



Heikki Tikkanen

# Ruiskupinnoituskoneen materiaali- syöttöjärjestelmän kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

25.3.2022

## Tiivistelmä

Tekijä:	Heikki Tikkanen
Otsikko:	Ruiskupinnoituskoneen materiaalisyyttöjärjestelmän kehittäminen
Sivumäärä:	31 sivua + 3 liitettä
Aika:	25.3.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Automaatiotekniikka
Ohjaajat:	Tuotantopäällikkö Matti Pesonen Lehtori Matti Välikylä

---

Tämä insinöörytö käsittelee Optitune Oy:n ruiskupinnoituskoneen syöttöjärjestelmän muutostyön suunnittelua. Pinnoituskone on sopiva alkuperäiseen käyttötarkoitukseensa, mutta nanopinnoitteiden tutkimuskäytössä pinnoitteen paksuus vaatii jatkuvaa kalibrointia ja tarkkailua. Tämän insinöörytön tavoitteena on parantaa ruiskupinnoituskoneen ominaisuuksia siten, että pinnoitustyö ja -tulokset ovat helpommin toistettavissa tutkimuskäytössä.

Optitune Oy:n tuotteet ovat nanopinnoitteita eri materiaaleille. Ruiskupinnoituskonetta käytetään enimmäkseen metallin ja lasin pinnoittamiseen. Pinnoitekerroksen ollessa erittäin ohutta vaatii se koneelta tarkkaa toimintaa ja erityistä puhtautta. Tällä hetkellä ruiskupinnoituskoneen materiaalisyytön ohjaus ei anna todellista kuvaa eri pinnoitemateriaalien käytettävistä määristä. Nykyistä tarkempi tieto pinnoitemateriaalien kulutuksesta prosessissa tuo lisäarvoa yrityksen tutkimukselle.

Insinöörytyössä käydään läpi erilaisia esikäsittely-, pinnoitus- ja testausmenetelmiä. Tämän lisäksi työssä suunnitellaan retrofit-tyylinen asennus nykyiseen järjestelmään. Järjestelmämuutoksen tavoitteena on lisätä koneen pinnoitustyön ja -tulosten toistettavuutta. Tällä tavoin helpotetaan koneen päivittäistä käyttöä kustannustehokkaasti mahdollisimman vähillä muutoksilla.

Avainsanat: Nanotekniikka, spray, pinnoitus

## Abstract

Author: Heikki Tikkanen  
Title: Spray Coating Tool Material Feed System Retrofit Design  
Number of Pages: 31 pages + 3 appendices  
Date: March 25th 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Automation Engineer  
Supervisors: Matti Pesonen, Production Manager  
Matti Välikylä, Senior Lecturer

---

This thesis is about Optitune's spray coating tool material feed system modification design. Spray coating tool is useful for its original use, but inaccurate for material research and development use. This thesis explains the design process of adding the needed material flow control for spray coating tool.

Optitune's products are nanocoating materials for different substrate materials. Spray process is mostly used for coating glass and metal. For use of extremely thin materials, the needed accuracy and purity of the tool is demanding. The used material feed system in Optitune's spray coating tool does not give the exact numbers for material usage, which is needed for thinfilm coating research and development.

This thesis goes through different pre-treatment-, coating- and testing methods for thinfilm coating. Thesis also explains the design of retrofitting new material feed system for old spray coating tool. New design will add precision and value for daily usage in research and development work with as minor changes and cost as possible.

As a result for this thesis Optitune has a solution for upgrading the spray coating tools feed system accuracy.

Keywords: nanocoating, thinfilm, coating, spray

# Sisällys

## Lyhenteet ja termit

1	Johdanto	1
2	Pinnoitus Optitune Oy:llä	2
2.1	Substraatin esikäsittely	2
2.1.1	Ultraäänipuhdistus	3
2.1.2	Plasma	4
2.2	Pinnoitusmenetelmät	7
2.2.1	Rullalta rullalle	7
2.2.2	Mayer tanko -pinnoitus	8
2.2.3	Kastopinnoitus	8
2.2.4	Pyörimispinnoitus	8
2.2.5	Ruiskupinnoitus	9
2.3	Pinnoitteen kovetus	9
2.3.1	Ultravioletivalo	9
2.3.2	Infrapunavalo	10
2.3.3	Lämpökovetus	10
2.4	Testausmenetelmät	11
2.4.1	Kontaktikulmamittaus	11
2.4.2	Abraasio-testi	11
2.4.3	Crosshatch-testi	12
2.4.4	Lyijykynäkovuustesti	13
2.4.5	Spektrometri	13
2.4.6	Spektrofotometri	14
3	Ruiskupinnoitus	14
3.1	Yleistä	14
3.2	Syöttötavat	16
3.2.1	Paineohjattu syöttötapa	16
3.2.2	Virtausohjattu järjestelmä	18
3.2.3	Materiaalin kulutuksen määrittäminen	20
4	Spindle Spray	22
4.1	Toiminta ja käyttö	22

4.2	Kappaleiden käsittely	23
4.3	Muutostarve	24
5	Suunnittelu	25
5.1	Syöttöjärjestelmä	26
5.2	Automaatio	28
5.3	Sähkö	29
5.4	Huuhtelu	29
5.5	Anturointi	30
6	Muutostyö	30
6.1	PI-kaavio	30
6.2	Sähkökuvat	30
6.3	Muut	31
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1: Kyt Kentäkotelon piirikaavio	
	Liite 2: Nykyisen järjestelmän PI-kaavio	
	Liite 3: Muutossuunnitelman PI-kaavio	

## Lyhenteet ja termit

Nano: SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö nanometri.

Substraatti: Käsiteltävä pinta tai kappale.

Vakuumi: Tyhjiö. Huomattavan alipaineen tila.

HVLP: High Volume Low Pressure. Ruiskupinnoitustekniikka.

LVLP: Low Volume Low Pressure. Ruiskupinnoitustekniikka.

VOC: Volatile organic compound. Haihtuva orgaaninen yhdiste.

DFT: Dry film thickness. Kuivan pinnoitteen pinnan paksuus.

WFT: Wet film thickness. Märän pinnoitteen pinnan paksuus.

SC: Solid content. Kuiva-ainepitoisuus.

HEPA: High Efficiency Particulate Air filter. Ilmansuodatintyyppi.

HMI: Human Machine Interface. Käyttöliittymä.

Maskaus: Pinnan suojaaminen tai peittäminen.

TTL: Transistor-Transistor- Logic. Digitaalielektroniikan logiikkamalli.

## 1 Johdanto

Työn tarkoituksena on esitellä Optitune Oy:n ruiskupinnoituskoneen syöttöjärjestelmän ongelma, kehitysehdotus sekä suunnitelma ehdotuksen mukaisen muutostyön toteuttamiseen. Järjestelmän muutos tuo yritykselle lisäarvoa sekä tuotekehityksen että asiakasyrityksien prosessituen kannalta.

Nanotekniikka mullistaa maailmaa. More-than-moore-ajatuksessa pyritään menemään Mooren lain edelle kehityksessä. Nanotekniikkaa kehitetään entistä enemmän käytettäväksi esimerkiksi lääkkeissä, erilaisissa kodin sovelluksissa ja kulutushyödykkeissä.

Nanopinnoitteet ovat pinnoitteita, jotka ovat paksuudeltaan ohuempia kuin 100 nanometriä. Pinnoitteet lisäävät pinnoitettavalle substraatille ominaisuuksia, joita ei muulla tavoin saataisi aikaan [1]. Mittasuhteen ymmärtämisen kannalta todettakoon, että nanometri on metrin miljardisosa.

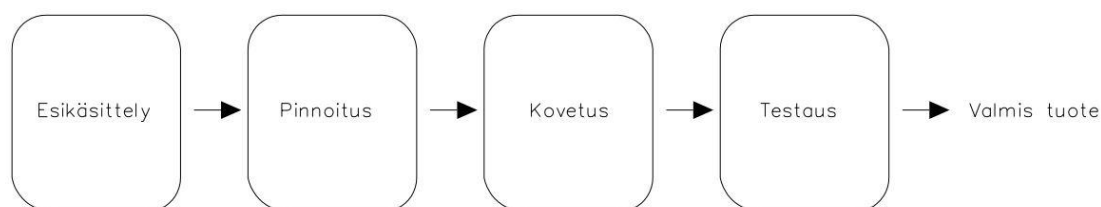
Nanopinnoitteilla voidaan tuoda pinnoitettaville materiaaleille lisää tärkeitä ominaisuuksia. Esimerkiksi metallin pinnalle voidaan luoda ominaisuuksia, jotka lisäävät pinnan naarmuuntumisen kestävyttä. Pinnoitteella voidaan kasvattaa tai laskea pintojen veden tai öljyn hylkivyyttä tai vaikkapa vähentää lasin pinnan heijastamista. Pääsääntöisesti Optitune Oy:n pinnoitteiden pyrkimyksenä on olla muokkaamatta kappaleen pinnan ulkoasua.

Markkinoilla olevien pinnoitteiden ominaisuuksissa on kehitettävää. Esimerkiksi pinnoitteiden mekaanista kulutuskestävyyttä pyritään parantamaan, jolloin pinnoitetun tuotteen käyttöikä pidentyy kulutukselle alttiissa kohteessa. Yleinen ongelma voi olla myös alhainen kemikaalikestävyys. Pinnoite voi esimerkiksi liueta etanolille altistuessaan ensimmäisellä pyyhkimiskerralla. Optitune Oy:n pinnoitteet ovat kilpailukykyisiä, sillä pinnoitteet ovat sekä kulutus- että kemikaalikestäviä kilpaileviin pinnoitteisiin verrattuna.

Tässä työssä perehdytään tarkemmin ruiskupinnoittamiseen, joka on useisiin ohutkalvopinnoitusmenetelmiin verrattuna yksinkertainen prosessi. Ruiskupinnoittamiseen ei esimerkiksi tarvita alipainekammiota, vaan prosessi on mahdollista tehdä yleisesti käytetyillä ruiskumaalauskalustoilla.

## 2 Pinnoitus Optitune Oy:llä

Osiossa käydään läpi Optitune Oy:n käytössä olevia menetelmiä substraattien esikäsitteilyyn, pinnoitukseen, pinnoitteen kovetukseen ja testaukseen. Kuva 1 havainnollistaa käsittelyprosessia.



Kuva 1. Käsittelyprosessi.

### 2.1 Substraatin esikäsitteily

Nanopinnoitteissa puhtaus on hyvin tärkeää. Erityisesti on otettava huomioon pinnoitemateriaalin kanssa kosketuksissa olevat pinnat, pinnoitettava substraatti sekä materiaalia substraatille kuljettavan kaasun puhtaus.

Substraattien esikäsitteily toimii osittain samalla tavalla kuin metallin maalauksessa. Pinnoitteen paksuuden ollessa alle 100 nanometriä voi substraatin pinnalla oleva rasva tai pöly pilata pinnoituksen täysin. Epäpuhtaudet substraatin pinnoilla ovat myös nähtävissä lopputuloksessa.

Epäpuhtaudet substraatilla aiheuttavat ongelmia myös pinnoitteen ja substraatin välisessä adheesiossa, joka voi johtaa esimerkiksi pinnoitteen epätasaiseen levittymiseen, pinnoitteelle ominaisen naarmuuntumisen keston huononemiseen, tai pinnoitteen irtoamiseen. Pinnoite voi näyttää visuaalisessa tarkastelussa



hyvältä, mutta pinnoitteen ominaisuudet eivät täytä muilta osin haluttuja vaatimuksia. Ennen pinnoitusta substraatille on suositeltavaa suorittaa puhdistus ja mahdollinen pinnan aktivointi.

