

# **Ruiskuvaluprosessin annostelunopeuden vaikutus polypropeenin lasikuitulujitteeseen**

TkK-tutkielma  
Turun yliopisto  
Kone- ja Materiaalitekniikan laitos  
Teknillinen tiedekunta  
2025  
Tuukka Nurmela

Kandidutkielma  
Tekniikan laitos, teknillinen tiedekunta

**Oppiaine:** Materiaalitekniikka

**Tekijä:** Tuukka Nurmela

**Otsikko:** Ruiskuvaluprosessin annostelunopeuden vaikutus polypropeenin lasikuitulujitteeseen

**Ohjaaja:** Yliopisto-opettaja Valteri Vinni

**Sivumäärä:** 26 sivua

**Päivämäärä:** Huhtikuu 2025

Tutkielmassa tarkastellaan ruiskuvaluprosessia, lasikuituvahvisteista polypropeenia ja sen prosessointia. Ruiskuvaluprosessissa muovi altistuu korkeille paineille, virtauksille ja lämmölle. Tämä voi johtaa lopputuotteen mekaanisten ominaisuuksien heikentymiseen. Kuituvahvisteiset termoplastiset muovit ovat erityisen herkkiä prosessissa syntyville vioille, sillä kuitujen jakautuminen, suuntautuminen ja mahdollinen katkeilu voivat vaikuttaa merkittävästi lopputuotteen mekaaniseen suorituskykyyn. Tutkimuksen keskiössä on ruiskuvalun annosteluvaihe, jossa materiaali annostellaan ruuvin kärkeen. Tässä prosessin vaiheessa materiaali altistuu korkeille lämpötiloille ja voimakkaalle sekoitukselle. Työn tavoitteena on selvittää, vaikuttaako nopeutettu annostelunopeus lujitekuitujen eheyteen ja näin lopputuotteen kestävyYTEEN.

Annostelunopeuden vaikutus kuitulujitteeseen pyritään selvittämään kokeellisen osion avulla. Kokeellinen osuus suoritetaan yhteistyössä Pdat Oy:n kanssa. Kokeessa valmistetaan ISO 527 -standardin mukaisia vetosauvoja ruiskuvalun eri annostelunopeuksilla. Kappaleet valetaan 30 % lasikuitua sisältävästä polypropeenista. Näytteiden mekaanisia ominaisuuksia tutkitaan vetokokeen avulla, ja tuloksia vertailemalla pyritään arvioimaan annostelunopeuden vaikutusta kuitujen säilyvyyteen ja materiaalin suorituskykyyn.

Tulosten perusteella muodostettiin jännitys-venymäkäyrät, ja kunkin näytteen murtolujuus määritettiin. Kokeessa suurin mitattu murtolujuus oli 92,042 MPa, mikä on noin 18 MPa vähemmän kuin materiaalin valmistajan ilmoittama arvo. Murtolujuuksista laskettiin eri annostelunopeuksilla valmistettujen näytteiden keskiarvot, jotka esitettiin taulukkomuodossa. Taulukon perusteella havaittiin, ettei murtolujuus pienene systemaattisesti annostelunopeuden kasvaessa.

**Avainsanat:** Ruiskuvalu, Polypropeeni, Lasikuitu

# Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ruiskuvalu</b> .....	<b>2</b>
2.1	Johdanto ruiskuvaluun.....	2
2.2	Ruiskuvalukone.....	3
2.3	Ruiskutusyksikön toiminta.....	6
2.4	Ruiskuvalumuotti .....	6
<b>3</b>	<b>Polypropeeni</b> .....	<b>9</b>
3.1	Johdanto.....	9
3.2	Polypropeenin rakenne.....	9
3.3	Kemialliset ominaisuudet .....	10
3.4	Polypropeenin lisäaineet .....	11
3.5	Polypropeenin prosessointi .....	11
<b>4</b>	<b>Vetokoe</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Materiaalit ja menetelmät</b> .....	<b>15</b>
5.1	Muotti ja vetosauva .....	15
5.2	Celstran PP-GF30-0403.....	15
5.3	Kappaleiden ruiskuvalu .....	16
5.4	Kappaleiden vetokoe .....	17
<b>6</b>	<b>Tulokset ja pohdinta</b> .....	<b>19</b>
6.1	Tulokset.....	19
6.2	Pohdinta.....	20
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b> .....	<b>23</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>24</b>
	<b>Liitteet</b> .....	<b>26</b>
	Liite 1. Ruiskuvalun ajoarvot .....	26
	Liite 2. Laboratoriopäiväkirja .....	30

# 1 Johdanto

Muovit ovat keskeinen osa modernia materiaaliteknologiaa niiden keveyden, kestävyys ja helpon prosessoitavuuden ansiosta. Näiden ominaisuuksien vuoksi muoveja käytetään laajasti eri teollisuudenaloilla. Yhdistämällä muoveja kuitujen kanssa saadaan komposiittirakenteita, jotka tarjoavat entistä parempia mekaanisia ominaisuuksia ja soveltuvat moniin teknisiin käyttökohteisiin. Erityisesti lyhytkuituisten muovikomposiittien hyödyntäminen ruiskuvalumenetelmässä mahdollistaa kustannustehokkaan tavan valmistaa kevyitä ja kestäviä rakenteita, mikä tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon monille teollisuudenaloille. [1]

Tämän työn tavoitteena on selvittää, kuinka ruiskuvaluprosessin annostelunopeus vaikuttaa lasikuitupitoisen polypropeenin kuituihin ja näin materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Kuitujen avulla normaalisti hyvin plastisesta polypropeenista saadaan hauras, jäykkä ja hyvin luja. Kuitulujitteisten muovien ruiskuvalu tuo paljon haasteita ja onkin hyvä tutkia, mitä vaikutuksia ruiskuvaluprosessilla on lopputuotteen ominaisuuksiin.

Tutkielmassa käsitellään kokeelliseen osioon liittyviä valmistus- ja testausmenetelmiä. Tutkielman ensimmäisessä osiossa keskitytään ruiskuvaluun. Käydään läpi ruiskuvalun toimintaperiaate ja keskitytään ruiskuvalukoneen ruiskutusyksikön toimintaan. Toisessa osiossa syvennytään polypropeeniin. Tässä osiossa tutustutaan kuituihin ja ruiskuvaluprosessin vaikutusta niihin. Kolmas osio käsittää vetokokeen teorian, jossa kerrotaan kaikki työssä tarvittavat laskut. Neljäs ja viides osio on tutkielman kokeellinen osio, jossa kerrotaan vetosauvojen valmistuksesta, niiden vetokokeesta sekä tuloksista.

Tutkielman kokeellisen osio koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäisessä vaiheessa ruiskuvalutaan ISO 527 -standardin mukaisia vetosauvoja ruiskuvalukoneen eri annostelunopeuksilla. Toisessa vaiheessa vetosauvoille suoritetaan vetokoe, jonka avulla pyritään selvittämään annosteluvaiheen vaikutusta materiaalin kuituihin. Mikäli annostelunopeudella ei ole merkittävää vaikutusta materiaalin kestävyys, niin päästään annostelu-aikaa nopeuttamalla pienempään jaksonaikaan ja näin tehokkaampaan ruiskuvaluprosessiin. Optimoidulla prosessilla saattaa olla iso merkitys pidemmissä tuotannoissa.

## 2 Ruiskuvalu

### 2.1 Johdanto ruiskuvaluun

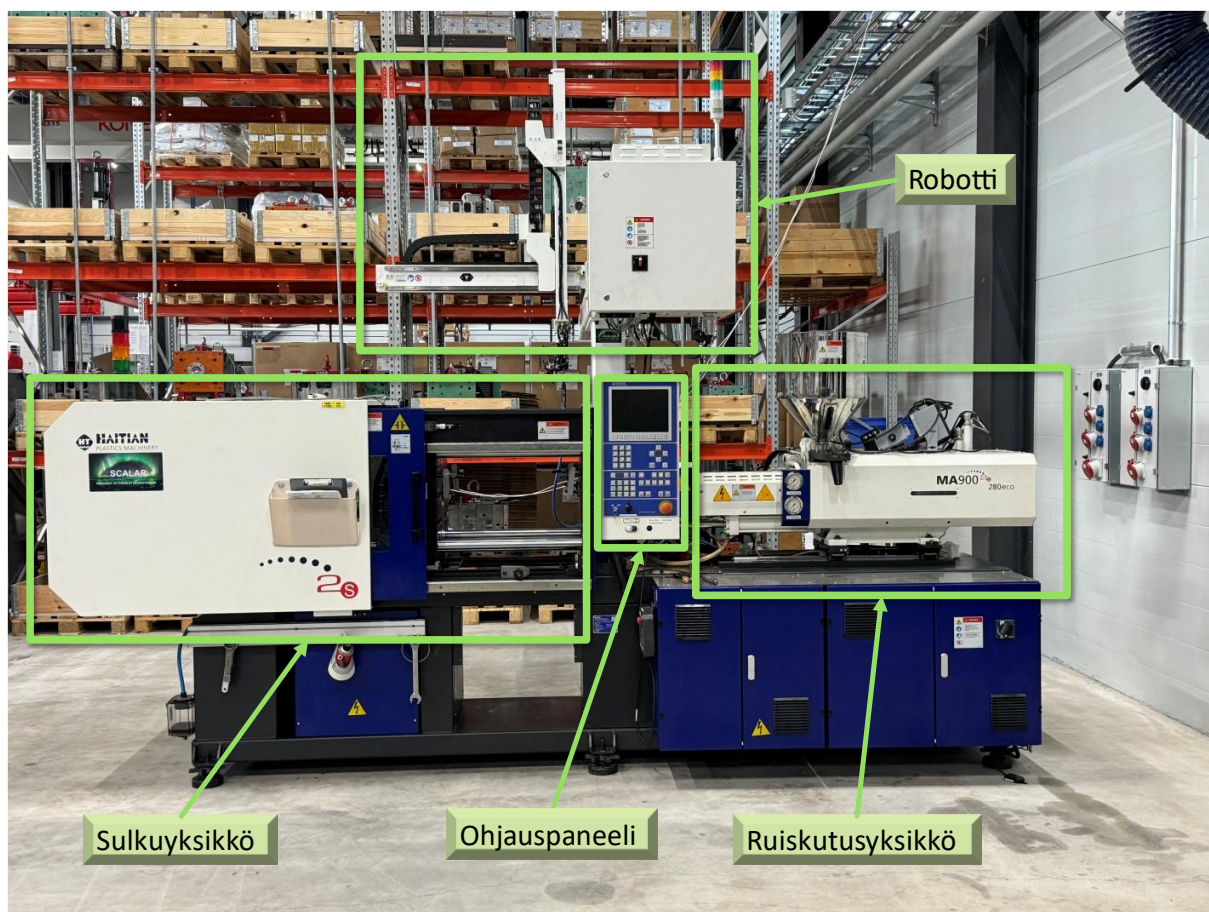
Ruiskuvalu on valmistustekniikka, jossa muovi sulatetaan ja painetaan muottiin. Lopputuloksena saadaan muotin onkalon muotoinen muovikappale. Maailman ensimmäiset ruiskuvalut tekivät veljekset Isaiah ja John Wesley Hyatt Vuonna 1868. He hyödynsivät mäntäperiaatetta valmistaessaan biljardipalloja selluloidista. Vuonna 1946 valmistettiin ensimmäinen nykyaikaista ruiskuvalukonetta muistuttava versio, jossa raaka-aineen sulattamisessa ja ruiskuttamisessa hyödynnettiin pyörivää ruuvia. Sen valmisti James Hendr. Ruuvin tehtävänä on sulattaa, sekoittaa, ruiskuttaa ja painaa. Ruuvi oli todella vallankumouksellinen muoviteollisuudelle, koska se mahdollisti muovin tehokkaamman sulattamisen, sekoittamisen ja annostelun, mikä paransi tuotannon laatua, nopeutta ja toistettavuutta merkittävästi. Se onkin yksi merkittävistä tekijöistä muovituotteiden tuotannon räjähdysmäisessä kasvussa. Ruiskuvalu on suunniteltu pääasiassa erilaisille muoveille ja muovin sekoituksille, niiden helpon prosessoitavuuden ansiosta. [2]

