

**MUOVIFILMIN TUOTTAMINEN AUTOMATISOIDULLA
EKSTRUUSIOPROSESSILLA JA LAADUNVALVONTA KONENÄÖN
AVULLA**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Valkeakoski, Sähkö- ja Automaatiotekniikka

syksy, 2017

Manu Haikonen

Sähkö- ja Automaatiotekniikka
Valkeakoski

Tekijä	Manu Haikonen	Vuosi 2017
Työn nimi	Muovifilmin tuottaminen automatisoidulla ekstruusioprosessilla ja laadunvalvonta konenäön avulla	
Työn ohjaaja	Raine Lehto	

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tehtiin periaatesuunnitelma, jossa on selvitetty, mikä olisi paras tapa toteuttaa automaattinen laadunvalvontajärjestelmä, jolla tuotantotilanteessa valvoa ekstruusiopäällystyksessä käytettävää sulaa muovifilmiä. Suunnitelma oli tarkoitus rakentaa niin, että sen pohjalta pystytään tarvittaessa tekemään sähkö-, automaatio- sekä mekaaninen suunnittelu ja toteutus. Työn toinen tärkeä tarkoitus oli myöskin selvittää onko tehdyn suunnitelman perusteella mahdollista toteuttaa automaattinen laadunvalvontajärjestelmä liiketaloudellisesti kannattavalla tavalla.

Suunnitteluprosessin aikana syvennyttiin paperinjalostuksessa käytettävän yleisen tuotantomenetelmän eli ekstruusiopäällystyksen ja –laminoinnin teoriaan sekä tuotantomenetelmässä käytettävän sulan muovifilmin ominaisuuksiin sekä laadunvalvonnan vaatimuksiin. Teoriaosuudessa selvitettiin myös konenäön ja lämpökuvauksen toimintaperiaate mahdollisimman kattavasti. Teoriaosuudessa selvitettiin myös nykyaikaisen teollisuusautomaatio järjestelmän rakenne sekä toimintatapa.

Työssä on esitelty suunnitelma, joka käyttää Siemens S7 ohjelmoitavaan logiikkaohjaimen liitettyä konenäkölämpökuvauksista sulassa muovifilmissä olevien reikien todentamiseen ja merkitsemiseen. Laadunvalvontajärjestelmän rakenne antaa mahdollisuuden havaita virheet erittäin suurissa tuotantonopeuksissa, jolloin laadunvalvontajärjestelmä itsessään ei ole tuotantonopeutta rajoittava tekijä.

Avainsanat Ekstruusiopäällystys, laadunvalvonta, konenäkö

Sivut 78 sivua, joista liitteitä 4 sivua

Electrical and Automation Technology
Valkeakoski

Author	Manu Haikonen	Year 2017
Subject	Production of molten plastic film by automated extrusion process and machine vision operated quality control	
Supervisor	Raine Lehto	

ABSTRACT

In this thesis, a principle was made to find out which would be the best way to implement an automated quality control system in which to monitor the molten plastic film used in extrusion coating. The design was planned to be completed so that, if necessary, it is possible to carry out electrical, automation and mechanical design and implementation. Another important purpose of the work was also to find out whether the design enabled the automated quality assurance system to be implemented in a business-economically viable way.

During the work, the theory of the general production method used for paper converting, ie the theory of extrusion coating and laminating, and the properties of the molten plastic film used in the production process and the quality control requirements were deepened. The theoretical part of the thesis also explored the concept of machine vision and thermal imaging as comprehensively as possible. The structure and principle of operation of the modern industrial automation system were also studied.

The thesis introduces a design for using machine vision thermal imaging connected to the Siemens S7 programmable logic controller for detecting and marking holes in a molten plastic film. The quality control system provides the ability to detect errors at very high production speeds, so the quality control system itself is not a constraint on production speed.

Keywords Extrusion coating, quality control, machine vision

Pages 78 pages including appendices 4 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	EKSTRUUSIOPÄÄLLYSTYS JA -LAMINOINTI	2
2.1	Ekstruusiopäällistyksen ja -laminoinnin määritelmä	2
2.2	Ekstruusiopäällistyksen ja –laminoinnin ominaisuuksia	3
2.2.1	Adheesio	3
2.2.1	Adheesioon vaikuttavat tekijät	4
2.2.1	Adheesioon vaikuttaminen	6
2.2.2	Vesitiiveys	8
2.2.3	Vesihöyryn läpäisy	8
2.2.4	Kaasudiffuusiotiiveys	8
2.2.5	Happitiiveys	8
2.2.6	Kuumasaumautuvuus	9
2.2.7	Rasvasuoja	9
2.3	Laadunvalvonta	10
3	EKSTRUUSIOPÄÄLLYSTYS JA –LAMINOINTI TUOTANTOLINJAN RAKENNE.....	12
3.1	Aukirullaimet	13
3.1.1	Keskusakseli	14
3.1.2	Rullan kiinnityskarot	14
3.1.3	Generaattori jarru.....	14
3.1.4	Vaihtolaitteisto	14
3.2	S-vetotelat	15
3.3	Sivelyasemat.....	16
3.4	Kuivaimet.....	16
3.5	Esikäsitteilylaitteistot	17
3.6	Ekstruuderi	17
3.6.1	Rakenne	18
3.6.2	Muovinsyöttölaitteisto	18
3.6.3	Ruuvit ja sylinterit.....	19
3.6.4	Adapteri, sihtipakka ja vastapaineventtiili	21
3.6.5	Feedblock.....	21
3.6.6	Suutin.....	23
3.6.7	Siirtovaunu.....	26
3.7	Laminaattori	26
3.8	Mittaus- ja säätöjärjestelmä	27
3.9	Kiinnirullain.....	29
4	LINJAOHJAUSJÄRJESTELMÄ	30
4.1	Rakenne.....	31
4.1.1	Siemens keskusyksikkö ja ohjelmamuisti	32
4.1.2	Virtalähteet.....	32
4.1.3	Kommunikointiprosessorit	32
4.1.4	Liitäntäyksiköt.....	32
4.1.5	Toimintayksiköt	33

4.1.6	Sisään- ja ulostuloyksiköt	33
4.1.7	Kosketuspaneelit ja PC-pohjaiset valvomot	33
4.2	Toiminta käytännössä	34
4.2.1	Moottorikäytöt	34
4.2.2	Automaattiset hälytykset	35
5	KONENÄKÖ	35
5.1	Konenäön määritelmä.....	36
5.2	Toimintaperiaate	36
5.2.1	Kuvan muodostus	36
5.2.2	Kuvankaappaus.....	37
5.2.3	Kuvankäsittely	37
5.2.4	Kuvan analysointi.....	37
6	KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ	37
6.1	Konenäköjärjestelmän rakenne	38
6.2	Konenäkökamera	38
6.3	Valaistusjärjestelmä	39
6.4	Tiedonsiirtojärjestelmä	40
6.5	Kuvankäsittely- ja analysointiohjelmisto	42
7	LÄMPÖKUVAUS	44
7.1	Lämpökuvauksen periaate	45
7.2	Lämpökuvauksen teoriaa	45
7.2.1	Sähkömagneettinen säteily	45
7.2.2	Sähkömagneettinen spektri	45
7.2.3	Lämpösäteily eli infrapunasäteily	46
7.3	Mustan kappaleen säteily	46
7.4	Planckin säteilylaki	48
7.5	Emissiivisyys	51
8	LAADUNVALVONTAJÄRJESTELMÄ	53
8.1	Taustaa	53
8.2	Markkinoilla olevat järjestelmät	54
8.3	Suunnittelu	58
8.3.1	Mittaustapa	58
8.3.2	Tiedonsiirtoväylä	60
8.3.3	Kvankeräyslaitteisto	61
8.3.4	Teollisuus-PC.....	62
8.3.5	Konenäköohjelmisto.....	64
8.3.6	Laajennettavuus	65
8.4	Suunnitelman testaus	65
8.4.1	Kameran testaus.....	66
8.4.2	Järjestelmän hinnoittelu.....	67
8.4.3	Konenäköohjelmiston ja kameran testaus.....	68
8.4.4	Virheiden etsintä konenäköohjelmistossa	70
9	YHTEENVETO	71

Liitteet

- Liite 1 Ekstruusiopäällystys tuotantolinjan periaate kuva
- Liite 2 Muovifilmin virheitä valmiissa tuotteessa
- Liite 3 Muovifilmin virheitä valmiissa tuotteessa
- Liite 4 Materiaalirata virheitä valmiissa tuotteessa

1 JOHDANTO

Paperiteollisuuden vuosina 2004-2005 alkanut teollinen murros johti voimakkaaseen murrokseen myös paperinjalostusteollisuudessa. Perinteisten paperiteollisuuteen suunnattujen tuotteiden kysynnän laskiessa voimakkaasti, paperinjalostusteollisuudessa keskityttiin uusien markkinoiden etsimiseen ja löytämiseen. Valtaosa uusista löydetyistä markkinoista oli vailla tuotteita, jotka olivat perinteisiä tuotteita huomattavasti teknisempiä. Teknisemmillä tuotteilla oli myös aiempaa enemmän vaadittuja ominaisuuksia, jonka vuoksi myös laadulliset vaatimukset kasvoivat ja monipuolistuivat. Pääosa kehitystyöstä suunnattiin uusien tuotteiden teknisten vaatimusten toteuttamiseen, jonka vuoksi laadunvalvonnan kehittäminen on jäänyt monin paikoin jälkeen muusta kehityksestä.

Samaan aikaan teollisuusautomaation kehitys on menneinä vuosina kiihtynyt, ja tulevana vuosina kiihtyy entisestään. Kehittyvä teollisuusautomaatio tarjoaa uusia mahdollisuuksia myös paperinjalostusteollisuudessa, mikäli automaation kehitykselle varataan resursseja. Konenäköjärjestelmät ovat yksi teollisuusautomaation nopeimmin kehittyvistä osa-alueista. Toiseksi Suomessa on kuitenkin verrattain vähän konenäköosaamista tarjoavia yrityksiä.

Quattrotec Oy on kotimainen yritys, joka perustettiin joulukuussa 2002 Valkeakoskella. Yrityksen pääasiallinen liiketoiminta on teollisuuskoneiden suunnittelua ja nykyaikaistamista. Opinnäytetyön valmistumisen hetkellä yrityksellä on 10 työntekijää erilaisissa hallinnollisissa tehtävissä sekä suunnittelu- ja asennustöissä. Quattrotec Oylla on asiakkaita, sekä kotimaassa, että ulkomailla. Yrityksen vientitoiminta suuntautuu pääasiassa Eurooppaan ja Aasiaan. Vuosittainen liikevaihto on noin 3,5 miljoonaa euroa.

Tämän opinnäytetyön pääasiallinen tavoite on tuottaa suunnitelma, jossa on selvitetty mikä olisi paras tapa toteuttaa automaattinen laadunvalvontajärjestelmä, jolla tuotantotilanteessa valvoa ekstruusiopäällystyksessä käytettävää sulaa muovifilmiä. Ekstruusiopäällystyksen perusajatus on käyttää ehyttä muovikerrosta osana tuotetta. Toissijaisena työn tavoitteena on tuottaa aineistoa jolla pystyy perehdyttämään uusia teollisuusautomaation työntekijöitä, joille ei paperinjalostusteollisuus ole välttämättä tuttu.

2 EKSTRUUSIOPÄÄLLYSTYS JA -LAMINOINTI

Ekstruusiopäällystys ja -laminointi on yleinen paperinjaostusteollisuudessa käytettävä tuotantotapa. Sen toimintaperiaate pohjautuu tuotteissa käytettävään muovikerrokseen, jolla on lukemattomia eri ominaisuuksia ja vaatimuksia. Paperinjalostusteollisuuden tuotteiden teknisesti monimutkaistuksessa, myös laadunvalvonnan vaatimukset kasvavat.

2.1 Ekstruusiopäällystys ja -laminoinnin määritelmä

Ekstruusiopäällystys tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että jotain rautamaista materiaalia päällystetään ekstruusiotekniikkaa apuna käyttäen. Ekstruusiopäällystyksessä voidaan yhdistää kaksi erilaista materiaalia. Tuosta kutsutaan yhdistelmäa materiaaleiksi eli laminaateiksi, joihin saadaan ominaisuuksia, jotka korkeateknologisen pakkausteollisuuden ja rakennusteollisuuden kannalta ovat elintärkeitä. (Järvinen 2008).

Päällystysmenetelmät jaetaan ekstruusio ja koekstruusiopäällystykseen. Termiä ekstruusiolaminointi käytetään, kun sulalla muovilla yhdistetään kaksi eri alusrataa (Ylänen 1996). Koekstruusiopäällystys on menetelmä, jossa kahdesta tai useammasta ekstruuderista tulevat muovit yhdistetään yhdeksi siten, että materiaalit liittyvät toisiinsa, mutta eivät sekoitu. Materiaalivirrat yhdistetään lopullisesti feedblockissa. Muovigranulaatit sulatetaan ekstruuderissa, ja pursotetaan rakomaisen suuttimen läpi. Muovin puristuessa ekstruuderin suuttimen läpi muodostuu paksuhko, lämpötilaltaan 230-330 °C filmi, joka venytetään mahdollisimman nopeasti 10-50 kertaa ohuemmaksi filmiksi, ja puristetaan alusradan pintaan metallisen jäähdystelän ja kumisen puristustelän muodostamassa nipissä. Näiden kahden telän välissä oleva paine saattaa päällystettävän alusradan ja muovin kosketuksiin keskenään. Samalla, kun muovi tarttuu alusrataansa, se jäähtyy ja saa jäähdystelän pintaa vastaavan sileyden ja ulkonäön. Keskeisimpänä tavoitteena ekstruusiopäällystyksessä on muodostaa mahdollisimman korkealaatuista sulaa filmiä. Toiminnan tulee olla mahdollisimman tasaista ja tarkasti hallittua. Muodostuvan filmin pituus- ja poikkiprofiilin tulee säilyä mahdollisimman muuttumattomina ajon aikana, jolloin filmissä ei saisi olla paksuuden muutosta tai leveyden vaihtelua. Tuotettavan filmin lämpötilan tulee myös pysyä vakaana, koska lämpötilalla on ratkaiseva vaikutus sulafilmin adheesioon. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004).

Adheesiolla tarkoitetaan muovin ja alusradan välistä tarttuvuutta. Näiden kahden komponentin välinen tarttuvuus on LDPE:llä sitä parempi, mitä happettuneempaan ja lämpimämpään muovi tulee nippiin. (Kurri, Malen, Sandell & Virtanen 2002).

2.2 Ekstruusiopäällystysprosessin ja –laminoinnin ominaisuuksia

Ekstruusiopäällystysprosessi perustuu kokonaisuudessaan sulan muovifilmin levittämiseen erilaisten ratamuotoisten materiaalien pinnalle. Näin ollen tuotteen jokaisella muovikerroksella on oma erityinen tarkoituksensa ja vaatimuksensa. Eri muovityypeillä on kaikilla omat ominaisuutensa, samat ominaisuudet siirtyvät tuotteen muovikerrokseen. Muita tärkeitä laatuominaisuuksia on muun muassa muovin määrä. Ei riitä että tuotteessa on tietty muovikerros, vaan jokaisen muovikerroksen tulee olla myös muovimäärältään sopiva, eli jokainen muovikerros on ennalta määrätyn paksuinen. Jotta tuote olisi kauttaaltaan tarkoitukseensa sopiva, muovikerrosten täytyy olla kauttaaltaan laadukkaita ja tasalaatuisia. Eli, jos muovikerroksessa on reikä tai muovikerros on paksuudeltaan vaihteleva, muovikerros ei tavoita haluttua ominaisuutta ja toiminnallisuutta.

2.2.1 Adheesio

Adheesiolla tarkoitetaan erilaisten materiaalien yhteen tarttumista, ja pysymistä toisissaan kiinni. Käytännössä adheesio usein yhdistetään kuvaamaan sitä voimaa, joka tarvitaan irrottamaan toisiinsa kiinnittyneet materiaalit erilleen. Edellytyksenä hyvän adheesio-ominaisuuden syntymiselle kiinteän aineen ja nesteen välille on se, että eri pinnat pääsevät riittävän läheiseen kosketukseen ja se, että neste pystyy kastelemaan kiinteän aineen pinnan riittävän hyvin. Tämän jälkeen adheesioon vaikuttavat aineiden sekä fyysiset että kemialliset ominaisuudet. Paperiteollisuudessa adheesioon törmää muun muassa prosesseissa, kuten liimauksessa, laminoinnissa, kuumasaumauksessa, metalloinnissa ja painatuksessa. Useissa prosesseissa adheesio-ominaisuuden hallinta on prosessien toiminnan kannalta tarpeellista, mutta toisaalta joissain tapauksissa siitä voi muodostua oikea riesa. Tällöin pienetkin vaihtelut adheesiossa saattavat aiheuttaa vakavia ongelmia prosesseissa. (Karhuketo ym. 2004).

Yhtään yksittäistä adheesiota luotettavasti kokonaisuutena kuvaavaa teoriaa ei ole vielä kehitetty. Täten adheesioon vaikuttavia muuttujia on pyritty selvittämään erilaisilla teorioilla, kuten muun muassa diffuusioteorialla, mekaanisella kiinnittymisellä, kemiallisella kiinnittymisellä, sähköstaattisuusteorialla, termodynaamisen adsorption ja pintaenergian teorialla, lujitusteorialla, WBL eli heikon rajapinnan teorialla sekä adheesiotyö vastaan pettämisenenergia – teorialla. (Karhuketo ym. 2004).

Adsorptioteoria on yleisimmin adheesio-ominaisuuden selvittämiseen käytetty teoria, jolle keskeisiä asioita ovat materiaalien lähikontaktissa tapahtuva fysikaalinen ja molekyyli-tason vuorovaikutus. Adsorptioteoria tunnetaan myös kasteluteorianna. Teorian mukaan kastelu on välttämätöntä adheesio-ominaisuuden syntymisen kannalta, mutta keskinäinen diffuusio ei ole kuitenkaan tarpeellista hyvän adheesio-ominaisuuden saavuttamiseksi. Teorian mukaan adheesio-voimat muodostuvat molekyylien välisestä kontaktista ja sen myötä syntyvistä

pintavoimista, jolloin sekundääriset vetovoimat vetävät liimaa ja käsiteltävää pintaa kiinni toisiinsa. Pintoja yhteen vetävien voimien syntyminen edellytyksenä on pintojen riittävän läheinen kontakti. Näin ollen esimerkiksi paperin tai kartongin polyeteenipäällystyksessä nestemäisessä olomuodossa olevan polyeteenin tulee kastella paperin tai kartongin pinta riittävän hyvin, jotta perusedellytykset pintojen tarttumiselle olisivat olemassa. Tämän jälkeen pintojen kiinnittymisen määräävät kiinnitettävien materiaalien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Materiaalien ominaisuuksien mukaan pintojen välille voi syntyä tyypeiltään ja vahvuuksiltaan erilaisia sidoksia. Pintaenergiaa voidaan käyttää ilmaisemaan pinnan kastuvuutta. Pintaenergia jakautuu kahteen eri osaan: poolisuuskomponenttiin, jonka aiheuttavat pooliset molekyylit sekä dispersiokomponenttiin, jonka aiheuttavat puolestaan poolittomat molekyylit. Esimerkiksi riittävän hyvän adheesion aikaansaamiseksi paperin tai kartongin polyeteenipäällystyksessä päällystettävän alusradan pintaenergian tulee olla riittävän suuri, jotta polyeteeni kastaisi pinnan. (Karhuketo ym. 2004).

Adheesion määrittämiseksi on kehitetty laaja kirjo erilaisia testausmenetelmiä, joista yksi käytetyimmistä on peel-testi. Peel-testissä mitataan voimaa, joka tarvitaan liitettyjen kerroksien erottamiseksi toisistaan. Muita adheesion mittaamiseen käytettyjä testausmenetelmiä ovat muun muassa Perkins-Soutwick-testi, käsitesti, teippitestit sekä naarmutestit. Perkins-Soutwick-testissä päällystemuovi poistetaan alusradasta tai rikotaan paineilman avulla ja tarkkaillaan tarvittavaa painetta. Testissä painekäsittely suoritetaan, sekä päällystämättömälle, että päällystetylle puolelle, ja adheesio lasketaan jakamalla päällystämättömälle puolelle tarvittu paine päällystetylle puolelle tarvittu paineella. Käsitestissä toisiinsa kiinnittyneitä kerroksia revitään erilleen käsineen, ja arvioidaan irtoamista asteikolla nollasta viiteen, nollan ollessa huonoin tulos. (Salste 1972).

Laminaatteja tai monikerroslaminaatteja valmistettaessa muovikerroksen tärkein tehtävä useimmiten on muodostaa ja varmistaa riittävä adheesio yhteen kiinnitettyjen ratamuotoisten materiaalikerrosten välille. Jos adheesio pettää, laminaatin tai monikerroslaminaatin eri kerrokset delamiinoituvat eli irtoavat toisistaan. Tällöin tuotteen rakenne kärsii, eikä se enää täytä käyttötarkoitustaan.

2.2.1 Adheesioon vaikuttavat tekijät

Ekstruusiopäällystyksessä muovifilmin adheesio alusrataan on oleellinen ominaisuus, jolloin riittävän hyvän adheesion aikaansaaminen on yksi perusedellytyksistä prosessin onnistumisen kannalta. Ekstruusiopäällystyksessä adheesioon vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa muovin viskositeetti, muovin tiheys, muovin lämpöhapetushajoaminen, sulan lämpötila, muovin ja alusradan yhteensopivuus, muovin esikäsittely, alusradan esikäsittely, päällystysnopeus, suuttimen positio, suuttimen lämpötila, suuttimen ja päällystysnipin välisen vapaan välin pituus, päällystepaksuus,

päällystepaino, jäähdytystelan lämpötila, puristuskumitelan kovuus sekä puristuspaine. (Lampinen 2010).

Adheesioon vaikuttavia koneoloja ovat sulamislämpötila, vapaa väli, päällystysnopeus, päällystepaksuus, puristuspaine ja jäähdytysnopeus. Edellä mainituista tekijöistä ensimmäiset neljä ovat vaikutukseltaan keskenään riippuvaisia sekä merkittävimpiä adheesioon vaikuttavia koneolosuhteita. Puristuspaineen ja jäähdytysnopeuden vaikutus adheesioon on huomattavasti vähäisempää, ja niillä ei ole yhteisvaikutusta. Sulamislämpötila vaikuttaa pohjarainan väliseen adheesioon kahdella tavalla. Ensinnäkin polyeteeniin muodostuvien polaaristen ryhmien määrä lisääntyy lämpötilan noustessa, jolloin van der Waals-voimien syntymismahdollisuus kasvaa. Toisekseen lämpötilan nousu alentaa polyeteenin viskositeettia, jolloin pohjaradan kastuminen paranee, ja muovi pystyy tunkeutumaan paremmin pohjaradan huokosiin. Päällystysnopeuden kasvaessa polyeteenin viipymisaika vapaassa välissä lyhenee, heikentäen näin polyeteenin hapettumista, ja tätä kautta adheesiota. Nopeuden kasvaessa myös polyeteenin ja pohjarainan yhteen puristukseen kuluva aika vähenee, heikentäen näin polyeteenin tunkeutumista pohjarainan huokosiin. Päällystysnopeuden kasvattamisen adheesiota parantava vaikutus on sulan polyeteenin viskositeetin kasvun heikkeneminen vapaassa välissä nopeuden kasvaessa. Päällystysnopeuden kasvattamisen kokonaisvaikutus adheesioon on heikentävä. Vapaata väliä kasvatettaessa polyeteenifilmi viipyy kauemmin ilman kanssa kosketuksissa, parantaen näin polyeteenin hapettumista, ja tätä kautta adheesiota. Toisaalta vapaata väliä kasvatettaessa polyeteeni ehtii jäähtymään enemmän, jolloin polyeteenin viskositeetti kasvaa, heikentäen näin adheesiota. Polyeteenipäällystepaksuutta kasvatettaessa polyeteeni jäähtyy ilman vaikutuksesta vapaassa välissä vähemmän. Näin olleen paksuilla päällystekerroksilla vapaassa välissä tapahtuva viskositeetin kasvaminen on vähäisempää ja polaaristen ryhmien muodostuminen tehokasta. (Lampinen 2010).

Guillotte ja MacLaughlin ovat tutkineet edellä mainittujen koneolosuhteiden vaikutusta polyeteenin ja pohjarainan väliseen adheesioon. Tutkimustulosten perusteella he ovat laatineet matemaattisen mallin, jolla pystytään määrittämään adheesio suhteellisen hyvällä korrelaatiolla eri olosuhteissa. Mallin perusteella koneolosuhteiden vaikutukset olisivat seuraavanlaisia: (Vainio & Aaltio 1968).

- Sulamislämpötilaa kasvatettaessa adheesio paranee. Vaikutus on voimakkainta suurilla nopeuksilla ajettaessa ja lyhyttä vapaata väliä käytettäessä. Vaikutus vähenee korkeisiin lämpötiloihin siirryttäessä.
- Päällystysnopeuden kasvaessa adheesio heikkenee. Vaikutus on voimakkainta alhaisiin lämpötiloihin siirryttäessä.
- Vapaan välin kasvaessa adheesio paranee. Vaikutus on voimakkainta alhaisilla nopeuksilla ajettaessa ja matalaa sulamislämpötilaa käytettäessä.

- Päälystepaksuuden kasvaessa adheesio paranee. Vaikutus on voimakkainta matalaa sulamislämpötilaa käytettäessä. (Vainio ym. 1968).

Myös Goslin ja Sweeney ovat tutkineet sulamislämpötilan vaikutusta adheesioon, ja heidän tutkimustulostensa perusteella adheesio oli vahvasti positiivisesti riippuvainen sulamislämpötilasta. Guillotte'n ja MacLaughlin'n tutkimustuloksista poiketen Goslin ja Sweeney ovat omissa tutkimuksissaan havainneet sulamislämpötilan vaikutuksen olevan voimakkaimmillaan korkeissa sulamislämpötiloissa. (Vainio ym. 1968).

2.2.1 Adheesioon vaikuttaminen

Ekstruusiomenetelmällä tapahtuvassa paperin tai kartongin polyeteeni-päälystyksessä adheesiolla on vaikutusta muovifilmin ja paperin tai kartongin välisessä kiinnittymisessä. Jotta kyseisten materiaalien välinen adheesio olisi riittävän korkea, tarvitaan materiaalien pintaenergian muokkaamista vaadittuun tilaan. Paperin, kartongin ja polyeteenifilmin pintaenergioihin voidaan vaikuttaa pintakäsittelyillä, kuten muun muassa koronoinnilla, jolloin kyseisten pintojen pintaenergiaa kasvatetaan keinotekoisesti. Adheesiota voidaan myös parantaa lisäämällä pintaenergiaa laskevaa lisäainetta polyeteenin sekaan. Tosin lisätessä lisäainetta polyeteenin sekaan, saatetaan päälystysprosessi perinteistä menetelmää huomattavasti herkemmäksi vikaantumiselle. (Karhuketo ym. 2004) (Salste 1972).

Sopivan polyeteenilajin sekä koneolojen valinnalla voidaan saavuttaa prosessin toiminnan kannalta tarvittava adheesio. Käytännössä kuitenkin näiden toimenpiteiden hyödyntämisellä on taloudelliset ja tuotantotekniset rajoituksensa, minkä takia tarvitaan myös muita ratkaisuja adheesioon parantamiseksi. Yleisesti ekstruusiopäälystyksessä adheesiota parannetaan keskitytään kemiallisen adheesioon lisäämiseen. Kemialliseen adheesioon positiivisesti vaikuttavia tekijöitä ovat: (Salste 1972) (Vainio ym. 1968).

- muovin sulamislämpötilan kasvattaminen
- ilmavälin kasvattaminen (tiettyyn rajaan saakka)
- päälystysnopeuden laskeminen
- puristustelan paineen kasvattaminen
- primerien lisääminen
- radan esilämmittäminen
- päälystetyn radan jälkilämmittäminen
- polyeteenin lämmittäminen vapaassa välissä
- päälystepaksuuden kasvattaminen
- muovin sulamisindeksin kasvattaminen
- radan sähkökoronakäsittelyminen
- radan liekkikäsittelyminen

Muovin sulamislämpötilaa kasvatettaessa sulan muovipinnan hapettuminen lisääntyy, parantaen näin muovin tarrautumista paperiin tai kartonkiin. Lämpötilan kasvattaminen vaikuttaa tehokkaimmin lämpötila-alueella 310–330 °C. Liika lämpötilan nostaminen kuitenkin heikentää kuuma- saumautuvuutta, alentaa tiheyttä ja antaa tuotteelle muovin käryämisestä aiheutuvan pahan hajun. Lämpötilan kasvaessa myös muovin viskositeetti alenee, aikaansaaden erinäisiä prosessitekniisiä ongelmia, kuten esimerkiksi polyeteenifilmin kuroutumista vapaassa välissä, reunojen paksuuntumista sekä päällystepaksuuden aaltomaista vaihtelua. Vapaata väliä kasvatettaessa muovi ehtii hapettumaan enemmän, parantaen näin muovin ja kartongin välistä adheesiota. Ilmaväliä kasvatettaessa kuitenkin myös muovin lämpötila päällystysnipissä laskee, huonontaa näin muovin kiinnittymistä kartonkiin. Lisäksi vapaan välin kasvattaminen alentaa kuuma- saumautuvuutta, voimistaa muovifilmin kuroutumista ja aiheuttaa hallintaongelmia prosessiin. Tämän takia ilmaväliä tuleekin säätää aina tapauskohtaisesti. Päällystysnopeutta alentamalla saadaan adheesiota yleensä suhteellisen helposti parannettua. Alhaisella nopeudella päällystyslinjan tuotanto jää kuitenkin alhaiseksi, joten nopeuden alentaminen ei ole käytännössä adheesioon parantamiseen soveltuva keino. (Salste 1972) (Vainio ym. 1968) (Laiho 1979).

