



Topi-Heikki Hintsala

**TERMOPLASTISEN POLYURETAANIMATERIAALIN  
SOVELTUVUUS MIKRONESTEKANAVISTOJEN  
KUUMAPURISTAMISEEN RULLALTA RULLALLE  
-PAINOKONEELLA**

**TERMOPLASTISEN POLYURETAANIMATERIAALIN  
SOVELTUVUUS MIKRONESTEKANAVISTOJEN  
KUUMAPURISTAMISEEN RULLALTA RULLALLE  
-PAINOKONEELLA**

Topi Hintsala  
Opinnäytetyö  
Kevät 2013  
Laboratorioalan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Laboratorioalan koulutusohjelma, Laboratorioanalytiikan  
suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Topi Hintsala

Opinnäytetyön nimi: Termoplastisen polyuretaanimateriaalin soveltuvuus  
mikronestekanavistojen kuumapuristamiseen rullalta rullalle painokoneella

Työn ohjaajat: Eija Hakala (OAMK), Sanna Uusitalo (VTT)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2013 Sivumäärä: 62 + 5 liitettä

---

Opinnäytetyö tehtiin Oulun VTT:lle. Työn tavoitteena oli kuumapuristaa entsyymimittauksiin soveltuvia mikronestekanavistoja elastisesta termoplastisesta polyuretaanikalvosta rullalta rullalle -painokoneella.

Kuumapuristamisessa muotissa koholla oleva kuvio painetaan muovimateriaaliin lämmön ja paineen avulla. Työssä käytettiin kahta rullalta rullalle -painokonetta kanavistojen valmistamiseen. Oulun ammattikorkeakoulun tiloissa olevalla Sampo-painokoneella kanavistoista ei saatu riittävän syviä. Kanavien syvyydet ja profiilit mitattiin pinnan muotojen mittaukseen tarkoitetulla dektakprofilometrillä. Oulun VTT:llä sijaitsevalla suuremmalla Pico-painokoneella valmistetut kanavistot olivat riittävän syviä, mutta ongelmia tuotti kuumapuristettavan polyuretaanimateriaalin kutistuminen ajosuunnassa. Materiaali kutistui vielä lisää kanavistoja kansitettaessa, jolloin myös kanavat madaltuivat hieman.

Kanavistojen kansittamiseen käytettiin laminaattoria, joka lämmön ja paineen avulla kiinnittää kansimateriaalin kanavistoon. Sammolla tehtyjä kanavistoja ei pystytty kansittamaan ilman, että ne menivät osittain tukkoon. Picolla valmistettuja kanavistoja pystyttiin kansittamaan siten, että kanavat pysyivät täysin auki.

Kansitettujen Picolla valmistettujen kanavistojen soveltuvuutta entsyymimittauksiin kokeiltiin värireaktion aiheuttavilla entsyymi- ja substraattiliuoksilla. Nesteet virtasivat hyvin kanavissa, mutta kanaviston sekoitusosio olisi voinut toimia paremmin. Pienten esivalmistelujen jälkeen entsyyminäyte saatiin sekoittumaan substraattiliuoksen kanssa sekoituskanavassa.

Työssä pystyttiin valmistamaan toimivia mikronestekanavistoja rullalta rullalle -painokoneella. Käytetyn polyuretaanimateriaalin kutistumisen vuoksi valmistetut kanavat olivat suunniteltua kapeampi ja matalampia. Painokoneen ajoparametrien optimoinnissa riittää vielä tutkittavaa.

---

Asiasanat: mikrofluidistiikka, kuumapuristaminen, entsyymikokeet, kestävä kehitys

## ALKULAUSE

Monista tähän opinnäytetyöhön liittyvistä asioista on hyvin vähän tai ei ollenkaan suomenkielistä kirjallisuutta. Kansitetuista kemiallisiin analyysihin käytettävistä mikrokokoluokan kanavistoista käytetään englanninkielisessä kirjallisuudessa usein termejä ”lab-on-a-chip” tai ”microfluidic chip”. Puhekielessä puhutaan ”chipeistä”. Tässä työssä käytettiin yksinkertaisesti termiä ”kanavisto” tai ”mikronestekanavisto” sekä kansittamattomasta että kansitetusta kanavistosta. Otsikossakin esiintyvän mikronestekanavaviston tilalla harkittiin myös käytettäväksi mikrofluidistiikkakanavistoa, mutta lopuksi päädyttiin versioon, jossa ei ole lainasanoja. Edellä mainittujen lisäksi myös ”tasokuumapuristaminen” on esimerkki sanasta, jota tuskin löytyy kirjallisuudesta tai edes internetin hakukoneiden tuloksista.

Ennen opinnäytetyön aloitusta olin muutaman kuukauden työharjoittelussa Oulun VTT:llä, missä tähän työhön liittyvät asiat tulivat tutuiksi. Haluaisin kiittää kaikkia Oulun VTT:n työntekijöitä ja erityisesti Leena Hakalahden vetämän bio- ja mikrosysteemit tiimin jäseniä viihtyisästä työilmapiiristä. Opinnäytetyöhön liittyen haluaisin edellä mainittujen lisäksi kiittää Oulun ammattikorkeakoululla sijaitsevassa PrinLab-laboratoriossa työskenteleviä ihmisiä. Kiitokset painokoneiden operaattoreille Inka Päckilälle (Pico, VTT) ja Juha Juutille (Sampo, OAMK). Tähän opinnäytetyöhön liittyvän tutkimuksen parissa Oulun VTT:llä työskenteli pääasiassa tutkija Sanna Uusitalo, jolle kuuluu suurin kiitos, sillä kiireistään huolimatta sain häneltä aina ohjausta ja apua ongelmatilanteissa.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 MIKROFLUIDISTIIKKA	9
3 TERMOPLASTISET POLYMEERIT	11
3.1 Termoplastinen polyuretaani (TPU)	12
3.2 Polymetyylimetakryyli (PMMA)	13
4 KUUMAPURISTAMINEN	14
4.1 Tasokuumapuristaminen	14
4.2 R2R-kuumapuristaminen	15
5 VTT:N TUTKIMUS	17
6 TYÖSSÄ KÄYTETYT PAINOKONEET	19
6.1 Sampo R2R-painokone	19
6.2 Pico R2R -painokone	20
6.3 MADAG-tasokuumapuristuspainokone	21
7 DEKTAK	23
8 KANAVISTOJEN KUUMAPURISTAMINEN	25
8.1 PMMA:n kuumapuristaminen Sammolla	25
8.2 TPU:n tasokuumapuristaminen	26
8.3 TPU:n kuumapuristaminen Sammolla	28
8.4 TPU:n kuumapuristaminen Picolla	30
9 KUUMAPURISTETTUJEN KANAVIEN PROFIIlien TULKINTA	34
9.1 Sammolla kuumapuristettu PMMA	34
9.2 Tasokuumapuristettu TPU	37
9.3 Sammolla kuumapuristettu TPU	39
9.4 Picolla kuumapuristettu TPU	43
9.4.1 Ensimmäinen ajo	43
9.4.2 Toinen ajo	44
9.4.3 Kolmas ajo	45
10 KANAVISTOJEN KANSITUS	48

10.1.1 Tasokuumapuristetut kanavistot	49
10.1.2 Sammolla valmistetut kanavistot	49
10.1.3 Picolla valmistetut kanavistot	50
11 ENTSYMIKOKKEET	53
11.1 Tasokuumapuristetut kanavistot	54
11.2 Picolla kuumapuristetut kanavistot	54
12 YHTEENVETO	57
LÄHTEET	60
LIITTEET	62

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, soveltuuko termoplastinen polyuretaanikalvo (TPU) mikronestekanavistojen materiaaliksi ja erityisesti voidaanko siihen kuumapuristaa kanavistoja rullalta rullalle (R2R) -painokoneella. Työssä oli tarkoitus käyttää Oulun ammattikorkeakoulun tiloissa sijaitsevaa Sampo R2R-painokonetta kanavistojen kuumapuristamiseen. Mikäli Sammolla ei saataisi hyviä kanavistoja, olisi mahdollista käyttää VTT:n tiloissa olevaa suurempaa Pico-painokonetta.

