



KAAPELIKOURUN KANNEN VALMISTAMINEN EKSTRUUSIOLLA

Jussi Kari

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Paperi- tekstiili- ja kemian-
tekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Paperi- tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka

JUSSI KARI:

Kaapelikourun kannen valmistaminen ekstruusiolla

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Huhtikuu 2013

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää uusi tuote tehtäväksi Teknikum Oy:n muoviosastolla. Tavoitteena oli tutkia käytössä olevan muoviekstruusiolinjaston soveltuvuutta uuden tuotteen valmistukseen ja tehdä laitteisiin tarvittavat muutokset. Tämä tehtiin niin, että koneella ajettiin koeajoja ja kartoitettiin näin mitkä osat missäkin laitteessa tarvitsivat muutosta. Samalla myös ajoparametrit täytyi säätää oikeiksi.

Työn tulokset olivat lupaavia ja suunniteltujen aikataulujen mukaisia. Useiden koeajojen ja prosessin peruseräiteiden ymmärtämisen jälkeen tuote saatiin vastaamaan haluttuja mittoja sekä hyvää pinnanlaatua.

Ekstruusio on prosessina haastava hallita, varsinkin ajon aloitusvaiheessa. Kun ekstruuderin on käynnistetty, saattaa kestää kauankin ennen kuin linjalta alkaa tulla hyvää tuotetta, koska vaatii jonkin aikaa, ennen kuin koneen käynti tasapainottuu ja jäähdytystehon säätö saadaan optimoitua. Jäähdytystehon säätö on tärkein tekijä, jolla säädellään tuotteen muodonmuutoksia tässä prosessissa. Tulokset osoittavat myös millaisilla käyttölämpötiloilla konetta kannattaa käyttää ja millainen vaikutus erilaisilla ajonopeuksilla on prosessin hallittavuuteen. Koeajomittakaavassa näillä laitteilla ja niihin tehdyillä muutoksilla pystytään saamaan hyvää tuotetta, mutta suuremmassa tuotantomittakaavassa laitteisiin täytyy mahdollisesti tehdä vielä muutoksia.

Asiasanat: profiiliekstruusio, polyeteeni, parametrit

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Paper, Textile and Chemical Engineering
Option of Chemical Engineering

JUSSI KARI:
Manufacturing of Cable Channel Lid by Extrusion

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 0 pages
April 2013

The purpose of this thesis was to develop a new product to manufacture in Teknikum Oy's plastic department. The objective was to study plastic extrusion equipment and its applicability for new product to manufacture and to make the necessary modifications to the equipment. Test runs were used to examine what parts of the equipment needed to be changed. Also the process parameters had to be adjusted correctly.

The results of the thesis were promising and according to schedule. After many test runs and understanding basic principles of the process, the product had the right dimension measurements and good surface quality.

Extrusion is a challenging process, especially in the beginning when the machine starts up. It may take quite a long time for the extruder to get equilibrium and to optimize the cooling effect. That is the most important factor which is controlling deformations of the product in this process. The results also indicate the proper operating temperatures for the process and show the effects of different driving rates. This equipment can produce good quality product in short test scale runs, but in longer production scale runs they might need more adjustments and changes.

Key words: profile extrusion, polyethylene, parameters

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	EKSTRUUSIO PROSESSINA	7
2.1	Suulakepuristuslinjan laitteisto	9
2.1.1	Ekstruuderi	10
2.1.2	Ruuvi.....	10
2.1.3	Ruuvien tilavuusvirtaus	13
2.1.4	Suutin	13
2.1.5	Jäähdytysallas.....	15
2.1.6	Vetolaite	16
2.1.7	Katkaisu.....	16
3	RAAKA-AINEEN OMINAISUUKSIA	17
3.1	Polyeteeni ekstruusiassa	18
4	VALMISTETTAVA TUOTE	21
5	TYÖSSÄ KÄYTETYT KONEET JA LAITTEET	23
5.1	Ekstruuderi	24
5.1.1	Suutin	25
5.1.2	Ohjauspaneeli	27
5.2	Jäähdytysallas	28
5.2.1	Kalibrointilevy	29
5.2.2	Kannatusrullat	32
5.3	Vetolaite.....	34
5.4	Katkaisu	35
6	KOEAJOT	36
6.1	Esivalmistelut.....	36
6.2	Koneen käynnistäminen.....	37
6.3	Ajoparametrien vaikutus ja ajon tasoittuminen	38
7	TUOTTEEN LAADUNVALVONTA	40
8	LOPPUPÄÄTELMÄT	44
	LÄHTEET.....	46

LYHENTEET JA TERMIT

PE-LD	Matalatiheyksinen polyeteeni
PE-MD	Keskitiheyksinen polyeteeni
PE-HD	Korkeatiheyksinen polyeteeni
MFI	Sulaindeksi (Melt Flow Index)

1 JOHDANTO

Ekstruusio on prosessina helppo ymmärtää, mutta käytännössä sitä voi olla vaikea hallita. Suulakepuristusprosessin hallinnan hankaluutena on se, että prosessin kaikki parametrimuuttujat ovat enemmän tai vähemmän kytköksissä toisiinsa, joten optimaalisten arvojen hakeminen vaatii aikaa ja kärsivällisyyttä.

Työhön kuuluu aluksi teoriaosuus ja perehtyminen ekstruusioon. Tämän jälkeen kerrotaan työssä käytetystä raaka-aineesta ja sen ominaisuuksista. Työssä ei testattu useampia eri raaka-aineita, koska työn tarkoituksena oli ensisijaisesti tutkia koneiden ja laitteiden soveltuvuutta valmistettavalle tuotteelle. Työssä esitellään myös kyseessä olevan tuotteen valmistukseen käytettävä ekstruusiolinjasto ja sen käyttö sekä linjastoon tehdyt muutokset uutta tuotetta varten. Lopuksi työssä on esitetty esimerkki tuotteen laadunvalvonnasta ja työn lopputuloksena pohditaan millaiset ajoparametrit juuri tähän prosessiin ovat optimaaliset.

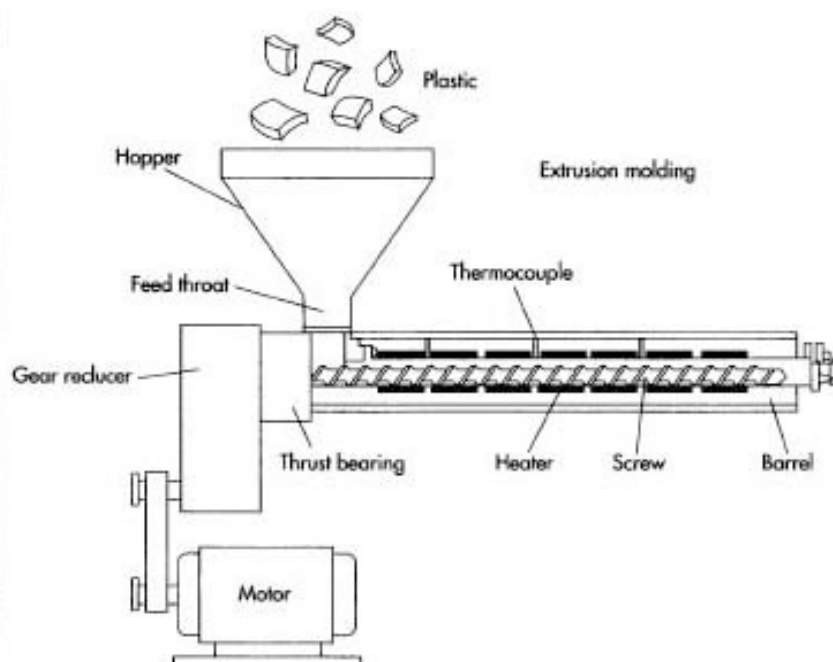
Työn käytännön osuus koostui työskentelystä ekstruusiokoneella ja tutkimisesta miten tehty muoviprofiili käyttäytyi linjan eri vaiheissa. Näin pystyttiin tekemään korjaus- ja muutostoimenpiteitä, joita laitteet vaativat.

2 EKSTRUUSIO PROSESSINA

Ekstruusio on prosessina lähtökohtaisesti varsin yksinkertainen, joskin sen hallinta käytännössä voi olla hankalaakin, riippuen käytettävissä olevista laitteista ja tehtävästä tuotteesta. Kaikkien ekstruudereiden toimintaperiaate on kuitenkin aina sama: koneeseen syötetystä raaka-aineesta tehdään homogenoitua massaa, joka puristetaan jonkinlaisen suuttimen läpi. Aine saa halutun muodon joko heti suuttimesta, tai se muokataan myöhemmin halutunlaiseksi, esimerkiksi kalvopuhalluksessa.

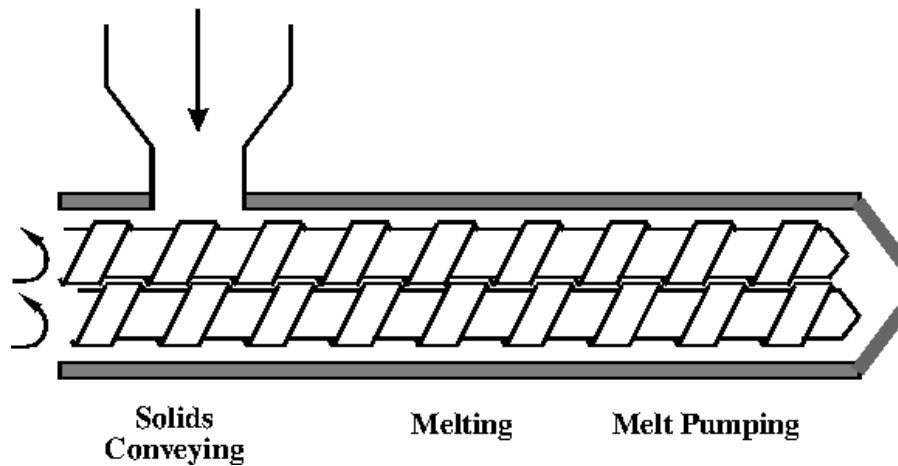
Tavallisimmat ekstruusiokoneet voidaan jakaa yksi- ja kaksiruuviekstruudereihin ja koekstruudereihin ja näillä on kaikilla erilaiset käyttösovellukset. Kaksiruuviekstruuderit soveltuvat hyvin esimerkiksi raaka-ainesekeitusten tekemiseen. Koekstruuderit puolestaan koostuvat useammasta erillisestä ekstruuderista, jolloin voidaan samaan tuotteeseen tehdä yhtä aikaa eri osia eri aineista. Tässä työssä on keskitytty yksiruuviekstruuderilla tehtävään suulakepuristukseen, joka on tällaisella koneella yleisin käyttösovellus.

Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva tavallisesta yksiruuviekstruuderista. Kuvasta nähdään moottori, joka vaihdelaatikon kautta pyörittää ruuvia ja syöttösuppilo, josta raaka-aine syötetään sylinteriin. Myöhemmin on kerrottu tarkemmin itse ekstruuderista ja sen rakenteesta ja siihen liittyvistä lisälaitteista.



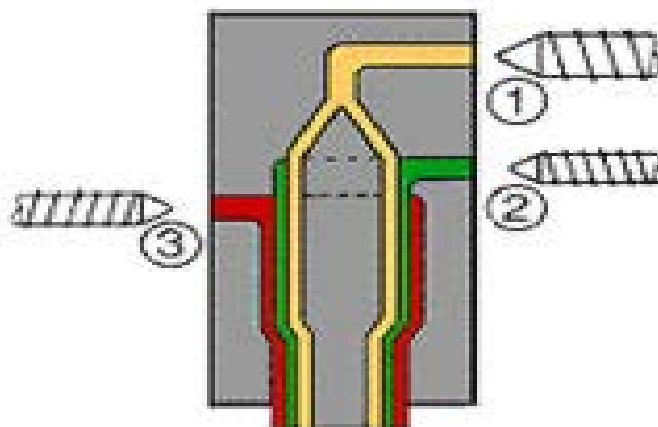
KUVA 1 Yksiruuviekstruuderit (GSM Industries 2009)

Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva kaksiruuviekstruuderista. Kone on periaatteessa rakenteeltaan samanlainen kuin yksiruuviekstruuderiksi, mutta tässä tapauksessa sylinterin sisällä on kaksi ruuvia rinnakkain.



KUVA 2. Kaksiruuviekstruuderiksi (Polymer Processing 2000)

Kuvassa 3 on esitetty kaaviokuva koekstruusion periaatteesta. Kuvasta nähdään, miten esimerkiksi kolme erillistä ruuvia voi syöttää ainetta samaan suuttimeen, jossa ne yhdistyvät yhdeksi tuotteeksi.