Puristustelan paineen ja lämmön nostaminen sekä radan esilämmittäminen parantavat adheesioita vain vähäisesti. Päällystepaksuutta kasvatettaessa adheesioon parantamiseksi tulee muovikerroksen liiallista paksuutta välttää, koska päällystepaksuuden ylittäessä läpäisyominaisuuksien edellyttämän tason, aiheuttaa polyeteenin liiallinen kulutus ylimääräisiä materiaalikuluja. Polyeteenin sulamisindeksin kasvaessa syntyy samoja prosessitekniisiä ongelmia kuin sulamislämpötilaa kasvatettaessa. Lisäksi sulamisindeksin kasvaessa muovifilmin läpäisemättömyysominaisuudet alenevat. Paperi- ja kartonkiradan pintaan applikoituja primereita voidaan käyttää adheesioon parantamiseen, mutta käytön rajoittavana tekijänä on niiden korkea hinta. Paperin tai kartongin primeroinnilla saadaan parannettua polyeteenin kiinnittymistä rataan. Eri primerit voivat vaikuttaa kiinnittymisen eri tavoin siten, että jotkin parantavat mekaanista adheesiota, kun taas toiset parantavat kemiallista adheesiota. Koronakäsittelyssä koronapurkauksessa syntynyt otsoni hapettaa tehokkaasti paperin tai kartongin pintaa, parantaen näin muovin kiinnittymistä siihen. Liekkikäsittelyssä paperin tai kartongin pinta hapettuu, kun pinnassa olevien kuitujen ulkopinnat reagoivat korkeassa lämpötilassa ilman sisältämän hapen kanssa, parantaen näin muovin kiinnittymistä siihen. Polyeteenin otsonoinnilla saadaan päällystemuovifilmi tehokkaasti hapetettua, jolloin polyeteenin ja alusradan välinen adheesio paranee. (Salste 1972) (Vainio ym. 1968) (Laiho 1979).

Edellä mainittujen koneolosuhteiden, polyeteenin ominaisuuksien sekä pintakäsittelymenetelmien valinnan lisäksi adheesioon voidaan vaikuttaa pohjaradan ominaisuuksilla. Hyvältä paperilta tai kartongilta odotetaan riittävän karkeaa pintaa sekä sopivan huokoista rakennetta mekaanisen

kiinnittymisen maksimoimiseksi, kuitenkin päällystettävän kartongin valitsemiseen on harvoin mahdollisuutta. (Salste 1972) (Vainio ym. 1968) (Laiho 1979).

Optimi ajo-olosuhde tarkoittaa, että jokaisella polymeerillä on omat suositeltavat asetuslämpötilansa ekstruusiopäällystyksessä, joissa materiaali kohtaa parhaimmat ajo-ominaisuutensa.

2.2.2 Vesitiiveys

Vesitiiveys, erityisesti rakennusten aluskatteissa, on kriittisin ominaisuus. Standardin mukaan aluskatteen vesitiiveys testataan asettamalla 20 cm korkea vesipatsas aluskatteen pinnalle, testi on kestoltaan kaksi tuntia. Ymmärrettävästi muovikerroksen täytyy olla kauttaaltaan ehyt toimiakseen vuotamatta. Epätasaisuudet muovisulassa, liiallisessa lämmössä tuhoutunut muovi, reiät muovifilmissä ja alusradasta aiheutuvat muovikerroksen mikroriät ovat tyypillisimmät vuotojen aiheuttajat.

2.2.3 Vesihöyryn läpäisy

Vesihöyryn läpäisy kertoo kuinka paljon vesihöyryä tuote, ja sen sisältämä muovikerros, päästävät lävitseen tietyssä ajanjaksossa. Rakennusten aluskatteissa ja tuulensuojissa pyritään usein korkeaan vesihöyrynläpäisyyn, jolloin aluskate tai tuulensuoja päästää vesihöyryn rakenteen sisästä ulkoilmaan, mikä vähentää kondensaation riskiä, ja täten ehkäistään mikrobien ja sisäilmaongelmien syntyä. Samalla muovikerros on ilmatiivis, eikä päästä lämmintä sisäilmaa rakenteen läpi ulos, mikä on oleellista energiatehokkuuden kannalta. Höyrysulku puolestaan omaa hyvin matalan vesihöyrynläpäisyn, mikä estää kosteutta siirtymästä sisätiloista rakenteiden sisään.

2.2.4 Kaasudiffuusiotiiveys

Vesitiiveyden sijasta joissakin eristetuotteissa muovikerrokselta vaaditaan kaasudiffuusiotiiveyttä. Eristeen toiminta perustuu eristeenä toimivassa vaahdossa oleviin pentaani kaasu kupliin. Mikäli eristeen muovikerrokset eivät ole yhtenäisiä ja tiiviitä, pentaani kaasu poistuu eristeestä, ja eriste menettää eristyskykyänsä. Näiden eristeiden valmistajat takaavat aina tuotteelle tietyn lämmöneristyskykyä kuvaavan lambda-arvon, joka laskeaan sen mukaan että eristeen pinnoite ei päästä pentaani kaasua läpi.

2.2.5 Happitiiveys

Elintarvikkeita pakataan suojakaasuun, jotta ne säilyisivät pidempään. Suojakaasupakkaamisen (engl. modified atmosphere packaging, MAP) tehtävä

on ehkäistä bakteerien kasvua, sekä hidastaa tai estää entsyymaattiset reaktiot, jotka voivat muuttaa elintarvikkeen aistittavia ominaisuuksia. Suojakaasun käytöllä kemiallisten säilöntä- ja lisäaineiden määrää tuotteissa voidaan vähentää. Elintarvikkeiden suojakaasuina käytetään ilmakehästä löytyviä kaasuja kuten typpeä, happea ja hiilidioksidia tai näiden seoksia. Eri elintarvikkeille on erilaiset kaasuseokset. Useimmiten suojakaasun halutaan syrjäyttävän hapen, ja estävän näin erilaiset hapettumisreaktiot, mutta esimerkiksi naudan jauhelihan suojakaasuna käytetään juuri happea, jotta lihan punainen väri säilyy. Suurpakkauksiin voidaan lisätä säilyvyyden pidentämiseksi runsaasti hiilidioksidia. Suojakaasuja voidaan käyttää vain pakkauksiin, joiden materiaali ei läpäise kaasuja, ja jotka voidaan sulkea tiiviisti. Kun pakkaus avataan tai se rikkoutuu, suojakaasu poistuu, ja sen teho lakkaa. Elintarvikkeiden pakkausmerkinnöillä ilmoitetut säilyvyysajat on laskettu oikein varastoiduille ehjille pakkauksille. Joissakin elintarvikkepakkauksissa, kuten sipsipusseissa, käytetään suojakaasua myös pullistamaan pakkausta, ja tekemään siitä näin paremmin iskuja kestävän. (Wikipedia 2017).

Elintarvikkepakkauksissa muovikerroksen täytyy siis olla yhtenäinen pitääkseen suojakaasun pakkauksen sisällä ja hapen ulkopuolella, tai halutessa päinvastoin. Muovikerros itsessään ei myöskään saa luovuttaa pakattuun tuotteeseen hajuja tai makuja, vaan sen tehtävänä on pitää tuotteen itsensä hajut sekä maut pakkauksen sisällä.

2.2.6 Kuumasaumautuvuus

Monet elintarviketeollisuudessa käytettävät pakkausmateriaalit kuuma- saumataan osittain loppukäytössä. Kuumasaumauksen tarkoituksena on sulkea pakkaus tiiviisti, jolloin halutut säilöntäkaasut jäävät pakkauksen sisäpuolelle, sekä sisältö suojataan ulkopuolisilta epäpuhtauksilta. Kuuma- saumattaessa ei riitä, että pyritään ainoastaan mahdollisimman tiukkaan saumaan, vaan sauman täytyy olla myös avattavissa ilman apuvälineitä. Reiät kuumasaumauskerroksessa voivat aiheuttaa avonaisia pakkauksia, ja siten tuotteen pilaantumisen (meijerituotteilla homehtumisen).

2.2.7 Rasvasuoja

Elintarvikkejoustopakkauksissa ohut muovikerros tuo rasvasuojan pakattua tuotetta vastaan, esimerkiksi kala, ja pitää laminaatin yhdessä. Reiät muovipäällysteessä aiheuttavat rasvan läpimenon nopeutumisen, ja laminaatti todennäköisesti delaminoituu joka poikkeuksetta johtaa kuluttajavalitukseen. On siis erittäin tärkeää, että muovikerros on yhtenäinen, eikä luovuta hajuja tai makuja pakattuun tuotteeseen. Vaikka muovi olisikin ominaisuuksiltaan käyttöön soveltuva, väärässä lämpötilassa, esimerkiksi liian kuumana, käsiteltynä muovin rakenne saattaa muuttua, niin että se pysyy yhtenäisenä, mutta alkaa luovuttamaan hajuja tai makuja pakattuun tuotteeseen.

2.3 Laadunvalvonta

Ekstruusiopäällystysteollisuudessa monet tuotteet ovat erittäin monimutkaisia ja teknisiä. Tästä syystä myös laadunvalvonta ja testaaminen arvotetaan hyvin korkealle. Ekstruusiopäällystyksessä, ja varsinkin teknisissä laminaateissa, käytetään useimmiten erittäin kalliita raaka-aineita, joten kaikki hylky tai viallinen tuote, joka valmistetaan tai lähetetään asiakkaalle, halutaan saada poistettua niin varhain tuotannossa kuin mahdollista. Ekstruusiopäällystyksessä tuote voi vikaantua monesta eri ominaisuudesta tai mekaanisesta syystä, esimerkiksi alhaisen adheesion, muovikerroksen reikien, väärän muovimäärän, väärän kokonaispainon, emissiivisyyden, kosteuden, korona-arvon, käpertyvyyden, repäisylujuuden, naarmujen, ryppyjen, vekkien tai epäpuhtauksien vuoksi.

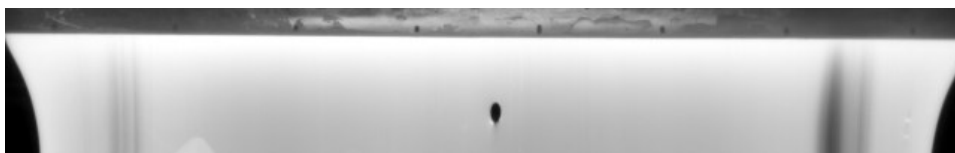
Laadunvalvontaa suoritetaan aistinvaraisesti, ja eri mittausjärjestelmillä tuotannon ollessa käynnissä. Valmiin tuotteen laatua valvotaan aistinvaraisesti ja laboratorio kokein. Tuotannossa aistinvaraisesti helpoiten pystytään havainnoimaan tuotteen mekaaniset virheet, esimerkiksi rypyt ja naarmut, koska nämä virheet ovat aina jatkuva luonteisia, eli jokin tuotantolinjassa aiheuttaa tuotteeseen virheen, joka pysyy tuotteessa nähtävillä siihen asti kunnes virhe korjaavalla toimenpiteellä saadaan poistettua. Myös eri mittausjärjestelmillä mitattavia ominaisuuksia havainnoidaan aistinvaraisesti, esimerkiksi tuotteen pintaprofiili ja painatuksen virheet. Mittaus- ja kuvausjärjestelmät tekevät mittaukset, mutta prosessinohjaajan on havaittava tuloksista virheet esimerkiksi painatuskamerasta. Painatusvirheet ja profiilivika ovat jatkuva luonteisia, joten näiden havaitseminen vaatii ainoastaan mittaustuloksen tai kuvan katsomisen ruudulta. Vaikeita virheitä huomata tuotannossa ovat virheet, jotka eivät ole jatkuva luonteisia, esimerkiksi reiät muovifilmissä. Reikiä muovifilmiin saattaa ilmaantua monestakin eri syystä täysin epäsäännöllisesti. Profiilin mittauksessa reiät näkyvät, jos reikä sattuu juurikin sillä hetkellä kulkemaan sen pisteen ohi, jota mittausjärjestelmä sillä hetkellä mittaa. Todennäköisyys tähän on kuitenkin hyvin pieni. Sama pätee reikien aistinvaraiseen toteamiseen. Se vaatisi, että joku prosessinohjaajista sattuisi katsomaan juuri tiettyyn kohtaan materiaaliradassa juuri sillä hetkellä, kun virhe siinä esiintyy. Virhe saattaa olla hyvinkin pieni ja toistua epäsäännöllisin välein, mutta juurikin tästä syystä viallisen tuotteen määrä on useimmiten suuri, kun tällaisia virheitä tuotteeseen syntyy. Täten siis viallisen tuotteen rahallinen arvo on erittäin suuri, koska kalliita raaka-aineita on kulutettu tuotteeseen, jota ei useinkaan pysty enää millään keinoin pelastamaan. Vielä suuremmaksi tappio muodostuu, jos viallista tuotetta pääsee asiakkaalle asti, tällöin rahallisen tappion lisäksi tulee imagolliset tappiot.

Valmiin tuotteen laadunvalvontaa suoritetaan, sekä aistinvaraisesti, että laboratorion testimenetelmillä. Aistinvaraisesti valvotaan mekaanisia virheitä, joita tuotannosta poiketen on nyt helpompi havainnoida, kun tuote ei enää liiku, näitä ovat erilaiset tahrat, naarmut, rypyt, värierot ja paina-

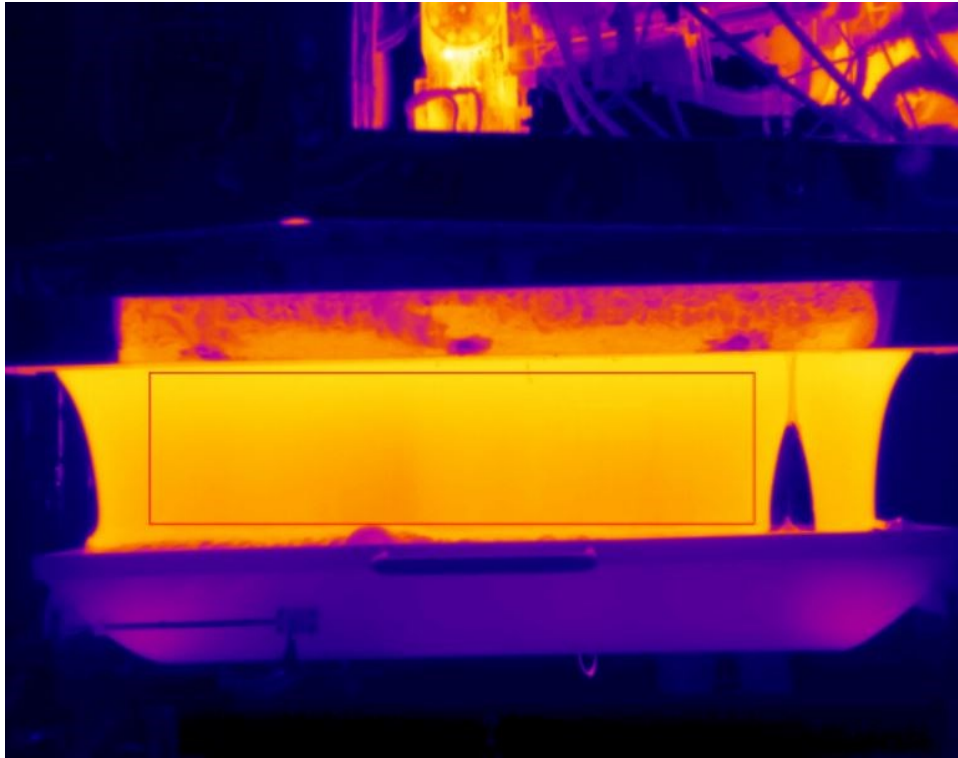
tusvirheet. Laboratorion testimenetelmillä valvotaan tärkeitä ominaisuuksia, esimerkiksi adheesiota, emissiivisyyttä, kosteutta, tuotteen grammapainoja, kerrospaksuuksia, kuumasautuvuutta ja korona-arvoa. Kestää kuitenkin aikansa, ennen kuin tulokset laboratoriosta tuotantolinjalle saapuvat, joten näin ollen viallista tuotetta saattaa syntyä huomattavan suuria määriä, ennen kuin korjaavia toimenpiteitä päästään suorittamaan. Alhainen adheesio on yksi suurimmista hylyn aiheuttajista, koska tätä ei nykyjärjestelmillä tai aistinvaraisesti pysty mitenkään tuotannon käynnissä ollessa havainnoimaan.

Mahdollisista tuotteen vioista adheesion ja muovikerroksen reikien havainnoiminen tuotannon käynnissä ollessa ovat hankalimpia havainnoida, ja suurimpia hylyn aiheuttajia, mutta nykypäivänä voisi olla mahdollista saada aikaan parannus paremmalla sulan muovivirran hallinnalla. Muovivirran sulalämpö tieto on yksi tärkeimmistä tiedettävistä asioista, kun halutaan hallita ja ohjata muovifilmin ja adheesion syntyä. Tällä hetkellä tässä työssä suunnittelu- sekä testialustana käytetyllä tuotantolinjalla viimeinen sulalämmön anturointitieto saadaan ekstruudereiden ruuvien päissä olevien adaptereiden jälkeen, jonka jälkeen sula muovivirta kulkee vielä putkien läpi feedblockiin, josta muovivirta siirtyy ja levittäytyy rakosuuttimeen. Kaikissa osioissa on lämmitysvastuksia, joilla sulalämpöä hallitaan, mutta tämä perustuu pelkästään asetettuihin asetusarvoihin, joiden perusteella linjaohjausjärjestelmä lämmitysvyöhykkeitä ohjaa. Sulalämmön oloarvoa ei enää tässä vaiheessa ole saatavissa. Itse sulalämmön hallinta siis perustuu enemmänkin saavutettuun kokemukseen kuin reaaliaikaiseen mittaukseen.

Konenäkölämpökameralla pystyttäisiin mittaamaan ja havainnoimaan rakosuuttimessa syntyvä muovifilmi ilmavälissä juuri ennen muovifilmin siirtymistä laminaattorin puristusnippiin, jossa tuotteen lopullinen rakenne ja ominaisuudet kuten adheesio, eli muovikerrosten ja materiaaliratojen välinen adheesio syntyvät. Linjaohjausjärjestelmään liitetyn konenäkölämpökuvauksen avulla pystyttäisiin havainnoimaan muovifilmiin syntyvät reiät ja muut viat (kuvat 1 ja 2), jolloin linjaohjausjärjestelmä pystyisi tuottamaan automaattisen hälytyksen, eikä virheiden havainnoinnissa oltaisi prosessinohjaajien aistien varassa, ja näin ollen saataisiin kalliit tuoteviat korjattua heti kun ne syntyvät. Liitteessä 2 on esiteltyä muutamia muovifilmin virheitä valmiissa tuotteessa.



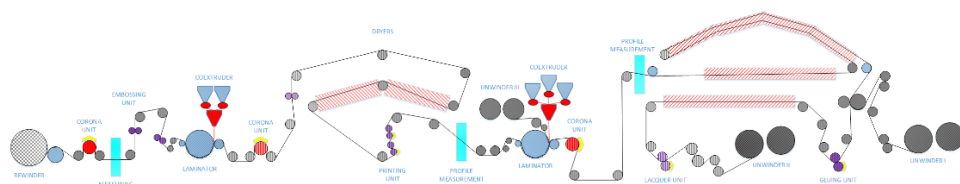
Kuva 1. Sulassa muovifilmissä esiintyvä satunnainen reikä lämpökuvatuna.



Kuva 2. Sulassa muovifilmissä esiintyvä repeämä lämpökuvattuna.

3 EKSTRUUSIOPÄÄLLYSTYS JA –LAMINOINTI TUOTANTOLINJAN RAKENNE

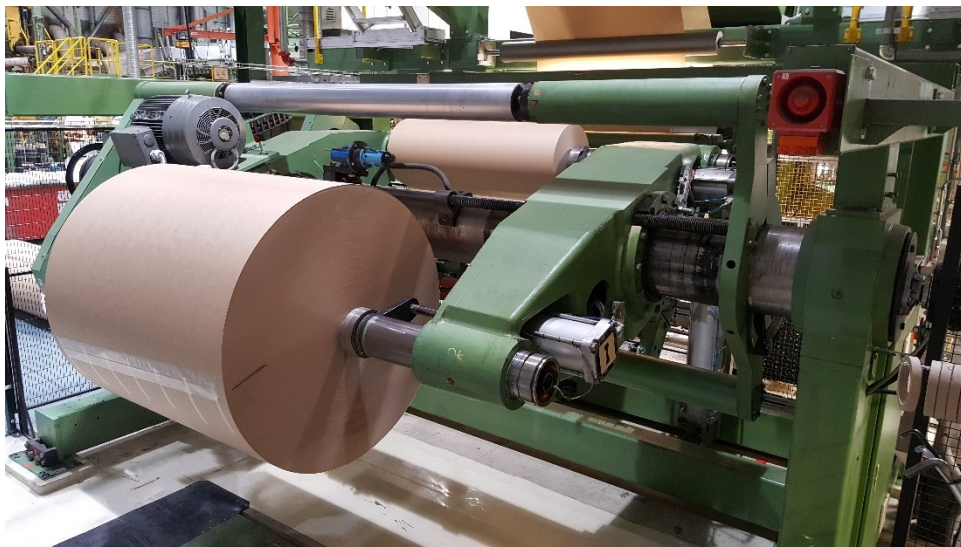
Nykymaailmassa, jossa kvartaalitalous pakottaa teollisuuden mukautumaan kulloinkin vallitsevaan maailman taloustilanteeseen, nopeat markkinoiden vaihtelut ovat nykypäivää, joten teollisuuden toiminnallisten markkinoiden hankalan ennustettavuuden vuoksi myös paperinjalostusteollisuudessa on pyrittävä pitämään tuotantomahdollisuudet monipuolisina, mutta silti keskittyttävä siihen markkinaan, jossa sillä hetkellä tilanne on hyvä. Tästä syystä myös tässä työssä suunnittelu- sekä testialustana käytetty tuotantolinja on rakennettu siten, että sillä pystytään valmistamaan tuotteita rakennusteollisuuden tuotteista aina elintarviketeollisuuden tuotteisiin. Seuraavassa esitellään nykyaikaisen ekstruusiopäällystys ja –laminointi tuotantolinjan osia.



Kuva 3. Esimerkki tuotantolinjan periaate kuva. Suurennettuna liitteessä 1.

3.1 Aukirullaimet

Aukirullaimen tarkoituksena on rullata hallitusti auki rullattu materiaalirata, joka usein on joko paperia, kartonkia, alumiinia, kuitukangasta, muovikalvoa tai verkkoa. Materiaalin grammapainot, vahvuudet ja käyttäytyminen vaihtelee suuresti, joten linjaohjausjärjestelmältä vaaditaan materiaaliradan hallintaa erittäin laajasti. Automaattisten aukirullainten täytyy myöskin pystyä liittämään loppuva rulla uuteen rullaan tuotannon keskeytymättä. Tämä tarkoittaa sitä, että linjaohjausjärjestelmän täytyy pystyä jatkuvasti laskemaan kuluvan rullan jäljellä oleva metrimäärä, ja suorittaa rullan vaihto ”lennossa”, kun kuluva rulla on loppumaisillaan. Seuraavassa esitellään aukirullaimen rakennetta. Alla olevissa kuvissa 4 ja 5 on nähtävissä aukirullaimen eri osat, jotka on eriteltyä tulevissa kappaleissa.



Kuva 4. Aukirullaimen kokoonpano ja osat.



Kuva 5. Aukirullaimen kokoonpano ja osat.

3.1.1 Keskusakseli

Keskusakseliksi kutsutaan akselia, jonka keskipisteessä sijaitsee aukirullaimen runko, jolla aukirullain on kiinnitettynä lattiaan, ja keskusakseliin on liitettyä aukirullausakselit, niin kutsutut armit, joissa materiaalirullat ovat kiinnitettynä pyöriessään, tai odottaessaan rullan vaihtoa. Keskusakselin pyörivää liikettä ohjataan vaihteiston, sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan avulla, jota vuorostaan ohjaa tuotantolinjan linjaohjausjärjestelmä.

3.1.2 Rullan kiinnityskarot

Materiaaliradat ovat rullattuina hylsille, joiden valmistusmateriaali ja sisähalkaisija vaihtelevat. Tämän vuoksi aukirullaimen täytyy olla vaihdettavissa erilaisia kiinnityskaroja, jotka ovat kiinnitettynä aukirullaimen armeihin ja, jotka ovat työntyneinä rullan hylsyn päistä sisään kannatellesaan rullaa ilmassa, tai pyörittäessään sitä. Useimmiten kiinnityskarot ovat puristettuna hylsyyn pneumaattisella toimilaitteella, jota ohjaa linjaohjausjärjestelmä.

3.1.3 Generaattori jarru

Generaattori jarruksi kutsutaan sähkömoottoria, joka on välityksellä yhdistettynä aukirullaimen kiinnityskara-akseliin, näin ollen mekaanisesti halliten rullan pyörimisnopeutta. Sähkömoottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, joka saa ohjauksensa linjaohjausjärjestelmästä. Prosessinohjaaja on linjaohjausjärjestelmään asettanut radan kireyden ohjearvon aukirullaimelta seuraavalle ryhmälle, jonka linjaohjausjärjestelmä pyrkii pitämään automaattisesti mittaamalla ratakiireyttä jatkuvasti, ja säätäen generaattori jarrun momenttia tarpeen mukaan. Kyseisen sähkömoottorin avulla aukirullain myös kiihdyttää uuden rullan ulkokehän tuotantolinjan ratanopeutta vastaavaksi rullan vaihdon aikana. Linjaohjausjärjestelmä laskee ja kontrolloi vaadittavan sähkömoottorin pyörimisnopeuden rullan oikean kehänopeuden saavuttamiseksi.

3.1.4 Vaihtolaitteisto

Sen lisäksi, että aukirullain kiihdyttää lähtevän rullan oikeaan nopeuteen, materiaalirata täytyy saattaa yhteyteen teippauksen kanssa, jonka prosessinohjaaja on uuteen rullaan tehnyt. Tämän lisäksi ”vanha” materiaalirata täytyy katkaista uuden rullan aloitettua auki rullautumisen. Näitä tehtäviä varten aukirullaimessa on saumaustela, joka pneumaattisilla sylintereillä saatetaan yhteyteen uuden rullan kanssa, jolloin uudessa rullassa oleva teippaus kiinnittyy materiaalirataan, ja aloittaa uuden rullan auki rullautumisen. Tämän lisäksi aukirullaimessa on koko materiaaliradan levyinen pneumaattisesti ohjattu terä, joka katkaisee ”vanhan” materiaaliradan linjaohjausjärjestelmän käskiessä.

3.2 S-vetotelat

S-vetotelat (kuvat 6 ja 7) ovat lähekkäin pareittain sijoitettuja, selvästi johdoteloja halkaisijaltaan suurempia teloja. S-vetoteloilla saadaan rataan pitävä ote, koska telat on pinnoitettu korkeakitkaisella kumipinnalla, sekä radan kosketuspinta kumpaankin telaan on hyvin korkea, lähes kolme neljäsosaa kehästä. Päälystyskoneen alkupäässä ennen laminaattoria olevilla S-vetoteloilla jarrutetaan, ja vastaavasti loppupäässä laminaattorin jälkeen olevia teloja käytetään radan vetämiseen, jolloin telastojen väliselle aluella saadaan säädettyä haluttu kireys. (Karhuketo ym. 2004).

S-vetotelojen tärkein tehtävä on pitää rataa kireyden rullainten ja laminaattorin välillä mahdollisimman tasaisena, myös kiihdytettäessä sekä hidastettaessa. S-vetotelojen pyörimisnopeutta säädelään sähkömoottorilla ja välityksellä. Sähkömoottorin pyörimisnopeutta säädelään taajuusmuuttajalla, joka saa ohjauksensa linjaohjausjärjestelmästä.



Kuva 6. S-vetotelasto lähellä tuotantolinjan loppupäätä hoitopuolelta kuvattuna.

Kuva 7. S-vetotelasto lähellä tuotantolinjan loppupäätä hoitopuolelta kuvattuna.

3.3 Sivelyasemat

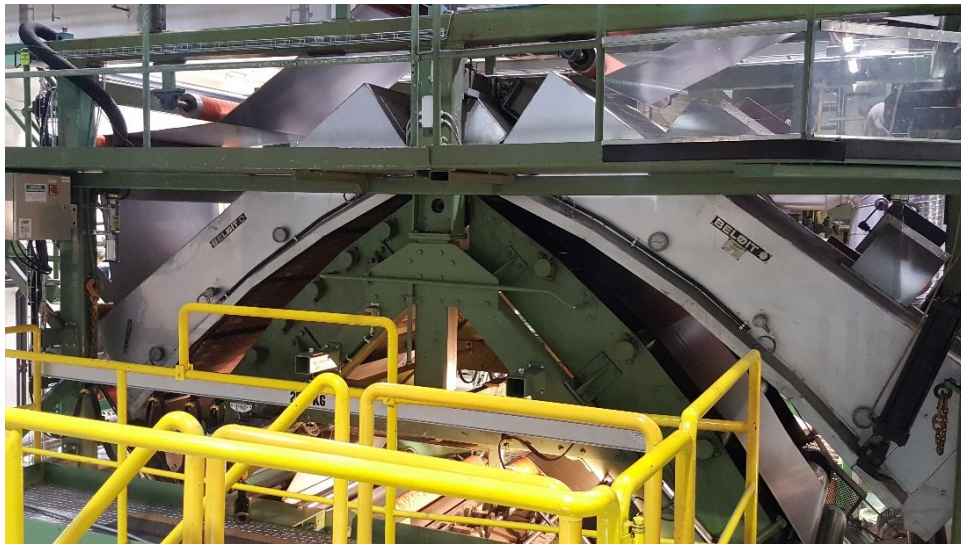
Tuotantolinjalle on tarpeen mukaan sijoitettuna sivelyasemia. Sivelyasema siirtää haluttua nestemäistä ainetta materiaalirataan. Useimmiten sivelyasemalla siirretään radan pintaan painoväriä, lakkaa, liimaa, primeria tai vettä. Aineesta riippumatta sivelyasemien rakenne tuotantolinjan sisällä on useasti mahdollisimman samanlainen yhteneväisten osien vuoksi. Esimerkkinä ja suunnittelu- sekä testialustana käytettävällä tuotantolinjalla sijaitsevat sivelyasemat ovat tyypiltään syväpaino tai fleksopaino laitteistoja.

3.4 Kuivaimet

Siveltäessä materiaalirataan jotakin nestemäistä ainetta, täytyy materiaalirata sivelyn jälkeen luonnollisesti kuivata tuotantolinjan telojen likaantumisen estämiseksi. Myöskin esimerkiksi painoväri täytyy kuivata, jotta painettu kuvio pysyy selkeänä. Kuivaimet täytyy suunnitella niin, että sivelty pinta ei kosketa ainoatakaan telaa, ennen kuin sivelty pinta on onnistuneesti kuivattu. Kuivaimissa lämmönlähteenä käytetään palavaa maakaasua, nestekaasua tai öljyä. Myös sähkö- ja infrapunakuivaimia käytetään. On olemassa myös sylinterikuivaimia, joissa kierrätetään joko kuumaa höyryä tai kuumaa nestettä, mutta näitä käytetään paperinjalostuksessa harvoin. Kuvissa 8 ja 9 on esitettyinä nykyaikainen maakaasulla toimiva kuivain ja vuosikymmeniä vanha nestekaasulla toimiva kuivain.



Kuva 8. Nykyaikainen maakaasulla toimiva leijukuivain.



Kuva 9. Vanha nestekaasulla toimiva leijukuivain.

