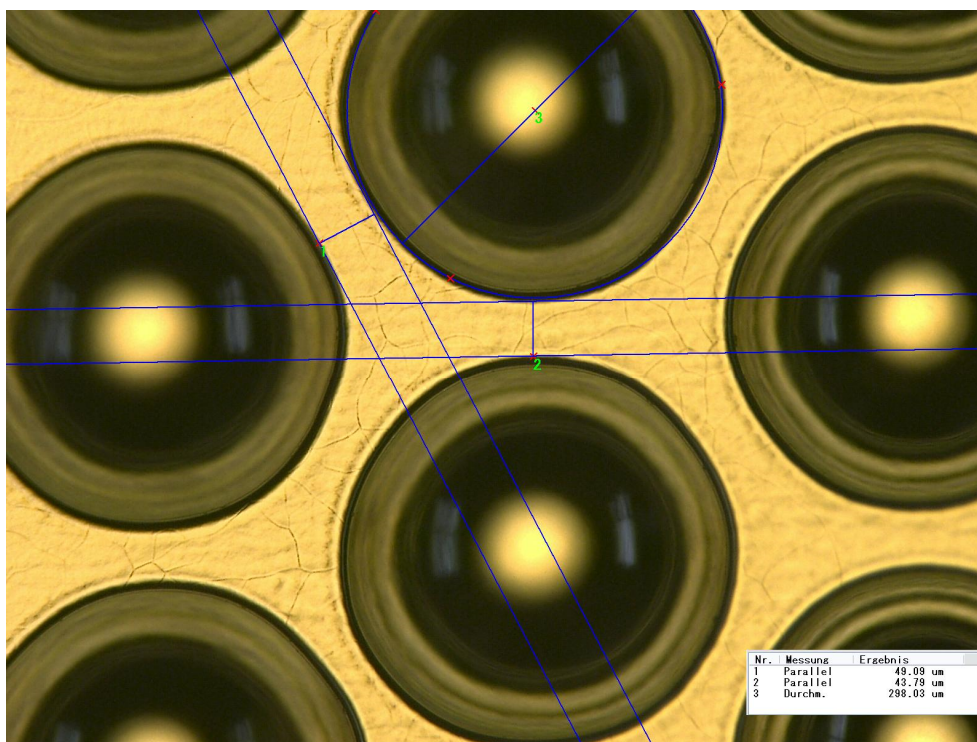
Liekkikäsittely myös polttaa pois pölyä, kuitua, öljyä ja muuta likaa käsiteltävän materiaalin pinnalta. Liekkikäsittely on nopeampi koronakäsittelyyn verrattuna, mutta vaatii monimutkaisemman ja kalliimman laitteiston. (Wikipedia 2017)

Esimerkiksi linjanopeuden pudotessa liian alhaiseksi on oltava varojärjestelmä, joka kytkee liekkikäsittelyn pois päältä tulipalovaaran vuoksi.

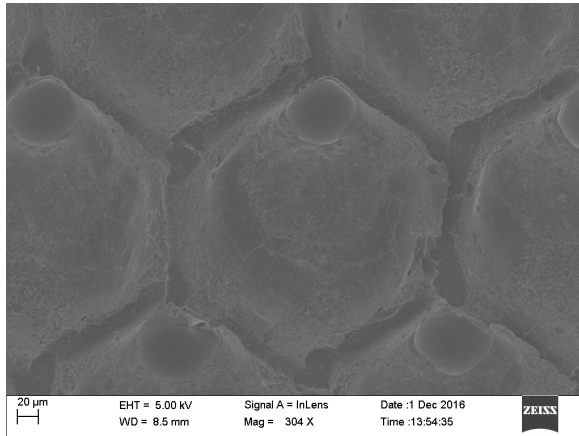
Liekkikäsittelyn vaikutus yltää 5-10 nanometrin syvyyteen, koronakäsittelyn 50 nanometriin verrattuna. Tästä voidaan päätellä, että pinnan hapettuminen on mittavampaa liekkikäsittelyn jäljiltä, vaikka se ulottuukin vain käsiteltävän materiaalin pintakerrokseen, sillä lopputuloksena on parempi kastuvuus. Lisäksi pienemmällä hapettumissyvyydellä ei ole havaittavissa pinnoituksen irtoamista, toisin kuin koronakäsittelyn jäljiltä. (Mancinelli 2017)

## 6 Tutkimus

Tutkimuksessa vertaillaan kahden eri syväpainotelan lakansiirtokykyä rainalle. Testauksessa käytetyt syväpainotelat ovat Z35 ja Z40. Ensimmäisessä telassa kupin syvyys on 35  $\mu\text{m}$  ja jälkimmäisessä 40  $\mu\text{m}$ , jotka myös niiden numeroinnit kertovat. Kupin halkaisijamitta 40  $\mu\text{m}$  syvässä rakenteessa on noin 300  $\mu\text{m}$ :n luokkaa. (Kuva 2 ja Kuva 3)



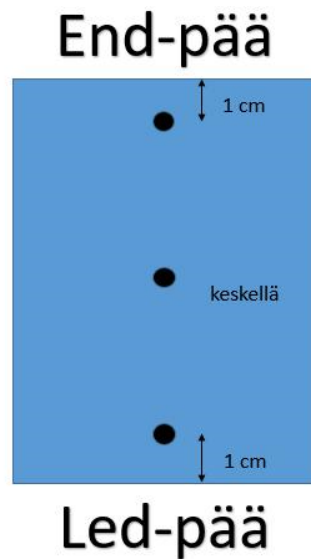
**Kuva 2.** Z40 syväpainotelan pintarakenne mikroskoopilla kuvattuna.



