

Vesileikkauksen asetusten määrittäminen

PRP-Plastic Oy

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Prosessi- ja materiaalitekniikka

2020

Arttu Kortelainen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Kortelainen, Arttu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2020
	Sivumäärä 25	
Työn nimi Vesileikkauksen asetusten määrittäminen PRP-Plastic Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Ohjaavan opettajan nimi, titteli ja organisaatio Reijo Heikkinen, yliopettaja, LAB-ammattikorkeakoulu		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Jukka Niemimäki, tuotantopäällikkö, PRP-Plastic Oy		
Tiivistelmä <p>Työn toimeksiantaja oli PRP-Plastic Oy. Tavoitteena oli selvittää soveltuvat leikkausasetukset PRP-Plastic Oy:n tuotantoon. Tuotannossa käytettävät materiaalit ovat kestäviä ja kertamuoveja.</p> <p>Vesileikkaus on työstömenetelmä, joka ei kehitä lainkaan lämpöä. Tästä syystä se soveltuu hyvin kestävämuovien leikkaukseen.</p> <p>Teoriaosuudessa esitellään vesileikkauksen toimintaperiaate sekä tietoa käytetyistä materiaaleista. Käytännön osuudessa suunniteltiin koeajot sekä suoritettiin ne käytännössä. Koeajoista esitellään eri asetusyhdistelmien leikkaukset.</p> <p>Lopuksi esitellään soveltuvat leikkausasetukset ja pohditaan jatkotutkimuksia.</p>		
Asiasanat vesileikkaus, polypropeeni, lujitemuovi, polyvinyylidenifluoridi		

Abstract

Author(s) Kortelainen, Arttu	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2020
	Number of Pages 25	
Title of Publication Defining water jet cutting parameters PRP-Plastic Oy		
Name of Degree Bachelor of Engineering		
Name, title and organization of the supervising teacher Reijo Heikkinen, principal lecturer, LAB University of Applied Sciences		
Name, title and organization of the client Jukka Niemimäki, chief of production, PRP-Plastic Oy		
Abstract <p>The objective of this thesis was to find out optimal parameters for PRP-Plastic Oy's water jet cutting machine. The study was not about the best possible surface, but what are adequate parameters to be used in production. Materials used in production are thermoplastics and thermosetting plastics.</p> <p>Water jet cutting does not generate heat. Because of this fact it is a good fit for cutting thermoplastics.</p> <p>The theory part is about water jet cutting in general and the materials used in PRP-Plastic Oy's production. The practical part of the report contains the plan for test cuts. It also presents the test results achieved by using different parameter combinations.</p> <p>Based on the test runs the cutting settings were decided for production.</p>		
Keywords water jet, polypropylene, fiberglass reinforced polymer, polyvinylidene fluoride		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Vesileikkaus.....	2
2.1	Vesileikkaus.....	2
2.1.1	Hyödyt ja haitat.....	3
2.1.2	Laatu	3
2.2	Käytettävä vesileikkuri	4
2.3	IGEMS-ohjelmisto.....	5
3	Materiaalit	6
3.1	Koeajettavat materiaalit	6
3.2	Polypropeeni.....	6
3.3	Polyvinyylideenifluoridi.....	6
3.4	Lujitemuovi	7
3.5	Materiaalin koneistettavuus	7
4	Koeajot	9
4.1	Koeajojen parametrit.....	9
4.2	Polypropeeni.....	10
4.3	Polyvinyylideenifluoridi.....	11
4.4	Lujitemuovi	12
5	Tulokset.....	14
5.1	Polypropeeni.....	14
5.1.1	Päätelmät	16
5.2	Polyvinyylideenifluoridi.....	17
5.2.1	Päätelmät	19
5.3	Lujitemuovi	19
5.3.1	Päätelmät	22
5.4	Johtopäätökset	23
6	Yhteenveto	24
	Lähteet	25

Liitteet

Liite 1. Koeajot

Liite 2. Leikkuujäljet

1 Johdanto

Tavoitteena oli selvittää toimeksiantajan tuotannossa hyödynnettävän vesileikkauskoneen ajoarvot eri materiaaleille. Vesileikkausta on käytetty materiaalista riippumatta suurella 250 g/min abrasiivin määrällä. Tarkoituksena oli selvittää leikkuupaine, riittävä hiekkamäärä sekä optimaaliset leikkuunopeudet siten, että laatu säilyy käyttökohteeseen soveltuvana eikä abrasiivia käytetä liiallisia määriä.

Käytettäville materiaaleille soveltuvat leikkuuparametrit tehostavat tuotantoa nopeuttamalla leikkuita ja takaamalla soveltuvan laadun. Työstä rajattiin pois pinnankarheuden tarkemmat määritykset sekä selvitystyö siitä, millä asetuksilla saadaan absoluuttisesti paras leikkausjälki.

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli PRP-Plastic Oy. PRP-Plastic Oy suunnittelee ja valmistaa teollisuuteen erilaisia prosessilaitteita sekä putkistoja. Valmistettavien tuotteiden materiaaleja ovat eri kestonmuovit, lujitemuovi (lasikuitulujuitteinen vinyyliesteri) sekä näiden yhdistelmät.

Vesileikkauskone on asennettu ja otettu käyttöön toukokuussa 2020. Koneella tuetaan pääasiassa omaa tuotantoa. Yleisimmät leikattavat materiaalit ovat polypropeeni (PP), polyeteeni (PE), polyvinyylideenifluoridi (PVDF), lujitemuovi tai kestonmuovin ja lujitemuovin yhdistelmä rakenteet. Näiden materiaalien lisäksi vesileikkausta hyödynnetään muottien ja muiden tarpeiden valmistuksessa, jolloin leikattaviin materiaaleihin kuuluvat myös alumiini, erilaiset teräslaadut sekä vaneri.

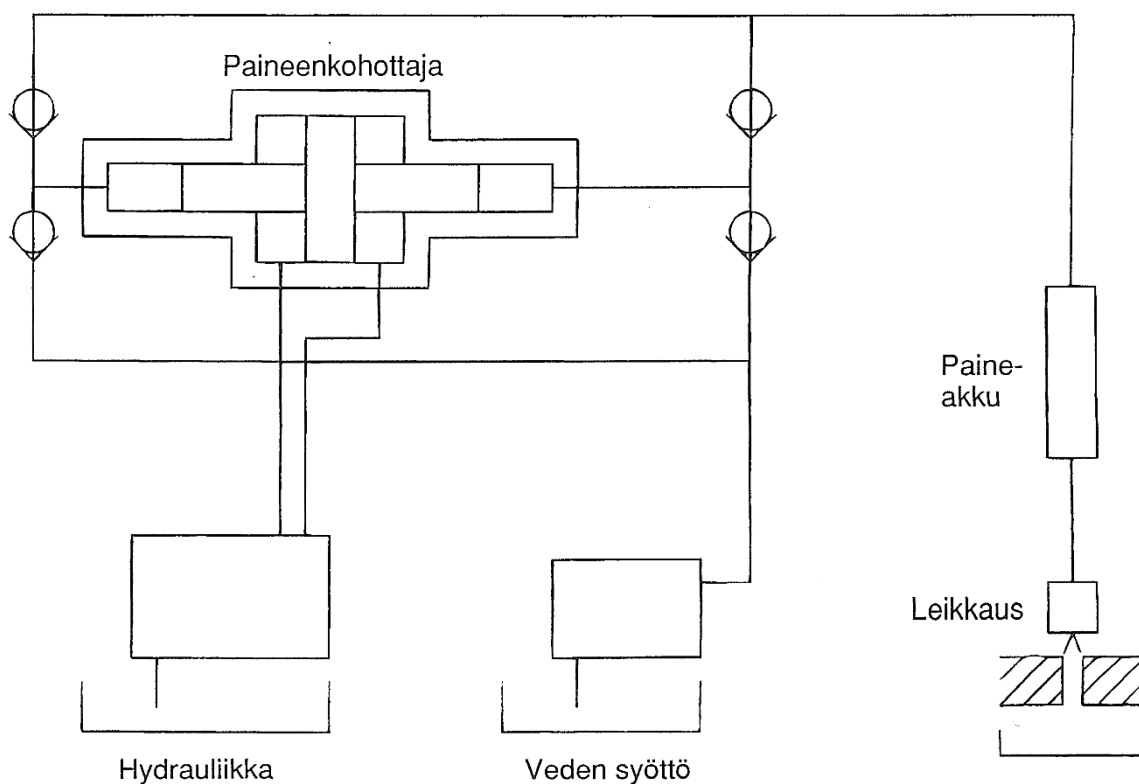
Työn teoriaosuudessa esitellään vesileikkauksen teoriaa ja eri materiaaleja, joita PRP-Plastic Oy:llä leikataan. Työn kokeellinen osuus sisältää suoritettut koeajot sekä läpikäynnin näistä saaduista tuloksista.

2 Vesileikkaus

2.1 Vesileikkaus

Vesileikkaus on ei-terminen työstömenetelmä, joka perustuu korkeapaineisen vesisuihkun käyttämiseen. Koska menetelmä ei tuota lämpöä, se soveltuu hyvin muovien leikkaukseen. Käytettävä suutin voi vaihdella 0,25 mm ja 0,45 mm välillä. Vesisuihkun leikkausura on 0,10–1,0 mm käytettävän suuttimen koon mukaan. (Muototerä Oy.)

Vesileikkauksen korkea paine saavutetaan hydraulisella paineenkohottimella (Aaltonen ym. 1985, 389). Leikkauspaine vaihtelee leikattavan materiaalin mukaan ja voi olla jopa 620 MPa. Korkealla paineella leikattaessa korkeapainepumpun huoltoväli on lyhyempi, mutta leikkuunopeuksia voidaan nostaa. 360 MPa:n painetta käyttäen huoltoväli on noin 800–1000 tuntia (Muototerä Oy.)