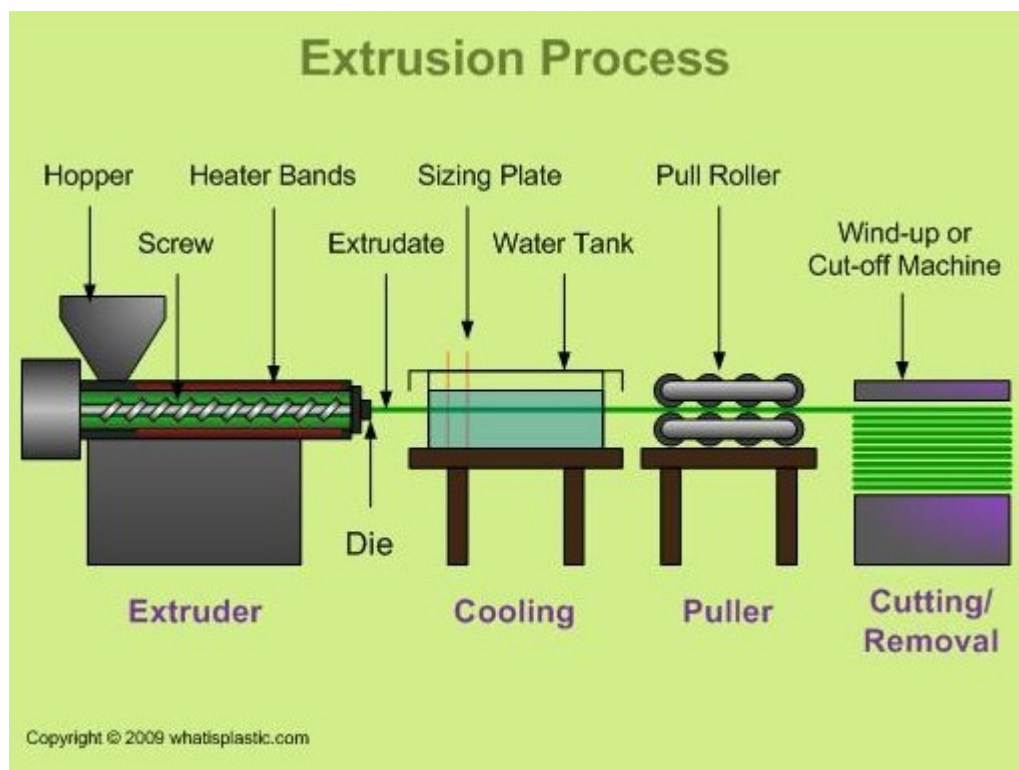
**3-layer-coextrusion
with barrier layer outside**

- ① Main extruder: body layer
- ② Satellite extruder 1: adhesive
- ③ Satellite extruder 2: barrier layer

KUVA 3. Koekstruusio (Plasticstech)

2.1 Suulakepuristuslinjan laitteisto

Suulakepuristus, eli profiilieksruusio, on yksi yleisimmistä ekstruusioprosesseista, koska sillä voidaan valmistaa hyvin monen muotoisia profiileja suurissa erissä. Profiilieksruusioprosessiin kuuluu yleensä aina vähintään viisi välttämätöntä perusosaa: itse ekstruuderin, suutin, jäähdytys, veto ja katkaisu. Kuitenkin ekstruusioprosessi ja siihen liittyvät laitteet on yleensä aina suunniteltu yksityiskohtaisesti tehtävän tuotteen mukaan. Samoilla laitteilla ei välttämättä pystytä valmistamaan toisenlaista profiilia, ainakaan tekemättä muutoksia työkaluihin. Kuvassa 4 on esitetty profiilieksruusioon tarvittavat laitteet (Giles, Wagner & Mount 2005, 475).



KUVA 4. Profiilieksruusiolinjasto (What is Profile Extrusion? 2009)

2.1.1 Ekstruuderi

Ekstruuderi on laite, joka yksinkertaisimmillaan koostuu 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 vaipassa on lämmitysvastukset, jotka sulattavat raaka-aineen ja mahdollistavat näin sen kulkeutumisen ruuvin mukana. Myös ruuvin pyörimisestä aiheutuva kitka lämmittää ja pehmittää raaka-ainetta. Ruuvin tehtävänä on siis sekoittaa ja plastisoida sylinteriin syötetty raaka-aine, joka muoveilla yleensä on granulaattimuodossa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että aineesta tulee yhtenäistä, homogenoitua pehmeää massaa, joka virtaa tasaisesti suuttimen läpi.

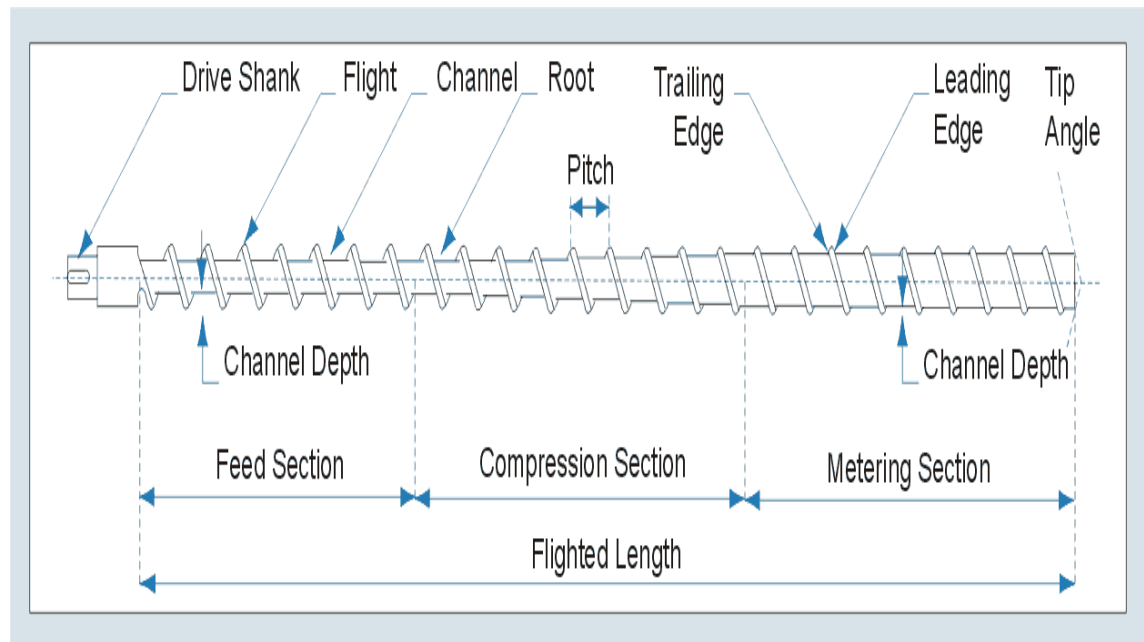
Sylinterin ja suuttimen välissä on myös tärkeänä osana sihtilevy, jonka tarkoituksena on muuttaa pyörivässä liikkeessä olevan aineen virtaus yhdensuuntaiseksi. Lisäksi se antaa koneelle tarvittavan vastapaineen, jotta aineen virtaus ruuvissa olisi tasaista. Seuraavassa kappaleessa on kerrottu tarkemmin itse ruuvista ja sen rakenteesta ja miten se vaikuttaa aineen kulkuun ekstruuderissa.

2.1.2 Ruuvi

Ruuvi on ekstruuderin tärkein osa, koska se saa aineen kulkeutumaan sylinterissä. Ruuveja on rakenteeltaan monenlaisia erilaisiin käyttötarkoituksiin riippuen koneen kapasiteetista ja käytettävästä raaka-aineesta. Ruuveihin voidaan esimerkiksi rakentaa erilaisia sekoitusvyöhykkeitä tai kaasunpoistovyöhykkeitä. Voidaan siis sanoa, että kaikki ruuvit eivät sovi kaikille raaka-aineille. Aivan kuten prosessin muutkin laitteet, myös ruuvin tulee soveltua kyseessä olevan tuotteen valmistukseen.

Kuvasta 5 nähdään, että tyypillisimmillään ruuvi voidaan jakaa kolmeen erilliseen vyöhykkeeseen. Ensimmäisenä on syöttövyöhyke, jossa ruuvin kannan halkaisija on pieni ja näin ollen harjakanava on korkea. Tämä tarkoittaa, että paine ruuvin tässä osassa ei ole vielä kovinkaan korkea. Nimensä mukaisesti tämä vyöhyke ei vielä sulata raaka-ainetta, vaan syöttää ja valmistele sitä seuraavaa vyöhykettä varten. Syöttövyöhykkeen kohdalla sylinterin lämpötilan pitää siis olla juuri oikeanlainen. Jos lämpötila on liian

suuri, raaka-aine sulaa enneaikaisesti ja aiheuttaa näin kitkan vähenemisen polymeerin ja sylinterin seinämän välillä ja aine ei näin ollen kulkeudu kunnolla eteenpäin. Jos taas lämpötila on liian alhainen, kitkaa ei tällöinkään ole tarpeeksi ja kiinteä aine kulkeutuu huonosti. Oikeanlainen lämpötila tekee raaka-aineesta tahmeaa aiheuttaen juuri oikeanlaiset kitkaominaisuudet, jotka saavat aikaan aineen liikkumisen ruuvin pyörimisen mukana (Giles ym. 2005, 38).

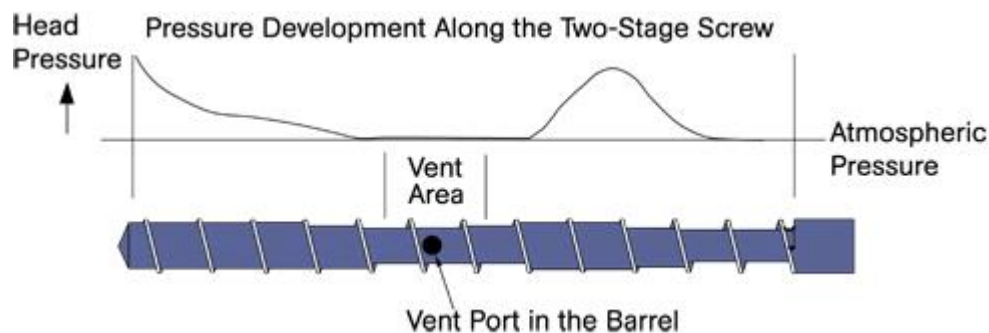


KUVA 5. Ekstruusioruuvi (Eval-asiapacific 2013)

Ruuvin toista vyöhykettä voidaan kutsua puristusvyöhykkeeksi tai muutosvyöhykkeeksi. Tämän vyöhykkeen tarkoituksena on sulattaa raaka-aine niin, ettei seuraavaan vyöhykkeeseen enää joutuisi kiinteää ainetta. Tämän vyöhykkeen aikana ruuvin kannan halkaisija kasvaa ja harjakanavan syvyys pienenee. Tämä aiheuttaa ruuvissa paineen kasvun, joka pakottaa harjakanavissa olevan kiinteän raaka-aineen painautumaan sylinterin seinämää vasten. Kun ruuvi pyörii, raaka-aine sulaa kokonaan tämän vyöhykkeen aikana johtuen kitkasta, jonka aiheuttaa ruuvin harjojen ja sylinterin välissä kulkeva sulafilmi. Sulafilmi ei kuitenkaan saa olla liian paksu tai se heikentää raaka-aineen sulamistehoa. Liian korkea sylinterin lämpötila voi tehdä sulafilmistä liian paksun. Mitä ohuempi sulafilmi on, sitä suurempi on leikkausnopeus ja sitä enemmän muodostuu viskoottista lämpöä, joka parantaa sulamista (Giles ym. 2005, 41).

Kolmatta vyöhykettä ruuvissa voidaan kutsua sekoitusvyöhykkeeksi. Tässä vaiheessa raaka-aine on jo täysin sulanut ja tämän vyöhykkeen pääasiallinen tarkoitus onkin sekoittaa aine niin, että siitä tulee täysin homogeenista ja työntää se sitten suuttimelle. Aineessa ei siis tapahdu tässä vyöhykkeessä enää muutoksia. Aine liikkuu ruuvissa siten, että mitä lähempänä se on sylinterin seinämää, sitä enemmän se liikkuu eteenpäin kohti suutinta. Tässä vyöhykkeessä on myös toiseen suuntaan kulkeva painevirtaus, joka osaltaan auttaa aineen sekoittumista. Työntövirtaus ja painevirtaus aiheuttavat yhdessä sen, että aine liikkuu eteenpäin ruuvissa lähellä sylinterin seinämää, mutta pieni osa siitä kulkeutuu taaksepäin ruuvissa. Tämä takaisinvirtaus kulkee lähellä ruuvin kantaa ja aiheuttaa aineeseen spiraalimaisen liikkeen, joka varmistaa sen kunnollisen sekoittumisen (Giles ym. 2005,42).

Ekstruusiossa voidaan käyttää myös ruuveja, jotka on tehty kaasunpoistoa varten. Tällaisia ruuveja käytetään yleensä, jos raaka-aineet ovat herkkiä absorboimaan vettä. Niitä sanotaan kaksivaiheruuveiksi. Vaikka raaka-aineet yleensä esikuivataan ennen syöttöä ekstruuderiin, jotkin tuotteet voivat vaatia erityisen tarkkaa kosteuden ja kaasujen poistoa aineesta, jotta ne eivät vaikuttaisi aineen termiseen hajoamiseen prosessoinnin aikana. Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva kaasunpoistoon tarkoitettusta kaksivaiheruuvista.