**Kuva 3.** Lakkavalu syväpainotelan Z40 pintarakenteesta.

Molemmilla teloilla ajetaan R2R-linjastolla koepätkät kevennetyllä työkalulla, jolloin lakka ei puristu nippitelan ja työkalun väliin ja rainalle jää sen paksuinen lakkakerros, jonka syväpainotela on sille luovuttanut. Lisäksi molemmilla teloilla ajetaan itse tuotetta ja tehdään niille lakanpaksuusmittaukset. Mittaamalla ja vertaamalla näitä paksuuksia itse tuotteen lakkakerrosten paksuuksiin voidaan selvittää, miten paljon syväpainotelan luovutuskyvyllä on merkitystä lopullisen tuotteen kannalta.

Mittaukset tehdään jokaiselle koekappaleelle kolmesta eri pisteestä: led-pään reunasta 1 cm keskelle päin, keskeltä kappaletta ja 1 cm end-pään reunasta keskelle päin. (Kuvio 24)



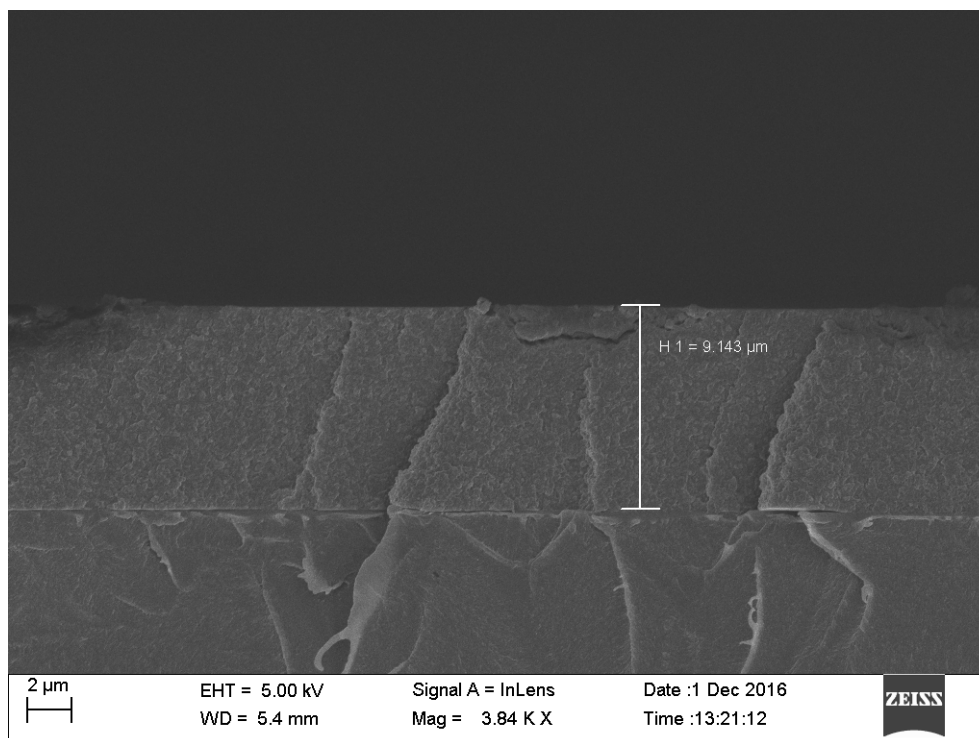
**Kuvio 24.** Koekappaleiden mittauspisteet.

Rainan materiaalina tutkimuksessa on tuotannossakin käytössä oleva Hostaphan® RNK 2600 (PET) ja lakkana Nanocomp Oy:n oma lakkasekoite Nalax 3. Prosessin parametrit ovat tutkimuksessa kaikin puolin samat kuin tuotantoajoa ajettaessakin, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia.

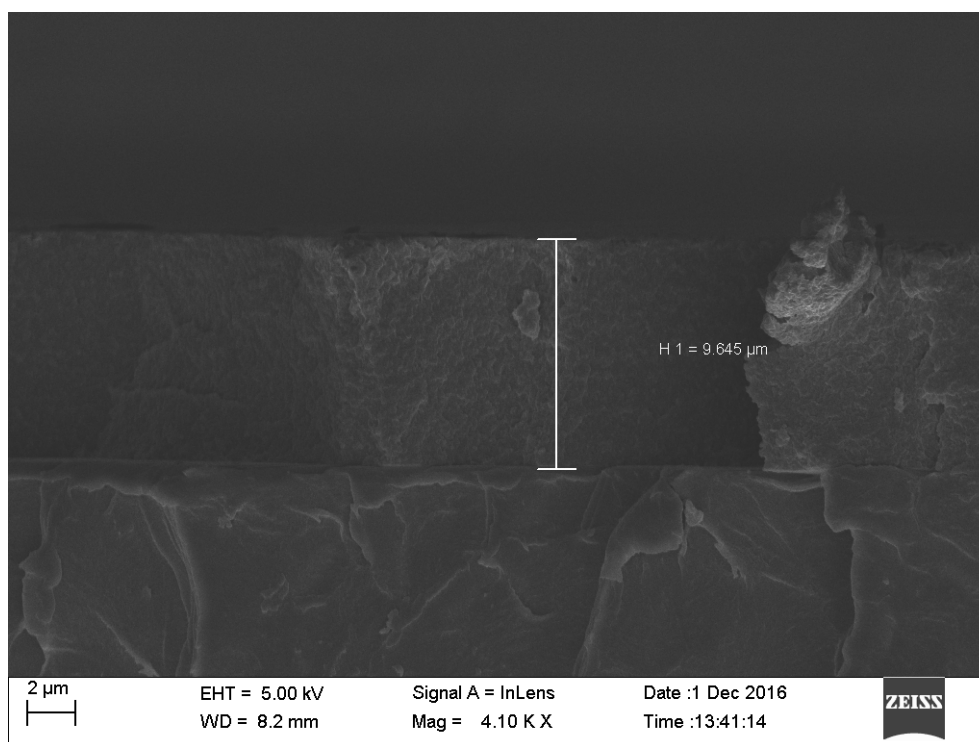
Mittaukset lakan paksuuksista suoritetaan Nanocomp Oy:n omalla Filmetrics F10-RT heijastusmittalaitteella, sekä myös Itä-Suomen yliopiston pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). SEM-mittausta varten kappale joudutaan leikkaamaan mittauspisteen kohdalta, jotta mittauspiste jää kappaleen reunaan.

