

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

PUUMUOVIKOMPOSIITIN EKSTRUUSIOSUUTTIMEN SUUNNITTELU  
DESIGN OF AN EXTRUSION DIE FOR WOOD PLASTIC COMPOSITE

Itissä 30.5.2011

Timo Toivanen

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	4
2 EKSTRUUSION PERUSTEET.....	5
2.1 Ekstruuderit.....	6
2.2 Suutin.....	8
2.2.1 Levysuuttimet.....	9
2.2.2 Kalvosuuttimet.....	9
2.2.3 Putkisuuttimet.....	10
2.2.4 Profiilisuuttimet.....	11
2.2.5 Koekstruusiosuuttimet.....	12
2.3 Jäähdytys ja kalibrointi.....	12
2.4 Profiilin muodonmuutokset .....	12
2.5 Puumuovikomposiittien ekstruusio.....	13
3 SUUTTIMEN SUUNNITTELUN PERIAATTEET.....	15
3.1 Suuttimen rakenne ja materiaali.....	15
3.2 Profiilin muotoilu.....	17
3.3 Simulointi.....	19
4 SUUTTIMEN SUUNNITTELU.....	20
4.1 Lähtötiedot ja tavoitteet.....	20
4.2 Suunnittelun vaiheet.....	20
4.3 Suunniteltu suutin.....	21
4.3.1 Kiinnitysosa.....	23
4.3.2. Keskiosa.....	23
4.3.3. Suulake.....	24
4.3.4. Virtauskanava.....	25

5 SUUNNITELLUN SUUTTIMEN TOIMINNAN JA VALMISTUKSEN ARVIOINTI. .26	
5.1 Rakenne.....26	26
5.2 Virtauskanavan muoto.....26	26
5.3 Valmistus.....27	27
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....29	29
LÄHTEET.....30	30
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä käsitellään puumuovikomposiitin ekstruusiosuuttimen suunnittelua. Puumuovikomposiittien suosio on kasvanut voimakkaasti 2000-luvulla. Niiden sovelluskohteita on muun muassa rakennus-, huonekalu- ja autoteollisuudessa. Materiaalin tarkoituksena on vahvistaa puukuidulla muovimatriisia, jolloin voidaan hyödyntää molempien komponenttien parhaat ominaisuudet yhteen tuotteeseen. Puumuovikomposiittituotteiden valmistusmenetelmät ovat ruiskuvalu ja ekstruusio, jolla valmistetaan muun muassa materiaalin suosituinta käyttökohdetta, terassilautaa. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2010, s. 1-2)

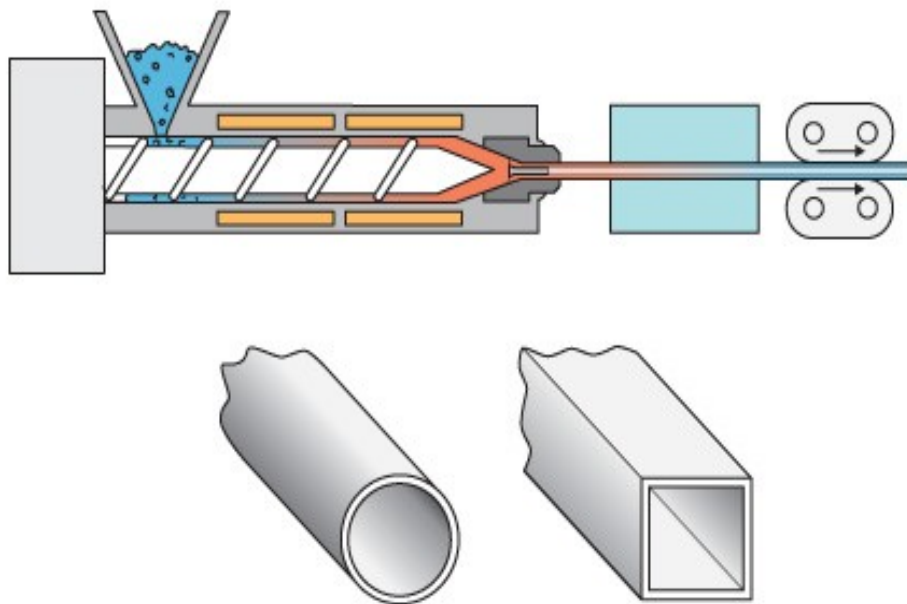
Ekstruusio on muovituotteissa paljon käytetty menetelmä, jossa materiaalia suuttimen läpi puristamalla saadaan aikaan profiilimaisia tuotteita. Suuttimien valmistus on kallista ja niiden suunnittelu on paljolti kokemuspohjaista, koska sulan käyttäytymistä on vaikea ennustaa. Puumuovikomposiittien ekstruusiossa on lisäksi otettava huomioon puun palamisherkkyyys.

Työssä käydään läpi ekstruusiota ja siihen liittyviä laitteita keskittyen erityisesti suuttimien suunnitteluun. Työhön sisältyy myös käytännön osuus, jossa suunniteltiin puumuovikomposiitin ekstruusiosuutin Lappeenrannan teknillisen yliopiston puutekniikan laboratoriolle. Nykyisten suuttimien ongelmana on se, että valmistaessa erilaisia profiileja joudutaan koko suutin vaihtamaan. Tavoitteena on saada suuttimen valmistusta edullisemmaksi moduloimalla. Työssä esitellään suunniteltu suutin ja arvioidaan sitä toimivuuden ja valmistuksen kannalta. Työn ulkopuolelle on rajattu suuttimen lujuus-, lämmönjohtumis- ja tarkempi virtaustekninen tarkastelu sekä materiaalinvalinta.

## 2 EKSTRUUSION PERUSTEET

Ekstruusiossa eli suulakepuristuksessa materiaalia puristetaan halutun muotoisen aukon läpi, jolloin saadaan aikaan samanmuotoista profiilia. Laitetta, jolla ekstruusio tehdään, kutsutaan ekstruuderiksi. Menetelmä soveltuu esimerkiksi putkien, letkujen, tankojen, folioiden, levyjen ja profiileiden valmistukseen. Pursotettavia materiaaleja on monia, esimerkiksi savi, keraamit, ruoka, metallit ja muovit. Yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat kestopuovit, kuten PE-HD, PP ja PVC. (Vienamo & Nykänen 2011)

Ekstruusiolinjassa (kuva 1) ekstruuderin eli suulakepuristin sulattaa muovirakeet ja puristaa sulan suuttimen läpi. Tämän jälkeen syntynyt profiili kalibroidaan ja jäähdytetään. Linjaan kuuluu usein myös vetolaite, jolla profiilia vedetään ulos suuttimesta sekä katkaisulaite, jolla profiileista tehdään määrämittäisiä. (Vienamo & Nykänen 2011)



**Kuva 1.** Ekstruusiolaitteisto. Muovirakeet (sininen) syötetään ekstruuderiin, joka sulattaa ja puristaa materiaalin suuttimen (tummanharmaa) läpi. Profiili jäähdytetään ja sitä vetää vetolaitteisto (oikealla). Alhaalla esimerkkejä profiileista. (Vienamo & Nykänen 2011)

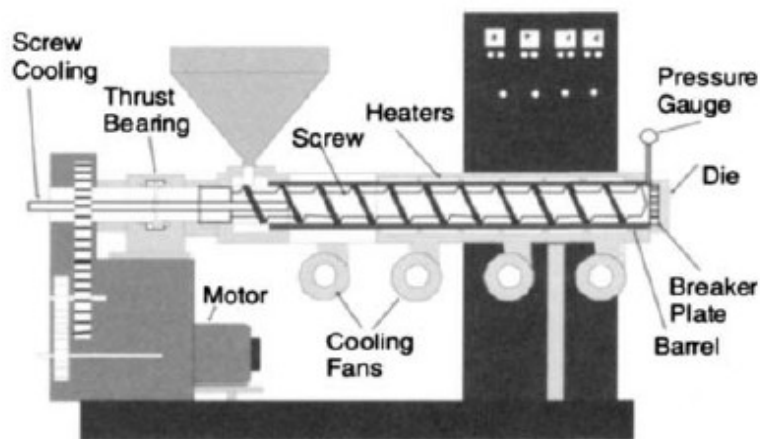
## 2.1 Ekstruuderit

Ekstruuderin tärkein tehtävä on kehittää tarvittava paine, jolla materiaalia voidaan pursottaa ulos suuttimesta. Riittävä paine riippuu materiaalista, virtausnopeudesta ja suuttimen geometriasta. Ekstruuderit voi olla myös plastisoiva, jolloin se myös sulattaa materiaalin. (Rauwendaal 2010, s. 1-4)

Ekstruuderit ovat yleisimpiä koneita muovituotteita valmistavassa teollisuudessa. Pursottamisen lisäksi niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi ruiskumuovaukseen. Yleisesti ottaen jokainen muoviosa on jossakin vaiheessa mennyt ekstruuderin läpi, usein useammankin kerran. (Rauwendaal 2010, s. 1-4) Jotta ekstruusioprosessin tuloksena olisi laadukas ja vaatimukset täyttävä tuote, vaaditaan ekstruuderilta seuraavia ominaisuuksia:

- tasainen ja materiaalille sopiva sulan lämpötila
- tasainen ja materiaalille sopiva paine suuttimessa
- homogeeninen ja hyvinsekoittunut sula (Giles et al. 2005, s. 13).

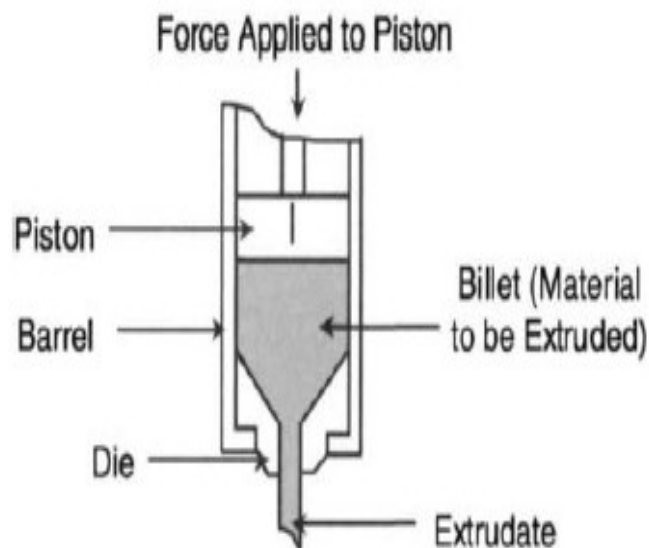
Muoviteollisuudessa käytetään lähinnä kolmenlaisia ekstruudereita: ruuvi-, mäntä-, tai kiekkoekstruudereita. Ruuviekstruuderit on näistä yleisimmin käytetty. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen yksiruuvisen ekstruuderin tärkeimmät osat. (Rauwendaal 2010, s. 1-4)



**Kuva 2.** Yksiruuvinen ekstruuderit. Suomentokset: Screw Cooling: ruuvien jäähdytys, Thrust Bearing: aksiaalilaakeri, Screw: ruuvi, Heaters: lämmityspannat, Pressure Gauge: painemittari, Die: suutin, Motor: moottori, Cooling Fans: jäähdytyspuhaltimet, Barrel: sylinteri, Breaker Plate: reikälevy. (Giles et al. 2005, s. 13)

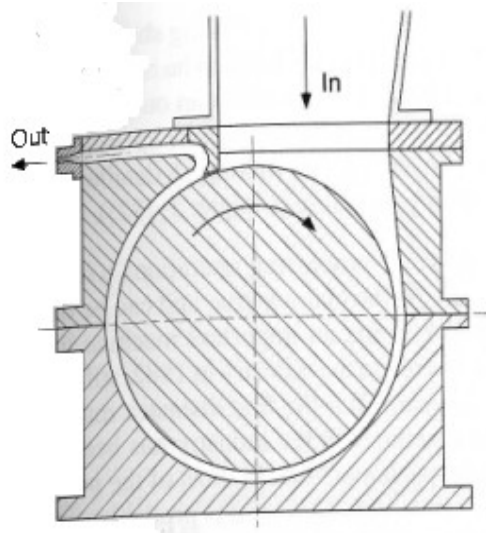
Ruuviekstrudereissa yksi tai useampi ruuvi pyörii sylinterin sisällä plastisoiden muovin kitkan, paineen ja lämmittimien avulla. Koska ruuvien kierteiden väliin jäävä tilavuus pienenee kohti suutinta, materiaalin paine kasvaa. Tällaisessa ekstruderissa voi olla yksi tai useampi ruuvi. Yksiruuvisia käytetään useimpien kestopuovien työstössä ja kaksiruuvisia lähinnä kova-PVC:n ekstruusiassa. (Järvinen 2000, s.109)

Mäntäekstruderissa sylinterissä liikkuva mäntä työntää materiaalia suuttimen läpi. Niillä saadaan aikaan erittäin korkeita paineita. Heikkoina puolina ovat rakenteesta johtuva prosessin jatkumattomuus sekä huono sulatuskapasiteetti. Näistä syistä mäntäekstrudereita ei kovinkaan usein käytetä muoviteollisuudessa. (Rauwendaal 2010, s. 1-4; Giles et al. 2005, s. 13.)