Työ tehtiin Oulun VTT:lle, jossa on painettuun teknologiaan keskittynyt tutkimusryhmä. Opinnäytetyö liittyi VTT:n tutkimukseen, jossa TPU-materiaalista on tarkoitus valmistaa kanavistoja, joita käytetään hiivasolujen tuottamien entsyymien määrittäisiin.

Oulun ammattikorkeakoululla sijaitseva Sampo on pienoissarjatuotantoon tarkoitettu painokone. Sammosta oltiin kiinnostuneita VTT:llä, koska se voisi mahdollistaa mikronestekanavistojen prototyyppivalmistuksen tuotekehitysprojektien alkuvaiheessa. Oulun VTT:n oma R2R-kuumapuristusyksikkö Pico-painokoneessa on tarkoitettu suurempien näytemäärien valmistukseen. Sampoa ei ollut aikaisemmin käytetty mikronestekanavien kuumapuristamiseen. Työssä oli tarkoitus optimoida Sammolla kuumapuristukseen käytettäviä valmistusparametreja eli kuumapuristustelan lämpötilaa, puristuspainetta ja kalvon ajonopeutta. Tavoitteena oli löytää parametrit, joilla painetuista kanavistoista saataisiin riittävän syviä ja hyvän muotoisia. Referenssinä käytettiin VTT:n tiloissa olevalla tasokuumapuristimella painettuja kanavistoja. Kanavien profiileja tutkittiin dektak-pintaprofiilin mittauslaitteistolla.

Termoplastisen polyuretaanin soveltuvuutta R2R-kuumapuristamiseen ei ole aiemmin tutkittu. Materiaali on hyvin elastista, mikä mahdollisesti hankaloittaa kanavistojen valmistusta. Ennen työn aloitusta TPU:lle oli VTT:llä kuumapuristettu kanavistoja tasokuumapuristusyksiköllä, jolla oli saatu hyviä kanavistoja.

Valmistetut kanavistot kansitettiin TPU-kalvolla, jonka toinen puoli on käsitelty siten, että siitä tulee tarttuva lämmön ja paineen vaikutuksesta. Kanavistojen soveltuvuus entsyymimittauksiin testattaisiin värireaktion aiheuttavilla entsyymi- ja substraattiliuoksilla. Mikäli Sammolla painetuista kanavistoista ei saataisi toimivia, keskityttäisiin Picolla tai tasokuumapuristimella tehtyihin kanavistoihin.

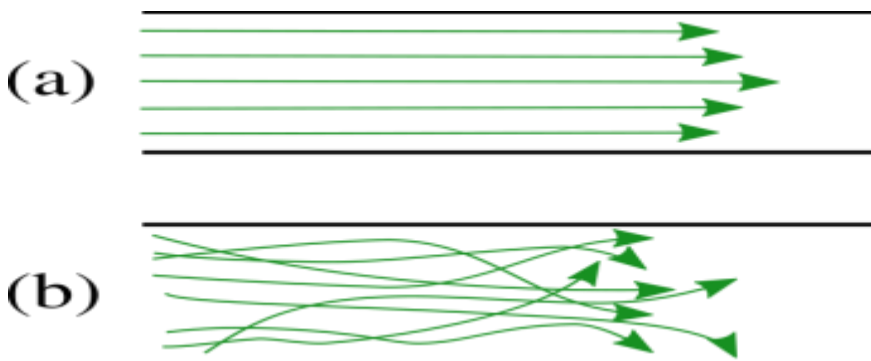


## 2 MIKROFLUIDISTIIKKA

Mikrofluidistiikka on suhteellisen uusi tieteen ja teknologian ala, jossa on tapahtunut huomattavaa kehitystä viimeisten parin vuosikymmenen aikana. Mikrofluidistiikan alalla kehitetään ja valmistetaan laitteita, joissa neste virtaa kanavissa, joiden syvyydet ja leveydet ovat kymmenien tai satojen mikrometrien luokkaa. Mikro-etuliite sanassa mikrofluidistiikka ei viittaa systeemin tai laitteen kokoon, vaan siinä virtaavan nesteen pieneen määrään. (1, s. 1–2.)

Vaikka nesteeseen vaikuttavat samat voimat makro-, mikro- ja nanokokoluokan kanavissa, ovat voimien suhteet hyvin erilaiset. Esimerkiksi painovoiman voi käytännössä unohtaa suunniteltaessa mikro- ja nanokokoluokan kanavistoja, joissa pintajännitysvoimat ovat hallitsevia. (2, s. 8.)

Mikrokokoluokan kanavissa nesteen virtaus on laminaarista, kun suuremmissa makrokoon kanavissa se on turbulენტtista (1, s. 4). Kuva 1 havainnollistaa näiden virtausten eroa. Kanavistoissa on usein tavoitteena sekoittaa kahta tai useampaa reagenssia, joiden välillä tapahtuu kemiallisia reaktioita. Yksinkertaisin tapa sekoittaa kahta liuosta on Y-kirjaimen muotoinen kanavarakenne, jossa eri liuoksia sisältävät kanavat yhdistyvät yhdeksi kanavaksi. Virtauksen laminaarisen luonteen vuoksi liuosten sekoittuminen tapahtuu diffuusion avulla (1, s. 386). Laminaarisen virtauksen luonne on usein hyvin ennalta arvattava, joten tietokonesimulaatioita voidaan käyttää hyväksi mikrokokoluokan kanavistoja suunniteltaessa. (2, s. 4–8.)



KUVA 1. (a) Laminaarinen virtaus, (b) Turbulenttinen virtaus (3)

Mikrofluidistiikan alalla ollaan siirtymässä perinteisesti käytetyistä pii- ja lasimateriaaleista enimmäkseen muovimateriaalien eli synteettisten polymeerien käyttöön niiden hyödyllisten ominaisuuksien vuoksi. Useat synteettiset polymeerit kestävät hyvin erilaisia kemikaaleja ja sopivat yhteen biomolekyylien ja mikrobien kanssa. Muita syitä polymeerien käyttöön ovat edulliset materiaalikustannukset ja massatuotantomahdollisuudet. Massatuotanto mahdollistaa edullisten kertakäyttöisten biosensoreiden valmistuksen. Biosensoreita ovat esimerkiksi terveydenhuollossa käytettävät pikatestit, joille on olemassa suuri kysyntä. Kertakäyttöisyys on usein tarpeellista, jotta voidaan välttää kontaminaatioita. (4, s. 1.)

### 3 TERMOPLASTISET POLYMEERIT

Polymeerimateriaali koostuu polymeerimolekyyleistä, jotka taas koostuvat toisiinsa kovalenttisesti liittyneistä monomeereistä. Polymeerissä voi olla yhtä tai useampaa erilaista monomeeriä. Luonnossa esiintyviä polymeerejä ovat esimerkiksi proteiinit ja DNA. Tässä tekstissä polymeeri-sanalla viitataan synteettisiin polymeereihin eli muoveihin. (5, s. 1.)

Lämmön avulla uudelleen muokattavia muoveja kutsutaan termoplastisiksi polymeereiksi tai kestopuoveiksi. Termoplastisten polymeerien polymeerimolekyylit ovat sitoutuneet toisiinsa suurilta osin fysikaalisin sidoksien eli van der Waals -voimilla, dipoli-dipolisidoksilla ja vetysidoksilla. Näiden heikkojen sidosten vuoksi polymeerimolekyylit pääsevät liikkumaan toistensa päällä, kun polymeerimateriaalia lämmitetään. Tämä mahdollistaa uudelleen muokattavuuden. Polymeerejä, joita ei voida uudelleen muovata lämmön avulla, kutsutaan termosettisiksi polymeereiksi eli kertamuoveiksi. Kertamuovien polymeerimolekyylit ovat verkottuneet kovalenttisin sidoksien toisiinsa ja hajoavat lämmittäessä. (5, s. 1–2.)

Kaikilla termoplastisilla polymeereillä on ominainen lasisiirtymälämpötila. Lämpötilan ollessa lasisiirtymälämpötilan alapuolella polymeeriketjut eivät pääse liikkumaan ja materiaali on jäykkää ja kovaa. Kun lämpötila nousee lasisiirtymälämpötilaan, polymeeriketjut voivat liikkua toistensa päällä ja materiaalista tulee joustavaa ja kumimaista. Tällöin materiaalia on mahdollista muovata. Lasisiirtymälämpötilaa ei tule yhdistää sulamislämpötilaan, joka on aina lasisiirtymälämpötilaa korkeampi. (5, s. 8.)