## 7 Tulokset

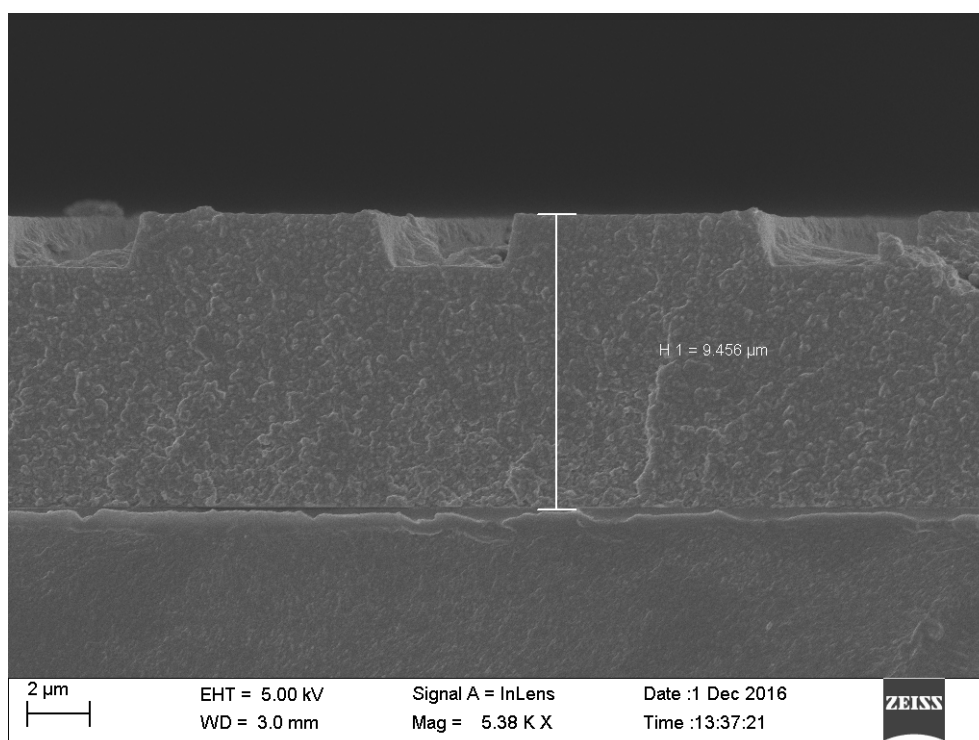
Alla olevissa SEM-kuvissa näkyy poikkileikkauskuvaa PET-rainasta, jonka pinnalla on Nalax 3 lakkakerros. Kuvassa on selkeästi havaittavissa vaakasuuntainen viiva, joka menee koko kuvan halki, eli lakan ja PET-rainan rajapinta. Kuvassa näkyvä mittajana osoittaa lakkakerroksen paksuuden rainan pinnalla. Lakan pintaan työkalusta kopioituneen rakenteen syvyys on myös hyvin nähtävissä kuvista 6, 7 ja 8.



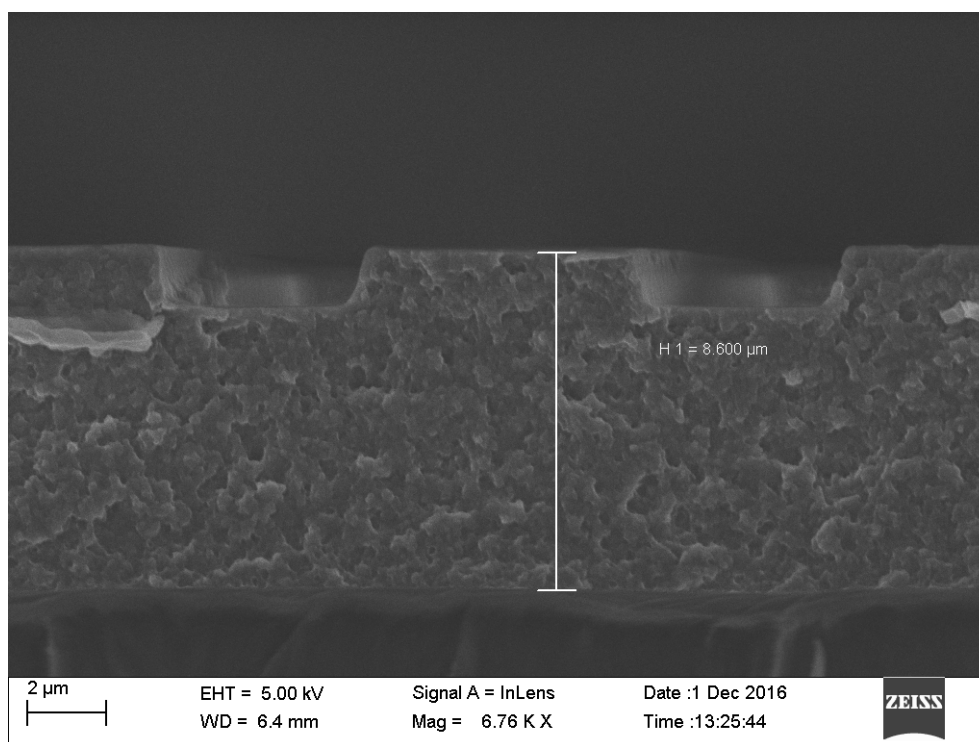
**Kuva 4.** SEM-poikkileikkauskuvaa Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z35. Mittaus suoritettu keskeltä näytettä ja lakan paksuudeksi mitattu 9,1 μm.