### 2.1.1 Ultraäänipuhdistus

Ultraäänipuhdistus on prosessi, jossa käytetään ihmisen kuuloalueen ulkopuolella olevaa korkeataajuuksista värähtelyä (>20 kHz). Ultraääni on esimerkiksi piezo-elementillä tuotettua atomien ja molekyylien värähtelyä, joka tarvitsee edetäkseen väliaineen. Ultraäänipuhdistus perustuu ultraäänen vedessä muodostamaan kavitaatioilmiöön. Ultraääni muodostaa pieniä kavitaatiokuplia, jotka irrottavat epäpuhtauksia käsiteltävältä pinnalta. [2.] Puhdistusprosesseissa ultraääntä käytetään yleensä veden kanssa. Parhaan lopputuloksen aikaansaamiseksi veden pintajännitystä suositellaan vähennettäväksi joko lämmittämällä tai lisäämällä veteen pintajännitystä vähentävää pesuainetta.

Veden pintajännitys saa pinnalla olevat vesimolekyylit kiinnittymään toisiinsa, ja tämä vaikeuttaa vesimolekyylien tunkeutumista puhdistettavaan pintaan. Veden korkea lämpötila ja pesuaine vähentävät veden pintajännitystä. Pintajännityksen vähentyessä vesimolekyylit tunkeutuvat helpommin puhdistettavan kappaleen pinnan huokosiin ja halkeamiin. [3.]

Laboratoriossa ultraäänipesureita voidaan käyttää useiden eri materiaalien käsittelyyn. Koska ultraääni liikkuu myös kiinteässä aineessa, on pesurissa mahdollista käyttää esimerkiksi erillistä lasiastiaa substraatin puhtauden varmistamiseksi. Pesurin metallialtaassa voidaan käyttää vesijohtovettä ja metallialtaaseen asetettavaan puhtaaseen lasiastiaan voidaan lisätä tislattua vettä. Tällä tavoin minimoidaan kontaminaation riski ja vältytään pesurin metallialtaan jatkuvalta puhdistamiselta. Ultraäänipuhdistus on teollisuudessa yleisesti käytetty tekniikka.

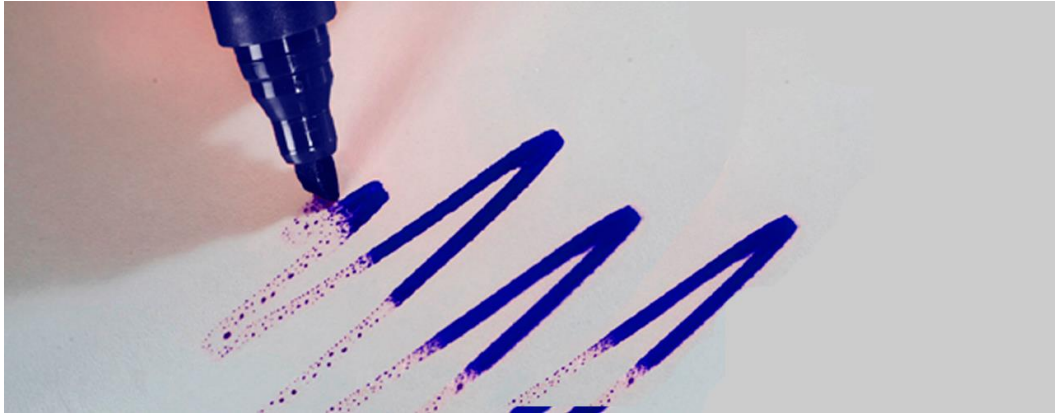
### 2.1.2 Plasma

Plasma on tila, jossa kaasun atomit ovat ionisoituneet. Plasman toiminta perustuu ionisoidun kaasun atomeihin, joita pommitetaan käsiteltävän kappaleen pintaan. [4.] Plasmakäsittely puhdistaa orgaanisen epäpuhtauden substraatin pinnalta ja tällä tavoin lisää käsiteltävän pinnan pintaenergiaa. Plasmakäsittelyllä siis aktivoidaan substraatin pinta.

Substraatin pinnan ja pinnoitemateriaalin pintaenergioiden välinen erotus vaikuttaa pinnoitemateriaalin leviämiseen substraatin pinnoille. Pinnoite levittyy substraatille tasaisimmin silloin, kun substraatin pintaenergia on suuri ja nestemäisen pinnoitemateriaalin pintaenergia on pieni. Tätä pintojen välistä vetovoimaa kutsutaan adheesioksi. [5.]

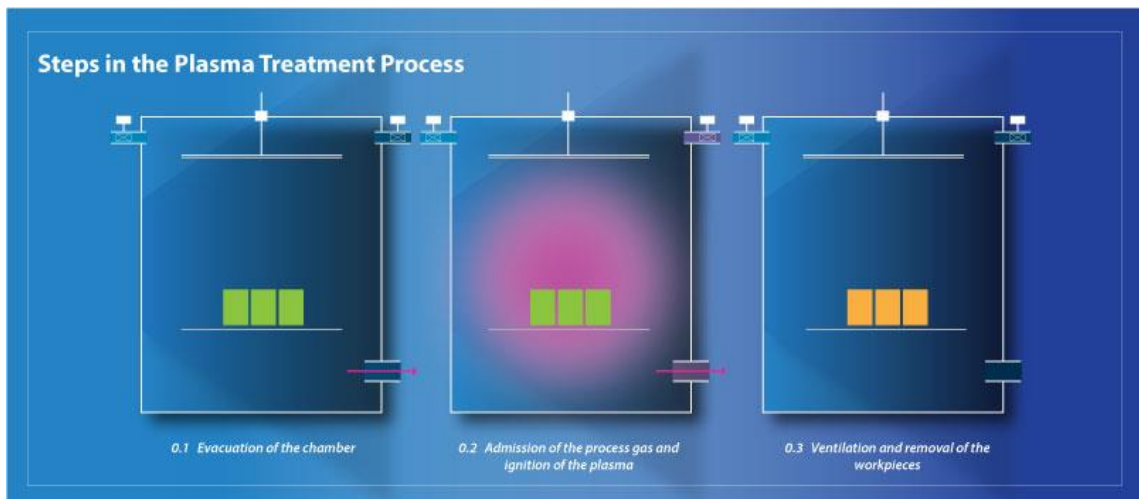
Adheesio vaikuttaa aineen kiinnittymiseen pintoihin, kun taas koheesio pitää ainetta koossa eli vastustaa sitä rikkovia voimia. Substraatin koheesiosta johtuu myös sen pintajännitys. Pintajännitys voidaan ajatella myös pintaenergiana yksikkönään joulea neliometriä kohden ( $J/m^2$ ) tai dyne neliösenttiä kohden ( $Dyne/cm^2$ ). [5.]

Pintajännitystä voidaan mitata sekä nestemäisen että kiinteän materiaalin pinnalta. Pintajännityksen muutos käsitellyn substraatin pinnalla voidaan todeta esimerkiksi veden kontaktikulman muutoksena, dyne-kynällä tai tarkoitukseen valmistetuilla nesteillä. Kuva 2 esittää, kuinka dyne-kynän muste kiinnittyy tasaisesti aktivoituun pintaan, kun taas pintajännityksen ollessa matala muste vetäytyy pisaroiksi. [6.]



Kuva 2: Dyne-kynä [6].

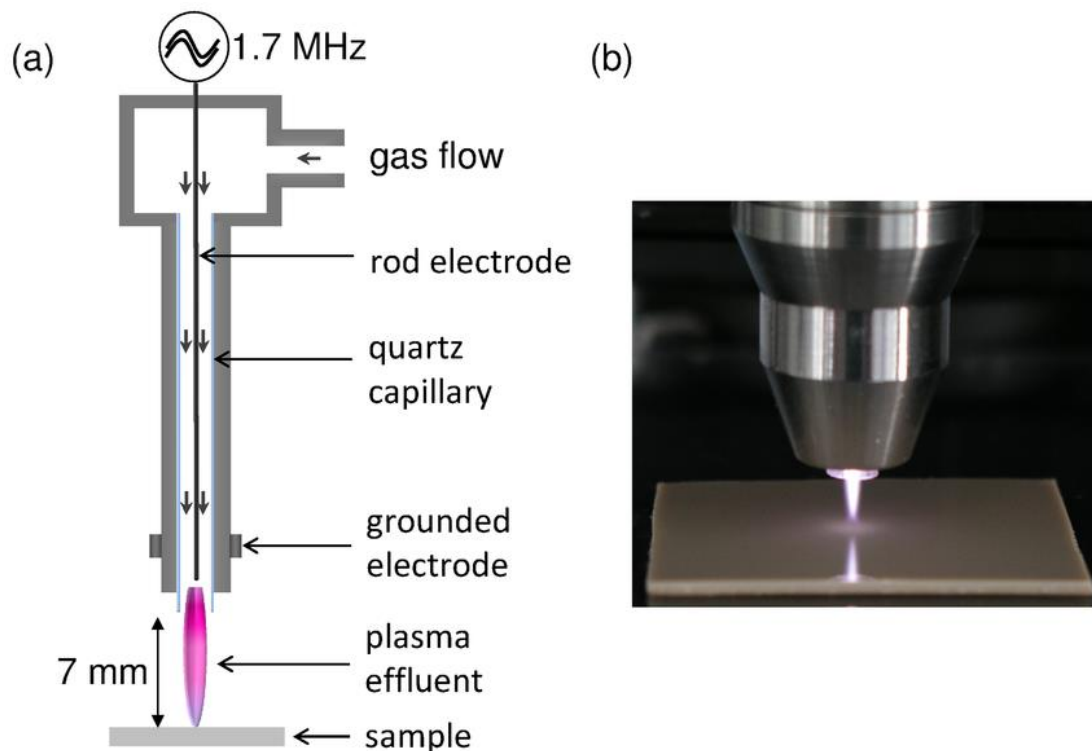
Ohutkalvoprosesseissa plasmakäsittely tehdään yleensä vakuumpioplasmalla. Substraatti asetetaan alipainekammioon, joka pumpataan noin yhden millibaarin paineeseen vakuumpumpun avulla. Tämän jälkeen kammioon johdetaan ionisoitua kaasua, joka puhdistaa ja varaa käsiteltävän substraatin pinnan muokaten samalla tämän pintaenergiaa suotuisaksi pintakäsittelyprosessille. Kuvassa 3 ovat vakuumpioplasmaprosessin vaiheet.



Kuva 3: Plasmakäsittely [7].

Plasmakäsittely on mahdollista tehdä myös normaalissa ilmanpaineessa atmo-sfääriplasmalla, ja se onkin yleisempi tapa plasmakäsittelylle maalauslinjoilla. Tämä johtuu vakuumpioplasmaprosessin hitaudesta ja hinnasta. Varsinkin tasaiset 2D-

kappaleet on mahdollista käsitellä atmosfääriplasmalla nopeasti vakuumpi-  
 lasmaan verrattuna. 3D-kappaleissa käsittelyyn tarvitaan robottia, mikä hidastaa  
 prosessia. Muodoiltaan monimutkaiset kappaleet ovat vaikeita tai jopa mahdot-  
 tomia puhdistaa täysin atmosfääriplasmalla sen ulottuvuuden takia. Vakuumi-  
 plasmalla kaasu kulkeutuu monimutkaisten muotojen sisään.



Kuva 4: Atmosfääriplasma-suutin [8].

Plasmakäsittelyssä kaasuna voidaan käyttää muun muassa happea, typpeä, ar-  
 gonia, vetyä tai jopa paineilmaa. Käsittelyyn soveltuva kaasu valitaan käyttö-  
 kohteen mukaan. Esimerkiksi happi on toimiva reaktiivinen kaasu pinnan akti-  
 vointiin, puhdistukseen ja etsaukseen. Herkästi hapettuvia metalleja käsiteltä-  
 essä happi oksidoi pintoja [9]. Argon ei oksidoi metalleja ja on turvallinen kaasu  
 metallien pinnan puhdistukseen ja aktivointiin [10]. Vety vähentää hapettumista  
 eli pelkistää ja onkin yleisesti käytetty kaasu elektroniikassa [11]. Typpi toimii  
 puhdistuksessa ja aktivoinnissa hapen tavoin, mutta happi on tehokkaampana  
 typpeä enemmän käytetty kaasu. [12.]