Ruiskuvalun etu muihin tuotantomenetelmiin verrattuna on sen kyky luoda monimutkaisia ja tarkkoja muotoja kustannustehokkaasti. Sillä voidaan valmistaa identtisiä osia hyvin nopeasti. Usein osat eivät myöskään vaadi lainkaan jälkikäsitteilyä, jolloin valmistus on edullista. Yhden kappaleen hinta laskee erityisen matalalle varsinkin suuremmissa tuotannoissa. Muovin erinomaiset mekaaniset ominaisuudet ja matala tiheys ovat mahdollistaneet sen laajan käytön ruiskuvaluprosessissa eri teollisuudenaloilla. Esimerkiksi autoteollisuudelle tuotetaan valtavasti ruiskuvaluttuja osia, sillä kevyet ja kestävät osat ovat tärkeitä auton ominaisuuksien kannalta. Myös elektroniikka, lääketieteelliset laitteet, kuluttajatuotteet, pakkaus-, rakennus-, ilmailu- ja avaruusteollisuus hyödyntävät paljon ruiskuvaluttuja muoviosia. Ruiskuvalulla on useita etuja, mutta myös tiettyjä heikkouksia. Yksi merkittävimmistä haasteista liittyy korkeisiin alkukustannuksiin, sillä muottien valmistus on sekä kallista että aikaa vievää. Tämän vuoksi ruiskuvalu ei välttämättä ole taloudellisesti kannattava menetelmä pienille tuotantosarjoille. [3]

## 2.2 Ruiskuvalukone

Ruiskuvalukoneita on monen tyyppisiä. Pääasiassa ruiskuvalukoneita on kolmea eri tyyppiä. On hydraulisia, sähköisiä ja näiden yhdistelmiä. Yleisesti suurimmat ruiskuvalukoneet ovat aina hydraulisia tai hybridejä ja pienemmät koneet sähköisiä. Ruiskuvalukoneita on myös kahden ja kolmen komponentin koneita, joilla voidaan valaa yhteen kappaleeseen kahta tai useampaa eri muovia. Tällöin kone on varusteltu useammalla ruiskutusyksiköllä.

Ruiskuvalukone koostuu kahdesta osiosta, ruiskutusyksiköstä ja sulkuyksiköstä. Kuvassa 1 näkyy ruiskuvalukone. Kyseinen malli on Haitianin 90 tonnin sulkuvoimalla varustettu hydraulinen kone. Sulkuyksikkö koostuu kahdesta pöydästä, nivelistä ja moottorista. Muotti asennetaan kahden pöydän väliin ja toista pöytää liikuttamalla saadaan muotti auki ja kiinni. Nivelillä ja moottorilla säädetään sulkuvoimaa. Sulkuvoimalla tarkoitetaan voimaa, jolla muottia painetaan kiinni. Lisäksi liikkuvalla puolella on ulostyöntömekanismi, johon muotin ulostyöntölevy kiinnitetään. Ruiskutusyksikkö koostuu suppilosta, ruuvista, piipusta, vastuksista ja suuttimesta. Ruuvin tehtävänä on sulattaa raaka-aine, sekoittaa se hyvin tasaiseksi massaksi ja ruiskuttaa se muottiin. Ruuvin toiminta koostuu kolmesta vaiheesta. Ensimmäiseksi raaka-ainetta annostellaan ruuvin eteen haluttu määrä, jonka jälkeen se työnnetään sisälle muottiin. Viimeistä vaihetta kutsutaan jälkipaineeksi, jossa muovi painetaan muottiin kovalla paineella muodostaen kappaleen viimeisetkin yksityiskohdat. [2]



Kuva 1, Ruiskuvalukone, Tuukka Nurmela, 18.7.2024

Ruiskuvalu on todella kustannustehokas ja nopea valmistusmenetelmä. Yhden kappaleen valmistukseen kuluva aika on hyvin pieni. Yhden kappaleen valmistusaikaa kutsutaan jaksonajaksi. Yhdessä jaksossa on vähintään kuusi vaihetta. [2]

1. Muotin sulku
2. Ruiskutus
3. Jälkipaine
4. Uuden annoksen annostelu ja kappaleen jäähtytys
5. Muotin avaus
6. Ulostyöntö/kappaleen irrotus

Näitä kuutta vaihetta ruiskuvalukone toistaa kappaleita valmistaessa. Ensin muotti suljetaan, joka jälkeen annos ruiskutetaan muotin sisälle. Ruiskutusvaiheessa ruuvi ei pyöri vaan

ainoastaan työntää. Ruiskutusvaiheessa muotin tulisi täyttyä noin 95 %, jonka jälkeen ruiskutus vaihtuu jälkipaineelle. Jälkipaineen aikana ruuvi painaa muovia muotin sisälle kovalla paineella. Tämän avulla loput 5 % muotista täyttyy muodostaen viimeisetkin yksityiskohdat. Ruuville jäänyttä pientä annosta kutsutaan massatyynyksi. On tärkeää, että massatyyny jää, koska tällöin jälkipaineella pystytään luomaan painetta muotin sisälle. Puutteellinen jälkipaine aiheuttaa vääntymiä, halkeamia, vaihtelevaa kutistumista ja vajaavaluihin. Jälkipaineen jälkeen ruuvi aloittaa uuden annoksen annostelun samalla, kun kappale muotin sisällä jäähtyy. Annostelu-aika olisi hyvä olla aina kuitenkin lyhyempi, kuin jäähtymisaika, jotta prosessi pysyy tehokkaana. Tämän jälkeen muotti avataan ja kappale poistetaan muottipinnalta. Tämä tapahtuu muottiin rakennettujen ulostyöntötappien avulla. Joskus kappale kerätään muotin pinnalta robotin avulla, jotta vältetään turhat kolhut ja naarmut. [2]

Ruiskuvalukoneen lisäksi tarvitaan muutamia lisälaitteita, joilla parannetaan prosessin toimintaa ja tuotteen laatua. Kosteuden hallinta ruiskuvaluprosessissa on kriittinen osa tuotelaadun varmistamista. Kosteus voi heikentää merkittävästi valettavan kappaleen pinnanlaatua, erityisesti jos sitä pääsee muotin sisään valetun massan mukana. Ruiskuvalussa käytetään korkeita lämpötiloja ja paineita, jolloin kosteuden tai ilman jääminen muotin onteloihin voi aiheuttaa niiden äkillisen höyrystymisen. Tämä voi johtaa höyryn sekoittumiseen sulan muovin kanssa, mikä näkyy lopputuotteessa eri pintavirheinä. Yleisin kosteuden lähde on itse raaka-aine. Tämän vuoksi raaka-aine on kuivattava ennen prosessointia. Kuivauksessa käytetään erityistä kuivainta, jossa granulaatti altistetaan kiertävälle ilmalle tietyllä lämpötilalla. Jokaisella muovilla on ilmoitettu oma kuivauslämpötila ja kuivausaika, sillä liiallinen lämmittäminen voi vahingoittaa muovin rakennetta ja ulkonäköä. [4]

Ruiskuvalaessa käsitellään paljon sulaa muovia ja koska muovien sulamispisteet ovat korkeat, niin myös ruiskuvaluprosessin lämmöt ovat todella korkeat. Ruiskuvalamisessa on tärkeää pitää prosessi mahdollisimman tasaisena, joten myös lämpötilaa ylläpidetään halutulla tasolla. Muotin lämpötilaan vaikutetaan vesikiertoilla. Ne ovat kanavat, jotka kiertävät muotin sisällä. Siksi tarvitaan temperointilaitte. Laitteeseen asetetaan lämpötila, jolloin se kierrättää muotin läpi asetetun lämpöistä vettä. On tärkeää jäähdyttää muottia, jotta kappale jähmettyy muotin sisällä, jolloin saavutetaan haluttu muoto. Lisäksi jäähdytys ehkäisee kappaleen vääntyilyä ja ylimääräistä kutistumista. [5]

## 2.3 Ruiskutusyksikön toiminta

Annostelu on vaihe, jossa ruuvi kerää materiaalia eteensä ja peruuttaa asetettuun sijaintiin. Ruuvien annostelunopeuteen vaikuttaa matka, pyörimisnopeus ja vastapaine. Vastapaineella tarkoitetaan painetta, jolla sulaa muovia painetaan ruuvien takaosasta ruuvien etuosaan. Annostelun kanssa samanaikaisesti jäähdytetään edellisen iskun kappaletta. Optimaalisessa tilanteessa annostelu-aika on lyhyempi kuin jäähdytysaika. Annostelumatkaan vaikuttavat sekä valettavan kappaleen että ruuvien koko. Vastapaine ja ruuvien pyörimisnopeus asetetaan usein raaka-aineen valmistajan ohjeiden mukaan. Nopeamman annostelunopeuden avulla yhteen iskuun kuluva aika voidaan usein lyhentää, sillä kappale jäähtyy usein nopeasti. [2]