**Kuva 3.** Mäntäekstruder. Suomennot: Force Applied to Piston: Mäntään kohdistuva voima, Piston: mäntä, Barrel: sylinteri, Die: suutin, Billet (Material to be Extruded): Aihio (pursotettava materiaali), Extrudate: suulakepuriste (pursotettu profiili). (Giles et al. 2005, s. 13)

Kiekkоекstrudereissa painetta tuottaa kiekko tai rumpu (kuva 4). Niillä saadaan aikaan jatkuva paine, mutta niiden käyttö teollisuudessa on melko harvinaista. (Rauwendaal 2001, s. 21-23)



**Kuva 4.** Rumpuekstruuder. Suomennokset: In: sisään, Out: ulos. (Rauwedaal 2001, s. 23)

## 2.2 Suutin

Suutin eli työkalu on ekstruusiolaitteiston osa, joka antaa profiilille sen lopullisen muodon. Suuttimen tarkoituksena on muovata ekstruuderista tulevasta sulasta materiaalista poikkileikkaukseltaan halutunlainen profiili. Suuttimia voidaan luokitella eri tavoin, esimerkiksi niiden tuottaman muodon mukaan. Kostic & Reifschneider luokittelevat suuttimet seuraavasti:

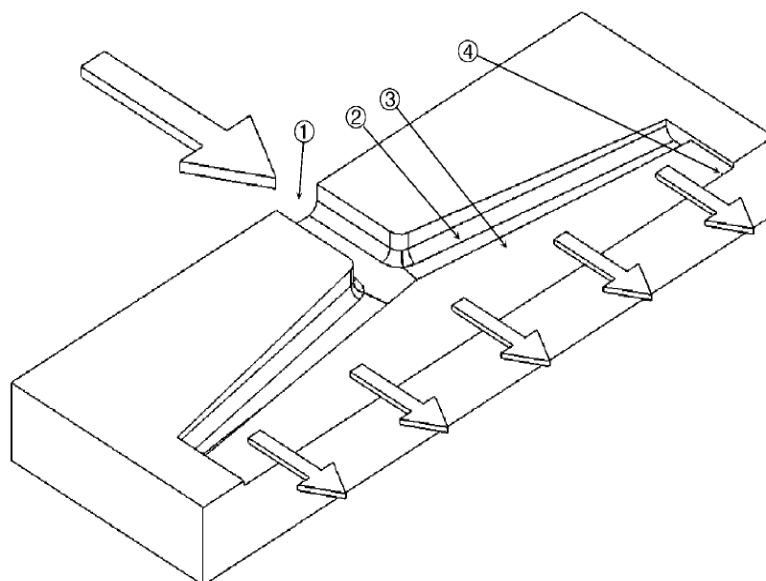
- levysuuttimet
- tasokalvo ja puhalluskalvosuuttimet
- putkisuuttimet
- profiilisuuttimet
- koekstruusiosuuttimet. (Kostic & Reifschneider 2006, s.633)

Suuttimen virtauskanava muuttuu muotoaan ekstruuderisylinterin pyöreästä ulostulosta usein kapeampaan ja leveämpään suuttimen suuaukkoon (Kostic & Reifschneider 2006, s.633). Suuttimen tulokanava on yleensä samankokoinen ekstruuderin ulostuloaukon kanssa. Jos näin ei ole, voidaan välissä käyttää adapteria. (Rauwendaal 2010, s.13)



### 2.2.1 Levysuuttimet

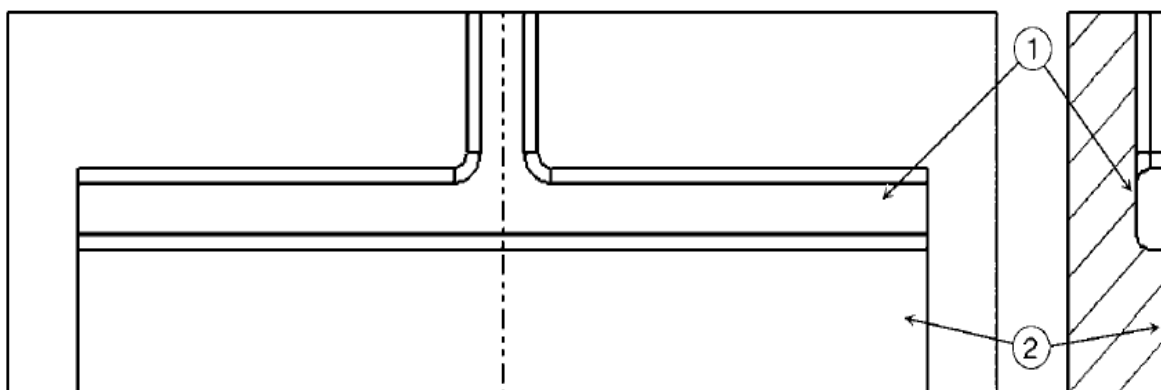
Levyillä (paksuus yli 0,25 mm) käytetään useimmiten suuttimia, joissa virtauskanava on henkarin muotoinen (kuva 5). Tällainen suutin koostuu sisääntuloaukosta, joka yhdistää suuttimen ekstruuderiin, jakovyöhykkeestä ja saarekkeesta, jotka levittää sulan tasaisesti sekä ylivirtauspinnasta, joka antaa sulalle lopullisen muodon. (Kostic & Reifschneider 2006, s.636)



**Kuva 5.** Henkarimainen levysuutin. (1): sulan sisääntuloaukko, (2): jakovyöhyke (levittää sulan), (3): saareke (tasaa paineen jakovyöhykkeen kanssa), (4): ylivirtauspinta (antaa levyille lopullisen muodon. (Kostic & Reifschneider 2006, s.634)

### 2.2.2 Kalvosuuttimet

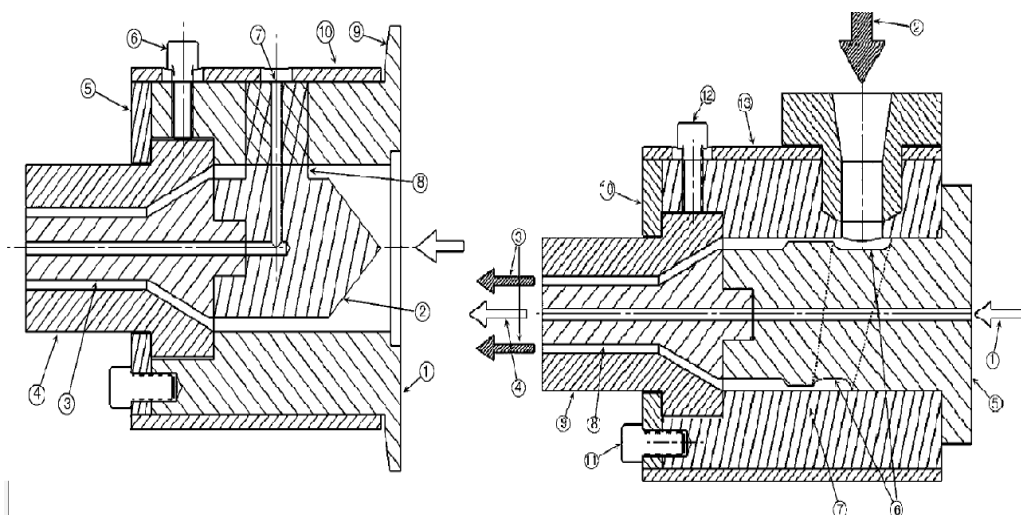
Kalvoja (paksuus alle 0,25 mm) pursotetaan useimmiten T- ja puhalluskalvosuuttimilla. T-suutin (kuva 6) eroaa henkarityyppisestä suuttimesta siten, että sen jakovyöhyke sekä ylivirtauspinta ovat koko suuttimen leveydeltä yhtä pitkät. Puhalluskalvosuutin on rengasmaisen, jolloin kalvoa voidaan laajentaa ilmanpaineella halutun suuruisiksi. (Kostic & Reifschneider 2006, s.636)



**Kuva 6.** T-mallinen suutin. (1): jakovyöhyke, (2): ylivirtauspinta. (Kostic & Reifschneider 2006, s.637)

### 2.2.3 Putkisuuttimet

Putkisuuttimen suuaukko on rengasmaisen ja suuttimia on kahdenlaisia: sisäsiltasuutin (kuva 7 vasemmalla) ja cross-head suutin (kuva 7 oikealla). Sisäsiltasuuttimen keskellä on tuurna, joka on kiinnitetty suuttimen runkoon pienillä ”jaloilla”, joista yhden sisällä kulkee myös valmistettavan putken keskelle ilmaa. Cross-head suuttimessa materiaali tuodaan sivusta ja sen keskellä on ydin, jonka sisällä kulkee ilmaputki. (Kostic & Reifschneider 2006, s.637)