KUVA 6. Kaksivaiheruuvi kaasunpoistoa varten (PlasticsTechnology 2013)

Kaksivaiheruuvin alkupää on rakenteeltaan samanlainen kuin tavallinenkin ekstruusioruuvi. Siinä on samat vyöhykkeet, mutta nyt kolmannen vyöhykkeen jälkeen ruuvin kannan halkaisija pienenee nopeasti, aiheuttaen paineen äkillisen laskun. Tällöin raaka-aineesta paineen vaikutuksesta puristuneet kaasut pääsevät purkautumaan sylinterissä olevasta aukosta. Paineen alentuminen ja harjakanavien tilavuuden kasvu estävät myös aineen karkaamisen ulos kaasunpoistoaukosta.

2.1.3 Ruuvin tilavuusvirtaus

Ruuvissa kulkevan aineen tilavuusvirtaus Q voidaan laskea yhtälöstä (1).

$$Q = \frac{W * H * V}{2} \quad (1)$$

$$V = \pi * D * N * \cos\varphi \quad (2)$$

missä

W = kierrekanavan leveys

H = kierrekanavan syvyys

V = aineen nopeus kanavassa

D = ruuvin halkaisija

N = ruuvin kierrosnopeus rpm

φ = ruuvin kierteen nousukulma

(Giles ym. 2005, 45.)

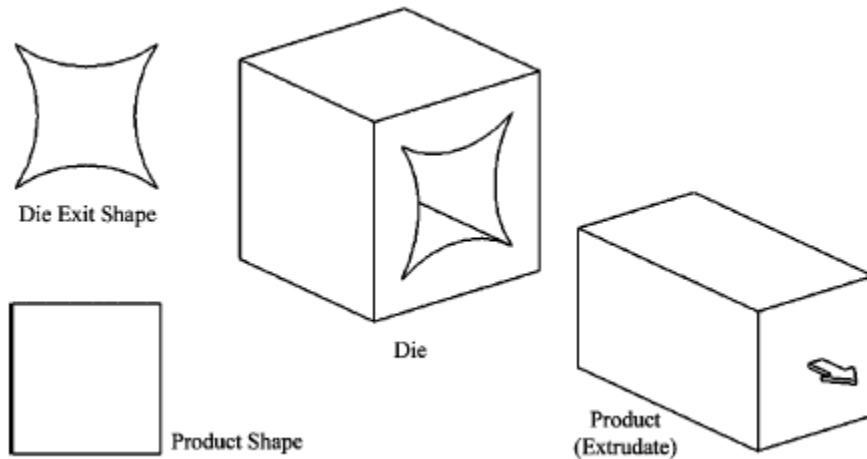
2.1.4 Suutin

Ekstruusioprosessin keskeisin työkalu on heti ekstruuderin ruuvin edessä oleva suutin. Suutin antaa tuotteelle halutun muodon. Suuttimen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon monenlaisia asioita.

Mitä monimutkaisemmasta profiilista on kyse, sitä vaikeampaa on myös suuttimen suunnittelu. Jotta tuotteesta tulisi oikeanlainen, jokaisessa suuttimen osassa täytyy kulkea yhtenäinen virtaus. Jos jokin kohta virtauksesta kulkee nopeammin kuin toinen, se johtaa erilaiseen molekyylien orientaatioon, joka aiheuttaa tuotteen muodoissa vääristymiä. Näin käy, jos suuttimessa jokin osa on selvästi paksumpi kuin muut, eli virtausvastus tässä osassa on pienempi. Tämän vuoksi suuttimen suunnittelussa pyritään tekemään kaikki seinämävahvuudet tasapaksuiksi, jotta virtausvastus olisi joka kohdassa samansuuruinen. Suuttimen profiilin muoto ei myöskään vastaa aivan suoraan suunnitelman mukaisen tuotteen mittoja, vaan sillä pyritään vastaamaan tuotteessa tapahtuviin joidenkin kohtien selviin kutistumiin sekä aineen paisumiseen suuttimen suulla. Jos tätä

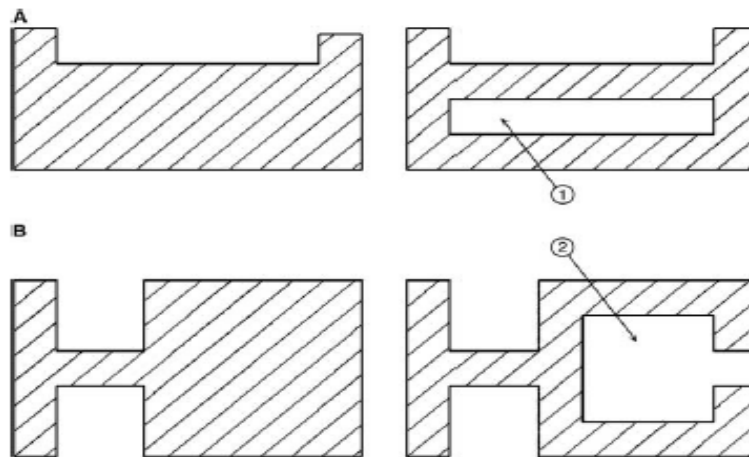
ei voida muilla keinoilla, kuten jäähtymisen ja vetonopeuden säädöllä kompensoida, joitakin kohtia suuttimen profiilista täytyy näin ollen kaventaa ja joitakin leventää jotta lopputuote vastaisi haluttuja mittoja (Giles ym. 2005, 476-477).

Kuvassa 7 on esitetty esimerkki suuttimen profiilin suunnittelusta kun tehdään neliön muotoista profiilia. Aineen paisunnasta johtuen suuttimen profiilin sivut täytyy tehdä sisäänpäin kääntyviksi.



KUVA 7. Profiilin paisumisen huomioiminen suuttimessa (Extrusion Die Design 2006)

Kuvassa 8 on esitetty esimerkki siitä, mitä täytyy ottaa huomioon monimutkaisempien profiilien suunnittelussa. Kuvassa vasemmanpuoleiset profiilit on huonosti suunniteltu, koska virtausvastus paksuissa kohdissa on pienempi kuin kapeammissa. Jotta virtausnopeus olisi yhtä suuri profiilin jokaisessa osassa, täytyy profiilin seinämävahvuudet olla kaikkialla yhtä suuret, jotta virtausvastus olisi kaikkialla yhtä suuri.



KUVA 8. Profiilin seinämävahvuuksien huomioiminen (Extrusion Die Design 2006)

Yhtälöstä (3) voidaan nähdä mitkä tekijät vaikuttavat virtausvastukseen suuttimessa. Tärkeimmät muuttujat ovat suuttimen kanavien pitkittäissuuntaiset pituudet ja kanavien korkeudet.

$$R = \frac{2 * \tau * l}{\eta * Q * h} \quad (3)$$

missä

R = virtausvastus

τ = leikkausjännitys

l = kanavan pituus

η = sulaviskositeetti

Q = tilavuusvirtaus

h = kanavan korkeus

(Giles ym. 2005, 477.)

2.1.5 Jäähdytysallas

Heti suuttimen jälkeen ekstruuderilinjassa on jäähdytysallas. Jäähdytys voidaan tehdä joko vedellä, ilmalla tai kylmillä pinnoilla. Paras tapa riippuu profiilin koosta ja sen laatuvaatimuksista sekä mittatoleransseista. Jäähdytyksellä on siis merkittävä vaikutus kontrolloitaessa tuotteen muotoja ja mittoja. Lähtökohta jäähdytyksen optimaaliseen säätöön on, että tuote ei saa jäähtyä liian nopeasti eikä liian hitaasti ja sen pitää jäähtyä tasaisesti joka kohdasta. Liian tehokas jäähdytys aiheuttaa profiilin kieroutumista ja kutistumista ja liian vaimea jäähdytys jättää profiilin löysäksi eikä se pysy muodossaan. Tämä korostuu sitä enemmän mitä monimutkaisempi ja kookkaampi profiili on kyseessä. Hyvä keino jäähdytyksen optimointiin on esimerkiksi laittaa altaan alkupäähän lyhyelle matkalle paineilmajäähdytys ja loppumatkalle vesisuihkut (Giles ym. 2005, 6).

Koska jäähdytysaltaan tarkoitus on saada profiili pysymään halutussa muodossaan, kun se tulee suuttimesta, on altaan alkupäähän yleensä asennettu tuotekohtainen kalibrointi-työkalu. Tämän osan tarkoitus on tukea profiilia ja pakottaa se pysymään muodossaan niin kauan, että se on jäähtynyt tarpeeksi pitäkseen muotonsa riittävällä tasolla myös seuraavissa vaiheissa.

2.1.6 Vetolaite

Vetolaitteen tarkoitus on vetää tuote tasaisella nopeudella jäähdytysaltaan läpi. Yleisin vetolaitteen toimintaperiaate on, että tuote kulkee kahden vetohihnan välissä, jotka puristavat tuotetta sekä ylhäältä että alhaalta. Hihnojen puristusaine täytyy olla riittävän suuri, että laite vetää profiilia koko ajan tasaisesti, eikä vetonopeudessa esiinny vaihtelua. Puristusaine ei kuitenkaan saa olla liian suuri, koska se saattaa vaikuttaa tuotteen muotoihin tai jopa murskata sen. Vetolaitteen nopeuden täytyy vastata tarkasti nopeutta, jolla tuote tulee ulos suuttimesta, koska vetonopeuden säädöllä on suuri vaikutus tuotteen lopullisiin mittoihin. Jos vetonopeus on liian pieni, tuote jumiutuu ja kasaantuu jäähdytysaltaan suulle. Jos taas vetonopeus on liian suuri, se venyttää ja kutistaa tuotteen pois halutuista mitoista. Lisäksi vetolaitteen täytyy olla suorassa linjassa yhdessä jäähdytysaltaan ja ekstruuderin kanssa, jotta tuotteen muotoihin ei syntyisi vääristymiä (Giles ym. 2005, 7).

Vetolaitetta käytetäänkin jäähdytyksen ohella tuotteen mittojen hienosäätöön aina, kun havaitaan, että profiilin kulku kalibrointilevyssä on muuttunut. Raaka-aineen syöttöön ja kulkunopeuteen ekstruuderin ruuvissa kuuluu luonnostaan pieniä vaihteluita, jotka vaikuttavat aineen ulostulonopeuteen suuttimesta. Tällöin tehdään korjaustoimenpide vetonopeuden säädöllä.

2.1.7 Katkaisu

Viimeisenä yksikköprosessina ekstruuderilinjassa on tuotteen katkaisu yleensä johonkin tiettyyn määrämittaan. Tuotteen koosta ja käytetystä materiaalista riippuu, minkälaista katkaisumenetelmää voidaan käyttää. Pehmeät ja ohutseinäiset tuotteet voidaan katkaista nopeatoimisella veitsileikkurilla. Paksummat profiilit vaativat kuitenkin katkaisuun sahan. Sahausleikkaus vie enemmän aikaa kuin veitsileikkaus, joten sahausalustan on liikuttava profiilin mukana, kunnes katkaisu on valmis. Näin katkaisu ei häiritse tuotteen kulkua. Kun sahaus on valmis, alusta siirtyy takaisin lähtöpaikkaansa. Joitakin tuotteita ei kuitenkaan tarvitse katkaista määrämittoihin heti ekstruuderiprosessissa, vaan ne voidaan esimerkiksi kelata vetolaitteen jälkeen suoraan keloille (Giles ym. 2005, 483).

3 RAAKA-AINEEN OMINAISUUKSIA

Tässä työssä käytettiin raaka-aineena matalatiheyksistä polyeteeniä (PE-LD). Tuotetta voitaisiin valmistaa muistakin muoviraaka-aineista, mutta polyeteeni soveltui tähän työhön parhaiten, koska sillä on helppo tehdä koeajoja ja tutkia ekstruuderilinjaston soveltuvuutta uudelle tuotteelle. Polyeteeni sopii työssä tutkitun tuotteen valmistukseen hyvin myös siksi, että sillä on luonnostaan useita hyviä ominaisuuksia ja se on halvin raaka-aine tuotantomittakaavassa.

Polyeteenin yleisiin ominaisuuksiin kuuluu:

- hyvä kulutuskestävyys
- hyvä iskulujuus
- hyvä kemiallinen kestävyys
- alhainen veden absorptio
- elintarvikehyväksytty
- voidaan käyttää hyvin alhaisissa lämpötiloissa
- edullinen

Mikään raaka-aine ei kuitenkaan ole täydellinen, vaan sillä on myös rajoittavia tekijöitä. Polyeteeni on suhteellisen pehmeä ja joustava materiaali, joten se ei kestä suurta kuormitusta ilman muodonmuutosta. Se kestää hyvin alhaisia käyttölämpötiloja, mutta ei puolestaan kovin korkeita, koska sen sulamispiste on n. 110°C . Sillä on erittäin hyvä sähköneristyskyky, mutta näin ollen se myös varautuu helposti ja saattaa siksi aiheuttaa ongelmia joissakin tilanteissa. Polyeteeni kestää hyvin monia eri kemikaaleja, mutta ei kuitenkaan hapettavia happoja. Myös UV-säteily vahingoittaa suojaamatonta polyeteeniä. Lisäksi suojaamaton polyeteeni on myös helposti palava materiaali (Muovi-muotoilu 2013).