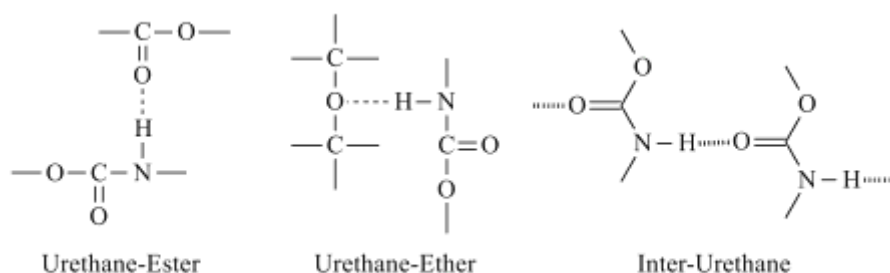
Polymeerejä, joiden sisäinen rakenne on järjestäytymätön, kutsutaan amorfisiksi muoveiksi. Mitä enemmän lämpötila nousee yli lasisiirtymälämpötilan, sitä pehmeämmäksi ja juoksevammaksi amorfinen muovi muuttuu. Tarkkaa sulamislämpötilaa ei voida määrittää ja usein puhutaan pehmenemislämpötilasta, jossa amorfinen muovi pehmenee tietyllä määrättyllä tavalla. Osakiteytyneeksi muoviksi kutsutaan materiaalia, jossa on sekä amorfista ja

kiteytyntä ainetta. Lämpötilaa, jossa osakiteytyneen muovin kiderakenne hajoaa kokonaan, kutsutaan sulamislämpötilaksi. (5, s. 7–8.)

### 3.1 Termoplastinen polyuretaani (TPU)

Polyuretaaneiksi kutsutaan polymeerejä, joissa uretaaniryhmä (-NHCO-O-) toistuu enemmän tai vähemmän säännöllisesti. Polyuretaaneja valmistetaan antamalla kolmen yhdistetyypin reagoida keskenään: isosyanaatin, polyolin ja diolin tai diamiinin. Isosyanaatit ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka sisältävät isosyanaattiryhmän (-N=C=O). Polyolit ovat alkoholeja, jotka sisältävät vähintään kaksi reaktiivista hydroksiryhmää. Uretaaniryhmä muodostuu syanaatti- ja hydroksiryhmän välille. Koska kaikkia kolmea osatekijää on hyvin monenlaisia, voidaan valmistaa lukemattomia erilaisia polyuretaanimateriaaleja. Tästä syystä polyuretaanien ominaisuuksia voidaan räätälöidä käyttökohteen mukaan. (6, s. 3.)

Tässä työssä käytettiin BASF:n valmistamaa Elastollan SP806 -polyuretaania. Materiaali on polyeetteripohjaista polyuretaania, jossa polymeerien uretaaniryhmät ovat liittyneet vetysidoksin toisten polymeerien eetteriryhmiin, kuten kuvan 2 keskimmaisessä piirustuksessa. Koska sidokset eivät ole kovalenttisia, vaan fysikaalisia vetysidoksia, ovat kuvan 2 tyyppiset polyuretaanityypit termoplastisia. (6, s. 5.)



*KUVA 2. Erityyppisiä vetysidoksia termoplastisten polyuretaani monomeerien välillä (6, s. 5)*

SP806-polyuretaani on pehmeää, joustavaa ja kumimaista materiaalia. Sen lasisiirtymälämpötila onkin  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joten sitä voidaan muovata periaatteessa jo huoneenlämmössä. Kevyesti venytettäessä materiaali palaa takaisin alku-

peräiseen muotoonsa, mutta voimakkaammin venytettäessä venyminen on pysyvää. Materiaalin pehmenemislämpötilaksi on ilmoitettu 155 °C. Työssä käytetty 200 µm paksu materiaali on hieman sameaa, mutta silti läpinäkyvää. (7.)

### **3.2 Polymetyylimetakryyli (PMMA)**

Polymetyylimetakryyli (PMMA) on termoplastinen polymeeri, joka koostuu metyylimetakryylimonomeereistä. Sitä kutsutaan usein lyhyemmin akryyliksi tai pleksilasiksi, joka on yksi sen kaupallisista nimistä. (8, s. 1.)

Polymetyylimetakryyli on kova materiaali eikä naarmuunnu helposti. Se on optisilta ominaisuuksiltaan erinomainen moniin tarkoituksiin, sillä se läpäisee valoa jopa enemmän kuin lasi. PMMA kestää hyvin useita kemikaaleja, absorboi kosteutta hyvin vähän ja on fysiologisesti vaaraton. Sitä voidaan helposti työstää terävillä työvälineillä ja muovata lämmön avulla. PMMA:n lasisiirtymälämpötila on noin 105 °C. (8, s. 1–4.)

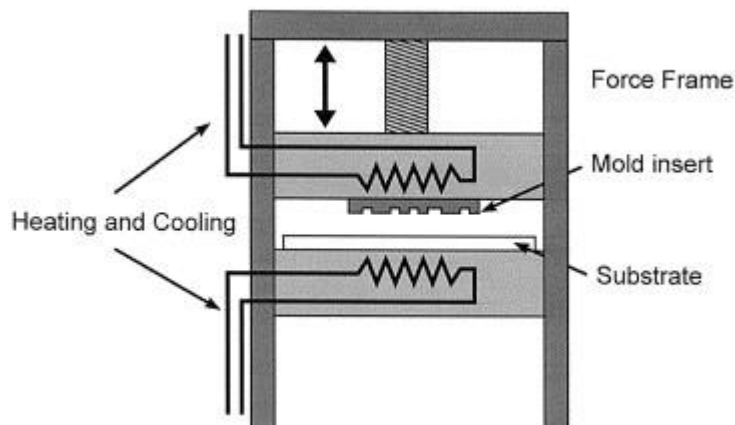
Edellä mainittujen ominaisuuksien vuoksi PMMA on hyvin monikäyttöistä. Lisäksi se on suhteellisen edullista. Sitä käytetäänkin usein lasin tilalla monissa käyttökohteissa, kuten linsseissä, akvaarioissa ja autojen valoissa (8, s. 5). PMMA on paljon käytetty materiaali mikrofluidistiikan alalla. Oulun VTT:llä on kuumapuristettu kanavistoja PMMA-kalvoon R2R-painokoneissa.

## 4 KUUMAPURISTAMINEN

Kuumapuristaminen (hot embossing) on edullinen ja toistettava tapa valmistaa mikrokokoluokan kanavistoja polymeerimateriaaleihin. Kuumapuristuksessa muotissa koholla oleva kanavisto painetaan polymeerimateriaaliin, johon muodostuu muottia vastaava painauma. Puristusaine, lämpötila ja aika riippuvat materiaalista, johon kanavisto painetaan. Lämpötila nostetaan yleensä hieman käytetyn substraatin lasisiirtymälämpötilan yläpuolelle. Substraattilla tarkoitetaan kuumapuristettavaa polymeerimateriaalia. (5, s. 1.)

### 4.1 Tasokuumapuristaminen

Kuvassa 3 on yksinkertainen piirustus tasokuumapuristimesta. Muotti kiinnitetään kuumapuristimeen tai asetetaan substraatin päälle. Puristusalue on usein tyhjiössä, jotta substraatin ja muotin väliin ei jäisi ilmakuplia tai kosteutta. (9, s. 131.)