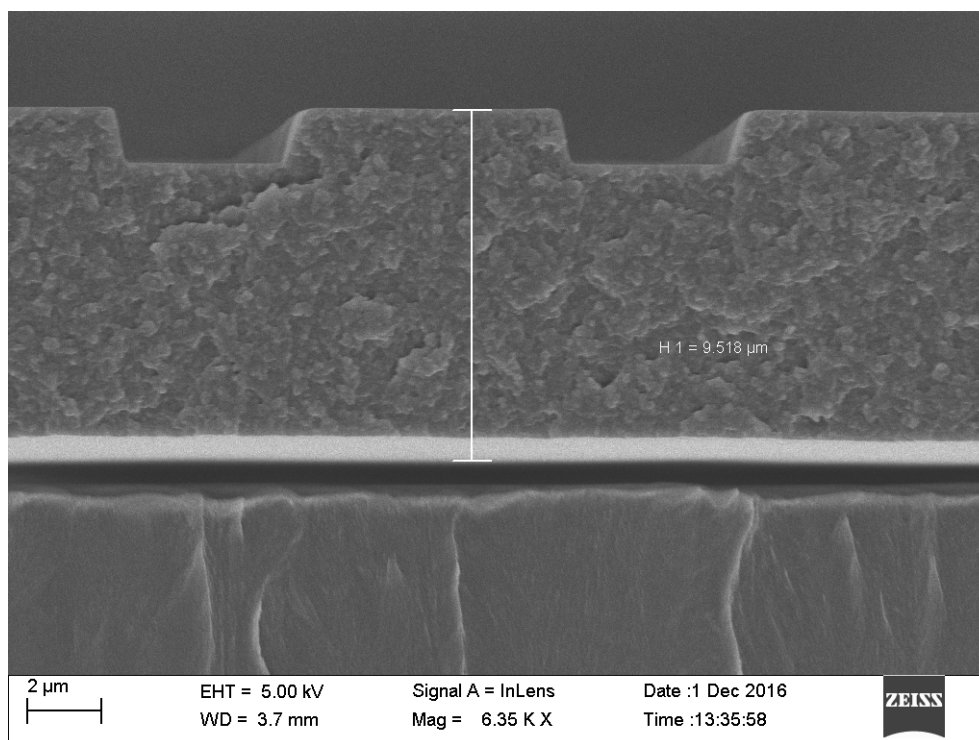
**Kuva 5.** SEM-poikkileikkauskuvaa Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z35. Mittaus suoritettu noin 1 cm end-pään reunasta keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu  $9,6 \mu\text{m}$ .



**Kuva 6.** SEM-poikkileikkauskuvaa Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z35. Mittaus suoritettu led-pään reunasta noin 1 cm keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu  $9,5 \mu\text{m}$ .

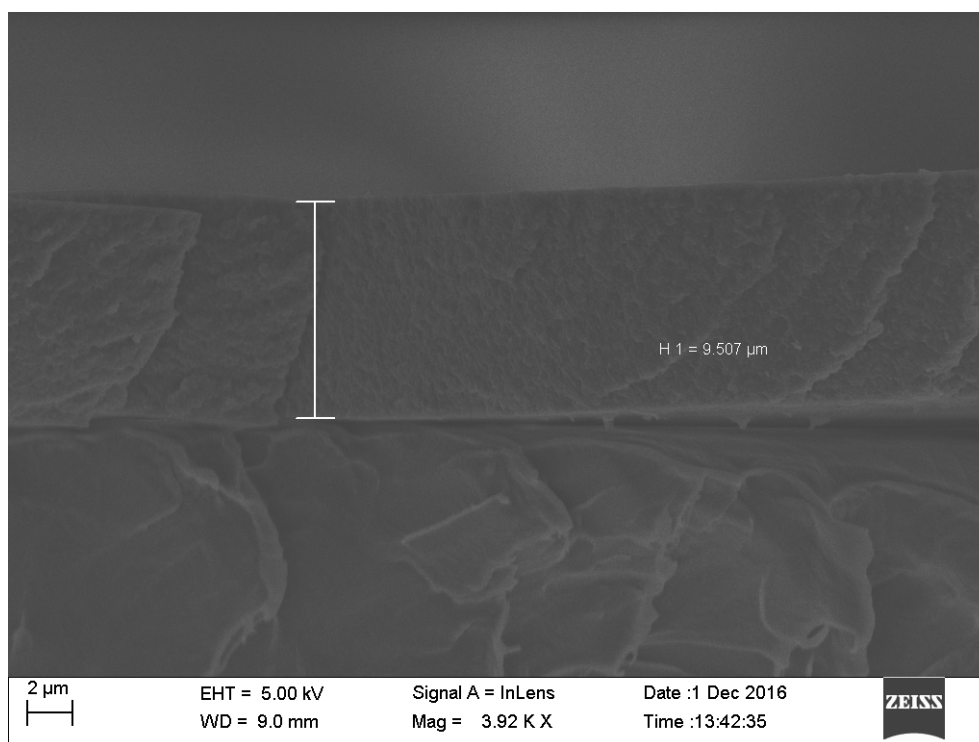


**Kuva 7.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z40. Mittaus suoritettu keskeltä näytettä ja lakan paksuudeksi mitattu 8,6 μm.