Näitä polyeteenin rajoittavia tekijöitä voidaan kuitenkin kompensoida muuttamalla raaka-aineen ominaisuuksia. Ensinnäkin polyeteeniä raaka-aineena voidaan valmistaa hyvin monenlaisina laatuina. Yleisimmin nämä laadut jaotellaan aineen tiheyden mukaan: PE-LD, PE-MD sekä PE-HD. Luokkien tiheuserot eivät keskenään ole kovin suuret, mutta jo pelkästään tämä vaikuttaa merkittävästi sekä aineen prosessointiominaisuuksiin että lopputuotteen ominaisuuksiin. Esimerkiksi, mitä suurempi aineen tiheys on, sitä

suurempi on sen sulamispiste. Matala- ja korkeatiheyksisen aineen sulamispiste-ero voi olla jopa 25 astetta. Suurempi tiheys merkitsee myös suurempaa kiteisyyttä, joka puolestaan antaa aineelle amorfisen luonteen.

Muoviraaka-aineeseen voidaan lisätä myös erilaisia seosaineita, joiden tarkoitus on muuttaa sen ominaisuuksia tuotteen käyttötarkoituksesta riippuen. Esimerkiksi ulko- käyttöön tarkoitettuun polyeteenituotteeseen täytyy lisätä UV-suoja-ainetta. Samalla tavalla voidaan lisätä myös palonestoaineita, antistaattisia aineita, väripigmenttejä ym.

Seosaineiden lisäksi raaka-aineeseen voidaan sekoittaa myös niin kutsuttuja täyteaineita. Nämä aineet eivät juuri vaikuta aineen ominaisuuksiin, vaan niiden pääasiallinen tarkoitus on tehdä raaka-aineesta halvempaa, koska täyteaineet ovat yleensä huomattavasti halvempia materiaaleja kuin neitseellinen muoviraaka-aine. Tyypillisimpiä täyteaineita ovat erilaiset mineraalijauheet kuten talkki, kaoliini ja kalkki. Tässä työssä tutkittu tuote on esimerkiksi tehty täyteaineistetusta muovisekoituksesta, joka sisältää 30 % vuolukivijauhetta. Täyteaineita ei kuitenkaan voida käyttää kuin tiettyyn täyttöasteeseen asti, koska ne haurastuttavat tuotetta.

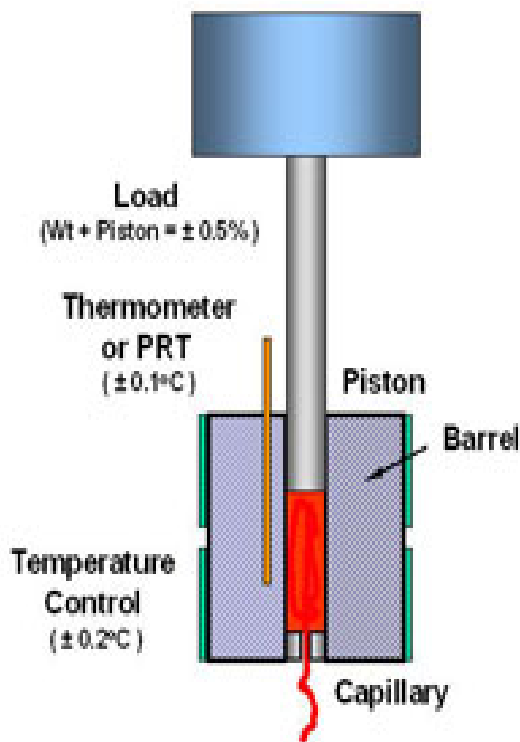
Nykyään muoviin voidaan sekoittaa myös erilaisia luonnonkuituja, joita saadaan esimerkiksi puusta, pellavasta, hampusta tai oljesta. Kuituja käytetään muovikomposiittituotteissa paitsi täyteaineina, myös lujitteina. Luonnonkuidut ovat ympäristöystävällinen vaihtoehto synteettisille lasi- ja hiilikuiduille. Niiden tuottamisella on pienemmät ympäristövaikutukset, koska esimerkiksi olkea saadaan viljantuotannon sivutuotteena. Ne vähentävät tarvittavan muovin määrää, jolloin myös syntyy vähemmän jätettä. Lisäksi luonnonkuitujen käytöllä on hyvä imago, koska ne parantavat kierrätettävyyttä ja pienentävät tuotteen hiilijalanjälkeä. Luonnonkuitujen käyttö tulee myös voimakkaasti kasvamaan tulevaisuudessa, johtuen kiristyvistä päästönormeista ja kierrätettävyyssvaatimuksista (Luonnonkuitu 2013).

3.1 Polyeteeni ekstruusiassa

Polyeteeni on monipuolinen materiaali käytettäväksi ekstruusioprosesseissa, koska se kestää korkeitakin lämpötiloja ilman että sen polymeerirakenne hajoaa. Toisaalta sitä voidaan käyttää myös suhteellisen matalissa lämpötiloissa, koska sen sulamispiste on

alhainen. Tavallisessa suulakepuristuksessa kuitenkin kannattaa käyttää aina mahdollisimman alhaisia lämpötiloja, jotta tuotteen jäähtytys ja näin ollen sen muodonpysyvyys, ei aiheuttaisi ongelmia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ruuvin sylinterin ja suuttimen lämpötilat kannattaa pitää korkeintaan n. 20-30 astetta aineen sulamispisteen yläpuolella.

Kuten aiemmin on jo todettu, polyeteenejä on useita eri laatuja. Tiheydeltään erilaisia polyeteenejä voidaan työstää ekstruusiolla, mutta aineen sulaominaisuudet täytyy olla sellaiset, että se soveltuu ekstruusioprosessiin. Valittaessa sopivaa laatua ekstruusioon nousee tärkeäksi valintakriteeriksi aineen MFI-arvo eli sulaindeksi. MFI kertoo käytännössä sen, kuinka jäykkää aine on kun se on kuumennettu yli sulamispisteen. MFI määrittellään aineelle standardin mukaisesti siten, että sylinteriin, joka on kuumennettu 190⁰C:een, laitetaan tutkittavaa muoviraaka-ainetta. Sen jälkeen aine puristetaan sylinteristä ulos männällä, joka painaa tarkalleen 2,16 kg. Sulaindeksin arvo saadaan, kun katsotaan kuinka monta grammaa ainetta tulee ulos sylinteristä 10 minuutin aikana. Tästä syystä raaka-ainelaatuja valmistetaan useita erilaisia, jotta ne soveltuisivat erilaisiin prosesseihin. Kuvassa 9 on esitetty kaaviokuva sulaindeksin määrittäslaitteistosta.

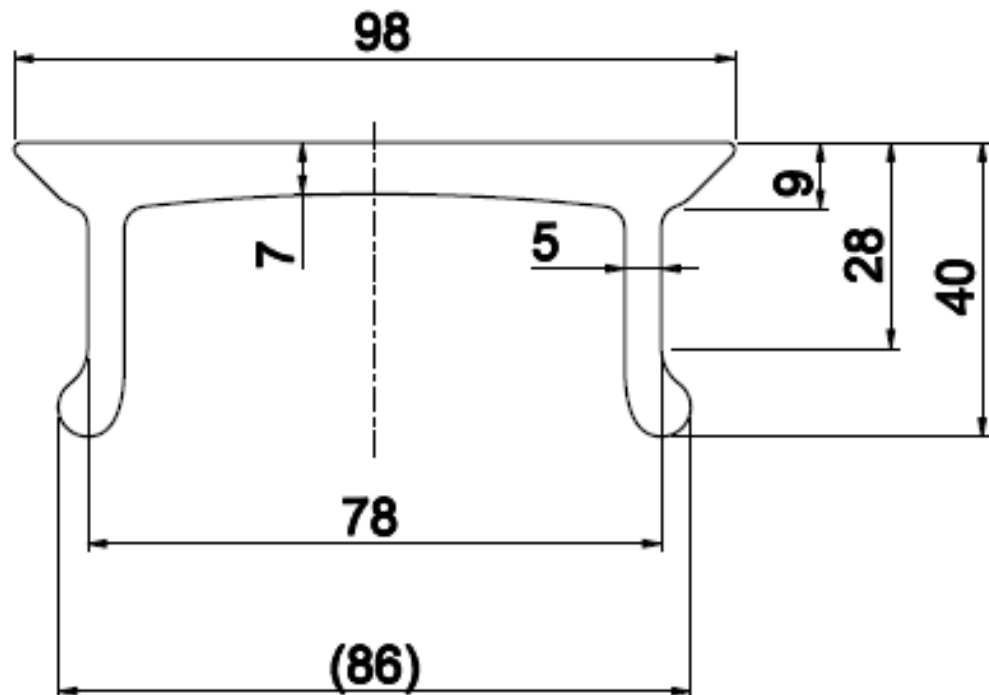


KUVA 9. Periaatekuva sulaindeksin määrittäslaitteesta (ElevTech-SRL 2010)

Parhaiten suulakepuristusekstruusioon sopivat sellaiset laadut, joiden MFI-arvo on n. 0,5. Jonkinlaisena ohjearvona voidaan sanoa, että sulaindeksin tulee olla korkeintaan 1,0, jotta se soveltuu ekstruusioon. Mitä korkeampi MFI-arvo on, sitä pienempi on sen sulaviskositeetti, eli sitä juoksevampaa aine on. Näin ollen MFI ei saa olla liian suuri, koska silloin aine on liian juoksevaa suulakepuristukseen.

4 VALMISTETTAVA TUOTE

Työssä kehitettyä ja valmistettua tuotetta on tarkoitus käyttää betonisten, rautateiden varsille vedettävien kaapelikourujen kansina. Kuvassa 10 on esitetty tuotteen poikkaisprofiili ja sen suunnitellut mitat. Tuotteen osalta työn tarkoitus oli tutkia pystyttäisiinkö käytettävissä olevilla laitteilla tuotetta valmistamaan ja onko ajoparametrien hallinta mahdollista.



KUVA 10. Työssä kehitetty profiili

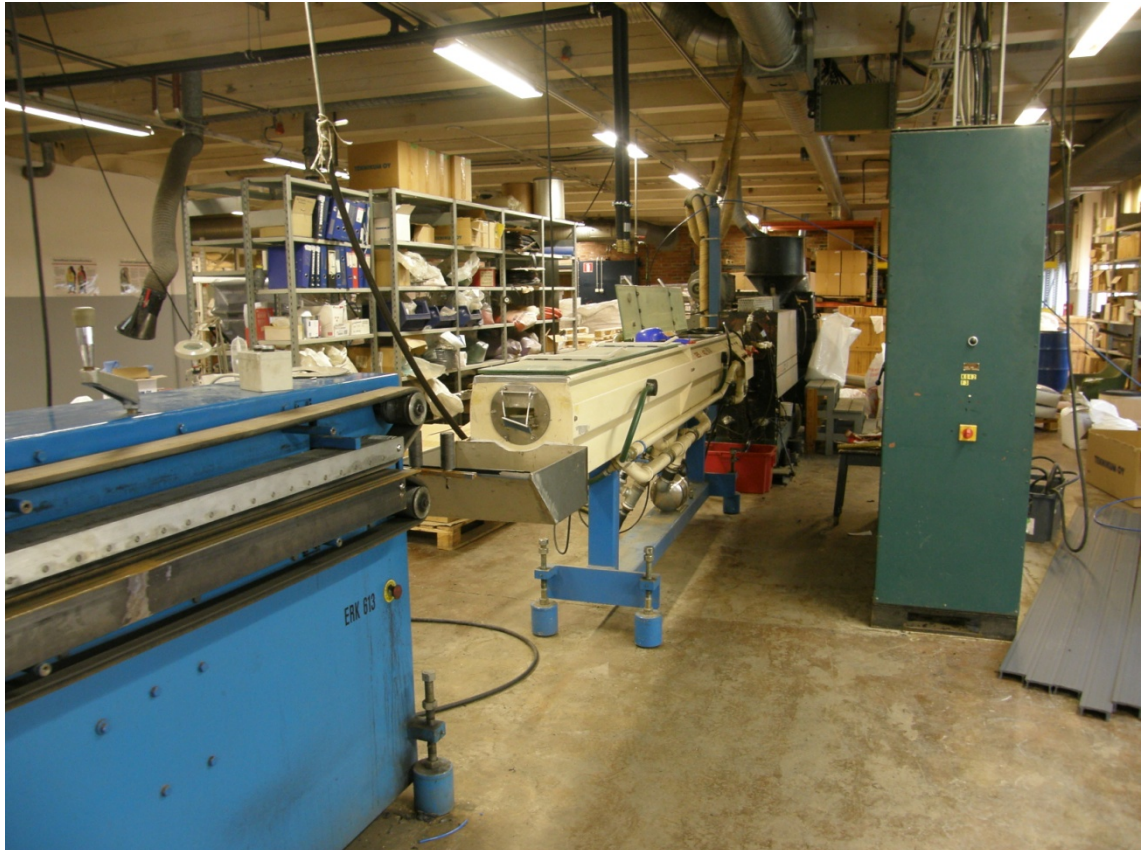
Kuvassa 11 on esitetty kaapelikouru, johon tuote on tarkoitettu. Kuvasta nähdään, miten kourun kapea yläosa vastaa seinämien muodoiltaan tuotteen sivupintojen muotoja.



KUVA 11. Tuotteen käyttökohde (Parma kaapelikanavat)

5 TYÖSSÄ KÄYTETYT KONEET JA LAITTEET

Tässä kappaleessa esitellään yksityiskohtaisesti työssä käytetyt koneet ja laitteet ja kuvaillaan, millaisia muutoksia eri osiin täytyi tehdä, jotta tuotantolinja soveltuisi kyseessä olevan tuotteen valmistukseen. Kuvassa 12 on esitettynä koko ekstruuderilinjasto.