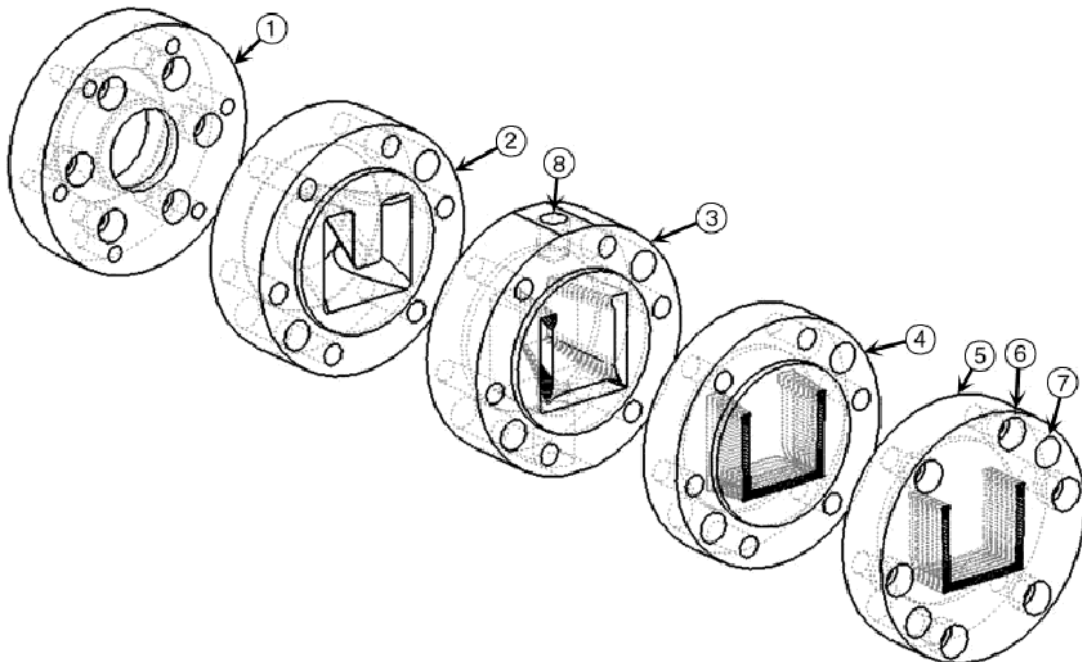


**Kuva 7.** Vasemmalla sisäsiltasuutin, jossa materiaali tuodaan oikealta (valkoinen nuoli). Oikealla cross-head suutin, jossa materiaali tuodaan ylhäältä (iso tumma nuoli). (Kostic & Reifschneider 2006, s.639)

## 2.2.4 Profiilisuuttimet

Profiilisuuttimilla tarkoitetaan muita kuin levy-, kalvo-, tai putkimaisia suuttimia. Usein profiilisuuttimet koostuu useista levyistä, jotka kiinnitetään toisiinsa, jotta hankalanmuotoisen virtauskanavan valmistaminen olisi helpompaa. Kuva 8 havainnollistaa virtauskanavan muuttumista U-profiilin muotoiseksi. Tyypillisesti tällaisessa suuttimessa ovat seuraavat osat:

- adapterilevy, joka muuntaa ekstruuderin ulostuloaukon pyöreän muodon lähelle profiilin muotoa
  - muutoslevy, joka muuntaa virtaviivaisesti adapterilevyn suuaukon muodon valmistelulevyn sisäänmenoaukon muotoiseksi
  - valmistelulevy, joka kaventaa virtauskanavaa ja yhtenäistää virtausnopeutta
  - ylivirtauspintalevy (suuaukkolevy), joka antaa profiilille lopullisen muodon.
- (Kostic & Reifschneider 2006, s.638-639)



**Kuva 8.** Pinottavan u-profiilisuuttimen räjäytyskuva. (1): kiinnitysleikka, (2): adapterilevy, joka muuttaa pyöreän muodon U-profiiliksi, (3): muutoslevy, joka kaventaa profiilia, (4): valmistelulevy (5): ylivirtauspintalevy, (6): pultinreikä, (7): kohdistustapin reikä. (Kostic & Reifschneider 2006, s.641)

### 2.2.5 Koekstruusiosuuttimet

Ko- eli monikomponenttiekstruusiossa käytetään suuttimia, joissa kulkee monta kanavaa, ja profiilit yhdistetään vasta lopuksi. Tällaisia suuttimia käytetään varsinkin monikerroksisia profiileja valmistettaessa. Tällöin voidaan käyttää myös erilaisia materiaaleja eri kerroksissa. (Rauwendaal 2010, s.14)

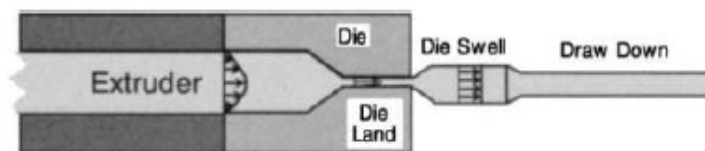
### 2.3 Jäähdytys ja kalibrointi

Puhalluskalvoja ja joitain yksinkertaisia profiileja lukuun ottamatta kaikki suulakepuristeet tarvitsevat jäähdytystä ja/tai kalibrointia. Jäähdytyksessä ja kalibroinnissa voidaan käyttää jäähdytysrullia, ilmaa, vettä, alipainetta tai kalibrointirenkaita riippuen profiilin tyypistä. (Kostic & Reifschneider 2006, s.643)

### 2.4 Profiilin muodonmuutokset

Suuttimesta ulostulevan profiilin muoto ei ole aivan sama kuin suuaukon muoto. Suurimmat muutoksia aiheuttavat tekijät ovat oheneminen, turpoaminen, jäähtyminen ja jännitysten laukeaminen. (Rauwendaal 2010, s. 92-95)

Turpoaminen (kuva 9) johtuu pääasiassa muovin elastisesta käyttäytymisestä. Turpoamiseen vaikuttavat suuttimen muoto, materiaalin virtausominaisuudet, virtausnopeus, lämpötila ja oheneminen. Usein oheneminen ja turpoaminen kumoavat toisensa. Turpoaminen ei ole symmetristä, vaan siihen vaikuttavat muun muassa erilaiset virtausnopeudet eri kohdissa. (Rauwendaal 2010, s. 92-95)



**Kuva 9.** Turpoaminen ja oheneminen. Suomennot: Extruder: ekstruuderin, Die: suutin, Die Land: ylivirtauspinta, Die Swell: turpoaminen, Draw Down: oheneminen. (Giles et al. 2005 s. 48)

Profiilin oheneminen (kuva 9) aiheutuu siitä, että sitä täytyy vetää suuttimesta ulos, jolloin kappalee venyy. Jännitystä on pidettävä yllä, ettei materiaali alkaisi valua. Oheneminen useimmiten pienentää profiilin kokoa vain muutamalla prosentilla, mutta joissain tapauksissa koon muutos voi olla suurempikin. (Rauwendaal 2010, s. 92-95)

Jäähtyminen suurentaa kappaleen tiheyttä, joten sen koko pienenee. Puolikiteinen muovi kutistuu enemmän kuin amorfinen, koska kiteiset alueet ovat tiheimpiä. Paksuihin osiin tulee helposti huokosia, koska ulkoseinät jäähtyvät ja jähmettyvät ensin. Jos profiilissa on ulkonemia, jäähtyminen voi aiheuttaa myös niihin muodonmuutoksia. (Rauwendaal 2010, s. 92-95)

## 2.5 Puumuovikomposiittien ekstruusio

Puumuovikomposiitti on seos, jossa on puuta ja polymeerejä. Materiaalien osuudet vaihtelevat välillä 10-90 %. Lisäksi voidaan käyttää lisäaineita, kuten värejä, palonsuoja-aineita ja antioksidantteja. (Lehtinen 2010 s.2) Käytettyjä muoveja ovat muun muassa kestumuovihartsit, kuten polypropeeni, polyeteeni, polystyreeni ja polyvinyylikloridi (PVC), koska ne pehmenevät lämmitettäessä ja kovenevat jäähdytettäessä. Tämän ominaisuuden ansiosta niihin voidaan sekoittaa muita aineita, kuten puuta. Puuaines voi myös olla monenlaista, kuten sahanpurua tai puujauhoa. Kuvassa 10 on esitelty erilaisia puumuovikomposiittiprofiileita. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2010)



**Kuva 10.** Esimerkkejä puumuovikomposiittiprofiileista (Gardner & Murdock 2002).

Ekstruusion raaka-aineena voidaan käyttää pellettejä, joissa puuaines, muovi ja lisäaineet ovat valmiiksi esisekoitettuna. On myös mahdollista syöttää raaka-aineet ekstruuderiin erillään. Puuraaka-aineen täytyy olla kuivaa (kosteusprosentti alle 1), jotta se sekoittuisi riittävästi muovin kanssa. Sahanpurun kosteus on yleensä 5-8 %, joten se on kuivattava ennen ekstruusiota esimerkiksi esilämmittimien avulla. (Gardner & Murdock 2002)

Puumuovikomposiitille voidaan käyttää samanlaisia ekstruudereita kuin muoville. On olemassa myös varta vasten puumuoville kehitettyjä ekstruudereita. Tällaisissa ekstruudereissa on otettu huomioon puuaineksen kuivaustarve. (Gardner & Murdock 2002)

Puumuovikomposiittien ekstruusiolle haasteita asettaa puun palamisvaara. Prosessin lämpötila täytyy olla matala ja ekstruuderissa oloaika lyhyt. Erityistä huomiota täytyy kohdistaa profiilin kulmiin, jotta ne eivät palaisi sekä puukuidun heikkoon lämmönjohtavuuteen. Lisäksi sulan lujuus on paljon alhaisempi kuin pelkällä muovilla. Myöskään tavalliset turpoamis- ja ohenemislaskelmat eivät toimi oikein. (Gardner 2002)

Suuttimen materiaalina käytetään usein ruostumatonta terästä, koska puu on hieman syövyttävää. Myös työkaluteräksset ovat hyviä materiaaleja. Hiiliterästä voidaan käyttää suuttimille, joiden elinikä on suunniteltu lyhyeksi. (Gardner 2002)

### 3 SUUTTIMEN SUUNNITTELUN PERIAATTEET

Ekstruusiosuuttimen suunnittelussa päätavoitteena on saada materiaali tulemaan tasaisella nopeudella suuttimen läpi. Tähän vaikuttavat materiaalin virtausominaisuudet, virtauskanavan geometria, virtausnopeus ja suuttimen lämpötilaerot. Tietylle materiaaliseokselle ja nopeudelle optimoitu suutin voi eri nopeudella tai materiaalilla olla vähemmän optimaalinen. Muille kuin pyöreille suuttimille on lähes mahdotonta saada sellaista muotoa, että suutinta voisi käyttää useille polymeereille useilla eri käyttöarvoilla. Tästä syystä usein valmistetaan sellaisia suuttimia, mitä voidaan säätää ajon aikana joko muuttamalla suuttimen virtausta tai lämpötilaa. (Rauwendaal 2001, s. 539-540)