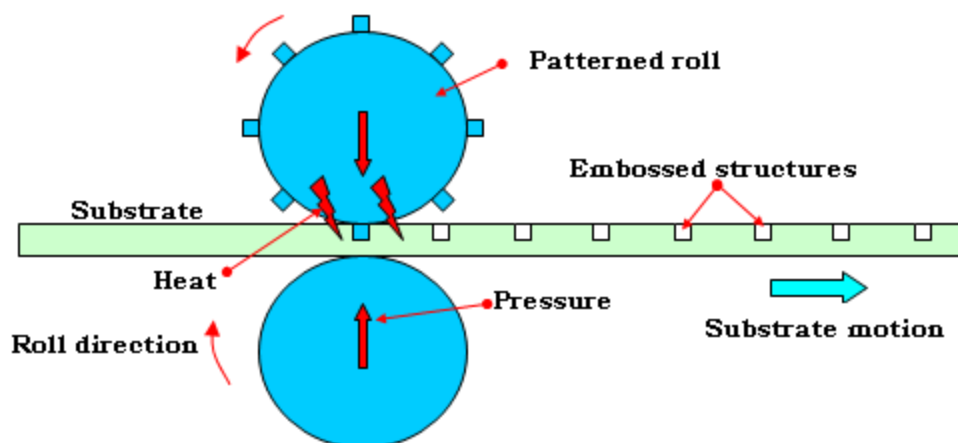
KUVA 3. Yksinkertaistettu piirustus tasokuumapuristimesta (9, s. 131)

Jos tasokuumapuristuksessa lämmitetään sekä muotti että substraatti, on kyseessä isoterminen kuumapuristus. Tällöin substraatti ja muotti tulee jäädyttää lasisiirtymälämpötilan alapuolelle ennen puristusaineen laskemista ja substraatin irrottamista muotista. Jos näin ei tehtäisi, substraattiin painetut kanavat eivät välttämättä pysyisi toivotun muotoisina. Ei-isotermisessä kuumapuristuksessa lämmitetään ainoastaan muotti, jolloin ainoastaan muottiin kosketuksissa oleva substraatin pinta lämpiää. Tällöin paineen voi laskea

muotin vielä ollessa puristuslämpötilassa, koska substraatti jäähtyy nopeasti. Isoterminen kuumapuristaminen vie enemmän aikaa johtuen jäähdytysvaiheesta, mutta painettu jälki on parempi kuin ei-isotermisessä kuumapuristuksessa. (10, s. 542–544.)

## 4.2 R2R-kuumapuristaminen

Rullalta rullalle (R2R) kuumapuristus on polymeerikanavistojen massatuotantoon suunniteltu metodi. Kuvassa 4 on esitetty R2R-kuumapuristusyksikön toimintaperiaate graafisesti. Rullalta tuleva substraatti kulkeutuu kahden pyörivän sylinterin välistä. Sylinterit, joista molemmat tai ainakin painettavan kuvion omaava painotela on lämmitetty, painavat paineen avulla kuvion substraattiin. (11, s. 725.)



KUVA 4. R2R-kuumapuristusyksikön toimintaperiaate (11, s. 725)

R2R-metodissa muotin ja substraatin välinen kosketusaika on huomattavasti lyhyempi kuin tasokuumapuristuksessa. Aikaan voidaan hieman vaikuttaa ajonopeutta vaihtelemalla. Jotta painetuista kanavista tulisi yhtä syviä kuin tasokuumapuristimella, tulee lämpötilaa tai painetta yleensä nostaa. Substraattia voidaan myös esilämmittää ennen sen saapumista painosylinterien väliin. Esilämmitys voidaan toteuttaa esimerkiksi kuumailemapuhaltimella tai substraatin ajoreittiä muuttamalla. Ajoreitin muutoksella tarkoitetaan substraatin tuomista yläviistosta (kuvassa 4) kuumapuristusyksikköön, jolloin se on

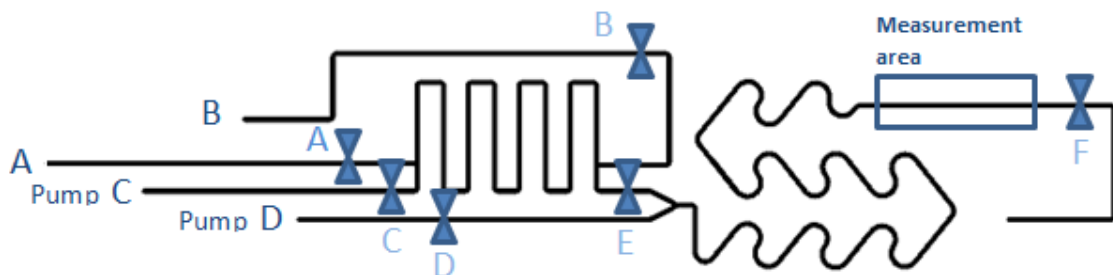
kosketuksissa painotetaan kauemmin ja ehtii lämmitä ennen varsinaista kuumapuristusta. (5, s. 2.)



## 5 VTT:N TUTKIMUS

Teknologian tutkimuskeskus VTT on vuonna 1942 perustettu Pohjois-Euroopan suurin soveltavaa tutkimusta tekevä organisaatio. VTT tuottaa teknologia- ja tutkimuspalveluja yrityksille sekä julkiselle sektorille Suomessa ja ulkomailla. VTT kuuluu työ- ja elinkeinoministeriön hallinnonalaan, eikä toiminnassaan tavoittele taloudellista voittoa. Painettu teknologia on strateginen tutkimuskohde VTT:llä, mihin myös Oulussa panostetaan paljon. Mikrofluidistiikan sovellukset ovat osa tätä kokonaisuutta. (12.)

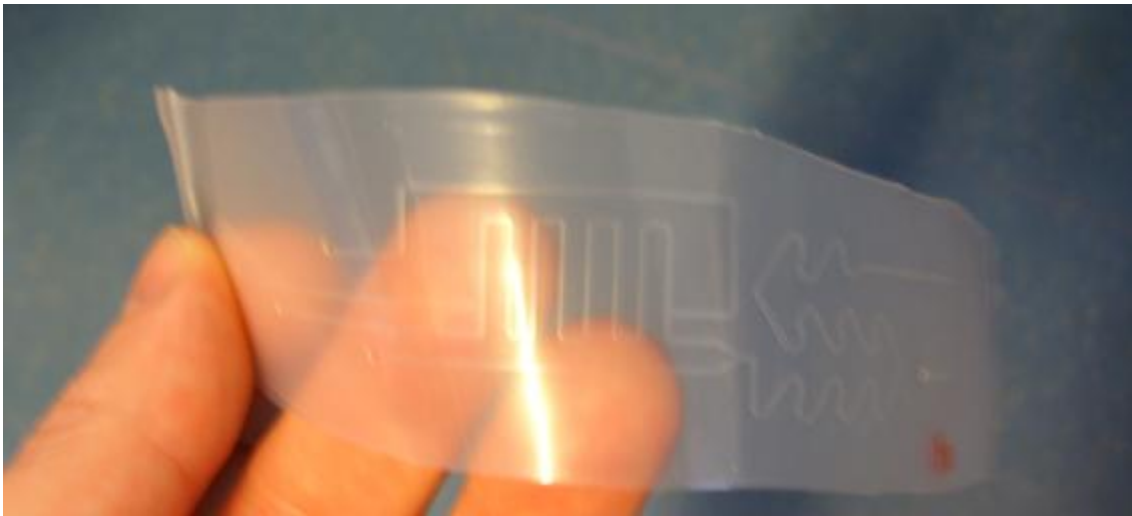
Tämä opinnäytetyö on osa VTT:n tutkimusta, jossa tutkitaan termoplastisen polyuretaanimateriaalin soveltuvuutta mikronestekanaavistojen materiaaliksi. Tutkimuksen tavoitteena on valmistaa kanavistoja massatuotantona rullalta rullalle kuumapuristimella. Kanavistoja on tarkoitus käyttää hiivojen valmistamien entsyymien mittaukseen. Entsyymimittausten avulla määritetään hiivojen lopputuotteiden valmistusaktiivisuus. Tutkimuksesta vastasi Oulussa VTT:ltä bio- ja mikrosysteemit tiimi ja erityisesti tutkija Sanna Uusitalo, joka toimi myös tämän opinnäytetyön ohjaajana VTT:llä. Työssä valmistettava kanavisto oli suunniteltu ennen tämän opinnäytetyön aloitusta, mutta sen rakennetta voidaan kehittää, jos niin koetaan tarpeelliseksi.