Kaasuja voidaan myös käyttää yhdessä. Puhdas paineilma on sekä typpeä että happea, ja se soveltuukin tarpeen tullen plasmakäsitelyyn. Yleisesti käytetty yhdistelmä on myös happi ja argon. Tällöin happi puhdistaa ja tarvittaessa etsä ja aktivoi pinnan, kun taas argon estää happimolekyylien kiinnittymisen pinnoille ja kuljettaa ne kammiosta ulos. Vetyä käytettäessä kammion täytyy huuhdella esimerkiksi argonilla ennen kammion avaamista. [10.]

Oikein käytettynä plasmakäsittely ei aiheuta materiaalille rasiutusta eikä se muuta materiaalin ominaisuuksia pitkäaikaisesti. Plasmakäsittely ei aiheuta esimerkiksi ainevalumia tai muuta vastaavaa haittaa. Vaihtoehtoisin raskaisiin kemikaalikäsittelyihin verrattuna plasmakäsittely on erittäin käytännöllinen. Plasmakäsittelyn pintajännitystä lisäävä vaikutus kestää tietyn ajan riippuen materiaalista.

## 2.2 Pinnoitusmenetelmät

### 2.2.1 Rullalta rullalle

Rullalta rullalle eli roll-to-roll-tekniikka toimii nimensä mukaisesti eli valittu substraattimateriaali viedään rullalta koneeseen, joka pinnoittaa sen, ja kone siirtää substraatin takaisin rullalle. Koneessa voi olla käytössä tarpeen mukaan eri menetelmiä pinnoitukseen, ja kone voi toimia eri painealueilla. Yleisesti roll-to-roll-tekniikassa pinnoitusmenetelmä vaihtelee. Käytössä voi olla esimerkiksi syväpainomenetelmä nestemäiselle pinnoitteelle tai vaikkapa eri lähdekaasuihin perustuva CVD- tai ALD-tekniikka. Tekniikka on yleinen esimerkiksi paperin, folion, muovien, tekstiilien, metallien tai jopa nanomateriaalien massatuotannossa.

### 2.2.2 Mayer tanko -pinnoitus

Mayer tanko -pinnoitus eli bar coating. Menetelmässä käytettävän ruostumattomasta teräksestä valmistetun sauvan ympärille on kierretty teräslankaa. Sauva pyyhkii liikkuessaan ylimääräisen materiaalin pois pinnoilta, jolloin se jättää tietyn paksuisen kalvon pinnoitettavalle pinnalle. Pinnoitteen paksuus on suoraan verrannollinen sauvan ympärille kierretyn langan halkaisijaan. [13.]

### 2.2.3 Kastopinnoitus

Kastopinnoitus eli dip coating on nimensä mukaisesti tekniikka, jossa substraatti upotetaan pinnoitusmateriaaliin. Substraatti upotetaan materiaaliastiaan, jonka jälkeen se nostetaan hitaasti ylös valumien välttämiseksi.

Pinnoitteen paksuuteen ja tasaisuuteen vaikuttaa materiaalin viskositeetti ja kiintoaineen määrä sekä substraatin nostamisen nopeus. Mitä suurempi nostamisen nopeus on, sitä paksumpi pinnoitteesta tulee. Kastopinnoituksessa pinnoitemateriaalin viskositeetilla on suuri vaikutus. Esimerkiksi pinnoitemateriaalin viskositeetin ollessa pieni voi sopiva kalvonpaksuus vaatia todella nopeita liikkeitä, jotka taas osaltaan vaikuttavat pinnoitteen epätasaisuuteen varsinkin substraatin reunoilla.

### 2.2.4 Pyörimispinnoitus

Pyörimispinnoituksessa eli spin coating -menetelmässä materiaali lisätään substraatin päälle, jonka jälkeen alustaa pyöritetään. Pyörimisliikkeestä aiheutuva keskipakoisvoima ja materiaalin pintajännitys yhdessä muodostavat substraatin päälle tasaisen pinnoitteen.

Pyörimispinnoitusmenetelmällä tehty pinnoite on tasainen, ja menetelmä on nopea. Liuottimet haihtuvat hyvin pyörimisestä aiheutuvan ilmavirran takia. [14.]

## 2.2.5 Ruiskupinnoitus

Ruiskupinnoitus eli spray coating on pinnoitus- ja maalaustekniikka, jossa pinnoite syötetään paineistetun kaasun avulla pinnoitettavalle pinnalle. Menetelmä on kohtalaisen yksinkertainen, ja se mahdollistaa eri kokoluokan substraattien pinnoittamisen tasaisesti. Tämä tekee menetelmästä suosittua eri käyttötarkoituksiin.

Ruiskulaitteistoon on yleisesti saatavana laaja valikoima erilaisia suuttimia, jotka mahdollistavat eri muotoisia suihkuja ja materiaalin kulutusmääriä. Sopiva laitteisto valitaan käytettävän materiaalin mukaan. Optitunen ruiskutettavaa nanopinnoitetta käytetään pinnoitusprosessissa vähän verrattuna perinteisessä ruiskumaalauksessa käytettäviin määriin, joten valittava suutin on myös pienempi.

## 2.3 Pinnoitteen kovetus

### 2.3.1 Ultraviolettivalo

Ultraviolettivaloa voidaan käyttää pinnoitteiden kovettamiseen. Pinnoitteisiin voidaan myös lisätä sekä ultraviolettikovetteita että normaaleja liuottimia.

UV-initiaattoreita on kahta erilaista: vapaaseen radikaaliin perustuvia, joita käytetään muun muassa akryylillä, sekä kationisia initiaattoreita, joita käytetään epokseilla. Näitä sanotaan positiivitoimisiksi ja negatiivitoimisiksi. Positiivitoimisessa initiaattorissa ultraviolettivalo hajottaa materiaalia eli peitetyt osat säilyvät. Negatiivitoimisessa initiaattorissa ultraviolettivalo kovettaa materiaalin, eli peitetyt osat voidaan esimerkiksi huuhtoa pois prosessin jälkeen.

Ultraviolettivaloa käytetään yleisesti linjastoilla 2D-mallisen pinnan, kuten tasaisen paneelin tai lasin, kovettamiseen. Ultraviolettisovellusta on mahdollista käyttää robottiin liitettynä myös 3D-mallisen kappaleen käsittelyyn.

Ultraviolettivalolla kovettuvia pinnoitteita käytetään nykyään teollisuudessa paljon. Tämä vähentää kuivumisprosessissa haihtuvia haitallisia VOC-yhdisteitä. Pinnoitteen kuiva-ainepitoisuus voi olla lähes 100 prosenttia, kun taas perinteisissä vesi- ja liuotinmaaleissa se voi olla reilusti alle puolet. [15.]

### 2.3.2 Infrapunavalo

Infrapunalamppuja voidaan käyttää pintojen lämmitykseen. Tekniikan avulla pintoja voidaan lämmittää hyvin nopeasti. Pintojen lämpeneminen riippuu materiaalista ja sen kyvystä vastaanottaa infrapunavaloa. Erilaiset värit ja pinnat käyttäytyvät eri tavoin infrapunalamppujen alla.

Infrapunavalo voidaan jakaa lyhyeen, keskipitkään ja pitkään infrapunavalon spektriin. Lyhyt toimii 0,75-2 mikrometrin, keskipitkä 2-4 mikrometrin ja pitkä 4-15 mikrometrin aalloilla. Lyhyillä aalloilla säteilyn intensiteetti on suuri ja pinnalla oleva pinnoite saadaan lämmitettyä kuumentamatta substraattia. Keskipitkä aallonpituus haihduttaa tehokkaasti veden ja liuottimet, mikä vaikuttaa vesi- ja liuotinpohjaisten pinnoitteiden kuivumiseen.

### 2.3.3 Lämpökovetus

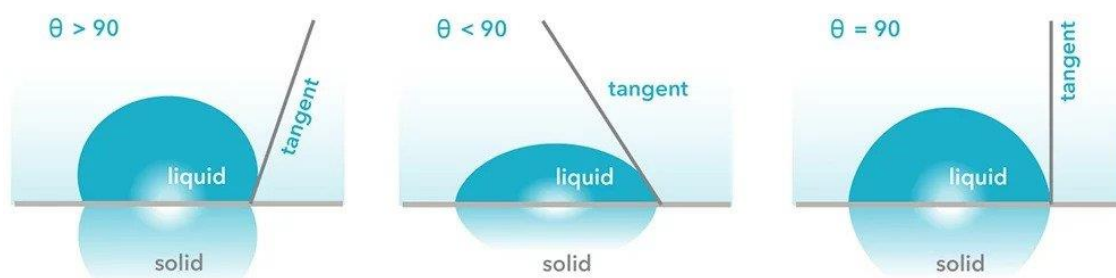
Perinteisillä liuottimilla varustetut pinnoitemateriaalit vaativat yleensä kovetuksen uunissa. Kovetusaika ja -lämpötila riippuvat pinnoitteesta ja pinnoitettavasta substraatista. Uuni voi olla varustettu puhalluksella, joka tehostaa kuivumisprosessia. Tätä menetelmää kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. Menetelmää voi käyttää eri tavoilla, joista esimerkkinä ovat puhallin ja ilmaveitsi. Ongelmana on ilman epätasainen virtaus substraatin pinnoilla. Perinteisen uunin ja konvektion lisäksi lämpöä voidaan muodostaa esimerkiksi induktiolla. [16.]



## 2.4 Testausmenetelmät

### 2.4.1 Kontaktikulmamittaus

Kontaktikulmamittauksessa substraatin pinnalle asetetaan pisara nestettä. Kuvassa 5 esitetään pisaran ja substraatin välisen kontaktikulman mittaamista. Kontaktikulman mittaaminen perustuu Youngin yhtälöön, joka ilmaisee kontaktikulman ja interfasiaalisen energian välisen yhteyden. [17.]



Kuva 5: Kontaktikulmamittaus [18].

### 2.4.2 Abraasio-testi

Abraasio-testissä mitataan pinnoitteen naarmuuntumisen kestävyyttä. Substraatti asetetaan testauslaitteeseen, joka on ladattu tarvittavalla määrällä punnuksia. Testauslaitteen varteen substraattia vasten kiinnitetään materiaali, jolla naarmuuntumiskestävyyttä halutaan testata. Yleisin materiaali on teräsvilla, mutta testejä voi tehdä esimerkiksi kankaalla tai kumilla.

Ennen testauslaitteen käyttöä täytyy testattavan alueen pituus ja taajuus määrittää laitteeseen. Tämän jälkeen laite tekee halutun määrän toistoja, ja testin tulokset voidaan todeta kontaktikulmamittauksella. Kuvassa 6 on Taber-abraasio-testauslaite.



KUVA 6: Taber-abraasiotestauslaite [19].

### 2.4.3 Crosshatch-testi

Crosshatch-testi suoritetaan terävällä veitsellä ja sille tarkoitetulla muotilla. Testissä veitsellä tehdään muotin mukaisesti viiltoja, jonka jälkeen tehdään sama määrä viiltoja kohtisuoraan alkuperäisiin viiltoihin nähden. Tämän jälkeen testi-alueen päälle asetetaan standardin mukainen teippi, joka vedetään nopeasti irti pinnasta.

Testin jälkeen mikroskoopin avulla tarkistetaan, kuinka paljon pinnoitetta on irronnut pinnasta. Tämän perusteella voidaan määrittellä kuvassa 7 esitetyn standardin mukainen luokka, joka kuvaa pinnoitteen kiinnittymistä substraatille.

Surface of cross-cut area from which flaking has occurred. (Example for 6 parallel cuts)	None					Greater than 65%
<b>Classification</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

Kuva 7: Crosshatch-standardi [20].