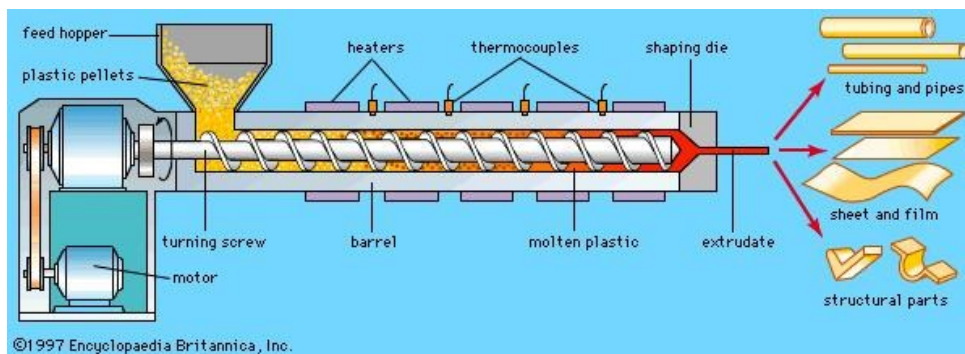
3.5 Esikäsittelylaitteistot

Esikäsittelylaitteistoja käytetään useimmiten materiaaliradan pintaenergian lisäämiseksi, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä adheesio kiinnitettävien pintojen välille. Erilaisia esikäsittelymenetelmiä ovat korona-, liekki- ja otsonikäsittely, jotka tapahtuvat tuotantolinjan sisällä olevissa erillisissä laitteistoissa, ja osaltaan primerkäsittely, joka tapahtuu sivelyasemalla.

3.6 Ekstruuderit

Ekstruuderit ovat laitteita, jotka yksinkertaisimmillaan koostuvat sylinteristä, suuttimesta ja ruuvista, joiden läpi sulatettu raaka-aine kulkee. Yleensä tarvitaan jokin voima, joka kuljettaa ainetta sylinterissä ja muodostaa paineen, jolla se saadaan puristettua suuttimen läpi. Teollisuuden käyttämissä koneissa raaka-ainetta kuljettaa sylinterin sisällä pyörivä ruuvi. Sylinterin ympärillä on lämmitysvastukset, jotka auttavat sulattamaan raaka-ainetta, ja osaltaan mahdollistavat näin sen kulkeutumisen ruuvin mukana. Pääasiassa ruuvin pyörimisestä aiheutuva kitka lämmittää ja sulattaa raaka-ainetta. Ruuvin tehtävänä on siis sulattaa, sekoittaa ja plastisoida sylinteriin syötetty raaka-aine, joka muoveilla yleensä on granulaatti muodossa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että aineesta tulee yhtenäistä, homogeenoitua pehmeää massaa, joka virtaa tasaisesti suuttimen läpi. (Kari 2013).

Ekstruuderin toiminta on tärkein yksittäinen tekijä monissa tuotteen ominaisuuksista, esimerkiksi adheesiossa. Alla olevassa kuvassa 10 on esitettyä ekstruuderin periaate, jota siis käytetään päällystysteollisuuden lisäksi useilla erilaisilla teollisuuden aloilla.



Kuva 10. Ekstruuderin toiminta periaate (Britannica 2016).

3.6.1 Rakenne

Ekstruuderi (kuva 11) koostuu muovinsyöttölaitteistosta, ruuveista ja sylintereistä, lämmitysvyöhykkeistä, muovinsiirtoputkista, sihtipakoista, adaptereista, vastapainelaitteistosta, feedblockista, jakokappaleesta, rakuuttimesta, kärynpoistolaitteistosta ja siirtovaunusta.



Kuva 11. Ekstruuderin kokoonpano ja eri osat.

3.6.2 Muovinsyöttölaitteisto

Tehtaassa, jossa käytetään ekstruusiopäällystystä ja -laminointia tuotteiden valmistukseen, muovi raaka-aine varastoidaan granulaatteina suurissa varastointisiiloissa. Varastointisiilot saattavat sisältää jopa satoja tuhansia kiloja muovigranulaatteja kerrallaan. Suuret varastointisiilot sijaitsevat yleensä tehtaan ulkopuolella. Tehtaan sisäpuolella saattaa usein olla pienempiä, muutaman tuhannen kilon varastointisiiloja erikoismuoveille, jotka eivät kestä lämpötilavaihteluita ja kosteutta.

Varastointisiiloilta muovigranulaatit johdetaan ekstruuderin hoppereille putkistoja, venttiileitä ja muovi-imureita apuna käyttäen. Venttiileitä ja

muovi-imureiden sähkömoottoreita ohjataan linjaohjausjärjestelmällä. Muovigranulaatit varastoidaan lyhytaikaisesti ruuvien yläpuolella oleviin hoppersiin, joista muovia annostellaan vaakamittaussäiliön kautta ruuveille. Annostelun hoitaa gravimetrinen mittaus- ja laskentajärjestelmä, joka annostelee halutun määrän sulaa muovia materiaaliradan pinnalle. Gravimetristä järjestelmää ja sen laskentaa ohjaa ja suorittaa linjaohjausjärjestelmä.

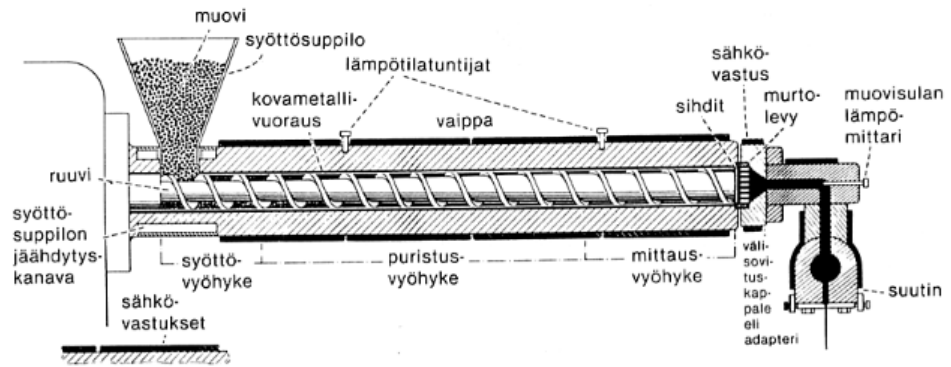
Hoppereista painovoiman avulla syötettävien päämuovien lisäksi usein syötetään muovin lisäaineita niin sanotuista mikseriestä. Lisäaineet syötetään päämuovin joukkoon sivusyöttönä, mikserien sisällä olevien ruuvien avulla. Kuvassa 12 on esitettyä muovinsyöttölaitteisto imuputkineen.



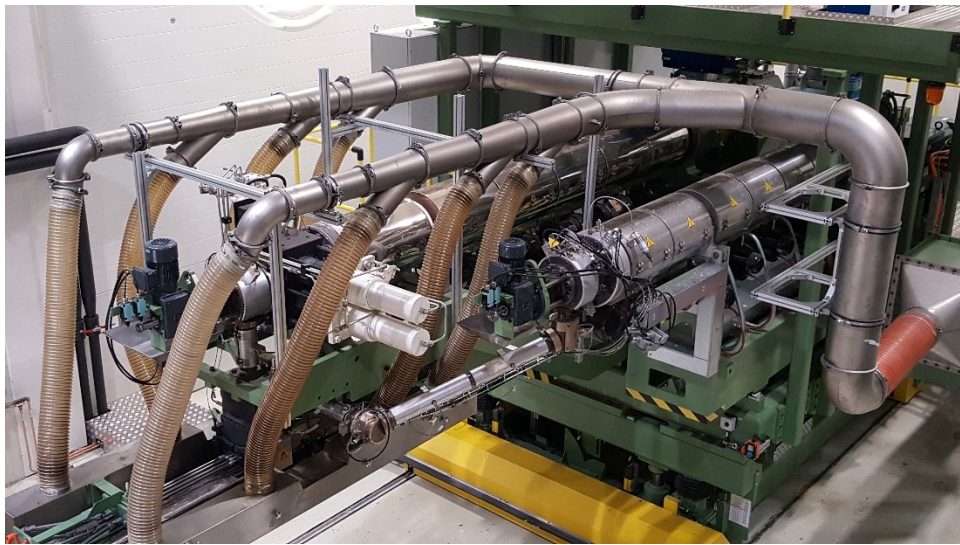
Kuva 12. Ekstruuderin muovinsyöttölaitteisto imuputkineen.

3.6.3 Ruuvit ja sylinterit

Varsinaisen ekstruuderin muodostavat sylinteri ja sen sisällä pyörivä ruuvi. Ruuvin ja sylinterin sisäseinämän materiaalina on kova, kulutusta kestävä erikoisteräs, ja sen pinnat ovat useimmiten kromatut. (Ekstruusio eli suulakepuristus 2007). Kuvassa 13 on esitettyä periaate päällystysteollisuuden ekstruuderista. Jos ruuveja ja sylintereitä on useampia, ne ovat asennettuina, joko vierekkäin, tai eri tasoissa limitysten (kuva 14).



Kuva 13. Päällystysteollisuuden ekstruuderit.



Kuva 14. Kaksi ruuvia ja sylinteriä asennettuina vierekkäin.

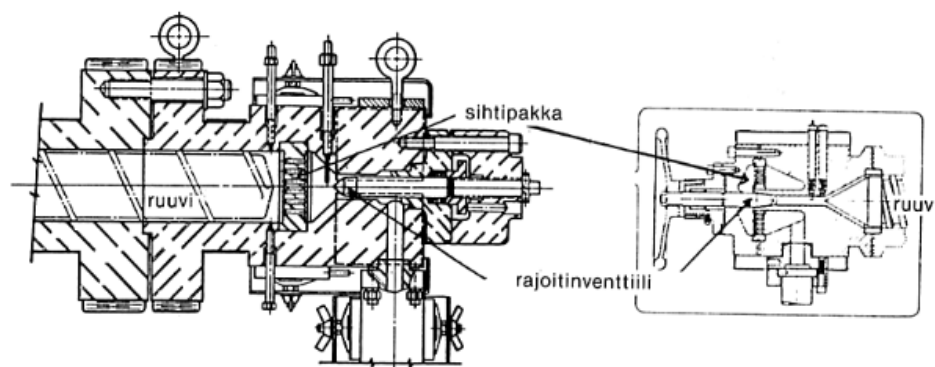
Muovin kulutusta säädetään ekstruuderin ruuvin kierroksilla, ei syötetyn granulaatin määrällä. Ruuvin halkaisijasta ja nopeudesta riippuu sen syötetyn muovin määrä. Ruuvin halkaisija on 80 – 200 mm, ja kierrokset saattavat olla jopa 1200 rpm. Ruuvin alkupäässä, syöttövaiheessa, ruuvin keskiosa on ohuimmillaan, ja vapaa tila suurimmillaan. Vapaa tila täyttyy granulaatilla. Puristusvyöhykkeessä muovi sulaa, rakeiden välissä oleva ilma poistuu taaksepäin, ja muovimassan paine kasvaa johtuen ruuvin keskiosan paksunemisesta kohti loppupäätä. Sulamiseen tarvittava energia tulee pääosin sähkömoottorista vaihdelaatikon kautta ruuviin. Osa lämmöstä saadaan yhdessä sulamiseen tarvittavan lämmön kanssa muovin sisäisestä kitkasta ja kitkasta putken seinää vasten. Sylinterin vaipan ympärillä on sähkövastuksia ja lämpötilatuntijoita, joiden avulla tuodaan lisätehoa oikean lämpötilaprofiilin säätämiseen ruuvin pituussuunnassa. Muovin laadusta riippuen vastusten ja kitkalämmön osuus vaihtelee. (Metsäteollisuuden työnantajaliitto 1982).

Lämpötilan hallintaan tarvitaan myös jäähdytystä. Yleensä putken ulkopuolella käytetään jäähdytysilmapuhaltimia, ja ruuvien sisällä jäähdytysvettä. Kaikki toiminnot on kytketty ruuvien pituussuunnassa oleviin säätölohkoihin. Kullekin lohkolle voidaan valita haluttu muovin lämpötila, jota säätöjärjestelmä pyrkii automaattisesti ylläpitämään. (Seppälä, Grönstrand, Karhuketo & Törn 1999).

Yhteen suuttimeen pystytään syöttämään sulaa muovia useasta ruuvista samanaikaisesti, tällöin puhutaan koekstruusiosta. Jokaisesta ruuvista pystytään syöttämään eri tyyppistä muovia, jolloin materiaaliradan pintaan pystytään muodostamaan erillisiä, mutta toisissaan kiinni olevia muovikerroksia, joilla kaikilla on omat ominaisuutensa ja vaikutuksensa.

3.6.4 Adapteri, sihtipakka ja vastapaineventtiili

Muovin jätessä sylinterin ja ruuvien loppupään se joutuu kulkemaan sihtipakan läpi.



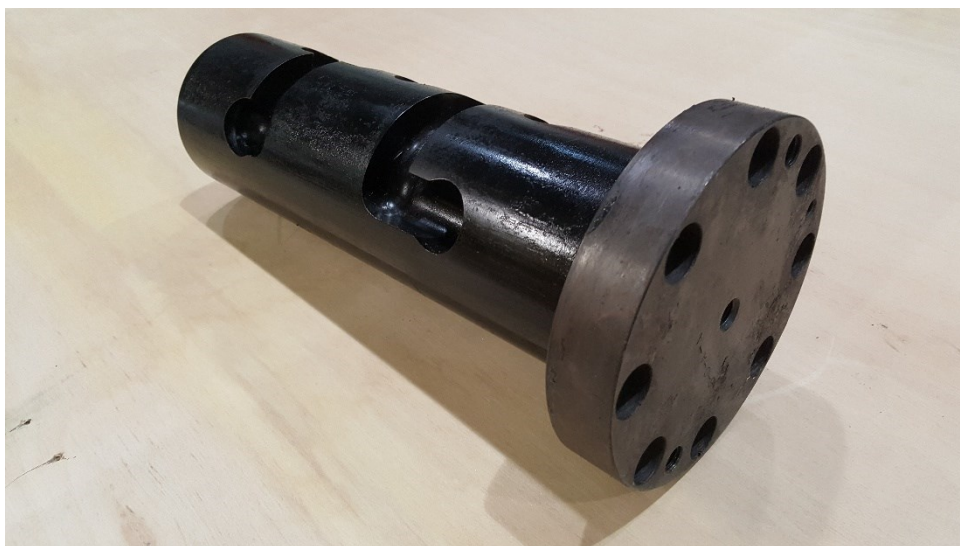
Kuva 15. Kuvassa adapteri, sihtipakka ja vastapaineventtiili.

Sihtipakka (kuva 15) koostuu kolmesta kuormitusta kestävästä "verkko-kankaasta", jossa tihein verkko (keskellä) aiheuttaa alipaineen, ja suodattaa pois vieraat partikkelit, ja mahdollisesti huonosti sulaneet muoviagglomeraatit. Adapterin yhteydessä on myös vastapaineen lisäsäätöä varten paineensäätöventtiili (kuva 15). Paineensäätöventtiilillä voidaan paine säätää vakioksi, ja kompensoida sihtipakan tukkeutuminen. Adapteri (kuva 15) ohjaa muovisulan kulkua kääntäen sen ruuvilta 90 °:n kulmassa alaspäin suuttimelle, ja näin adapteri toimii suuttimen kannattajana. Adapterin yhteydessä on myös varoventtiili, joka toimii paineen noustessa liian korkeaksi. (Metsäteollisuuden työnantajaliitto 1982).

3.6.5 Feedblock

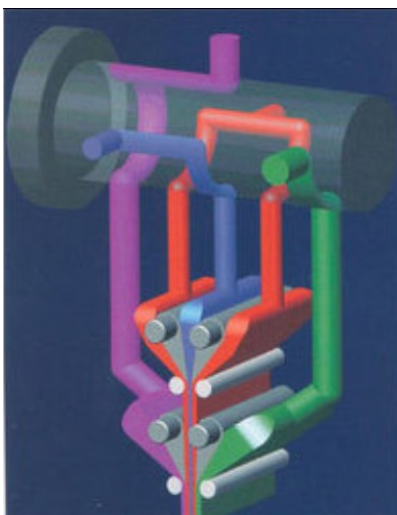
Erillään olevien ruuvien ja sylintereiden jälkeen sula muovimassa johdetaan adapterien ja sihtipakkojen kautta yhteiseen feedblockiin (kuvat 18 ja

19), jossa sulat muovivirrat yhdistyvät. Feedblockin yläosassa, lähinnä ruuveilta tulevia muovin siirtoputkia, sijaitsee jakokappale (kuva 16). Jakokappaleen tarkoituksena on järjestellä ruuveilta tulevat sulat muovivirrat haluttuun järjestykseen, jossa ne levittäytyvät ulos suuttimesta. Näin ollen materiaaliradan pintaan saadaan kerroksittainen muovikalvo, jossa jokaisella kerroksella on oma tehtävänsä. Jakokappaletta ei pysty säätämään tai muokkaamaan, vaan jokaiselle kerrostus vaihtoehdolle on oma jakokappaletensa, joka vaihdetaan feedblockiin tarpeen mukaan.

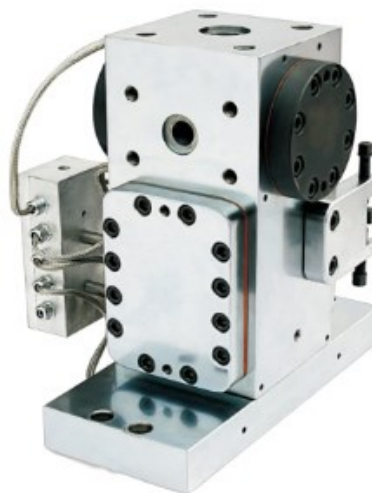


Kuva 16. Jakokappale ja sen urat joilla muovivirrat käännetään haluttuun järjestykseen.

Jakokappaleen käännettyä muovivirrat haluttuun järjestykseen, säädetään haluttu muovin kerrostuspaksuus ”siivekkeillä”. Siiven muotoisia ohjaimia käännetään manuaalisesti tarpeen mukaan, ja vaikutetaan muovikerrosten paksuuteen suhteessa keskenään (kuva 17). Ohjaimilla ei siis varsinaisesti säädellä muovin määrää, vaan muovin määrä pysyy aina vakiona, mutta kerrosten paksuutta suhteessa toisiinsa säädetään. Eli kun toista kerrosta ohennetaan, viereinen kerros paksuuntuu saman verran.



Kuva 17. Jakokappaleen, siivekkeiden ja pinien toimitaperiaate.



Kuva 18. Feedblock eri osineen.



Kuva 19. Feedblock asennettuna paikalleen.

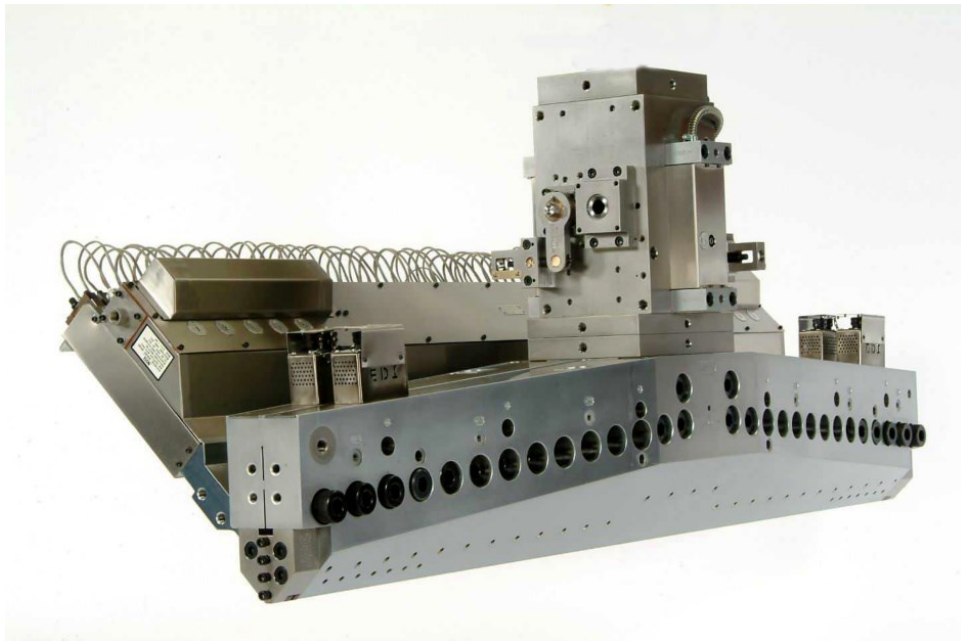
Feedblockissa vaikutetaan myös siihen kuinka muovivirrat levittäytyvät suuttimeen. Näitä ohjaimia kutsutaan ”pineiksi”. Pinit ovat lähes pyöreitä akseleita, joissa on viiste ja, jotka sijaitsevat siivekkeiden suuntaisesti. Pinejä kääntämällä vaikutetaan muovivirtaan siten, että ohjataan muovivirtaa virtaamaan joko enemmän tai vähemmän suuttimen reunoja kohden. Eli ohjaamalla muovivirtaa suuttimen reunoille, ohennetaan samalla muovikerrosta suuttimen keskellä ja päinvastoin. Optimaalisena säätönä toimii näin ollen paras kompromissi kuten siivekkeissä.

3.6.6 Suutin

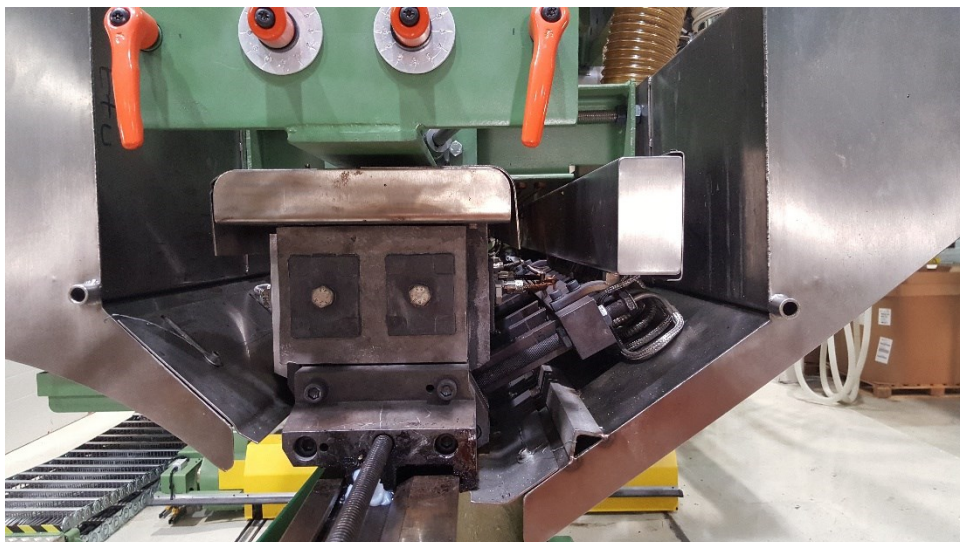
Suuttimen (kuva 20) tehtävänä on levittää sula muovimassa materiaaliradan pintaan. Suutin (kuva 22) on ekstruuderin ainoa osa, jolla pystyy vaikuttamaan levitettävän muovisulan muotoon, eli ratasuuntaiseen profiiliin

materiaaliradan pinnassa. Sulan muovimassan kokonaismäärän määrittelee ekstruuderin ruuvien kierrokset, suuttimella määritellään siis ainoastaan ruuvien määrittelemän muovimäärän kerrospaksuus materiaaliradan pinnassa eli profiili. Suutinta kutsutaan kuvaavammin myös rakosuuttimiksi. Suuttimessa on kaksi toisiinsa puristettua ”huulta”, joiden välissä on rako, perusasetuksessaan 0,5-1,0 mm leveä. Toinen suuttimen huulista on asennettu kiinteäksi, jota ei pysty säätämään. Toinen huuli on asennettu paksujen pulttien varaan, joiden sisässä on lämmitysvastus (kuva 21). Näihin vastuksiin johdetaan sähkövirtaa tarpeen mukaan, jolloin ne lämmittävät pultteja, jotka puolestaan lämmön vaikutuksesta laajenevat, jolloin säädettävä huuli puristuu kiinteätä huulta vasten, ja rako huulten välillä pienenee. Pulttien avulla siis säädellään huulirakoa jokaisen pulstin kohdalla erikseen, ja näin ollen vaikutetaan muovikalvon profiiliin sen leivityessä materiaaliradan pinnalle.

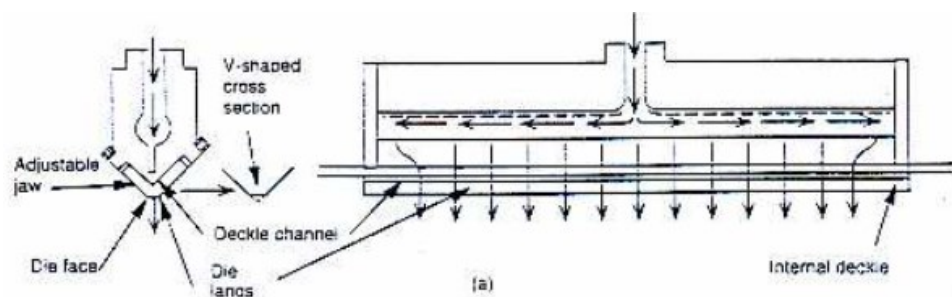
Suuttimessa on myös vyöhykkeisiin jaetut termoparit, joilla ekstruuderin lämmitysautomaatiikan avulla säädellään muovisulan käyttäytymistä suuttimessa (kuva 22). Lämmitysautomaatiikkaa ohjaa linjaohjausjärjestelmä.



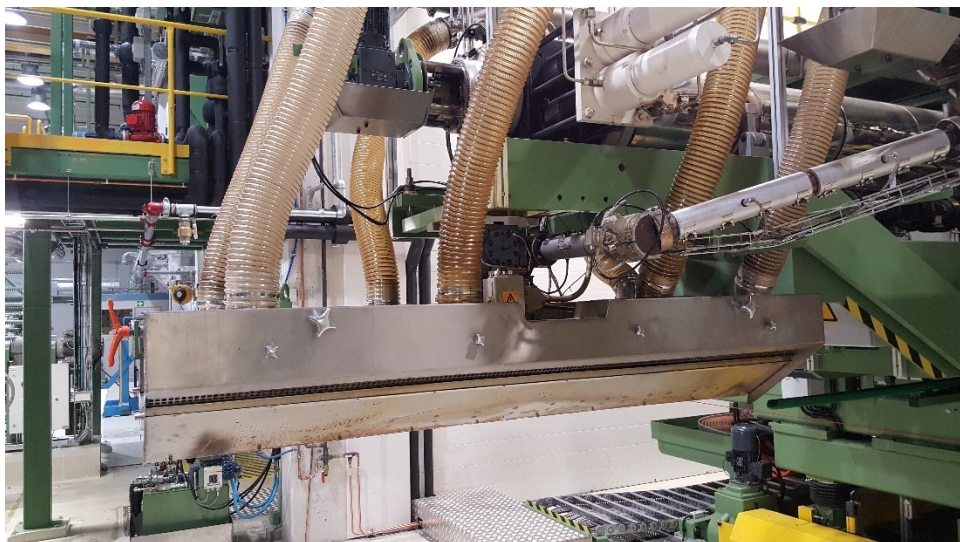
Kuva 20. Rakosuutin jolla muovisula levitetään materiaaliradan pinnalle (Cloeren 2016).



Kuva 21. Suuttimen säätöpultit joiden sisässä lämmitysvastukset.



Kuva 22. Sulan muovivirran liikehdintää rakosuuttimessa.



Kuva 23. Rakosuutin asennettuna ekstruuderiin.

3.6.7 Siirtovaunu

Ekstruuderin osat ovat kiinnitettynä vankkaan metallirunkoon (kuva 24), joka kannattelee koko laitteistoa, ja siirtää sen materiaaliradan päälle ja pois. Ekstruuderin siirtyä lattiaan kiinnitetyillä kiskoilla materiaaliradan sivussa olevalta huoltoalueelta radan päälle tuotantoa varten, ja takaisin huolto- ja muutostöitä varten. Siirtovaunuja ja ekstruusioasemia saattaa yhdellä tuotantolinjalla olla kaksi, tällöin tuotantolinjasta käytetään nimitystä Tandem-linja.



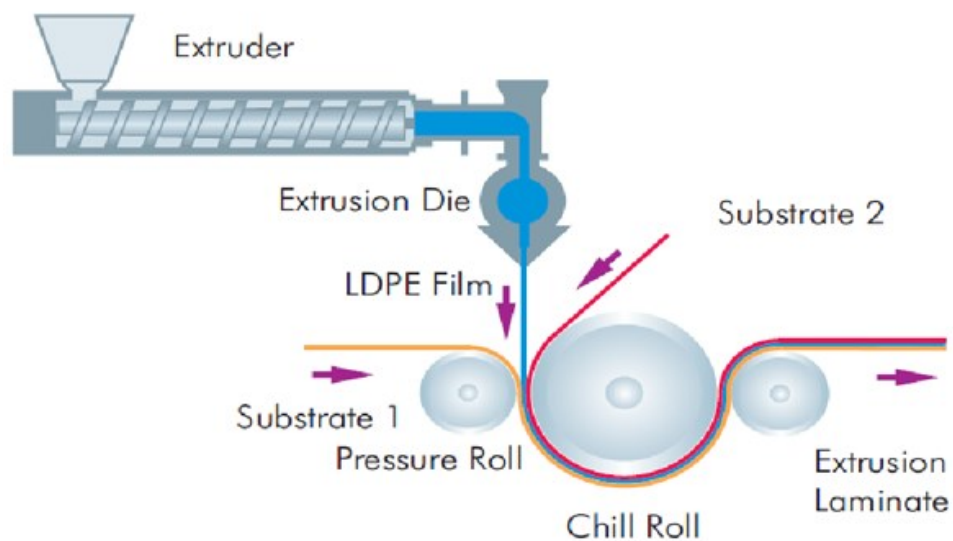
Kuva 24. Siirtovaunu johon asennettuina ekstruuderin eri osat.

3.7 Laminaattori

Suuttimen jälkeen huuliraossa muodostunut muovifilmi levittäytyy laminaattorilla materiaaliradan pintaan viivyttyään hetken suuttimen ja laminaattorin välille muodostuvassa ilmaraossa. Ilmaraossa filmiä pyritään hahpettamaan mahdollisimman kauan, mutta silti filmi ei saa jäähtyä ilmaraossa liikaa.