Ruiskutus on vaihe, jossa annosteltu muovi työnnetään sisälle muottiin. Ruiskutusvaiheen alkaessa ruuvien etuosassa oleva sulkurengas sulkeutuu pienen alkuliikkeen avulla, jolloin annostelu vaihtuu ruiskutukseksi. Ruiskutusvaiheessa ruuvi ei pyöri vaan työntää annostellun massan sisälle muottiin. Ruiskutusvaihe kestää usein vain noin 2 sekuntia. On harvinaista, että ruiskutus kestäisi yli 3 sekuntia. Ruiskutusvaiheessa muottista täyttyy noin 95 %. [2]

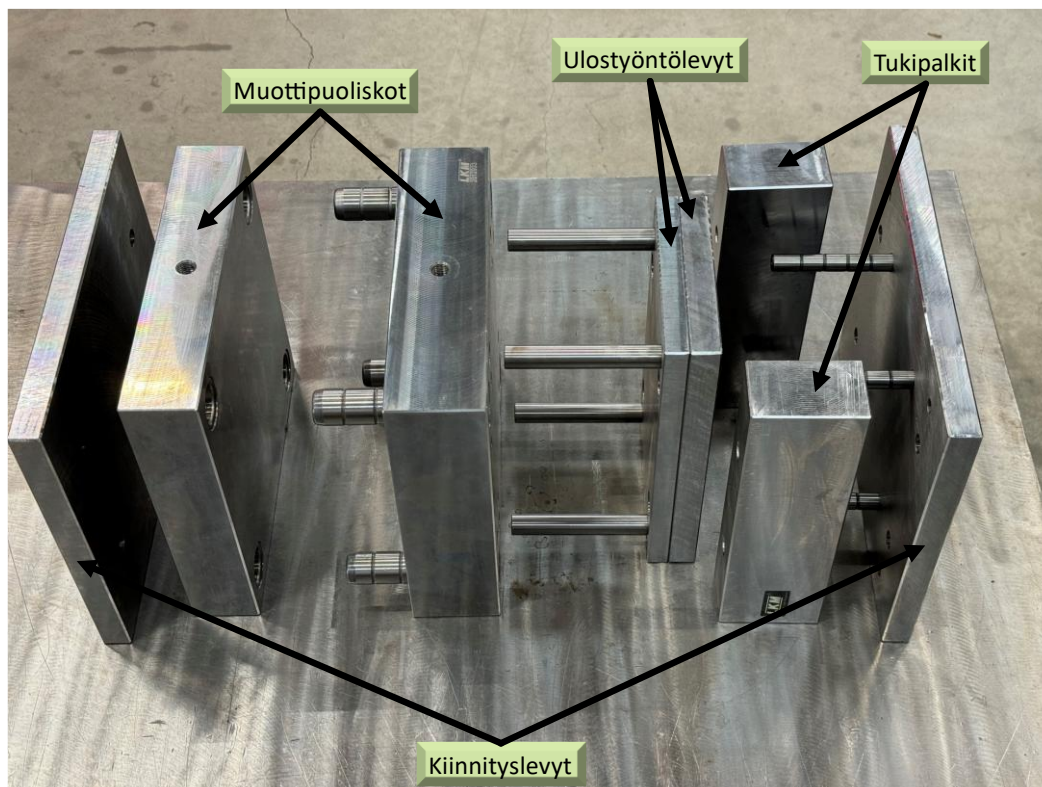
Jälkipaineella tarkoitetaan vaihetta ruiskutuksen jälkeen, jossa annosta painetaan muottiin kovalla paineella. Kun painetta pidetään yllä, niin muodostuu kappaleen viimeisetkin yksityiskohdat ja muotti täyttyy täysin. Jälkipaineen jälkeen ruuvi ei vielääkään ole täysin edessä, sillä ruuvien etuosaan jää aina pieni määrä sulaa muovia. Tätä kutsutaan massatyynyksi. Massatyyny on yleensä 3–6 mm pitkä. Mikäli massatyynyä ei jätetä, niin riittävää jälkipainetta ei pystytä luomaan, joka aiheuttaa lopputuotteena vajaita iskuja, vääntyilyä ja erikoisia kutistumia. [2]

## 2.4 Ruiskuvalumuotti

Ruiskuvalumuotti on keskeisin asia ruiskuvalussa. Muotti määrittää valetun kappaleen muodon. Muotti koostuu kahdesta puolesta, etumuotista ja takamuotista. Etumuotissa on suutin ja se osoittaa ruiskutusyksikköä päin ja takamuotti on kiinni liikkuvassa pöydässä, jota liikutetaan. Etu- ja takamuotin välistä kohtaa, josta muotti aukeaa kutsutaan jakotasoksi. [2]

Etu- ja takamuotin väliin koneistetaan kappaleen muoto ja valukanava. Etumuotissa on suutin, johon ruiskuvalukoneen tykki ajetaan kiinni. Takamuotissa on ulostyöntölevy, joka kiinnitetään ruiskuvalukoneen takapöytään. Kuvassa 2 näkyy ruiskuvalumuotin rungon osat. Se koostuu

kahdesta muottipuoliskosta, kahdesta kiinnityslevystä, kahdesta ulostyöntölevystä sekä kahdesta tukipalkista.



Kuva 2, Ruiskuvalumuotin runko, Tuukka Nurmela, 18.7.2024

Toimiakseen muottirunko tarvitsee tuotepinnat ja valukanavan, suuttimen ja ohjausrenkaan, ulostyöntötapit ja ulostyönönsovittimen koneelle. Myös vesikierrot tulee tehdä etu- ja takamuottiin. Vesikiertojen määrä tulee laskea raaka-aineen ja kappaleen koon mukaan. Myös eristelevyt kiinnityslevyihin ovat usein tarpeelliset, jotta muotin lämpö ei siirry ruiskuvalukoneeseen. Ulostyöntö levyyn koneistetaan paikat ulostyöntötapeille, jotka kulkevat muottipuoliskon läpi tuotepinnoille. Tämän avulla kappale ja valukanava irrotetaan muotin pinnalta. Suutin valmistetaan hieman kovemmasta materiaalista, kuin runko, joten sitä ei voi koneisteta suoraan runkoon. Suuttimia on kahden tyyppisiä. On tavallisia kartiomaisia suuttimia ja kuumasuuttimia. Kuumasuuttimen ympärille on kiedottu vastus, jolla suutin saadaan halutun lämpöiseksi. Kuumasuuttimen etuna on pienempi valukanava, jonka avulla ruiskuvalussa syntyvän hukan määrä on pienempi. Kuumasuuttimet ovat kalliimpia, mutta tietynlaiset materiaalit vaativat kuumasuutinta, jotta ruiskuvalaminen toimii ongelmitta. Suuttimelle tehdään myös ohjausrenkas, jolla muotti kohdistetaan ruiskuvalukoneeseen. Mikäli valmistettavan kappaleen geometria on monimutkaisempi, niin tarvitaan myös sivuttain

liikkuvia tuotepintoja eli keernoja. Keernoja voidaan liikuttaa hydrauliiikan tai vinotappien avulla. [2]

Muotin valmistus aloitetaan sen mallintamisesta. Mallinnus tehdään tietokoneella 3d-mallinnusohjelmistoa hyödyntäen. Tällöin mallia voidaan hyödyntää itse valmistuksessa, koska muotti valmistetaan teräksestä, niin se vaatii paljon tarkkaa tietokoneohjattua koneistamista. Muotin mallinnusvaiheessa tulee ottaa huomioon monia toiminnallisia asioita. Esimerkiksi muovin jäähtyessä kappale kutistuu aina hieman. Jotta tältä vältytään, niin mallinnetaan muotin tuotepinnat hieman suuremmiksi, jotta kappale on halutun kokoinen. Mallinnusvaiheessa tulee jo pohtia, miten kappale saadaan jäämään takamuottiin muotin avausvaiheessa. Usein suuttimesta muodostuva valukanava on kovin kiinni etumuotissa. Tämä ratkaistaan usein koukkumaisella ulostyöntötapilla. Muotissa ei saa olla täysin kohtisuoria pintoja jakotasoon nähden. Kaikissa pinnoissa tulisi olla pieni päästö. Kaasunpoistot tulee suunnitella, jotta ilma muotin välistä pääsee pois, eikä sekoitu muovin kanssa. Suunnitteluvaiheessa tulee jo miettiä, valukanavan toimintaa. On tärkeää, että muotti täyttyy tasaisesti. Tämä on erityisen tärkeää silloin, kun valetaan useampi osa samanaikaisesti. [2] Myös jos suunniteltu materiaali sisältää kuituja, niin on pohdittava sitä, kuinka kuidut asettuvat valun aikana, sillä kuidut asettuvat virtauksen suuntaisesti. [6]

## 3 Polypropeeni

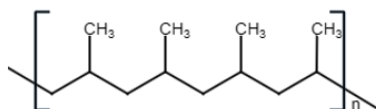
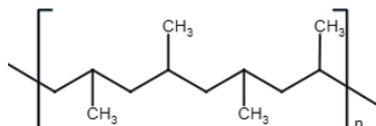
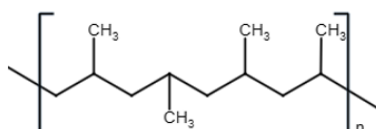
### 3.1 Johdanto

Polypropeeni (PP) on yksi maailman laajimmin käytetyistä muoveista. Polypropeeni on kevyt, joustava, lämmönkestävä, kemiallisesti resistiivinen, helposti prosessoitava ja halpa. Siksi se onkin saavuttanut suuren suosion teollisuudessa. Polypropeeni on hyvin kierrätettävä, mikä tekee siitä ympäristöystävällisen valinnan moniin sovelluksiin. [8] Polypropeenia käytetään paljon isommissa tuotannoissa, mutta siitä saadaan myös soveltuva eri teknisiin sovelluksiin pienilläkin muokkauksilla. Tässä luvussa käsitellään polypropeenia, sen ominaisuuksia, lisäaineita ja prosessointia. [7]