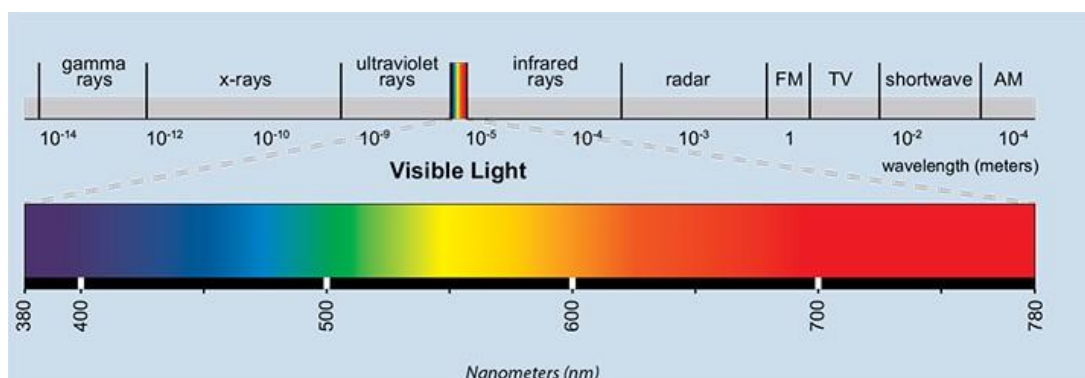
#### 2.4.4 Lyijykynäkovuustesti

Lyijykynäkovuustestissä eli Wolff-Wilborn-testissä pinnoitteen kovuutta testataan naarmuttamalla pintaa eri kovuusluokan lyijykynillä. Testi aloitetaan pehmeimmän kovuusluokan lyijykynällä kasvattaen kynien kovuusluokkaa, kunnes testattava pinta naarmuuntuu. Vaihtoehtoisesti voidaan aloittaa suurimmasta kovuusluokasta ja jatketaan, kunnes pinta ei enää naarmuunnu.

Testi kertoo, kuinka hyvin pinnoite on kovettunut substraatin pinnalle. Testiä voidaan käyttää esimerkiksi sopivan pinnoitteen määrittämiseen eri kohteisiin.

#### 2.4.5 Spektrometri

Spektrometriä käytetään optisen säteilyn intensiteetin aallonpituusjakauman analysointiin [21]. Kuvassa 8 on näkyvän ja näkymättömän valon aallonpituusjakauma.



Kuva 8: Valon spektri [22].

Spektrometrin käyttöön täytyy tietää pinnan taitekerroin ja paksuus tietyllä vaihteluvälillä. Tämän avulla voidaan mitata nanopinnoitteen paksuus piikiekolta. Piikiekkopinnoitetaan samoilla asetuksilla kuin pinnoitettava substraatti ja sillä voidaan todeta pinnoitteen paksuus.

### 2.4.6 Spektrofotometri

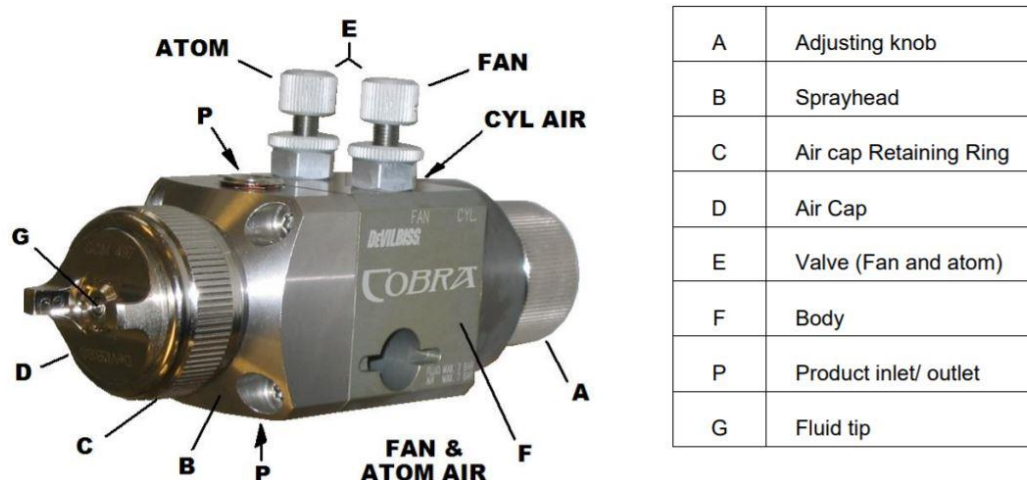
Spektrofotometri mittaa sähkömagneettisen säteilyn absorptiota eri aallonpituuksilla. Spektrofotometriä voidaan käyttää esimerkiksi värillisyyden ja värierojen mittaamiseen. [23.] Nanopinnoitteita mitattaessa spektrofotometrillä voidaan todeta pinnoitteen vaikutus materiaalin heijastukseen ja väriin. Yleensä lasien ja metallien nanopinnoitteiden vaikutus tuotteen väriin halutaan minimoida.

Spektrofotometrillä mitataan myös lasin haze-ilmiotä. Haze on optinen ilmiö, joka saa lasin näyttämään kuin sen pinnalla olisi yhtenäinen pölykerros [24]. Pinnoittamattomalla lasilla ilmiö voi johtua pinnan karheudesta. Nanopinnoitteilla, joilla ei ole tarkoitus aiheuttaa ilmiötä, voi ilmiö johtua esimerkiksi substraatin likaisuudesta tai ongelmasta pinnoitemateriaalissa.

## 3 Ruiskupinnoitus

### 3.1 Yleistä

Ruiskupinnoituksessa eli spray coatingissa materiaalisyöttölinjan päässä on pistooli, jota automaattijärjestelmässä ohjataan paineilmalla ja käsikäyttöisessä järjestelmässä liipaisimella. Ruiskupistoolin purkausaukon suuttimen kokoa on mahdollista muuttaa vaihtamalla ilmasuutinta eli air capia. Tämä vaikuttaa sekä pisaroiden kokoon että materiaalin sumun muotoon. Kuvassa 9 on Devilbiss Cobra 1 -automaattiruiskun eri osat.



Kuva 9: Devilbiss Cobra 1-automaattiruisku [25].

Paineilma ohjaa ruiskupistoolissa olevan neulan taakse, jolloin syöttölinjaan liisätty paine purkautuu ruiskusuuttimen materiaalin purkausaukon läpi. Atom-sisääntuloon ohjattu ilmavirtaus saa nestemäisen materiaalin atomisoitumaan eli muuttumaan sumuksi. Fan-sisääntuloon lisätty ilmavirta ohjataan noin 45 asteen kulmassa kohti atom-ulostulon ja materiaalin syöttöaukon ilmavirtausta, joka muodostaa sumusta kuvion, joka edesauttaa materiaalin päätymistä pinnoitettavan substraatin pintaan. Sumu levittyy pinnoitettavalle pinnalle tasaisemmin kuin neste.

HVLP on ruiskutekniikka, jossa itse ruiskupistooli tarvitsee vähäisen paineen toimiakseen. Suurempaa ilmavirtaa käytetään sumun muodostukseen ja materiaalikuvion säätöön pienemmällä paineella. Tuloksena on suurempi materiaalin siirtotehokkuus pinnoille ja vähäisempi materiaalihukka. HVLP on nykyään paljon käytetty tekniikka eri aloilla, ja myös Optitunella käytetään kyseistä tekniikkaa pinnoitukseen.

LVLP-tekniikka toimii myös pienemmällä paineella kuin perinteinen ruiskupistooli, mutta se käyttää myös pienempää ilmavirtausta kuin HVLP-ruiskupistooli. Tämä lisää siirtotehokkuutta ja samalla vähentää paineilman tarvetta. [26.]

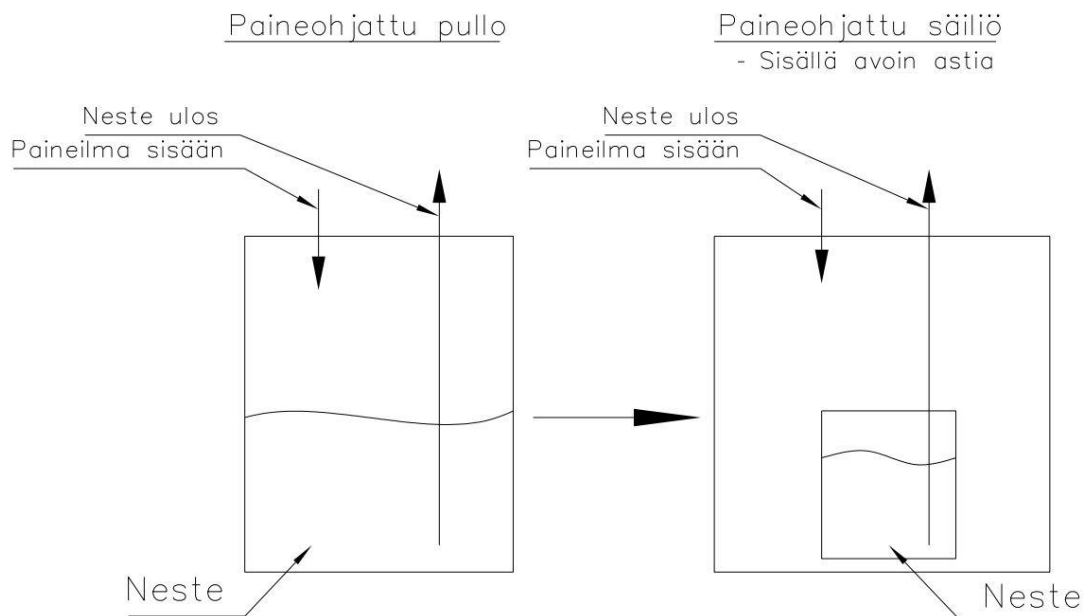
Optitunella käytössä oleva automaattiruiskupistooli on merkiltään Devilbiss ja malli Cobra 1. Eroa vastaavaan maalauksessa käytettävään HVLP-ruiskupistooliin ei neulan paineilmanohjauksen lisäksi käytännössä ole. Maalauksessa käytettävässä ruiskupistoolissa fan- ja atom-säädöt ovat saman säätöventtiilin alla, kun taas Optitunella käytettävässä automaattiruiskupistoolissa on lisäksi siirretty nämä säädöt omien säätöventtiilien alla. Tämän lisäksi fan-, atom- ja feed-paineilmaputkiin on lisätty rinnalle omat painemittarit, jolloin säätäminen ei tapahdu pelkästään ruiskun suihkun ulkomuotoa arvioimalla.

## 3.2 Syöttötavat

### 3.2.1 Paineohjattu syöttötapa

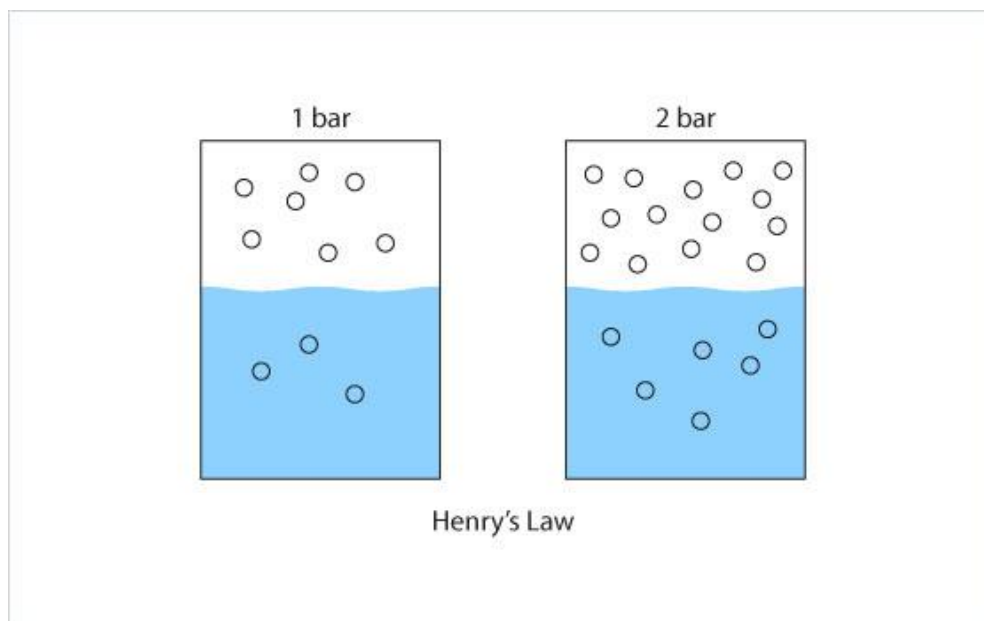
Paineohjatussa syöttöjärjestelmässä materiaalisäiliö paineistetaan, jolloin materiaali virtaa halutulla virtauksella putkistosta kohti ilmanpainetta. Prosessin säätö onnistuu esimerkiksi painemittarin avulla, jolloin säiliön painetta voidaan säätää tarvittavan virtauksen aikaansaamiseksi. Säätötapa on hidas ja epätarkka verrattuna esimerkiksi massavirtasäätimen avulla virtausohjattuun järjestelmään.