KUVA 12. Ekstruuderilinjasto (Jussi Kari 2013)

5.1 Ekstruuderit

Kuvassa 13 on esitetty työssä käytetty ekstruuderit. Koneen keskellä olevasta syöttösuppilosta syötetään granulaattimuodossa oleva muoviraaka-aine sisään koneeseen. Suppilosta on avoin yhteys suoraan sylinteriin, joten granulaatit valuvat omalla painollaan sisään samalla kun ruuvi työntää niitä eteenpäin sylinterissä. Koneen suppilosta vasemmalla oleva osa koostuu ruuvista ja sylinteristä ja sylinterin lämmitysvastuksista sekä jäädytyspuhaltimista. Suppiloon oikealla puolella on koneen vaihdelaatikko ja sen takana moottori joka pyörittää ruuvia. Itse ekstruuderit ei tarvinnut tehdä mitään muutoksia, koska koneen koko ja kapasiteetti sekä ruuvi soveltuivat hyvin tuotteen valmistukseen.



KUVA 13. Ekstruuderit (Jussi Kari 2013)

5.1.1 Suutin

Kuvassa 14 on esitetty ekstruuderin sylinterin pää, johon kiinnitetään tuotteen mukainen suutin. Kuvasta nähdään sylinterin ja ruuvin pää avoimena. Kuvassa 15 puolestaan on esitetty sihtilevy, joka on asetettu suoraan ruuvin ja suuttimen väliin. Sihtilevy on välttämätön, jotta sylinteriin muodostuu tarvittava vastapaine, joka auttaa aineen sekoittumista ruuvissa. Lisäksi sihtilevy muuttaa aineen virtauksen niin, että se tulee suuttimelle tasaisesti ja suorassa ja pääsee näin ollen virtaamaan suuttimen jokaisen osan läpi yhtenäisellä nopeudella.



KUVA 14. Sylinterin pää avoimena (Jussi Kari 2013)



KUVA 15. Sihtilevy (Jussi Kari 2013)

Kuvassa 16 on esitettyinä työssä käytetty suutin kiinnitettynä ekstruuderiin. Suuttimeen kuuluu oma lämmitysvastuspanta, koska sen täytyy olla lämmitettynä kauttaaltaan ja lämpötilan täytyy olla koko suuttimessa sama, jotta aineen virtaus sen läpi olisi yhtenäistä joka kohdassa. Suuttimen fyysinen suunnittelu täytyy myös olla toteutettu juuri oikealla tavalla, jotta virtaus olisi tasainen.

Koneella tehdyt koeajot osoittivat suunnittelun merkityksen käytännössä. Alun perin virtaus suuttimen läpi oli selvästi epätasaista. Se oli nopeampaa profiilin vaakaosassa ja hitaampaa sivujen kohdalla. Suuttimeen täytyi siis tehdä muutos niin, että virtaus kaikissa osissa olisi yhtenäinen. Tämä toteutettiin siten, että suuttimen takaosasta koverrettiin metallia pois ja avarrettiin näin ollen tilaa profiilin sivujen kohdalta onkalossa, joka jää sihtilevyn ja suuttimen profiilikanavien väliin. Toisin sanoen sivujen virtauskanavia lyhennettiin, jolloin virtausvastus pieneni. Tämä auttoi tasaamaan virtausnopeuden profiilin eri osissa.



KUVA 16. Suutin (Jussi Kari 2013)

5.1.2 Ohjauspaneeli

Kuvassa 17 on esitetty ekstruuderin ohjauspaneeli. Kuvassa vasemmalla olevat alemmat mittarit näyttävät ruuvien kierrosnopeuden ja moottorin virrankulutuksen. Ylempänä on myös sylinterin painemittari. Näiden alla on koneen käynnistys- ja pysäytyskytkin sekä ruuvien kierrosnopeuden säädin. Näistä oikealla on sylinterin ja suuttimen lämmityspantojen lämpötilamittarit. Ekstruuderisylinteri jaetaan perinteisesti neljään eri vyöhykkeeseen joiden lämpötilat voidaan paneelista erikseen säätää. Lisäksi tähän koneeseen kuuluu kolme erillistä virtajohtoa, jotka voidaan kytkeä suuttimeen kiinnitettäviin lämmityspantoihin, koska jotkin suutinkonstruktiot voivat vaatia useamman erillisen lämmityspannan.



KUVA 17. Ekstruuderin ohjauspaneeli (Jussi Kari 2013)

5.2 Jäähdytysallas

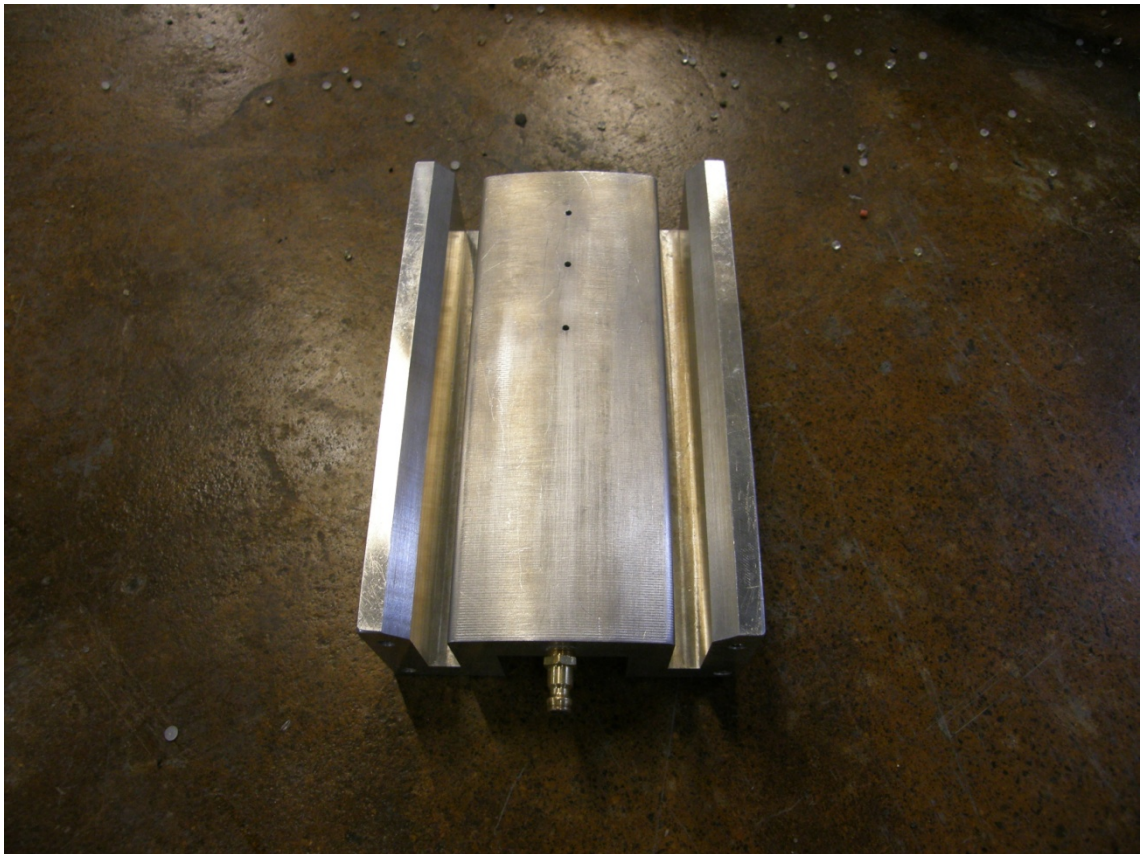
Kuvassa 18 on esitetty linjaston jäähdytysallas. Altaan sisäreunoilla kulkee neljä pituus-suuntaista putkea, joihin on tasaisin välein kiinnitetty suihkusuuttimia. Nämä voi nähdä tarkemmin kuvasta 24. Altaaseen kuuluu sähköpumppu, joka kierrättää vettä suljetussa kierrossa siten, että se imee veden altaan pohjassa olevista sihdeistä ja pumpkaa sen takaisin altaaseen suihkuputkien kautta. Ennen kuin vesi pääsee suihkuputkiin, se kulkee kahden säätöventtiilin kautta. Näillä venttiileillä säädetään veden virtausnopeus suihkusuuttimissa. Toinen venttiili vastaa altaan toisesta puoliskosta ja toinen toisesta. Jäähdytysveden virtausnopeuden, eli toisin sanoen jäähdytystehon täytyy olla juuri oikeanlainen, koska sillä on oleellinen vaikutus tuotteen muodonpysyvyyteen, varsinkin altaan alkupäässä. Muodonpysyvyyteen toki vaikuttavat muutkin asiat, kuten vetonopeuden oikea säätö ja nopea reagoiminen profiilin kulkunopeuden mahdollisiin vaihteluihin. Uutta vettä altaaseen saadaan vesijohdosta joka on liitetty suoraan pumpulle joltavaan imuputkeen.



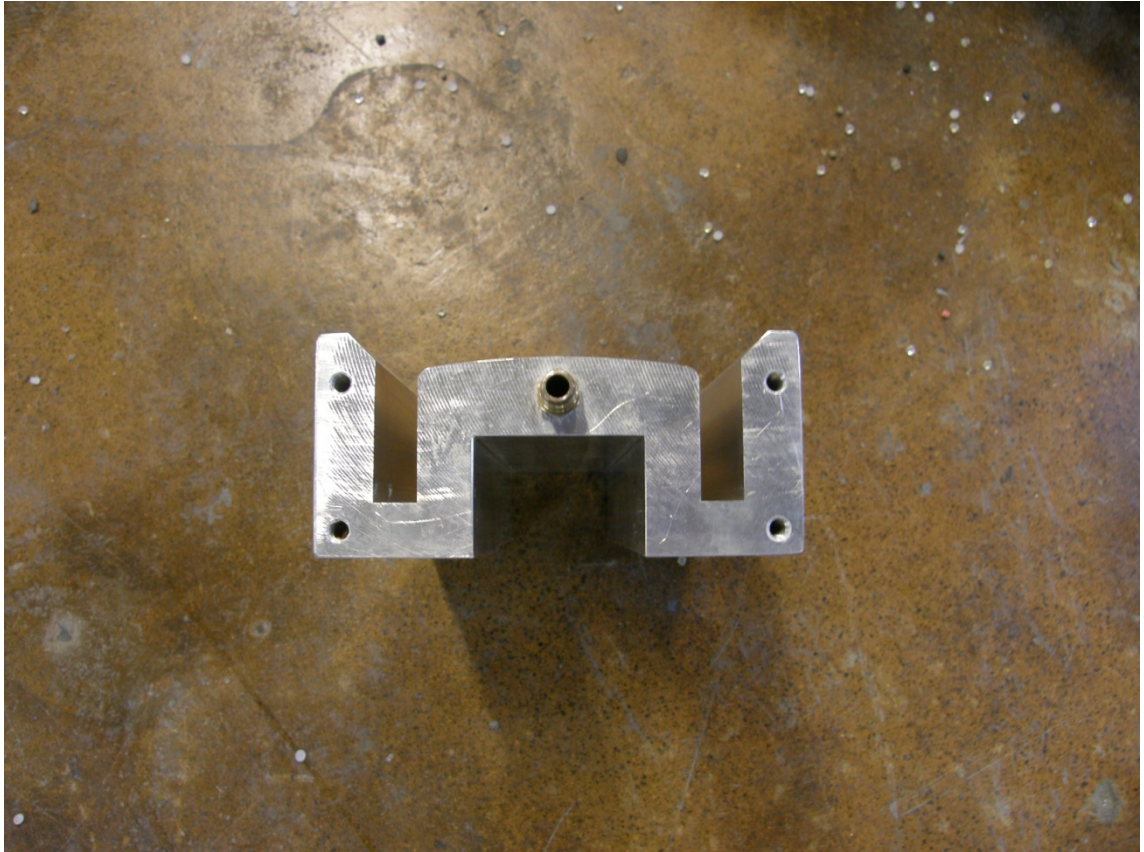
KUVA 18. Jäähdytysallas (Jussi Kari 2013)

5.2.1 Kalibrointilevy

Kalibrointilevy on tuotteen muodonpysyvyyden kannalta linjaston tärkein osa. Se tukee profiilia ja pitää sen muodossaan jäähdytyksen kriittisimmän vaiheen aikana. Kuvassa 19 on esitetty ensimmäinen kalibrointilevy, joka tehtiin tämän työn tuotetta varten. Se on pituudeltaan vain 200 mm pitkä. Kuvasta nähdään, että myös kalibrointityökaluun on mahdollista kytkeä vesi- tai paineilmajäähdytys. Jäähdytys suunnattuna levystä profiilin sisäpintaan osoittautui kuitenkin huonoksi, koska se sai profiilin pinnan aaltomaiseksi. Kuvassa 20 on kalibrointilevyn poikittaisprofiili joka on tehty vastaamaan mahdollisimman hyvin tuotteen profiilimuotoa. Näin ollen levy pakottaa profiilin pysymään muodossaan kriittisimmän jäähdytysvaiheen aikana.