Laminaattori (kuva 26) muodostuu tukitelasta, kumitelasta, jäähdytystelasta, irrotustelasta ja reunaleikkasasemasta. Kumitelan ja jäähdytystelan välisessä nipissä, saatetaan materiaalirata ja muovifilmi yhteyteen keskenään (kuva 25). Kumitelalla puristetaan jäähdytystelaa vasten korkealla paineella, jolloin muovifilmi puristuu materiaalirataa vasten ja kiinnittyy materiaaliradan kuituihin. Tukitela tukee kumitelaa ettei se taivu kovassa puristuksessa. Jäähdytystelan tehtävänä on jäähdyttää muovifilmiä niin, että muovifilmin tartunta materiaalirataan on suurempi kuin jäähdytystelan jättöpintaan ja seuraaviin teloihin, jolloin muovifilmi jatkaa matkaansa materiaaliradan mukana, eikä repeydy siitä irti.

Reunaleikkasemasen tehtävänä on leikata materiaaliradan reunasta ylimääräinen muovifilmi pois joka muodostuu laminaattorin nipissä muovifilmin levittäytyessä aavistuksen materiaaliradan reunojen yli.



Kuva 25. Laminaattorin kokoonpano ja toimintaperiaate (Safepack 2017).



Kuva 26. Laminaattori ja sen osat.

3.8 Mittaus- ja säätöjärjestelmä

Jotta pystyttäisiin säätämään muovifilmin profiilia, täytyy syntyvän muovikerroksen profiili pystyä todentamaan, eli kerrospaksuus mittamaan. Useimmiten ekstruusiopäällystys tuotantolinjalla profiilin mittaus suoritetaan säteilymittauksen avulla. Materiaalirata kulkee mittausaseman (kuva 27) lävitse, jossa mittausyksikkö (kuva 28) kulkee edestakaisin. Pääasiassa mittausapoja on kaksi, joko Beta-säteitä hyödyntävä kokonaispainomit-

taus, tai IR-säteitä hyödyntävä pelkän muovikerroksen mittaus. Kokonaispainomittauksessa mittausyksikössä oleva säteilylähde lähettää tietyn määrän Beta-säteitä kohtisuoraan materiaalirataa vasten. Materiaaliradan vastakkaisella puolella oleva vastaanottoyksikkö (kuva 28) ottaa vastaan materiaaliradan läpi tulevat säteet, ja vertaa saapuneiden säteiden määrää lähetettyjen säteiden määrään, josta lasketaan materiaalin kokonaispaino. IR-mittauksessa säteilylähde lähettää IR-säteitä kohtisuoraan materiaaliradan pintaan, josta ne heijastuvat takaisin kulkematta materiaaliradan lävitse. Takaisin heijastuneet säteet analysoidaan, josta muodostuu muovikerroksen profiili. Mittaus- ja säätöjärjestelmä kohdistaa profiiliin mittauspisteet (kuva 29) suuttimessa olevien pulttien mukaan, ja näin ollen osaa syöttää sähkövirtaa pulteissa oleviin sähkövastuksiin tarpeen mukaan.



Kuva 27. Mittausasema (Thermo Scientific 2016).

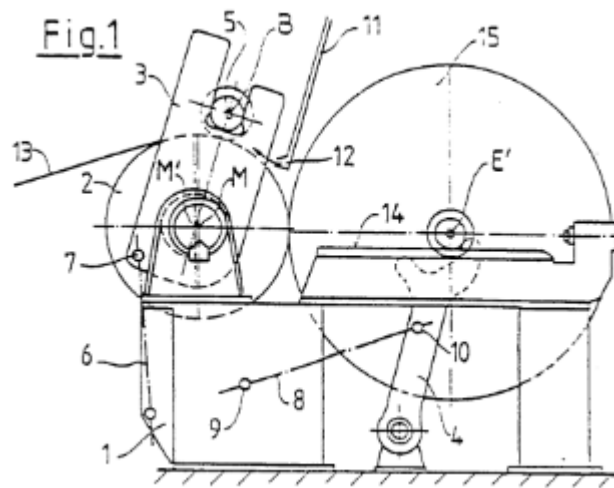
Kuva 28. Mittausyksikkö (Thermo Scientific 2016).



Kuva 29. Mittausyksikkö mittaa yhden pisteen kerrallaan ja kohdistaa saadun arvon säätöpulttikohtaisesti materiaaliradan leveys suunnassa.

3.9 Kiinnirullain

Ekstruusiolinjan loppupäässä on kiinnirullain, jossa syntyy ns. konerulla. Kiinnirullauspukin pitää pystyä rullaamaan tehty tuote koneen maksimi tuotantonopeudella oikeaan kireyteen aiheuttamatta virheitä juuri valmistettuun tuotteeseen. Rullanvaihto pitää pystyä tekemään mieluiten täydessä vauhdissa. Nykyään käytetään joko pope-rullaajaa tai keskiövetoista rullaajaa. Kantotelarullain on käytössä vanhemmissa koneissa ja leikkureilla. Kantotelarullain vaatii koneen pysäyttämistä rullan vaihdon yhteydessä, joten sen käytöstä on luovuttu lähes kokonaan ekstruusiolinjoissa. Puhtaasti keskiövetoista kiinnirullainta käytetään ohuille filmeille, yhdistettyä vetoa filmeille ja laminaateille ja pope-rullainta (kuvat 30 ja 31) papereille, laminaateille ja kartongeille. (Metsäteollisuuden työnantajaliitto 1982).



Kuva 30. Pope-rullaimen periaate (USPatent 2016)



Kuva 31. Pope-kiinnirullain (Quattrotec Oy 2016)

4 LINJAOHJAUSJÄRJESTELMÄ

Nykyaikaisen paperinjalostus tuotantolinjan linjaohjausjärjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa kaiken kattava yhtenäinen ohjausjärjestelmä koko tuotantolinjalle. Linjaohjausjärjestelmän tärkeimpänä käyttötarkoituksena on tuotantolinjan sähkömoottoreiden ja toimilaitteiden ohjaus. Ohjausperiaatteet voivat vaihdella suorasta tapahtuma-aikaisesta ohjauksesta erilaisten laskentojen perusteella tehtäviin ohjauksiin. Esimerkiksi aputoimilaitteiden päälle ja pois ohjaukset toimivat tapahtuma-aikaisesti prosessinohjaajan valitsemana, tai erilaisten etukäteen annettujen ehtojen täyttymisen kautta. Laskentaperusteiset ohjaukset ottavat vastaan analogia-antureiden mittaamia arvoja, ja siirtävät ne etukäteen ohjelmoituihin laskentaosioihin, ja ohjaa sähkömoottoreita ja joitakin aputoimilaitteita saavutettujen laskentatulosten mukaan. Linjaohjausjärjestelmä myös mittaa lukemattomia suureita prosessin käydessä, ja antaa näistä informaatiota prosessinohjaajille, tai vaihtoehtoisesti antaa automaattisia hälytyksiä etukäteen määritettyjen raja-arvojen ylityttyä tai alituttua. Yksinkertaistettuna voidaan sanoa että mitä enemmän informaatiota prosessista prosessinohjaajilla on saatavilla, sen helpompaa, tarkempaa ja tuotavampaa prosessin ohjaaminen on. Toisekseen mitä enemmän muistin- ja aistinvaraisia asioita pystytään korvaamaan automaattisilla hälytyksillä, sitä vähemmän syntyy tuotantohylkyä ja tuotantokatkoja.

4.1 Rakenne

Nykyaikainen linjaohjausjärjestelmä sisältää tarvittavan yhdistelmän ja määrän ohjelmoitavia logiikkaohjaimia. Ohjelmoitavat logiikkaohjaimet muodostuvat keskusyksiköistä eli laskentayksiköistä, virtalähteistä, kommunikointiprosessoreista, liitäntäyksiköistä, toimintayksiköistä sekä sisään- ja ulostuloyksiköistä (kuva 32). Ohjelmoitavalla logiikkaohjaimella ohjataan taajuusmuuttajia ja kenttälaitteita, jotka puolestaan ohjaavat joko sähkömoottoreita, tai erilaisia tuotantolinjan apulaitteita. Linjaohjausjärjestelmä saattaa sisältää useamman erilaisen logiikkaohjain yhdistelmän, ja nämä useimmiten ovat keskenään yhdistettynä teollisuuden suunnitellulla kommunikointi järjestelmällä. Logiikkaohjaimien ohjaaminen perustuu niihin etukäteen rakennettuihin ja syötettyihin ohjelmiin, joihin reaaliaikaisesti vaikutetaan prosessinohjaus päätteeltä, joka voi olla joko yksittäinen HMI-kosketuspaneeli (*Human Machine Interface*), näiden yhdistelmät tai keskitetyssä prosessinohjaus valvomossa oleva näppäimistö ja hiirellä ohjattava yhden tai useamman kuvaruudun graafinen käyttöliittymä, eli SCADA-järjestelmä (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Ohjelmoitavia logiikkaohjaimia valmistaa useampi valmistaja, kuten esimerkiksi kotimainen ValmetDNA (entinen metsoDNA), saksalaiset Siemens ja Beckhoff, japanilainen OMRON sekä yhdysvaltalainen Rockwell (Allen-Bradley). Tässä työssä kuitenkin keskitytään ainoastaan Siemensin ohjelmoitaviin logiikkaohjaimiin, koska esimerkkinä ja suunnittelu- sekä testialustana käytettävällä tuotantolinjalla on käytössä ainoastaan Siemens-logiikkaohjaimet.



Kuva 32. Siemens-merkkisen ohjelmoitavan logiikkaohjaimen eri osia (Siemens 2016).

4.1.1 Siemens keskusyksikkö ja ohjelmamuisti

Keskusyksikön sisäisiä toimintoja ohjaavat mikroprosessori ja käyttöjärjestelmä. Mikroprosessori toimii käyttöjärjestelmän ja sovellusohjelman ehdoilla. Käyttöjärjestelmän laatii logiikan valmistaja, sovellusohjelman tekee logiikan käyttäjä. Ohjelmamuistiin kirjoitetaan käskyt, kuinka logiikan kussakin tilanteessa tulee toimia. Keskusyksikön tehtävänä on lukea tulot, ja suorittaa ohjelmamuistissa oleva ohjelma, ja näiden perusteella asetella lähdöt. Keskusyksikkö voi olla toiminnaltaan pyyhkäisevä tai reaaliaikainen. Pyyhkäisevässä logiikassa toiminta on kolmivaiheinen: 1. tulosten luku, 2. ohjelman suoritus ja 3. lähtöjen muokkaaminen. Tämä ohjelmakiertoaika voi olla kiinteä tai vaihteleva. Ohjelmakierron aikana ei voida suorittaa muutoksia, tästä johtuu pyyhkäisevän logiikan hitaus. Reaaliaikaisissa logiikoissa ei käytetä apumuisteja, vaan tulot ja lähdöt voivat muuttua myös ohjelmajakson aikana. Reaaliaikaisuus saattaa aiheuttaa toimintojen ajoituksessa loogisia virheitä, eli toiminnallisia virheitä ohjauksessa. (Oulun yliopisto 2013).

4.1.2 Virtalähteet

Virtalähde on automaatio- ja koneautomaatiojärjestelmien sydän, joka taukoamatta syöttää virtaa toimintojen ylläpitämiseksi. Tehokas virtalähde on perusedellytys prosessin toimivuudelle. Useimmiten virtalähde ottaa ja muuntaa 230 V vaihtovirran 24 V tasavirraksi, jonka se syöttää automaatiojärjestelmään.

4.1.3 Kommunikointiprosessorit

Kommunikointiprosessorit eli CP-yksiköt ovat erillisiä väyläkommunikointiin tarkoitettuja yksiköitä, jotka vähentävät järjestelmän keskusyksikön eli CPU:n kommunikaatiotehtäviä. CPU:ssa itsessään useimmiten on esimerkiksi Profibus- liityntä, jolla CPU laskennan ohella hoitaa väyläkommunikointia, mutta käytettäessä erillistä CP-yksikköä, keskusyksikön ei tarvitse hoitaa väyläkommunikointia, jolloin suurempi osa CPU:n resursseista on käytettävissä itse laskentaan.

4.1.4 Liitântäyksiköt

Logiikkajärjestelmän ollessa erittäin laaja, tai tilan puutteen vuoksi, järjestelmä saatetaan asentaa useampaan kuin yhteen asennuskiskoon. Tällöin liitântäyksiköitä eli IM-yksiköitä käytetään yhdistämään eri asennuskiskoissa olevat järjestelmän osat toisiinsa.

4.1.5 Toimintayksiköt

Toimintayksiköt eli FM-yksiköt voidaan valjastaa suorittamaan jotain tiettyä laskentaa, esimerkiksi pulssianturilta tulevaa kierrosnopeus tietoa, ja vapauttaa näin ollen keskusyksikön resursseja itse prosessin laskentaan.

4.1.6 Sisään- ja ulostuloyksiköt

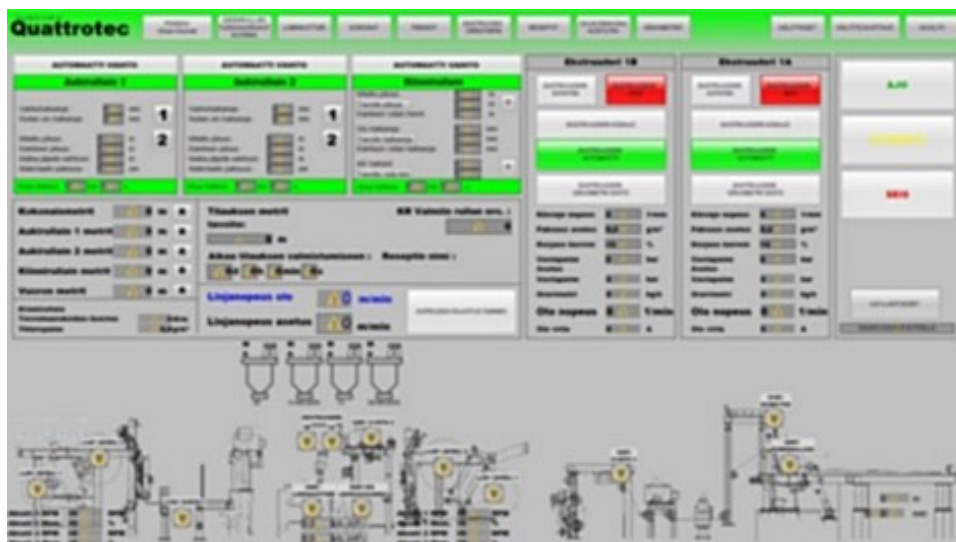
Sisääntuloyksikköön liitetään kaikki tulosignaalit: rajakatkaisijat, kytkimet, painonapit jne. Nykyään toteutukset eivät aina ole pelkästään binäärisiä. Digitaalinen sisääntulo yksikkö on binäärinen, eli päällä/pois yhden binääritulon. Uusissa kehittyneissä logiikka järjestelmissä on analogia-tuloyksiköitä, joihin voidaan suoraan kytkeä esim. lämpötila-anturit, paineanturit jne ja analogia-lähtöyksiköitä mm. venttiilin ohjauksille.

Ulostulo yksiköihin kytketään kaikki toimilaitteet: magneettiventtiilit, merkkilamput, kontaktorit jne. Ulostulojenkaan ei tarvitse olla vain binäärisiä. Digitaalinen ulostulo yksikkö on binäärinen, eli päällä/pois. Analogiset ulostulo yksiköt mahdollistavat eri toimilaitteiden ohjaamisen standardiviestejä käyttäen. Erilaisia sisään- ja ulostuloyksiköitä löytyy runsaasti, niiden ominaisuuksista ja käyttökohteista saa parhaiten tietoa valmistajien tuoteluetteloista.

4.1.7 Kosketuspaneelit ja PC-pohjaiset valvomot

Jotta prosessia pystyttäisiin ohjaamaan, täytyy prosessinohjaajalla olla josain määrin mahdollisuus vaikuttaa ohjelmoitavan logiikkaohjaimen toimintaan. Ohjaimen etukäteen rakennettuun ja syötettyyn ohjelmaan on asetettu osioita, joihin prosessinohjaaja asettaa halutun ohjearvon tietyille toiminnolle, ja logiikkaohjain säätää tuotantolinjan toimintaa asetetun ohjearvon mukaisesti. Nykyaikaisissa linjaohjausjärjestelmissä prosessin ohjaus tapahtuu, joko yksittäisiä kosketuspaneeleita operoimalla, tai laajempaa PC-pohjaista valvomosovellusta (kuva 33) hyväksi käyttäen. Kosketuspaneelein ohjattua linjaohjausjärjestelmän ja prosessinohjaajan välistä yksinkertaisempaa kommunikointitapaa kutsutaan lyhenteellä HMI (*Human Machine Interface, ihmisen ja laitteiston rajapinta*).

Laajempaa ja monimutkaisempaa ohjaustapaa, jossa käytetään prosessinohjaus valvomoon sijoitettua tietokoneella toteutettua, hiirellä ja näppäimistöllä ohjattua graafista käyttöliittymää (kuva 33), kutsutaan lyhenteellä SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Tällainen järjestelmä useimmiten sisältää useamman suuren kuvaruudun, joihin logiikkaohjain syöttää suunnattoman määrän reaaliaikaista tietoa prosessista kaiken aikaa.



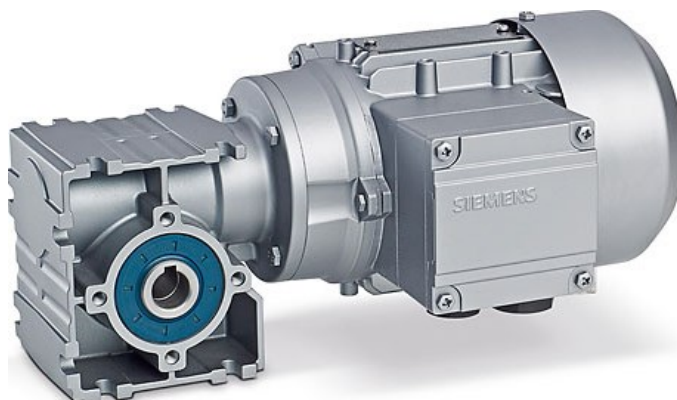
Kuva 33. Linjaohjausjärjestelmän valvomo-ohjelmisto eli graafinen käyttöliittymä (Quattrotec 2016).

4.2 Toiminta käytännössä

Nykyaikaisen ekstruusiopäällystys ja –laminointi tuotantolinjan ollessa kyseessä, linjaohjausjärjestelmä on rakennettu siten, että samalla järjestelmällä pystytään ohjaamaan kaikkia, tai ainakin suurinta osaa tuotantolinjan eri osista ja laitteista. Yllä mainitun tuotantolinjan tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että samalla järjestelmällä täytyy pystyä hallitsemaan tuotantolinjan materiaalirata linjan ensimmäisestä aukirullaimesta linjan kiinnirullaimen asti. Tämän lisäksi hallitaan kaikki ”sivusta” tulevat materiaalliradat ja erilliset toiminnalliset yksiköt esim. päällystysyksiköt.

4.2.1 Moottorikäytöt

Ryhmiksi kutsutaan tuotantolinjan eri osa-alueita, jotka sisältävät joko kahden telan muodostaman nipin, jossa vähintään toisen telan pyörittävän käyttövoiman muodostaa sähkömoottori, tai kaksi toisistaan irrallaan olevaa kitkapintaista telaa, jotka muodostavat S-kirjaimen muotoisen radanviennin, ja joiden pyörittävän käyttövoiman muodostaa sähkömoottori tai –moottorit. Sähkömoottoreiden ja telojen välissä on yleensä lisäksi vaihteisto tai välitys (kuva 34), jolla sähkömoottoreiden pyörimiskierrokset ja momentti sovitetaan haluttuihin telojen pyörimisnopeuksiin ja ratakiireyteen. Nykyaikaiset moottorikäytöt ovat varustettuja vaihtovirta sähkömoottoreilla, joiden pyörimisnopeutta hallitaan taajuusmuuttajalla (kuva 35), jota ohjaa ohjelmoitava logiikkaohjain. Moottorikäyttöjen ohjaus on yleensä logiikkaohjaimessa tapahtuvien monimutkaisten laskentojen tulos. Moottorikäyttöjen pyörimisnopeutta hallitaan joko nopeussäädöllä tai momenttisäädöllä.



Kuva 34. Siemens-merkkinen vaihdemoottori (Siemens 2016).



Kuva 35. ABB-merkkinen taajuusmuuttaja (ABB 2016).

4.2.2 Automaattiset hälytykset

Nykyaikaisten ohjelmoitavien logiikkaohjainten avulla pystytään tuotantoprosessin jokainen muuttuja saamaan automaattisen hälytyksen vaikutuksen alaiseksi haluttaessa. Tarkasteltavalla tuotantolinjalla on käytössä monia erilaisia hälytyksiä, joiden raja-arvoja mitataan lämpötilan, paineen, pinnankorkeuden, massan, säteilyn, jännitteen, sähkövirran, sijainnin ja asennon perusteella. Linjaohjausjärjestelmään asetetaan haluttu raja-arvo ja logiikkaohjain väsymättömästi mittaa asetettua prosessisuuretta erilaisten antureiden avulla. Asetetun raja-arvon ylittyessä tai alittuessa logiikkaohjain antaa automaattisesti hälytyksen, joko äänimerkin, tai valomerkin avulla, tai tekstisyötteenä tai kuviona valvomopaneelilla.

5 KONENÄKÖ

Automaatiotekniikan nopea kehittyminen on lisännyt teollisuuden tuotantomääriä. Samaan aikaan laadunvalvonnan vaatimukset ovat kasvaneet. Tämän vuoksi yhä useammat yritykset ovat valitsemassa konenäön vaativiin laadunvalvonnan tehtäviin. Konenäköjärjestelmien hintojen lasku on avannut uusia käyttökohteita. Konenäkö tarjoaa luotettavan, nopean ja edullisen vaihtoehdon ihmisilmälle. (Provondor Oy 2017).

Konenäkö nykymuodossaan toimii parhaiten tehtävissä, joissa ihmisen käyttö ei ole mahdollista, tai taloudellisesti kannattavaa. Konenäön avulla parannetaan teollisuudessa tuottavuutta, laatua, ja näistä seuraten kannattavuutta. (Mäenpää, Niskanen, Pyökkö, Ropponen & Silven 2008).

5.1 Konenäön määritelmä

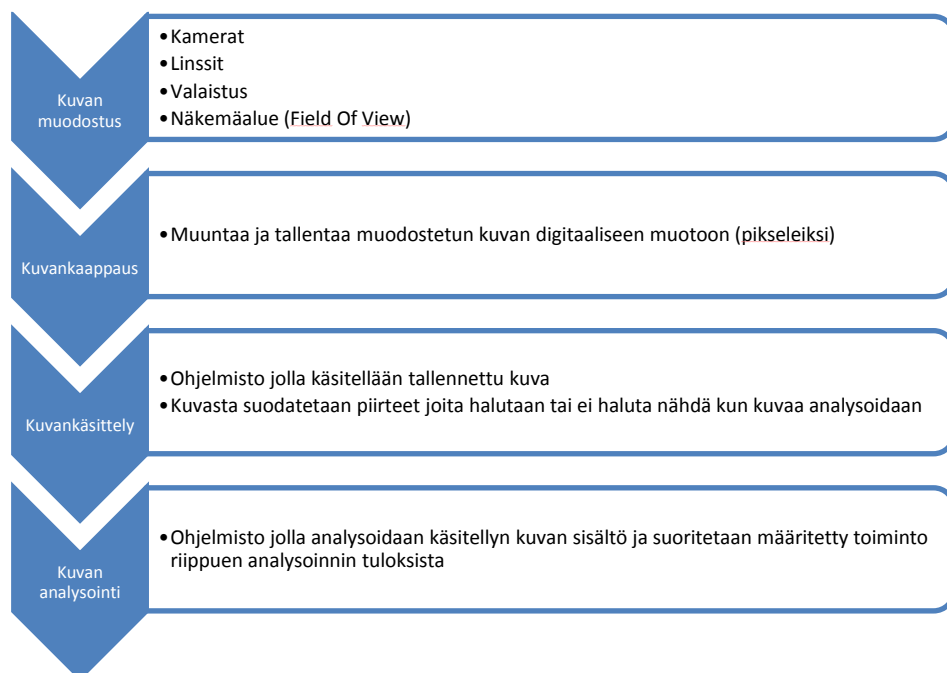
Konenäkö tarkoittaa kokonaisuutta, jossa kuvan hankinta, käsittely, analysointi, ja sen perusteella tehtävät päätökset suoritetaan tietokoneella, tai muulla digitaalisen laskennan järjestelmällä. (Pikkarainen 2004).

Konenäkö jäljittelee ihmisen näköaistia, keräten kameralla parametrejä tilanteeseen parhaiten soveltuvassa valaistuksessa. Kerätyistä parametreistä segmentoidaan tarvittavat piirteet, joita verrataan referenssikuvaan. Teollisessa tuotannossa konenäkö on väsymätön, ja tuottaa tasalaatuisempaa tulosta kuin ihminen. Tätä hyödynnetään kohteiden tunnistuksessa, ohjauksessa, tarkastustehtävissä ja laaduntarkkailussa. (Skinnari 2005).

5.2 Toimintaperiaate

Konenäön toimintaperiaate voidaan jakaa neljään osaan, kuvan muodostukseen, kuvankaappaukseen, kuvankäsittelyyn ja kuvan analysointiin.

Taulukko 1. Konenäön toimintaperiaate.



5.2.1 Kuvan muodostus

Kuva muodostetaan kameralla, konenäkösovelluksissa elektroniikkaan perustuvalle valotettavalle kennolle, jossa valon avulla tuotetaan jännitetasoja kennon sisältämiin valodiodeihin, eli pikseleihin. Valodioidien fyysinen koko määrittää siten myös pikseleiden fyysisen koon, joka taas määrittää pikseleiden määrän tiettyä kennokokoa kohden. Kuvan muodostumisen perustuessa detektorin valottamiseen, se edellyttää hyvää valaistusta,

joka onkin konenäköjärjestelmän eräs kriittisimmistä osa-alueista. Kuva rakentuu kuvapisteistä, joiden määrällä on yhteys kuva laatuun, eli mitä suurempi pikseleiden määrä pinta-ala yksikköä kohden, sitä suurempi kuvan tarkkuus on. (Kurkioja 2008).

5.2.2 Kuvankaappaus

Tuotettu kuva on yleisesti analogiasignaalia, joka on muutettava elektronikan helpoimmin käsittelemäksi digitaalisignaalin muotoiseksi. Muuntaminen analogisesta digitaaliseen tapahtuu A/D- muuntimella. (Kurkioja 2008).

Muunnoksen jälkeen kuva siirretään, joko järjestelmän käyttömuistiin kuvankäsittelyä varten, tai tallentimelle myöhempää käyttöä varten.

5.2.3 Kuvankäsittely

Kuvankäsittelyn tarkoituksena on valmistella muodostettu kuva muotoon, jolla sitä on optimaalisinta analysoida. Kuvankäsittelyllä kuvasta poistetaan virheitä, kuten kohinaa. Kuvasta myös suodatetaan osat ja piirteet, joita ei tarvita ja vahvistetaan tai selvennetään piirteitä, joita halutaan analysoida.

5.2.4 Kuvan analysointi

Kuvan analysointi tapahtuu ohjelmistolla, jolla määritellään mitä kuvasta halutaan nähdä, ja mitkä ovat hyväksytyt ja ei-hyväksytyt parametrit. Tunnettuja ohjelmistoja ovat esimerkiksi Cognex VisionPro ja Matlab. Ohjelmistoissa on monasti myös valmiit rajapinnat eri automaatiojärjestelmiin, kuten Siemens S7.

6 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ

Konenäköjärjestelmät suorittavat pääasiassa tarkoin ennalta ohjelmoituja tehtäviä, kuten kappaleiden laskentaa liukuhihnalta, sarjanumeroiden lukemista tai pintavikojen etsimistä. Vaikka konenäköjärjestelmillä ei ole älyä tai ihmisen oppimiskykyä, niitä pidetään käyttökelpoisina useaan eri tehtävään. Järjestelmiä käytetään tehtäviin, joissa optisen tarkastuksen pitää olla nopeaa, tarkkaa, ympärivuorokautista ja toistettavaa.

Konenäköllä voidaan korvata ihmiselle rasittavia rutiinitehtäviä esimerkiksi liukuhihnalla, tai suorittaa ihmisen näkökyvylle mahdottomia tehtäviä käyttämällä avuksi aallonpituuksia, joita ihmisen silmä ei pysty havaitsemaan. (Wikipedia 2017).

6.1 Konenäköjärjestelmän rakenne

Konenäköjärjestelmä koostuu yhdestä tai useammasta kamerasta, kamerat voivat olla myös eri tyyppisiä, valaistusjärjestelmästä, tiedonsiirtojärjestelmästä, laskentayksiköstä sekä kuvankäsittely- ja analysointiohjelmistosta.

6.2 Konenäkökamera

Konenäössä käytettävät kamerat ovat fyysiseltä kooltaan erittäin pienikokoisia, johtuen elektroniikan komponenttien valmistuskoon pienentymisestä. Kamera sisältää detektorin (kennon), jolle valotus tapahtuu, oheiselektroniikan, sekä liitännät ulkoiselle tiedonsiirrolle (I/O), valaistuksen ohjaukselle, ja kierteet optiikalle. Konenäössä käytettävät kameratyyppit ovat CCD- kennolla (Charge Couplet Device) toimiva analogikuvaan perustuva kamera tyyppi, sekä täysin digitaalinen CMOS- kenno (Complementary Metal- Oxide- Semiconductor) tyyppinen kamera. CCD- kennolla varustetussa kamerassa kuva muodostuu analogisena kennolle, josta se analogia/digitaaliksi muunnoksen jälkeen siirtyy digitaaliseen muotoon. Tämä kenno tyyppi on kaikissa nk. digitaalikameroissa vallitseva toistaiseksi, johtuen kennon edullisemmista valmistuskustannuksista. Kenno sisältää valoherkkiä fotodiodeja, jotka muodostavat kohteesta valotuksen voimakkuuden perusteella musta-valkean kuvan. Värikameroissa värit saadaan aikaiseksi diodien päällä olevien värisuotimien avulla. Tyypillisesti CCD-kenno värikameroissa käytetään nk. RGB- suodinta, jolloin saadaan punainen, vihreä ja sininen väri muodostettua. CCD- kenno muodostuu pikseleistä, joka on kooltaan hyvin pieni, ja mitä enemmän pikseleitä on esimerkiksi alaltaan 1/3 tuuman kennossa, sitä pienempiä pikselit ovat kooltaan, ja sitä suurempi on kuvan tarkkuus. Yksi pikseli sisältää yhden fotodiodin. Pikseleissä valon määrä muuttuu sähköiseksi varaukseksi, joka pikseli pikseliltä luetaan numeeriseksi arvoksi. CCD-kenno koostuu kahden-tyyppisistä fotodiodeista, nk. parillisista ja parittomista, jotka reagoivat valoon, jolloin ne synnyttävät sähkövarauksia. Näistä varauksista muodostuvat pikseleiden bitit, joiden yhdistelmästä muodostuu digitaalinen kuva. CCD- kennon keksivät Willard S Boyle ja George E Smith, vuonna 1969, josta ansiostaan he saivat muun muassa Nobelin fysiikan palkinnon vuonna 2009. CCD- kennon valmistajia maailmassa vain muutamia. (Iso-Markkula 2010).