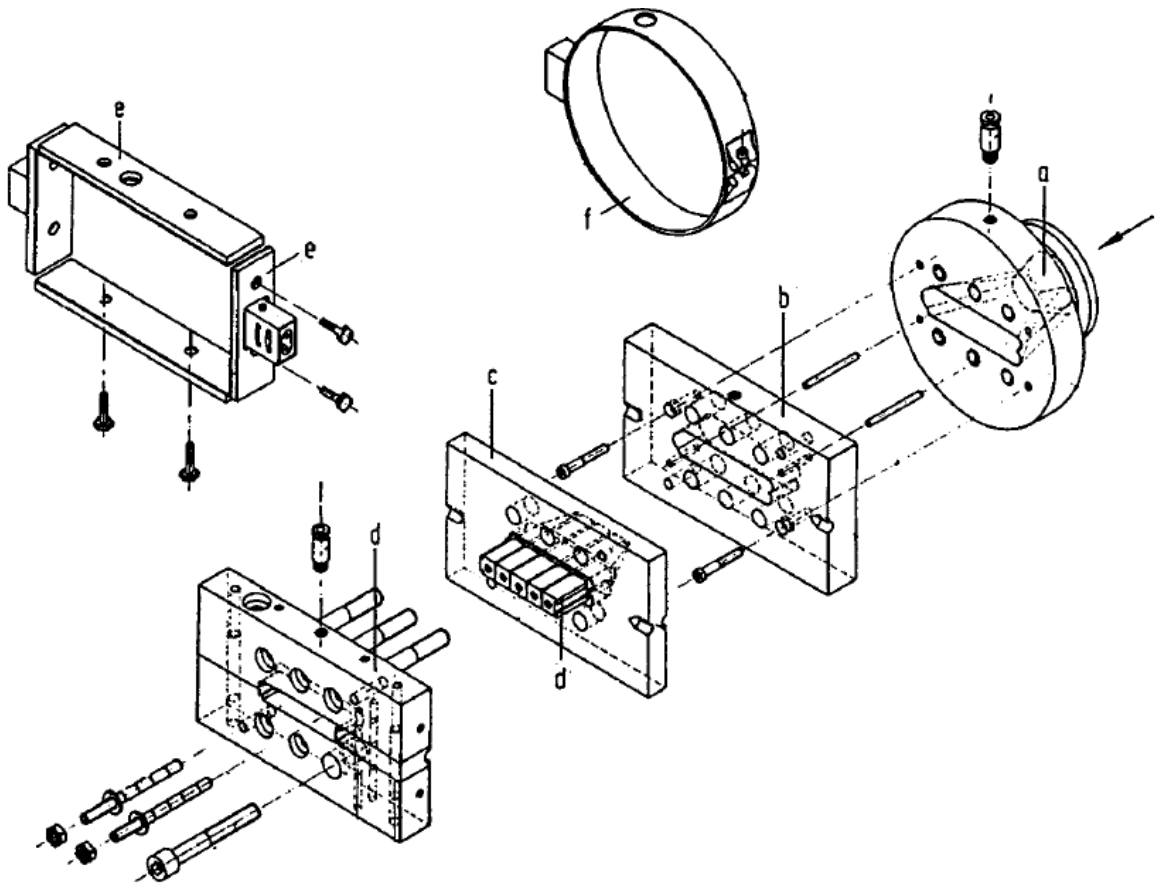
Muun muassa materiaalin pienenemisen ja turpoamisen vuoksi valmiin profiilin muoto ei ole aivan sama kuin suuttimen aukon. On hankalaa ennalta tietää materiaalin käyttäytyminen suuttimesta tulon jälkeen. Tämän takia suuttimien suunnittelu perustuukin laajalti kokemukseen tarkkojen laskelmien sijasta. (Rauwendaal 2010, s.13-14)

#### 3.1 Suuttimen rakenne ja materiaali

Seuraavia yleisiä sääntöjä voidaan käyttää suuttimen suunnittelun apuna:

- Ei kuolleita pisteitä (paikkoja, joissa virtaus pysähtyy) virtauskanavaan.
- Materiaalin virtausnopeuden lisäys pidetään tasaisena.
- Kokoonpanon ja purkamisen oltava helppoja.
- Ylivirtauskanavan pituuden oltava noin 10 kertaa korkeus.
- Vältetään jyrkkiä muutoksia kanavassa.
- Käytetään pieniä kulmia muutoksissa. (Rauwendaal 2001, s.540)

Kun vaaditaan hyvää mittatarkkuutta suurilla pursotusnopeuksilla, on käytettävä suuttimia, joissa virtauskanava muuttuu portaattomasti halutunlaiseksi. Tällöin kanavan poikkileikkauksen on pienennyttävä jatkuvasti suuaukkoa kohti. Suuttimen muodon tulee olla myös yksinkertainen ja irrotettavissa oleva, jotta kanava voidaan puhdistaa helposti. Esimerkki tällaisesta suuttimesta on esitetty kuvassa 11. (Michaeli 2003, s.212)



**Kuva 11.** Profiilisuuttimen räjäytyskuva (Michaeli 2003, s. 212).

Suuttimen tulisi koostua mahdollisimman vähistä osista liitoskohtien vähentämiseksi ja kokoonpanon sekä puhdistuksen nopeuttamiseksi. Kun liitoskohtia on vähän, myös vuotamisen mahdollisuus pienenee. Liitokset täytyy valmistaa tarkasti samankokoisiksi, jottei materiaalivirtaukseen tulisi pyörteitä ja ne tulee sijoittaa sellaisiin kohtiin, että puhdistus olisi helppoa. (Michaeli 2003, s. 321)

Suuttimen kokoonpanossa käytetään useimmiten pultteja, jotka mukautuvat suuttimen lämpölaajenemiseen. Monen pienen pultin sijasta on kannattavampaa käyttää muutamaa isoa pulttia, koska niiden huoltoikä on pidempi. Pultit on hyvä sijoittaa siten, että niiden aukaisu on helppoa. (Michaeli 2003, s. 321)

Virtauskanavan pinnanlaadun on oltava hyvä, jotta virtaus olisi sujuvaa. Pinnankarheuden tulisi olla alle  $0,2 \mu\text{m}$ , johon päästään kiillottamalla tai hoonamalla pinta. Pinta voidaan



myös kromipinnoittaa, mikä pienentää sulan taipumusta tarttua kanavaan sekä helpottaa puhdistusta. Pinnoitus on kuitenkin aika ajoin uusittava, eikä se sovi kaikille materiaaleille. Tämän vuoksi useimmiten virtauskanavat ovat karkaistuja ja kiillotettuja. (Michaeli 2003, s.322)

Suuttimen materiaalille on seuraavia vaatimuksia:

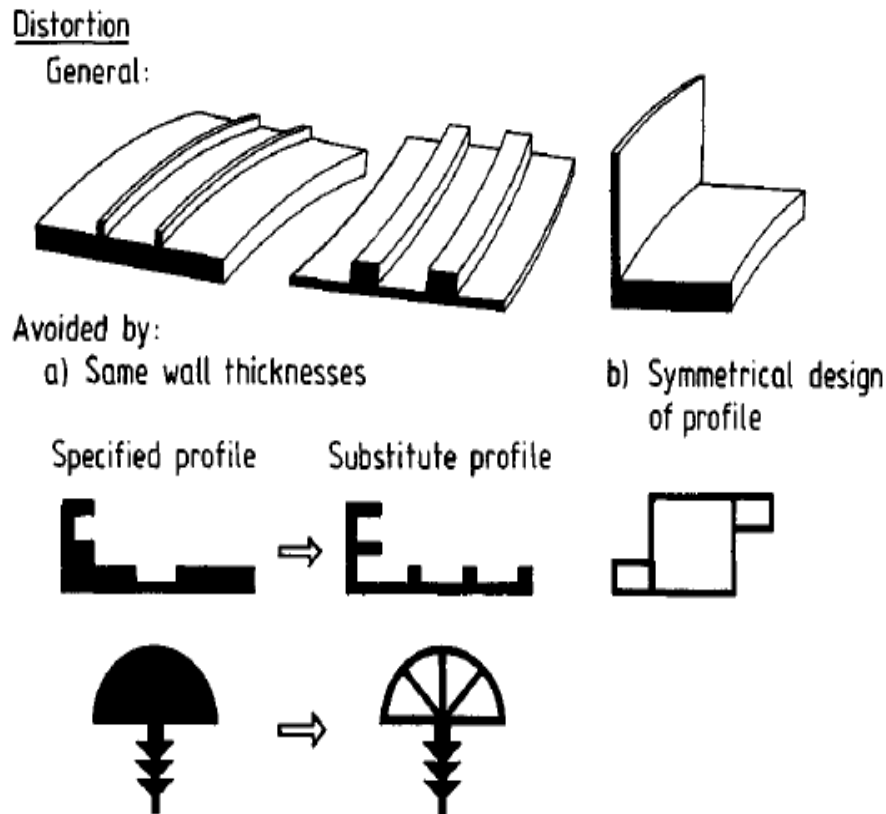
- helposti koneistettavissa
- kestää painetta, korkeaa lämpötilaa ja kulumista
- riittävän luja ja sitkeä
- riittävä pinnankovuus
- helposti kiillotettavissa (ei huokoinen)
- lämpökäsiteltävissä ilman merkittäviä muodonmuutoksia
- kestää syövyttäviä kemikaaleja
- mahdollista pintakäsitellä (kromipinnoitus, typetys)
- hyvä lämmönjohtavuus
- ei jännityksiä.

Yhtä täydellistä materiaalia suuttimille ei ole, joten tapauskohtaisesti on harkittava sopiva materiaali. Valintaan vaikuttavat muun muassa prosessin parametrit, käytettävä valmistusmuoto ja suuttimen koko. Useimmin suuttimissa käytetään pintakarkaistua, nitridoitua, karkaistua, nuorrutettua tai korroosionkestävää terästä. (Michaeli 2003, s.322-323)

### 3.2 Profiilin muotoilu

Suutinta suunniteltaessa on tärkeää, että itse profiilin muoto on suunniteltu hyvin. Profiilin poikkileikkaus on pidettävä niin yksinkertaisena kuin mahdollista. Sisäseinämiä on vältettävä niiden jäähdyttämisen vaikeuden vuoksi. Jos niitä tarvitaan, paksuuden on oltava 20–30 % pienempi kuin ulkoseinän. Kulmat täytyy pyöristää siten, että pyöristyssäde on 0,25–0,5 kertaa seinämän paksuuden verran. (Michaeli 2003, s.216)

Äkillisiä muutoksia ja paksuja osuuksia seinämissä täytyy välttää, koska sula jakautuu epätasaisesti. Ohuet osiot jäähtyvät nopeammin kuin paksut, mikä aiheuttaa profiilin vääntymistä. Vääntymistä voidaan välttää pitämällä seinämänpaksuus yhtenäisenä ja profiilimuoto symmetrisenä (kuva 12). Symmetrisissä profiileissa jäähtyminen on tasaista, eikä profiili ala vääntyä. (Michaeli 2003, s.216–217)

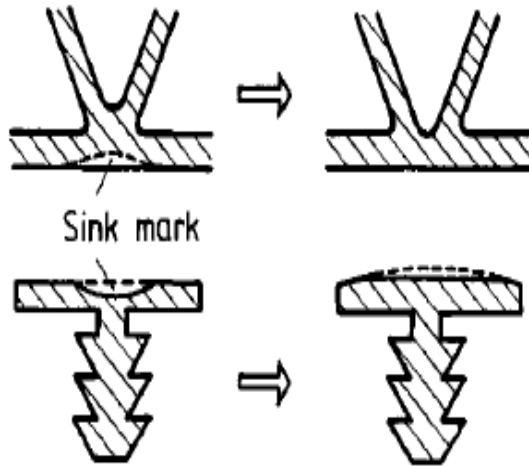


**Kuva 12.** Muodonmuutosten estäminen profiilia muokkaamalla. Suomennot: Distortion: muodonmuutos, General: yleisesti, Avoided by: vältetään, Specified profile: määritelty profiili, Substitute profile: korvaava profiili, Symmetrical design of profile: profiilin symmetrinen suunnittelu. (Michaeli 2003, s.216)

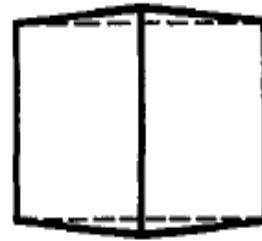
Painumajälkiä voidaan estää ottamalla kutistuminen huomioon etukäteen profiilin muodossa (kuva 13 oikealla) ja välttämällä materiaalin kasautumia profiilissa (kuva 13 vasemmalla). Profiilin poikkileikkauksen massakeskipisteen täytyisi olla samalla linjalla ekstruuderin ruuvin kanssa, koska silloin virtaus on tasaisinta. (Michaeli 2003, s.216)

### Shrinkage (sink marks)

a) Avoiding material accumulations



b) Taking the shrinkage of the interior cross-piece into consideration



**Kuva 13.** Painumien estäminen profiilia muokkaamalla. Suomennokset: Shrinkage: kutistuminen, sink marks: painumat, Avoiding material accumulations: materiaalin kasaumien välttäminen, Taking the shrinkage of the interior cross-piece into consideration: poikkipalkin kutistuman huomioon ottaminen. (Michaeli 2003, s.216)

### 3.3 Simulointi

Laitteiston ja suuttimen suunnitteluprosessin kustannuksia voidaan vähentää simuloimalla ekstruusioprosessia numeerisesti. Sulan, virtauksen ja materiaalin sekoittumisen optimointia varten on jouduttu tekemään monimutkainen laitteisto, johon kuuluu muun muassa läpinäkyvällä sylinterillä varustettu ekstruuderit. Onkin selvää, että numeerisella laskennalla saadaan aikaan kustannus- ja aikasäästöjä. (Gramann et al. 2001, s.706)

FEM-analyysi (Finite Element Method) on suosittu menetelmä virtauksen simuloinnissa suuttimen läpi. Sen etuna on ei-lineaaristen nesteiden hyvä simulointi. Uudempana tekniikkana käytetään BEMiä (Boundary Element Method), jolla saadaan kolmiuloitteisia monimutkaisiakin geometrioita mallinnettua. Se ei kuitenkaan ole FEMin veroinen ei-lineaarisisissa nesteissä. (Rauwendaal 2001, s.539)

## 4 SUUTTIMEN SUUNNITTELU

### 4.1 Lähtötiedot ja tavoitteet

Käytännön osuuden tarkoituksena oli suunnitella Lappeenrannan teknillisen yliopiston puutekniikan laboratoriolle ekstruusiosuutin puumuovikomposiitille. Valmistettavan profiilin poikkileikkauksen tuli olla 2x150 mm. Näin kapeaa profiilia ei ole laboratoriossa ennen valmistettu. Tavoitteena oli tehdä sellainen suutin, että siitä voitaisiin mahdollisimman vähin osavaihdoin moduloida suutin 1x150 mm suorakaideprofiilille, jos ensin testattavan 2 mm:n paksuisen profiilin teko onnistuu.