KUVA 19. Kalibrointilevyn prototyyppi (Jussi Kari 2013)



KUVA 20. Kalibrointilevyn poikittaisprofiili (Jussi Kari 2013)

Muutamien koeajojen jälkeen kävi kuitenkin selväksi, että ensimmäinen prototyyppi kalibrointilevystä oli aivan liian lyhyt tukeakseen profiilia tarpeeksi. Niinpä siitä tehtiin uusi versio, joka on poikittaisprofiililtaan samanlainen, mutta sen pituus on 1000 mm. Tähän uuteen kalibrointilevyyn suunniteltiin myös uudenlaisia jäähdytys- ja tukijärjestelmiä. Kuvassa 21 on esitetty uusi kalibrointilevy ja siihen tehdyt muokkaukset.

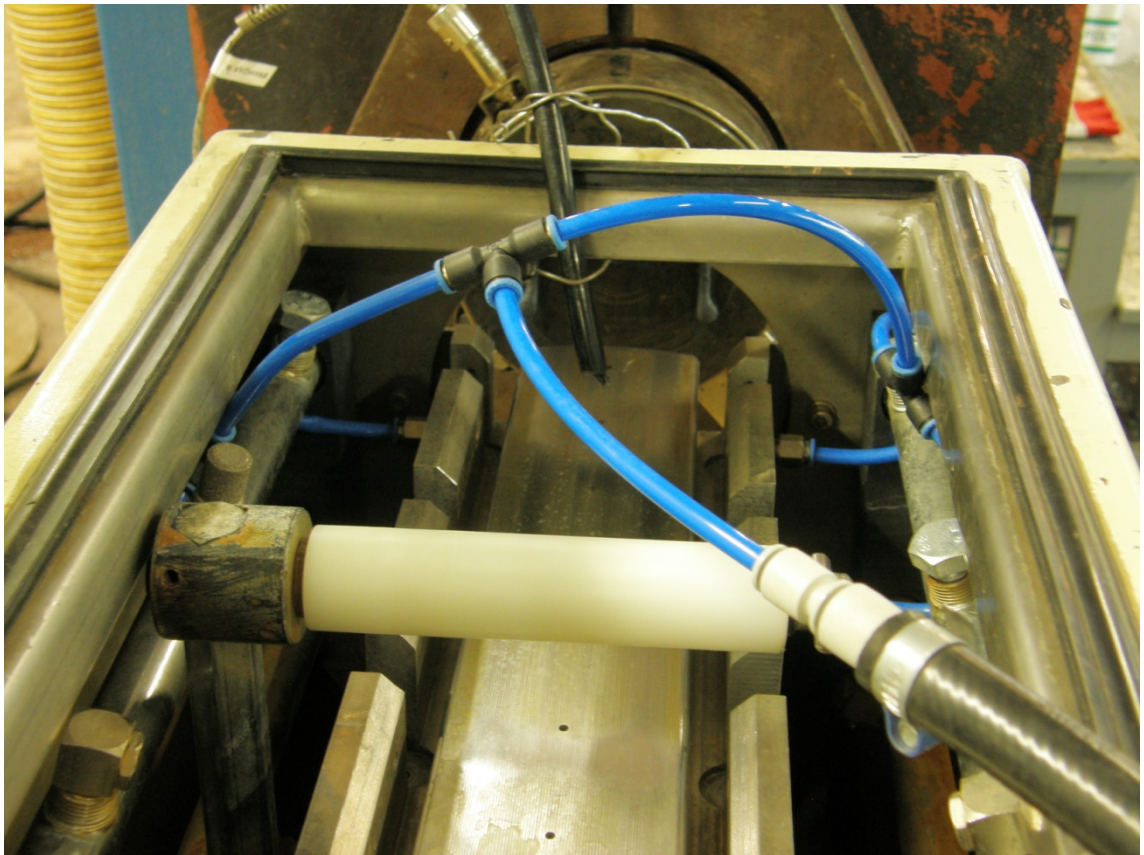
Levyn keskellä oleva vesisuihkujäähdytys tehtiin ulottumaan 300 mm matkalle. Jäähdytyskanavaa ei lopulta kuitenkaan käytetty ollenkaan. Levyn molempiin kylkiin tehtiin viisi reikää kuvan 21 osoittamalla tavalla. Näihin voidaan kiinnittää letkut joko vesi- tai paineilmajäähdytystä varten. Käytännössä letkujen kiinnitys osoittautui kuitenkin hankalaksi toteuttaa jo pelkästään jäähdytysaltaan ahtaan rakenteen vuoksi. Kaikkiin kalibrointilevyn reikiin ei pystytty kiinnittämään liittimiä altaan konstruktiosta johtuen. Lisäksi vesijäähdytys levyn alkupäässä osoittautui liian nopeaksi jäähdytysmenetelmäksi. Niinpä lopulta päädyttiin käyttämään paineilmajäähdytystä kuvan 22 osoittamalla tavalla. Kuvasta nähdään, että levyn kahteen ensimmäiseen reikään molemmille sivuille on kiinnitetty letkut jotka puhaltavat paineilmaa profiilin sivuille.

Lisäksi jäähdytysaltaan reunaan on kiinnitetty toinen paineilmaletku, joka puhaltaa ilmaa profiilin vaakapinnalle. Näin saatiin järjestettyä jäähdytys siten, että se on riittävän hidasta ja materiaali ehtii jäähtyä pinnasta juuri sen verran, ettei vesisuihkujäähdytys aiheuta siihen muodonmuutoksia. Jos profiili altistetaan pisaroivalle vesisuihkulle liian kuumana, se aiheuttaa aineen pintaan pieniä paisumia. Todennäköisesti nämä paisumat johtuvat profiilin pinnassa olevien molekyyliketjujen uudelleenjärjestymisestä. Kun vesipisarot koskettavat kuumaa ja yhä lähes sulaa profiilin pintaa, on jäähdytys pisaroiden alueella suhteellisen nopeaa. Näin nopea lämpötilan muutos saattaa saada profiilin pinnassa olevat molekyyliketjut orientoitumaan niin, että ne näyttävät paisuvan ulospäin pinnasta.

Uuteen kalibrointilevyyn suunniteltiin myös profiilin sivuja paremmin tukevat, nylonista sorvatut sivurullat, jotka näkyvät kuvassa 21. Oikein asetettuina niiden tarkoitus oli pitää profiilin sivut tiiviimmin levyn keskiosaa vasten ja saada profiili paremmin vastaamaan suunnitelman mukaisia haluttuja mittoja. Rullat osoittautuivat kuitenkin lopulta huonoiksi, koska materiaali jota työssä käytettiin, oli sen verran tahmeaa, että se jäi rulliin kiinni ja aiheutti profiilin juuttumisen ja kasaantumisen jäähdytysaltaan suulle. Profiili on varsinkin levyn ensimmäisten 30cm matkalla vielä varsin kuumaa ja pehmeää.



KUVA 21. Uusi kalibrointilevy (Jussi Kari 2013)



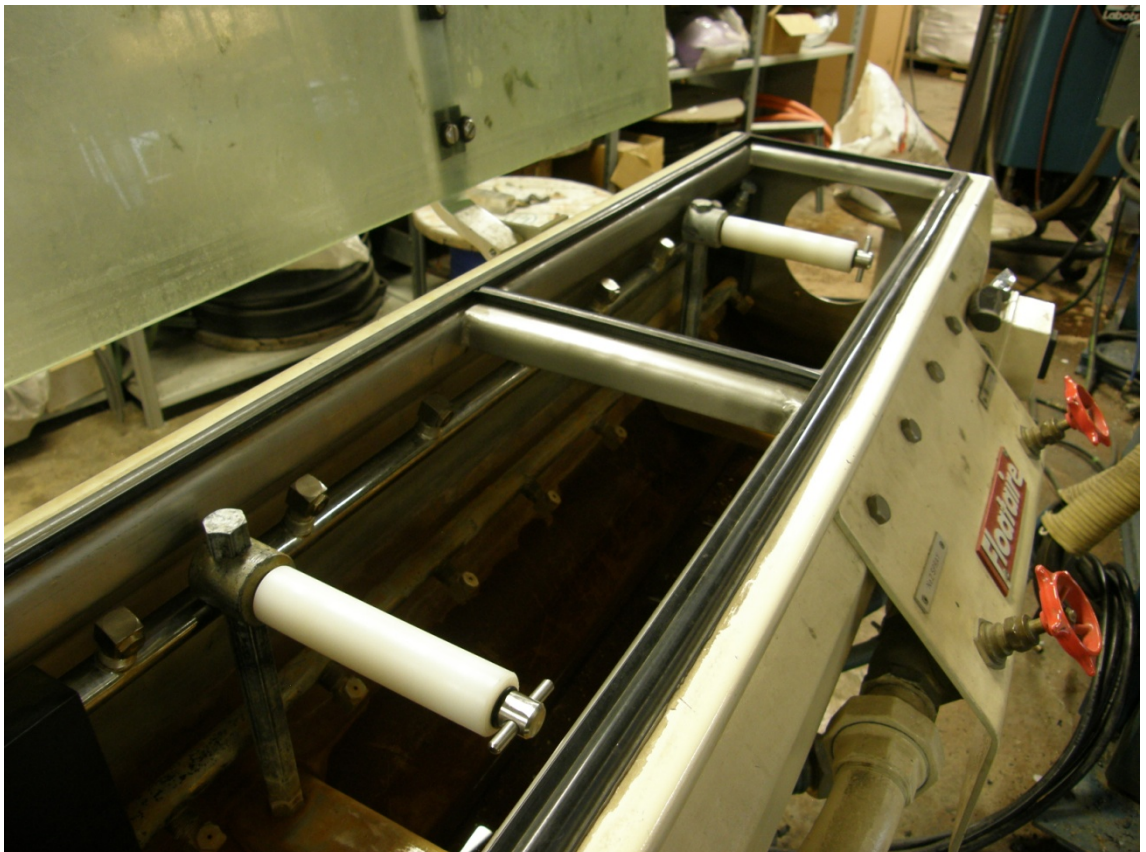
KUVA 22. Kalibrointilevyn sivujäähdytysletkut (Jussi Kari 2013)

5.2.2 Kannatusrullat

Jäähdytysaltaan rakenteeseen kuuluu kuusi kannatusrullaa, joiden korkeus voidaan säätää halutulle tasolle. Tässä ne säädettiin samalle korkeudelle kuin kalibrointilevy. Näiden rullien tarkoitus on kannatella profiilia sen kulkiessa jäähdytysaltaan läpi ja näin pitää se suorassa. Lisäksi altaan kaksi ensimmäistä rullaa on kalibrointilevyn päällä, joten niitä voidaan käyttää painoteloina pitämään profiilia paremmin kalibrointilevyä vasten. Kuvassa 23 vasemmanpuolinen rulla on altaassa ollut alkuperäinen rullamalli. Rullat olivat kuitenkin pituudeltaan liian lyhyet kyseessä olevaa profiilia varten, eivätkä antaneet sille kunnollista kannatusta. Niinpä oli tehtävä uudet pidemmät rullat ja akselit. Kuvan oikeanpuoleinen rulla on uuden suunnitelman mukainen ja pitää profiilin koko ajan tasaisessa kannatuksessa. Kuvassa 24 on esitetty rullien kiinnitys jäähdytysaltaassa. Rullat voidaan kiristää niitä kiinni pitävissä tangoissa halutulle korkeudelle.



KUVA 23. Jäähdytysaltaan kannatusrullat (Jussi Kari 2013)



KUVA 24. Kannatusrullien kiinnitys jäähdytysaltaassa (Jussi Kari 2013)

5.3 Vetolaite

Vetolaitteen hallinta osoittautui varsinkin työn alkuvaiheessa hankalaksi, mutta työn edetessä ja laitteisiin paremmin tutustuttaessa sen kanssa onnistuttiin toimimaan. Alkuvaiheen ongelmana oli, että laite ei toiminut tasaisella vetonopeudella, mikä aiheutti profiiliin vääristymiä ja kasaantumia. Yksi syy voi olla, että vetolaitteen hihnat eivät aina saa täysin pitävää otetta profiilista ja pyörivät ikään kuin tyhjää ja aiheuttavat näin vetonopeuden vaihtelua. Vetolaitteen moottori ei myöskään välttämättä toimi aina täysin tasaisella ajonopeudella.

Todennäköisin syy profiilin huonoon kulkuun vetolaitteessa on, että tätä laitetta ei ole suunniteltu niin leveää profiilia varten, kuin mistä tässä työssä on kyse. Hihnojen tarkoituksena on pitää profiilin kulku suorana. Profiilin sivujen luisuminen pois hihnalta aiheuttaisi vetolaitteen jumittumisen. Koska profiili voitiin ottaa hihnojen väliin vain osittain, täytyi vetolaitteen alemman hihnan viereen asentaa levy tukemaan profiilin toista puolikasta niin, että se pysyi suorassa. Tämä tukilevy on esitetty kuvassa 25.



KUVA 25. Vetolaite (Jussi Kari 2013)

5.4 Katkaisu

Laitteistoon ei kuulunut automaattikatkaisua, joten katkaisu hoidettiin manuaalisesti käyttämällä puukkosahaa. Tästä profiilista oli tarkoitus tehdä noin kolmen metrin pituisia kappaleita. Koska profiilista piti tehdä niinkin pitkiä kappaleita, se piti saada kulkemaan tuettuna ja samalla korkeudella kuin vetolaite vielä hyvän matkaa sen jälkeen. Jos profiilia ei tuettaisi vetolaitteen jälkeen, se taipuisi ja vääntyisi oman painonsa johdosta.