Kuva 1. Vesileikkauksilaitteen rakenne (Aaltonen ym.1985, 389)

Pehmeämmillä tai ohuilla materiaaleilla leikkaus voi olla puhdasvesileikkausta, mutta paksujen kappaleiden sekä kovempien materiaalien kanssa leikkausta voidaan tehostaa sekoittamalla veden sekaan hiekkaa, jolloin puhutaan abrasiivivesileikkauksesta (Airasmaa

ym. 1991, 294). Abrasiiveja on useita eri karkeuksia, joista yleisimmät ovat 80 mesh sekä 120 mesh.

2.1.1 Hyödyt ja haitat

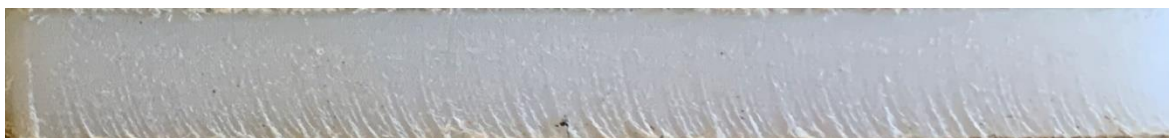
Vesileikkauksen suurimmat hyödyt ovat sen kapea leikkausura sekä se, että leikkausprosessi on suhteellisen siisti eikä leikatessa synny pölyä veden sitoessa leikkuupölyn itseensä. Vesileikkaus soveltuu myös lähes kaikille materiaaleille, ainoastaan karkaistu lasi ei sovellu vesileikattavaksi. Etuja ovat myös mahdollisuus leikata useita kappaleita päällekkäin (Muototerä Oy).

Haitaksi voidaan laskea korkea melutaso. Melun taso riippuu hieman leikattavasta materiaalista. Lasikuidun ja muiden kerrosmateriaalien leikkaus voi olla myös haastavaa, sillä ne vaativat joko esireiän tai leikkuun aloittamisen kappaleen ulkopuolelta.

2.1.2 Laatu

Laatua voidaan arvioida sen aaltomaisuudella, muulla epämääräisellä leikkuujäljellä sekä leikkuu-uran kartiomaisuudella (Kovacevic 1991, 32). Eniten leikkuujäljen laatuun vaikuttavat parametrit ovat leikkuupaine, leikkuunopeus sekä abrasiivin syötön määrä. Mikäli nämä parametrit eivät ole sopivat, vesisuihku ei joko läpäise materiaalia tai se saattaa jättää liikaa leikattavassa materiaalissa. Seurauksena on karkea leikkuujälki (kuva 2).

Leikkuujälkeä saadaan hienommaksi joko laskemalla leikkuunopeutta, kasvattamalla leikkuupainetta tai lisäämällä abrasiivin määrää, jolloin leikkausvoima kasvaa. Vähemmässä määrin leikkuujälkeen vaikuttaa suuttimen etäisyys leikattavasta levystä. Suuttimen etäisyys vaikuttaa eniten leikkuu-uran kartiomaisuuteen eikä varsinaiseen pinnan laatuun (Ahsan & Azmir 2007, 126.)



Kuva 2. Karkea aaltomainen leikkuujälki polyvinyylideenifluoridissa

Korkeammalla paineella leikattaessa vesisuihkun nopeus suuttimesta kasvaa. Tällöin myös vesisuihkun sekaan lisättävän abrasiivin nopeus kasvaa, joka parantaa leikkauksen tehoa. Korkealla paineella saattaa olla kielteisiäkin vaikutuksia. Abrasiivi saattaa hajota liikaa ja

täten menettää leikkuutehoaan. Abrasiivin liiallinen määrä voi kuitenkin heikentää laatua sen hidastaessa vesisuihkun nopeutta leikkuu-urassa. (Kovacevic 1991, 38.)

Kappaleiden kulmissa ja muissa tiukoissa muodoissa leikkuunopeutta on hidastettava. Mikäli näin ei tehdä, vesisuihkun jättäessä kulmista saattaa tulla epämuodostuneita.

2.2 Käytettävä vesileikkuri

Käytössä oleva vesileikkuri on Muototerä Oy:n valmistaja FINJET L4020 mallin kone. Leikkuri on varustettu yhdellä leikkaussuuttimella. Koneen leikkausalue on kooltaan 2100 mm * 4200 mm. Maksimileikkauspaksuus on 300 mm. Vesileikkurin korkeapainepumppu toimii 50–360 MPa:n alueella. 360 MPa:n paineella pumpun huoltoväli on 800–1000 tuntia. Matalammalla paineella leikattaessa huoltoväliä voidaan hieman pidentää.

Käytettävä abrasiivi on karkeudeltaan 80 mesh, jonka raekoko on 0,100 mm–0,300 mm väliltä. Vesileikkurin hiekkamäärää voi säätää 0–600 g/min välillä käytetyn suuttimen ja sekoitusputken rajoissa. Koneessa on 0,25 mm timanttisuutin ja 0,762 mm sekoitusputki, joiden kanssa hiekan maksimisyöttömäärän suositus on 250 g/min. (Muototerä Oy.)



Kuva 3. Käytettävä vesileikkuri

2.3 IGEMS-ohjelmisto

Leikkuuradat kappaleista luodaan IGEMS-ohjelmistoa käyttäen. IGEMS sisältää oman materiaalikirjaston leikkuuparametreineen, mutta kestopuuvien osalta kirjasto on käytännössä olematon, eikä sisällä lainkaan tuotannossa käytössä olevia materiaaleja. Kestopuoveista kirjastosta löytyi valmiina ainoastaan polymetyylimetakrylaatti sekä polykarbonaatti. Omia materiaaleja voi vapaasti tallentaa kirjastoon leikkuuasetuksineen.

IGEMS kompensoi automaattisesti leikkuunopeutta kappaleen kulmissa ja muissa tiukoissa muodoissa. Ilman kompensatiota vesisuihkun jättäessä liikaa kappaleen kulmista tulee heikkolaatuisia. Kompensatioitten takia leikattavien kappaleiden todellista leikkuuaikaa on vaikea määrittää ennakkoon, vaikka leikkuunopeus olisikin tiedossa.

3 Materiaalit

3.1 Koeajettavat materiaalit

PRP-Plastic Oy:n tuotannossa käytetään useita eri kestopuoveja. Näihin lukeutuvat polypropeeni (PP), polyeteeni (PE), polyvinyylidikloridi (PVC), polyvinyylideenifluoridi (PVDF), eteeniklooritrifluorieteeni (ECTFE), perfluorieteenpropeeni (FEP), perfluorialkoksi (PFA). Lujitemuoveista käytetään lasikuidulla lujitettua vinyyliesteriä.

Testattaviksi materiaaleiksi valittiin polypropeeni, polyvinyylideenifluoridi sekä lujitemuovi-levy. Lujitemuovi-levy oli lasikuitulujitteinen vinyyliesteri. Näihin materiaaleihin päädyttiin sillä perusteella, että polypropeeni ja polyeteeni ovat työstettävyydeltään hyvin samantyyppisiä ja leikkausparametrit ovat todennäköisesti hyvin samantyyppiset. Polyvinyylideenifluoridiin päädyttiin eri fluorimuoveista siksi, että sekä FEP:iä että PFA:ta käytetään ohuina, joko 1,5 mm tai 2,3 mm vahvaisina levyinä. PVDF:ää taas käytetään useina eri paksuuksina 2,3–30 mm väliltä. Sekä FEP että PFA ovat myös erittäin hinnakkaita materiaaleja, jonka takia niitä ei valittu koeajoihin mukaan lainkaan.

3.2 Polypropeeni

Polypropeeni (PP) on polyolefiinien joukkoon kuuluva kestopuovi, joka on kolmanneksi eniten käytetty kestopuovi. Polypropeeni on tiheydeltään 0,90–0,91 g/cm³. Käyttölämpötila on korkeimmillaan lyhytkestoisesti 130 °C, pidempiaikaisesti 100 °C. Sulamislämpötilaan 160–170 °C. (Airasmaa ym. 1993, 38–39.)

Kemianteeollisuuden käyttökohteissa polypropeenia käytetään muun muassa putkistoissa sekä säiliöissä. Polypropeenista valmistetaan myös tartuntakudoksellista levyä. Tartuntakudoksellisia levyjä käytetään yhdistelmäarakenteissa kertamuovien kanssa. (Agru 2020b).

3.3 Polyvinyylideenifluoridi

Polyvinyylideenifluoridi (PVDF) on fluorimuovi, joka luokitellaan tekniseksi muoviksi. PVDF:n hyviin ominaisuuksiin lukeutuvat hyvä lämmönkesto, mekaaninen kestävyys sekä sähkön eristävyys. Sen merkittävin ominaisuus on kuitenkin sen erinomainen kemiallinen kesto (Agru, 2020). PVDF kestää useimpia kemikaaleja, mutta ei kestä vahvoja emäksiä, ketoneja eikä amiineja (Ebnesajjad 2011).

3.4 Lujitemuovi

Leikattava lujitemuovina oli lasikuituvahvisteinen vinyyliesteri. Vinyyliestereitä on kahta eri tyyppiä. Yleisin vinyyliesterityyppi on epoksihartsia metakryylihapon kanssa esteröitynä. Vaativampiin käyttökohteisiin soveltuu epoksien novolakkoihin pohjautuva vinyyliesteri. (Airasmaa ym. 2003, 45.)

Vinyyliesterin hyvä kemiallinen kesto tekee siitä soveltuvan eri teollisuuden aloille. Yleisimpiä käyttökohteita ovat putkistot, säiliöt sekä pesurit (Airasmaa ym. 2003, 45).

Vesileikkauksessa lujitemuovilevyn haasteena on sen potentiaalinen delaminointuminen. Delaminointumista saattaa tapahtua, jos leikkaus aloitetaan ilman esireikää kappaleen päältä. Tällöin vesi saattaa tunkeutua materiaalin kerrosten väliin. (Airasmaa ym. 1991, 295.)