Suutin tulisi käyttöön laboratorion uuteen ekstruuderiin, jonka mitat eivät olleet suunnitteluvaiheessa vielä tiedossa. Suunnitteluun on käytetty laboratoriolta olemassa olevan ekstruuderin ulostuloaukon halkaisijaa 60 mm. Pursotettavan massan paine on noin 20 bar. Minimissään koneella voidaan ajaa materiaalia 5–8 kilogrammaa tunnissa. Suuttimen pituus sai olla enintään noin 300 mm ja paino 80 kg kiinnityksen keston vuoksi.

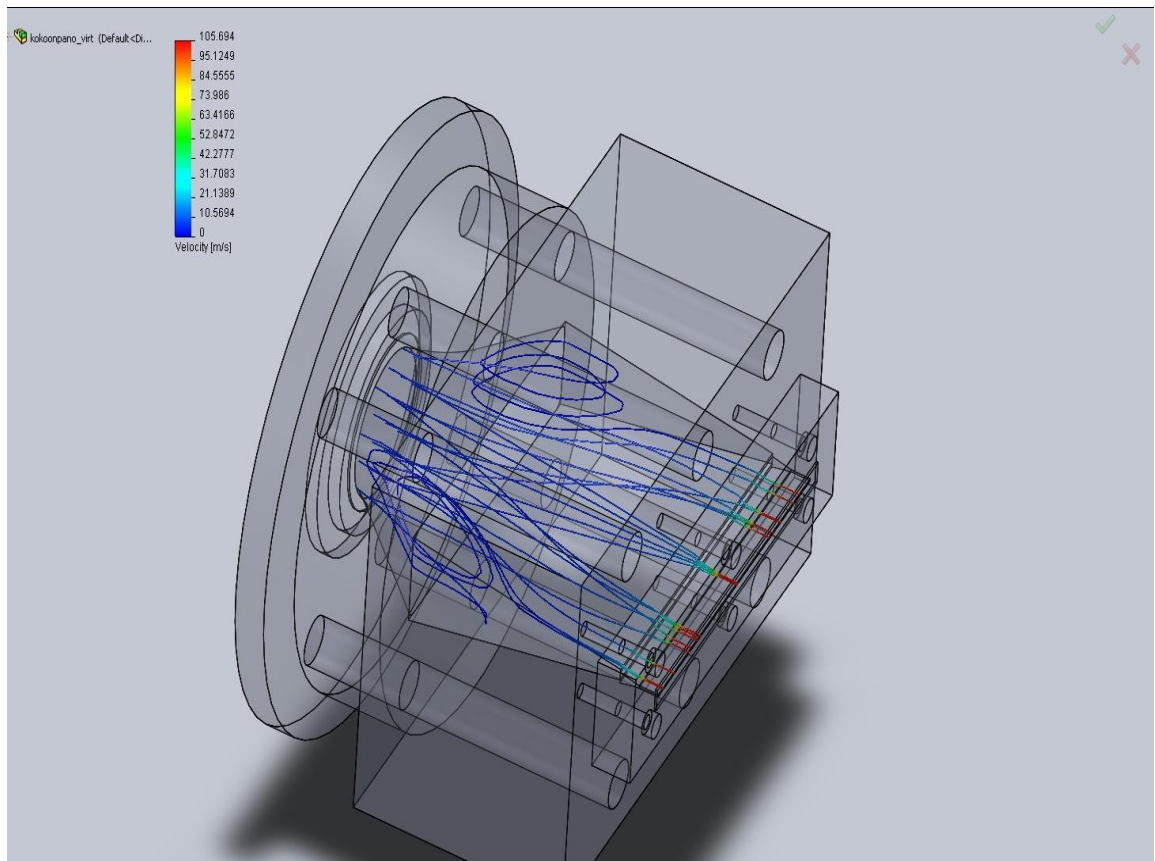
Valmistettavassa suuttimessa tulisi käyttää olemassa olevaa lämmityspantaa, joiden kokovaihtoehtoina olivat 150x150x75 mm tai 245x155x110 mm. Profiilin leveydestä johtuen vain jälkimmäinen panta on sopivan kokoinen.

### 4.2 Suunnittelun vaiheet

Suuttimen suunnittelu jakautui sen rakenteen ja virtauskanavan suunnitteluun. Suunnittelu aloitettiin ulkoisten muotojen ja eri osien suunnittelulla, jonka jälkeen suunniteltiin virtauskanavan muoto. Rakenteen suunnittelun tavoitteena oli tuottaa toimiva kokonaisuus, joka täyttää vaatimukset. Ulkoinen rakenne suunniteltiin olemassa olevien lämmityspannan ja ekstruuderilipan mukaisesti. Osien lukumäärässä ja liitoskohdissa pyrittiin huomioimaan puhdistuksen ja valmistuksen helppoutta.

Virtauskanavan muotoilun tarkoituksena oli saada yhtenäisellä nopeudella suuttimesta poistuva profiili. Virtauksen tulisi olla mahdollisimman suoraviivaista, jotta profiilin laatu

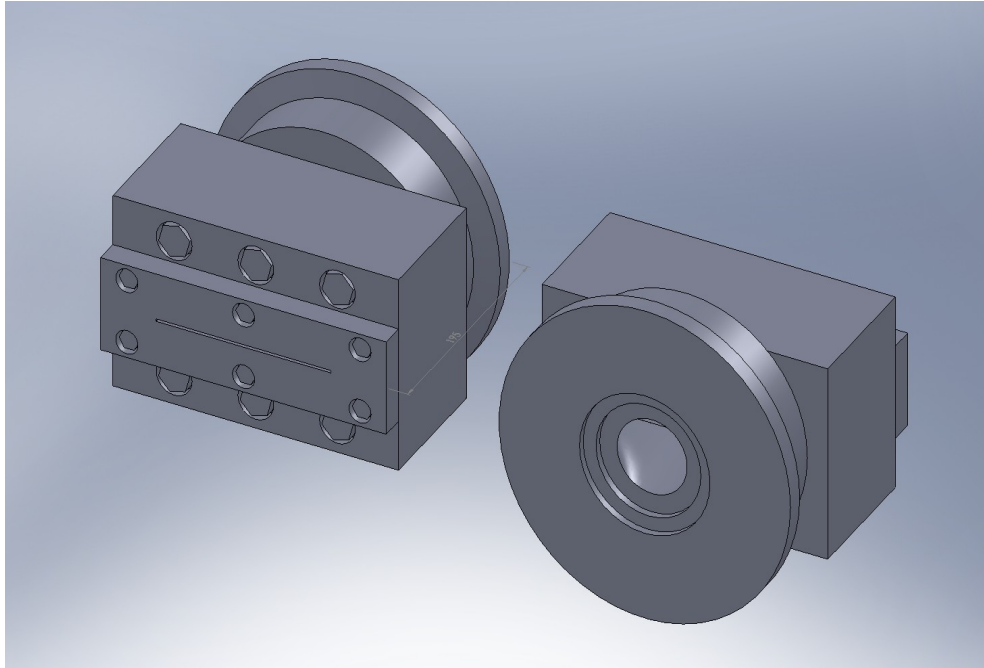
ei kärsisi ja virtaus pysyisi tasaisena. Kuvassa 14 on esitetty virtaussimulaatio suunnittelun alkuvaiheissa olleelle virtauskanavalle. Tässä suuttimessa kiinnitysosan ulostuloaukon poikkipinta-ala oli suurempi kuin sisäänmenoaukon poikkipinta-ala. Virtaussimulaatiossa paljastui, että tämänkaltainen geometria tuottaisi virtaukseen pyörteitä, jotka eivät ole toivottavia. Pyörteiden välttämiseksi virtauskanavasta suunniteltiin sellainen, että sen poikkipinta-ala pienenee jatkuvasti lähestyttäessä suuttimen ulostuloaukkoa.



**Kuva 14.** Virtaussimulaatiossa havaittuja pyörteitä.

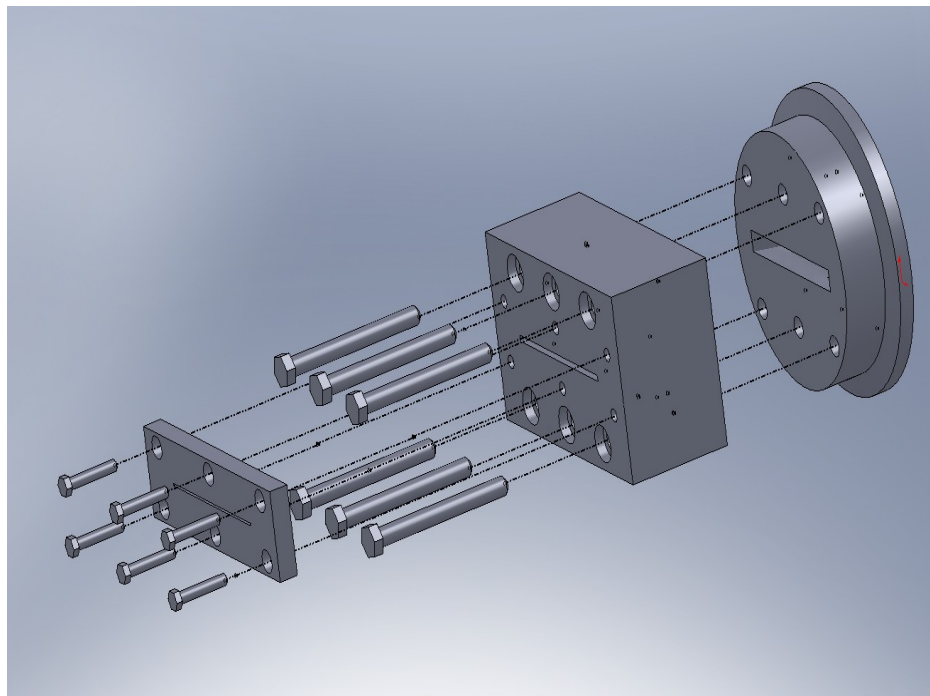
#### 4.3 Suunniteltu suutin

Tässä osiossa esitellään lopullinen suunniteltu suutin (kuva 15). Suuttimen kokonaispituus on noin 195 mm ja suurin halkaisija on 250 mm.