6 KOEAJOT

Seuraavissa kappaleissa kuvataan tässä työssä käytetyn ekstruuderin ja muiden laitteiden käyttöä tehdyissä koeajoissa ja tuotteen valmistusta.

6.1 Esivalmistelut

Ennen ekstruuderin varsinaista käynnistämistä täytyy sylinteri ja suutin lämmittää asetettuihin käyttölämpötiloihin. Tämä saattaa kestää jopa useamman tunnin, riippuen siitä kuinka korkeat käyttölämpötilat asetetaan. Kuten aikaisemmin on jo todettu, sylinteri jakautuu neljään eri lämpötilavyöhykkeeseen. Näiden lämpötilat sekä suuttimeen kuuluvan lämpöpannan lämpötila voidaan määrittää ohjauspaneelista. Vyöhykkeiden lämpötilaprofiili voitaisiin asettaa millaiseksi tahansa, mutta käytännössä paras lämpötilaprofiili on niin kutsuttu nouseva profiili. Tämä tarkoittaa sitä, että ensimmäisen vyöhykkeen lämpötila on alhaisin ja se nousee vyöhykkeittäin. Tällöin ensimmäinen vyöhyke ei lämmitä ainetta liikaa ja aiheuta ennen aikaista sulamista, joka puolestaan johtaisi aineen huonoon kulkeutumiseen sylinterissä. Keskimmäiset vyöhykkeet ehtivät sulattaa ja sekoittaa aineen sopivasti ennen sen tuloa suuttimelle. Sylinterin lämpötilat kannattaa pitää maksimissaan 20–30 astetta käytettävän aineen sulamispisteen yläpuolella.

Jos koneella on valmistettu jotain toista tuotetta, täytyy suutin luonnollisesti vaihtaa ennen ajon aloittamista. Kone ja suutin pitää kuitenkin lämmittää, ennen kuin se voidaan helposti irrottaa koneesta. Nämä lämpötilat riippuvat aikaisemmassa ajossa käytetyn raaka-aineen sulamispisteestä. Myös sihtilevy kannattaa vaihtaa, jos aikaisemmassa ajossa on käytetty merkittävästi korkeamman sulamispisteen omaavaa ainetta kuin mitä ollaan aloittamassa, koska muuten sihtilevy tukkeutuu. Myös ruuvi ja sylinteri pitää puhdistaa aikaisemmasta aineesta. Tämä tehdään niin, että ruuvin läpi ajetaan sopivaa puhdistusainetta. Polyeteeni sopii tähän tarkoitukseen hyvin, koska se kestää korkeita lämpötiloja ilman termistä hajoamista. Tämän jälkeen asennetaan koneeseen haluttu suutin ja asetetaan käyttölämpötilat seuraavaa ajoa varten oikeiksi.

Koeajot ovat osoittaneet, että paras käyttölämpötilaprofiili tässä työssä käytetylle aineelle, eli matalatiheyksiselle polyeteenille vyöhykkeittäin on seuraava: 1. vyöhyke 125⁰C, 2. vyöhyke 130⁰C, 3. vyöhyke 135⁰C, 4. vyöhyke 140⁰C ja suuttimen lämpö: 140⁰C.

6.2 Koneen käynnistäminen

Koneen käynnistäminen on monivaiheinen tapahtuma. Ensin kannattaa asettaa ruuvien kierrosnopeus suhteellisen alhaiseksi, noin 20–30 kierrosta minuutissa ja antaa koneen rauhassa ottaa ainetta ruuviin ja odottaa, että se tulee ulos tasaisesti suuttimen jokaisesta kanavasta. Käytetyn puhdistusaineen pitää myös antaa tulla kokonaan ulos ruuvista, koska se ei ole tuotteeseen haluttua ainetta.

Jos ennen käynnistystä ei ole tarvinnut tehdä suuttimenvaihtoa, kannattaa ekstruuderin neljännen vyöhykkeen ja suuttimen lämpötila asettaa aluksi suhteellisen korkeiksi, koska ruuviin jäänyt vanha aine ei alkuun välttämättä tule kunnolla ulos suuttimesta, koska se ei sula täysin pelkän ulkoisen lämmityksen vaikutuksesta. Tämä huomattiin käytännössä eräissä koeajoissa; ainetta jouduttiin ajamaan suuttimen läpi suhteellisen paljon, ennen kuin virtaus pääsi kulkemaan tasaisesti suuttimen jokaisesta osasta.

Kun aine on saatu virtaamaan suuttimen jokaisessa osassa tasaisesti, ohjataan profiili kalibrintilevylle ja jäähdytysaltaaseen. Profiili täytyy kuljettaa ja vetää käsin altaan läpi, kunnes se saadaan vetolaitteelle, jonka jälkeen voidaan aloittaa ajoparametrien säätö ja ajon tasaaminen. Tämä tarkoittaa vetonopeuden ja jäähdytystehon optimointia. Tuotteesta voi käynnistysvaiheessa mennä paljonkin materiaalia hukkapaloiksi riippuen siitä, kuinka nopeasti ajon saa tasapainotettua ja tuotteen mitat vakioitua. Tämän vuoksi ruuvien pyörimisnopeuden tulisi pysyä asetetussa ajoarvossa. Aina kun nopeutta muutetaan, se vaikuttaa tuotteen muotoihin ja kestää aikansa, ennen kuin ajo taas tasapainottuu.

6.3 Ajoparametrien vaikutus ja ajon tasoittuminen

Ensimmäiseksi ajoparametrien säädössä täytyy päättää, millä ajonopeudella profiilia halutaan ajaa. Kun profiili on saatu vetolaitteelle, voidaan ekstruuderin ruuvien kierrosnopeus nostaa halutuksi. Kun tämä parametri on asetettu haluttuun arvoon, pitää odottaa että ekstruuderin käynti tasapainottuu. Tänä aikana hienosäädetään vetonopeus niin, että profiili tulee juuri oikean levyisenä kalibrointilevylle ja pyritään säätämään jäähdytysaltaan vesisuihkut juuri oikeaan paineeseen, jotta jäähdytys vaikuttaa tuotteen muotoihin oikealla tavalla. Kuvassa 26 on esitetty, millainen vaikutus liian tehokkaalla jäähdytyksellä on profiiliin. Kuten nähdään, profiili kutistuu, eli sen sivut kääntyvät sisäänpäin ja vaakapinta menee kaarelle. Jos taas jäähdytys on liian vähäistä, käy päinvastoin, eli profiili tulee kalibrointilevyltä pois liian pehmeänä, eikä jaksa pysyä muodossaan, jolloin vaakapinta painuu kourulle ja sivut kääntyvät ulospäin.



KUVA 26. Jäähdytyksen vaikutus profiiliin (Jussi Kari 2013)

Kun ajo on tasapainottunut ja kaikki ajoparametrit on optimoitu, prosessissa voidaan keskittyä profiilin katkaisuun ja tuotteen laadunvalvontaan. Laadunvalvontaan kuului tuotteiden tärkeimpien mittojen tarkkailu, ja tämän perusteella tehtiin korjaavia hienosäätöjä jäähdytykseen ja vetonopeuteen.



KUVA 27. Tasoittuneen ajon profiili (Jussi Kari 2013)

Kuvassa 27 on esitetty tuotteen profiili sellaisena, kuin sen kuuluu olla hyväksytyjen mittojen rajoissa. Lisäksi pinnat ovat suoria ja tasaisia. Tällaista profiilia onnistuttiin saamaan parin viimeisen koeajon jälkeen, kun oli kunnolla opittu optimoimaan ajoparametrit ja annettu ajon tasapainottua.

7 TUOTTEEN LAADUNVALVONTA

Tuotteen laadunvalvonnan tärkeimmät valvontakohteet ovat profiilin eri pintojen mitat. Näitä seuraamalla tehdään tuotantolinjan ajoparametreihin tarvittavia korjaavia muutoksia, jos tuotteen mitat alkavat poiketa mittatoleransseista. Tässä prosessissa tärkein korjaava säätötoimenpide on yleensä jäähdytysaltaan venttiilien hienosäätö. Myös profiilin kulkua jäähdytysaltaassa ja erityisesti kalibrointilevyssä täytyy koko ajan valvoa, ettei se juutu mihinkään kiinni. Tämä tarkoittaa että vetolaitteen nopeutta joutuu aina välillä hienosäätämään sopivaksi, koska profiilin ulostulonopeudessa ja vetolaitteen vetonopeudessa saattaa esiintyä silloin tällöin pieniä poikkeamia.

Tasalaatuisuutta ei yleensä koskaan pystytä täydellisesti saavuttamaan. Siksi voidaan sanoa, että hyvän laadun tunnusmerkkinä on mahdollisimman pieni vaihtelu. Jos laadun vaihtelu johtuu yleisistä syistä, jotka kuuluvat aina osaksi prosessia ja johtuvat esimerkiksi ihmisistä, koneista materiaaleista, menetelmistä ja mittaussysteemeistä, prosessi on hallinnassa eikä tarvitse erityisiä korjaustoimenpiteitä (Haaga-Helia 2008).

Jos taas vaihtelu johtuu erityisistä syistä, jotka eivät luonnostaan kuulu prosessiin, täytyy siihen tehdä asiaankuuluvat korjaustoimenpiteet. Erityisiä syitä voivat olla esimerkiksi väärin säädetyt koneet, kuluneet koneen osat, huonolaatuiset raaka-aineet, puutteellisesti koulutetut työntekijät jne. Tilastollisia menetelmiä tarvitaan erottamaan erityisistä ja yleisistä syistä aiheutuva vaihtelu. Tähän käytetään apuna kontrollikaavioita, joihin on määritelty virhemarginaalirajat kullekin mitattavalle muuttujalle. Jos mitat menevät virhemarginaalirajojen yli, on kyseessä erityisistä syistä johtuva vaihtelu. Kontrollikaaviossa käytetään yleisesti virhemarginaalina kolmea keskihajontaa. Marginaalirajat määritetään näin ollen kaavasta (4) (Haaga-Helia 2008).

$$\mu \pm 3 * \sigma \quad (4)$$

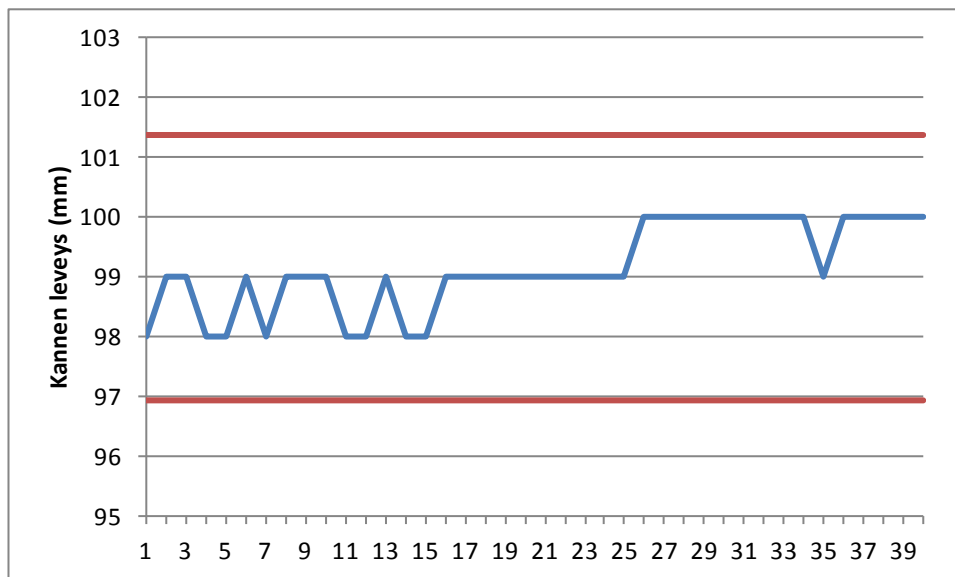
missä

μ = keskiarvo

σ = keskihajonta

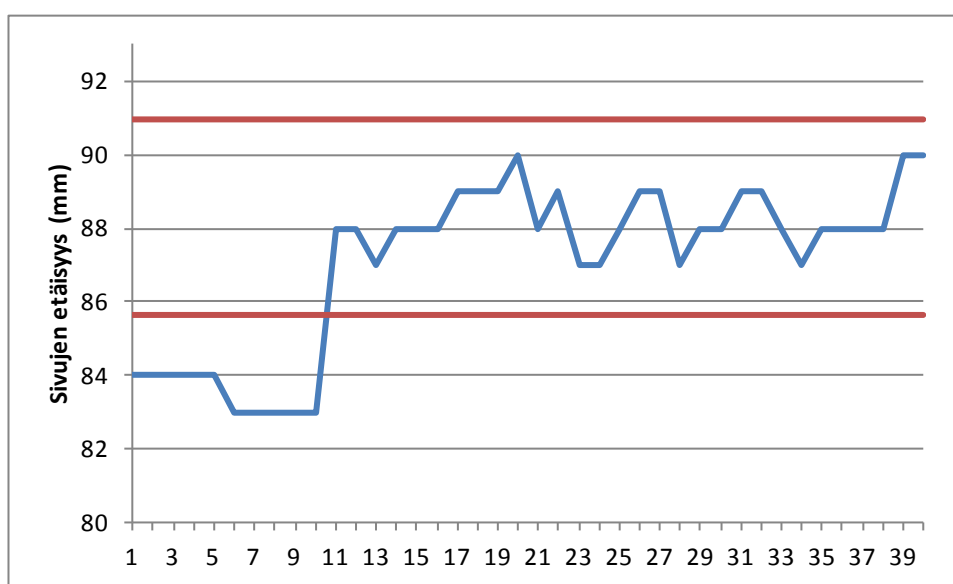
Seuraavissa kuvioissa on esitetty esimerkki tuotteen mittatarkkuuksien laadunvalvonnasta. Niissä on esitettyä tuotteen neljän tärkeimmän mitan vaihtelut kymmenestä peräkkäisestä tuotekappaleesta. Jokaisesta kappaleesta on otettu mitat neljästä mittapistestä tasaisin välein.