Ongelmana paineohjauksessa on nesteen muuttuva pinta-ala materiaalisäiliössä. Kun materiaali vähenee pullosta, nesteen ja ilmamäärän suhde pullossa vaihtelee, jolloin myös paine ja ilmatilan tilavuus muuttuu. Tähän ongelmaan ratkaisuna voi olla esimerkiksi tilavampi paineastia, jonka sisälle asetetaan erillinen pienempi astia materiaalia varten. Näin voidaan vähentää paine-eron vaikutusta, koska nesteen määrä suhteessa paineastian kokonaistilavuuteen vaihtelee vähemmän. Säiliön painetta ohjataan paineregulaattorin avulla paineen epätasaisuuden välttämiseksi. Kuvassa 10 on esitetty paineohjatun pullon ja paineohjatun säiliön käytön eroavaisuus.



Kuva 10: Paineistettu pullo vs. paineistettu säiliö.

Henryn lain mukaisesti nesteeseen liuenneen kaasun määrä on suoraan verrannollinen kaasun paineeseen [27]. Ruiskujärjestelmässä ilmiöllä voi olla vaikutusta, kun neste siirtyy suuttimen kautta ilmanpaineeseen ja pinnoitettavalle pinnalle, jolloin paineen madaltuessa kaasua haihtuu nesteestä. Esimerkkinä tästä on juomien hiilihapotus. Kun pullon tai tölkin avaa, niin nesteestä lähtee irtautumaan kaasua paineen laskemisen seurauksena. Tätä efektiä voi välttää valitsemalla sopivan kaasun materiaalisäiliön paineistukseen. Esimerkiksi puhdas happi liukenee nesteeseen helpommin kuin typpi. Helium taas liukenee nesteeseen huonosti, mikä tekee siitä varsin hyvän kaasun säiliöiden paineistamiseen. Kuvassa 11 on Henryn laki.



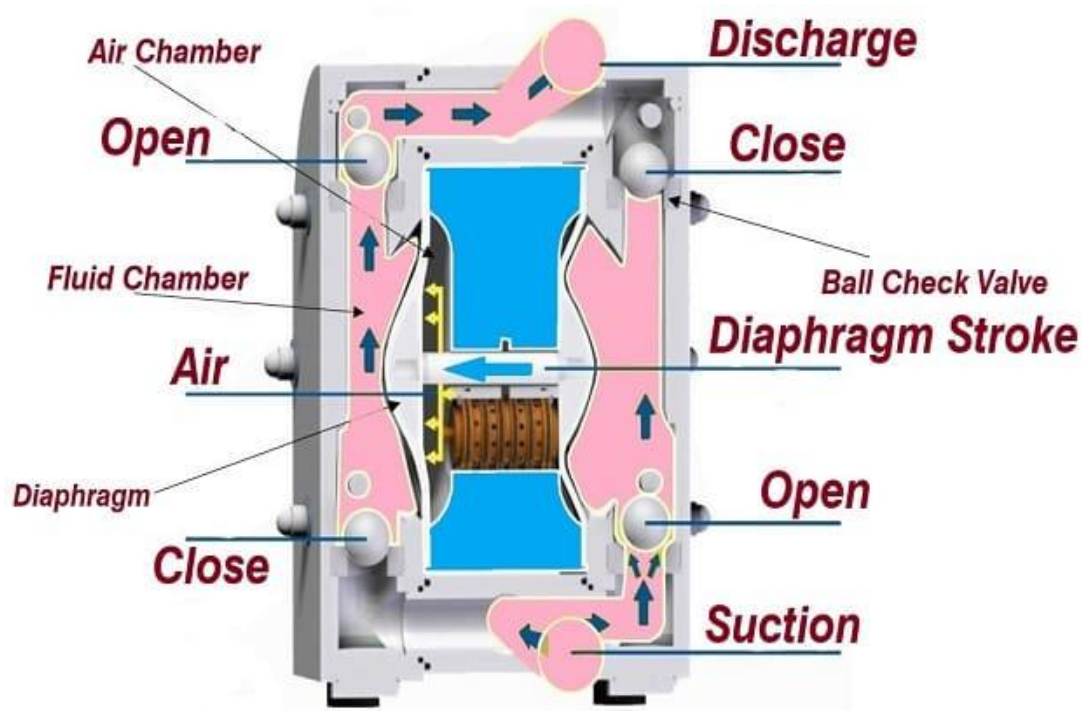
Kuva 11: Henryn laki [27].

Typeä tai heliumia käytettäessä täytyy ottaa huomioon turvallisuustekijät vuoto-tilanteessa, kun taas paineilmaa käytettäessä vuoto tuotantotiloissa ei aiheuta tukehtumisen vaaraa.

### 3.2.2 Virtausohjattu järjestelmä

Virtausohjatussa järjestelmässä materiaalia syötetään tasaisesti tietyllä virtauksella. Virtausta voidaan ohjata esimerkiksi kalvopumpun tai massavirtasäätimen avulla. Massavirtasäätimessä on samassa virtausanturi ja komponentti, jolla virtausta säädetään. Säädetä on säiliön paineella tapahtuvaan säätöön verrattuna huomattavan nopea.





Kuva 12: Perinteinen kalvopumppu [28].

Kalvopumpussa on kaksi linjaa, jonka välissä moottori liikuttaa kalvoja edestakaisin luoden ali- ja ylipainetta linjoihin. Molemmissa linjoissa on kaksi takaiskuventtiiliä, jolloin pumpatessa materiaali jää pumpun kammioon ja siirtyy siitä eteenpäin. Moottorin nopeutta säätämällä saadaan tietty virtaus aikaiseksi putkistoon. Pumput ovat kestäviä ja helppokäyttöisiä. Menetelmä on hyvin yleisesti käytetty.

Ruiskupumppu on lääketieteestä ja laboratorioista tuttu väline. Ruiskupumpussa servomoottori ohjaa ruiskun syöttöä tietyllä nopeudella, jolloin syöttöputkeen saadaan hyvin tasainen ja tarkka virtaus. Ruiskupumpulla saadaan siirrettyä tarkasti hyvin pientä materiaalmäärää.



Kuva 12: WPI Aladdin 4000-ruiskupumppu [29].

Liuottimia huomattavan osan sisältävää materiaalia käytettäessä on syytä käyttää suljettua säiliötä höyrystymisen välttämiseksi. Ruiskupumpun syöttäessä virtausohjattua järjestelmää ei säiliötä tarvitse paineistaa. Jos materiaalisäiliön paine on liian korkea, voi syöttöjärjestelmässä olevat takaiskuventtiilit pakko-ohjautua auki, jolloin syöttö ei toimi, kuten sen on tarkoitettu toimivan. Höyrystyviä liuottimia käytettäessä on syöttösäiliön syytä olla suljettu. Säiliön ollessa suljettu voidaan paine tasoittaa esimerkiksi mekaanisen alipaineventtiilin avulla. Tällöin pumpun ladatessa materiaalia säiliöstä mekaaninen alipaineventtiili syöttää korvausilmaa säiliöön, jolloin säiliöön ei synny alipainetta. Paineen lasku säiliössä nostaa materiaalin liikkeen vastusta syöttöputkessa.

### 3.2.3 Materiaalin kulutuksen määrittäminen

Pinnoitteissa ja maaleissa materiaali koostuu erilaisista liuottimista, lisäaineista ja kiinteästä aineesta. Halutun kuivan pinnan paksuuden avulla voidaan määrittää pinnoitteen märkäpaksuus ja tämän avulla voidaan määrittää käytettävän materiaalin teoreettinen määrä pinta-alalle.

Nanopinnoitteissa käytettävän materiaalin määrä on esimerkiksi maaleihin verrattuna pieni. Tämän lisäksi kiinteän aineen osuus materiaalista on yleensä todella pieni. Tämä tarkoittaa sitä, että materiaalista haihtuu suurin osa kuivauksen aikana.

Maaleissa kiinteän aineen määrä voi olla jopa 60 %. Kuivan maalikerroksen paksuus voidaan laskea lisätyn maalikerroksen paksuuden avulla, joka voidaan maalatessa mitata erilaisilla mittalaitteilla. Kuivakalvon paksuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$DFT = WFT * SC / 100$$

Märkäkalvon paksuus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$DFT * 100 / SC = WFT$$

Maalipinnan märkäpaksuus ilmoitetaan yleensä mikrometreinä pinnoitettavan kappaleen pinnalla. Märkäpaksuudesta voidaan määrittellä teoriassa tarvittava materiaalmäärä neliömetrille. Mikrometrin paksuus neliön pinta-alalla vastaa tilavuudeltaan yhtä kuutiosenttimetriä, joka taas vastaa yhtä millilitraa. Koska käytettävän materiaalin asettuminen substraatin pinnalle riippuu monesta tekijästä, on todettava, että teoriassa määriteltä materiaalmäärä ei vastaa todellista menekkiä. Prosessia varten joudutaan testaamaan pinnoitteen tarve käytössä olevalla laitteistolla.

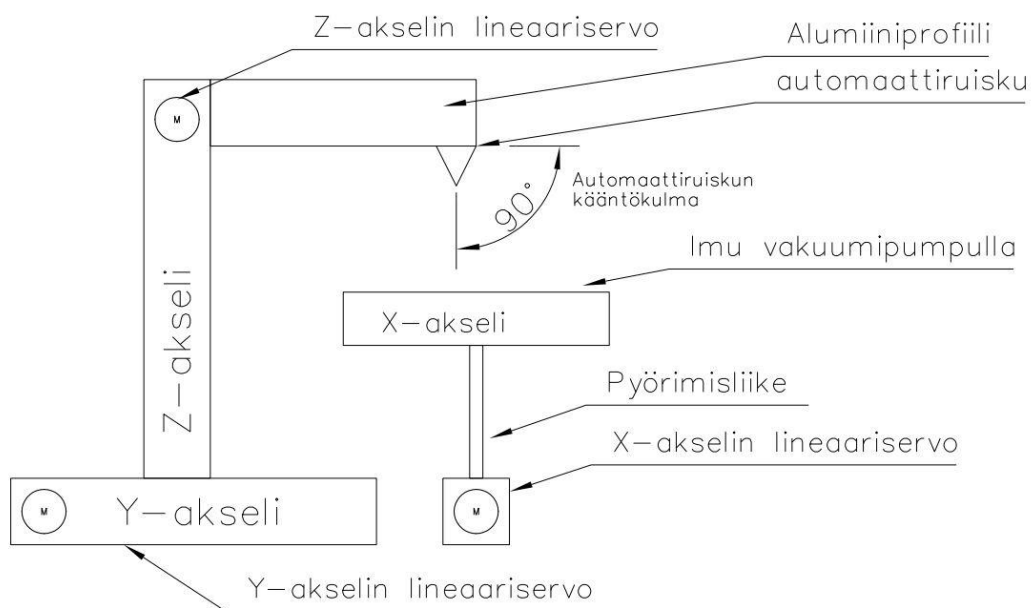
Prosessissa tarvittava pinnoitteen määrä voidaan laskea pinnoitettavan kappaleen pinta-alan, ruiskupistoolin siirtymän x-akselilla eli jaon, ruiskupistoolin liikkeen nopeuden y-akselilla ja materiaalivirtauksen avulla. Materiaalivirtauksen määrittämiseen ja pinnoitteen paksuuteen vaikuttaa myös ruiskupistoolin etäisyys kappaleesta eli z-akselin säätö. Pinnoitteen paksuus piikiekon pinnalla voidaan mitata spektrometrillä. Tarpeen mukaan pinnoitteen tasaisuus voidaan mitata myös esimerkiksi ellipsometrillä. [30.]