CMOS- kenno on yleistymässä nykytekniikan, ja valmistajien runsauden mahdollistaessa kennolle edullisemmat valmistuskustannukset. Tällä täysin digitaalisella järjestelmällä saadaan laitetta yksinkertaistettua, koska ei tarvita erillisiä signaalimuuntimia. Tässäkin järjestelmässä kenno ottaa vastaan analogisen signaalin, joka jo kennossa muutetaan digitaaliseen muotoon, tästä nimitys täysin digitaalinen kamera. CMOS- kennossa jokainen pikseli itse muuntaa varauksen jännitteeksi, ja suorittaa signaalin vahvistuksen. Tällä saavutetaan etuna se että se, että varausta ei ole tarvetta siirtää kennolta eteenpäin, jolloin kennon energian kulutus on huomattavasti alhaisempi CCD- kennoon verrattuna. CMOS- kennot kehitettiin 1990-

luvun loppupuolella, ja markkinoille ne tulivat 1998. Yhteistä molemmille kameratyypeille on, että ne toimivat järjestelmän pääosassa, eli kuvan muodostuksessa, sekä se että ne koostuvat puolijohdesensoreista. (Iso-Markkula 2010).

Matriisikamerassa olevat CCD- tai CMOS- kennon kuvaelementtejä, eli pikseleitä $m \times n$ kappaletta matriisissa (kuvio 1). Kuvankäsittelyn nopeus hidastuu, mitä enemmän pikseleitä on. Kuvien tarkkuus eli resoluutio kasvaa suuremmilla kennoilla, koska pikseleiden lisääntyessä voidaan toistaa pienempiä yksityiskohtia. Toisin kuin matriisikameroissa, viivakameroissa pikselit ovat jonossa (kuvio 1). Tämä menettely parantaa tarkkuutta ja nopeuttaa kuvankäsittelyä, koska pikseleitä käsitellään kerralla vähemmän kuin matriisikameroissa. Viivakamerat soveltuvat hyvin liikkuvien kohteiden kuvaamiseen, esimerkiksi ratojen seurantaan. Hinnaltaan viivakamerat ovat kalliimpia kuin matriisikamerat ja ne myös vaativat paremman voimakkaamman valaistuksen. (Halinen 2007).

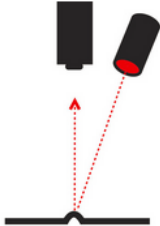
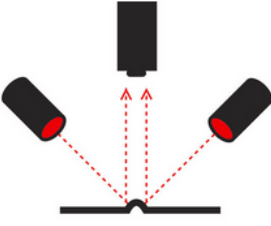
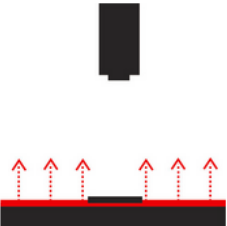
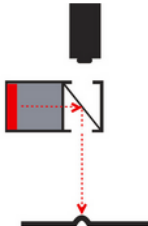
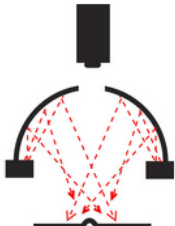


Kuvio 1. Matriisi- ja viivakameran matriisit (Alroth 2010).

6.3 Valaistusjärjestelmä

Ensimmäinen ja tärkein askel konenäkösovelluksen suunnittelussa on oikean valaistuksen valinta. Valaistus on usein koko järjestelmän edullisin ja keskeisin osa. Konenäköjärjestelmä, jolta puuttuu ihmissilmän mukautumiskyky hahmontunnistuksessa, tarvitsee selkeän kontrastieron voidakseen toistuvasti päästä oikeaan tulokseen. Peukalosääntönä voidaan sanoa, että tarvitaan vähintään 20 % kontrastiero jotta konenäköjärjestelmä voi toimia. Jopa parhaat ohjelmistot ovat riippuvaisia laadukkaista kuvista toimiakseen tehokkaasti. Järjestelmän tehokkuus paranee kun ohjelmiston ei tarvitse kompensoida huonoa kuvanlaatua. (OEM 2017).

Valaistusta (kuvio 2) valitessa tavoitteena on luoda mahdollisimman tasainen valaistusympäristö käytössä olevalle järjestelmälle. Vaikka eri valaistustyytit toimivatkin parhaiten tietyllä tavalla, niitä voidaan yleensä käyttää myös muussa kuin alunperin suunnitellussa käytössä. Esimerkiksi suoraan valaistukseen suunniteltu spottivalaisin voidaan asentaa valaisemaan kohde kulmasta, ja luoda näin epäsuora valaistus (dark field). Monesti parhaaseen lopputulokseen päästään yhdistelemällä useampaa eri valaistustekniikkaa. (OEM 2017).

	
<p>Suora valo - Direct Light Valo on suunnattu suoraan tutkittavaan kohteeseen, joka yleensä saa aikaan selkeän varjon. Tällä tekniikalla saadaan korkea kontrasti, mutta se voi monissa tapauksissa luoda ei-toivottuja heijastuksia kun tutkittavana on heijastava pinta.</p>	<p>Epäsuora valo - Dark Field Valo suunnataan kohteeseen loivassa kulmassa jätetään normaalitilanteessa näkyviin kameralle. Pinnassa olevat epätasaisuudet, naarmut ja lika muuttavat valon heijastuskulmaa ja näin näkyvät kameran kuvassa selvästi</p>
	
<p>Taustavalo - Back light Tasainen valopinta sijoitetaan tutkittavan kohteen taakse, jolloin kohteesta nähdään selkeä siluettikuva. Tätä tekniikkaa käytetään useimmiten mittaus- ja paikantamisovelluksissa.</p>	<p>Aksiaalivalo - Axial light Suorassa kulmassa sijaitsevan valaisimen valo ohjataan puolilämpäisevän peilin avulla kohteeseen suorassa linjassa kamerasta nähdä. Hyödyllinen tekniikka jos tilanpuute rajoittaa valaisinten sijoittelua, tai kuvattaessa heijastavia pintoja.</p>
	
<p>Diffusoitu valo - Diffuse lighting - Diffuse Light Heijastettu valo, joka luo pehmeän epäsuoran valaistuksen jossa ei ole varjoja tai heijastuksia. Saavutettava valaistus on saman kaltainen kuin puolilämpäisenä päivänä ulkona. Tekniikka on parhaimmillaan tutkittaessa voimakkaasti heijastavia materiaaleja.</p>	

Kuvio 2. Yleisimpiä valaistustekniikoita (OEM 2017).

6.4 Tiedonsiirtojärjestelmä

Jotta kameralla kuvattu materiaali saataisiin käsiteltäväksi ja analysoitavaksi laskentayksikköön, tarvitaan tiedonsiirtojärjestelmä. Standardoituja ja käytettyjä tiedonsiirtojärjestelmiä ovat mm. Firewire, USB2, USB3, CameraLink, CoaXPress, GigE ja GigE Vision.

- FireWire (IEEE-standardi numero 1394) tai i.Link on tietokoneen ulkoisten oheislaitteiden liitäntästandardi, joka mahdollistaa nopean tiedonsiirron. FireWire on Applen tavaramerkki ja i.Link Sonyn. Väylän pääarkkitehti oli Michael Johas Teener. FireWire 400 (IEEE.1394) mahdollistaa tiedonsiirron maksimissaan 400 megabittiä sekunnissa. FireWire 800:n (IEEE 1394b) maksimitiedonsiirtonopeus on noin 800 megabittiä sekunnissa. Samaan FireWire-porttiin voi liittää 63 laitetta samaan aikaan. SBP-2 (Serial Bus Protocol 2)

on protokolla, jonka avulla FireWire-laitteet osaavat kommunikoida keskenään; esimerkiksi tietokoneen videoeditointiohjelmalla voi ohjata digitaalivideokameraa. (Wikipedia 2017).

- USB (engl. Universal Serial Bus) on sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen. Kotikäyttäjälle näkyvin hyöty on saman liitännän sopiminen useisiin eri laitteisiin; ennen USB-väylää esimerkiksi hiiren ja näppäimistön saattoi kytkeä väärinpäin, ja tulostimilla oli omanlaisensa liitännätapa. Väylä tukee kytke ja käytä -tekniikkaa, jolloin esimerkiksi tulostin kertoo tietokoneelle mallinsa, ja tietokone voi tämän perusteella asentaa automaattisesti oikean ohjelmiston. Aiemmin käyttäjän piti kertoa käyttöjärjestelmälle asennetun tulostimen merkki ja malli. Vuonna 1995 johtavat laite- ja ohjelmistovalmistajat (mm. Intel, Microsoft, NEC ja Compaq) perustivat USB-Implementers-Forum. Liitäntä eri versioineen on laajasti käytetty, nykyään myös pienten akkukäyttöisten laitteiden kuten matkapuhelimien ja MP3-soitinten latausliittimenä. (Wikipedia 2017).
- USB 3.0 on järjestyksessä toinen suuri uudistus USB (engl. Universal Serial Bus) sarjaväyläarkkitehtuuriin. Vuonna 2008 esitelty USB 3.0 tarjoaa uuden siirtotilan nimeltään "SuperSpeed" (eroaa USB 2.0 -liitännästä liittimen sinisen värin tai liittimessä olevan SS-kirjainyhdistelmän perusteella), joka mahdollistaa tiedon siirtämisen jopa 5 Gbit/s (625 MB/s) nopeudella; yli kymmenen kertaa nopeammin kuin USB 2.0, jonka siirtonopeus on 480 Mbit/s (60 MB/s). (Wikipedia 2017).
- Camera Link on rakennettu kamerasovelluksia silmälläpitäen, ja se on paljon käytetty ja vakiintunut standardi. Camera Link -väylän siirtonopeus on 850 MB/s. Uudessa 2.0 versiossa on mahdollista viedä käyttöjännite laitteeseen sekä vaihtoehtona pienempi liitin. Camera link on pisteestä pisteeseen -liitäntä, jossa kamera liitetään kuvankaappauskortin kautta järjestelmään. (VisionOnline 2017).
- CoaXPress on koaksiaaliliitäntä, joka on suunniteltu kuvan siirtoa varten. Sen tiedonsiirtonopeus yhdellä kaapelilla on 6,25 Gbit/s, joskin järjestelmään voidaan liittää neljä kaapelia, joiden avulla saavutetaan 20 Gbit/s nopeus. Kaapelilla voidaan syöttää käyttöjännite laitteelle, ja sen pituus voi olla ilman toistimia yli sata metriä. Taulukossa 1 on vertailtu yleisimpien kameraliitännöiden ominaisuuksia. (CoaXPress 2017).
- Gigabit Ethernet on vanhempien Ethernet-liitännöiden uusimpia versioita. Kaapeli on usein Cat 5 -kaapelia, sen pituus voi olla jopa 100 metriä ja sen kaistanleveys on 125 MB/s. Konekäytössä liitännää kutsutaan GigE Visioniksi. Sen etuna on laajalti käytössä oleva Ethernet-standardi, jonka mukainen verkko skaalautuu helposti, ja laitteisto on edullista. Ethernet-kaapelin kautta on myös mahdollista viedä laitteeseen käyttöjännite, mutta se vaatii erillisen sovittimen. Lisäksi verkkoon voidaan liittää useampia kameroita. Ethernet-liikenne on pakettimuotoista, mikä tarkoittaa sitä, että jos ver-

kossa on useampia laitteita, voi tiedonvälitys viivästyä, koska toinen verkossa oleva laite lähettää dataa juuri sillä hetkellä. GigE-liitäntä ei ole tämän vuoksi hyvä valinta järjestelmiin, joissa kuvan toimittaminen isäntäkoneelle täytyy tapahtua tietyn aikarajan sisällä. (VisionOnline 2017).

6.5 Kuvankäsittely- ja analysointiohjelmisto

Kuvankäsittelyyn ja analysointiin on yleensä jokaisella kuvankaappauskortin toimittajalla omat kuvankäsittely- ja analysointiohjelmistonsa, sekä konenäkötyökalukirjastonsa. Ehkäpä edistynein ja monipuolisin ohjelmisto ja työkalukirjasto on saatavilla Cognexilta. Cognex on maailman johtava älykameroiden, konenäköohjelmistojen, älyantureiden ja koodinlukijoiden valmistaja. Näiden lisäksi markkinoilla on saatavilla yleisesti laskenta-, mitta- ja tutkimuskäyttöön suunnattuja ohjelmistoja, joissa on laajat työkalut kuvankäsittelyyn ja analysointiin, kuten Matlab ja LabView.

Matlab on interaktiivinen numeerisen laskennan ohjelmisto. Se on tehokas, monipuolinen ja laajalti käytössä teollisuudessa, yliopistoissa ja muissa tutkimuslaitoksissa. Matlabissa yhdistyvät laskentatehokkuus, ohjelmitavuus ja visualisointi. Matlabin ensimmäisen version kirjoitti Fortran-ohjelmointikielellä Cleve Moler 1970-luvun lopulla. Ohjelman saavutettua suosiota sekä opetus- että tutkimuskäytössä, se kirjoitettiin uudelleen C-ohjelmointikielellä. Ensimmäinen kaupallinen versio, Matlab 1.0, julkaistiin vuonna 1984. Alunperin Matlab kehitettiin matriisilaskennan ohjelmistoksi (MATrix LABoratory), mutta nykyään se on laajentunut hyvin monelle sovellusalueelle. Matlabille on tehty suuri joukko ns. toolboxeja, joilla on laajennettu Matlabin toiminnallisuutta uusille alueille. Toolboxit on kirjoitettu Matlabin omalla ohjelmointikielellä, ja niitä on tarjolla signaalin- ja kuvankäsittelyyn, optimointiin, sumeaaan logiikkaan, neuroverkkoihin, osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen ym. (Oulun ammattikorkeakoulu 2012).

Matlabilla on useita etuja perinteisiin numeerisen laskennan työkaluihin (esim. Fortran- ja C-ohjelmointi) verrattuna:

- Ohjelmointi Matlabin korkean tason kielellä on nopeaa ja kohtalaisen helppoa.
- Tietorakenteisiin ei tarvitse kiinnittää samassa määrin huomiota kuin perinteisillä ohjelmointikielillä. Erityisesti taulukoita (matriiseja) ei tarvitse esitellä ennen käyttöä.
- Interaktiivinen käyttöliittymä mahdollistaa erilaiset nopeat kokeilut (ns. prototyypitys).
- Korkeatasoisen grafiikan ja visualisoinnin teko on helppoa.
- Matlabilla tehdyt m-tiedostot ovat täysin siirrettäviä eri tietokonealustojen välillä.
- Ohjelmistoa voidaan laajentaa toolboxeilla. (Oulun ammattikorkeakoulu 2012).

Edelleen Matlab on moderni ohjelmointikieli ja ongelmanratkaisuympäristö. Siinä on kehittyneet tietorakenteet, se sisältää editorin ja virheentarkistustyökalut (ns. debuggaus). Se tukee nykyään myös oliosuuntautunutta ohjelmointia. Matlab on tulkattava kieli, joten se kärsii pienestä tehohäviöstä käännettäviin kieliin verrattuna. Uusimmat versiot sisältävät kuitenkin erilaisia sisäänrakennettuja kiihdytysmenetelmiä. Matlabia voi käyttää interaktiivisesti sen oman käyttöliittymän avulla, tai voidaan ajaa Matlabin ohjelmointikielellä itse kirjoitettuja Matlab-ohjelmia. Matlab-ohjelmia voidaan myös integroida Matlab-ympäristön ulkopuolisiin sovelluksiin, jotka on tehty käännettävillä ohjelmointikielillä (esim. C, C++, Fortran tai Java). Siis voidaan esimerkiksi käyttää Matlabista käsin ko. kielillä tehtyjä ohjelmia. Edelleen on mahdollista kääntää Matlab-ohjelmia C- tai C++-kielelle tehokkaampaa suoritusta varten. (Oulun ammattikorkeakoulu 2012).

Cognex VisionPro -ohjelmisto on johtava PC-pohjainen konenäköohjelmisto, jonka avulla käyttäjät voivat nopeasti luoda ja ottaa käyttöön haastavimmat 2D- ja 3D-visuaaliset sovellukset, riippumatta siitä, mitä kameraa tai kuvankaappauskorttia he käyttävät. VisionPro-työkalukirjasto tarjoaa laajan valikoiman toimintoja geometrisesta kohteen paikannuksesta ja tarkastuksesta tunnistamiseen ja mittaamiseen. Tehokkaat konenäkötyökalut (mukaan lukien PatMax, LineMax, OCRMax ja IDMax) suorittavat tarkat ja toistettavat tarkastukset.

- Laajan .NET-luokan kirjasto- ja käyttäjäohjauksen avulla käyttäjät voivat integroida VisionPro-ohjelmiston täysin eri automaatiojärjestelmiin.
- Cognex Designer ja VisionPro QuickBuild mahdollistavat kuvan hankinnan määrittämisen, konenäkötyökalujen valitsemisen ja optimoinnin sekä hyväksyty/hylätty päätöksen ilman ohjelmointikielen käyttöä.
- Täysin yhteensopiva uusimpien Windows-ympäristöjen kanssa ja tukee Microsoftin 64-bittisiä käyttöjärjestelmiä, jotka vastaavat laajempien kameroiden ja suurempien pikselisyvyyksien vaatimuksia.
- Tukee laajaa valikoimaa Cognex-teollisuuskameroita ja useimpia kolmannen osapuolen kameroita Cognex Acquisition Alliance -ohjelman kautta.

VisionPro- ja Cognex Vision Library (CVL) –tehotyökalut sisältävät älykkyyden jättää kuvan ei-kriittiset vaihtelut huomioimatta keskittyen kriittisiin vaihteluihin, ja sen kautta päättämään tuotteen hyväksyttävän laadun. Tehotyökalut eivät tarvitse laajaa ja perusteellista kuvan esikäsittelyä saavuttaakseen asetetun lopputuloksen, nopeuttaen konenäkösovellus kehitystä, ja alentaa yrityksen elinkaarikustannuksia.

- Nopea, luotettava kuvansiirto

- Suunniteltu liukuhihna työskentelyyn pienen viiveen ja suuren läpäisykyvyn vuoksi, tukee kaiken tyyppistä kuvan tallennusta: analoginen, digitaalinen, värillinen, yksivärinen, matriisin kuvaus, linjan skannaus, korkea resoluutio, monikanavainen ja multipleksoitu.
- Omien Cognex- teollisuuskameroiden (CIC) lisäksi sekä VisionPro että CVL tarjoavat avoimen kamera tuen sekä konfigurointi- ja diagnostiikkatyökalut kolmannen osapuolen kameroille. Näin asiakkaat voivat määrittää, analysoida ja muokata kameroita useille kone- näkö ympäristöille.

Cognex Designer on integroitu kehitysympäristö, jota käytetään VisionPro-ohjelmiston kanssa. Konenäkö-sovellusten luominen on monimutkaistunut vuosien varrella. Cognex Designer poistaa tarpeen käyttää Microsoft Developer Studiota tarjoamalla työkalut, joilla monimutkaiset tehtävät saadaan pilkottua pienempiin helpommin käsiteltäviin tehtäviin, jolloin projektityöt saadaan onnistuneesti päätökseen lyhyemmässä ajassa.

- Monipuolinen HMI-käyttöliittymä - Integroitu HMI-käyttöliittymän luontityökalu mahdollistaa helpon tavan kehittää ammattimaisen käyttöliittymän kehittyneillä toiminnoilla.
- Graafinen ympäristö - Graafiset sekvenssikaaviot mahdollistavat luoda 90-100% konenäkösovelluksista nopeasti ilman edistyneiden ohjelmointikielien käyttöä.
- Integroitu teollisuus I/O-kommunikointi – Cognex Designer sisältää valmiit kommunikointi rajapinnat ilman komentosarjoja Rockwellin, Siemensin ja Mitsubishin ohjelmoitavien logiikoiden kanssa.
- Tietokanta, tarkastuspolku ja reseptin hallinta.

Cognex Designerin avulla on nopeampaa rakentaa täydellisiä konenäkösovelluksia, ja kehittäjät voivat helpommin hyödyntää tehokkaasti VisionPro-työkalukirjastoa. Graafinen, virtauskaaviopohjainen ohjelmointiympäristö johtaa kaavamaiseen esitykseen, joka on helpompi ymmärtää, selittää muille ja ylläpitää. (Cognex 2017).

7 LÄMPÖKUVAUS

Lämpökuvaus eli termografia, on kuvausmenetelmä, joka hyödyntää lämpökameraa. Sitä voi hyödyntää esimerkiksi tutkittaessa mahdollisia lämmönvuotokohtia rakennuksissa. Jotkin sovellukset liittyvät lääketieteen. Näiden lisäksi lämpökuvausta käytetään laajasti ja menestyksekkäästi muun muassa palontorjunnassa, sähkölaitteistojen ennaltaehkäisevässä kunnossapidossa, teollisuuden ennaltaehkäisevässä mekaanisessa kunnossapidossa sekä laadunvalvonnassa. (Wikipedia 2017).

7.1 Lämpökuvauksen periaate

Lämpökamera mittaa kuvattavan kohteen pintalämpötilaa. Lämpökameran toiminta perustuu jokaisen kohteen pinnalta säteilevään lämpösäteilyyn, jonka voimakkuus riippuu kohteen pintalämpötilasta ja pinnan emissiokertoimesta. Lämpösäteilyn vastaanottimena toimivan lämpökameran ilmaisin muuttaa mitatun lämpösäteilyn lämpökuvaksi, josta saadaan kohteen pintalämpötilajakauma. Kameran näytölle reaaliajassa digitaalisesti muodostetusta lämpökuvasta eri lämpötilat nähdään eri väreinä tai harmaan eri sävyinä. (Paloniitty 2005).

7.2 Lämpökuvauksen teoriaa

7.2.1 Sähkömagneettinen säteily

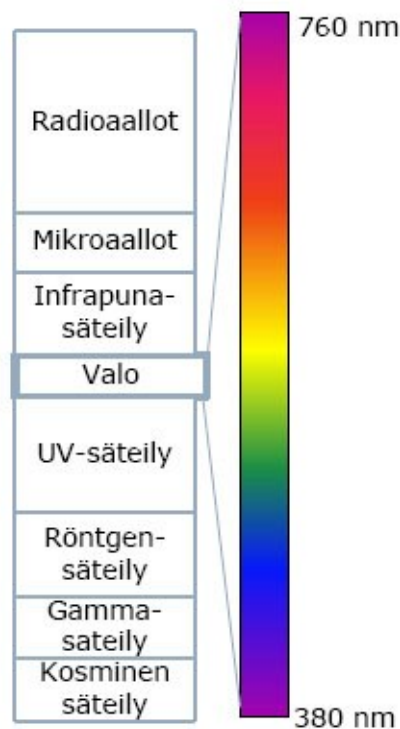
Sähkömagneettinen säteily on valon nopeudella etenevää sähkö- ja magneettikentän poikittaista aaltoliikettä. Aineet emittoivat säteilyä vain tiedetyn suuruisina energia-annoksina eli kvantteina. Sähkömagneettista aaltoliikettä on

- gammasäteily, joka on peräisin atomin ytimestä
- infrapunasäteily, näkyvä valo, ultravioletti- ja röntgensäteily, jotka aiheutuvat molekyyileissä ja atomeissa tapahtuvista energianmuutoksista
- johtimissa kulkeva vaihtosähkö ja sähköisissä värähtelypiireissä syntyvät radio- ja mikroaallot.

Fotoni on sähkömagneettisen kentän kvantti, alkeishiukkanen, jolla ei ole lepomassaa eikä sähkövarausta. Fotoneista koostuvan sähkömagneettisen säteilyn energia on $E = hf$, jossa h on Planckin vakio ($h = 6,62517 \cdot 10^{-34}$ Js = $4,135669 \cdot 10^{-15}$ eVs) ja f on säteilyn taajuus. (Opetushallitus).

7.2.2 Sähkömagneettinen spektri

Sähkömagneettisen säteilyn luokittelua sen aallonpituuden mukaan kutsutaan sähkömagneettisen säteilyn spektriksi. Sähkömagneettisen säteilyn spektrin kirjo ulottuu radioaalloista, joiden taajuus voi olla vähemmän kuin 10 kHz, gammasäteilyyn, jonka taajuus voi olla yli 10²⁴ Hz. Sähkömagneettisen säteilyn spektrin laajuus on yli 20 kertalukua, kun tarkastellaan säteilyn taajuutta. Spektri jaetaan seitsemään osa-alueeseen säteilyn taajuuden mukaan. Käytännössä eri säteilylajit menevät hieman päällekkäin vierekäisten säteilylajien kanssa. Aurinko säteilee energiaa kaikilla sähkömagneettisen säteilyn spektrin kaistoilla, mutta intensiteetin maksimi on kapealla näkyvän valon alueella. (Vahtola 2000).



Kuva 36. Sähkömagneettinen spektri (Ensto 2017).

7.2.3 Lämpösäteily eli infrapunasäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus huoneen lämpötilassa on enimmäkseen infrapuna-alueella, joten se on siis silmille näkymätöntä. Ihminen kuitenkin tuntee lämpösäteilyn lämpönä. Lämpötilan ollessa yli 500 °C näkyvän valon osuus kasvaa ja säteilevä kohde on lievästi punahehkuinen ja lämpötilan noustessa yli 1500 °C:een, säteilevän kohteen väri muuttuu valkohehkuiseksi. Lämpösäteily on johtumisen ja kuljettumisen lisäksi yksi keskeisistä lämpöenergian leviämistavoista. Muista tavoista poiketen lämpösäteily ei tarvitse siirtymiseen mitään väliainetta ja, kuten muukin sähkömagneettinen säteily, lämpösäteily liikkuu valon nopeudella. Kaikki yli absoluuttisen nollapisteen (-273 °C) lämpötilassa olevat kappaleet lähettävät pinnaltaan säteilyä ja säteilyn voimakkuus vastaa kappaleen todellista lämpötilaa. (Inkinen & Tuohi 2006).

7.3 Mustan kappaleen säteily

Kaikki kappaleet lähettävät ympäristöönsä sähkömagneettista säteilyä. Kappaleen emittoiman säteilyn voimakkuus riippuu sen lämpötilasta. Mitä korkeampi kappaleen lämpötila on, sitä enemmän se emittoi säteilyä. Lämpötilariippuvuudesta johtuen kappaleen lähettämää säteilyä kutsutaan yleisesti lämpösäteilyksi. Lämpösäteilyn aiheuttavat aineen atomeissa ja molekyyliissä kiihtyvässä liikkeessä olevat varaukset (elektronit ja protonit). Varaukset toimivat aineessa värähtelevinä sähköisinä dipoleina. Yksittäisen dipolivärähtelijän emittoiman säteilyn taajuus riippuu värähtelijän

energiatilasta. Fysikaalisen systeemin sanotaan olevan termodynaamisessa tasapainotilassa, kun systeemin menettämä ja siihen tuleva energiamäärä ovat yhtä suuret. Tällöin termiset energiansiirtomekanismit (konvektio, lämmön johtuminen ja lämpösäteily) pysyvät tasapainossa ja systeemin lämpötila pysyy vakiona. Termodynaamisessa tasapainossa olevan systeemin kaikki dipoliväriähtelijät jakautuvat tiettyihin energiatiloihin Maxwellin–Boltzmannin todennäköisyysjakauman perusteella. Termodynaaminen tasapaino on teoreettinen fysikaalinen malli, eikä se esiinny todellisissa systeemeissä täydellisesti (Vahtola 2000) (Tapio 2015).

Monet systeemit ovat kuitenkin riittävän lähellä termodynaamista tasapainoa, joten systeemin voidaan olettaa olevan tasapainossa Mustalla pinnalla tarkoitetaan pintaa, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. Tällöin pinta ei myöskään heijasta lainkaan säteilyä. Kappaletta, jonka kaikki pinnat ovat mustia, sanotaan mustaksi kappaleeksi. Termodynaamisessa tasapainossa olevan systeemin säteily on mustan kappaleen säteilyä. Pysyäkseen termodynaamisessa tasapainossa kappaleen täytyy emittoida jatkuvasti absorboimansa energiamäärä säteilyä. Näin ollen musta kappale on paitsi täydellinen absorboija, myös täydellinen emittoija. Todellisuudessa mikään kappale ei ole täydellisesti musta kappale, koska reaaliset kappaleet heijastavat aina osan tulevasta säteilystä. Monet kappaleet, esimerkiksi aurinko ja muut tähdet, ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan lähellä mustaa kappaletta. Tällöin niitä voidaan mallintaa melko tarkasti ideaalisina mustan kappaleen säteilijöinä. (Vahtola 2000) (Tapio 2015).

Mustan kappaleen määritteli ensimmäisenä saksalainen Gustav Robert Kirchhoff vuonna 1859. Kirchhoff pystyi todistamaan epäsuorasti väitteen, että mustan kappaleen emittoiman säteilyn intensiteetti riippuu pelkästään kappaleen lämpötilasta ja kappaleen emittoiman säteilyn aallonpituudesta. Mustan kappaleen säteilylakia kehittivät edelleen Joseph Stefan ja Ludwig Boltzmann 1800-luvun loppupuolella. Stefan havaitsi vuonna 1879 kokeellisesti, että mustan kappaleen emittoima säteilyteho pinta-alaa kohden on verrannollinen kappaleen absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Boltzmann johti Stefanin tuloksen teoreettisesti vuonna 1884. Tätä tulosta kutsutaan Stefanin–Boltzmannin laiksi. Saksalainen Wilhelm Wien kehitti kokeellisten tulosten perusteella niin sanotun Wienin siirtymälain vuonna 1893. Laki kertoo mustan kappaleen säteilytehon maksimia vastaavan säteilyaallonpituuden riippuvan lineaarisesti mustan kappaleen säteilijän lämpötilasta. Wienin lain todettiin pätevän tarkasti vain lyhyillä aallonpituuksilla ja melko matalissa lämpötiloissa (Vahtola 2000) (Tapio 2015).