**Kuva 15.** Suutin edestä (vasemmalla) ja takaa (oikealla) katsottuna.

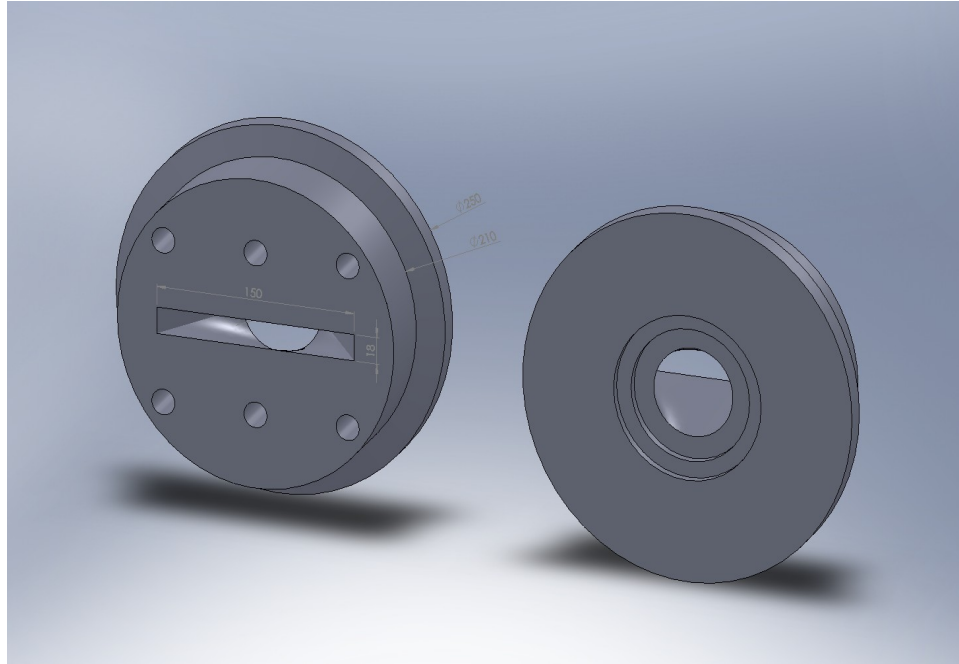
Suutin koostuu kolmesta osasta, jotka on esitetty räjäytyskuvassa (kuva 16). Kokoonpantu suutin kiinnitetään ekstruuderiin kiinnityslaipan avulla. Toisiinsa osat kiinnitetään pulteilla, joiden kiinnitys on myös esitetty kuvassa.



**Kuva 16.** Suuttimen räjäytyskuva.

#### 4.3.1 Kiinnitysosa

Kiinnitysosalla (kuva 17) suutin kiinnitetään ekstruuderiin. Se myös muuttaa virtauskanavan muodon pyöreästä suorakulmaiseksi.

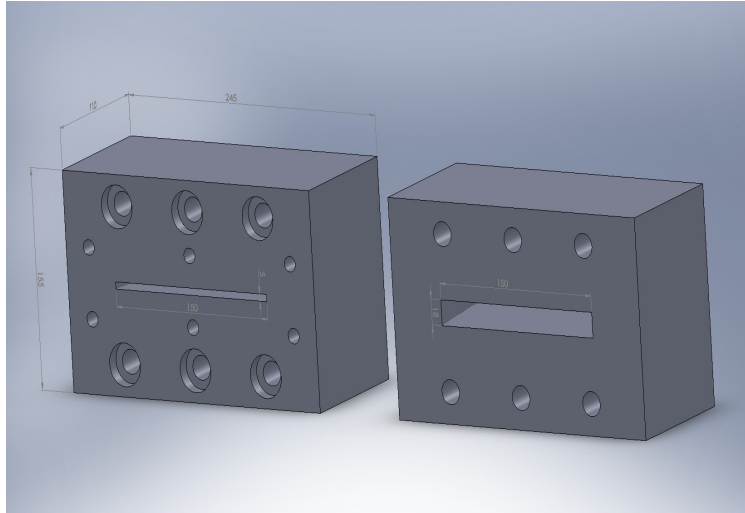


**Kuva 17.** Vasemmalla kiinnitysosa edestä ja oikealla takaa (ekstruuderista päin).

Kiinnitysosan kiinnityslaipan halkaisija on 250 mm ja paksuus noin 20 mm. Koko osan paksuus on noin 65 mm. Se kiinnitetään ekstruuderiin kiinnityslaipastaan olemassa olevalla kiinnityksellä. Kuvasta nähdään myös suuttimen keskimmäisen osan pulttien kiinnitysreiät.

#### 4.3.2. Keskiosa

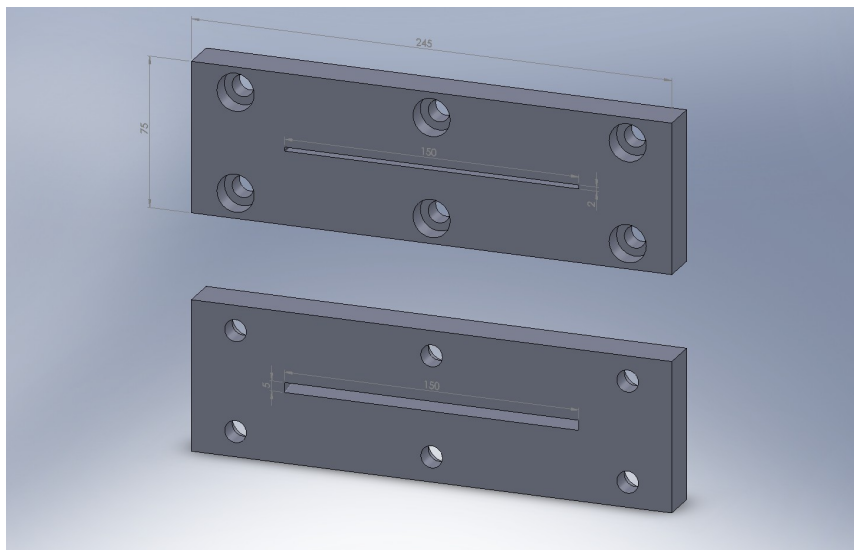
Keskiosa (kuva 18) kiinnitetään kiinnitysosaan M16-pulteilla. Osan ulkoiset mitat ovat 110x245x155 mm (pituus x leveys x korkeus). Keskiosan virtauskanava kaventuu 18x150 mm:stä 5x150 mm:iin. Lisäksi osassa on kiinnitysreiät suulakeosan pulteille.



**Kuva 18.** Keskiosa edestä (vasemmalla) ja takaa (oikealla). Kuvassa näkyvät suuremmat reiät ovat osan kiinnitysreikiä. Pienempiin reikiin kiinnitetään suuttimen suulakeosa.

#### 4.3.3. Suulake

Suulake (kuva 19), eli suuttimen viimeinen osa antaa profiilille sen lopullisen muodon. Suulakkeen mitat ovat 20x245x75 mm. Suulakkeessa virtauskanava kaventuu 5 mm:stä 2 mm:iin 10 mm:n matkalla. Viimeiset 10 mm virtauskanava on lopullisen suuaukon kokoinen, eli 2x150 mm. Tämän osan tilalle voidaan vaihtaa esimerkiksi suuaukoltaan 1 mm korkuinen suulake. Osa kiinnitetään suuttimen keskiosaan kuudella M10-pultilla.

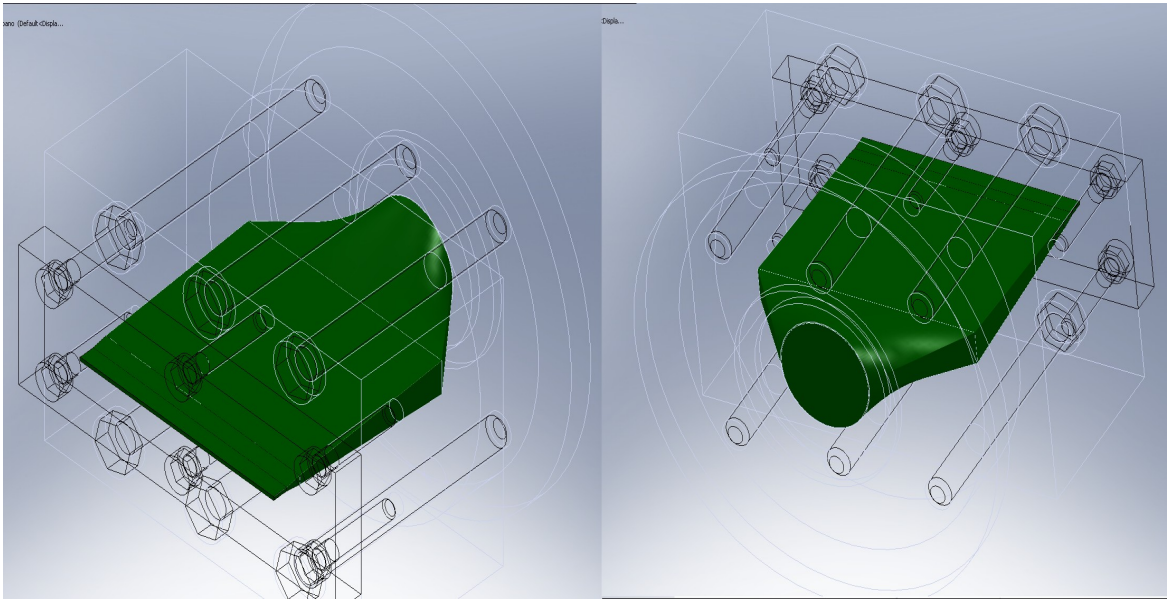


**Kuva 19.** Suulake edestä (ylhällä) ja takaa (alhaalla).



#### 4.3.4. Virtauskanava

Suuttimen virtauskanavan muoto on esitetty kuvassa 19. Muoto muuttuu ekstruuderin ulostulon pyöreästä 60 mm aukosta suorakulmaiseksi 2x150 mm aukoksi.



**Kuva 20.** Virtauskanava edestä (vasemmalla) ja takaa (oikealla).

Virtauskanavan poikkileikkauksen pinta-ala pienenee jatkuvasti kohti suuaukkoa. Suuttimen alussa pinta-ala on noin 2827 mm<sup>2</sup>, keskikappaleen alussa 2700 mm<sup>2</sup>, suulakkeen alussa 750 mm<sup>2</sup> ja ulostuloaukossa 300 mm<sup>2</sup>.

## 5 SUUNNITELLUN SUUTTIMEN TOIMINNAN JA VALMISTUKSEN ARVIOINTI

Tässä osiossa analysoidaan suunnitellun suuttimen ominaisuuksia rakenteen ja virtauskanavan toiminnan sekä valmistuksen kannalta.