Nanopinnoitteiden pinnan paksuuden ollessa alle 1 mikrometrin, on pinnan paksuuden mittaamiseen käytettävät toimintatavat rajalliset. Optitune Oy:llä pinnoitteiden mittaamiseen käytetään spektrometriä.

## 4 Spindle Spray

### 4.1 Toiminta ja käyttö

Optitunen ruiskupinnoitusprosessissa toimii kone nimeltä Spindle Spray. Kyseinen kone on noin 10 vuotta vanha. Kone on hyvin monipuolinen, ja siitä löytyy lisätoimintoina infrapunalämmitin ja tehokas ultraviolettivalo. Kappaleen siirto toimii lineaariservolla, ja kappale pysyy paikoillaan vakuumpumpun aikaansaa- man imun avulla. Pinnoitettavaa kappaletta on myös mahdollista pyörittää. Kone on asennettu ilmastoituun kehikkoon, joka on varustettu HEPA-suodattimilla. Koneella on mahdollista pinnoittaa sekä vaaka- että pystysuunnassa.



Kuva 14: Spindle Spray -pinnoituksen ohjauksen mekaaninen rakenne.

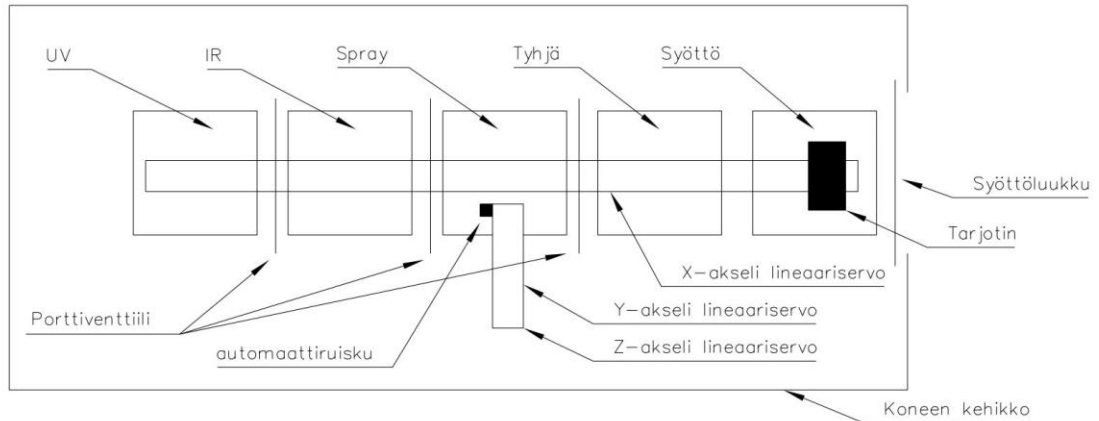
Koneella tehtävä tuotanto on tällä hetkellä vähäistä, ja koneen käyttö keskittyy tutkimus- ja kehitystoimintaan. Koneen yleisin käyttötapa on 10x10 cm kokoisten 2D-kappaleiden pinnoitus.

Koneen HMI:n avulla on mahdollista muokata erilaisia parametrejä, kuten liikkeen suunnan ja nopeuden määrittäminen pinnoituksen aikana. Kappaletta voi tarpeen mukaan myös pyörittää, mikä on hyvä toiminto esimerkiksi pyöreiden 3D-kappaleiden pinnoitukseen. Esimerkkinä pyörimisliikkeelle soveltuvasta prosessista on paistinpannun pinnoitus. Pinnoitteen paksuuteen voidaan vaikuttaa säätämällä koneen liikkeitä ja pyörimisnopeutta. Koneen asetukset määritetään testaamalla prosessi piikiekon pinnoittamisella. Koneeseen voidaan myös asettaa erilaisia pinnoitusalueita, ja niiden avulla voidaan pinnoittaa useita pieniä kappaleita yhdellä pinnoitusyhdöllä.

## 4.2 Kappaleiden käsittely

Puhdas substraatti asetetaan koneeseen syöttöluukussa olevalle tarjottimelle, joka on varustettu imulla. Tarjottimen pohjalla on reikiä, joista vakuumpumpun tekemä alipaine kiinnittää substraatin tarjottimen pintaan. Tarjotin suojataan muovilla ennen substraatin asettamista. Muoviin tehdään tarpeen mukaan reikiä sille tarkoitetulla neulalla kappaleen koon mukaan. Tarjottimelle on mahdollista asettaa useita pinnoitettavia kappaleita tarpeen mukaan. Tarjottimia on erilaisia ja niitä voi tarpeen mukaan vaihdella.

Kun vakuumin imu on sopivalla tasolla, eli kappale on kiinnittynyt sopivasti tarjottimeen, voi pinnoituksen aloittaa. Syöttöluukun sulkemisen jälkeen tarjotinta siirtävä servomoottori siirtää tarjottimen kammioon. Siellä tarjotinta siirtävä servomoottori sekä ruiskupistoolia siirtävät servot muodostavat ohjelmoidun liikkeen. Servomoottorien lähtiessä liikkeelle ohjataan ruiskusuuttimen neula paineilman avulla auki-asentoon. Neulaa ohjataan logiikan kautta magneettiventtiilin avulla. Samalla venttiilillä ohjataan auki ruiskusuuttimen puhallus- ja atomisointilinjojen ilmavirtaukset.



Kuva 15: Spindle Spray -koneen rakenne.

Spray-ohjelman loppumisen jälkeen ohjautuu tarjotin takaisin syöttöluukulle, josta pinnoitettu kappale siirretään uuniin kovetukseen. Kovetuksen ja jäähtymisen jälkeen pinnoitus on valmis.

#### 4.3 Muutostarve

Tutkimustyössä on erittäin tärkeää, että pinnoitukseen käytettävät laitteet ovat tarkkoja ja pinnoitus tasalaatuista. Pinnoitusprosessin toistettavuus, laitteiston kunnossapito ja pinnoitteen paksuuden vaihtelun minimoiminen ovat tärkeitä tekijöitä tutkimuksessa.

Optitunella käytetyssä syöttöjärjestelmässä materiaalisäiliö on paineistettu, eikä materiaalin virtausta tarkkailla millään tavalla. Laitetta käytetään erilaisten materiaalien pinnoitukseen, ja esimerkiksi syöttöputkistoon jäänyt kuiva-aine voi irrota virtauksen seurauksena putken pinnoilta aiheuttaen mahdollisia tukoksia ruiskupistoolissa. Tästä seuraa se, että pelkästään syöttöjärjestelmän painetta tarkkailemalla virtaus saattaa vaihdella tilanteen mukaan huomattavasti.

Virtausohjattu järjestelmä palvelee tutkimustyötä paremmin. Materiaalin virtauksen säädön avulla voidaan myös varmistaa käytettävän materiaalin määrä tarkemmin. Tämä myös vähentää järjestelmän jatkuvan kalibroimisen tarvetta,

joka on kuormittava ja aikaa vievä vaihe ruiskupinnoituskoneen päivittäisessä käytössä.

Materiaalin kulutus voi vaihdella huomattavasti käytettävän materiaalin mukaan. Eri materiaalisekoituksilla on omat ominaisuutensa, jotka vaikuttavat myös viskositeettiin ja painoon, aineen leviämiseen substraatin pinnalla sekä materiaalin haihtumiseen pinnoitusvaiheessa.

Pinnoitusvaiheessa tapahtuu materiaalihäviötä riippuen käytettävästä materiaalista ja laitteistosta. Pinnoitusvaiheessa tapahtuvan häviön laskeminen on erittäin vaikeaa, ja tästä syystä paras tapa varmistaa pinnoitteen kulutus ja sopiva paksuus on mitata se asiakkaan laitteella tapauskohtaisesti. Tästä huolimatta tietämällä tarkan materiaalin kulutuksen omalla laitteella on mahdollista päästä lähelle asiakkaan laitteella tarvittavaa materiaalin määrää. Tällä tavoin asiakkaan prosessin optimointi on helpompaa.

## **5 Suunnittelu**

Syöttöjärjestelmän suunnittelutyön ensisijainen tavoite on parantaa ruiskupinnoituskoneen työn tuloksen toistettavuutta sekä vähentää jatkuvan kalibroimisen tarvetta. Tämän lisäksi tavoite on tuoda helpommin tietoa saataville yksittäisten pinnoitusmateriaalien kulutuksesta. Koska sähkö- ja automaatiokuvia tai muitakaan suunnitelmia koneesta ei ole saatavilla, on muutoksen suunnittelu rajoitettua. Tästä syystä suunnitelmassa pyritään asentamaan koneeseen lisäosa eikä tekemään muutoksia olemassa olevaan järjestelmään. Asennustyön ajankäyttö pyritään minimoimaan koneen suuresta käyttötarpeesta johtuen.

Suunnitelman tavoitteiden täytyminen voidaan todeta muutostyön toteutuksen jälkeisen pinnoitustyön seurannalla. Seurannassa tarkastellaan halutun pinnoitepaksuuden toistettavuutta samalla virtausasetuksella. Seurantajakson aikana pinnoitteen paksuutta seurataan tiheästi pinnoitustyön ohessa.

Työn tavoitteet voidaan todeta saavutetuiksi, jos seurantajakson aikana pinnoitteen paksuus ja laatu pysyy pinnoitemateriaalilta edellytetyissä toleransseissa.

## 5.1 Syöttöjärjestelmä

Tällä hetkellä materiaalin syöttöjärjestelmä on paineohjattu. Materiaalisyötön paineen on vuosien käyttökokemuksen myötä todettu olevan riippuvainen materiaalin ominaisuuksista ja olosuhteista. Esimerkiksi pienimmätkin materiaali jäämät ja ruiskupinnoituskoneen pistoolin neulan kuluminen vaikuttaa paineeseen. Tästä syystä järjestelmä vaatii jatkuvaa kalibroimista pinnoituksen yhteydessä eikä alkuperäisessä järjestelmässä ole pinnoitemateriaalin virtauksen mittausta.

Yksi järjestelmän muutoksen tärkeä tekijä on ohjata materiaalisyöttöjärjestelmää aineen virtauksen avulla. Ottaen huomioon käytettävän materiaalin määrän on ruiskupumppu sopiva valinta materiaalin syötön ohjaukseen. Ruiskupumppu on yleisesti käytetty pumpputyyppejä tilanteessa, jossa materiaalin kulutus on pieni ja materiaalin virtauksen halutaan olevan mahdollisimman tasainen. Ruiskupumpun järjestelmä pitää syötön virtauksen huolimatta pienistä muutoksista syöttöjärjestelmän virtausvastuksessa. Tällä tavoin voidaan jatkossa vähentää jatkuvaa kalibroimisen tarvetta.

Tutkimuskäytössä ruiskupinnoituskone ei tarvitse kovinkaan suurta määrää materiaalia pinnoitukseen. Arvioitu materiaalin maksimikulutus on noin 150 millilitraa minuutissa. Tällä hetkellä käytössä on 250 millilitran pullo, jonka tilavuudesta vain osaa käytetään. Pinnoitussyklin pituus on 24 sekuntia, jolloin pinnoitussykliin arvioitu maksimikulutus on noin 60 millilitraa. Ruiskupumpun säiliön voi täyttää tarpeen mukaan pumpun käyttöjärjestelmästä ennen pinnoitussykliä ruiskupumpun toimiessa yhdellä säiliöllä. Ruiskupinnoituskoneen ollessa tuotantokäytössä voi ruiskupumppua käyttää kahdella säiliöllä, jolloin ruiskupumpun järjestelmä täyttää säiliöt automaattisesti.

World Precision Instruments -yritys tarjoaa tähän tarkoitukseen sopivaa pumpumallia Aladdin 4000, jota tässä työssä suosittelen hinnan ja laadun kannalta



käyttämään. Aladdin 4000 -mallissa yhden ruiskun maksimikoko on 60 ml, joka soveltuu tähän käyttötarkoitukseen hyvin. [29.]