*KUVA 5. Opinnäytetyössä valmistettavan mikronestekanaaviston rakenne*

Kanavarakenteena toimi kanavisto (kuva 5), johon entsyyminäyte pipetoidaan reiästä A ja se etenee reikään B asti (venttiilit C, D, E ja F kiinni). Venttiilit A ja B suljetaan ja näyte pumpataan eteenpäin pumpulla C ja yhdistetään substraattiliuokseen, joka pumpataan kanavistoon pumpulla D. Liuokset etenevät mutkittelevaan sekoitusrakenteeseen, ja värireaktion lopputulos havainnoidaan

mittausalueelta. Kanavisto on 95 mm pitkä. Kuvassa 6 nähdään, miltä valmis kanavisto näyttää käytännössä.



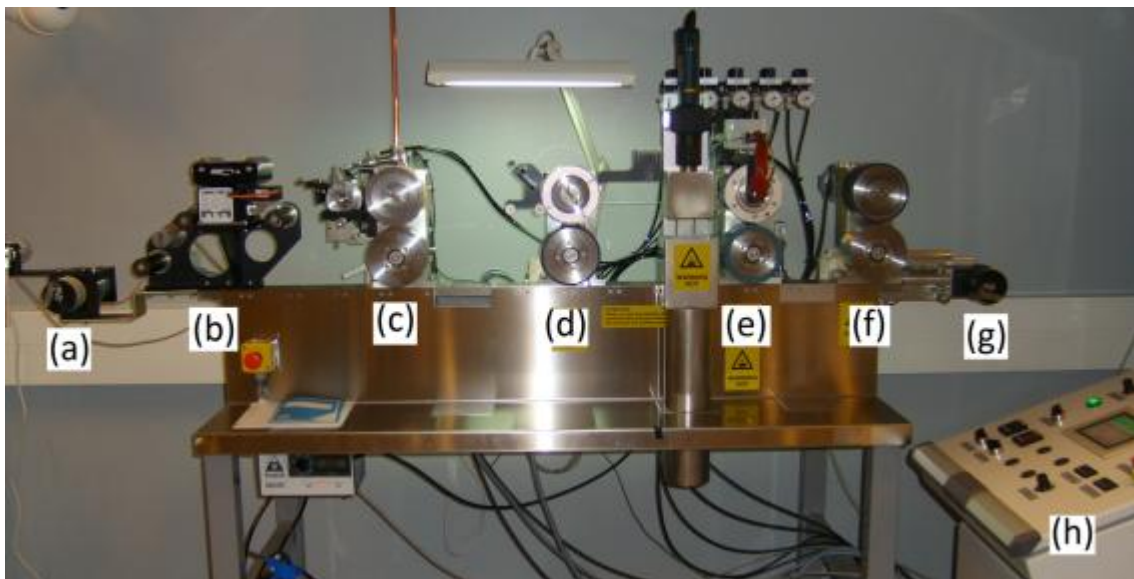
*KUVA 6. Tasokuumapuristettu kansitettu TPU-kanavisto*

Joustava polyuretaanimateriaali mahdollistaa yksinkertaisten nipistysventtiilien käytön nestekanavistoissa, mikä oli tärkein syy materiaalin valinnassa. Nipistysventtiilillä nestekanavisto voidaan tukkia halutusta kohdasta painamalla kanavaa ulkoapäin tylpällä objektilla. Kun painaminen lopetetaan, on kanavisto jälleen auki.

## 6 TYÖSSÄ KÄYTETYT PAINOKONEET

### 6.1 Sampo R2R-painokone

Sampo SOM100R2R (kuva 7) rullalta rullalle -painokone sijaitsee Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön PrinLab-laboratoriossa. Koneessa on kolme painoyksikköä: syväpaino- (gravure), kohopaino- (flexo) ja kuumapuristusyksikkö. Tässä työssä käytettiin ainoastaan kuumapuristusyksikköä.

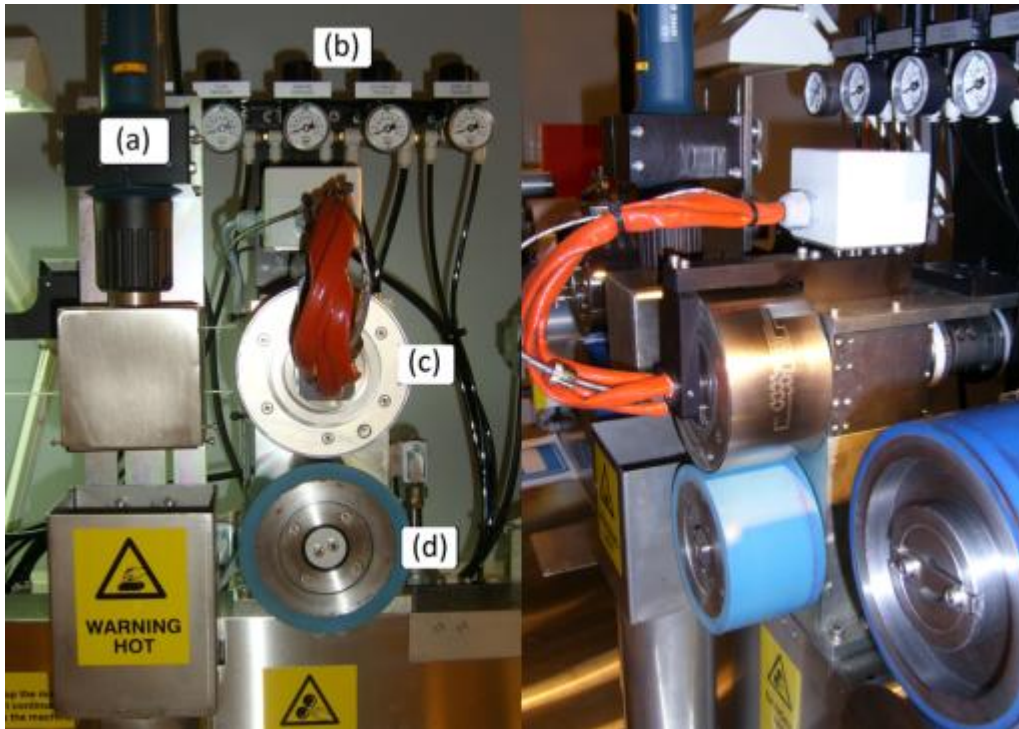


*KUVA 7. Sampo R2R-painokone; koneen osat: (a) Lähtörulla (b) Ajoreitin suoruuden säädin (c) Syväpainoyksikkö (d) Kohopainoyksikkö (e) Kuumapuristusyksikkö (f) Vetotela, (g) Loppurulla, (h) Ohjauskeskus*

Oulun VTT:llä oltiin kiinnostuneita Sammosta, koska sen käyttö olisi edullista pienten käyttö- ja materiaalikustannusten vuoksi. Tästä syystä Sampo soveltuu esimerkiksi uuden materiaalin käyttäytymisen tutkimiseen R2R-painokoneessa. Sammon linjasto on vain pari metriä pitkä ja käytettävän substraatin leveys on 80 mm. Vähäinen materiaalin kulutus on erityisen tärkeää, jos käytettävä materiaali on kallista.

Sammon kuumapuristusyksikössä on mahdollista lämmittää vain painotela. Painopelti lämmitetään termostaattiohjatulla lämpövastuksella, joka on painotelan sisällä kuvassa 8 näkyvän punaisen johdon päässä. Puristusvoima

saadaan aikaan paineilmasylintereillä, jotka saavat paineilman laboratorion paineilmaverkosta säädettävien paineenalennusventtiilien kautta. Kolme baria oli suunniteltu Sammon kuumapuristusyksikön maksimipaineeksi, mutta käytännössä voidaan käyttää korkeampaa painetta, jos paineilmaverkosta sellaista saadaan. Opinnäytetyön suorituksen aikana Sampoon asennettiin myös Boschin kuumailmapuhallin, jota voidaan käyttää esilämmittimenä kuumapuristusyksikössä. Sammon toimintaa kontrolloidaan ohjauskeskuksesta.



*KUVA 8. Sammon kuumapuristusyksikkö kuvattuna kahdesta kulmasta; yksikön osat: (a) Kuumailmapuhallin (b) Painemittarit (c) Painotela (d) Vastatela*

## **6.2 Pico R2R -painokone**

Kuvan 9 Pico R2R-painokone sijaitsee Oulun VTT:n puhdastiloissa. Painokoneessa on seuraavat yksiköt: kuumapuristus, kaksi syväpainoa, koronakäsittely, laminointi ja kuivaus (ilma, UV ja IR). Substraatin maksimileveys Picolla on 250 mm. Ajonopeutta voidaan vaihdella 0,5 – 120 m/min ja ajoradan kireyttä voidaan säätää eri osissa ajorataa.