Klassisen fysiikan mallia mustan kappaleen säteilylaiksi kehitti edelleen eteenpäin Lord Rayleigh vuonna 1900. Viisi vuotta myöhemmin Rayleigh ja Sir James Jeans julkaisivat lopullisen muotonsa saaneen Rayleigh'n–Jeansin lain, joka vastaa melko hyvin todellisuutta pitkillä aallonpituuksilla ja korkeissa lämpötiloissa. Lyhyillä aallonpituuksilla Rayleigh'n–Jeansin laki sen sijaan antoi mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle ääretöntä lähestyviä

arvoja, mikä on fysikaalisesti mahdotonta. Tätä klassista fysiikkaa vaivannutta ongelmaa kutsuttiin ultraviolettikatastrofiksi. Klassisessa fysiikassa säteilyn oletettiin olevan jatkuvaluonteista, mikä johti mainittuun ultraviolettikatastrofiin. Vuoden 1900-lopulla Max Planck yritti yhdistää Wienin ja Rayleigh'n tutkimusta kehittämään pätevän teorian mustan kappaleen säteilylaiksi. Planckin tavoitteena oli ratkaista ristiriita, joka vallitsi klassisen fysiikan ja kokeellisten havaintojen välillä. Mustan kappaleen säteilylain johtamisessa Planck teki oletuksen, että säteilevä kappale ei pystykään absorboimaan ja emittoimaan energiaa jatkuvasti, vaan ainoastaan pieninä diskreetteinä energiayksikköinä, eli kvantteina. Planck määritteli matemaattisesti yhden säteilykvantin, eli fotonin, energian olevan sen taajuuden ν ja luonnonvakion h (Planckin vakio) tulo. Tällä kvanttioletuksella Planck ratkaisi ultraviolettikatastrofiongelman ja mustan kappaleen säteilylaki sai tarkan muotonsa. Planckin kvanttioletuksen myötä käynnistyi kvanttimekaniikan kehittyminen fysiikan historiassa. (Vahtola 2000) (Tapio 2015).

7.4 Planckin säteilylaki

Reaalinen kappale emittoi säteilyä, jonka voimakkuus määritellään fysikaalisella suureella $M(T)$, säteilyvoimakkuus. Se tarkoittaa lämpötilassa T säteilevää energiaa aika- ja pinta-ala-yksikköä kohti (W/m^2). Säteilyvoimakkuudelle pätee yhtälö:

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda,$$

missä $M_{\lambda}(T)$ on spektrinen säteilyvoimakkuus (W/m^3), joka riippuu lämpötilan lisäksi säteilyn aallonpituudesta λ . Mustan kappaleen säteilijän säteilyvoimakkuus määritellään samalla tavalla, mutta sille käytetään merkinettä $B(T)$. Max Planck esitteli kuuluisan säteilylakinsa artikkelissaan vuonna 1901. Planck määritteli mustan kappaleen spektrisen säteilyenergian tiheydelle yhtälön, joka on taajuudesta ja lämpötilasta riippuva:

$$u_{\nu}(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)},$$

missä ν on taajuus, u_{ν} on spektrinen säteilyenergian tiheys ($\text{J/m}^3 \text{s}^{-1}$), jossa alaindeksi ν tarkoittaa derivaattaa taajuuden suhteen, h on Planckin vakio, c on valon nopeus tyhjiössä, k on Boltzmannin vakio ja T on lämpötila. Vastaava Planckin yhtälö voidaan kirjoittaa aallonpituudesta riippuvana, jolloin spektrisen säteilyenergian tiheyden u_{λ} yksikkö on J/m^4 :

$$u_{\lambda}(T) = \frac{8\pi h c}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}.$$

Käytännössä termografian mittauksissa mitataan säteilytehoa, jonka perusteella kappaleen lämpötila voidaan määrittää. Tällöin on tarkoituksenmukaista siirtyä säteilyenergian tiheydestä (J/m³) säteilyvoimakkuuteen (W/m²). Niiden välillä pätee seuraava yhteys:

$$M_{\lambda}(T) = B_{\lambda}(T) = \frac{c}{4} u_{\lambda}(T).$$

Yhtälön kertoman säteilyenergian tiheyden ja säteilyvoimakkuuden välisen riippuvuuden perusteella saadaan määriteltyä mustalle kappaleelle Planckin lain mukainen spektrinen säteilyvoimakkuus B_{λ} (W/m³):

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)},$$

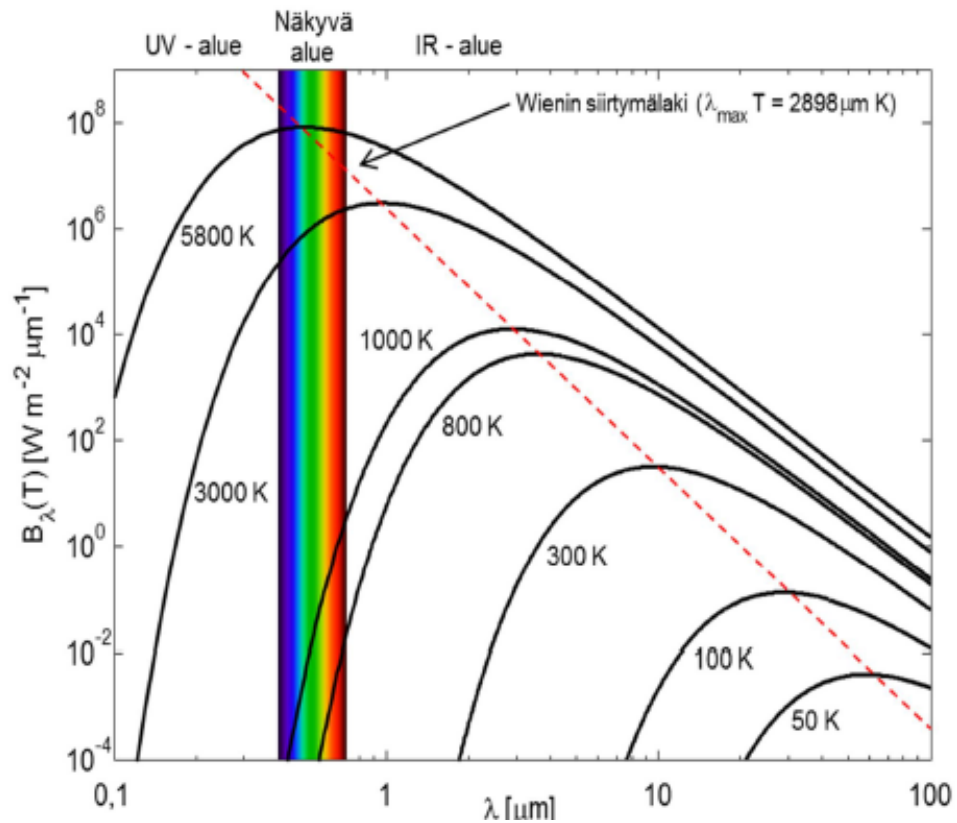
missä $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,74177 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, on Planckin ensimmäinen säteilyvakio ja $C_2 = (hc)/k = 1,43878 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ on Planckin toinen säteilyvakio. Kun derivoidaan spektrisen säteilyvoimakkuuden määrittämällä oleva yhtälö aallonpituuden suhteen ja etsitään tämän derivaatan nol-lakohta, saadaan määritettyä spektrisen säteilyvoimakkuuden maksimiarvo. Tällöin säteilyvoimakkuuden maksimia vastaavan aallonpituuden ja lämpötilan väliseksi riippuvuudeksi saadaan seuraava yhtälö:

$$\lambda_{\max} T = \frac{hc}{5k} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Yhtälö tunnetaan Wienin siirtymälakina, jonka Wilhelm Wien esitti kokeellisten tulosten perusteella jo ennen Planckin lakia. Wienin siirtymälaki kertoo, että lämpötilan kasvaessa voimakkaimman säteilyn aallonpituus λ_{\max} siirtyy kohti lyhyempiä aallonpituuksia. Tätä seikkaa havainnollistaa kuva 36. Wienin siirtymälaki on approksimaatio Planckin säteilylaista. Siirtymälain perusteella mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle voidaan johtaa Wienin approksimaatio, joka saa muodon:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)},$$

Yhtälön perusteella Planckin säteilylakia voidaan approksimoida lyhyillä aallonpituuksilla ja matalissa lämpötiloissa. Wienin approksimaation tarkkuus Planckin lakiin verrattuna on parempi kuin yksi prosentti, kun $\lambda T < 3121 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

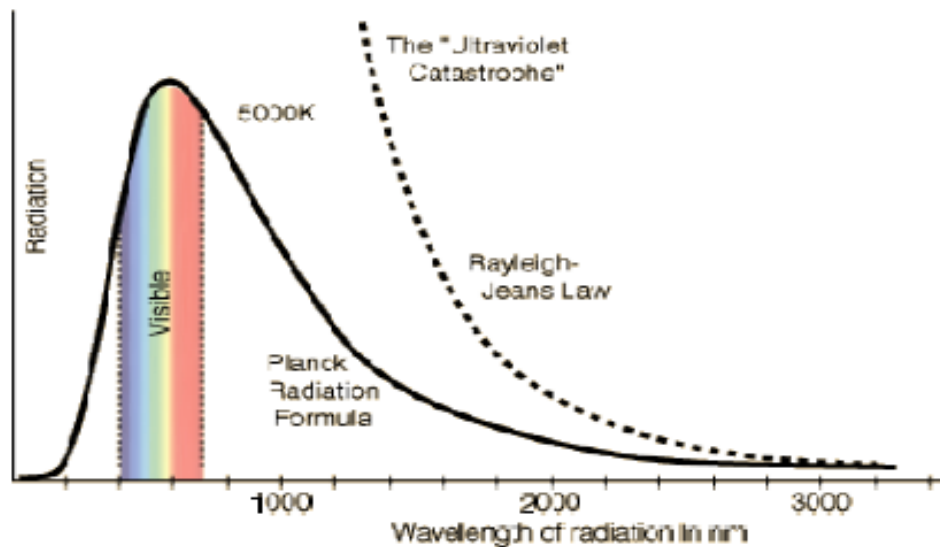


Kuva 37. Mustan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus (Planckin laki) esitettyä aallonpituuden funktiona (logaritminen asteikko) eri lämpötiloissa sekä Wienin siirtymälaki. Kuva on piirretty MATLAB-ohjelmistolla. Kuvasta nähdään, että 5800 kelvinasteen käyrän maksimi osuu näkyvän valon aallonpituusalueelle. Auriongon pintalämpötila on noin 5800 kelvinastetta. 800 kelvinasteen käyrä osoittaa likimääräisen alarajan näkyvän alueen säteilylle. (Tapio 2015).

Planckin säteilylaille voidaan johtaa myös toinen approksimaatio, joka tunnetaan Rayleigh'n-Jeansin lakina. Se on klassisen fysiikan malli mustan kappaleen säteilijälle. Rayleigh'n-Jeansin approksimaatio mustan kappaleen spektriselle säteilyvoimakkuudelle kirjoitetaan muodossa:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

Yhtälöllä approksimoidaan Planckin lakia, kun aallonpituus on suuri ($\lambda \gg \lambda_{\max}$). Aallonpituuden pienentyessä klassisen fysiikan mallin mukaan säteilyvoimakkuus kasvaa rajatta, mikä johtaa tunnettuun ultraviolettikatastrofiin. Planckin säteilylaki ratkaisee ultraviolettikatastrofi-ongelman. Planckin ja Rayleigh'n-Jeansin lakien vertailua sekä ultraviolettikatastrofi-ongelmaa havainnollistaa kuva 38.



Kuva 38. Planckin ja Rayleigh'n-Jeansin lakien vertailua lämpötilassa 5000 K (Tapio, 2015).

Mustan kappaleen säteilijälle voidaan johtaa kokonaissäteilyvoimakkuus integroimalla Planckin spektrinen säteilyvoimakkuus B_λ kaikkien aallonpituuksien yli. Tällöin tulokseksi saadaan:

$$B(T) = \int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4,$$

missä $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ on Stefanin-Boltzmannin vakio. Yhtälö tunnetaan Stefanin-Boltzmannin-lakina, jonka perusteella mustan kappaleen kokonaissäteilyvoimakkuus riippuu ainoastaan lämpötilasta ja kasvaa hyvin voimakkaasti lämpötilan kasvaessa. (Vahtola 2000) (Tapio 2015).

7.5 Emissiivisyys

Lämpökamera mittaa kohteesta lähtevää kokonaissäteilyä. Käytännössä jokaisen kappaleen pinnalta heijastuu myös muista lähteistä peräisin olevaa säteilyä, sekä joissakin tapauksissa myös pinnan läpi tullutta säteilyä (kuva 2). (Paloniitty 2005).

Kappaleen itsensä lähettämän (emittoiman) lämpösäteilyn osuus kokonaissäteilystä ilmaistaan emissiivisyytenä asteikolla 0 – 1. Tämä pintamateriaalin mukaan määrittyvä emissiokerroin on suhdeluku, joka on todellisen pinnan säteilytehon ja ideaalisen säteilijän säteilytehon suhde. Ideaalisen säteilijän eli ns. mustan pinnan, josta emittoituu vain omaa säteilyä, emissiivisyys on siis 1. Ideaaliselle säteilijälle ei ole todellista vastinetta. Jotta lämpökameran mittaama lämpötila vastaa todellista pinnan lämpötilaa, on kameran asetuksista mahdollisesti valittavissa oleva emissiokerroin valittava kuvattavaa pintamateriaalia vastaavaksi. Taulukossa 2 on esitetty

yleisten pintamateriaalien keskimääräisiä emissiivisyys arvoja. (Inkinen ym. 2006).

Taulukko 2. Pintojen keskimääräisiä emissiivisyyksiä (Inkinen ym. 2006).

Pinta	Emissiivisyys
alumiini, hapettunut	0,25
alumiini, kiillotettu	0,1
betoni	0,7
emali, kaikki värit	0,9
kumi	0,93
kupari, hapettunut	0,8
kupari, kiillotettu	0,05
lakka	0,9
lasi	0,95
muovi	0,8 - 0,95
paperi, pahvi	0,9
posliini, lasitettu	0,92
puu	0,8 - 0,9
rautalevy, ruosteinen	0,7 - 0,85
sähköteippi, musta muovi	0,95
teräs, galvanoitu	0,28
teräs, hapettunut	0,88
tiili, tavallinen	0,85
öljyväri, kaikki värit	0,95

Pinnan emissiivisyyden ollessa lähellä yhtä, lämpökameralla on saatavissa lähellä todellista olevia pintalämpötila-arvoja. Tällaisia pintoja kuvattaessa suurin osa lämpösäteilystä on kohteesta itsestään ja heijastusten osuus on pieni. Kiiltävillä pinnoilla, joilla emissiivisyys on alle 0,5, lämpösäteilystä suurin osa voi olla heijastuksia. Näistä alhaisen emissiivisyyden pinnoista lämpökameralla todellisen lämpötilan mittaaminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta. (Paloniitty 2005).

8 LAADUNVALVONTAJÄRJESTELMÄ

Integroimalla konenäkö osaksi teollisuuden automaatiosovelluksia, vähennetään tuotteiden laatupoikkeamia ja hävikkiä, sekä lisätään tuotantonopeutta. Lisäksi konenäköä käyttämällä pystytään valmistamaan laadukkaampia tuotteita edullisemmin. Konenäköä hyödynnetään laadunvalvonnassa, mittauksissa, paikoituksessa ja lajittelussa. Hyvä käyttökohde konenäkölle on nimenomaan laadunvalvontasovellukset, erityisesti yksitoikkoiset tarkistus- ja lajittelutehtävät. Ihminen herpaantuu nopeasti rutiininomaisissa tehtävissä, ja sen seurauksena lopputuotteissa on tarpeetonta laadunvaihtelua. Lisäksi ihmisen laatuikäsite on subjektiivinen, eli eri ihmiset luokittelevat laatua eri tavalla. (Karttunen 2006). Tehokas laadunvalvonta on myös kilpailukeino edullisen kustannustason maita vastaan (Koivula 2006).

8.1 Taustaa

Opintojeni alkutaipaleella työskentelin ekstruusiopäällystystuotantolinjalla, jossa valmistetaan suuria määriä kuppikartonkia. Kuppikartonki on polyeteenillä päällystettyä taivekartonkia, ja sen tärkein käyttökohde ovat kertakäyttöiset tai kierrätettävät juomakupit. Polyeteeni-muovikerros antaa tuotteelle nestetiiveyden, jonka avulla neste pysyy kupissa. Jos muovikerroksessa on reikiä tai kerros paikoin puuttuu, neste ei pysy kupissa.

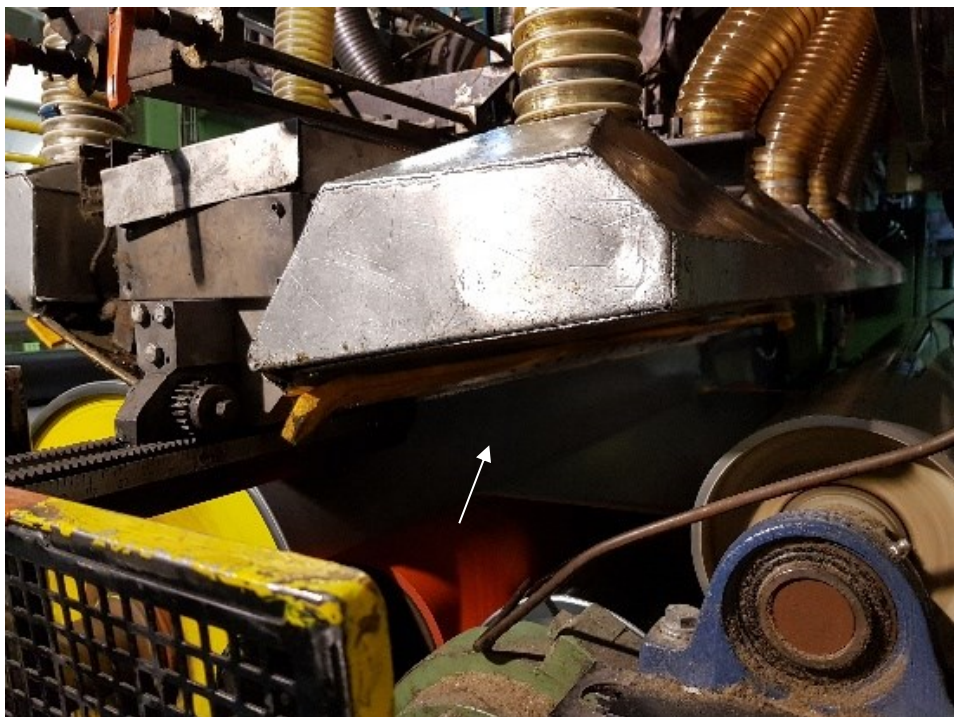
Taivekartonki valmistetaan kartonkitehtaalla ja toimitetaan rullina paperinjalostustehtaalle jatkojalostukseen. Paperinjalostustehtaalla rullat aukirullataan, päällystetään polyeteenillä, pituusleikataan sekä kiinnirullataan ekstruusiopäällystystuotantolinjalla. Paperinjalostustehtaalta päällystetty kartonki lähtee rullina kerta-astioita valmistavaan yritykseen, jossa päällystetystä kartongista valmistetaan kerta-astioita esimerkiksi juomakuppeja. Kyseisellä ekstruusiopäällystystuotantolinjalla kohdattiin suuria ongelmia sulan muovifilmin reunan repeämien vuoksi. Muovifilmin repeämien vuoksi muovikerros ei kata koko rataleveyttä, joten tuotteeseen jää muovittomia kohtia joissa neste ei pysy. Tuotantolinjan pääkoneella tuotantonopeus kyseisellä tuotteella on parhaimmillaan noin 390 m/min ja pituusleikkurilla noin 1600 m/min, joten silmämääräisesti repeämiä on vaikea havainnoida. Tällöin tuotetta, joka sisältää muovikerroksen virhettä, kulkeutuu valmiisiin rulliin, jotka kuljetetaan kerta-astioita valmistavaan yritykseen, jossa vialliset rullat aiheuttavat tuotantokatkoksia prosessissa, tai viallisen lopputuotteen hylkäämistä.

Ensisijainen tavoite on ongelman juurisyyn löytäminen, mutta koska ongelman syntymiseen saattaa vaikuttaa yksi monista asioista tai moni yksittäinen asia, usein juurisyyn löytäminen saattaa kestää jopa kuukausia tai vuosia. Tässäkin tapauksessa juurisyys jäi varmuudella löytymättä, joten seuraava askel oli kartoittaa millä tavoin viallinen tuote saataisiin poistettua prosessista.

Opintojeni lopputaipaleella työskentelin ekstruusiopäällystystuotantolinjalla, jossa valmistetaan sekä elintarvikepakkauksia että rakennusteollisuuden eristepinnoitteita, joissa on tärkeää, että muovikerros on yhtenäinen ja tiivis. Näissä tuotteissa muovikerros tai muovikerrokset valmistetaan useimmiten koekstruusio menetelmällä, joten muovikerrokset sisältävät useampia kerroksia eri muovilaatuja. Monimutkaisemman tuotantoprosessin vuoksi myös prosessiongelmien todennäköisyys kasvaa. Verrattuna edeltävään prosessiin, suurimpia prosessio ongelmia olivat muovifilmin reiät, sulamattomat partikkelit muovifilmissä, muovifilmin halkeamiset ja katkeamiset, roskat suuttimessa sekä muovikerrokseen liittymättömät ongelmat, kuten painatusvirheet, rypyt, ratamuotoisten materiaalien paikoitellen heikko adheesio ("kuplat") ja epäpuhtaudet. Tässäkin tapauksessa juurisyiden etsiminen vei aikaa, jonka vuoksi viallista tuotetta pääsi asiakkaille monia kertoja, joista seurasi useita asiakasreklamaatioita. Kyseisellekin tuotantolinjalle aloitettiin kartoittamaan järjestelmää, jolla vialliset tuotteen osat saataisiin pois järjestelmästä.

8.2 Markkinoilla olevat järjestelmät

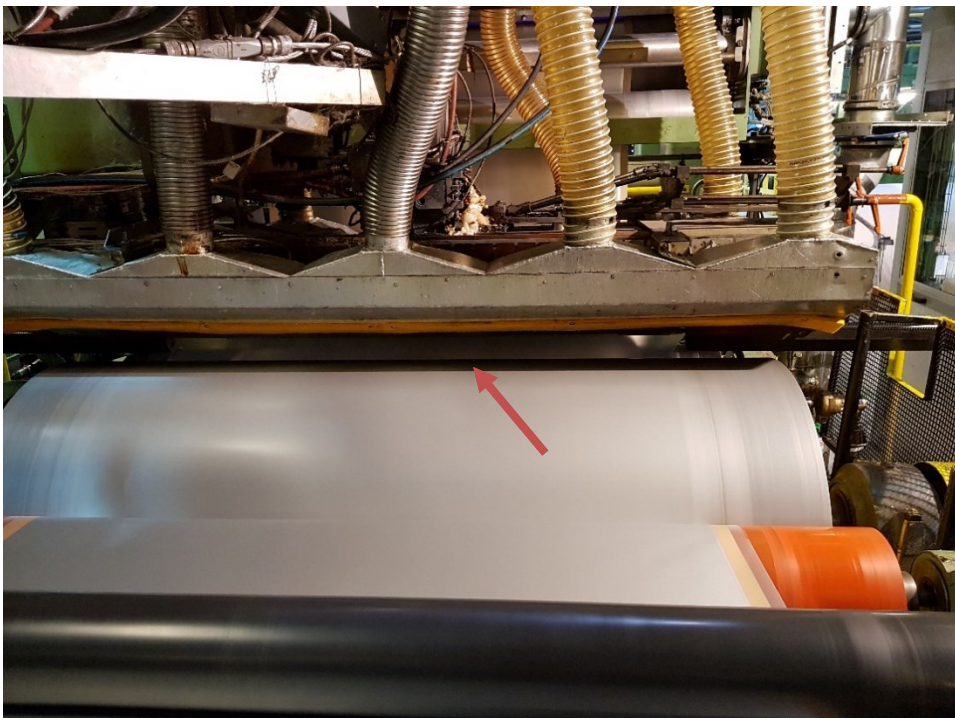
Kartoituksen aluksi selvitettiin järjestelmästä vaadittavat ominaisuudet. Tärkeimmät ominaisuudet olivat mittausalueen tarkkuus tai tiheys, mittauksenopeus sekä automaattiset hälytykset. Mittausolosuhteet ovat erittäin vaativat, toisinaan mittausala on erittäin rajoittunut, toisaalta prosessissa syntyvät kuumat muovikäryt saattavat sekoittaa mittausta. Mittausolosuhteista saa hyvän käsityksen kuvista 39, 40 ja 41.



Kuva 39. Sula muovifilmi haastavissa olosuhteissa.



Kuva 40. Sula muovifilmi haastavissa olosuhteissa.



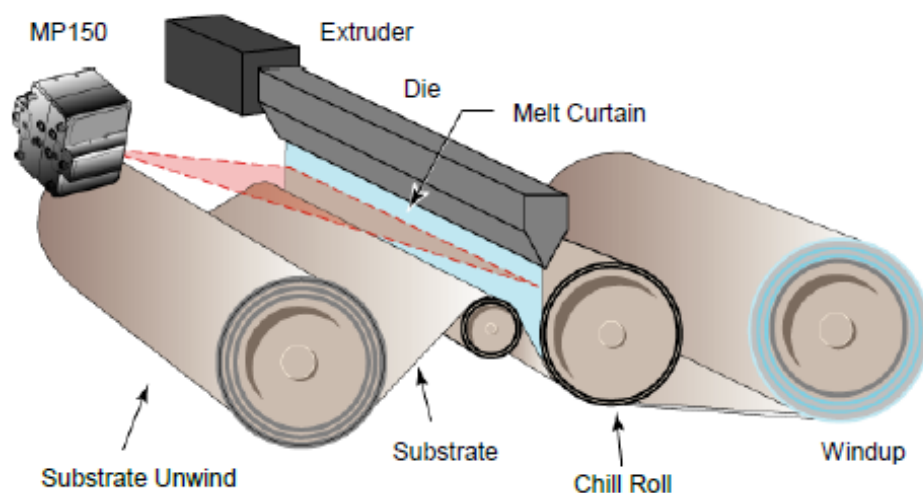
Kuva 41. Sula muovifilmi haastavissa olosuhteissa.

Kuvasolosuhteiden haasteellisen valaistuksen vuoksi päädyttiin lämpötilamittaukseen. Kartoituksen kuluessa markkinoilta löytyi valmiita sulan muovifilmin laadunvalvontajärjestelmiä. Nämä järjestelmät perustuvat viuhkamaiseen infrapunapistemittaukseen (kuva 42). Mittausyksiköstä lähetetään infrapunamittaussäde peilin kautta kohti suoraan mitattavaan

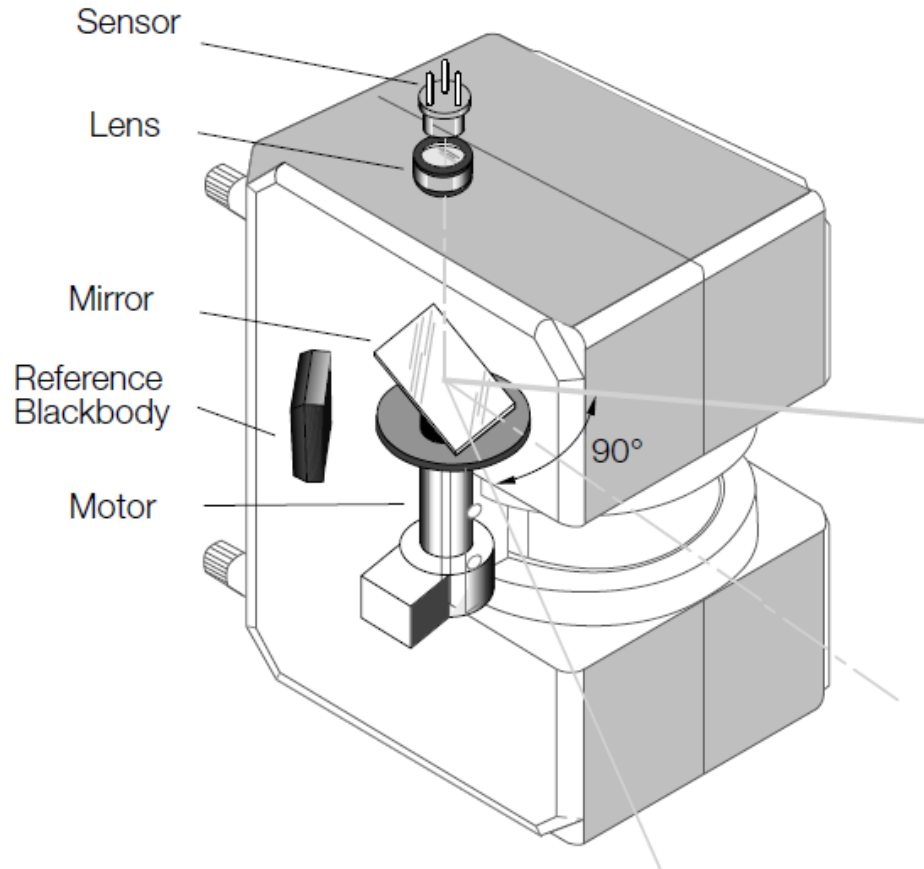
muovifilmiin. Peiliä käännetään sähkömoottorin avulla niin, että mittauksesta muodostuu viuhkamainen linjapistemittaus (kuva 43).

Mittausalue on jaettu niin, että mittauslinjassa on 256, 512 tai 1024 mittauspistettä. Vastaavasti mittausnopeus on joko 150, 76 tai 36 mittausta sekunnissa. Tämä vastaavasti tarkoittaa sitä, että kun 2000mm leveässä muovifilmissä on 256 mittauspistettä, pisteiden väliin jää noin 7mm mitaamaton aluetta. Tässä tapauksessa mittausnopeus on 150 mittausta sekunnissa, eli mittauslinjan 256 mittauspistettä mitataan 150 kertaa sekunnissa. Suurissa tuotantonopeuksissa muovifilmi liikkuu 5-6 m/s, joten muovifilmi liikkuu enimmillään 40 mm mittausten välissä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kyseistä järjestelmää käyttäessä filmiin jää 40*7 mm kokoisia sokeita alueita, joista ei virheitä havaita. Jos 2000 mm leveä muovifilmi on jaettu 512 mittauspisteeseen, mittauspisteiden väliin jää noin 3 mm sokea alue. Mittausnopeuden ollessa 76 mittausta sekunnissa, muovifilmi liikkuu noin 80 mm mittausten välissä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kyseistä järjestelmää käyttäessä filmiin jää 80*3 mm kokoisia sokeita alueita, joista ei virheitä havaita. Jos 2000 mm leveä muovifilmi on jaettu 1024 mittauspisteeseen, mittauspisteiden väliin ei käytännössä jää sokeaa aluetta, josta virheitä ei havaitaisi. Sen sijaan tällöin mittausnopeus on 36 mittausta sekunnissa, jolloin muovifilmi liikkuu lähes 170 mm mittausten välissä.