### 3.2 Polypropeenin rakenne

Polypropeeni on osakiteinen termoplastinen muovi. Osakiteisyys tarkoittaa, että se sisältää kiteisiä alueita sekä amorfisia alueita. Kiteiset alueet ovat järjestäytyneitä rakenteita. Niissä polymeeriketjut ovat tiiviisti pakkaantuneet säännölliseen muotoon. Amorfiset alueet sen sijaan ovat satunnaisesti järjestäytyneitä. Polypropeeni johdetaan polymeroinnin avulla propeenista. Sen ketjurakenne koostuu hiiliatomeista, jossa joka toinen hiiliatomi on yhdistetty metyyliryhmään ( $-CH_3$ ). [8]

Polypropeenin metyyliryhmän järjestäytyminen vaikuttaa polypropeenin ominaisuuksiin. Esimerkiksi ketjun jäykistyminen voi nostaa polymeerin kiteisen sulamispisteen arvoa tai häiritä molekyylin symmetriaa, mikä taas vähentää kiteisyyttä ja alentaa kiteisen sulamispisteen arvoa. Metyyliryhmän järjestäytymiseen vaikuttaa polymerointimenetelmä. Polypropeenia voi esiintyä pääsääntöisesti kolmessa eri muodossa, isotaktinen, syndiotaktinen ja ataktinen. Kuvassa 3 näkyy polypropeenin kolme esiintymismuotoa. [9]

**Isotaktinen Polypropeeni****Syndiotaktinen Polypropeeni****Ataktinen Polypropeeni**

Kuva 3, Isotaktinen -, syndiotaktinen - ja ataktinen polypropeeni, Tuukka Nurmela

Isotaktisessa polypropeenissa kaikki metyyliryhmät ovat samalla puolella ketjua, mikä mahdollistaa tiiviin pakkaantumisen ja korkean kiteisyyden. Tämä rakenne johtaa erinomaisiin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten suureen jäykkyyteen ja korkeaan sulamispisteeseen. Tämän vuoksi isotaktinen polypropeeni on teollisesti käytetyin muoto. Syndiotaktisessa polypropeenissa metyyliryhmät vuorottelevat säännöllisesti ketjun molemmiin puolin, mikä antaa sille kohtuullisen kiteisyyden ja hyvät lämmönkesto-ominaisuudet, mutta hieman matalamman sulamispisteen ja jäykkyyden verrattuna isotaktiseen muotoon. Ataktinen polypropeeni on puolestaan rakenteeltaan epäsäännöllinen, mikä estää kiteiden muodostumisen ja tekee materiaalista amorfisen, pehmeän ja elastisen. Tämän vuoksi ataktista muotoa ei yleensä käytetä sellaisenaan teknisissä sovelluksissa, mutta sitä voi esiintyä sivutuotteena polymerointiprosessissa. [10]

### 3.3 Kemialliset ominaisuudet

Polypropeeni on termoplastinen muovi eli kestopuovi. Se tarkoittaa, että polypropeeni pehmenee kuumentaessa ja kovettuu jäähtyessään. Sitä voidaan muokata useaan kertaan ilman merkittävää kemiallista muutosta. Tämä on erityisen hyödyllistä valmistusmenetelmissä kuten ruiskuvalu tai ekstruusio. Polypropeeni on puolijäykkä, sitkeä ja omaa hyvän väsymiskestävyyden. Se on myös yksi kevyimmistä teollisesti käytetyistä muoveista, jolla on hyvät kemialliset ominaisuudet. Se kestää erinomaisesti laimennettuja happoja, emäksiä, sekä monia orgaanisia liuottimia, kuten esimerkiksi alkoholeja. Polypropeeni omaa myös hyvän kestävyuden aldehyddeja, estereitä, alfaattisia hiilivetyjä ja ketoneja vastaan. Aromaattisia,

halogenoituja hiilivetyjä sekä hapettavia aineita vastaan kestävyys on rajoitettua. Myöskään pitkäaikaista UV-säteilyä polypropeeni ei kestä. [8]

### **3.4 Polypropeenin lisäaineet**

Lisäaineilla on suuri merkitys muoviteollisuudessa. Lisäaineiden avulla voidaan parantaa muovien prosessoitavuutta ja soveltuvuutta. Lisäaineet voidaan karkeasti jaotella apuaineisiin, täyteaineisiin sekä väreihin ja pigmentteihin. Apuaineiden avulla voidaan parantaa prosessoitavuutta, lämmönkestoa, mekaanista lujuutta, iskunkestävyyttä, UV-säteilyn ja hapettumisen kestävyttä, paloturvallisuutta sekä sähköisiä ja optisia ominaisuuksia. Apuaineita lisätään usein vain muutama tilavuusprosentti. Toisin kuin apuaineita, niin täyteaineita lisätään vähintään 8 tilavuusprosenttia. Täyteaineiden avulla voidaan parantaa polypropeenin jäykkyyttä, mittapysyvyyttä, kulutuskestävyyttä, lämpölaajenemisen hallintaa ja kustannustehokkuutta. [11]

Polypropeenin alhainen veto- ja iskunkestävyys on johdattanut paljon täyteaineiden käyttöön, sillä se soveltuu hyvin täyteaineiden käyttöön. Ennen polypropeenin täyteaineena käytettiin paljon talkkia kustannusten vähentämiseksi. Tällä hetkellä lisäaineilla pyritään parantamaan polypropeenin jäykkyyttä, lujuutta, sitkeyttä, mittojen vakautta ja jopa estetiikkaa. Näiden ominaisuuksien parantamiseksi on käytetty useita partikkelimaisia tai kuitumaisia täyteaineita, kuten lasikuitua, nanosavea, hiilinanoputkia ja kumia. Kun partikkeleiden sekoitus polypropeenimatriisiin yhdistetään ruiskuvalun kanssa, saadaan hyvin edullinen tapa valmistaa monimutkaisia muotoja, jotka ovat kevyitä ja kestäviä. [7] Yksi laajinten käytetyistä kuituvahvisteista on lasikuitu. Se on synteettisesti valmistettu kuitu ja se tarjoaa erinomaista lujuutta ja kestävyttä. Lisäksi lämpöstaattiset, iskunkesto, kemialliset, kitka- ja kulumisominaisuudet yleensä paranevat. Lasikuitu on saavuttanut suuren suosion sen edullisuuden vuoksi. [12]

### **3.5 Polypropeenin prosessointi**

Polypropeeni on herkkä valmistusprosessien kuten ruiskuvalun aikana syntyville vioille. Ruiskuvaluprosessin aikana polypropeeni altistuu paljon kovalle sekoitukselle, voimakkailla virtauksilla, sekä korkeille lämpötiloille ja paineille. Ruiskuvalu saattaa muodostaa monia erilaisia virheitä, jotka heikentävät lopputuotteen kestävyttä. Tyypillisiä tämänlaatuisia virheitä ovat virtausviivat, yhtymäsaumat ja kutistuma. Polypropeenin melko korkea prosessointilämpötila voi saada kappaleessa helposti aikaan vääntyilyä ja kutistumaa.

Virtausviivat syntyvät, kun kaksi eri muovivirtausta kohtaavat virraten samaan suuntaan. Yhtymäsaumaksi kutsutaan kohtaa, jossa kaksi muovivirtausta yhdistyy keskenään. Nämä virheet usein näkyvät myös pintavirheinä. Usein yhtymäsauman muodostuminen luo kappaleeseen heikon kohdan. Yhtymäsauman vahvuuden määrittää materiaalin käyttäytyminen, kappaleen monimutkaisuus ja ruiskuvalun ajoparametrit. [7] Yhtymäsaumaa voidaan hieman vahvistaa prosessiparametrien muutoksilla, kuten muotin tai ruuvin lämpötilan nostolla [2].

Ruiskuvalulla voidaan valmistaa muovikomposiitteja hyvin tehokkaasti. Yksi ruiskuvalussa käytetty tekniikka on käyttää raaka-ainepellettejä, joiden rakenteeseen on sidottu lyhyitä kuituja. Kuidut altistuvat myös ruiskuvaluprosessin prosessoinnille samalla tavalla, kuin muovimatriisi. Kuitenkin kuitujen suorituskykyyn vaikuttaa niiden pituus ja orientaatio, jolloin materiaaliin. Tämän vuoksi materiaali on herkempi syntyville materiaalivirheille. Esimerkiksi yhtymäsauman vahvistamiseen kuitulujitetun muovin kanssa on vähemmän mahdollisuuksia, sillä kuidut järjestäytyvät virtauksen mukaan ja usein yhtymäsauma esiintyy valun loppuvaiheessa, jolloin muovin virtaus hidastuu ja pysähtyy. Tällöin kuitujen järjestäytyminen on satunnaisempaa. [7]

Polypropeeniin syntyvät viat korostuvat kuituvahvisteisen polypropeenin kanssa, sillä kuitujen järjestäytyminen ja rikkoutuminen vaikuttaa merkittävästi materiaalin kestävyyskykyyn. Siksi onkin tärkeää tietää, kuinka ruiskuvaluprosessi vaikuttaa kuitujen katkeiluun ja järjestäytymiseen. Tutkimukset osoittavat, että korkeampi ruiskutusnopeus luo paremman kuitujen järjestäytymisen, mikä vahvistaisi kappaleen kestävyyttä, mutta samaan aikaan se rikkoo enemmän kuituja, joka taas laskee kappaleen kestävyyttä, johtaen lopulta heikompaan kestävyyskykyyn. Tätä voidaan hieman kompensoida alentamalla muotin lämpötilalla, joka saa aikaan paremman kuitujen järjestäytymisen. Monimutkaisempien muotojen tapauksessa kuitujen järjestäytyminen on erityisen monimutkaista. Valuvikojen, kuten yhtymäsauman läheisyydessä kuidut järjestäytyvät epäyhdenmukaisesti, sekä vaihtuva lasikuitupitoisuus geometrian sisällä muokkaa kappaleen murtumiskäyttäytymistä. [7]

## 4 Vetokoe

Vetokoe on materiaalin mekaanisia ominaisuuksia mittaava kokeellinen menetelmä. Siinä tietyistä materiaalista valmistettuun näytekappaleeseen kohdistetaan vetovoima niin kauan, kunnes materiaali rikkoutuu. Materiaalin mekaaniset ominaisuudet kuvastavat materiaalin käyttäytymistä ulkoisten voimien ja kuormitusten alaisena. Tutkimalla näitä ominaisuuksia saadaan tieto materiaalien mekaanisesta suorituskyvystä ja voidaan arvioida eri materiaalien soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin. [13]