Picon kuumapuristusyksikössä on mahdollista lämmittää sekä painotela että vastatela. Telojen lämmitys tapahtuu öljykierron avulla. Kun öljy lämmitetään

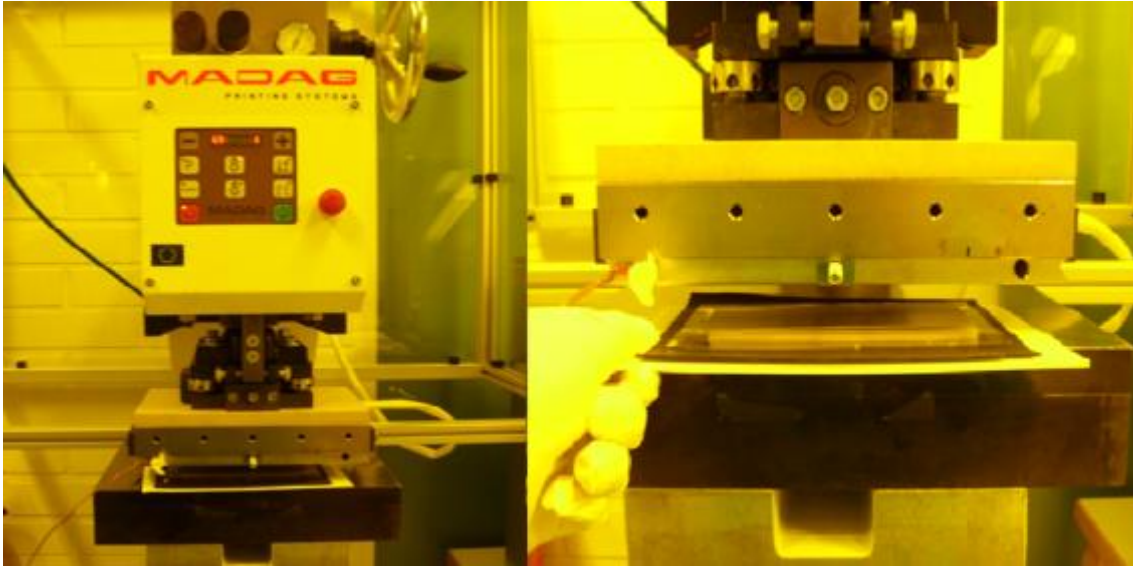
maksimilämpötilaansa (160 °C), painotelan lämpötilaksi saadaan noin 150 °C ja vastatelan hieman yli 100 °C. Puristuspainetta voidaan vaihdella välillä 4–25 bar. Substraatti voidaan tuoda kolmesta eri kulmasta kuumapuristusyksikköön: vaakasuorassa, yläviistosta tai alaviistosta. Kuumapuristusyksikön jälkeen substraatti kulkeutuu aina yläviistoon myötäillen vastatelaa.



*KUVA 9. Oulun VTT:llä sijaitseva Pico R2R-painokone*

### **6.3 MADAG-tasokuumapuristuspainokone**

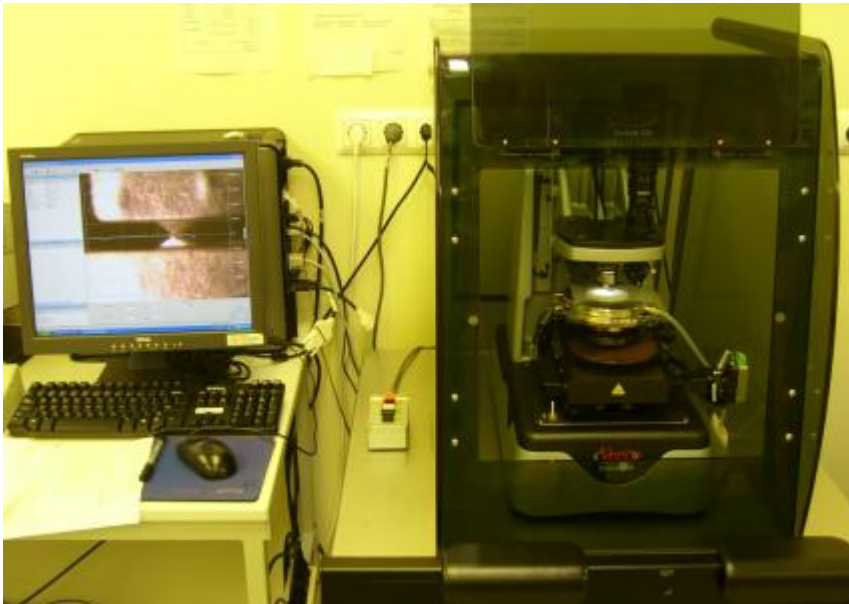
Referenssinäytteet, joihin R2R-näytteitä voidaan verrata, painettiin Oulun VTT:n tiloissa olevalla MADAG-tasokuumapuristuspainokoneella (kuva 10). Laitteessa voidaan lämmittää ainoastaan puristusalueen ylempi metallipinta, joten vain ei-isoterminen kuumapuristaminen on mahdollista. Puristusalue on avonainen, joten kuumapuristus tapahtuu normaalissa ilmanpaineessa.



*KUVA 10. Työssä käytetty VTT:n tiloissa oleva MADAG-tasokuumapuristus-painokone; oikealla asetetaan kuumapuristettava näyte puristusalueelle*

## 7 DEKTAK

Painettujen kanavien profiilien tutkimiseen käytettiin VTT:n puhdastiloissa sijaitsevaa Veeco Dektak 150 -profilometriä, joka näkyy kuvassa 11. Laitetta käytetään pinnan muotojen mittaamiseen. Laite on yhteydessä tietokoneeseen, josta sitä ohjataan. Mitattava näyte asetetaan laitteen sisään sille tarkoitetulle alustalle, joka on kuvassa 11 keskellä laitetta näkyvä pieni valaistu alue. Alustaan saadaan alipainepumpun avulla imu, joka pitää näytteen paikallaan. Mittaus tapahtuu niin, että laite kuljettaa neulaa mitattavan pinnan päällä piirtäen pinnanmuodoista samalla kuvan tietokoneelle.

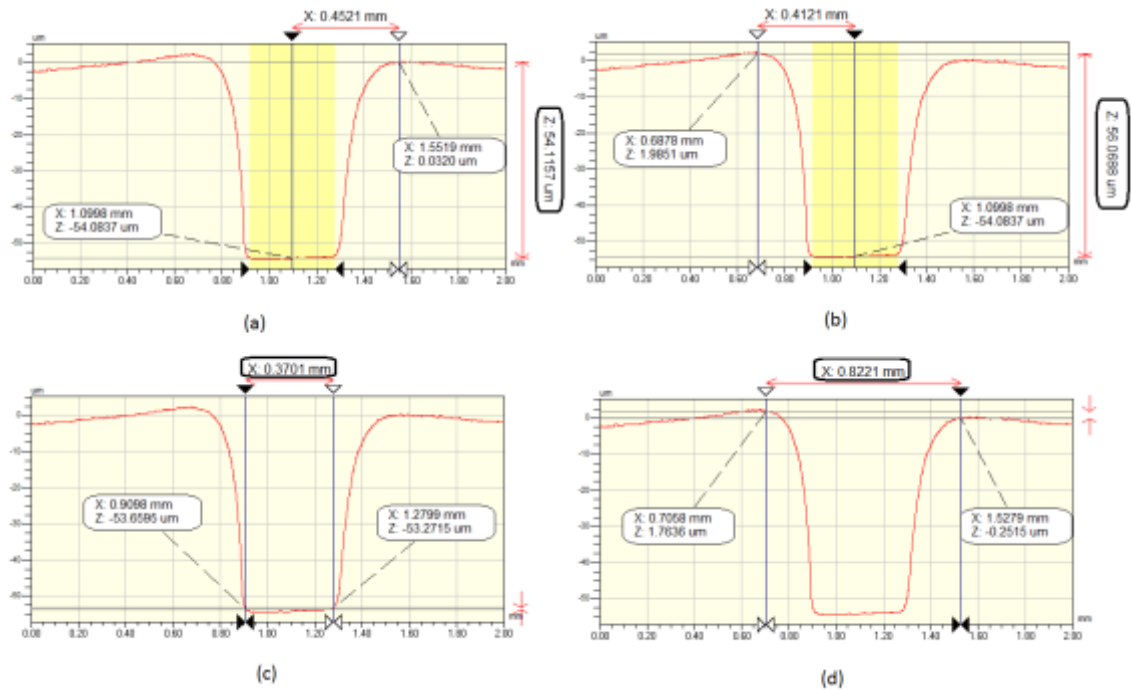


*KUVA 11. Veeco Dektak 150*

Dektakissa on liikuteltava alusta, jota ohjataan tietokoneella. Neula liikutetaan haluttuun mittauskohtaan ja tietokoneohjelmaan syötetään muun muassa haluttu mittausmatka ja mittauspisteiden lukumäärä. Laitteessa on videokamera, jonka avulla tietokoneelta nähdään reaaliajassa, missä neula liikkuu.