### 5.1 Rakenne

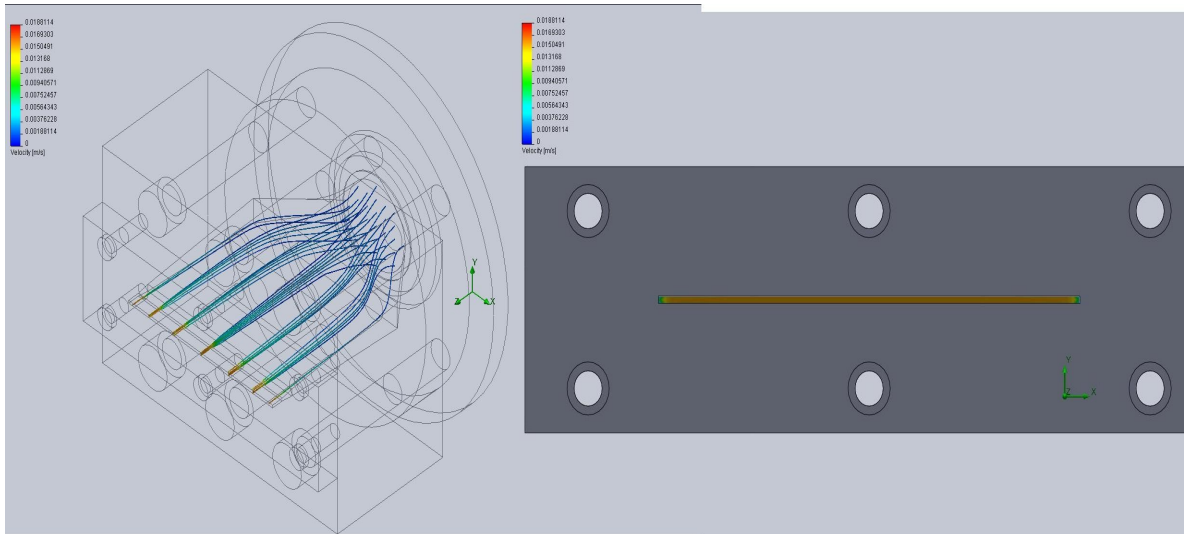
Kiinnitysosan ulkomuoto soveltuu olemassa olevaan ekstruuderilaippaan. Keskiosaan saadaan käytettyä olemassa olevaa lämmityspantaa. Suulakeosa on helposti vaihdettavissa ja valmistettavissa sekä sopivan pieni, mutta todennäköisesti riittävä kestämään virtauskanavan paine.

Suulake voidaan irroittaa ilman, että koko suutinta tarvitsee irroittaa. Lisäksi keskiosan kiinnityspultit ovat irroitettavissa ilman suulakkeen irrottamista, jolloin myös keskiosa voidaan tarvittaessa vaihtaa. Tällaista ominaisuutta voidaan käyttää esimerkiksi tilanteessa, jossa valmistetaan täysin erilaista profiilia. Tällöin kiinnitinosa säilyy samana.

Eri osien lukumäärässä on päädytty kolmeen, jolloin virtauskanava on helppo puhdistaa, kun suutin irroitetaan ja puretaan. Suuremmalla osien lukumäärällä liitosten määrä kasvaisi, joka voi aiheuttaa vuotoja tai pyörteitä virtaukseen. Liitosten kohdat on valittu valmistusta helpottavasti.

### 5.2 Virtauskanavan muoto

Virtauskanavan muoto on sellainen, että sen poikkipinta-ala pienenee jatkuvasti lähestyttäessä suuaukkoa. Suuttimen virtaussimulaation tulokset ovat esitetty kuvassa 21. Kuvasta havaitaan, että materiaalin virtaus on varsin tasaista, eikä pyörteitä ilmene. Suuttimen ulostuloaukon kohdalla olevasta nopeusprofiilista (kuva 21 vasemmalla) havaitaan, että profiilin äärilaidoilla nopeus on hieman alhaisempi kuin profiilin muissa kohdissa.



**Kuva 21.** Suuttimen virtaussimulointi. Vasemmalla materiaalin virtauskäyrät, oikealla materiaalin virtausnopeus suuttimen ulostuloaukon kohdalla. Virtausnopeus kasvaa sinisestä punaiseen päin mentäessä.

### 5.3 Valmistus

Suuttimen suunnittelussa on otettu huomioon myös osien valmistettavuutta. Vaikein valmistettava osa on kiinnitysosa, jonka virtauskanava muuttuu portaattomasti pyöreästä suorakulmaiseen. Helpoin valmistettava osa on suulakeosa.

Kiinnitysosan 2D-piirustus on työn liitteessä I. Ulkoiset mitat voidaan sorvata pyöreästä aihioista. Pulttien reiät valmistetaan poraamalla, jonka jälkeen ne kierteytetään esimerkiksi kierretapilla. Virtauskanavan valmistus voidaan aloittaa poraamalla hieman ulostuloaukkoa pienempi reikä keskelle aihioita. Tämän jälkeen jyrsitään ulostuloaukolta päin suoraa osuuksia. Kappale käännetään ympäri, jonka jälkeen jyrsitään virtauskanavan loppuosa, ja pinta viimeistellään tasaisemmaksi. Jyrsinän jälkeen pinta kiillotetaan. Liitospinnat koneistetaan liitosten pitävyyden varmistamiseksi. Ulkopintojen pinnankarheus voi olla suurempi.

Vaihtoehtoinen tapa on valmistaa osa lasersintraamalla. Lasersintrauksessa osa valmistettaisiin kerroksittain sulattamalla metallijauhetta lasersäteen avulla. Tällä

menetelmällä virtauskanavasta saadaan oikeanmuotoinen, mutta pinta ja kiinnitysreiät ovat koneistettava sekä pinta kiillotettava.

Keskiosa valmistetaan suorakulmaisesta aihioista koneistamalla liitospinnat, virtauskanava ja kiinnitysreiät. Osan 2D-piirustus on työn liitteessä II. Virtauskanavan leveys on vakio, jotta sen koneistus olisi helpompaa ja jyrsiminen tapahtuisi pääasiassa yhdeltä puolelta.

Suulakeosa (2D-piirustus liitteessä III) voidaan valmistaa esimerkiksi 20 mm paksuisesta aihioista, johon koneistetaan virtauskanava ja kiinnitysreiät. Tässä kappaleessa ei ole vaikeita muotoja ja sen koneistaminen ei tuota vaikeuksia.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Havaittiin, että ekstruusiosuuttimen suunnittelu vaatii suunnittelijalta osaamista ja kokemusta. Suuttimen suunnittelu perustuu edelleen paljolti kokemuspohjaiseen osaamiseen, mutta hyvänä apuvälineenä toimivat nykyaikaiset simulointiohjelmat. Suuttimen toiminnan simuloinnissa olisi aihetta laajemmallekin tutkimukselle. Profiilisuuttimien valmistus on melko työlästä ja näin ollen myös kallista. Kehittämällä suuttimien modulointia siten, että vain yhtä tai muutamaa osaa vaihtamalla voitaisiin vaihtaa valmistettavaa profiilimuotoa, voidaan suutinkustannuksissa säästää huomattavia summia.

Suuttimen suunnittelu onnistui kokonaisuudessaan hyvin. Lopullisessa mallissa virtaus on suoraviivaista ja osat ovat valmistettavissa. Myös tavoitteena ollut modulaarisuus saatiin suuttimeen, jolloin vaihdettaessa profiilin paksuutta pienempään saadaan aikaan huomattava kustannussäästö. Puumuovimassan nopeus ei ollut aivan yhtenäinen ulostuloaukon kohdalla, joten tältä osin suunnittelu ei onnistunut täysin. Tätä nopeuseroa voidaan kompensoida lämmityspantojen avulla tai muotoilemalla profiilin kulmien pyöristykset erilaisiksi. Koska kyseessä on suorakaiteen muotoinen profiili, voidaan siitä myös leikata epämuodostuneet reunat pois ja hyödyntää ne uudelleen ekstruusiossa.

Koska lujuusteknistä tarkastelua ei tehty, on ennen suuttimen käyttöönottoa varmistettava, että se kestää tulevan ekstruuderin aiheuttaman paineen. Lisäksi suuttimeen olisi lisättävä paineenmittauslaite. Jatkokehitykseen jäivät myös materiaalinvalinta, lämmönjohtumistarkastelu ja tarkempi virtaustarkastelu. Virtauskanavaa voidaan kehittää virtausteknisesti paremmaksi, mutta samalla on huomioitava kuitenkin kappaleiden valmistettavuus. Myös suuttimen ulostuloaukko tulisi muotoilla siten, että materiaalin virtausnopeus olisi täysin yhtenäinen. Lisäksi modulointia voisi kehittää siten, että olisi mahdollista saada samalla rungolla myös suorakaideprofiilista poikkeavia profiileja.

## LÄHTEET

Gardner, D. 2002. Wood-Plastic Composite Extrusion – Die Design Principles. [opetusmateriaali]. Mainen yliopisto, [viitattu 15.5.2011]. Saatavissa: <http://www.umaine.edu/adhesion/gardner/5502002/wpc%20extrusion%20dies%203-20-02.pdf>.

Gardner, D., Murdock, D. 2002. Extrusion of Wood Plastic Composites. [tutkielma]. Saatavissa: <http://www.entwoodllc.com/PDF/Extrusion%20Paper%2010-11-02.pdf>.

Giles, H., Harold F. Jr., Wagner, J. Jr., Mount, E. 2005. Extrusion – The Definitive Processing Guide and Handbook. Norwich, New York, William Andrew Pub. 542 s. ISBN 1-591-24850-7 ja 978-1-591-24850-7. Saatavissa Knoval -tietokannasta.

Gramann, P., Davis, B., Osswald, T. 2001. Modeling and Simulation of the Extrusion Process. Teoksessa Rauwedaal C. Polymer Extrusion, Revised 4<sup>th</sup> edition. Munich, Carl Hanser Verlag. ISBN-10: 3-446-21774-4, ISBN-13: 978-3-446-21774-4.

Järvinen, P. 2000. Muovin suomalainen käsikirja. Porvoo, Muovifakta Oy. 173 s. ISBN: 952-92-1918-6

Kostic, M., Reifschneider, L. 2006. Design of Extrusion Dies. Teoksessa Encyclopedia of Chemical Processing. Taylor & Francis Group. S.633-649. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.138.1853&rep=rep1&type=pdf>.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Puu-muovikomposiitit. 2010. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.5.2011]. Saatavissa: <http://tbrc-community.lut.fi/internal/alykop/system/files/Puumuovikomposiitit.pdf>.

Lehtinen, L. 2010. Puumuovikomposiitti – Puuta vai muovia? [luentoesitys]. UPM ProFi, [viitattu 15.5.2011]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/plastics/lahti/Lehtinen.pdf>.