Vetokokeen näytteen poikkileikkaus on joko pyöreän tai suorakaiteen muotoinen. Usein näyte on leveä kiinnityskohdista ja kapea keskeltä, jolloin murtumispiste saadaan rajoitettua kapealle alueelle ja vältetään rikkoutuminen kiinnikkeiden läheisyydessä. [13] Vetokokeelle on useita standardeja riippuen tutkittavasta materiaalista. Yksi kansainvälinen standardi on ISO 527. Tämä standardi on suunniteltu polymeerimateriaaleille ja siinä käytetty näytekappale on suorakaiteen muotoinen. Standardeissa määritellään hyvin tarkkaan kaikki testiin liittyvät tekijät. [14]

Jännitys ja venymä ovat vetokokeen keskeiset käsitteet. Näiden välinen suhde määrittää materiaalin käyttäytymisen kuormituksen alla. Jännitys kuvaa materiaalin sisäistä kuormitusta. Jännitys voidaan laskea käyttämällä niin sanottua insinööriä jännitystä. Insinööriä jännitys  $\sigma$  voidaan laskea kaavan 1 avulla

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

missä  $F$  on kappaleeseen kohdistuva voima newtoneina ja  $A_0$  näytteen poikkipinta-ala. Jännityksen SI-yksikkö on pascal. Insinööriä jännityksen ja todellisen jännityksen keskeinen ero on laskussa käytetty näytteen poikkipinta-ala. Insinööriä jännityksessä käytetään aina alkuperäistä poikkipinta-alaa riippumatta siitä, muuttuuko pinta-ala vetokokeen aikana. Toinen vetokokeen keskeinen käsite on venymä  $\varepsilon$ . Se kuvaa kappaleen pituuden muutosta suhteessa alkuperäiseen pituuteen. Venymä lasketaan kaavan 2 avulla

$$\varepsilon_z = \frac{l_i - l_0}{l_0}, \quad (2)$$

missä  $l_i$  on kappaleen pituus ja  $l_0$  kappaleen alkuperäinen pituus. Venymä on yksikötön, mutta usein käytetään esimerkiksi  $mm/mm$  kuvaamaan venymää. [15]

Jännityksen ja venymän avulla voidaan muodostaa jännitys-venymäkäyrä, josta nähdään jännityksen ja venymän suhdetta. Jännitysvenymäkäyrästä nähdään hyvin nopeasti, minkä tyyppinen materiaali on kyseessä. Usein kuvaajasta katsotaan ensin materiaalin elastisuutta ja plastisuutta. Mahdollinen elastinen alue esiintyy aina kuvaajan alussa ja sen tunnistaa kuvaajan lineaarisuudesta. Jännitysvenymäkäyrän eri alueista voidaan selvittää materiaalin keskeisiä mekaanisia ominaisuuksia, kuten kimmomoduuli, myötölujuus, sitkeys, murtolujuus ja murtovenymä. [15]

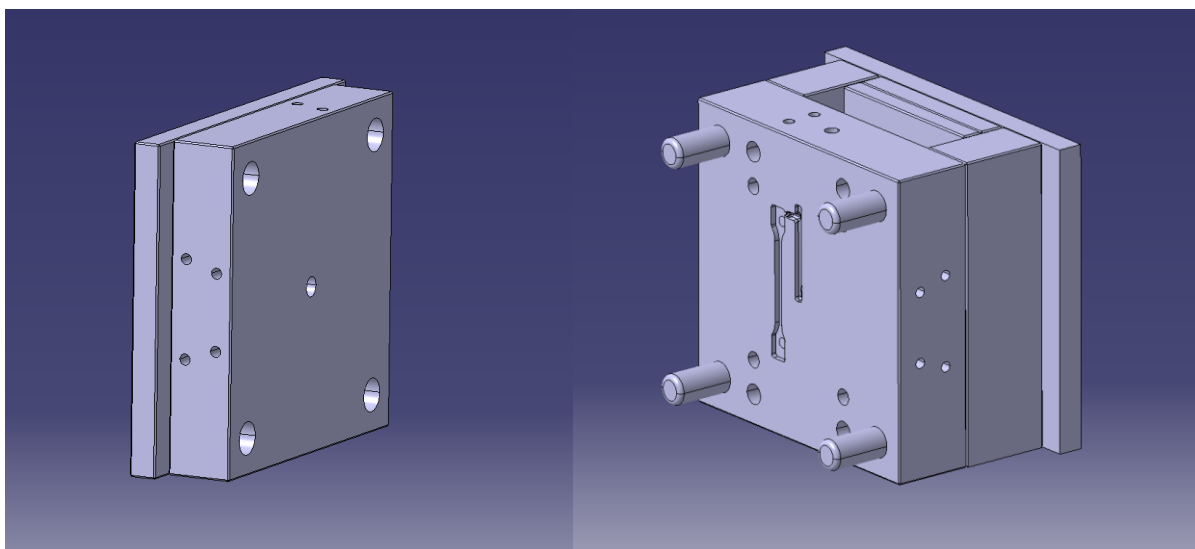
Kimmomoduuli kuvaa materiaalin jäykkyyttä. Jäykkä materiaali vastustaa hyvin minkäänlaista muodonmuutosta. Kimmomoduuli saadaan selville kuvaajan lineaarisen eli elastisen alueen kulmakertoimesta. Elastisen alueen jälkeen kappaleessa saattaa alkaa muodostua plastista muodonmuutosta. Pistettä, jossa tämä vaihdos tapahtuu, kutsutaan myötölujuudeksi. Tämän määrittäminen on tarpeellista ainoastaan, mikäli materiaalilla on selkeä elastinen ja plastinen alue. Myötölujuuden tarkka määrittäminen on kuitenkin haasteellista, jonka vuoksi sen määrittämiseen on kehitetty useita sääntöjä, mutta yksi tunnetuimmista on 0,2 %:n venymäperiaate. Siinä kimmomoduulin avulla muodostetaan suora, joka sijoitetaan alkamaan 0,2 % venymän kohdalta. Tällöin jännitys-venymäkäyrän ja muodostetun suoran leikkauspisteestä saadaan myötölujuus. [13]

Sitkeys on materiaalin ominaisuus, joka kuvaa sen kykyä vastaanottaa energiaa ennen murtumista. Sitkeys saadaan selville jännitys-venymäkäyrän alle jäävästä pinta-alasta. Murtolujuus kuvastaa jännitystä, jossa materiaali rikkoutuu. Kuvaajasta katsottuna se on piste, jossa materiaali saavuttaa korkeimman jännityksen. Murtolujuus ei ole aina sama asia, kuin murtumispiste. Murtovenymä taas on kappaleessa muodostunut plastinen muodonmuutos, joka muodostuu koko kokeen aikana. Tämä selvitetään vähentämällä kokeen lopullisesta venymästä elastinen venymä. [13]

## 5 Materiaalit ja menetelmät

### 5.1 Muotti ja vetosauva

Vetokappaletta varten valmistettiin ruiskuvalumuotti. Tämä toteutettiin valmiiseen muottirunkoon. Runko näkyy kuvassa 2. Ensimmäinen vaihe oli mallintaa haluttu kappale ja sille muotti. Vetokappale suunniteltiin ISO 527 standardin mukaan. Etumuottiin koneistettiin vain suuttimen ja ohjausrenkaan paikka. Suuttimena käytettiin Meusburgerin E 1605 1 tuuman syöttösuutinta säteellä 15.5 ja 56 mm pituudella. Takamuottiin koneistettiin tuotepinnat ja ulostyöntömekanismi. Muotin tuotepinnat skaalattiin 0,006 % standardia suuremmaksi, jotta kompensoidaan kutistuma. Tuotepinnoille tehtiin yhden asteen päästöt ja ne koneistettiin suoraan runkoon, jolloin ei tarvita erillisiä päämuotoinserttejä. Etumuottiin ja takamuottiin tehtiin molempiin kahdet vesikierrot. Kuvassa 4 on 3d-malli muotista, jossa vasemmalla etumuotti ja oikealla takamuotti.



Kuva 4, Etu- ja Takamuottin 3D-mallit, Tuukka Nurmela

### 5.2 Celstran PP-GF30-0403

Tutkittava materiaali on komposiittimuovi. Materiaalikoodi ISO 1043-1:n mukaan: PP Polypropeeni, vahvistettu 30 painoprosenttisilla pitkillä lasikuiduilla. Väri on musta. Valmistaja lupaa muovilla valmistetuille osille erinomaiset mekaaniset ominaisuudet, kuten suuri lujuus ja jäykkyys yhdistettynä korkeaan lämpöpoikkeutukseen. Materiaali on pilkottu lieriömäiseksi muovipelletiksi ja sidotut kuidut ovat 11 mm pitkiä. Suositeltu materiaalin kuivaus on 2 tuntia 90–100 °C lämpötilassa. Valmistaja on ilmoittanut ruiskutusnopeudeksi vain

”hidas” ja vastapaineeksi maksimissaan 30 baaria. Annostelunopeudeksi 40 mm ruuville on ilmoitettu 50 kierrosta minuutissa. [16]

### 5.3 Kappaleiden ruiskuvalu

Kappaleiden ruiskuvaluun käytettiin Haitianin 160 t ruiskuvalukonetta, jossa on hydraulinen sulkuyksikkö ja sähköinen ruuviyksikkö. Ruuvin halkaisija on 40 mm. Muotti asennettiin koneen väliin ja kiinnitettiin vesikiertot. Vesikierto asetettiin 30°C asteeseen 7 l/min virtauksella. Tämän jälkeen säädettiin ruiskuvalukoneen ajoarvot ja ohjelmoitiin robotti. Robotin avulla prosessi saadaan täysin automaattiseksi, jolloin prosessista saadaan mahdollisimman tasainen, sillä jokaisen näytteen jaksonaika on täysin sama, eikä kappaleet vaurioitu tällöin. Yhden kappaleen jaksonajaksi muodostui 41 sekuntia. Annostelun taka-asemaksi asetettiin 30 mm ja vastapaineeksi 5 baaria. Ruiskutusaineeksi asetettiin 100 baaria ja nopeudeksi 5 mm/s. Jälkipaineeksi asetettiin 36 baaria. Massatyynyä ruuvin eteen jälkipaineen jälkeen jäi 8,6 mm. Jälkipaineajaksi asetettiin 12 sekuntia ja jäähdytysajaksi asetettiin 20 sekuntia, jotta saadaan minimoitua paksun kappaleen kutistuma ja vääntyily. Taulukossa 1 on esitettyinä ruuville asetetut lämpötilat, jossa alue 1 on lähimpänä kärkeä. Taulukossa 2 näkyy eri annostelunopeuksilla saavutetut ajat. Tarkemmat ajoarvot löytyvät liitteistä 1.