3.5 Materiaalin koneistettavuus

Koneistettavuusarvo tarkoittaa materiaalin leikkaukseen soveltuvuutta. Jokaiselle leikattavalle materiaalille tulee määrittää koneistettavuusarvo, joka voidaan määrittää kaavan

$$N_1 = N_0 \frac{u_1}{u_0}$$

mukaan, jossa N_1 on selvitettävä koneistettavuus, N_0 tunnettu koneistettavuus, u_1 selvitettävän materiaalin läpileikkuunopeus ja u_0 tunnetun materiaalin läpileikkuunopeus. Tässä menetelmässä kaikkien muiden leikkuuparametrien tulee olla identtiset, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. (Zeng 2007, 12).

Toinen mahdollinen tapa määrittää materiaalin koneistettavuus on tehdä selvitettävälle materiaalille koeajo määrättyllä nopeudella siten, että vesisuihku ei läpäise materiaalia. Vesisuihkun jättämän uran syvyys mitataan. Mitattu arvo syötetään IGEMS-ohjelmistoon, joka laskee materiaalille koneistettavuuden syötetyillä arvoilla.

Materiaalin asetus

Ryhmän paksuudet

Kaikki koneet

PVDF 785.64 / 1.00

0,25 / 0,76 / 3000

TVL

Yleinen AbrasiiviVesiLeikkaus

Nimi PVDF

Tiheys 1780.0 kg/m³ ?

Koneistettavuus 786 Laske ?

Hauras materiaali

Kerrosmateriaali

8.00

10.00

12.00

20.00

30.00

40.00

50.00

PVC

1.00

1.50

2.00

3.00

4.00

5.00

6.00

8.00

10.00

20.00

30.00

40.00

PVDF

3.00

6.00

8.00

10.00

+ -

Tuo OK Peruuta

Kuva 4. Kuvakaappaus IGEMS-ohjelmiston materiaaliasetuksista

4 Koeajot

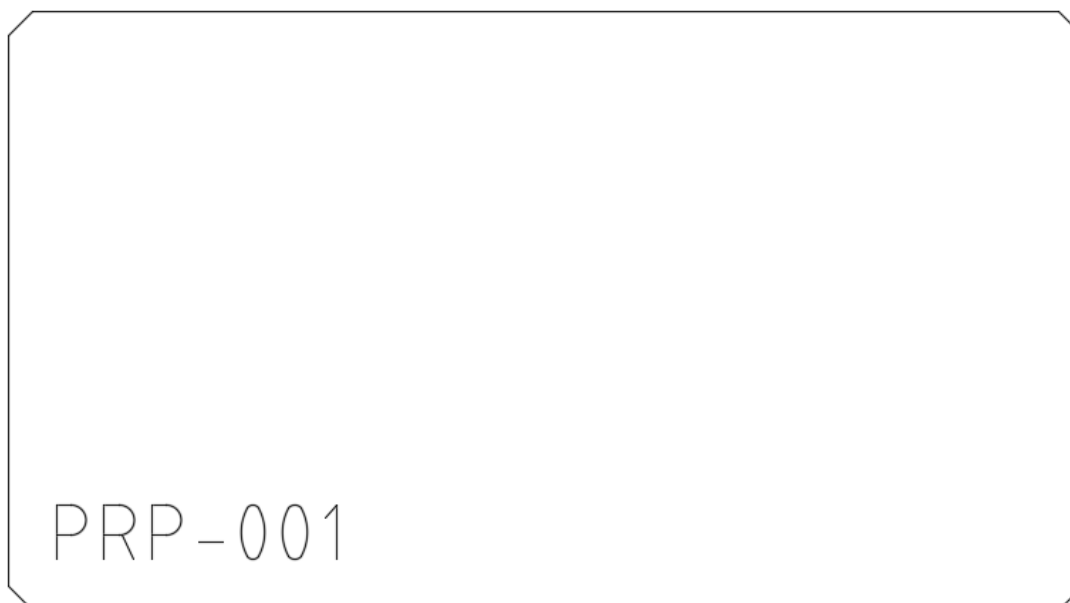
4.1 Koeajojen parametrit

Koeajoja suoritettiin 250 MPa:n sekä 360 MPa:n paineella. Suuttimen etäisyys asetettiin joka leikkuuseen 7 mm etäisyydelle. Aikaisemmissa leikkuissa on havaittu suuttimen tukkeutumista silloin, kun kappaleita leikataan suutin lähellä levyä. Tukkeutuminen korostuu ohuilla levyillä, jotka pääsevät liikkumaan kesken leikkauksen korkeussuunnassa. 7 mm etäisyydeltä leikatessa leikkuu-urasta tulee lievästi kartiomainen. Tätä ei kuitenkaan tutkittu enempää tässä työssä.

Abrasiivin määrän vaikutus kokeiltiin 50–250 g/min välillä 50 g/min askelin. Leikkuunopeudet määritettiin vesileikkurilta halutun jäljen mukaisesti asteikolla erittäin karkeasta erittäin hienoon. Koekappaleita leikattiin yhteensä viisi kappaletta kullakin parametriyhdistelmällä.

Testattavien levyjen paksuudeksi valittiin 10 mm. Paksuus valittiin sen takia, että ohuemasta levystä on vaikeampi tutkia pinnan laatua. 10 mm on myös tuotannossa eniten käytetty levypaksuus.

Kaikki koekappaleet leikattiin kuvan 5 mukaisesta mallista ja kaikille annettiin oma tunnusnumero, joka merkattiin leikatessa kappaleeseen. Kappaleen mitat ovat 90 mm * 50 mm. Koekappaleen leikkumatka on 280 mm. Koeajojen leikkuunopeudet sekä leikkuaajat löytyvät tarkemmin liitteestä 1.



Kuva 5. Leikattava koekappale

Koneistettavuudet määritettiin jokaiselle koeajettavalle materiaalille leikkaamalla 5 uraa koepaloihin. Leikkuunopeus oli 5000 mm/min. Urien syvyydet mitattiin ja näiden keskiarvo syötettiin IGEMS-ohjelmistoon. Materiaalien koneistettavuudet ovat esiteltynä taulukossa 1.

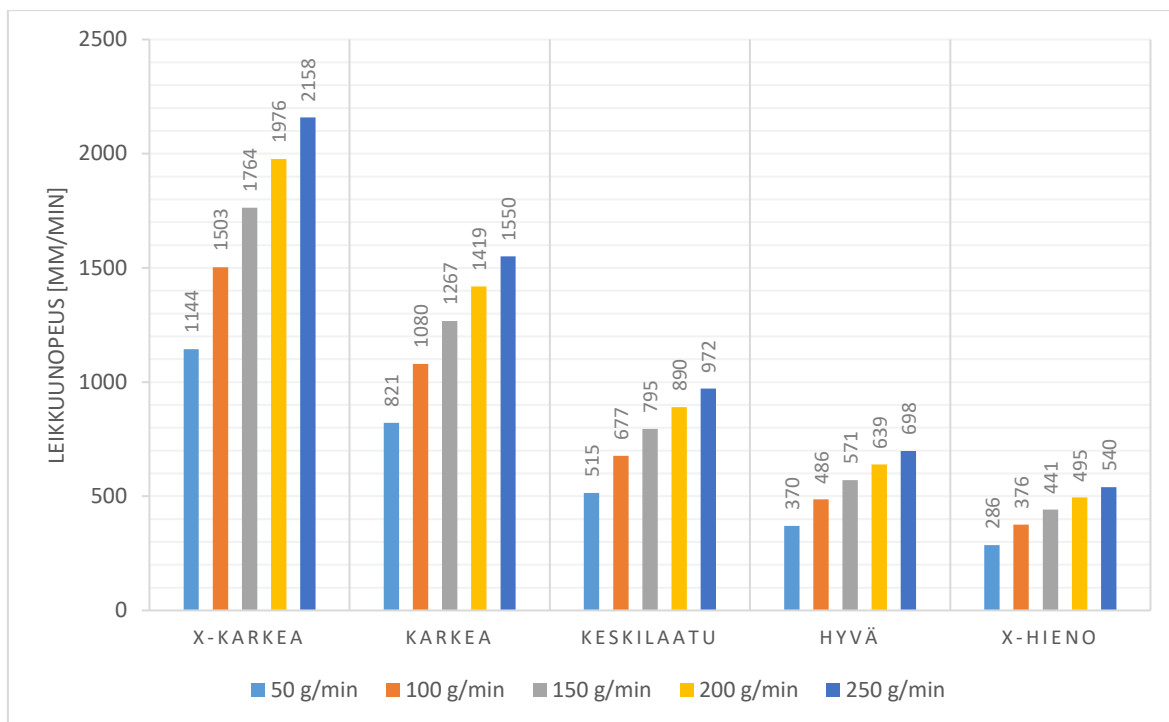
Materiaali	Urasyvyyden keskiarvo	Koneistettavuus
Polypropeeni	7,2	786
Polyvinyylideenifluoridi	7,2	786
Lujitemuovi	7,9	1068

Taulukko 1. Materiaalien koneistettavuudet

Koneistettavuus osoittautui samaksi polypropeenin ja polyvinyylideenifluoridin osalta. Lujitemuovin koneistettavuudeksi saatiin muita materiaaleja korkeampi arvo.

4.2 Polypropeeni

Polypropeenin koneistettavuusarvo oli 786. Leikkuunopeudet eri laaduilla on esitetty kuvassa 4. Koekappaleet leikattiin sekä 250 MPa:n, että 360 MPa:n paineella. Leikkuunopeudet eri abrasiivin syöttömäärillä ovat esitettynä kuvassa 6. Koeajot päätettiin aloittaa polypropeenilla, sillä se on leikattavista materiaaleista yleisin sekä edullisin.