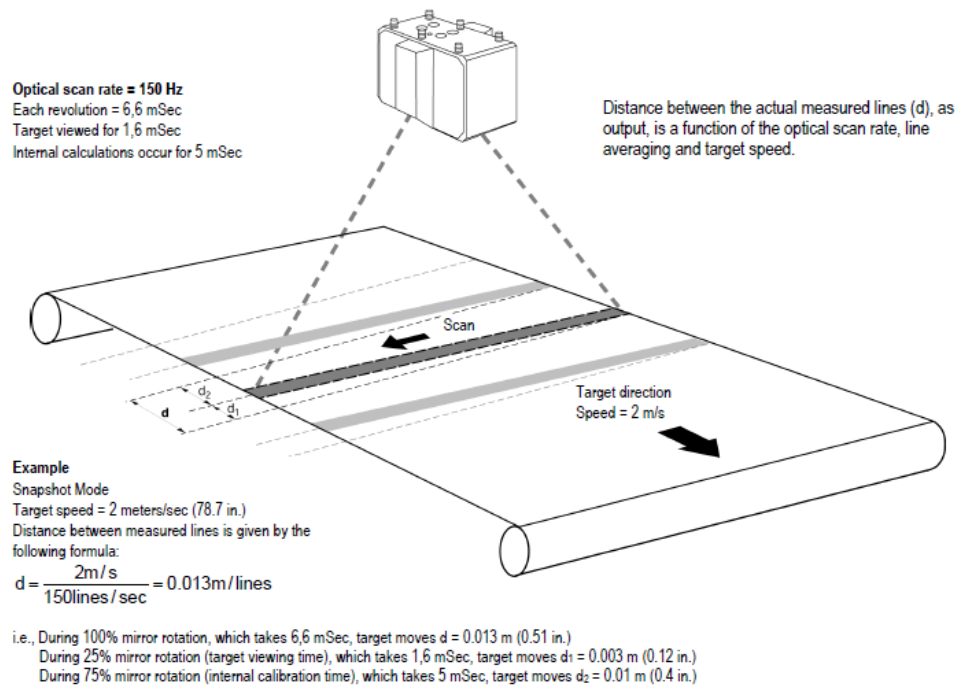
Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kovinkaan suurella todennäköisyydellä muovifilmin virheitä ei pystyittäisi havainnoimaan ja poistamaan. Edellä kuvatun laskennan tuloksena kyseistä järjestelmää ei voi harkita käytettäväksi muovifilmin laadunvalvontajärjestelmänä esimerkkinä ja suunnittelu- sekä testialustana käytettävällä tuotantolinjalla.



Kuva 42. IR-pistemittausjärjestelmä (Raytek 2017).



Kuva 43. IR-pistemittausjärjestelmän toiminta (Raytek 2017).



Kuva 44. Laskentakaava jolla osoitetaan IR-pistemittausjärjestelmän mitaustiheys (Raytek 2017).

8.3 Suunnittelu

Koska markkinoilta ei löytynyt valmista järjestelmää, joka olisi pystynyt täyttämään tehtävänsä hyväksytysti, todettiin että markkinoilla oleva tarve mahdollistaisi laadunvalvontajärjestelmän suunnittelun, joka laajentaisi Quattrotec Oy:n linjaohjausjärjestelmän lisäoptio valikoimaa.

8.3.1 Mittaustapa

Haasteellisten valaistusolosuhteiden vuoksi lämpökuvaus valikoitui edelleen mittaustavaksi. Suunnittelun pohjaksi otettiin vaatimus koko muovifilmin virheanalysoinnista tuotantonopeudella 400 m/min. Tällöin sula muovifilmi etenee vapaassa välissä mahdollisesti jopa 6 m/s. Koska linjaskannausjärjestelmät oli todettu toimimattomiksi, suunnattiin huomio matriisikameroihin, joista löytyi vaihtoehdoksi konenäkölämpökamerat. Konenäkölämpökameran valinta oli helppoa, koska FLIRin valmistama malli A35 on ainoa matriisi periaatteella toimiva konenäkölämpökamera, jonka kuvataajuus 60 Hz mahdollistaisi koko muovifilmin laadunvalvonnan. Onneksemme kyseisen kamerasi ominaisuudet näyttivät muutoinkin sopivan tarkoitukseen.

FLIR A35 kamerasi resoluutio on 320*256. Ekstruusiopäällystys tuotantolinjan laminaattorin ympäristö on kuitenkin niin ahdas, että kuvausetaisyys täytyy saada mahdollisimman lyhyeksi. FLIR A35 kameraa voi asentaa kaksi kameraa rinnakkain, jolloin päästään kuvausetaisyyteen 670 mm muovifilmistä. Tällöin kahden kamerasi kokonaisresoluutioksi tulee 640*256. Kahden kamerasi matriisi sisältää siis 163840 lämpömittauspistettä, mikäli koko matriisia pystytään hyödyntämään. Kamera toimii kuvataajuudella 60 Hz, joka tarkoittaa 60 kuvaruutua sekunnissa. Kamerat mittaavat siis matriisinsa sisältämät mittauspisteet 60 kertaa sekunnissa. Tällöin kamerasi kokonaismittauspistemäärä on lähes 10 miljoonaa pistettä sekunnissa. Yhden pikselin eli mittauspisteen koko on noin 3*2,5 mm. Kamerasi värisyvyys on 14 bit eli 16384 eri harmaa- tai värisävyä osoittamassa eri lämpötiloja.

Tuotantonopeuden ollessa 400 m/min, kamera tarvitsee ainoastaan 100 mm korkuisen näkemäalueen pystyäkseen mittaamaan jokaisen kohdan etenevästä muovifilmistä. Tällöin kamera käyttää 40 mittauspisteen korkuisia mittausaluetta, kun jokainen mittauspiste on korkeudeltaan 2,5 mm. Tuotantonopeuden ollessa pienempi, kameralle riittää korkeudeltaan pienempi näkemäalue koko muovifilmin mittaamiseen.

Matriisikamerasi eduksi mainittakoon myös mahdollisuus hyötyä muovifilmin ajantasaisesta stream-kuvasta (kuva 45 ja 46). Kamera lähettää ajantasaista stream-kuvaa valvomon WinCC- valvomojärjestelmään. Prosessinohjaaja näkee lämpötilaerojen avulla filmistä massaltaan sekä lämpötilaltaan epätasaiset alueet muovifilmissä. Prosessinohjaajien on mahdollista nähdä kuinka eri muovityypit ovat filmissä sekoittuneet tai levinneet,

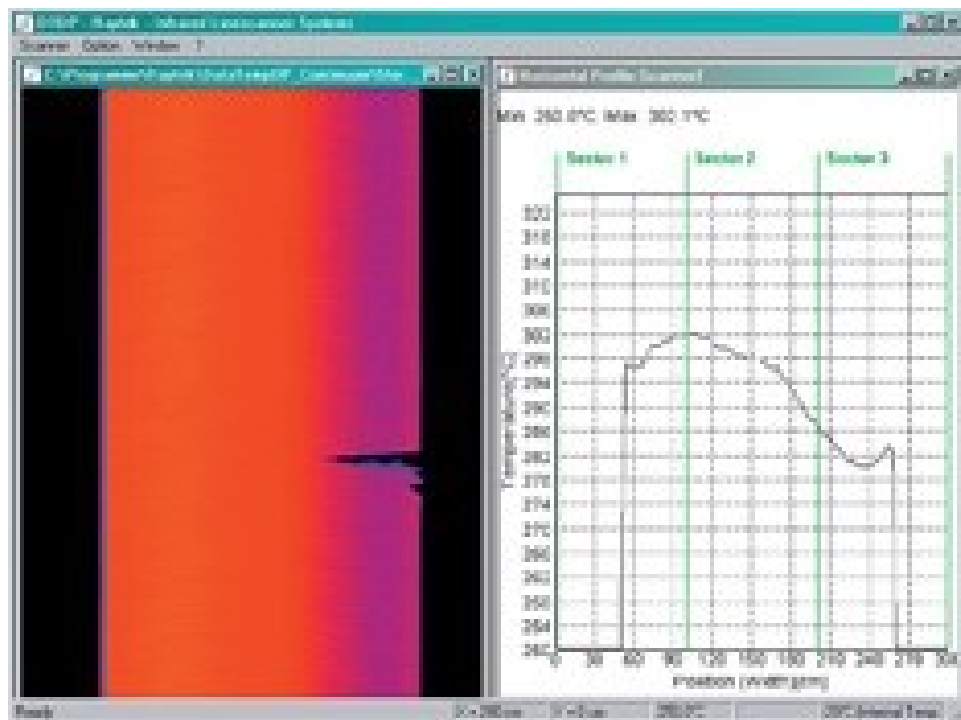
koska usein eri muovityypeillä on erilaiset työskentelylämmöt ja tiheydet. Toisin kuin laadunvalvontajärjestelmissä, jotka käyttävät viuhkamaista IR-mittausta, jotka esittävät mitatut lämpötilat linjaskannaus kerrallaan jolloin kuvaajasta tulee putkimainen (kuva 47). Tällainen kuvaaja ei kerro prosessinohjaajalle muovifilmin olomuodosta tärkeää tietoa millään tavoin.



Kuva 45. Sula muovifilmi harmaasävy kuvattuna FLIR A35 konenäkökameralla.



Kuva 46. Sula muovifilmi RGB-värein kuvattuna FLIR A35 konenäkökameralla.



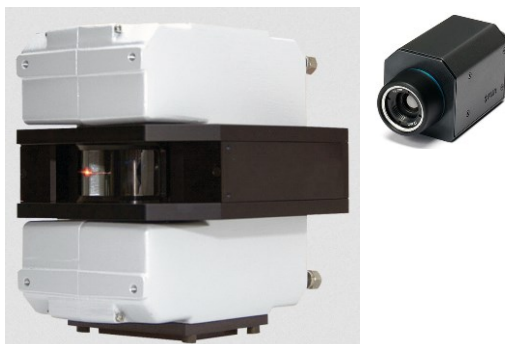
Kuva 47. IR-pistemittausjärjestelmän putkimainen kuvaaja (Raytek 2017).

Kuvausympäristön ahtaus vaikutti myös osaltaan päätökseen valita FLIR A35 konenäkölämpökamera viuhkamaisen IR-skannerin sijasta. IR-skannerin asennusetäisyys olisi auttamatta ollut vähintään 1000 mm muovifilmin sijainnista, joka taas olisi tarkoittanut lisätilan luomista jo ahtaaseen tilaan. IR-skannerin fyysinen koko on myös kymmenkertainen verrattuna valittuihin kameroihin (taulukko 3). Kuten todettua kahdella FLIR A35

kameralla asennusetäisyys saatiin rajattua maksimissaan 670 mm. Käytäntö voi sallia jopa kameroiden siirtämisen aavistuksen lähemmäksi muovifilmiä.

Taulukko 3. IR-skannerin ja konenäkölämpökameran kokosuhde vertailu.

Tyyppi	IR-skanneri	FLIR A35
Pituus mm	181	106
Leveys mm	190	47
Korkeus mm	202	50
Tilavuus mm ³	6946780	249100
Kokosuhde	27,9	



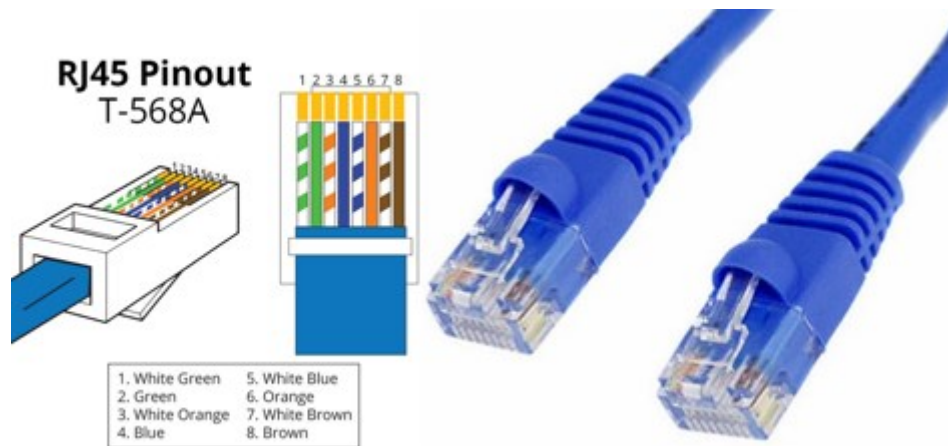
Kamerat suunniteltiin sijoitettavaksi omaan telineeseensä, kuitenkin niin, että teline olisi kiinnitettynä ekstruuderiyksikköön, ja liikkuisi ekstruudereiden mukana materiaaliradan ylle sekä sivuun huoltoalueelle. Näin ollen muovifilmiä pystyisi tuotantotilanteen lisäksi valvomaan ohjausvalvomosta myös huoltoalueella ollessa, esimerkiksi muovin vaihtoja tehdessä. Asennustelineeseen suunniteltiin lisättäväksi myös ilmajäähdytys kameroille, koska kameroiden käyttölämpötila on $-15\text{ °C} \rightarrow 60\text{ °C}$, ja sulan muovifilmin välittömässä läheisyydessä lämpötila saattaa nousta yli sallitun.

8.3.2 Tiedonsiirtoväylä

FLIR A35 kamera tukee, sekä GigE Vision-, että GeniCam-standardeja. GigE Vision on kameroihin suunniteltu Gigabit Ethernet- tiedonsiirtoväylä. Väylyä pitkin on myös mahdollista kuljettaa käyttöjännite kameralle, menetelmää kutsutaan nimellä Power over Ethernet eli PoE. Käytettäessä vähintään kategorian Cat5e ethernet- kaapelia, virransyöttö verkkolaitteelle, joka tässä tapauksessa on kamera, voidaan järjestää saman kierretyn pari-kaapelin avulla, jolla laite hoitaa verkkoliikenteen, mikäli tiedonsiirto nopeus ei vaadi kaikkien neljän johdinparin käyttöä (1 Gbit/s). Tällöin säästetään kaapelointikuluissa, sekä asennuskuluissa. Tässä tapauksessa tyypillinen tiedonsiirto määrä on noin 80 Mbit/s per kamera, eli noin 160 Mbit/s

yhteensä. Yleisin käytettävä liitintyyppi ethernet-kaapeleissa on RJ-45 (Kuva 48).

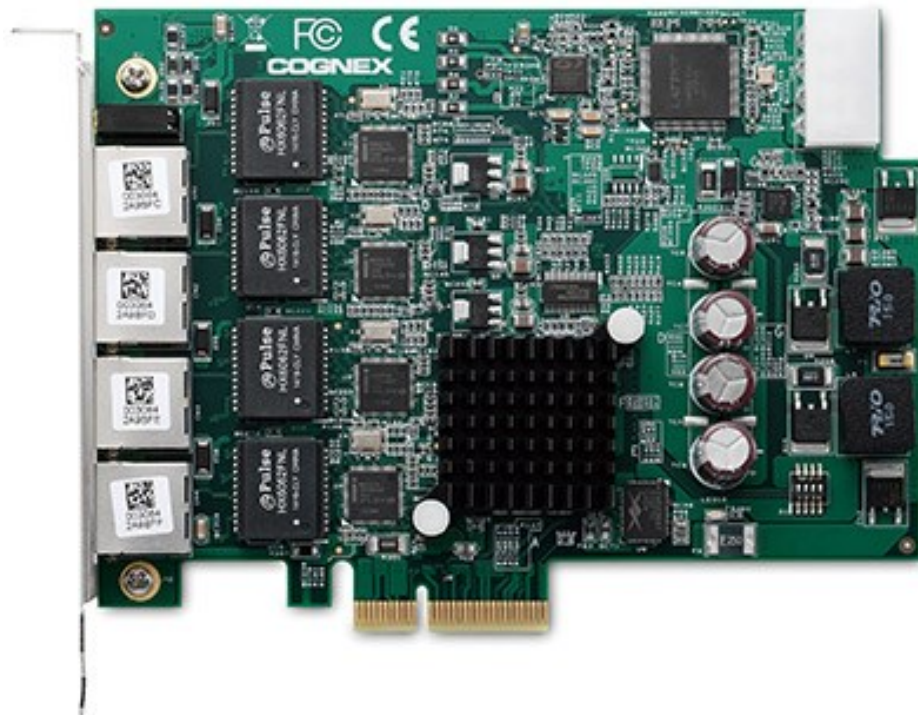
GeniCam on standardoitu geneerinen ohjelmointiliittymä kameroille. GeniCam toimii rajapintana kameran ja käyttäjän välillä, mikäli on tarpeellista muuttaa kameran rekisteriä eli asetuksia.



Kuva 48. RJ-45 liitintyyppi.

8.3.3 Kuvankeräyslaitteisto

Kuvattu materiaali noudetaan kameralta kuvankaappauskortilla, eli niin sanotulla Grabber-kortilla (kuva 49). Käytettäessä GigE Vision- tiedonsiirtoväylää ilman Power over Ethernetia, kuvankaappauskorttia ei tarvita. Jos kameran käyttöjännite siirretään ethernet-väylän avulla, tällöin tarvitaan kuvankaappauskortti, joka pystyy kameran käyttöjännitteen luomaan. PoE Grabber- kortissa saattaa olla ulostulo useammalle kameralle. Kameran ulostulot ovat liitintyyppiltään RJ-45. Tämän laadunvalvontajärjestelmän vaihtoehtoina ovat kortit, joissa on joko 4 tai 8 kappaletta RJ-45 liittimellä varustettua ulostuloa. Laadunvalvontajärjestelmää on mahdollista laajentaa niin monella kameealla, kuin kortissa ulostuloja on. Tiedonsiirto PC:n emolevyn kanssa tapahtuu PCI Express- tiedonsiirtoväylän avulla.



Kuva 49. Power over Ethernet kuvankaappauskortti (Cognex 2017).

8.3.4 Teollisuus-PC

Quattrotec automaattinen laadunvalvontajärjestelmä suunniteltiin täysin Quattrotec linjaohjausjärjestelmään integroiduksi tuotteeksi. Laadunvalvontajärjestelmä on asennettuna samaan teollisuus-PC:hen linjaohjausjärjestelmän valvomo-ohjelmiston (WinCC) kanssa. Tällöin välttytään erillisiltä ja ylimääräisiltä keskusyksiköiltä prosessinohjausvalvomossa, jotka vievät tilaa ja keräävät pölyä, sekä kuluttavat energiaa. Teollisuus-PC:hen on asennettu kuvankaappauskortti, joka vastaanottaa kameroilta tulevan kuvamateriaalin Ethernet-väylän avulla. PC:lle asennettu konenäköohjelmisto käsittelee ja analysoi jokaisen kameroilta tulevan kuvan, molemmilta kameroilta maksimissaan 60 kuvaa sekunnissa, yhteensä lähes 10 miljoonaa lämpömittauspistettä sekunnissa. Käsiteltävän datan määrä on noin 20 MB sekunnissa.

Teollisuus-PC sisältää Siemens WinCC- ohjelmiston jolla on luotu prosessinohjausvalvomon näyttöpäätteillä näkyvä linjaohjausjärjestelmän graafinen käyttöliittymä. Graafisella käyttöliittymällä on esitettyä tuotantolinjan toiminta. Käyttöliittymään asetetaan halutut prosessiarvot, sekä käyttöliittymälle tuodaan, ja esitetään tarvittavat ja halutut prosessin oloarvot. Graafisen käyttöliittymän avulla prosessiohjaajat asettavat halutut prosessin tavoitearvot, sekä asettavat toimilaitteiden tilan. Graafiseen käyttöliit-

tymään luodaan oma välilehti laadunvalvontajärjestelmälle, jolla näytetään ajantasainen stream-kuva konenäkölämpökameroilta, sekä mahdollinen havaittu muovifilmin virhe näytetään kuvankaappauksena. Graafiseen käyttöliittymään ohjelmoituun osioon, joka hallitsee automaattisia prosessihälytyksiä, lisätään automaattiset hälytykset, kun muovifilmin virheitä havaitaan. Tuotantolinjaan on asennettu laite, joka merkitsee materiaalivirheet, materiaaliitokset, ynnä muut, syntyvään tuotteeseen, joka on rullattuna kiinnirullaimella. Graafinen käyttöliittymä antaa ohjelmoitavalle logiikkaohjaimelle käskyn suorittaa virhemerkintä punaisella lapulla automaattisella merkitsemislaitteella (kuva 50).

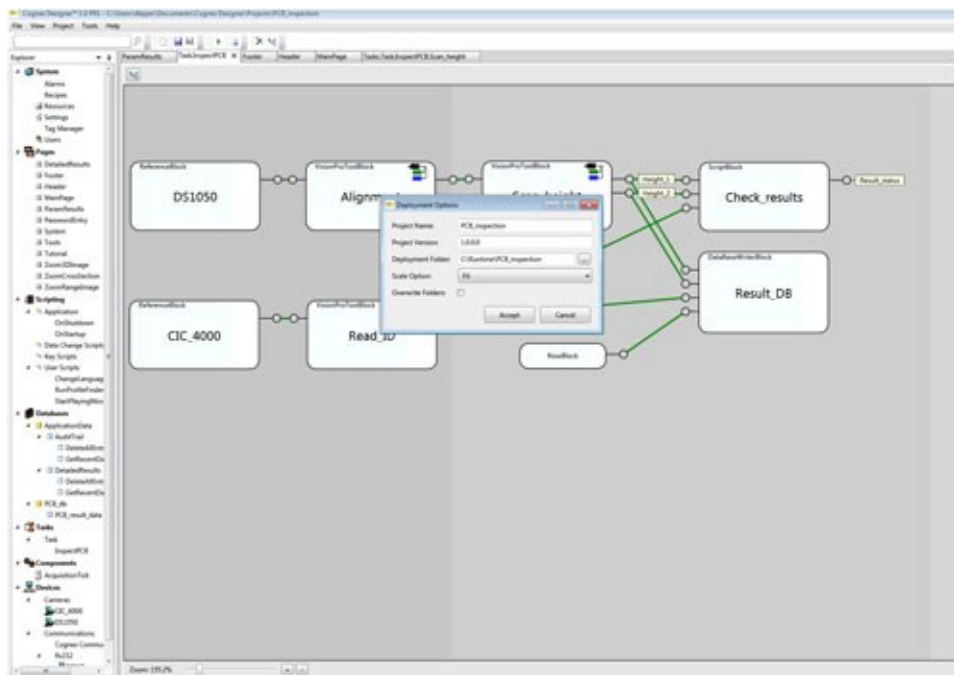


Kuva 50. Automaattinen merkitsemislaitte.

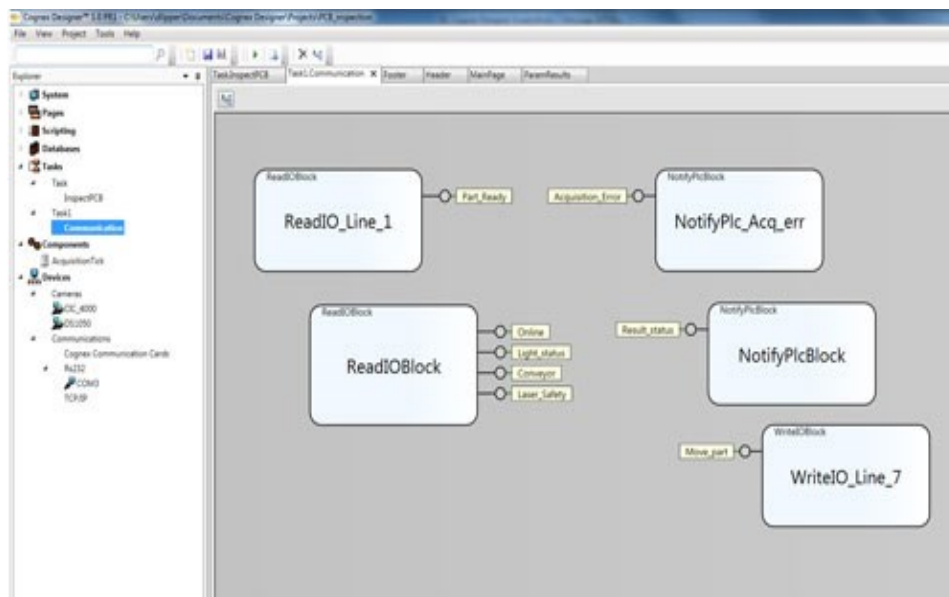
8.3.5 Konenäköohjelmisto

Laadunvalvontajärjestelmän mahdollisesti toteutessa, tarvittavaksi konenäköohjelmistoksi valittiin Cognex VisionPro ja Designer yhdistelmä. Järjestelmä olisi ollut mahdollista toteuttaa myös muilla ohjelmistoilla, esimerkiksi Matlab tai LabView mutta tällöin itse konenäkösovelluksen tekemiseen tai muokkaamiseen tarvittaisiin edistynyttä ohjelmointikieltä. Laadunvalvontajärjestelmän toimittajalle tämä ei ole ongelma, mutta laadunvalvontajärjestelmän asiakkaille ei välttämättä ole konenäköön perehtynyttä ohjelmoijaa helposti saatavilla, useinkaan ei ole. Lähes aina sovelluksiin tarvitsee kuitenkin tehdä vähintään muutoksia tuotannon kehittyessä. Tämän vuoksi käyttöön haluttiin mahdollisimman yksinkertainen ja helppo konenäköohjelmisto, tällöin asiakkaat pystyisivät tekemään tarvittavia muutoksia myös itse.

Cognex VisionPro sisältää erittäin laajan kirjaston valmiita konenäkötyökaluja joilla voi mitata, etsiä, valikoida, muokata, häivyttää, vahvistaa tai laskea kuvista haluttuja asioita. Normaalisissa ohjelmistossa työkalujen käyttöä hallitaan edistyneillä ohjelmointikielillä mutta Cognex Designer on luotu yksinkertaistamaan ja helpottamaan konenäkösovelluksen luontia. Designer-ohjelmointiympäristössä VisionPro-työkaluja hallitaan sekvenssi tyyppisillä toimilohko-ohjauksilla (kuvat 51 ja 52). Heti alusta asti tämä näyttää suhteellisen tutulta henkilöstä, joka on ohjelmoinut esimerkiksi logiikkaohjaimia toimilohkokaavioilla. Ohjelmiston toimintaan pääsee helposti sisälle, ja tarvittaessa on tarjolla kursseja, joilla opetetaan nimenomaan kyseisten ohjelmistojen käyttöä.



Kuva 51. Cognex Designer ohjelmointiympäristö (Cognex 2017).



Kuva 52. Cognex Designer ohjelmointiympäristö (Cognex 2017).

8.3.6 Laajennettavuus

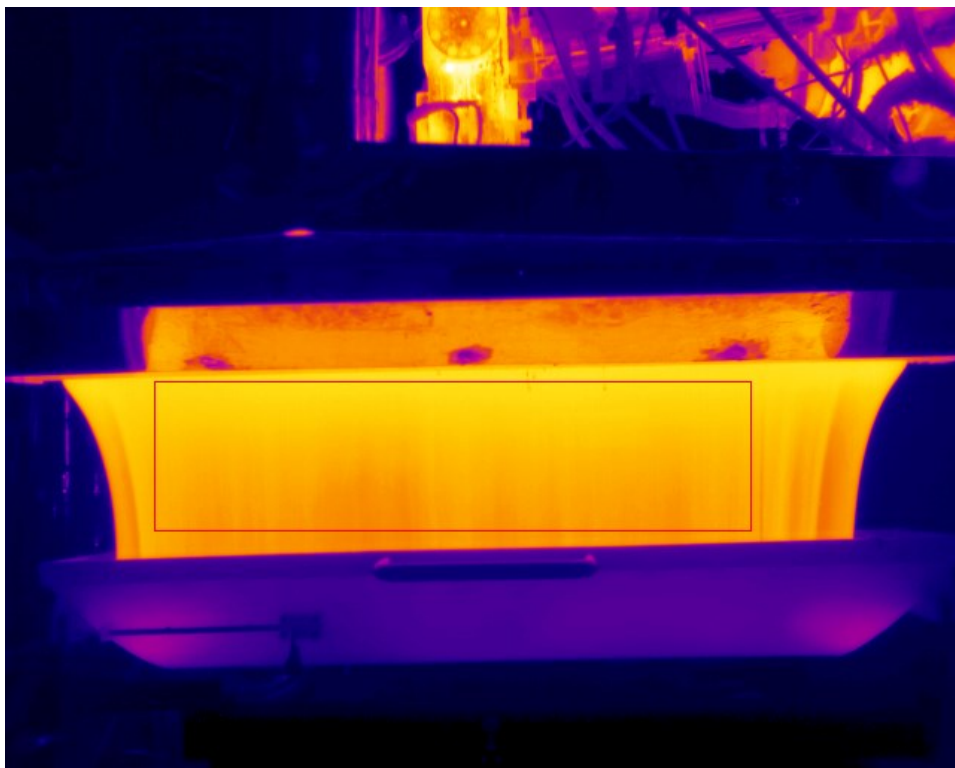
Jo suunnittelun alusta asti, oli ajatuksissa tuottaa sulan muovifilmin laadunvalvonnan lisäksi mahdollisuus tuotteen kokonaisvaltaisempaan laadunvalvontaan. Cognex-konenäköohjelmisto valittiin muun muassa siksi, että sillä on mahdollista ohjata ja vastaanottaa kuvamateriaalia yhteensä kahdeksasta eri GigE Vision- kamerasta. Esimerkkinä ja suunnittelu- sekä testialustana käytettävä tuotantolinja on niin sanottu tandem-tuotantolinja, joten se sisältää kaksi laminaattoria ekstruudereineen. Näin ollen neljä kameran ulostuloa on varattuna konenäkölämpökameroille, jotka kuvaavat kahdesta rakosuuttimesta tuotettavaa sulaa muovifilmiä. Neljä kameran ulostuloa voidaan käyttää puolivalmiin ja valmiin materiaaliradan laadunvalvonnassa. Muovikerroksen virheiden lisäksi, tuotteesta olisi tärkeää saada pois painatusvirheet, kuplat, rypyt, reiät ja epäpuhtaudet. Esimerkkinä mainittakoon, että painatusvirheet saataisiin tehokkaasti todennettua Cognex In-Sight 5604- viivakameran avulla. Painettava kuvio saataisiin myös koko painatuspituudeltaan kerrallaan näkymään kuvaruudulle prosessinohjaajien käyttöön.