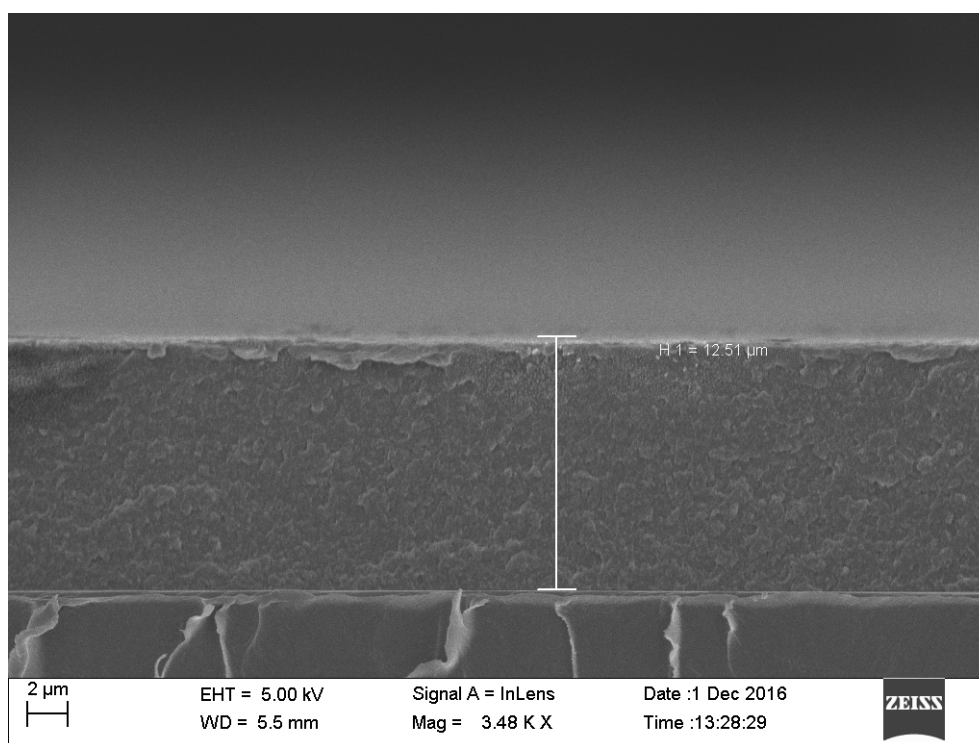


**Kuva 8.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z40. Mittaus suoritettu led-pään reunasta noin 1cm keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu 9,5 μm.