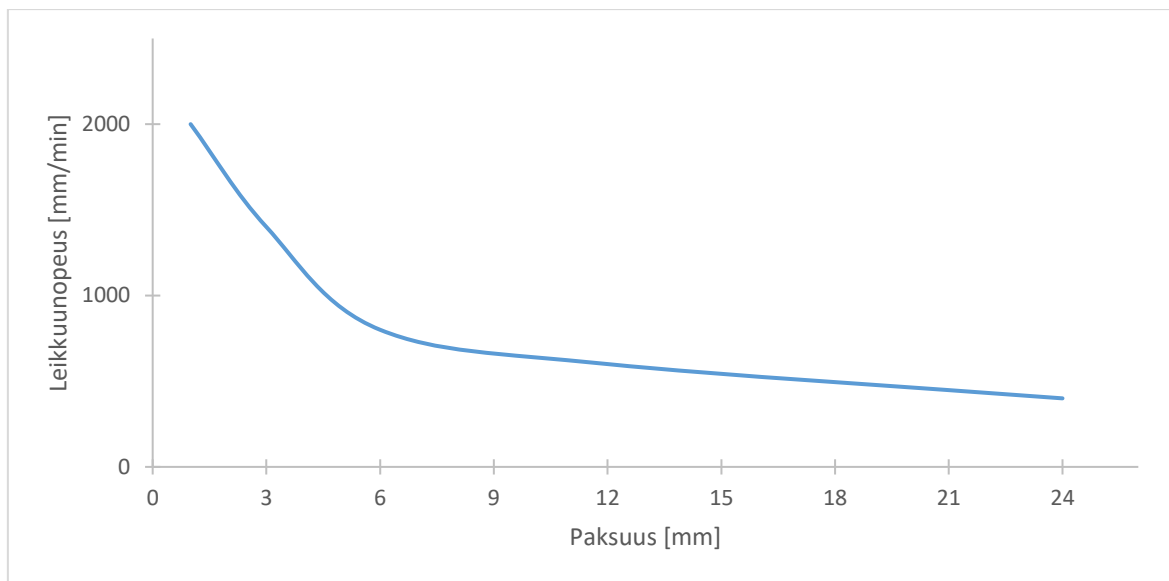
Kuva 6. Polypropeenin sekä polyvinyylideenifluoridin leikkuunopeudet eri laatuasetuksilla

4.3 Polyvinyylideenifluoridi

Polyvinyylideenifluoridin koneistettavuus osoittautui samaksi kuin polypropeenin 786. Korkeamman leikkuupaineen uskottiin todennäköisesti tuottavan hyvän leikkujäljen, joten materiaalin hinnan takia koeajot päädyttiin leikkaamaan ainoastaan 360 MPa:n leikkuupaineella. Polyvinyylideenifluoridin leikkuunopeudet olivat saman koneistettavuuden takia täysin samat kuin polypropeenilla (kuva 6).

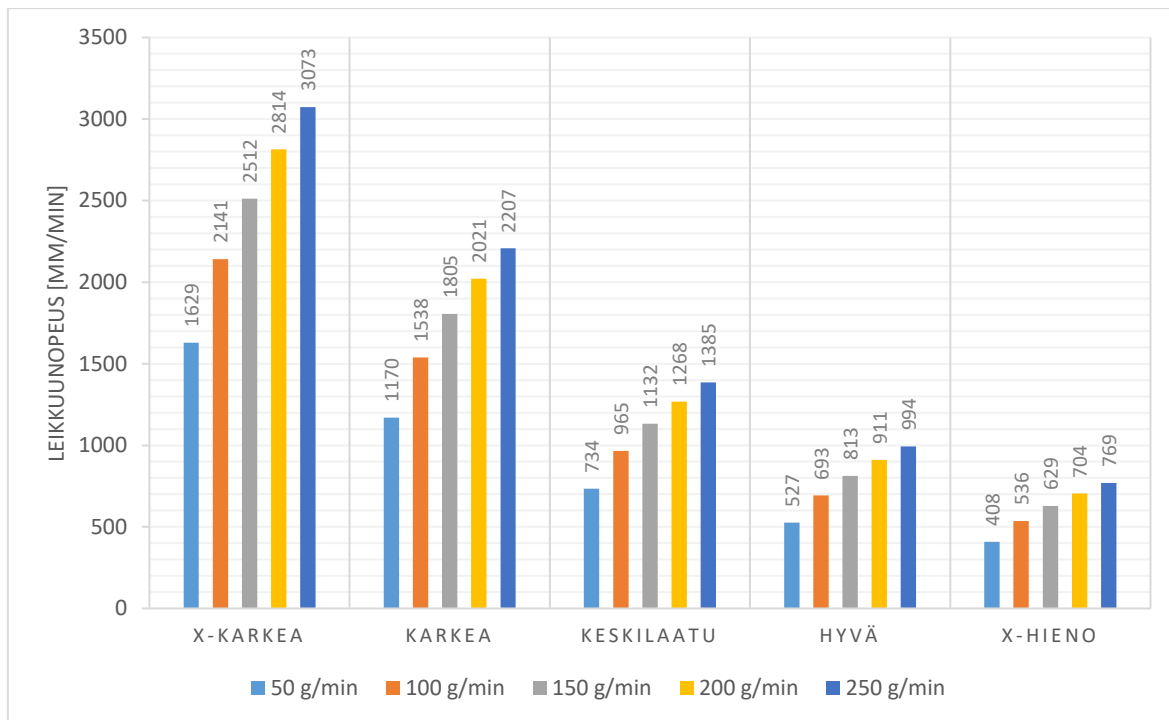
4.4 Lujitemuovi

Lujitemuovilevyjen leikkuunopeuksista on saatavilla vähäisesti aikaisempaa tutkimustietoa. Airasmaa ym. (2003, 218) mukaan 10 millimetrin levyille leikkuunopeuden olevan noin 800 mm/min (kuva 7). Määritetyllä koneistettavuudella leikkuunopeuksista saatiin huomattavasti nopeampia, mutta myös samansuuntaisia arvoja.



Kuva 7. Lujitemuovilevyjen leikkuunopeuksia (mukailtu Airasmaa ym. 2003, 218)

Lujitemuoveja leikatessa on käytettävä esiporausta. Poran käyttö vaikuttaa leikkuun kokonaisaikaan merkittävästi. Poraus aika jätettiin huomiotta vähentämällä se leikkuaajoista. Esiporauksessa kesti 48 sekuntia, joka on vähennetty liitteen 1 taulukoissa esitetystä leikkuaajoista. Lujitemuovilevyt leikattiin 250 MPa:n paineella sekä 360 MPa:n paineella. Leikkunopeudet ovat esitettyinä kuvassa 8.



Kuva 8. Lasikuidun leikkuunopeudet eri parametrijhdistelmin

5 Tulokset

IGEMS:in nopeuden kompensatioiden takia kappaleiden leikkuuajat eivät vastaa leikkuunopeuden laskennallista leikkuaikaa. Suurista leikkuunopeuden eroista huolimatta leikkuaikojen erot ovat paikoin pieniä, sillä koekappale on pienikokoinen ja sen kulmissa leikkuunopeus on hidas. Kappaleiden leikkuujäljet arvioitiin silmämääräisesti.

Abrasiivin kulutus laskettiin sekä koekappaleen kehämittaa 280 mm että koeajoissa saatua aikaa käyttäen. Laskennallisen ja mitatun leikkuuajan ero johtuu kulmakompensatioista, jotka leikkuuohjelmisto suoritti automaattisesti. Leikkuuajan todellinen ero riippuu merkittävästi leikattavasta kappaleesta eikä näin ollen ole täysin pääteltävissä leikkuunopeudesta.

Kuvat leikkuujäljistä löytyvät liitteestä 2. Useissa kappaleissa oli havaittavissa merkittävää leikkuujäljen aaltomaisuutta. Kestomuoveja leikatessa leikkuujäljen aaltomaisuus ei kuitenkaan aina haittaa, jos leikkuujälki peitetään esimerkiksi hitsaamalla kuumakaasuhitsauksella tai ekstruuderilla. Lujitemuovilevyjen käyttökohteina ovat usein erilaiset painolevyt, jotka jäävät valmistettavan kappaleen rakenteen sisään. Tällöin leikkuujäljessä voidaan hyväksyä heikompi laatu kohtuuden rajoissa.

5.1 Polypropeeni

Polypropeenin koeajoissa havaittiin, että abrasiivin määrä vaikuttaa eri paineilla leikatessa merkittävästi leikkuujälkeen korkeilla leikkuunopeuksilla. Matalilla leikkuunopeuksilla eroa ei ollut suuresti havaittavissa.

250 MPa:n paineella leikatuissa koekappaleissa leikkuujäljen laadulla oli selkeää hajontaa. Koekappaleet olivat lähes tasalaatuisia 360 MPa:n leikkuupainetta käytettäessä. Keskiläadun asetusta hienommalla leikatut olivat lähes tasalaatuisia myös 250 MPa:n leikkuupaineella.

Kappaleiden taustapuolelle muodostui jäystettä. Jäysteen muodostuminen oli suurempaa 250 MPa:n leikkuissa. 250 MPa:n leikkuupaineella nopeus 515 mm/min 50 g/min abrasiivin kulutuksella osoittautui riittävän hyvälaatuiseksi kaikkiin käyttökohteisiin. Taulukossa 2 on esitetty parametrien yhdistelmiä, joilla leikkuujälki oli riittävän hyvälaatuinen.

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]
50	515	27,2
100	677	41,4
150	795	54,4
200	890	62,9
250	972	72,0

Taulukko 2. Keskilaadun leikkuiden leikkuunopeudet ja abrasiivin kulutus paineella 250 MPa

Nostettaessa leikkuupaine 360 MPa:han lähes vastaavaa laatua saatiin korkeammalla nopeudella leikattaen. Taulukosta 3 nähdään, että leikattaessa karkean laadun asetuksella 360 MPa:n paineella leikkausnopeus kasvaa 59,4 % ja abrasiivin kulutus laskee 37,3 %.

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]	Nopeusero [%]	Abrasiivin kulutuksen ero [%]
50	821	17,1	59,4	-37,3
100	1080	21,7	59,5	-37,3
150	1267	33,2	59,4	-37,3
200	1419	39,5	59,4	-37,3
250	1550	45,2	59,5	-37,3

Taulukko 3. Karkean laadun leikkuunopeudet ja abrasiivin kulutus paineella 360 MPa verrattuna 250 MPa:n asetuksiin

360 MPa:n paineella jopa nopeus 2158 mm/min tuotti myös hyvän leikkuujäljen, joka soveltuu useimpiin käyttökohteisiin. Abrasiivin syöttö oli tällöin 250 g/min. Leikkuujälki on lähes samanlaatuinen kuin 250 MPa:n paineella leikatessa nopeudella 972 mm/min. Nostamalla leikkuupainetta tuotantoon soveltuvaa laatua voitiin täten leikata 319 % nopeammin käyttäen vain 19,3 % enemmän hiekkaa 250 MPa:n hyvään jälkeen verraten (taulukko 4).