Kuviossa 1 on esitetty kannen leveyden vaihtelut. Suunnitelman mukainen asetusarvo leveydelle on 98 mm, joka nähtiin luvussa 4 esitetystä profiilin kuvasta. Tästä mitasta tehtyjen otosten keskiarvo on 99,2 mm ja tämän perusteella on laskettu virhemarginaalirajat jotka näkyvät kuviossa 1 punaisella. Kuvioista nähdään, että leveys vaihtelee 98 ja 100 mm välillä. Tämä osoittaa, että vaihtelu on todella vähäistä ja tuote pysyy tämän mitan osalta hyvin toleransseissa. Voidaan kuitenkin todeta, että otosten keskiarvo olisi hyvä saada vastaamaan paremmin suunnitelman asetusarvoa. Tähän voidaan vaikuttaa ajoparametrien hienosäädöllä.



KUVIO 1. Profiilin kannen leveys

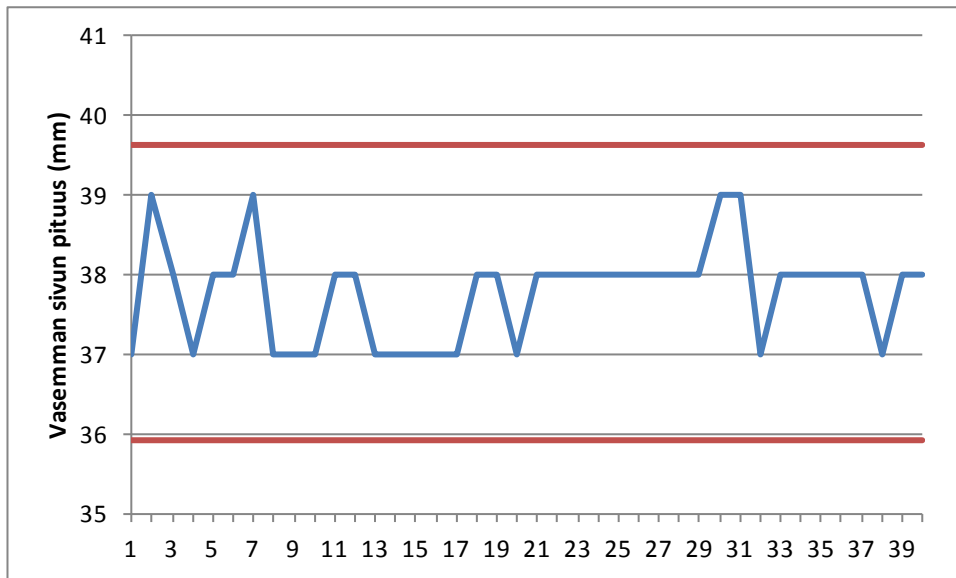
Kuviossa 2 on esitetty profiilin sivujen etäisyys toisistaan paksuimmasta kohdasta mitattuna. Mitan asetusarvo on 86 mm. Kuviosta nähdään, että kymmenen ensimmäistä mittaustosta ovat virhemarginaalien ulkopuolella ja tästä voidaan suoraan päätellä, että vaihtelu johtuu erityisistä syistä. Tämän mitan osalta virhe johtui todennäköisimmin jäähtytyksen hienosäädöstä. Keskiarvo ja virhemarginaalit on laskettu niiden otosten perusteella, joiden aikana ajo on tasapainottunut, kun korjaava toimenpide on tehty. Keskiarvo tälle mitalle on 88,3 mm. Tämä mitta ei kuitenkaan ole tuotteen kannalta erityisen kriittinen, koska sivuja pystyy tarvittaessa hieman puristamaan sisäänpäin, vaikka mitta olisikin selvästi yli asetusarvon. Tärkeämpää on, että sivut pysyvät suorassa eikä niissä ole aaltoilua.



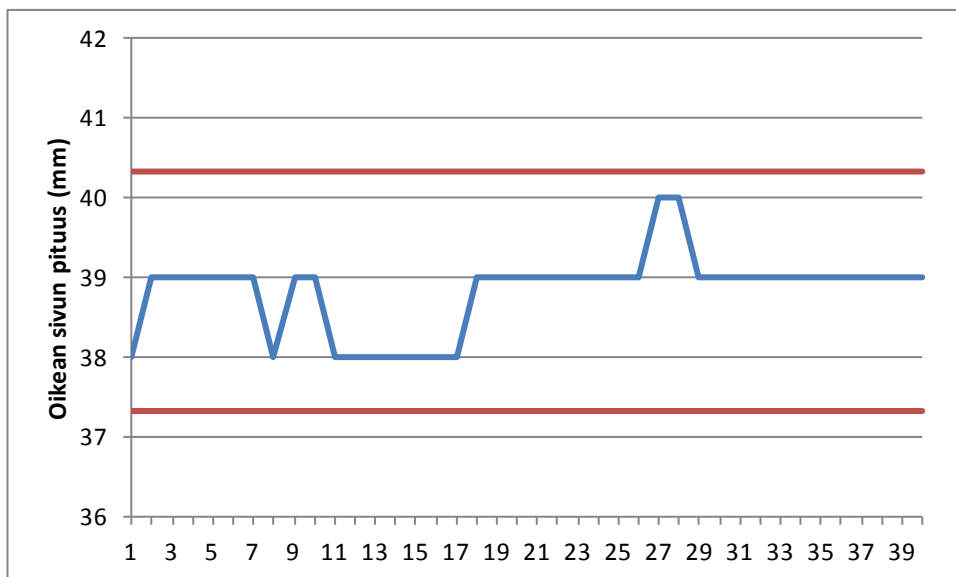
KUVIO 2. Profiilin sivujen etäisyys toisistaan

Kuvioissa 3 ja 4 on esitetty profiilin sivujen pituusarvojen vaihtelu. Tämä asetusarvo on 40 mm. Kuviot 3 ja 4 molemmat osoittavat, että profiilin sivujen pituusmitoissa ei ole juurikaan merkittäviä vaihteluja. Kuitenkin tehtyjen koeajojen perusteella sivujen pituudet ovat aina jääneet n. 2-3 mm vajaaksi asetusarvosta. Tämä on kuitenkin vielä aika pieni poikkeama, ja on ehkä jopa parempi, että nämä mitat ovat aavistuksen verran suunnitelman mukaisia arvoja lyhyempiä, jotta tuote sopii hyvin käyttötarkoitukseensa. Jos mitat olisivat liian pitkät, tuote ei pysyisi kaapelikourussa tiiviisti kiinnitettynä.

Kuvion 3 mukainen keskiarvo profiilin vasemman sivun pituudelle on 37,8 mm. Kuvion 4 mukainen keskiarvo profiilin oikean sivun pituudelle on 38,8 mm.



KUVIO 3. Profiilin vasemman sivun pituus



KUVIO 4. Profiilin oikean sivun pituus

8 LOPPUPÄÄTELMÄT

Työn tavoitteet saavutettiin lupaavin tuloksin ja suunniteltujen aikataulujen mukaisesti. Kun laitteiden perustoimintoihin ja niiden käyttöön oli perehdytty, oli helppo lähteä tutkimaan niiden soveltuvuutta kyseisen tuotteen valmistamiseen. Uusien työkalujen valmistaminen vei aikansa, mutta niiden myötä tuotantolinja alkoi koko ajan paremmin soveltua tuotteen tekemiseen.

Tarkoitus oli siis saada aikaan hyvälaatuista, pinnoiltaan ja muodoiltaan suoraa ja tasaista tuotetta, joka myös vastaa haluttuja mittoja. Kun tuotantolinjaan oli saatu tehtyä tarvittavat muutokset, päästiin paremmin tutkimaan ajoparametrien vaikutusta tuotteen laadunhallinnassa. Vaikka ensimmäisissä koeajoissa käytettiin neitseellistä, puhdasta polyeteeniä ja loppuvaiheessa kierrätysmateriaalia, johon on sekoitettu täyteaineeksi vuolukiveä, sillä ei kuitenkaan ole merkittävää eroa aineen käyttäytymiseen prosessissa.

Alkuun tutkittiin erilaisten lämpötilojen vaikutusta tuotteen laatuun, mutta tämä todettiin pian turhaksi, koska ekstruuderin lämmöt kannattaa aina pitää mahdollisimman alhaisina, jotta tuotteen jäähdytys olisi helpoimmin hallittavissa. Seuraavaksi tutkittiin erilaisten ajonopeuksien vaikutusta. Testien perusteella voidaan sanoa, että vaikka tuotetta pystytään ajamaan suhteellisen nopeasti niin, että se on vielä hyvälaatuista, se kuitenkin vaatii jäähdytyksen hallinnalta enemmän. Eikä ajonopeuksien muutoksilla ollut tuotteen pinnankarheuteen erityistä vaikutusta. Pinnankarheus johtuu käytetystä raaka-aineesta, koska siinä käytetty täyteaine tekee tuotteesta hauraampaa kuin jos se olisi tehty puhtaasta muoviraaka-aineesta. Jos tuotteen pinta haluttaisiin saada sileämmäksi tai kiiltävämmäksi, suuttimen kanavat voitaisiin kiillottaa, tai ne voitaisiin päällystää kromilla tai nikkelillä. Koeajojen tulosten perusteella voidaan kuitenkin päätellä, ettei tämäkään toimenpide välttämättä vaikuta tuotteeseen toivotulla tavalla.

Voidaan siis sanoa, että tällaisessa ekstruusioprosessissa tärkeimmät valvottavat asiat ovat jäädytysteho ja vetonopeus. Jäähdytys täytyy aloittaa hitaasti, esimerkiksi paineilmalla, kuten tässä työssä, koska liian kuumalle pinnalle tulevat vesipisarat aiheuttavat tuotteen pinnan kuplimisen. Tuotteen jäädytystä tulee myös jatkaa riittävän hitaasti, niin että se pitää muotonsa myös kalibrointilevyn jälkeen. Vetonopeuden muutoksiin täytyy osata reagoida nopeasti, jotta tuotteeseen ei missään vaiheessa kohdistuisi liikaa venytystä eikä profiili pakkautuisi jäädytysaltaan suulle. Kun ajo on tasapainottunut ja tuote on tasalaatuista, myös vetolaite toimii paremmin, koska tuotteessa ei enään esiinny suuria muodonvaihteluita.

LÄHTEET

ElevTech-SRL. 2010. Product. Contract Manufacturing. Molding. Brittleness measured with MFI tester. Luettu 24.4.2013 <http://chenesan-intl.eu/>

Eval-asiapacific. 2013. EVAL Processing. Basics. Machine Design. Screw Design. Typical screw design. Luettu 21.4.2013 <http://www.eval-asiapacific.com/apen/home.aspx>

Extrusion Die Design. Luettu 24.4.2013 http://www.kostic.niu.edu/Extrusion_Die_Design-EChP-1.pdf

Giles, H, Wagner, J & Mount, E. 2005. Extrusion, The Definitive Processing Guide and Handbook. Norwich, NY: William Andrew, Inc.

GSM Industries. 2009. Our Products. Plastic Extrusion Machinery. Luettu 30.4.2013 <http://www.gsmindustries.co.in/>

Haaga-Helia. 2008. Tilastollinen laadunvalvonta. Luentokalvoja. Aki Taanila. Luettu 28.4.2013 <http://myy.haaga-helia.fi/~taaak/p/laatu.pdf>

Luonnonkuitu. 2013. Hanke. Hankkeen osat. Luettu 24.4.2013 <http://www.luonnonkuitu.fi/>

Muovimuotoilu. 2013. Opetusmateriaali. Materiaalit. Kestomuovit. Valtamuovit. Luettu 24.4.2013 <http://www.muovimuotoilu.fi/>

Parma kaapelikanavat. Esite.

Plasticstech. Processes. Co-extrusion. Luettu 21.4.2013 <http://www.plasticstech.info/>

PlasticsTechnology. 2013. Zones. Extrusion. Columns. Extrusion Know-How: The Whys & Hows (& Ifs) of Vented Extruders. Luettu 23.4.2013 <http://www.ptonline.com/>

Polymer Processing 2000. Operations. Twin Screw Extrusion. Luettu 21.4.2013 <http://www.polymerprocessing.com/>

What is Profile Extrusion? 2009. Luettu 24.3.2013. <http://www.whatisplastic.com>