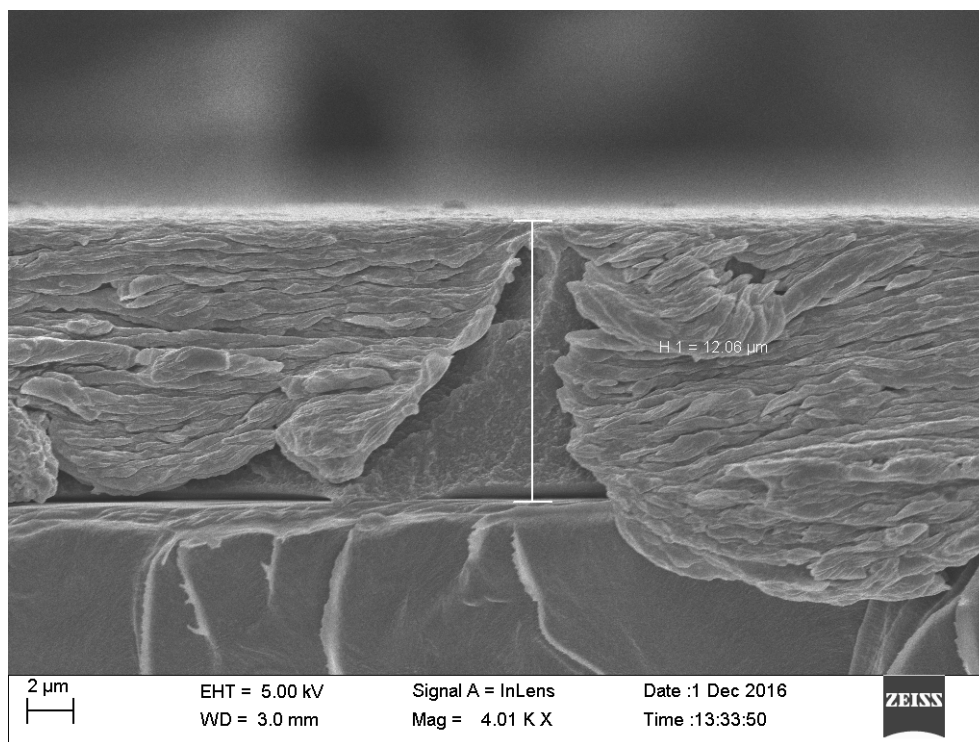




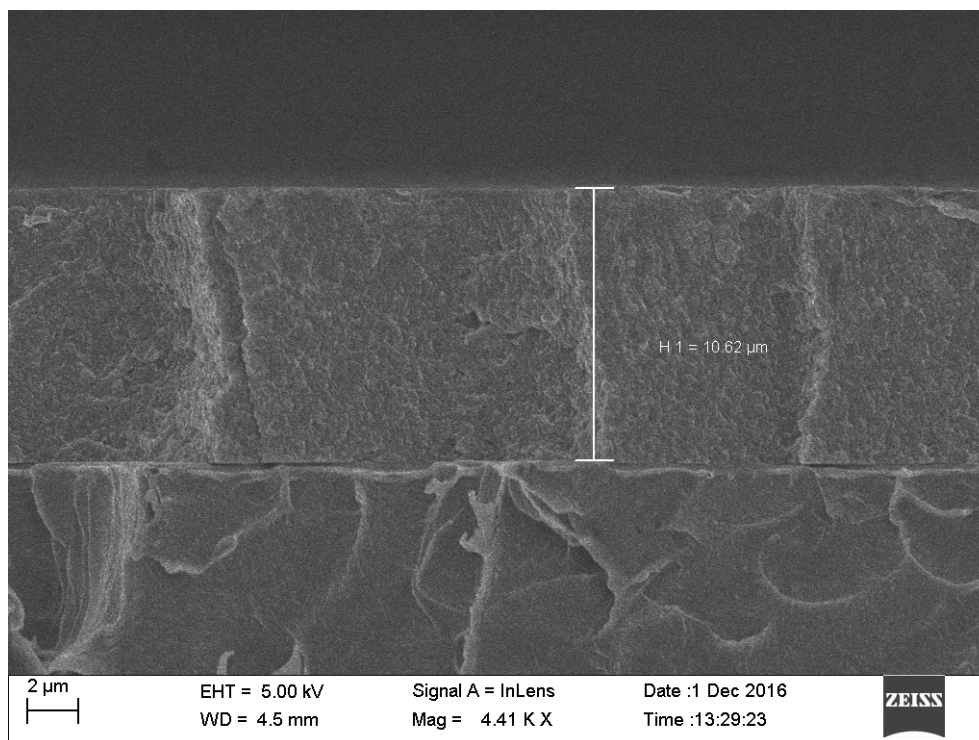
**Kuva 9.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z40. Mittaus suoritettu end-pään reunasta noin 1cm keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu  $9,5 \mu\text{m}$ .



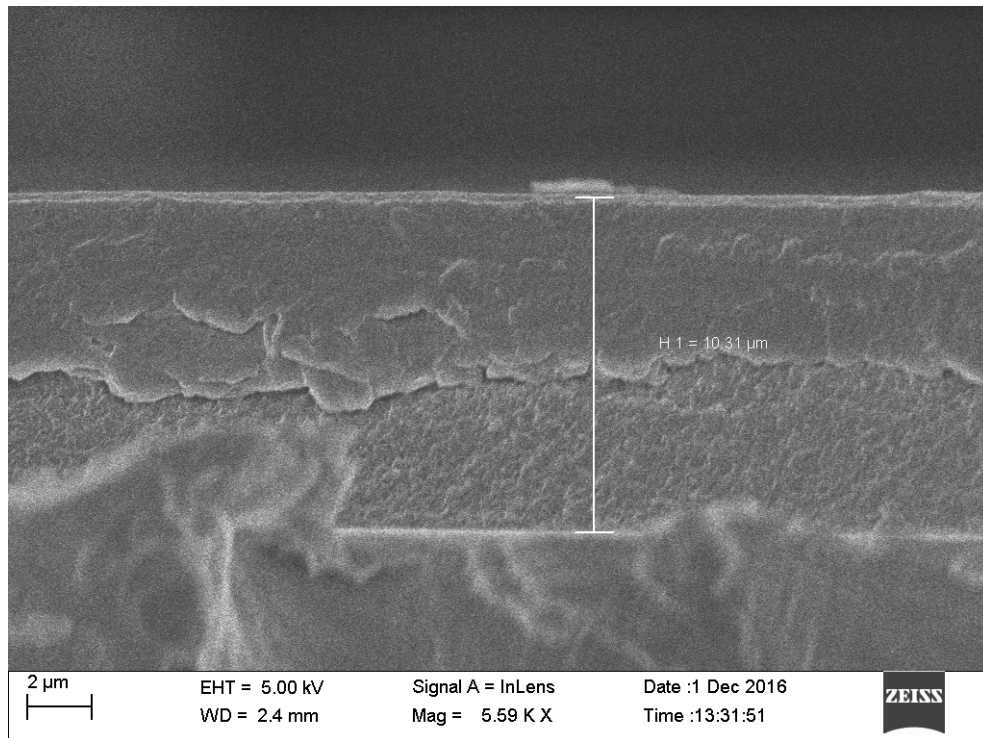
**Kuva 10.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z40 ilman kuvion painantaa. Mittaus suoritettu keskeltä näytettä ja lakan paksuudeksi mitattu  $12,5 \mu\text{m}$ .



**Kuva 11.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z40 ilman kuvion painantaa. Mittaus suoritettu led-pään reunasta noin 1cm keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu 12,0  $\mu\text{m}$ .