Taulukko 1 Ruuvin lämpötilat

	<b>Alue 1</b>	<b>Alue 2</b>	<b>Alue 3</b>	<b>Alue 4</b>	<b>Alue 5</b>	<b>Alue 6</b>
<b>Lämpötila (°C)</b>	245	255	255	250	235	230

Taulukko 2 Annostelunopeudet

	<b>40 1/min</b>	<b>80 1/min</b>	<b>120 1/min</b>	<b>160 1/min</b>
<b>Annosteluaika (s)</b>	4,5	2,7	2	1,2

Materiaali kuivattiin Wittmann Feedmax S3-NET kuivaimella 95 asteen lämmössä 2 tuntia. Muotin asennuksen jälkeen tyhjennettiin ruuvi ja kaadettiin 350 g materiaalia ruuville. Annosteltiin ensimmäinen annos käsin ja käynnistettiin täysautomaattiajo, jolloin robotti kerää kappaleet muotin välistä koneen sivulle. Ensimmäiset 5 kappaletta hylättiin, jonka jälkeen kerätään 5 näytettä. Pussit merkittiin numeroin 1–5. Ensimmäinen ajo suoritettiin annostelun kierrosnopeudella 40. Tämän jälkeen pysäytettiin kone, tyhjennettiin ruuvi ja vaihdettiin

seuraava annostelunopeus. Nämä toimenpiteet suoritettiin 40 -, 80 -, 120 -, 160 1/min annostelun kierrosnopeuksilla.

#### 5.4 Kappaleiden vetokoe

Vetokoe suoritettiin Lloyd Instrumentsin LR 30 K -yleisaineenkoetuskoneella. Esijännitysvoimaksi asetettiin 100 newtonia. Myötönopeus ja murtumisnopeus asetettiin 10 mm/min. Työssä käytettiin kuvan 5 mukaisia tasaisia kiinnikkeitä.



Kuva 5, Lloyd Instrumentsin LR 30 K kiinnikkeet ja kiinnitetty kappale, Tuukka Nurmela

Kappaleet kiinnitettiin kuvan 5 mukaisesti ja käsin kiristäen. Ruiskutuspuiste sijoitettiin aina ylempään kiinnityskampaan. Ennen jokaista mittausta koneelle kirjoitettiin kappaleen poikkipinta-ala ja pituus. Samalla mitattiin ruiskuvalussa syntyneen kutistuman syvyys. Mittaukset suoritettiin käsin työntömittaa käyttäen. Mittauksen jälkeen näyte irrotettiin ja laitettiin takaisin pussiin. Taulukkoon 3 on listattu näytteiden mitat. Ensimmäisellä sarakkeella lukee näytenumero, toisella annostelunopeus, kolmannella paksuus, neljännellä leveys ja viidennellä sarakkeella kutistuma. Kapeimman kohdan pituus kaikilla kappaleilla oli 80 mm.

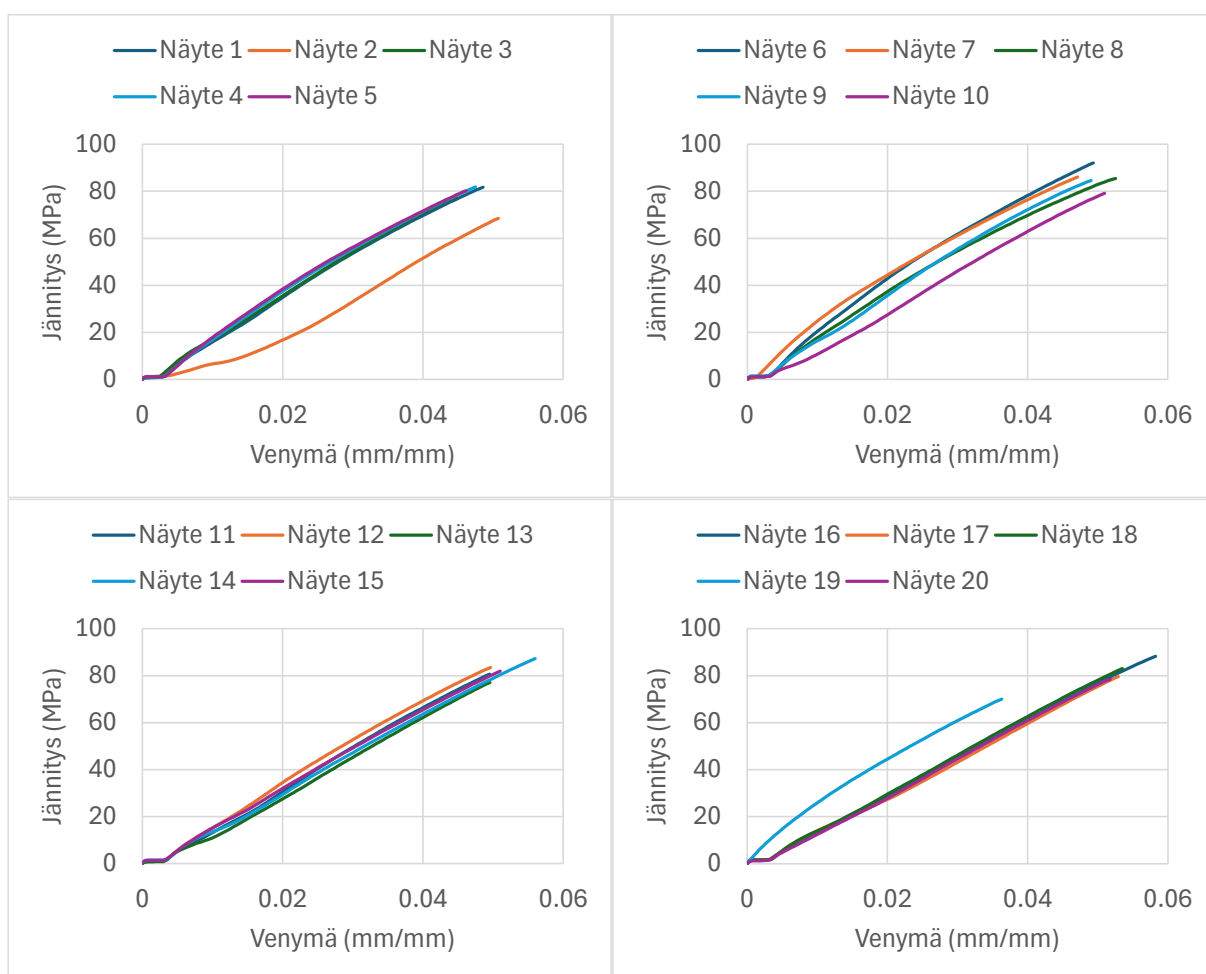
Taulukko 3 Näytteiden mitat

<b>Näyttenumero</b>	<b>Annostelunopeus (1/min)</b>	<b>Paksuus (mm)</b>	<b>Leveys (mm)</b>	<b>Kutistuma (mm)</b>
<b>Näyte 1</b>	40	5.06	9.97	0.24
<b>Näyte 2</b>	40	5.06	9.97	0.16
<b>Näyte 3</b>	40	5.06	9.97	0.14
<b>Näyte 4</b>	40	5.05	9.92	0.13
<b>Näyte 5</b>	40	5.05	9.97	0.16
<b>Näyte 6</b>	80	5.02	9.92	0.13
<b>Näyte 7</b>	80	5.05	9.89	0.22
<b>Näyte 8</b>	80	5.05	9.89	0.14
<b>Näyte 9</b>	80	5.04	9.87	0.10
<b>Näyte 10</b>	80	5.03	9.97	0.09
<b>Näyte 11</b>	120	5.05	9.93	0.17
<b>Näyte 12</b>	120	5.05	9.89	0.17
<b>Näyte 13</b>	120	5.04	9.97	0.12
<b>Näyte 14</b>	120	5.05	9.97	0.10
<b>Näyte 15</b>	120	5.06	9.89	0.11
<b>Näyte 16</b>	160	5.06	9.92	0.16
<b>Näyte 17</b>	160	5.04	9.97	0.13
<b>Näyte 18</b>	160	5.05	9.92	0.15
<b>Näyte 19</b>	160	5.05	9.92	0.09
<b>Näyte 20</b>	160	5.05	9.93	0.15

## 6 Tulokset ja pohdinta

### 6.1 Tulokset

Tuloksiksi saatiin lista jännityksen ja venymän arvoja, joiden avulla muodostetaan jännitysvenymäkäyrät. Tuloksista jätetään huomioimatta kaikki negatiiviset tulokset, sekä pisteet rikkoutumisen jälkeen, koska nämä eivät ole oleellisia pisteitä tuloksien kannalta. Kuvassa 6 näkyy jännitys-venymäkäyrät eri annostelunopeuksien näytteille. Vasemmassa yläkulmassa on annostelunopeuden 40 1/min, oikeassa yläkulmassa 80 1/min, vasemmassa alakulmassa 120 1/min ja oikeassa alakulmassa 160 1/min näytteet.



Kuva 6, Annostelunopeuksien 40 -, 80 -, 120 - ja 160 1/min näytteiden jännitys-venymäkäyrät, Tuukka Nurmela

Taulukoidaan tulosten tärkeimmät tulokset, jotta nähdään tarkat murtolujuudet ja venymät.

Taulukkoon 4 on merkitty ensimmäiselle sarakkeelle näytenumero, toiselle annostelunopeus, kolmannelle murtolujuus ja neljännelle venymä.

Taulukko 4 Näytteiden murtolujuudet ja venymät

Näytenumero	Annostelunopeus (1/min)	Murtolujuus (MPa)	Venymä (mm/mm)
Näyte 1	40	81.734	0.049
Näyte 2	40	68.486	0.051
Näyte 3	40	77.439	0.045
Näyte 4	40	81.817	0.047
Näyte 5	40	80.230	0.046
Näyte 6	80	92.042	0.049
Näyte 7	80	86.072	0.047
Näyte 8	80	85.410	0.053
Näyte 9	80	84.523	0.049
Näyte 10	80	79.147	0.051
Näyte 11	120	80.690	0.050
Näyte 12	120	83.471	0.050
Näyte 13	120	77.079	0.050
Näyte 14	120	87.249	0.056
Näyte 15	120	81.933	0.051
Näyte 16	160	88.249	0.058
Näyte 17	160	79.606	0.053
Näyte 18	160	83.093	0.053
Näyte 19	160	69.981	0.036
Näyte 20	160	78.475	0.052

## 6.2 Pohdinta

Kuvaajista huomataan, että kyseinen materiaali on hyvin jäykkä, sillä kuvaajat ovat hyvin lineaarisia ja kappale rikkoutuu ennen plastista muodonmuutosta. Tyypillisesti muovit ovat plastisia, mutta polypropeeniin lisätty lasikuitu saa materiaalista huomattavasti jäykemmän. Kuvaajien välillä on vain vähäistä hajontaa lukuun ottamatta näytteitä 2 ja 19, jotka poikkeavat selvästi muista.