Paine [MPa]	Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]	Nopeusero [%]	Abrasiivin kulutuksen ero [%]
250	50	515	27,2	-	-
360	250	2158	32,0	319,0	19,3

Taulukko 4. Hyväksyttävä leikkuujälki 360 MPa:lla verraten 250 MPa:n paineella leikattuun

5.1.1 Päätelmät

250 MPa:n kohdalla abrasiivin määrällä oli suuri vaikutus leikkuujäljen laatuun. Leikkuujäljissä on havaittavissa eri leikkuunopeuksilla merkittävää laadun vaihtelua. Pienellä abrasiivin määrällä korkeaa nopeutta käyttäen leikkuujälki oli huonolaatuinen. Polypropeenin tyypillisimmät käyttökohteet eivät kuitenkaan vaadi erityisen hyvää leikkuujälkeä, jolloin voidaan käyttää matalampaa 250 MPa:n painetta. 250 MPa:n leikkuupaineen käytössä etuna on myös korkeapainepumpun pidempi huoltoväli, sillä korkeampi paine on pumpulle kuluttavampaa.

360 MPa:n paineen osalta abrasiivin määrällä ei havaittu merkittävää vaikutusta leikkuujälkeen. Leikkuunopeus sekä leikkuupaine osoittautuivat tärkeimmiksi kriteereiksi leikkuujäljen laadun kannalta. Korkeammalla paineella saatiin leikattua samantasoista tai jopa parempaa laatua merkittävästi nopeammin. Tuotantoon yleisesti sopiviksi asetuksiksi päädyttiin valitsemaan erittäin karkea asetus, jolloin nopeus on 2158 mm/min ja abrasiivin syöttö 250 g/min (kuva 9).



Kuva 9. Leikkuupaine 360 MPa, nopeus 2158 mm/min ja abrasiivin syöttö 250 g/min

5.2 Polyvinyylideenifluoridi

Polyvinyylideenifluoridin koeajot suoritettiin ainoastaan 360 MPa:n leikkuupaineella. PVDF:n koneistettavuus osoittautui samaksi kuin polypropeenin, joten leikkuunopeudet olivat samat kuin polypropeenilla.

Leikkujäljet todettiin hyvälaatuisiksi. Eri leikkuunopeuksien välillä ei ilmennyt merkittäviä laatueroja. Ainoastaan erittäin karkean asetuksen korkea nopeus jätti leikkuureunaan huomattavaa aaltomaisuutta. Hitaammilla leikkuunopeuksilla leikkujäljet osoittautuivat lähes tasalaatuisen hyväksi.

Leikkujäljistä riittäväksi laaduksi tuotantoon todettiin leikkuunopeus 515 mm/min 50 g/min abrasiivin syötöllä. Leikkujäljeltään samaa laatua saatiin taulukon 5 mukaisilla asetuksilla.

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]
50	515	27,2
100	677	41,4
150	795	52,8
200	890	62,9
250	972	72,0

Taulukko 5. Riittävän laatuisten leikkujälkien asetusten vertailu

Leikkujäljen laadusta hieman karsien myös karkean laadun asetus todettiin useimpiin tuotannon käyttökohteisiin riittäväksi. Karkean asetuksen nopeuksia verrattiin keskilaadun asetuksiin taulukon 6 mukaisesti.

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin ku- lutus [g]	Nopeus- ero [%]	Abrasiivin kulu- tuksen ero [%]
50	515	27,2	-	-
50	821	17,1	59,4	-37,3
100	1080	25,9	109,7	-4,6
150	1267	33,2	146,0	21,6
200	1419	39,5	175,5	45,2
250	1550	45,2	201,0	66,1

Taulukko 6. Karkeamman leikkuujäljen asetusten vertailu

Vain hieman heikompaa leikkuujälkeä voitiin parhaimmillaan leikata kuluttaen 4,6 % vähemmän hiekkaa nopeuden noustessa 109,7 %. Leikkuunopeutta voitiin kasvattaa jopa 201 % kuluttaen kuitenkin 66,1 % enemmän hiekkaa.

Edellä mainituilla asetuksilla leikaten kappaleiden taustalla esiintyi lievää jäystettä. Jos leikattua kappaletta ei syystä tai toisesta voida jälkikäsitellä, on leikkuunopeutta laskettava tai abrasiivin määrää nostettava.

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin ku- lutus [g]	Nopeus- ero [%]	Abrasiivin kulu- tuksen ero [%]
50	515	27,2	-	-
50	370	37,8	-28,2	39,2
100	486	57,6	-5,6	111,9
150	571	73,6	10,9	170,6
200	639	87,6	24,1	222,4
250	698	100,3	35,5	268,9

Taulukko 7. Leikkuunopeudet ilman taustan jäystettä

Taulukon 7 mukaisesti leikattaessa lähes samaa nopeutta, 5,6 % hitaammin, abrasiivin kulutus kasvoi 111,9 %. Hienompaa leikkuujälkeä vaatiessa abrasiivikustannukset kasvavat merkittävästi.

5.2.1 Päätelmät

Koeajoista yleiseksi leikkuuasetukseksi päädyttiin valitsemaan nopeus 1419 mm/min hiekamäärällä 200 g/min (kuva 10). Tätä nopeammat asetukset suuremmalla hiekansyötöllä eivät olleet leikkuujäljeltään juuri lainkaan parempia. Leikkuunopeus ei myöskään noussut tarpeeksi suhteessa abrasiivin kulutuksen kasvuun.



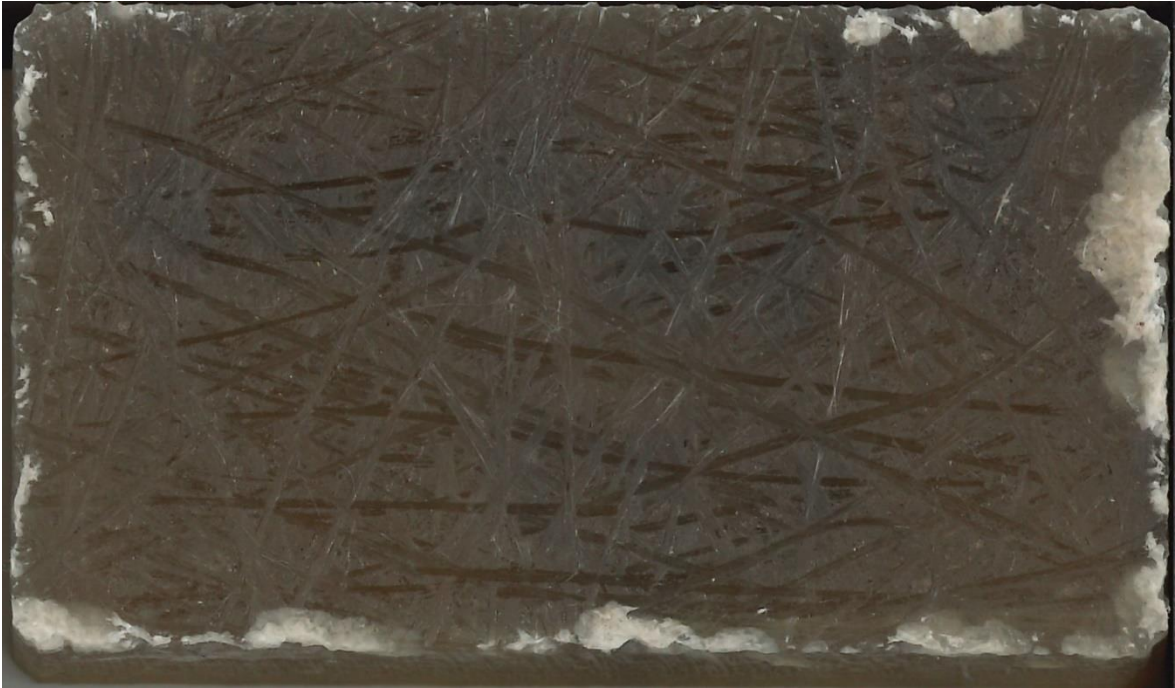
Kuva 10. Leikkuunopeus 1419 mm/min, abrasiivin syöttö 200 g/min

5.3 Lujitemuovi

250 MPa:n leikkuupaine osoittautui korkeilla nopeuksilla liian alhaiseksi. Korkeimmilla leikkuunopeuksilla koekappaleet jäivät kiinni levyyn eikä vesisuihku lävistänyt lujitemuovilevyä täydellisesti. Leikattavien kappaleitten taustapuolilla esiintyi delaminoitumista taulukon 8 esittämällä parametrijhdistelmällä (kuva 11).

Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]
50	734
100	1538
100	965
150	1805
200	2021
250	2207

Taulukko 8. Delaminoitumisen esiintyminen 250 MPa:n paineella



Kuva 11. Leikkuureunan delaminoituminen

250 MPa:n paineella leikkuureuna oli irronneissa kappaleissa tyydyttävän laatuinen hitailla leikkuunopeuksilla, eikä leikkuujäljen laadussa esiintynyt huomattavaa eroa korkeammalla paineella leikattuun (kuva 12).



Kuva 12. Leikkuunopeus 408 mm/min. Abrasiivin määrä 50 g/min. Leikkuupaine vasemmalla 250 MPa ja oikealla 360 MPa

250 MPa:n paineella leikkuunopeus 1132 mm/min ja abrasiivin syöttö 150 g/min osoittautui leikkuujäljeltään yleiskäyttöön soveltuvaksi. 360 MPa:n leikkuupaineella 50 g/min abrasiivin syötöllä delaminoitumista esiintyi 734 mm/min korkeammilla nopeuksilla leikatessa. Delaminoitumista oli lievästi havaittavissa myös 100 g/min abrasiivin syötön kanssa 2141 mm/min nopeudella. Abrasiivin syöttöä nostoen 150 g/min tasolle delaminoitumista ei enää havaittu lainkaan. Leikkuunopeus oli tällöin korkeimmillaan 2512 mm/min. Leikkuujäljen laatu oli näillä parametreilla yleisimpiin käyttökohteisiin riittävä.