8.4 Suunnitelman testaus

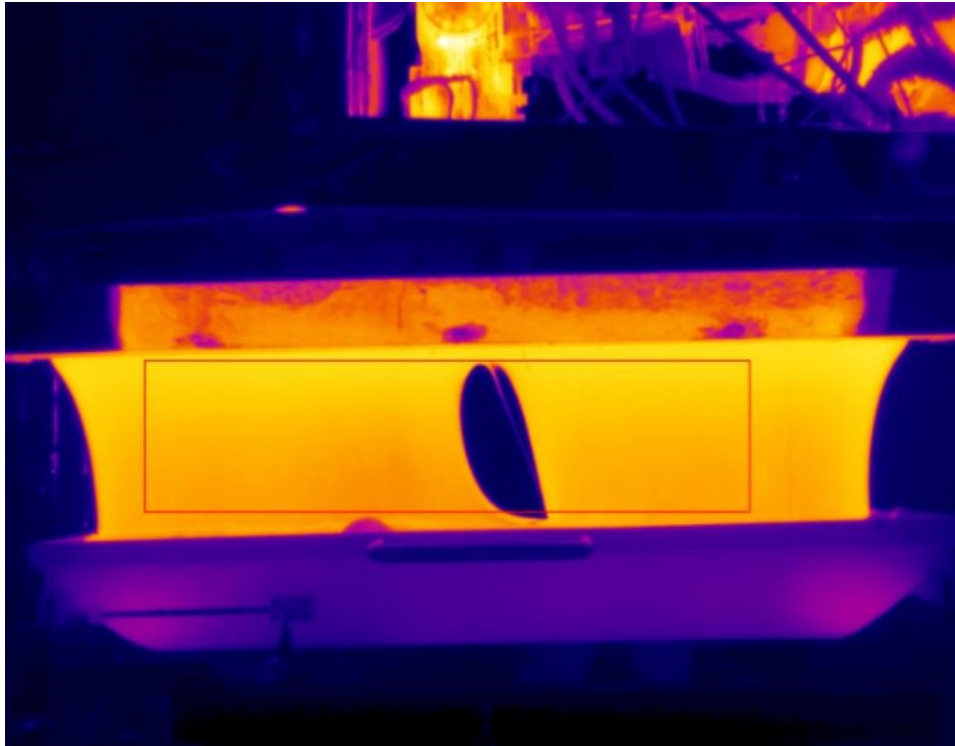
Koska laadunvalvontajärjestelmälle ei vielä ollut valmista asiakasta, suunnitelman valmistuttua sitä aloitettiin testaamaan osa kerrallaan. Koska ei ollut täyttä varmuutta, edes kameran toimittajalla, kuinka FLIR A35- konenäkölämpökameralla pystyy sulaa muovifilmiä kuvaamaan, päätettiin testaaminen aloittaa kamerasta. Kameran toimittajan epävarmuus johtuu siitä, että edes heillä ei ollut tiedossa, että vastaavaa järjestelmää olisi käytössä missään ekstruusiopäällystysteollisuudessa.

8.4.1 Kameran testaus

Ensimmäisellä testikerralla suuri osa ajasta kului kameran toimittajan kanssa keskustellessa, mitä tarpeita ekstruusiopäällystysorisissa on kameran ominaisuuksien tai suorituskyvyn suhteen. Toisaalta aikaa vei myös kuvaolosuhteisiin tutustuminen ja testikuvauksen suunnittelu, sekä kameran ja testissä tarvittavan kannettavan tietokoneen virranjakelu. Ensimmäisen testikerran tavoitteeksi asetettiin puhtaasti todeta, pystyykö sulaa muovifilmiä kuvaamaan vai ei. Lopulta kuvaus testi onnistui paremmin kuin oli odotettua, ja ilman kameran tai konenäköohjelmiston asetuksien muuttamistakin sulaa muovifilmiä todentui erittäin selkeästi (kuva 53). Sulaa muovifilmiin tehtiin käsin myös reikiä, joilla todettiin pohjimmaisena toiminta-ajatuksen toimivuus, filmin reiät näkyivät kuvassa erittäin selkeänä (kuva 54).



Kuva 53. Sulamuovifilmiä kuvattuna huoltoalueella FLIR A65 konenäkölämpökameralla.



Kuva 54. Sulamuovifilmi jossa reikä kuvattuna huoltoalueella FLIR A65 konenäkölämpökameralla.

8.4.2 Järjestelmän hinnoittelu

Ensimmäisen onnistuneen kameratestin jälkeen sain opinnäytetyön ohjaajaltani tehtäväksi ottaa selvää laadunvalvontajärjestelmän kehitys- ja valmistuskustannukset kokonaisuudessaan, että pystyttäisiin arvioimaan onko järjestelmän toteuttaminen liiketaloudellisesti kannattavaa. Kokonaiskustannuksiin lopulta sisältyivät:

- FLIR A35- kamera kaksi kappaletta
- Cognex CFG-8704e- kuvankaappauskortti
- Cognex VisionPro- ja Designer- konenäköohjelmistot
- kameroiden kaapelointi
- kameroiden mekaanisen asennuksen suunnittelu ja toteutus
- kameroiden jäähdytyksen suunnittelu ja toteutus
- järjestelmän käyttöönotto mukaan lukien Cognex- ja WinCC- rajapinnan luonti sekä konenäkösovelluksen luonti

Selvittämistyön tuloksena todettiin että liiketaloudelliselle kannattavuudelle on edellytykset joten tutkimustyötä päätettiin jatkaa.

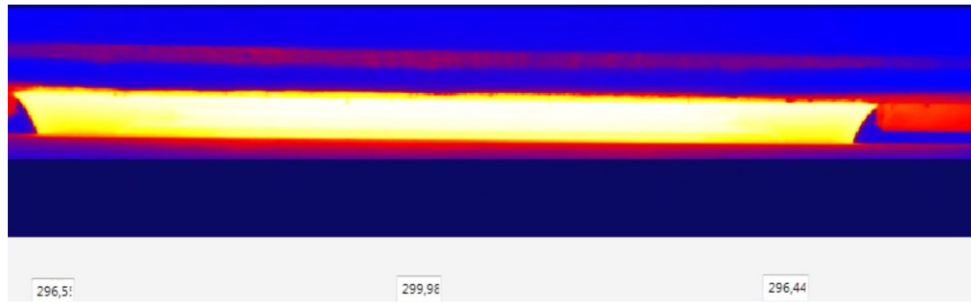
8.4.3 Konenäköohjelmiston ja kameran testaus

Toisen kamera testin tavoitteeksi asetettiin todeta, kuinka kamera pystyy todentamaan muovifilmin todellisessa tuotantotilanteessa ja tuotantonopeudessa, sekä kuinka Cognex-konenäköohjelmisto käyttötarkoitukseen soveltuu. Kamera asetettiin väliaikaiseen telineeseen, niin lähelle tuotannossa olevaa rakosuutinta, kuin väliaikaisesti pystyi (kuva 55). Sattumalta tuotannossa oli testihetkellä kuvauksen kannalta haasteellisimmat olosuhteet, mitä voi olla. Sula muovifilmi ajettiin laminointinippiin poikkeuksellisesti konesuunnassa jäähdytysylinterin takapuolella, joten sulan muovifilmin kuvausala oli pienimmillään, jota se tuotannossa voi olla, noin 45-50 mm. Tuotantonopeus ei tällöin ole kuin 200 m/min. Laskennallisesti tämä kuvausala riittää FLIR A35- kameralle jotta pystytään varmuudella mittaamaan jokainen kohta etenevässä muovifilmissä mutta ei viuhkamaiselle IR-mittaukselle.

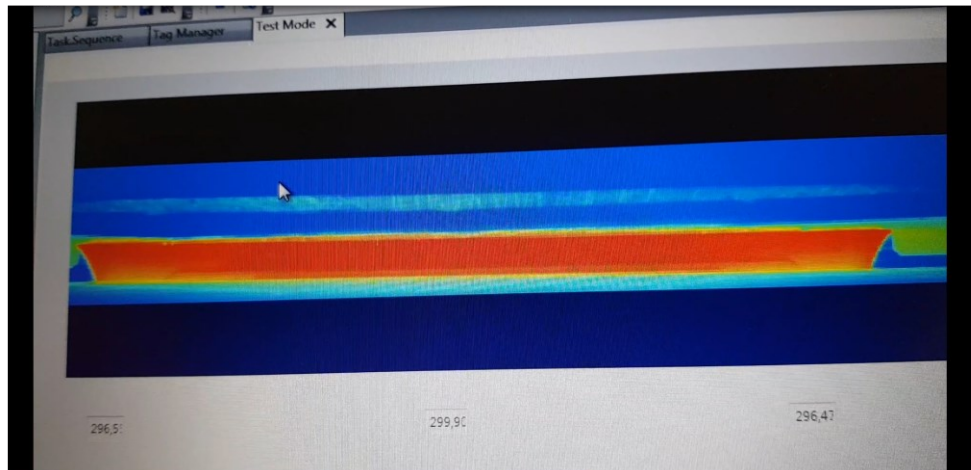


Kuva 55. Testikuvaus tuotantotilanteessa.

Cognex Designer -ohjelmistolla luotiin kevyt konenäkösovellus joka mittasi sulasta muovifilmistä kolme eri mittauspistettä, molemmista reunoista ja keskeltä. Etukäteen oli tiedossa että muovifilmin pitäisi olla reunoiltaan noin 3-5 °C viileämpää kuin keskellä. Tämän ennakoidun asian konenäkösovellus vahvisti (kuva 56 ja 57). Ajanpuutteen vuoksi emme saaneet luotua konenäkösovellusta, jolla olisi pystynyt filmin virheet automaattisesti kuvamateriaalista poimimaan, sen lisäksi tahallisesti aiheutetut virheet muovifilmissä maksavat tuotannossa sekä rahaa että aikaa.

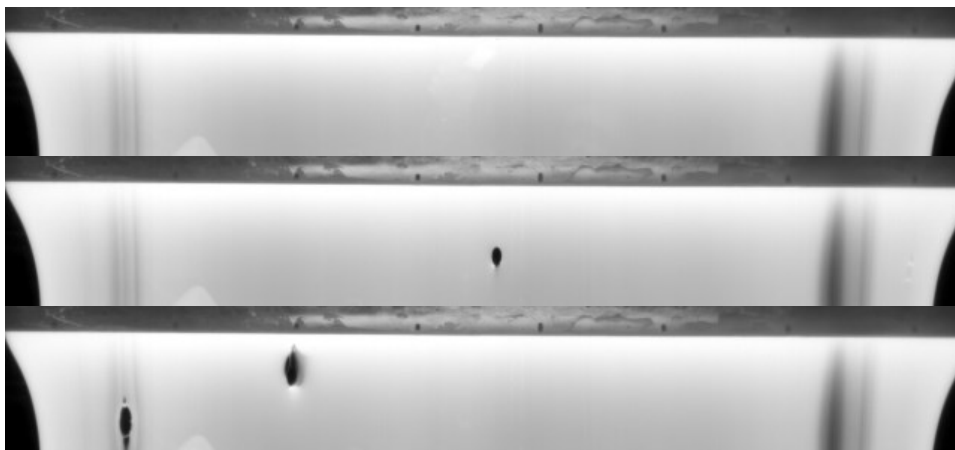


Kuva 56. Muovifilmin lämpötiloja mitattuna konenäkösovelluksella.



Kuva 57. Muovifilmin lämpötiloja mitattuna konenäkösovelluksella.

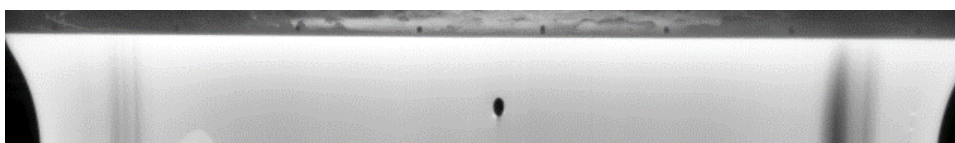
Todettuamme kameran toiminnan oikeassa tuotantotilanteessa ja erittäin haasteellisella kuvausalalla, siirryimme viereiselle tuotantolinjalle, jossa oli sillä hetkellä käyttämättömänä toinen ekstruusioasemista. Tavoitteena oli asettaa huoltoalueella ekstrudereiden nopeus tuotantonopeuteen, aiheuttaa muovifilmiin virheitä, sekä tallentaa kameran lähettämää ajantasaista stream-kuvaa tästä kaikesta. Huoltoalueella saatiin luotua jokseenkin tuotantomaiset olosuhteet, ja muovifilmin virheet saatiin kuvattua erittäin selkeästi (kuva 58). Ajantasainen stream-kuva oli tarkkaa ja selkeää, ja antoi vahvat viitteet siitä että muovifilmistä pystyttäisiin toteamaan, kuinka eri lämpötilan omaavat muovit ovat filmissä levinneet. Kuvaustestin jälkeen oli todettava, että käytettävä lämpökuvaustapa on täsmälleen oikea sulan muovifilmin laadunvalvontajärjestelmään.



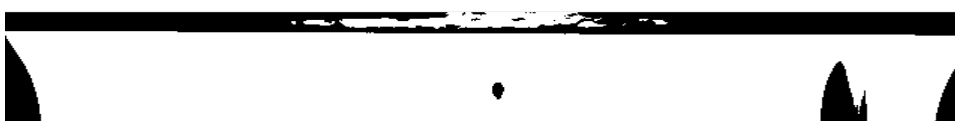
Kuva 58. Sulan muovifilmin virheitä kuvattuna.

8.4.4 Virheiden etsintä konenäköohjelmistossa

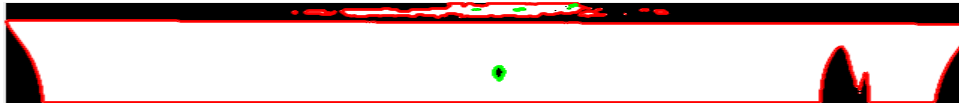
Onnistuneiden kamera- ja konenäkösovellus testien jälkeen halusin vielä selvittää kuinka käytännössä konenäkösovellus virheen kuvasta etsii. Koska suunniteltu laadunvalvontajärjestelmä oli vasta suunnittelu- ja testivaiheessa, ei tarvittavia Cognex-lisenssejä ollut vielä hankittuna. Tästä johtuen, päätettiin asia tutkia Matlab-ohjelmistolla, johon oli lisenssi valmiina. Konenäkö-kurssilla saamillani tiedoilla ja taidoilla, poimin kuvatusta videosta yhden kuvaruudun, jossa virhe esiintyi, jonka jälkeen muutin kuvan binäärikuvaksi (kuva 60), jolle määritin tietyn rajan, jolla sovellus jakaa kuvassa olevat harmaasävy pikselit joko mustaksi tai valkoiseksi. Kyseisen rajan määritin niin, että sovellus jakaa pikselit lämpötilan mukaan niin, että muovifilmissä olevat lämpötilaltaan erittäin matalat alueet, eli reiät, näkyvät mustalla, ja alue jolla on korkeampi lämpötila, eli muovifilmi, näkyy valkoisella. Muunnetusta binäärikuvasta sovellus ohjattiin etsimään näiden alueiden reunat, jonka jälkeen sovellus pystyi tunnistamaan sulassa muovifilmissä näkyvät reiät, ja merkitsemään ne vihreällä värillä (kuva 61). Lopujen lopuksi reikien löytäminen Matlab-ohjelmistolla oli suhteellisen helppoa, vaikka Matlabia käyttäessä joutuu käyttämään edistynyttä ohjelmointikieltä. Cognex-ohjelmiston valinta on varmasti oikea ratkaisu, koska Designer-ohjelmistolla konenäkösovelluksen tekeminen on helpompaa.



Kuva 59. Reikä muovifilmissä harmaasävy kuvattuna.



Kuva 60. Matlabilla tuotettu binäärikuva.



Kuva 61. Muovifilmin reikä tunnistettuna Matlabilla.

9 YHTEENVETO

Ajatus opinnäytetyön aiheesta syntyi jo vuonna 2015 työskennellessäni koneenhoitajana ekstruusiopäällystys ja –laminointi tuotantolinjalla, jolla valmistetaan suuria määriä kuppikartonkia, eli kerta-astioiden valmistukseen käytettyä PE-päällystettyä taivekartonkia. Tuotantolinjalla oli ongelmia muovifilmin katkeilevien reunojen vuoksi. Juurisyyyn ollessa epäselvä ja laadunvalvonnan pettäessä, asiakkaalle asti pääsi usein tuotetta, jossa muovikerros ei ollut yhtenäinen. Tuotantotyöni ohessa syntyi ajatus muovifilmin laadunvalvonnasta lämpökuvauksen avulla.

Siirryttyäni käyttöönottamaan ja työskentelemään tuotantolinjalle, joka ajan hetkellä oli laajan modernisoinnin kohteena, esittelin ajatukseni aiemmasta uuden tuotantolinjan käyttöönotosta entuudestaan tuntemalleni henkilölle, joka vastasi nyt modernisoitavan tuotantolinjan automaatioitoimituksista. Tuloksena oli tarkentunut opinnäytetyön aihe ja itse työ automaatioitoimituksen tehneeseen yritykseen. Opinnäytetyön aikana ja varsinkin sen johdosta, minä sekä opinnäytetyön tilaaja, tutustuimme ylipääntään konenäköön, lämpökuvaukseen sekä niiden tarjoamiin mahdollisuuksiin teollisuusautomaatiossa.

Prosessin aikana oma tietouteni konenäköön, lämpökuvauksen sekä linjaohjausjärjestelmien toiminnasta on syventynyt huomattavasti, jopa asiantuntijatasolle asti. Suunnitelman laatiminen auttoi myös ymmärtämään, kuinka erilaiset järjestelmät saatetaan toimintaan keskenään rajapintojen avulla. Prosessi on antanut itselleni taidon ja työkalut käyttää innovatiivisuuttani, sekä syvää kokemustani paperinjalostusteollisuuden tuotantolinjoista, luomaan ja kattavasti suunnittelemaan teollisuuden tuotantoratkaisuja. Opinnäytetyön tilaajalla heräsi kiinnostus, kuinka konenäkö mahdollistaisi laajentamaan heidän yrityksensä automaatiotuotteiden tarjontaa.

LÄHTEET

- ABB. (13. 12 2016). Noudettu osoitteesta www.abb.com
- ammattikorkeakoulu, O. (2012). *Matlab-luennot 1. osa*. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu.
- Britannica E. (4. 11 2016). *Extruder*. Noudettu osoitteesta www.britannica.com
- Cloeren. (6. 11 2016). *Extrusion die*. Noudettu osoitteesta www.cloeren.com
- CoaXPress. (7. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.coaxpress.com
- Cognex. (12. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.cognex.com
- Ekstruusio eli suulakepuristus*. (2007). Noudettu osoitteesta www.tut.fi
- Ensto. (24. 10 2017). Noudettu osoitteesta ww2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi
- Halinen, M. (2007). *Konenäkö robotin ohjauksessa*. Aalto yliopisto.
- Inkinen, P. & Tuohi, J. (2006). *Momentti 1 Insinöörifysiikka*. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- Iso-Markkula, J. (2010). *Filmistä Digitaaliseen- tallennusmuotojen taitekohdassa*. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.
- Järvinen, P. (2008). *Uusi muovitieto*. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Karhuketo, H., Seppälä, M., Törn, T., & Viluksela, P. (2004). *Paperin- ja kartongin jalostus*. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
- Kari, J. (2013). *Kaapelikourun kannen valmistaminen ekstruusiolla*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- Karttunen, J. (2006). *Konenäöllä yhä suurempi rooli laadunvarmistuksessa*. Automaatioväylä.
- Koivula, P. (2006). *Konenäöllä yhä suurempi rooli laadunvarmistuksessa*. Automaatioväylä.
- Kurkioja, A. (2008). *Konenäkölaitteisto*. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Kurri, V., Malen, T., Sandell, R., & Virtanen, M. (2002). *Muovitekniikan perusteet*. Helsinki: Hakapaino Oy.

- Laiho, E. (1979). *Päälystetyn tuotteen testaus sekä eri ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät (LDPE)*. Kulloo: Pekema Oy.
- Lampinen, P. (2010). *Adheesio kartongin polyeteenipäälystyksessä*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Logiikkaohjattu annosteluprosessi*. (2013). Oulu: Oulun yliopisto.
- Metsäteollisuuden, t. (1982). *Metsäteollisuuden työnantajaliitto*. Myllykoski: Myllykosken kirjapaja.
- Mäenpää, T., Niskanen, M., Pyökkö, H., Ropponen, S. & Silven, O. (2008). *Konenäön hyödyntämismahdollisuudet teiden ylläpidossa ja hoidossa*. Tiehallinto.
- OEM. (5. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.oem.fi
- Opetushallitus. (ei pvm). etälukio.
- Paloniitty, S. (2005). *Rakennuksen lämpökuvaus*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu.
- Pikkarainen, H. (2004). *Konenäkö elintarviketeollisuuden työkaluna*. Kehittyväelintarvike.
- Provendora Oy. (3. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.provendra.fi
- Quattrotec Oy. (6. 12 2016). Noudettu osoitteesta www.quattrotec.com
- Raytek. (57. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.raytek.com
- Safepack. (6. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.safepack.com
- Salste, M. (1972). *Muovipäälystys*. Enso-Gutzeit Osakeyhtiö.
- Seppälä, M., Grönstrand, J., Karhuketo, H., & Törn, T. (1999). *Paperin ja kartongin jalostus*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Siemens. (8. 12 2016). Noudettu osoitteesta www.mall.industry.siemens.com
- Skinnari, T. (2005). *Konenäön soveltaminen pintaviilun leikkauksessa*. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Tapio, T. (2015). Värivalokuvaukseen perustuva kaksiväripyrometria polttotekniikan sovelluksissa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- Thermo Scientific. (4. 12 2016). Noudettu osoitteesta www.thermoscientific.com
- USPatent. (6. 12 2016).

Vahtola, H. (2000). *Sähkömagneettinen säteily ja sen vuorovaikutus materian kanssa*. Oulu: Oulun yliopisto.

Vainio, T., & Aaltio, E. (1968). *Polyeteenin ja pohjarainan väliseen adheesioon vaikuttavista tekijöistä pursotinpäällystyksessä*. Paperi ja Puu.

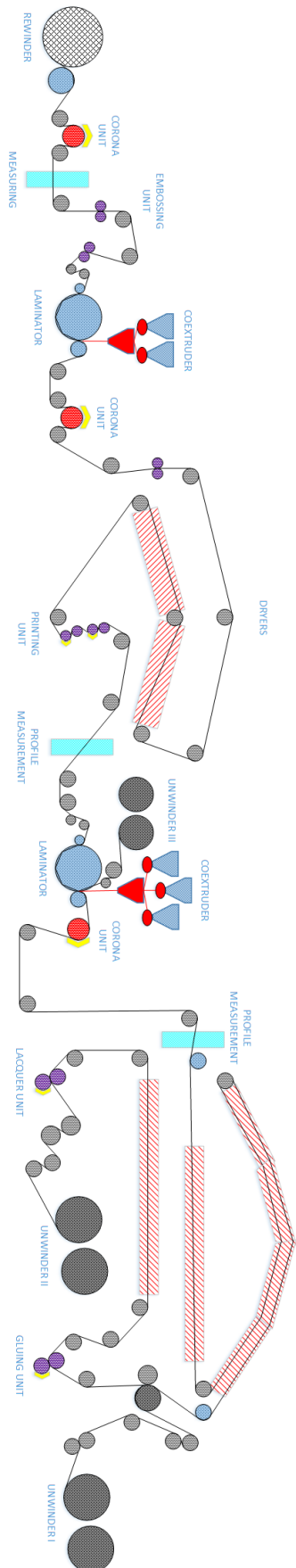
Wikipedia. (5. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.wikipedia.fi

Wikipedia. (18. 11 2017). *Suojakaasu*. Noudettu osoitteesta <https://fi.wikipedia.org/wiki/Suojakaasu>

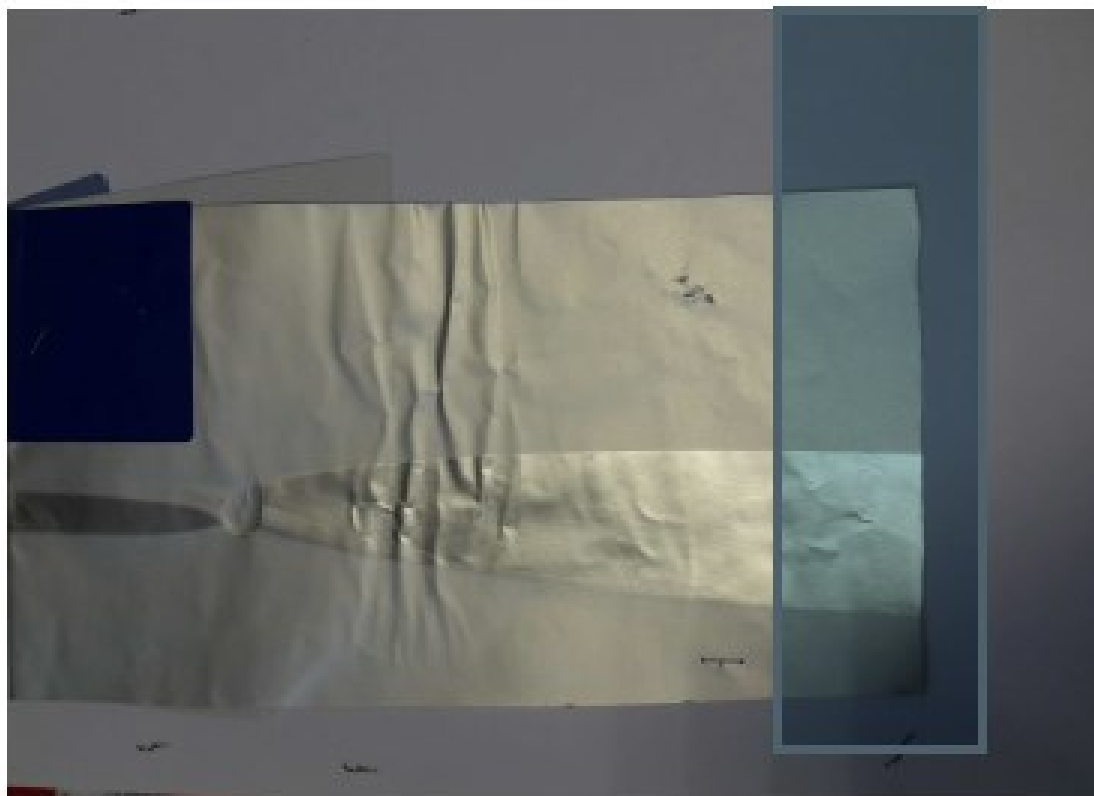
VisionOnline. (7. 11 2017). Noudettu osoitteesta www.visiononline.org

Ylänen, T. (1996). *Eri käsittelymenetelmien vaikutus adheesioon ekstruusiopäällystyksessä*. Tampereen Teknillinen korkeakoulu.

EKSTRUUSIOPÄÄLLYSTYS TUOTANTOLINJAN PERIAATE KUVA



MUOVIFILMIN VIRHEITÄ VALMIISSA TUOTTEESSA



Kuva 1. Muovifilmin halkeama eristetuohteessa



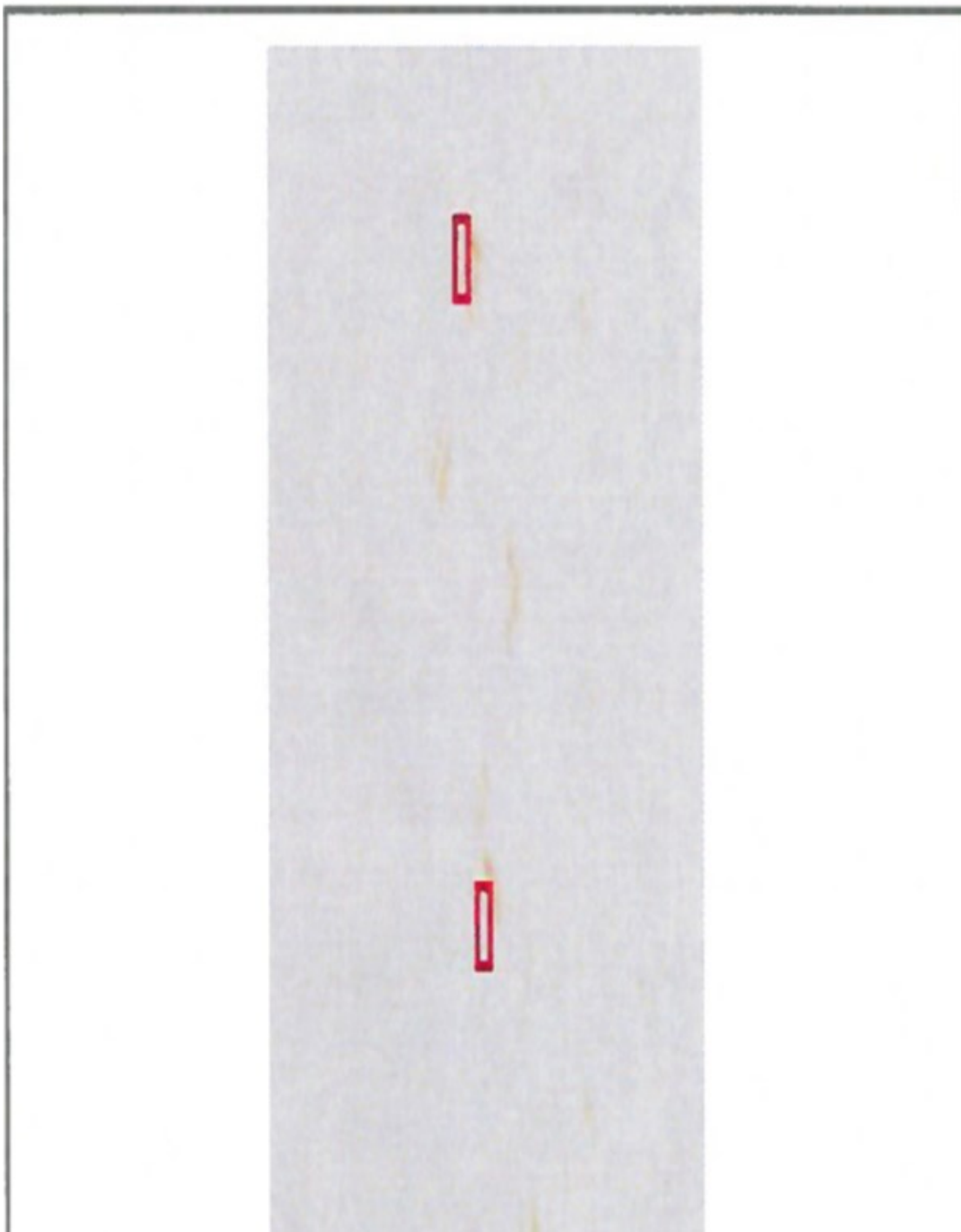
Kuva 2. Muovifilmin halkeama ja epäpuhtauksia elintarviketuotteessa

MUOVIFILMIN VIRHEITÄ VALMIISSA TUOTTEESSA



Kuva 1. Muovifilmin halkeama eristetuotteessa

MATERIAALIRATA VIRHEITÄ VALMIISSA TUOTTEESSA



Kuva 1. Materiaaliradan epäpuhtauksia elintarviketuotteessa löydettyä asiakkaan konenäköjärjestelmällä