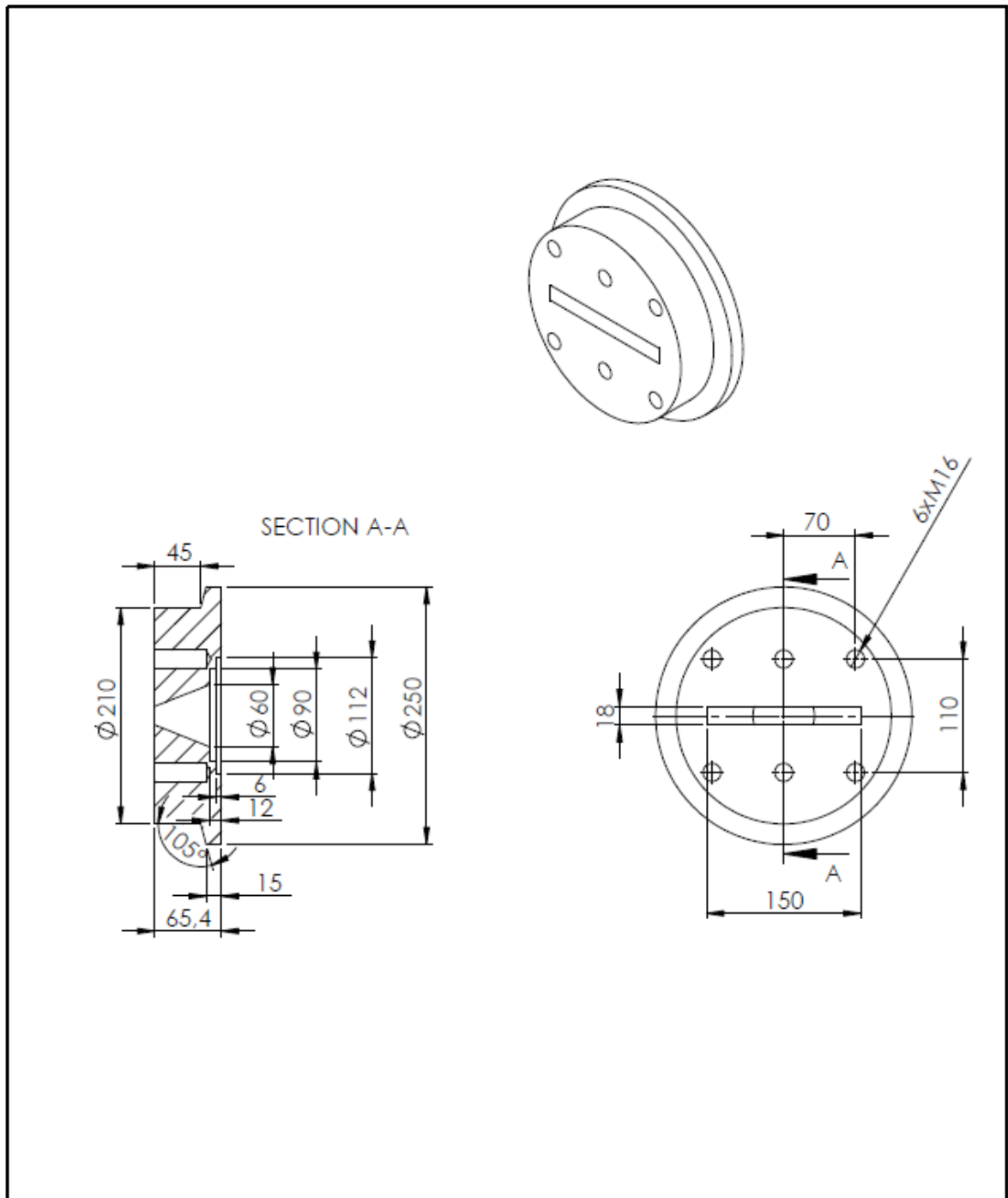
Michaeli, W. 2003. Extrusion dies for plastics and rubber. Munich, Hanser Publishers. 362 s. ISBN: 3-446-40181-gard4. Saatavissa Knovel-tietokannasta.

Rauwendaal, C. 2001. Polymer Extrusion, Revised 4<sup>th</sup> edition. Munich, Carl Hanser Verlag. 781 s. ISBN-10: 3-446-21774-4, ISBN-13: 978-3-446-21774-4.

Rauwendaal, C. 2010. Understanding Extrusion, 2<sup>nd</sup> Edition. Munich, Carl Hanser Verlag. 231 s. ISBN 978-3-446-41686-4.

Vienamo, T., Nykänen, S. 2011. Ekstruusio eli suulakepuristus [verkkoartikkeli]. Helsinki: Taideteollinen korkeakoulu, [viitattu 15.5.2011]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/50/83/>.

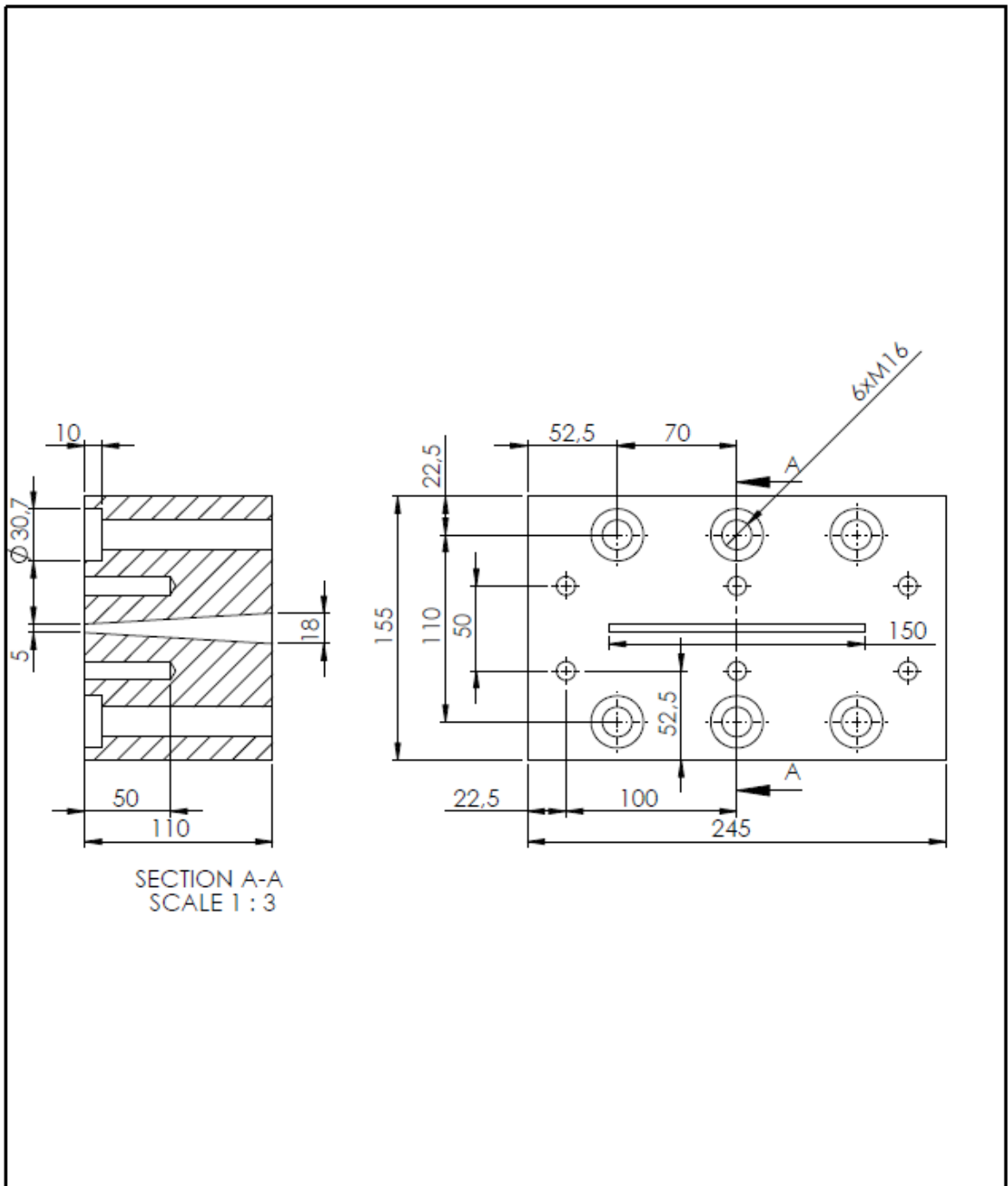
Liite I: Kiinnityskappaleen valmistuspiirustus



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD						kiinnityskappale			
APPVD									
MFG									
QA									
SolidWorks Student License		MATERIAL:		OWG NO.		A4			
Academic Use Only		WEIGHT:		SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1			



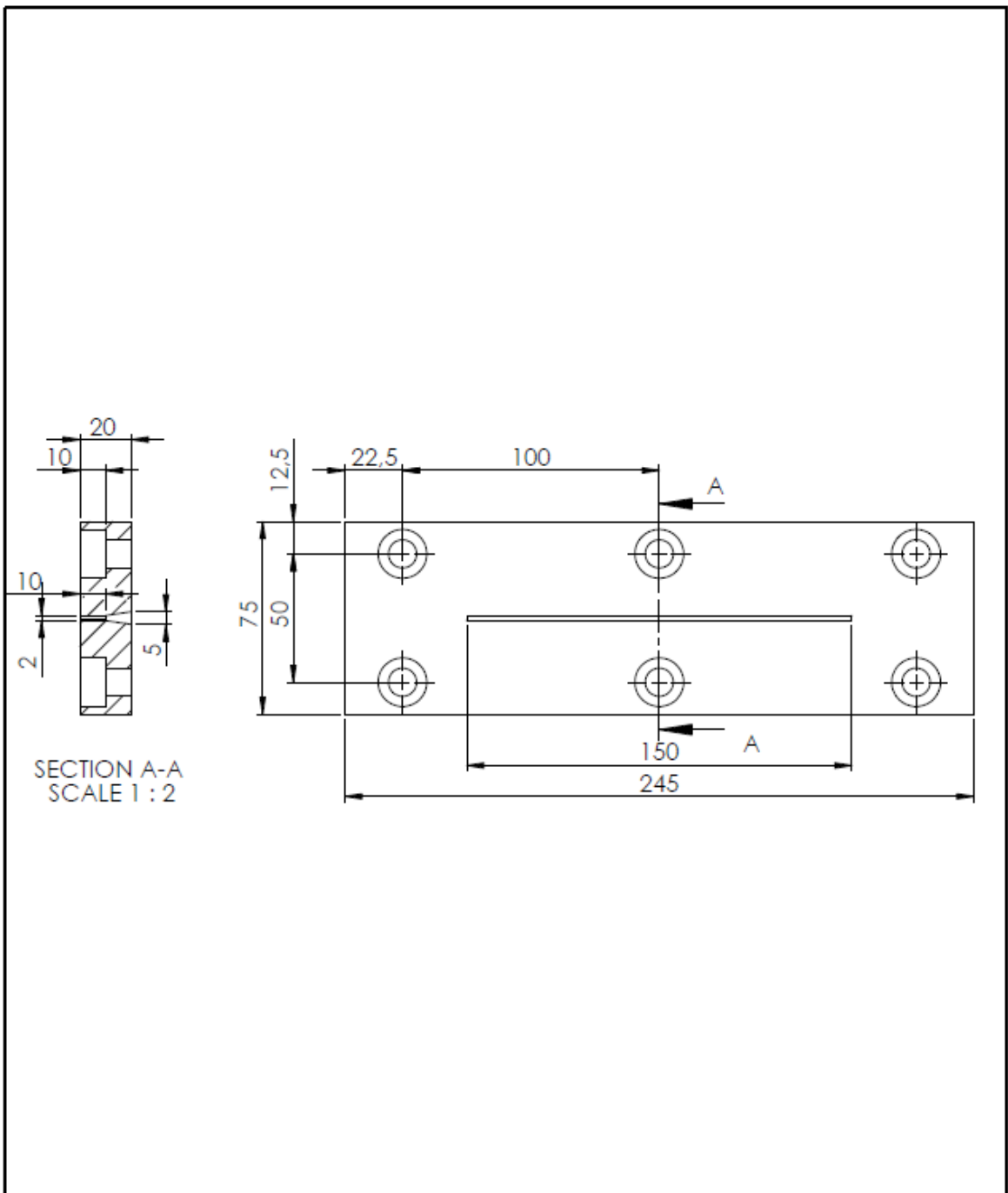
Liite II: Keskikappaleen valmistuspiirustus



SECTION A-A  
SCALE 1 : 3

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN					
CHECKED					
APPROVED					
MFG					
Q.A.			MATERIAL:	DWG NO.	keskikappale
SolidWorks Student License Academic Use Only			WEIGHT:	SCALE:1:3	A4 SHEET 1 OF 1

Liite III: 2 mm suulakkeen valmistuspiirustus



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN									
CHKD									
APPVD									
MFG									
QA					MATERIAL:	DWG NO.		suulake 2mm	
SolidWorks Student License					A4				
Academic Use Only					WEIGHT:	SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	