Paine [MPa]	Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]	Nopeusero [%]	Abrasiivin kulutuksen ero [%]
250	150	1132	37,1	-	-
360	100	1538	18,2	35,9	-50,9
360	150	2512	16,7	121,9	-54,9
360	200	2814	19,9	148,6	-46,4
360	250	3073	22,8	171,5	-38,6

Taulukko 9. 360 MPa:n asetuksia verrattuna 250 MPa leikkuupaineen hyväksyttävään laatuun

Leikkuunopeus voidaan yli kaksinkertaistaa samalla vähentäen käytetyn abrasiivin määrää 54,9 % kuitenkin samaan leikkujälkeen päästen. Korkeimmillaan nopeutta saatiin nostettua 171,5 % silti kuluttaen abrasiiviä 38,6 % vähemmän.

Hyvälaatuinen leikkujälki saavutettiin 250 MPa:n paineella leikatessa 536 mm/min 100 g/min abrasiivin syötöllä. 360 MPa:n paineella vastaava laatu saatiin 50 g/min abrasiivin määrällä 734 mm/min leikkuunopeudella.

Paine [MPa]	Abrasiivi [g/min]	Leikkuunopeus [mm/min]	Abrasiivin kulutus [g]	Nopeusero [%]	Abrasiivin kulutuksen ero [%]
250	100	536	52,2	-	-
360	50	734	19,1	36,9	-63,5
360	100	965	29,0	80,0	-44,5
360	150	1132	37,1	111,2	-29,0
360	200	1268	44,2	136,6	-15,5
360	250	1385	50,5	158,4	-3,2

Taulukko 10. 360 MPa asetusten vertailu 250 MPa:n hyvään leikkuujälkeen

Leikkuupainetta nostettaessa 360 MPa:n tasolle hyvään leikkuujälkeen päästiin huomattavasti nopeammin leikaten samalla kuluttaen vähemmän abrasiiviä. Nopeutta voitiin nostaa parhaimmillaan 158,4 % hiekan kulutuksen vähentyessä 3,2 %.

5.3.1 Päätelmät

Käytettäessä 250 MPa:n leikkuupainetta kappaleet jäivät alhaisilla hiekkamäärillä usein kiinni levyyn. Leikkuissa havaittiin usein delaminoitumista. Nopeudella 2512 mm/min 150 g/min abrasiivin syötöllä delaminoitumista ei enää ollut nähtävissä. Mahdollisen vesisuihkun läpäisemättömyyden sekä merkittävän delaminoitumisen takia 250 MPa:n leikkuupaine hylättiin leikkuupaine vaihtoehdona lujitemuoville.

360 MPa:n painetta käyttäen vesisuihkun läpäisy oli ongelmaton, mutta delaminoitumista esiintyi lievästi korkeilla nopeuksilla alhaista hiekkamäärää käyttäen. 250 g/min abrasiivin syötöllä ja leikkuunopeudella 3073 mm/min leikkuureunan laatu oli riittävän laatuinen useimpiin käyttökohteisiin, kuten painolevyihin (kuva 13). Tätä hitaammilla nopeuksilla leikaten reunan laatu ei merkittävästi parantunut. Erytisen hyvää leikkuujälkeä vaatiessa nopeus 1385 mm/min todettiin riittäväksi. Abrasiivin määrä oli tällöin 250 g/min (kuva 14).



Kuva 13. Leikkuunopeus 3073 mm/min, abrasiivin syöttö 250 g/min



Kuva 14. Leikkuunopeus 1385 mm/min, abrasiivin syöttö 250 g/min

5.4 Johtopäätökset

Tuloksista voitiin päätellä, että mikäli tavoitteena on leikata riittävän laatuista leikkujälkeä nopeasti, on kannattavaa käyttää korkeaa leikkuupainetta. Mikäli leikkuaika ei kuitenkaan ole kriteeri, hyvää laatua saatiin myös alhaisemmalla paineella. Tällöin leikkuissa kesti ai-noastaan hieman kauemmin, mutta käytetty abrasiivin määrä oli usein myös suurempi. Etuna alhaisemmalla paineella leikatessa on korkeapainepumpun pidempi huoltoväli.

Polypropeenin ja polyvinylideenifluoridin leikkuuasetukset olivat samansuuntaiset, mutta lievää eroa oli havaittavissa. Polyvinylideenifluoridilla leikkujälkien laatu oli erittäin tasa-laatuinen, kun taas polypropeenilla esiintyi selkeämpää vaihtelua leikkujäljissä. Tuloksista voidaan päätellä, että eri kestumouveja leikatessa leikkuuasetukset eivät eroa toisistaan merkittävästi.

Lujitemuovien koeajoja verratessa aikaisempaan tutkimustietoon voitiin todeta, että riittä-vän hyvää leikkujälkeä saatiin leikattua merkittävästi korkeammilla nopeuksilla kuin mitä aikaisemmat tutkimukset antoivat ymmärtää. Lujitemuovin leikkaaminen vaati käytännössä aina korkean leikkuupaineen, sillä delaminoitumista tapahtui usein matalalla paineella lei-katessa.

Koeajoista kirjattiin myös leikkuaajat. Näistä ei voida kuitenkaan tehdä suuria päätelmiä vesileikkuuohjelmiston kompensatioiden takia. Leikkuaajat riippuvat huomattavasti leikat-tavan kappaleen muodosta.

6 Yhteenveto

Toimeksiannon tavoitteena oli selvittää PRP-Plastic Oy:n tuotantoon soveltuvat vesileikkuuparametrit. Tarkoituksena ei ollut löytää absoluuttisesti parasta laatua tuottavat leikkuuasetukset, vaan asetukset, joilla tuotannossa saadaan leikattua riittävää laatua tarpeeksi nopeasti ja turhaa hiekan kulutusta välttämällä.

Parametrit selvitettiin suorittamalla koeleikkuuta käytännössä eri leikkausarvoin. Työ aloitettiin materiaalien koneistettavuusarvojen selvityksellä, jonka pohjalta suoritettiin koeajoja eri parametrein vaihtaen leikkuupainetta, leikkuunopeutta sekä abrasiivin syöttömäärää.

Leikkuuparametrit ovat tämän työn jälkeen selvillä koeajetuille materiaaleille. Tuloksista voidaan päätellä, että on järkevää käyttää korkeaa leikkuupainetta leikkuun nopeuttamiseksi. Mikäli leikkuulla ei kuitenkaan ole kiire, voidaan painetta laskea korkeapainepumpun huoltovälin pidentämiseksi. Alhaisemmalla paineella leikatessa leikkujäljestä voidaan saada hitaammin leikaten hyvälaatuinen. Leikkuunopeudet saatiin optimoitua siten, että riittävää leikkausjälkeä saadaan paikoin moninkertaisesti nopeammin samalla vähemmän abrasiivää käyttäen.

Työn tulos helpottaa työaikojen arviointia ja valintaa siitä, millä nopeudella leikaten saadaan riittävän hyvälaatuinen kappale leikattua. Leikkuunopeuksien selvitys auttaa myös tarjouslaskennassa. Selvitettyjen asetusten takia myös abrasiivin kulutus on vähäisempää, eikä abrasiivää kuluteta turhan suurilla määrillä. Tulokset kuitenkin antavat ainoastaan oikean suunnan, ja asetusten toimivuutta tullaan seuraamaan ja hienosäätämään tarpeen mukaan.

Jatkossa leikkuuparametrien selvitystyötä tullaan jatkamaan tartuntakudoksellisten fluorimuovien osalta. Myös erityisen paksujen, yli 40 mm, levyjen osalta aiotaan erikseen selvittää soveltuvat parametrit.

Lähteet

Agru. 2020a. Agru Piping Systems. Viitattu 20.10.2020. Saatavissa

<https://www.agru.at/en/company/piping-systems/>

Agru. 2020b. Agru semi-finished products. Viitattu 2.11.2020. Saatavissa

https://www.agru.at/uploads/tx_bfbrochures/PRO_Halbzeuge_en-WEBSC_01.pdf

Ahsan, A. K; Azmir, M; 2007. Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. Journal of Materials Processing Technology 198, 122-128.

Airasmaa, I; Kokko, J; Komppa, V; Saarela, O. 1991. Muovikomposiitit. Jyväskylä: Muoviyhdistys ry.

Airasmaa, I; Kokko, J; Komppa, V; Saarela, O; Skrifvars, M. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.

Ebnesajjad, S. 2011. Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials. Elsevier Science & Technology Books.

Aaltonen, K; Aromäki, M; Ihalainen, E; Sihvonen, P. 1985. Valmistustekniikka. Jyväskylä: Otatieto.

Muototerä Oy. Muototerä Oy:n kotisivut. Viitattu 21.10.2020. Saatavissa

<https://www.muototera.fi>

Kurri, V; Malen, T; Sandell, R; Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. Opetushallitus.

Kovacevic, R. 1991. Surface texture in abrasive waterjet cutting. Journal of Manufacturing Systems 10.

Zeng, Jay. 2007. Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting. Omax Corporation.