Paineohjauksen poistumisen myötä paineistettu pullo tai säiliö ei ole koneen toiminnallisuuden kannalta tarpeen. Pinnoitemateriaali koostuu osittain liuottimista, jotka haihtuvat huoneilmaan. Puhdastilan tehostettu ilmanvaihto lisää ilman virtausta, mikä edistää pinnoitemateriaalin liuottimien haihtumista. Tällä perusteella on suositeltavaa säilyttää pinnoitemateriaalia suljetun säiliön sisällä.

Virtausohjatussa järjestelmässä suljetun säiliön ylimääräisellä tilavuudella ei myöskään ole merkitystä materiaalisyötön kannalta. Säiliön koko on syytä pitää kompaktina, koska säiliön ylimääräinen tilavuus tuo lisää ilmatilaa liuottimien kaasuuntumiselle. Liuottimien kaasuuntuminen muuttaa materiaalin viskositeettia ja vaikuttaa materiaalin leviämiseen pinnoitettavalle pinnalle.

Ruiskupumpun täyttövaiheessa materiaalia siirtyy säiliön sisältä astiasta pumppuun, jolloin materiaalin määrä säiliössä vähenee. Materiaalin väheneminen suljetussa astiassa laskee painetta, ja paineen laskeminen lisää ruiskupumpun syöttölinjan virtausvastusta. Virtausvastuksen pienentämiseksi suljettuun säiliöön on syytä lisätä alipaineventtiili, joka tasaa painetta säiliössä.

Järjestelmää muutettaessa optio ylipaineen ohjaamiseen suljettuun materiaalisäiliöön jätetään järjestelmään. Paineilmatulo voidaan kytkeä suljettuun materiaalisäiliöön, jos pieni ylipaine todetaan tarpeelliseksi lisävoimaksi ruiskupumppua ladattaessa.

Pumppu tarvitsee toimiakseen takaiskuventtiilit tulo- ja lähtösuuntaan. Ilman näitä materiaali voi kulkea väärään suuntaan syöttöjärjestelmässä, mikä lisää myös pinnoitemateriaalin kontaminaatoriskiä.

## 5.2 Automaatio

WPI Aladdin 4000 -ruiskupumppumoduulia on mahdollista ohjata TTL Logic - ohjausjärjestelmällä yhdeksällä pinnillä varustetun Dsub9-liittimen kautta. Koska tässä tapauksessa pinnoituskoneen omaan automaatiojärjestelmään kajoaminen on mahdotonta, ratkaistaan asia kaappaamalla signaali ruiskupistoolin paineilmasyöttöä ohjaavalta magneettiventtiililtä.

TTL Logic-järjestelmä on 5 voltin järjestelmä, joka havaitsee yli 3,5 voltin jännitteen nousevaksi eli bitti on 1, ja alle 1,5 voltin jännitteen laskevaksi eli bitti on 0. Aladdin 4000 -pumppumoduulissa liittimen toiselle pinnille on mahdollista asettaa ohjattavaksi level-toiminto, joka käynnistää pumpun signaalin ollessa 1 ja sammuttaa pumpun signaalin ollessa 0. [29.]

Tämän lisäksi ohjauspinnille tuodaan +5 voltin jännite ja 0 voltin jännite ohjaavalta toimilaitteelta, ja tätä kutsutaan yleisesti kättelyksi. Tällä hetkellä laitteistossa ei ole käytössä viiden voltin jännitejärjestelmää, joten se on aiheellista lisätä kokonaisuuteen. Kättely tuodaan tässä tapauksessa suoraan jännitelähteeltä ohjausliittimelle. Tätä käyttöä varten rakennetaan oma ohjauskotelo, jolloin koneen sähkö- ja automaatiojärjestelmää ei tarvitse muuttaa. Ohjauskotelo sijoitetaan ruiskupinnoituskoneen sähkökaapin välittömään läheisyyteen. Sähkökaapin läheisyydessä sijaitsee myös koneen käyttäjä, HMI:nä toimiva kannettava tietokone ja materiaalisyöttösäiliö. Ohjauskotelon on hyvä olla tiiveysluokaltaan IP44 eli roiskevesitiivis, koska kotelo joudutaan kiinnittämään materiaalisyöttösäiliön läheisyyteen.

Ohjaukseen käytetty viiden voltin jännitejärjestelmä kytketään ruiskupumpun ohjauskoteloon. On suositeltavaa käyttää johdonsuojakatkaisijaa viiden voltin jännitelähteen toisiopuolella varotoimena. Tällä tavoin voidaan vähentää esimerkiksi oikosulun aiheuttamaa laiterikon vaaraa. Vallitettavasti TTL Logic -järjestelmän virrankäytöstä ei löytynyt tietoa WPI Aladdin 4000 -manuaalista. Johdonsuojakatkaisijan koko valittiin mahdollisimman pieni tasajännitteelle soveltuva ja helposti saatavilla oleva johdonsuojakatkaisija. Kooksi valikoitui yhden

ampeerin johdonsuojakatkaisija, joka antaa sähköisen tehon kaavan mukaan viiden voltin jännitteellä mahdollisuuden käyttää maksimissaan viiden watin tehoa. Seuraavana on esitetty sähköisen tehon kaava.

$$P = U * I$$

### 5.3 Sähkö

Tässä tapauksessa koneen sähköjärjestelmän muutokset kohdistuvat pienoisjännitteisiin. Koneen 230 voltin jännitejärjestelmään ei tehdä lisäyksiä, vaan ruiskupumppu kytketään laitekaapelilla pistorasialta. Myös ohjausjärjestelmään lisättävä viiden voltin jännitelähde toteutetaan jännitelähteen omalla kiinteällä kaapelilla, jolloin uusia 230 voltin asennuksia ei synny. Tästä johtuen järjestelmään ei tarvitse tehdä sähkömittauksia. [31.]

### 5.4 Huuhtelu

Materiaalisyöttölinjaa on tärkeää huuhdella tukkeutumisen välttämiseksi ja materiaalin puhtauden säilyttämiseksi. Huuhtelu tapahtuu syöttämällä puhdasta etanolia linjaan.

Paineohjatussa järjestelmässä huuhtelu suoritetaan vaihtamalla pinnoitusmateriaalisäiliö etanolisäiliöön. Tämän jälkeen puhdasta etanolia syötetään linjan läpi pinnoituskammioon, josta etanoli haihtuu tuuletuksen mukana suodattimen läpi poistokanavaan.

Ruiskupumpulla toimivassa virtausohjatussa järjestelmässä huuhtelu suoritetaan samalla periaatteella. Huuhtelun jälkeen on mahdollista vaihtaa käytetty ruisku puhdistettuun ruiskuun, jolloin käytetty ruisku saadaan puhdistettua myöhempää käyttöä varten. Putkisto on kemikaaleja kestävä materiaali, ja siinä on myös hyvä pitää käytön jälkeen etanoliliuosta, jolloin ylimääräinen irtoava materiaali saadaan likoamaan etanoliin.

## 5.5 Anturointi

Aladdin 4000 -sarjan ruiskupumpun ohjaukseen voi tarpeen mukaan liittää TTL Logic -järjestelmän avulla virtaus- tai painekeytkimen.

Pumppumoduulissa on ylikuormituksen havaitseva turvaohjelma. Pumppu pysähtyy ja antaa hälytyksen, jos servomootorin kuormitus nousee liian suureksi. Servomootorin maksimikuormitus on miniminopeudella 45 kilogrammaa ja maksiminopeudella 8 kilogrammaa. Ruiskujärjestelmän materiaalisyöttölinjan anturoinnin rajoitteena on erittäin pieni virtaus. Käyttötarkoitukseen vaaditaan laajasti kemikaaleja kestävä anturin valmistusmateriaali. Soveltuvien virtaus- ja paineanturien valikoima on pieni, ja komponenttien hinnat kalliita. Tästä syystä anturointia ei tässä työssä lisätä materiaalisyöttölinjaan. [29.]

## 6 Muutostyö

### 6.1 PI-kaavio

Tämän insinööriyön liitteenä nro 2 on alkuperäisen koneen PI-kaavio ja liitteenä nro 3 on muutossuunnitelman PI-kaavio. Kaaviot on piirretty Cadmatic PI -ohjelmalla.

### 6.2 Sähkökuvat

Tämän insinööriyön liitteenä nro 1 on piirikaavio. Työssä tehdään muutoksia ai-noastaan pienoisjännitejärjestelmään. Alkuperäisiä sähkökuvia ei ollut saatavilla, joten kaavioon ei ole lisätty viitteitä sähkökuviin. Työssä käytettävä ohjaus-signaali jaetaan koneen logiikalta tulevan ruiskusuutinta ohjaavan magneetti-venttiilin syöttökaapelista. Piirikaavio on piirretty Cadmatic Electrical -ohjelmalla.

### 6.3 Muut

Työn ohessa koneeseen lisätään paineilmajakotukki, joka kytketään paineilmajärjestelmään silmukkamallilla. Tämä tapahtuu haaroittamalla paineilman syöttölinja pääsyöttölinjassa olevan regulaattorin jälkeen ja asentamalla molemmat linjat jakotukin päihin asennettuihin liittimiin. Tämä lisää järjestelmän tilavuutta ja vähentää paineilmajärjestelmän epätasaisuuksia nykyiseen y-haaroilla rakennettuun järjestelmään verrattuna. Tästä ei ole olemassa vertailumittauksia, mutta tällä hetkellä konetta käytettäessä on huomattavissa epätasaisuuksia paineilman syötössä.

Järjestelmän muutoksen hinta on halpa verrattuna saatavaan hyötyyn. Tämän lisäksi koneen paineilmajärjestelmään uusitaan noin kymmenen vuotta vanha pääsyöttölinjan regulaattori ja useita liittimiä ja letkuja.

Lisäksi koneen sähkökaapista poistetaan rungossa olevat HEPA-suodattimien sähkönsyötöt, ja ne lisätään toimivaksi puhdastilan järjestelmän yhteyteen kytkimen avulla. Tämä johtuu siitä, että nykyisessä järjestelmässä koneen rungon ilmastoinnin korvausilma tuodaan HEPA-suodattimien kautta rungon sisälle. HEPA-suodattimet ovat toiminnassa vain koneen pääkytkimen ollessa on-asennossa, kun taas suodattimet halutaan pitää päällä huolimatta siitä, että onko kone toiminnassa vai ei. Jatkuva puhdas korvausilma puhdistaa ja vähentää haitallisia partikkeleita koneen rungon sisällä.

HEPA-suodattimien poistaminen koneen järjestelmästä ei vaadi erityisiä sähkömittauksia, koska koneeseen ei lisätä osia, jotka voivat aiheuttaa tarkastamattomana vaaratilanteita. Sen sijaan työ vaatii sähköalan ammattihenkilön pätevyyden. Työ tehdään jännitteettömänä, eikä kaapeleiden poistaminen järjestelmästä aiheuta vaaraa.

HEPA-suodattimien asentaminen puhdastilan järjestelmän yhteyteen vaatii sähköalan ammattihenkilön pätevyyksien lisäksi sähkömittaukset, jotka suoritetaan S2-sähkölupien omaavan henkilön valvonnan alla. Tämän toteutuksen tekee sertifioitu aliurakoitsija.

## 7 Yhteenveto

Tässä työssä käytiin läpi nanopinnoitusprosessin vaiheita ja erilaisia nanopinnoituksessa käytettäviä tekniikoita. Tekniikan esittely alustaa olemassa olevan ongelman yhtä ratkaisuvaihtoehtoa ja muutostyön suunnittelua. Muutostyö käytiin läpi pintapuolisesti, jolloin tietyt osa-alueet jäivät suppeaksi. Työssä ei ollut tarkoituksena syventyä pieniin yksityiskohtiin vaan luoda yleisluontoinen suunnitelma ajankohtaisen ongelman ratkaisemiseksi. Ongelman ratkaisuun voi olla muitakin toimivia tapaa. Myös koneiden ja prosessilaitteiden suunnittelussa voi olla useita toimivia ratkaisuja luoda tarpeellisia ominaisuuksia.

Työn käytännön toteutus tullaan suorittamaan tämän työn jälkeen yrityksen aikatauluun sopivana ajankohtana. Tämän työn arvo yritykselle voidaan todeta vasta käytännön toteutuksen jälkeen.