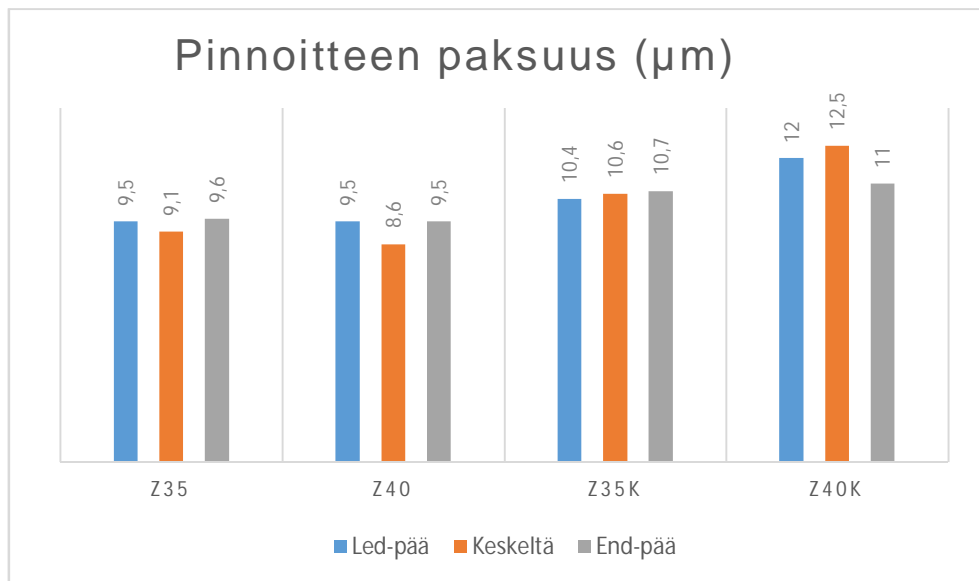


**Kuva 12.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z35 ilman kuvion painantaa. Mittaus suoritettu keskeltä näytettä ja lakan paksuudeksi mitattu 10,6  $\mu\text{m}$ .



**Kuva 13.** SEM-poikkileikkauskuva Nalax 3 pinnoituksesta syväpainotelalla Z35 ilman kuvion painantaa. Mittaus suoritettu led-pään reunasta noin 1cm keskelle päin ja lakan paksuudeksi mitattu 10,3  $\mu\text{m}$ .

Kun vertaillaan kevennetyillä työkaluilla ajettuja mittakappaleita toisiinsa, voidaan selvästi huomata, että suuremmalla syväpainotelan rakenteella siirtyy myös lakkaa enemmän rainalle. (Kuvio 25) Tämä tulos oli aivan odotettu ja haluttu, sillä juuri tuolla syväpainotelan rakenteen koolla pyritään hallitsemaan lakan määrää rainan pinnalla.



**Kuvio 25.** Koekappaleiden SEM-mittaustulokset.

Itse tuotteessa lakkapinnoituksen paksuutta säätelee syväpainotelan luovutuskyvyn lisäksi paine, jolla lakka kaulitaan työkalun ja rainan väliin. Mittaustuloksista voidaan todeta, että nippitelan paine onkin ratkaisevassa roolissa, sillä vaikka Z40 syväpainotela luovuttaa rainalle noin 20 % enemmän lakkaa kuin Z35, niin silti itse lopullisessa tuotteessa lakkakerroksen paksuus on molemmilla yhtä suuri.

Lakkaa jää siis prosessissa rainalle itse tuotteen kohdalle saman verran, riippumatta siitä käytetäänkö syväpainotelan rakenteen syvyytenä 35 mikrometriä tai 40 mikrometriä. Koska lakkaa on kuitenkin siirtynyt Z40 syväpainotelalla pinnoitettuna enemmän rainalle, niin kaulitsemisen aikana ylimääräinen lakka on paennut työkalun alta purseeksi tuotteen reunoille. Kuviossa 25 on esitetty mitatut lakkapaksuudet. Z35K ja Z40K ovat kevennetyllä työkalulla ajettuja mittauskappaleita ja Z35 ja Z40 tuotannossa olevan tuotteen lakkapaksuuksia.

## 8 Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus hankkia tietoperustaa syväpainopinnoitusmenetelmän pinnoituspaksuuden hallintaan. Erityisesti mielenkiinnon kohteena olivat syväpainotelan erilaiset pinnoituskuviot, niiden valmistusmenetelmät, erilaisten kuviointien antamat edut. Tarkoituksena oli tutustua aiheeseen löytää mahdollisesti olemassa olevia laskukaavoja, joiden avulla rakenteen koko syväpainotelassa voitaisiin määrittää mahdollisimman tarkasti.

Tiedon hankinta laskennallisista perusteista kuvioinnin koon valinnassa osoittautui vaikeaksi ja tämän opinnäytetyön osalta Nanocompille toimitetun syväpainotelan kuvioinnin koko jäi syväpainotelan toimittajan tietotaidon varaan. Toki opinnäytetyön toimeksi antaneella yrityksellä oli jo entuudestaan paljon kokemusta erilaisista rakenteista syväpainoteloilla. Aiempien pinnoituspaksuustestien perusteella heillä olikin hyvä tuntuma rakenteen riittävään kokoon ja heille tehtäväksi jäikin vain syväpainotelatoimittajan ehdottaman rakenteen ja rakennekoon hyväksyminen.

Tätä opinnäytetyötä voidaan hyödyntää rullalta rullalle pinnoitusmenetelmien valinnassa. Tunnettuja menetelmiä on olemassa paljon enemmän ja tässä opinnäytetyössä on tuotu esille vain joitakin, joilla päästään Nanocompin vaatimaan pinnoituspaksuuteen. Lisäksi tästä opinnäytetyöstä voi olla hyötyä syväpainotelan pintakuvioinnin valinnassa.