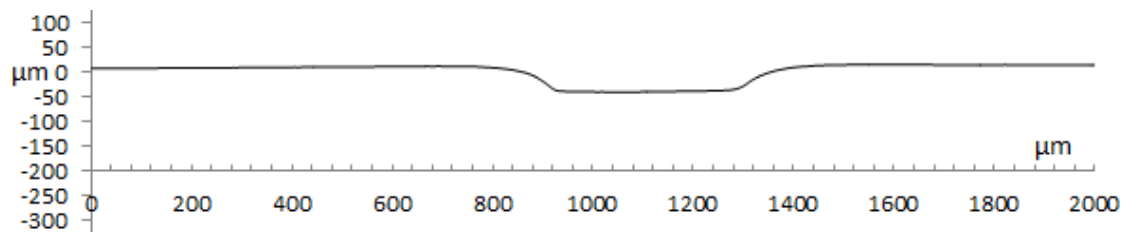
Mittauksia tarkastellaan Vision ohjelmalla. Opinnäytetyössä esitetyt pintaprofiilikuvat on otettu Visionista. Kanavien profiileista määritettiin kanavan syvyys, pohjan leveys ja kokonaisleveys. Vision ei anna mittoja automaattisesti, vaan ne määritettiin manuaalisesti profiilikuvista. Kaikista kanavaprofiileista otettiin mitat mahdollisimman yhtenevällä tavalla, jotta tulokset olisivat vertailu-

kelpoisia. Kuvasta 12 nähdään, kuinka mitat on määritetty. Kanavan syvyydeksi ilmoitettiin vasemman ja oikean syvyyden keskiarvo. Syvyydet määritettiin kanavan reunan korkeimmasta kohdasta pohjan pinnan keskiarvoon.



KUVA 12. Kanavista määritettävät mitat: (a) Korkeus oikealta (b) Korkeus vasemmalta (c) Pohjan leveys (d) Kokonaisleveys

Kanavien profiilikuvia katsellessa voi saada väärän käsityksen kanavan todellisesta muodosta johtuen x- ja y-akseleiden mittasuhteista. Tässä työssä kuumapuristettujen kanavien leveydet ovat huomattavasti syvyyksiä suurempia. Kuvan 12 kanavan profiili on todellisuudessa kuvan 13 näköinen.



KUVA 13. Kuvan 12 kanavan profiili esitettynä niin, että x- ja y-akselin mittasuhteet ovat samat



## 8 KANAVISTOJEN KUUMAPURISTAMINEN

Tässä luvussa eri painokoneilla ja materiaaleilla tehdyt kuumapuristukset ovat kronologisessa järjestyksessä. Jokaisen ajopäivän eli ajon jälkeen mitattiin dektakilla kanavien profiileja. Yhden ajopäivän aikana käytettiin usein monia ajoparametreja. Kaikilla eri ajoparametreilla saaduista kanavistoista mitattiin kanavien profiileja yhdestä tai yleensä useammasta eri kohdasta. Lisäksi samoilla parametreilla saaduista kanavistoista mitattiin kaksi tai kolme rinnakkaista. Kanavien profiileista saatu informaatio vaikutti seuraavalla ajokerralla käytettyihin ajoparametreihin.

### 8.1 PMMA:n kuumapuristaminen Sammolla

Koska tilattu TPU-materiaali ei ollut vielä saapunut, Sammon kuumapuristusyksikköä kokeiltiin aluksi PMMA:lla. Substraattina oli 125 µm paksu rullalla oleva suojamuoviton PMMA-kalvo. Rullan leveys oli leikattu VTT:llä Sammolle sopivaksi 80 mm:ksi. Painotelan ympärysmitta on sama kuin VTT:n R2R-painokoneiden, joten painopeltinä oli mahdollista käyttää VTT:ltä saatua vanhaa testipeltiä, jonka leveys leikattiin ensin Sammolle sopivaksi. Pellissä oli neljä pientä noin 4 cm \* 2 cm kokoista yksinkertaista hieman toisistaan poikkeavaa kuviota. Kun VTT:llä oli käytetty peltiä kuumapuristukseen, kanavien syvyyksiksi oli saatu noin 40 µm ja leveyksiksi 200 µm.

Ensimmäistä testiajon ajoi Sammon operaattori Juha Juuti. Ajossa käytetyt ajoparametrit ja kuumapuristettu substraatti toimitettiin VTT:lle mitattavaksi. Ensimmäisessä ajossa ajonopeus oli 0,5 m/min ja puristusaine 5,5 bar, joka oli paineilma-verkoston maksimipaine. Termostaatin lämpötila oli säädetty maksimiin eli 150 °C:seen, jolloin painopellin pinnan lämpötila nousi 101 °C:seen, jossa se pysyi.

Ensimmäisen ajon painopellin pintalämpötilan 101 °C arveltiin olevan liian matala ja tästä mainittiin Sammon kanssa tekemisissä oleville työntekijöille. Säättämällä koneen rakennetta he sai painopellin maksimipintalämpötilaa nostettua.

Seuraavalla ajokerralla käytettiin samaa ajonopeutta ja puristuspainetta kuin aiemmin. PMMA:ta kuumapuristettiin kolmella pellin pintalämpötilalla: 105 °C, 108 °C ja 110 °C. Substraattia ajettiin muutama minuutti, kunnes ajo keskeytettiin ja säädettiin seuraava lämpötila ja odotettiin hetki, että pellin lämpötila tasaantui.

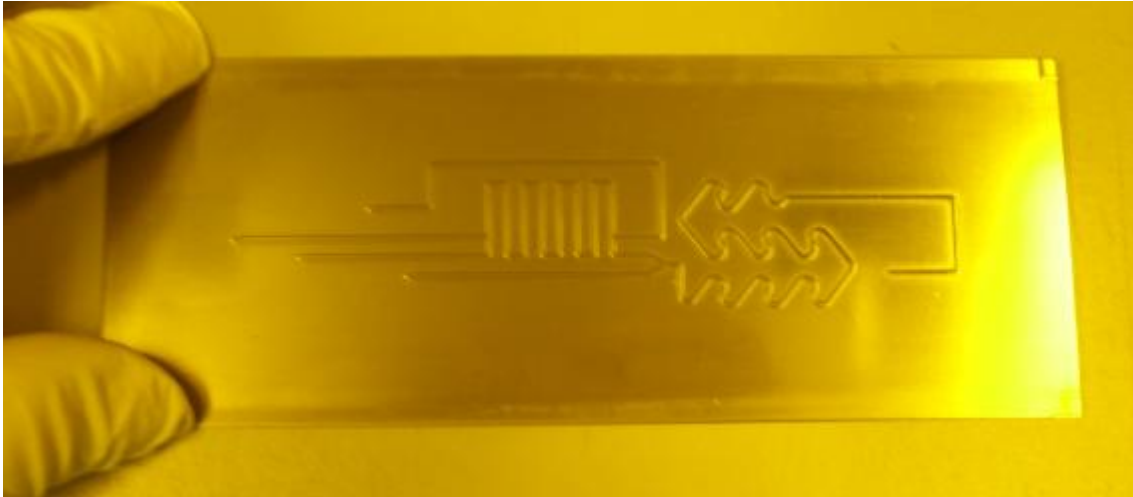
Sammon kuumapuristusyksikön ei-lämmitettävä kumimainen vastatela oli melko pehmeä. Käytävissä ei ollut kovempaa vastakelaa, joten sen vaikutusta lopputulokseen pyrittiin simuloimaan ajamalla kovaa materiaalia substraatin ja vastatelan välissä. VTT:llä oli varastossa saatavilla suojamuovitonta 375 µm paksua polykarbonaattimuovia rullalla. Polykarbonaatti (PC) on suhteellisen kovaa muovia ja kestää hyvin lämpöä. Rulla kavennettiin Sammolle sopivaksi.