Materiaalin valmistaja on ilmoittanut materiaalin murtolujuudeksi 110 MPa ja murtovenymäksi 2,2 % testistandardilla ISO 527-2/1A [16]. Taulukosta 4 katsottuna tämän työn suurin saavutettu murtolujuus oli 92.042 MPa, joka on noin 18 MPa matalampi kuin materiaalin

valmistajan ilmoittama murtolujuus. Kaikkien näytteiden venymien keskiarvo oli 0,0498 mm/mm eli 4,98 %. Se on yli kaksinkertainen materiaalin valmistajan tuloksiin verrattuna. ISO 527 -standardin mukaan tulee hylätä kaikki näytteet, joissa yli 0,1 mm kutistuma [14]. Tämän työn näytteissä suurimmassa osassa taulukon 3 kutistuma on yli standardin sallitun rajan.

Yhdeksi mahdolliseksi selittäväksi tekijäksi alhaisemmalle murtolujuudelle voidaan esittää ruiskuvalun muita ajoarvoja. Esimerkiksi ruiskutusnopeus vaikuttaa hyvin paljon kuitujen järjestäytymiseen ja kuitujen katkeiluun [7]. Työssä jouduttiin käyttämään matalampaa jälkipainetta, koska korkealla jälkipaineella kappale oli haastava ulostyöntää ilman vaurioita, sillä kappaleen keskikohta jäi lujasti kiinni takamuottiin. Tämä aiheutti kappaleen vääntymistä ulostyönnön aikana mahdollisesti vaurioittaen kappaletta. Korkean jälkipaineen hyöty on usein siinä, että kappaleen paino saadaan hieman korkeammalle, koska materiaali pakkautuu tiukemmin muottiin [2]. Tämän myötä myös kappaleen kutistuma pienenee, mikä tässä työssä oli yli standardin sallitun rajan [2]. Vaikka materiaalin valmistajan tulokset eroavat työn tuloksista, niin sillä ei kuitenkaan ole merkitystä tässä työssä, koska verrataan näytteitä keskenään toisiinsa.

Tulosten avulla voidaan selvittää myös kimmomoduuli. Tässä työssä tutkitaan annostelunopeuden vaikutusta kuitujen katkeiluun ja kuitujen katkeilu vaikuttaa suoraan kappaleen murtolujuuteen [7]. Tällöin tärkein tutkittava tieto on murtolujuus, eikä kimmomoduulin laskeminen tuo merkittävää lisäarvoa tutkimukselle. Laaditaan taulukko, jossa verrataan eri annostelunopeuksien näytteiden murtolujuuksien keskiarvoja. Taulukossa 4 on listattu kaikkien näytteiden murtolujuudet, joiden perusteella lasketaan jokaiselle annostelunopeudelle murtolujuuksien keskiarvo. Taulukoon 5 on laskettu nämä keskiarvot.

Taulukko 5 Näytteiden murtolujuuksien keskiarvot

<b>Annostelunopeus</b>	<b>40 1/min</b>	<b>80 1/min</b>	<b>120 1/min</b>	<b>160 1/min</b>
<b>Murtolujuuksien keskiarvo</b>	77.941 MPa	85.439 MPa	82.084 MPa	79.881 MPa

Taulukon 5 murtolujuuksien keskiarvojen välinen hajonta on 2,786 MPa. Keskiarvojen perusteella nähdään, ettei murtolujuuksien ja annostelunopeuksien välillä ole havaittavissa korrelaatiota.

Tuloksista myös huomataan, että näytteet 2 ja 19 poikkeavat muista näytteistä huomattavasti. Nämä voisi olla merkki materiaalivirheestä, joka muodostuu raaka-aineen tai kappaleen

valmistusprosessin aikana. Näytteet eivät kuitenkaan korreloi annostelunopeuden kanssa, sillä poikkeavia tuloksia muodostui vain kaksi, joista toinen 40 1/min ja toinen 160 1/min annostelunopeudella. Tämän vuoksi on hyvin epätodennäköistä, että poikkeavat tulokset muodostaisivat minkäänlaista korrelaatiota annostelunopeuden kanssa. Poikkeavia näytteitä voidaan pitää satunnaisena virheenä, eikä systemaattisena virheenä. Laaditaan toinen taulukko, josta jätetään näytteet 2 ja 19 pois. Murtolujuuksien keskiarvot ilman näytteitä 2 ja 19 on koottu taulukkoon 6. Ensimmäisellä rivillä lukee annostelunopeus ja toisella murtolujuuksien keskiarvo

Taulukko 6 Murtolujuudet ilman näytteitä 2 ja 19

<b>Annostelunopeus</b>	<b>40 1/min</b>	<b>80 1/min</b>	<b>120 1/min</b>	<b>160 1/min</b>
<b>Murtolujuuksien keskiarvo</b>	80.305 MPa	85.439 MPa	82.084 MPa	82.356 MPa

Taulukon 6 murtolujuuksien keskiarvojen välinen hajonta on 1.847 MPa. Nähdään, että näytteiden 2 ja 19 poissulkemisen jälkeen keskiarvojen välinen hajonta pieneni, mutta korrelaatiota ei tällöinkään ole havaittavissa. Työn tulokset osoittavat, ettei annostelunopeudella ollut vaikutusta lasikuituvahvisteisen polypropeenin mekaaniseen suorituskykyyn. Lasikuituvahvisteisen polypropeenin tuotannossa voidaan käyttää 40 mm ruuvilla annostelunopeutta 160 1/min asti ilman materiaaliin syntyvää vahinkoa.

Ruiskuvalutuotannossa on tärkeää huomioida myös muut prosessiparametrit, kuten ruiskutusnopeus, vastapaine sekä muotin ja ruuvien lämpötila. Korkeamman ruiskutusnopeuden on jo havaittu rikkovan enemmän kuituja samalla johtaen kuitujen parempaan orientaatioon [7]. Kuitujen järjestäytymisellä on myös merkittävä vaikutus lopputuotteen kestävyteen, joten valettavan kappaleen muodon monimutkaisuus on myös merkittävä tekijä kuitujen käyttäytymiseen. Monimutkaisempaan muotoon saattaa syntyä yhtymäsaumoja ja virtausviivoja, joissa kuitujen järjestäytyminen on epäsäännöllisempää [7]. Tämä johtaa heikon kohdan muodostumiseen.

## 7 Yhteenveto

Tutkimuksessa tarkasteltiin lasikuituvahvisteisen polypropeenin mekaanisia ominaisuuksia ja erityisesti sen murtolujuuden ja annostelunopeuden välistä suhdetta. Kokeelliset tulokset osoittivat, että tutkittu materiaali käyttäytyy hauraasti. Työssä valettiin 20 näytettä, viisi näytettä kullakin annostelunopeudella. Näytteiden murtolujuuksien välillä havaittiin vähäistä hajontaa, lukuun ottamatta näytteitä 2 ja 19, jotka poikkesivat normista. Nämä näytteet luokiteltiin satunnaiseksi virheeksi, sillä näyte 2 esiintyi hitaimmalla annostelunopeudella ja näyte 19 taas nopeimmalla.

Eri annostelunopeuden näytteiden murtolujuuksien keskiarvojen välinen hajonta oli 2,786 MPa ja ilman näytteitä 2 ja 19 hajonta putoaa 1,847 MPa asti. Taulukossa 7 on listattu murtolujuuksien keskiarvot ilman näytteitä 2 ja 19.

Taulukko 7, tulokset poissulkien näytteet 2 ja 19

<b>Annostelunopeus</b>	<b>40 1/min</b>	<b>80 1/min</b>	<b>120 1/min</b>	<b>160 1/min</b>
<b>Murtolujuuksien keskiarvot</b>	80,305 MPa	85,439 MPa	82,084 MPa	82,356 MPa

Taulukon 7 perusteella kappaleiden murtolujuuksien ja annostelunopeuksien välillä ei havaittu korrelaatiota. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, ettei annostelunopeudella tutkituilla nopeuksilla ole vaikutusta lasikuituvahvisteisen polypropeenin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten murtolujuuteen. Tämän vuoksi polypropeenin tuotannossa voidaan 40 mm ruuvilla hyödyntää annostelunopeuksia 160 1/min asti ilman, että se heikentäisi lopputuotteen kestävyyttä.

## Lähteet

- [1] Fu, H., Xu, H., Liu, Y., Yang, Z., Kormakov, S., Wu, D., & Sun, J. (2020). *Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites*. *ES Materials & Manufacturing*, 8, 3–23. Saatavilla: <https://www.espublisher.com/journals/articledetails/285> (viitattu 9.4.2025)
- [2] Bryce, D. M. (1996). *Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals*, Society of Manufacturing Engineers.
- [3] SyBridge Technologies. *Advantages and disadvantages of injection molding*. Saatavilla: <https://sybridge.com/advantages-and-disadvantages-injection-molding/> (viitattu 9.4.2025)
- [4] RJG Inc. *Best practices for drying plastic resins*. Saatavilla: <https://rjginc.com/best-practices-for-drying-plastic-resins/> (viitattu 9.4.2025)
- [5] MyPlasticMold. *Why cooling is important for injection molding*. Saatavilla: <https://myplasticmold.com/why-cooling-important-for-injection-molding.html> (viitattu 9.4.2025)
- [6] Zainudin E. S., Sapuan S. M., Sulaiman, S., & Abdan, M. M. H. (2002). *Fiber orientation of short fiber reinforced injection molded thermoplastic composites*: *Journal of Injection Molding Technology*. Saatavilla: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/fiber-orientation-short-reinforced-injection/docview/217288494/se-2>. (viitattu 9.4.2025)
- [7] Wang W., Zhang, Y., Zeng, Y., & Wang, W. (2020). *Polypropylene: Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties*. In *Polypropylene Blends and Composite: Processing-Morphology-Performance Relationship of Injected Pieces*. (Chapter 4). IntechOpen. Saatavilla: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73995> (viitattu 9.4.2025)
- [8] Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. Saatavilla: <https://www.vitalitymedical.com/pdf/PromisingPlastic.pdf> (viitattu 9.4.2025)
- [9] Vincenzo B., & Cipullo R. (2001). *Microstructure of polypropylene*, *Progress in Polymer Science*, Volume 26, Issue 3, 2001, ISSN 0079-6700. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00046-0). (viitattu 9.4.2025)
- [10] De Rosa, Claudio, et al. “Mechanical Properties and Morphology of Propene–Pentene Isotactic Copolymers.” *Macromolecules*, vol. 51, no. 8, Apr. 2018,