## Lähteet

- 1 Sakib Yousaf, Mohamed Albed Alhnan, Aram Abdallah, Banu Abdallah, If-tikhar Khan, Waqar Ahmed. 2015. Emerging Nanotechnologies for Manu-facturing. 2.painos. Elsevier.
- 2 Grönroos. 2010. 3. General aspect of ultrasound. Ultrasonically enhanced disintegration. Teknologian tutkimuskeskus VTT.
- 3 Pintajännitysteoriaa. 2013. Verkkoaineisto. Jyväskylän yliopisto. Haku 30.1.2022. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/ako/Pintajannitys> Luettu 30.1.2022.
- 4 Pinnan muokkaus plasmakäsittelyllä. 2016. Verkkoaineisto. Fluid Finland. Hakupäivä 30.1.2022. <https://www.fluidfinland.fi/uutiset.html?63862> Luettu 30.1.2022.
- 5 Categorizing Surface Energy. 2021. Verkkoaineisto. 3M. Hakupäivä 27.12.2021. [https://www.3m.com/3M/en\\_US/bonding-and-assembly-us/re-sources/science-of-adhesion/categorizing-surface-energy/](https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/re-sources/science-of-adhesion/categorizing-surface-energy/) Luettu 27.12.2021.
- 6 Kuva: Patel 2021. Verkkoaineisto. Dyne pens: what they are and how to measure surface tension. ETP. Hakupäivä 3.12.2021 <https://www.electro-technicproducts.com/blog/dyne-pens-what-they-are-and-how-to-measure-surface-tension/> Luettu 3.12.2021.
- 7 Kuva: Plasma treatment explained. 2021. Verkkoaineisto. Henniker Plasma.Haku 3.12.2021. <https://plasmatreatment.co.uk/pt/plasma-techno-logy-overview/plasma-treatment-explained> Luettu 3.12.2021.
- 8 Kuva: Fricke, Koban, Jablonowski, Kocher. 2012. Verkkoaineisto. At-mospheric Pressure Plasma: A high-performance tool for the effecient re-moval of Biofilms. Hakupäivä 6.2.2022. [https://www.researchgate.net/figure/The-atmospheric-pressure-plasma-jet-kINPen08-INP-Greifswald-Ger-many-a-Schematic\\_fig11\\_230646064](https://www.researchgate.net/figure/The-atmospheric-pressure-plasma-jet-kINPen08-INP-Greifswald-Ger-many-a-Schematic_fig11_230646064) Luettu 6.2.2022.
- 9 2020. What is Oxygen plasma?. Verkkoaineisto. Plasma etch, Inc. Haku-päivä 28.12.2021. <https://www.plasmaetch.com/oxygen-plasma-treat-ment.php> Luettu 28.12.2021.
- 10 2020. What is Argon plasma? Verkkoaineisto. Plasma etch, Inc. Haku-päivä 28.12.2021. <https://www.plasmaetch.com/argon-plasma.php> [28.12.2021](https://www.plasmaetch.com/argon-plasma.php) Luettu 28.12.2021.

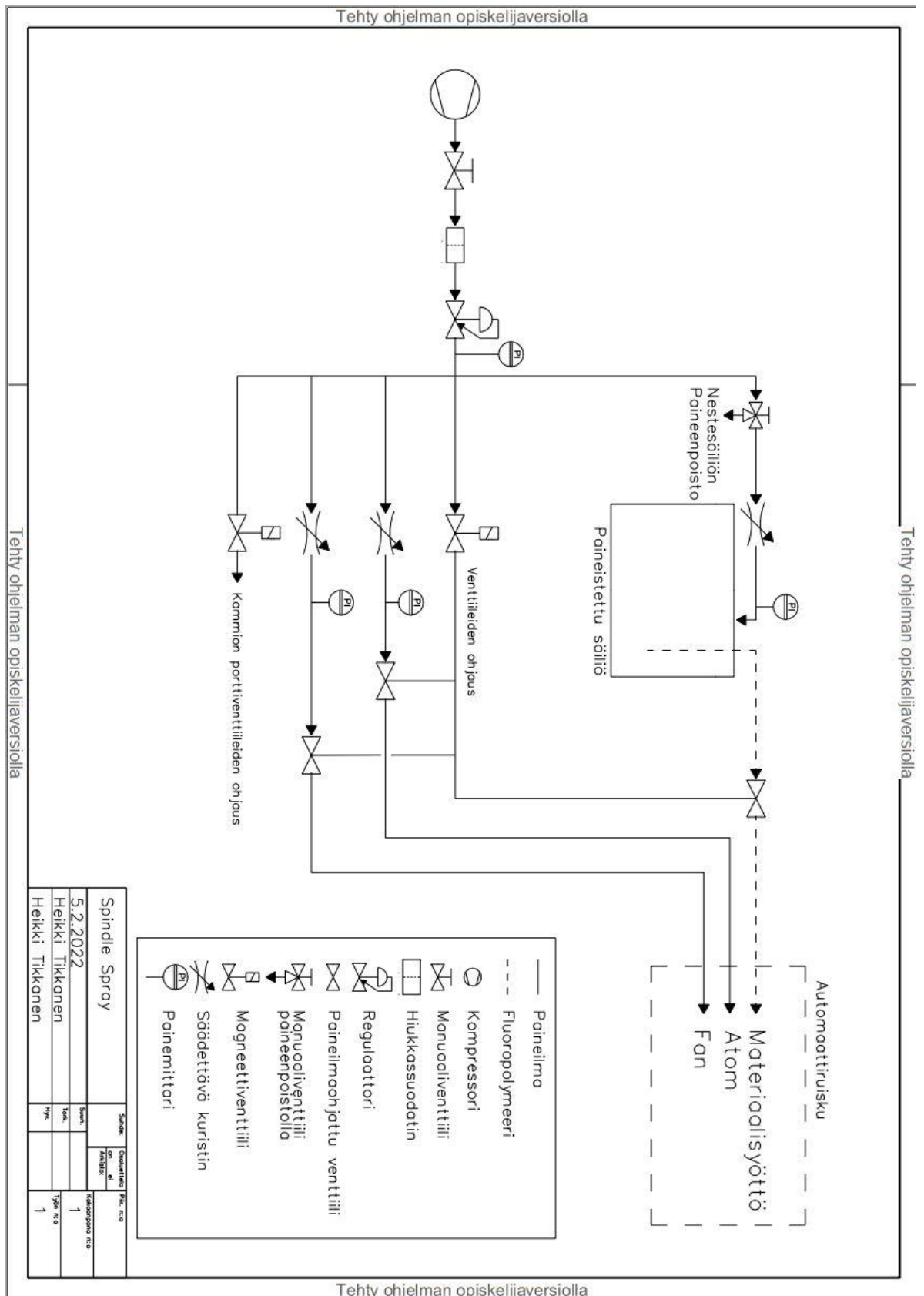
- 11 2022. Hydrogen (H<sub>2</sub>) Plasma. Verkkoaineisto. Thierry Corp. Hakupäivä 28.12.2021. <https://www.thierry-corp.com/plasma-knowledgebase/hydrogen-h2-plasma> Luettu 28.12.2021.
- 12 2022. Nitrogen Plasma. Verkkoaineisto. Thierry Corp. Hakupäivä 28.12.2021 <https://www.thierry-corp.com/plasma-knowledgebase/nitrogen-plasma> Luettu 28.12.2021.
- 13 Mäkimartti, Oskari 2016. Painettavan pinnoitteen tuotannollistaminen. Opiskelija ammattikorkeakoulussa. Insinööriyö. OAMK. Theseus-tietokanta.
- 14 Griffin, Hassan, Spooner. 2022. Verkkoaineisto. Introduction to spin-coating. Ossila. Spin-coating: Complete guide to theory and techniques. Hakupäivä 29.12.2021 <https://www.ossila.com/pages/spin-coating> Luettu 29.12.2021.
- 15 Dr. Podhajny 2004. What is cationic uv technology? Verkkoaineisto. Paper, Film & Foil Converter 29.2.2004. Hakupäivä 16.1.2022 <https://www.pffc-online.com/coat-lam/2206-paper-cationic-uv-technology> Luettu 16.1.2022.
- 16 Nienhuis. 2004. Review on drying and curing techniques of coatings. Verkkoaineisto. Verkkoaineisto. SHR. Hakupäivä 27.12.2021. <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/coste18/nienhuisdryingpaper.pdf> Luettu 27.12.2021.
- 17 Spooner. What is surface energy?. Verkkoaineisto. Ossila. A guide to surface energy. Hakupäivä 29.12.2021 <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy> Luettu 29.12.2021.
- 18 Kuva 6: Contact Angle Goniometry-tensiometry. Nanoscience instruments. Hakupäivä 3.1.2022. <https://www.nanoscience.com/techniques/tensiometry/>.
- 19 Kuva 7: Heavy duty linear abraser. Taber Industries. Hakupäivä 29.12.2021. <https://www.taberindustries.com/heavy-duty-linear-abraser/>.
- 20 Simple tests. Verkkoaineisto. Midwest Tungsten Service. Hakupäivä 3.1.2022 <https://www.tungsten.com/tips/simple-tests/> Luettu 3.1.2022.
- 21 Tenhunen, Malinen, Käsäkoski. 2002. Patenttjulkaisu. Teknillinen tutkimuskeskus VTT.
- 22 Kuva 8: Settembre 2019. Light and Dark: Understanding spectrometry. Hakupäivä 3.1.2022 <https://medium.com/@amesett/light-and-dark-understanding-spectrometry-fe538ad2aaa9>.



- 23 Happonen. Analyysimenetelmät kouluopetuksessa: Spektrofotometri. Kirjoittaja filosofian maisteri Helsingin Yliopistolta. Helsingin yliopisto.
- 24 Haze. Verkkoaineisto. Suomen Tasolasiyhdistys. Hakupäivä 30.12.2021 <https://www.tasolasiyhdistys.fi/lasitietoa/ongelmia/haze/> Luettu 30.12.2021.
- 25 Operational manual. 2014. Käyttöohje. Devilbiss. Hakupäivä 16.1.2022 [https://www.carlisleleft.eu/library/SB-E-2-CBA1\\_ENGLISH.pdf](https://www.carlisleleft.eu/library/SB-E-2-CBA1_ENGLISH.pdf).
- 26 What is the difference between LVLP or HVLP spray guns? Verkkoaineisto. Sames Kremlin. Hakupäivä 16.1.2022 <https://www.sames-kremlin.com/sao/en/faq-what-is-the-difference-between-lvlp-or-hvlp-spray-gun.html> Luettu 16.1.2022.
- 27 Hanselman 2021. How to deal with dissolved gas? Verkkoaineisto. Bronkhorst. Blog series: How to handle low liquid flows? Hakupäivä 16.1.2022. <https://www.bronkhorst.com/int/blog/blog-series-liquid-supply-using-a-pressure-vessel/> Luettu 16.1.2022.
- 28 Kuva 11: Waqar. What is a diaphragm pump? How does a diaphragm pump work? Hakupäivä 6.2.2022 <https://mechanicalboost.com/diaphragm-pump>.
- 29 Instruction manual Aladdin 4000. Käyttöohje. World Precision Instruments. Hakupäivä 16.1.2022 [https://www.wpi-europe.com/downloads/content/AL-4000\\_IM.pdf](https://www.wpi-europe.com/downloads/content/AL-4000_IM.pdf).
- 30 Mäkimartti, Oskari 2020. Excel-taulukko: Spray consumption per square. Optitune Oy.
- 31 Usein kysytyt sähkötöistä ja sähköasennuksista. Verkkoaineisto. Tukes. Hakupäivä 16.1.2022 <https://tukes.fi/tietoa-tukesista/usein-kysytyt-kysymykset/usein-kysyttya-sahkotoiden-tekemisesta> Luettu 16.1.2022.



# Nykyisen järjestelmän PI-kaavio



Tehty ohjelman opiskelijaversiolla

Tehty ohjelman opiskelijaversiolla

# Muutosuunnitelman PI-kaavio