## 9 Lähteet

- Anthavale, S. 2011. Various Adhesive Coating Methods. <https://www.slideshare.net/ashrikant58/06presentation-on-coating-methods> 26.10.2017
- Bera, S., Udayabhanu, G., Narayan, R. & Rout, Tapan K. 2016. Methodologies of Application of Sol-Gel Based Solution onto Substrate. Journal of Coating Science and Technology, [https://www.researchgate.net/publication/303278698\\_Methodologies\\_of\\_Application\\_of\\_Sol-Gel\\_Based\\_Solution\\_onto\\_Substrate\\_A\\_Review/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/303278698_Methodologies_of_Application_of_Sol-Gel_Based_Solution_onto_Substrate_A_Review/figures?lo=1) 3.12.2017
- Donato, T. 2014. Doctor Blade Metering. SlideShare. [http://www.slideshare.net/flexoglobal/doctor-blade-metering?next\\_slideshow=1](http://www.slideshare.net/flexoglobal/doctor-blade-metering?next_slideshow=1). 17.11.2017
- FluidFinland. 2016. Pinnan muokkaus plasmakäsittelyllä. <https://www.fluidfinland.fi/uutiset.html?63862>. 12.12.2017
- Fraunhofer IAP. 2017. Flame treatment. [https://www.iap.fraunhofer.de/content/dam/iap/de/documents/FB2/Flame\\_treatm<ent\\_4\\_0.pdf](https://www.iap.fraunhofer.de/content/dam/iap/de/documents/FB2/Flame_treatm<ent_4_0.pdf) 1.12.2017
- FUJI KIKAI KOGYO Co.,Ltd. 2017. <http://english.fujikikai.co.jp/products/coater/coating/>. 30.11.2017
- Gutoff, Edgar B. & Cohen, Edward D. 2006. Coating and drying defects. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kapur, N., Hewson, R., Sleigh, PA, Summers, JL, Thompson, HM & Abbott, SJ. 2011. A Review of Gravure Coating Systems. Converttech & e-Print. <http://eprints.whiterose.ac.uk/43238/10/sleighPA2apdf.pdf>. 6.10.2017
- Kroenert. 2017. [http://newsletter.kroenert.de/en/12\\_10/Cat3/curtain-coaters.jpg](http://newsletter.kroenert.de/en/12_10/Cat3/curtain-coaters.jpg) 1.12.2017
- Looser, J. 2014. New Era Converting Machinery - Gravure Coating Webinar. SlideShare. <https://www.slideshare.net/jrd22/new-era-converting-machinery-gravure-coating-webinar>. 11.12.2017
- Mancinelli, S. 2017. Flame treatment technology for converting industry. <http://www.ice-x.com/europe/exhibitor-files/flame-treatment-for-converting-industry.pdf>. 30.11.2017
- Miller, M. 2014. Slot Die Coating Technology. Mark's Coating Matters. 17.7.2014. <http://www.pffc-online.com/blog/miller/12242-slot-die-coating-technology> 2.12.2017
- MIRWEC. 2017. MICROGRAVURE™. <http://www.mirwecfilm.com/microgravure.php>. 10.11.2017
- Nanocomp Oy. 2017. nanocomp.fi/ 16.10.2017
- NarrowWebTech. 2017. How to achieve high opacity whites in flexo. <http://narrowwebtech.com/dossiers/how-to-achieve-high-opacity-whites-in-flexo/>. 9.12.2017
- New Era Converting machinery, inc. 2017. Principles and uses of roll coating equipment - part 1 of 3. <https://neweraconverting.com/news->

- [3/principles-and-uses-of-roll-coating-equipment-part-1-of-3.](#)  
10.12.2017
- RK Print Coat Instruments. 2017. [http://rkprint.com/?page\\_id=1746](http://rkprint.com/?page_id=1746) 1.12.2017
- Sabreen, S. 2012. Surface Wetting and Pretreatment Methods. Adhesion Bonding. <http://www.adhesionbonding.com/2012/05/04/surface-wetting/> 12.12.2017
- Schmid, M. 2011. Curtain Coater as Air Knife Replacement. Tappi. <http://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/254.376%20doc.pdf>. 6.12.2017
- TanTec. 2017. <https://tantec.com/dyne-test-measuring-surface-energy.html>. 2.12.2017
- Technical Coating International. 2017. <http://www.tciinc.com/capabilities/> 8.12.2017
- TiMaTEC Coating GMBH. 2017. [http://www.timatec.at/html/coating\\_systems\\_print.html](http://www.timatec.at/html/coating_systems_print.html) 7.12.2017
- U.S. Department of energy. Roll to Roll (R2R) Processing Technology Assessment. 2015. <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR%20Ch8%20%20Roll%20To%20Roll%20Processing%20TA%20Feb-13-2015.pdf> 22.11.2017
- VanTRail. 2017. Plasmakäsittely. <http://vtr.cc/plasma.html>. 12.12.2017
- Vetaphone. 2017. Corona treatment. <http://www.vetaphone.com/technology/corona-treatment/>. 7.12.2017
- Wikipedia. 2017. Flame treatment. [https://en.wikipedia.org/wiki/Flame\\_treatment](https://en.wikipedia.org/wiki/Flame_treatment). 2.12.2017
- Wolf, R. 2013. Improving Flexographic Ink & Coating Adhesion. SlideShare. <https://www.slideshare.net/flexoglobal/enercon-treatment>. 29.11.2017
- Vollpott, J. 2012. Comparison of Coating Techniques Gravure Roll (Contact) vs. Curtain (Non-contact). AIMCAL Web Coating Conference. [https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/vollpott\\_presentation.pdf](https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/vollpott_presentation.pdf). 16.11.2017
- YURI ROLL MACHINE Co.,Ltd. 2017. [http://www.yuri-roll.co.jp/en/products/roll\\_gravure/](http://www.yuri-roll.co.jp/en/products/roll_gravure/). 7.12.2017