- doi:10.1021/acs.macromol.8b00362. Saatavilla:  
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00362> (viitattu 9.4.2025)
- [11] Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., & Komppa, V. (2019). *Raaka-aineet. Täyte- ja apuaineet*. Saatavilla: <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-3-tayte-ja-apuaineet/> (viitattu 9.4.2025)
- [12] Smith, J., Johnson, R., & Lee, P. (2024). Katsaus: *Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications*. In Reinforced Polymer Composites (s. 9–22). MDPI. Saatavilla: [https://mdpi-res.com/bookfiles/book/4164/Reinforced\\_Polymer\\_Composites.pdf?v=1727053367](https://mdpi-res.com/bookfiles/book/4164/Reinforced_Polymer_Composites.pdf?v=1727053367) (viitattu 9.4.2025)
- [13] Callister, William D., ja David G. Rethwisch. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed., pp. 142–179, 565–593, 511–563). Wiley.
- [14] SFS-EN ISO 527. (2019). *Plastics — Determination of tensile properties (ISO 527:2019)*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [15] Hibbeler, R. C. (2018). Luku 3: Materiaalien mekaaniset ominaisuudet. In *Mechanics of Materials* (10th ed., pp. 103–139). Pearson Education Limited. ISBN 978-1-292-17820-2. Saatavilla:  
<https://media.pearsoncmg.com/intl/ge/abp/resources/products/product.html#product,isbn=9781292178202> (viitattu 9.4.2025)
- [16] Celanese Corporation. CELSTRAN® PP-GF30-0403 ECO-B 352 P10/10. Saatavilla:  
<https://materials.celanese.com/gb/products/datasheet/SI/CELSTRAN%20PP-GF30-0403%20ECO-B%20352%20P1010> (viitattu 9.4.2025)

# Liitteet

## Liite 1. Ruiskuvalun ajoarvot



**Pdat**  
PRODUCT DESIGN  
AND TOOLING

V8 Page 1/1

Date: 23.11.2014  
Maker: Tuusula - Tooling  
Place: Lieto  
Mould: VETOŠUVA  
Mould No: -  
Revision: Asetettu 40 FBM

Basic information		Mold opening	
Machine: R-35-100	Mold opening: 434 mm	Machine name: Mars 1900	Used clamping force: 127 kN
Clamping force (kN): 1600	Raw material:	Screw diameter: 30	Drying material:
Pressure ratio: 11.38	Additive/color:	Color mixer speed:	

Cooling MS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature			30	30						
Group1			X	X						
Group2										
Group3										
Flowrate (l/min)			7	7						

Cooling FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature	30	30								
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate (l/min)	7	7								

Temperatures °C	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Hotrunner	245	255	255	250	235	220				
Barrel										

Injection profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)	100	100	100							
Speed (mm/s)	5	5	5							
Stroke (mm)	4.5	10								

Holding profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)	36									
Time (s)	12									

Ejector	Type	Pressure	speed	position	Time
Ejector forward	CONT.	5 bar	5.00	5 mm	
Ejector backward	CONT.	5 bar	5.00	1 mm	

Hydraulic Core program info			Injection true values			Quality data		
Dosage			Injection pressure: 36 bar			Recipe/mold data: VETOŠUVA		
Plast end position: 10 mm			Injection time: 1.6 s					
Dosage speed: 40 rpm			Hold end position: 8.6 mm			Notes		
Back pressure: 5 bar			Switchover point					
Actual dosage time: 4.5 s			Melt pressure: - bar			Gripper:		
Decompression: 5.0 bar			Melt pressure position: 15 mm			Robot program: VETOŠUVA		
Speed: 2.0 mm/s			Melt pressure time: - s			Shot weight: 12.8 g		
position: 5 mm			Tool movements					
Additional information			close: 4.4 sec					
Cooling time: 2.0 s			open: 2.6 sec					
Cycle time: 4.1 s			protect 0.3 mm: 1.6 sec					
Robot time: 3.5 s								

**Setup parameters**



**Pdat**  
PRODUCT DESIGN  
AND TOOLING

V5 Page 1/1

Date:			
Maker:		Lieho	
Place:			
Mould:			
Mould No:			
Revision:		A 2015-01-09 90 RPM	

Basic information		Mold opening	
Machine	A 25-100		mm
Machine name	Max 1600	Used clamping force	kN
Clamping force (kN)	1600	Raw material	
Screw diameter	40	Drying material	
Pressure ratio	11.30	Additives/color	
		Color mixer speed	

Cooling MS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature										
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate (l/min)										

Cooling FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature										
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate (l/min)										

Temperatures °C	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Hotrunner										
Barrel										
INRO										

Injection profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Speed (mm/s)										
Stroke (mm)										


Holding profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Time (s)										

Ejector	Type	Pressure	speed	position	Time
Ejector force					
Ejector backw.					

Hydraulic Core program info		Injection true values		Quality data	
Plast end position	mm	Injection pressure	bar	Recipe/mold data:	
Dosage speed	rpm	Injection time	s		
Back pressure	bar	Hold end position	mm	Notes	
Actual dosage time	s	Switchover point			
Decompression	bar	Melt pressure	bar	Gripper	
Speed	mm/s	Melt pressure position	mm	Robot program	
position	mm	Melt pressure time	s	Shot weight	13.2

Additional information		Tool movements	
Cooling time	s	close	
Cycle time	s	open	
Robot time	s	protect	mm

**Setup parameters**



**Pdat**  
PRODUCT DESIGN  
AND TOOLING

V5 Page 1/1

Date: 23.11.2024  
 Maker: TWEED WILSON  
 Place: Lieto  
 Mould: Verogaard  
 Mould No: -  
 Revision: -

**Basic information**

Machine	R 25 100
Machine name	Max 1600
Clamping force (kN)	1600
Screw diameter	40
Pressure ratio	11,36

**Mold opening**

Mold opening	mm
Used clamping force	kN
Raw material	
Drying material	
Additives/color	
Color mixer speed	

Cooling MS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature										
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate l/min	7	7								
Cooling FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature	30	30								
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate l/min			7	7						

Temperatures °C	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Hotrunner										
Barrel										


INFO

Injection profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Speed (mm/s)										
Stroke (mm)										
Holding profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Time (s)										
Ejector	Type	Pressure	speed	position	Time					
Ejector forw.										
Ejector backw.										

Hydraulic Core program info

Dosage		Injection true values		Quality data	
Plast end position	mm	Injection pressure	bar	Recipe/mold data	
Dosage speed	gpm	Injection time	s		
Back pressure	bar	Hold end position	mm		
Actual dosage time	s	Switchover point		Notes	
Decompression	bar	Melt pressure	bar		
Speed	mm/s	Melt pressure position	mm		
position	mm	Melt pressure time	s		
Additional information		Tool movements	sec		
Cooling time	s	close			
Cycle time	s	open			
Robot time	s	protect	mm		

**Setup parameters**



**Pdat**  
PRODUCT DESIGN  
AND TOOLING

V5 Page 1/1

Date:											
Maker:		Lieto									
Place:											
Mould:											
Mould No:											
Revision:											

Basic information		Mold opening	
Machine	R 25 190	Used clamping force	mm
Machine name	Max 1600	Raw material	kN
Clamping force (kN)	1600	Drying material	
Screw diameter	40	Additives/color	
Pressure ratio	11,30	Color mixer speed	

Cooling MS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature										
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate l/min										
Cooling FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperature										
Group1										
Group2										
Group3										
Flowrate l/min										

Temperatures °C	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Hotrunner										
Barrel										
INFO										

Injection profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Speed (mm/s)										
Stroke (mm)										
Holding profile	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10
Pressure (bar)										
Time (s)										
Ejector	Type	Pressure	speed	position	Time					
Ejector low										
Ejector backw										

Hydraulic Core program info		Injection true values		Quality data	
Dosage		Injection true values		Quality data	
Plast end position	mm	Injection pressure	bar	Recipe/mold data:	
Dosage speed	rpm	Injection time	s		
Back pressure	bar	Hold end position	mm	Notes	
Actual dosage time	s	Switchover point			
Decompression	bar	Melt pressure	bar	Grpper:	
Speed	mm/s	Melt pressure position	mm	Robot program:	
position	mm	Melt pressure time	s	Shot weight:	
Additional information		Tool movements	sec		
Cooling time	s	close			
Cycle time	s	open			
Robot time	s	protect	mm		

## Liite 2. Laboratoriopäiväkirja

Vetokoe 3.12.2024

Yleisgireen koeuskone: Lloyd Instrument  
LR 30K

Asetukset:  
advanced settings

Preload: 100 N  
Proof speed mm/min: 10  
Breaking speed mm/min: 10

Vetosuvojen mitat

		Paksuus(m)	Leveys(m)	Imu(m)
40 RPM	Näyte 1	5.06	9.97	0.24
	Näyte 2	5.06	9.97	0.16
	Näyte 3	5.06	9.97	0.14
	Näyte 4	5.05	9.92	0.15
	Näyte 5	5.05	9.97	0.16
80 RPM	Näyte 6	5.02	9.92	0.13
	Näyte 7	5.05	9.89	0.22
	Näyte 8	5.05	9.89	0.14
	Näyte 9	5.04	9.97	0.10
	Näyte 10	5.03	9.97	0.09
120 RPM	Näyte 11	5.05	9.93	0.17
	Näyte 12	5.05	9.89	0.17
	Näyte 13	5.04	9.97	0.12
	Näyte 14	5.05	9.97	0.10
	Näyte 15	5.06	9.89	0.11
160 RPM	Näyte 16	5.06	9.92	0.16
	Näyte 17	5.04	9.97	0.13
	Näyte 18	5.05	9.92	0.15
	Näyte 19	5.05	9.92	0.09
	Näyte 20	5.04	9.93	0.15