Liite 1. Koeajotaulukot

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1144	24
Karkea	821	30
Keskilaatu	515	42
Hyvä	370	55
X-hieno	286	69

Taulukko 11. Polypropeenin koeajot 50 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1503	20
Karkea	1080	24
Keskilaatu	677	34
Hyvä	486	44
X-hieno	376	55

Taulukko 12. Polypropeenin koeajot 100 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1764	18
Karkea	1267	22
Keskilaatu	795	30
Hyvä	571	38
X-hieno	441	48

Taulukko 13. Polypropeenin koeajot 150 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1976	17
Karkea	1419	20
Keskilaatu	890	27
Hyvä	639	35
X-hieno	495	43

Taulukko 14. Polypropeenin koeajot 200 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	2158	16
Karkea	1550	19
Keskilaatu	972	26
Hyvä	698	32
X-hieno	540	40

Taulukko 15. Polypropeenin koeajot 250 g/min abrasiivin määrällä

PVDF

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1114	24
Karkea	821	30
Keskilaatu	515	42
Hyvä	370	55
X-hieno	286	69

Taulukko 16. Polyvinyylideenifluoridin koeajot 50 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1503	19
Karkea	1080	25
Keskilaatu	677	34
Hyvä	486	44
X-hieno	376	54

Taulukko 17. Polyvinyylideenifluoridin koeajot 100 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1764	17
Karkea	1267	22
Keskilaatu	795	30
Hyvä	571	38
X-hieno	441	47

Taulukko 18. Polyvinyylideenifluoridin koeajot 150 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1976	17
Karkea	1419	20
Keskilaatu	890	27
Hyvä	639	35
X-hieno	495	43

Taulukko 19. Polyvinyylideenifluoridin koeajot 200 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	2158	16
Karkea	1550	19
Keskilaatu	972	26
Hyvä	698	32
X-hieno	540	40

Taulukko 20. Polyvinyylideenifluoridin koeajot 250 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	1629	19
Karkea	1170	22
Keskilaatu	734	32
Hyvä	527	41
X-hieno	408	51

Taulukko 21. Lasikuidun koeajot 50 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	2141	12
Karkea	1538	19
Keskilaatu	965	26
Hyvä	693	33
X-hieno	536	40

Taulukko 22. Lasikuidun koeajot 100 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	2512	13
Karkea	1805	17
Keskilaatu	1132	23
Hyvä	813	29
X-hieno	629	35

Taulukko 23. Lasikuidun koeajot 150 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	2814	13
Karkea	2021	16
Keskilaatu	1268	21
Hyvä	911	26
X-hieno	704	32

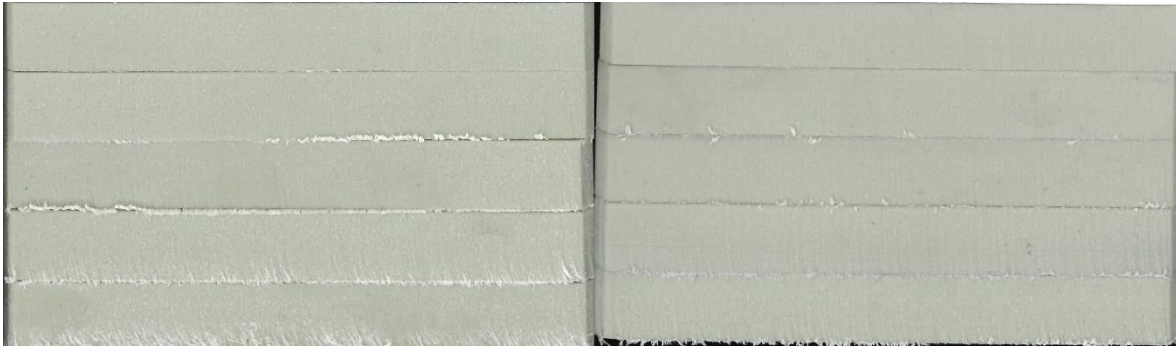
Taulukko 24. Lasikuidun koeajot 200 g/min abrasiivin määrällä

Laatu	Nopeus [mm/min]	Aika [s]
X-karkea	3073	13
Karkea	2207	15
Keskilaatu	1385	20
Hyvä	994	25
X-hieno	769	30

Taulukko 25. Lasikuidun koeajot 250 g/min abrasiivin määrällä

Liite 2. Leikkuujäljet

Polypropeeni



Kuva 1. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 50 g/min



Kuva 2. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 100 g/min



Kuva 3. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 150 g/min

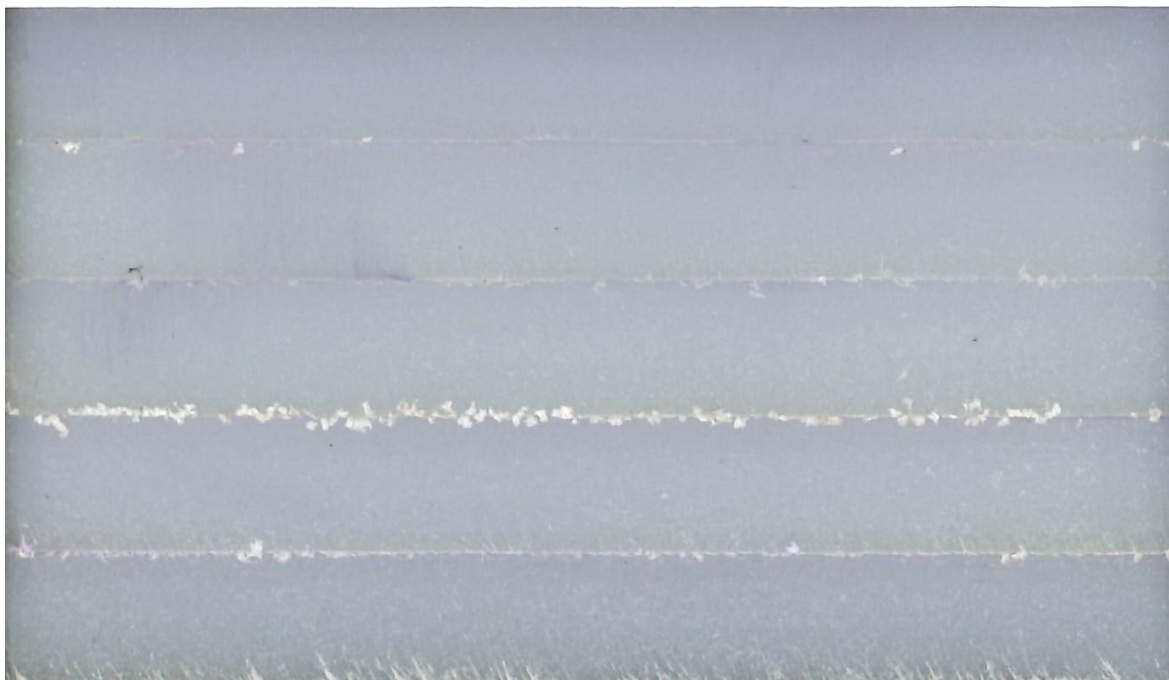


Kuva 4. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 200 g/min

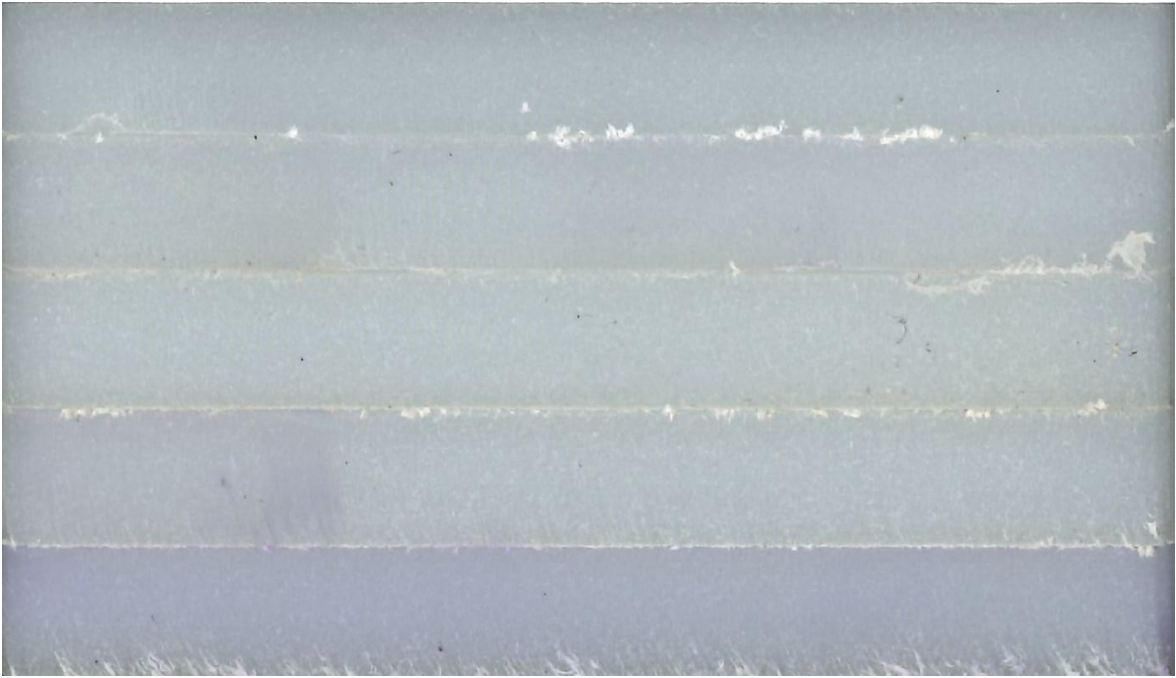


Kuva 5. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 250 g/min

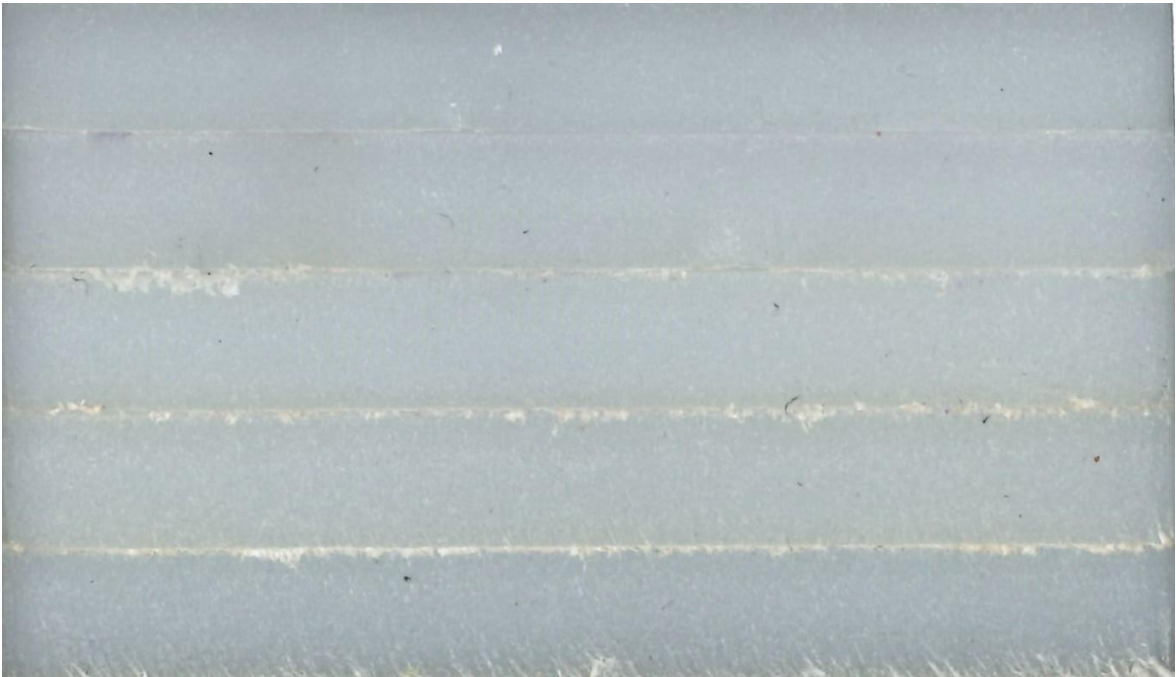
Polyvinyylideenifluoridi



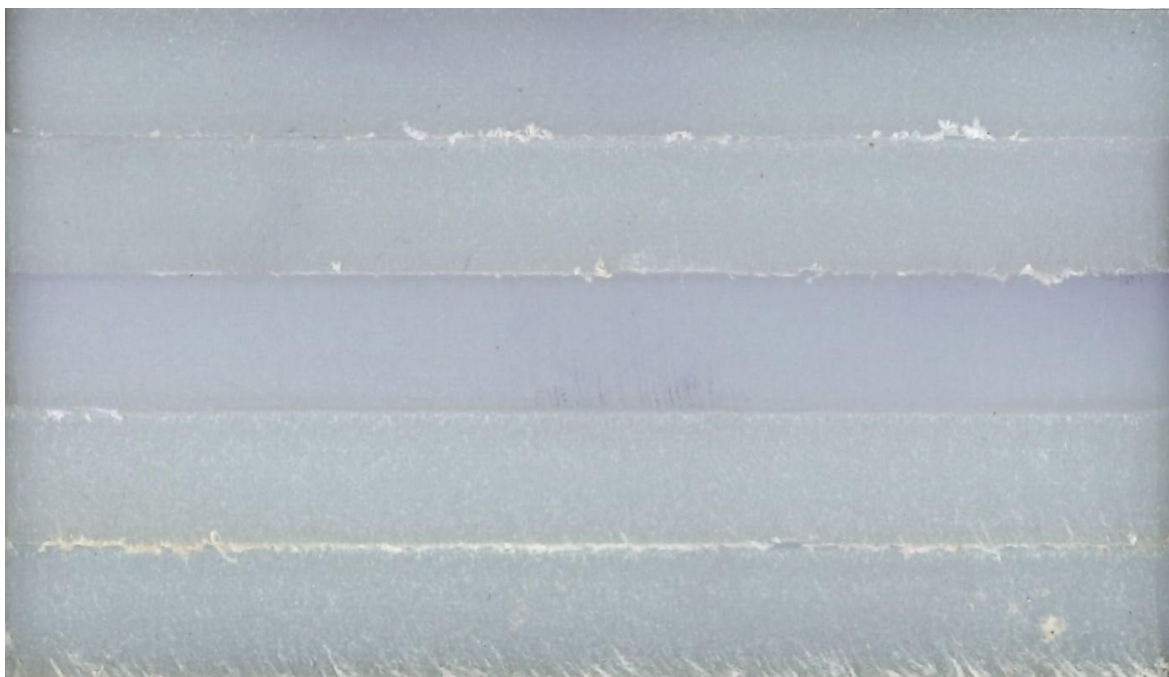
Kuva 6. Paine 360 MPa, abrasiivin syöttö 50 g/min



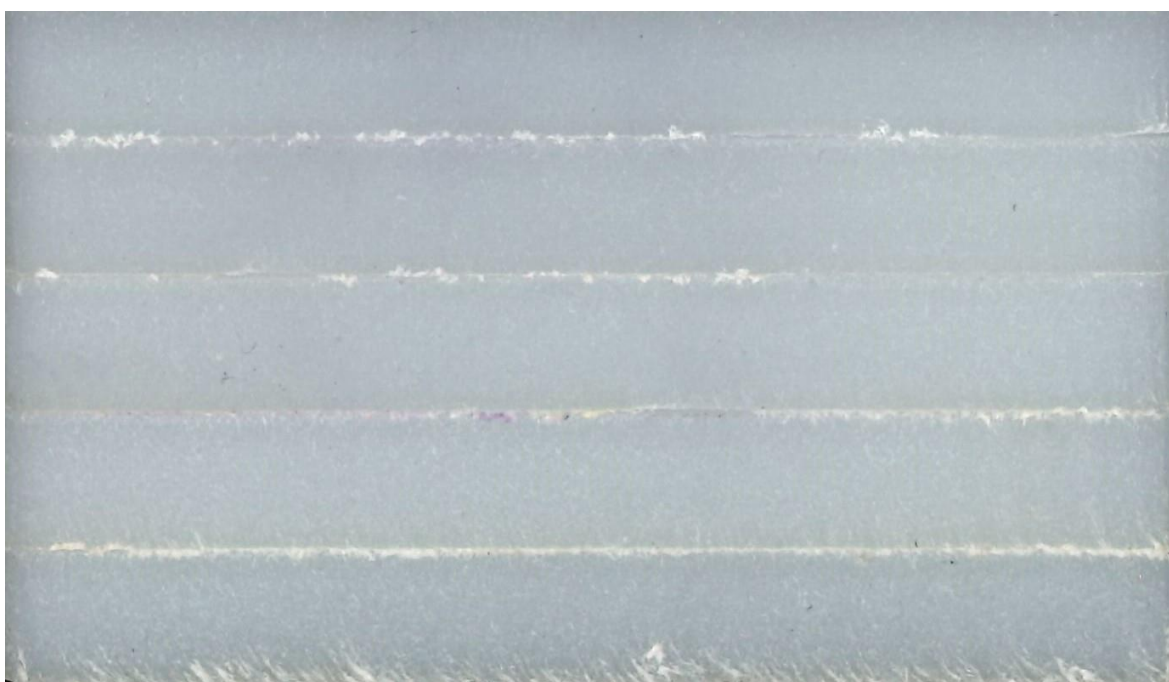
Kuva 7. Paine 360 MPa, abrasiivin syöttö 100 g/min



Kuva 8. Paine 360 MPa, abrasiivin syöttö 150 g/min



Kuva 9. Paine 360 MPa, abrasiivin syöttö 200 g/min



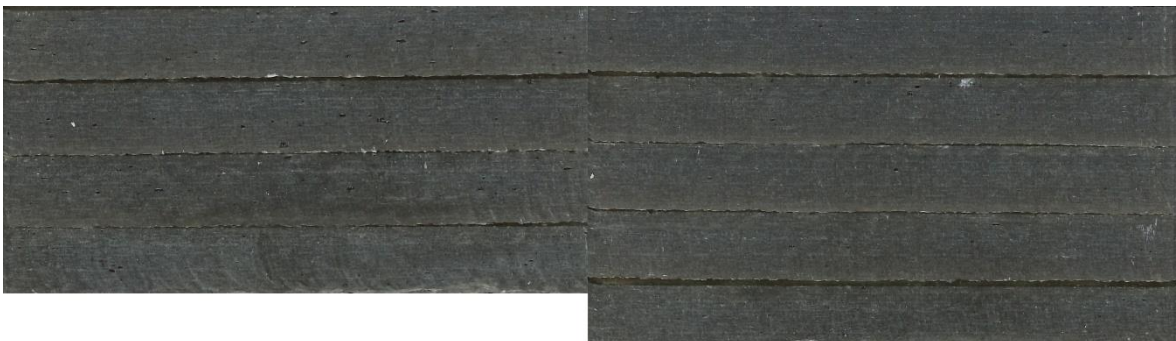
Kuva 10. Paine 360 MPa, abrasiivin syöttö 250 g/min



Kuva 11. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 50 g/min



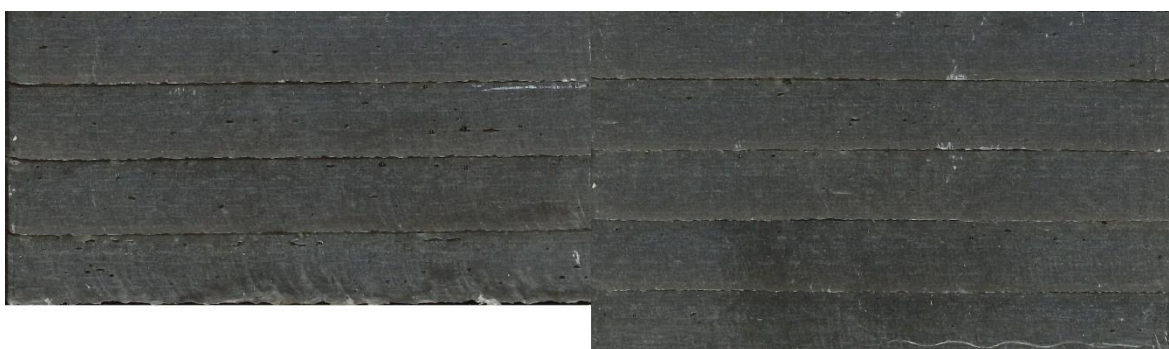
Kuva 12. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 100 g/min



Kuva 13. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 150 g/min



Kuva 14. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 200 g/min



Kuva 15. Paine vasemmalla 250 MPa, oikealla 360 MPa, abrasiivin syöttö 250 g/min