Kolmannessa ajossa käytetty pintalämpötila oli 108 °C. Muut ajoasetukset olivat samat kuin aiemmin. PC-rullasta syötettiin muovia käsin kuumapuristusyksikön läpi PMMA substraatin kulkiessa normaalista PC-muovin päällä. Lisäksi ajettiin vertailuksi normaalisti ilman PC-alustaa.

Substraatti alkoi usein kulkeutua vinoon linjastolla. Kun substraattia oli kuumapuristettu noin 2 m, oli substraatti usein ylittänyt jo noin kahdella senttimetrillä kuumapuristusyksikön pellin etuosan. Tällöin ajo keskeytettiin. Painettava kuvio on pellin etureunassa, mikä saattoi vedättää substraattia vinoon. Ajot olivat kuitenkin riittävät pitkiä, jotta niistä saatiin tarpeeksi mitattavia näytteitä. Mitä enemmän substraatti kulkeutui kuuman painotelan reunan yli, sitä kupruisemmaksi se muuttui. Tämä aiheutti hieman hankaluuksia dektak-mittauksissa.

## **8.2 TPU:n tasokuumapuristaminen**

VTT:lle oli hankittu jo ennen tämän työn aloittamista tasokuumapuristukseen soveltuva entsyymimittauskanaviston painopelti (kuva 14). Pellillä oli testattu TPU:n soveltuvuutta mikronestekanavistojen materiaaliksi jo ennen tämän työn aloitusta. Tätä peltiä käytettiin myös tässä työssä MADAG-tasokuumapuristimella valmistettujen kanavistojen muottina. Substraattina käytettiin Elastollan SP806 TPU:ta.



*KUVA 14. Tasokuumapuristuspainopelti*

Tasokuumapuristuksessa käytettiin hyväksi tietoja VTT:llä aiemmin tehdyistä kokeista TPU:lla. Kuumapuristustason väliin ylimmäksi, eli lämmitettyä metallilevyä vasten, tuli painettavan kanaviston sisältämä pelti. Peltiä vasten laitettiin TPU, johon kanavisto painetaan. TPU:n alle asetettiin seuraavan paksuiset polymeerikalvot järjestyksessä: (TPU -) 125  $\mu\text{m}$  PMMA – 500  $\mu\text{m}$  PC – PU – 500  $\mu\text{m}$  PC – musta silikoni – PTFE. Tämä monipuolinen alusta oli todettu aiemmissa tasokuumapuristustesteissä sopivaksi TPU:lle. Välittömästi TPU:n alla olevat PMMA- ja PC-kalvot ovat suhteellisen kovia ja lämmönkestäviä materiaaleja. Alustassa olevat polyuretaani (PU) ja musta silikoni ovat hyvin pehmeitä ja joustavia materiaaleja. Joustavuutta tarvitaan, jotta puristusaine jakautuisi tasaisesti näytesubstraattiin. Laitteeseen syötettiin lämpötilaksi 108 °C, jolloin lämpiävän metallilevyn lämpötilaksi mitattiin 102 °C. Puristusainetta pidettiin aluksi 30 sekuntia 2 bar:ssa, minkä jälkeen se nostettiin 6 bar:iin, missä sitä pidettiin 6 minuuttia. TPU tarttui hieman kiinni niin peltiin kuin PMMA:han, mutta saatiin irrotettua vahinkoa aiheuttamatta.

Myös painopellistä mitattiin dektakilla pinnan profiilit. Sammolle menneestä pellistä ei ehditty mitata pinnan profiileja, mutta painopeltien valmistaja oli tehnyt ja lähettänyt vahingossa kaksi identtistä peltiä, joten toisesta ne mitattiin.

### 8.3 TPU:n kuumapuristaminen Sammolla

Painopelti, jossa oli entsyymimittauksiin käytettävän kanaviston kohouma, kiinnitettiin Sammon kuumapuristussyksikön painotelaan. Pelti näkyy kuvassa 8. Substraattina käytettiin samaa TPU-materiaalia kuin tasokuumapuristuksessa.

Ensimmäisessä ajossa käytettiin ajonopeutena 0,5 m/min ja paineena sekä lämpötilana suurimpia mahdollisia. Paine oli 5,5 bar ja pellin pintalämpötilaksi mitattiin ennen ajon aloitusta pintalämpötila-anturilla 112 °C. Sammon linjastoon asennettiin esilämmitystä varten kuumailemapuhallin, joka asetettiin puhaltamaan 64 °C:sta ilmaa substraattiin.

Kun ajo käynnistettiin, huomattiin heti, että loppurullan kelaaja kiristi substraattia liikaa. Loppurullan kelaaja ei pyöri samaa tahtia muun linjaston kanssa, vaan kiristää substraatin tiiviiksi rullaksi itsenäisellä systeemillä. TPU venyi silminnähten ja muuttui samalla sameammaksi. Loppukelan kiristysvoimaa ei voitu säätää pienemmäksi, joten TPU kelattiin tästä lähtien käsin loppurullaan.

Ensimmäisessä ajossa kuumapuristussyksikön ja sen jälkeen tulevan vetotelan väliin jäi hieman löysää, jolloin TPU pysyi tarttuneena noin 10–15 cm matkan kuumaan painopeltiin puristuksen jälkeen, mutta irtosi kuumapuristussyksikköä seuraavan vetotelan avulla. Tämän ei uskottu vaikuttavan kanavistojen laatuun, eikä siihen kiinnitetty sen suurempaa huomiota.

Seuraavalla ajokerralla kokeiltiin esilämmityspuhaltimen vaikutusta kanavistojen laatuun. Käytetty materiaali ja ajoparametrit olivat samat kuin edellisellä kerralla. Esilämmityspuhaltimessa on asteittainen tehon säädin, joten oli mahdollista kokeilla vain tiettyjä lämpötiloja. Lämpötila mitattiin pitämällä lämpötila-anturia puhaltimen alla. Ilmoitetut lämpötilat ovat siis mitattuja likimääräisiä lämpötiloja.

Kun esilämmitys säädettiin 150 °C:seen, TPU katkesi heti puhaltimen päälle laittamisen jälkeen. Loppukelan käsin kelaamisen lisäksi alkukelakin kelattiin tästä lähtien käsin, jotta substraattiin kohdistuva kiristysvoima olisi mahdollisimman pieni. Puhaltimen lämpötila laskettiin hieman alle 130 °C:seen. Kun yksi

kanavisto oli ehtinyt painautua, TPU katkesi jälleen. Saadun kanaviston laatu oli silminnähdyn hyvin heikko. Sitä oli vaikea edes erottaa selvästi substraatista.

Puhaltimen lämpötilaa laskettiin edelleen 64 °C:seen. Ajoparametrit olivat nyt samat kuin ensimmäisellä ajokerralla. Kanavistot näyttivät kuitenkin selvästi heikompilaatuisilta. Vertailuksi otettiin myös esilämmitys kokonaan pois ja ajettiin muutama kanavisto. Myöhemmällä ajokerralla kokeiltiin myös 80 °C:n esilämmitystä, jonka silmämääräisesti todettiin tuottavan heikompaa jälkeä kuin ilman esilämmitystä. Tämän vuoksi ei koettu tarpeelliseksi kokeilla puhaltimen lämpötiloja 80–130 °C.

Kovempaa vastakelaa simuloitiin, kuten PMMA-ajoissa, syöttämällä käsin 375 µm paksua polykarbonaattia TPU:n alle. Jälleen ajettiin 64 °C:n esilämmityksen kanssa ja ilman.

VTT:lle oli saapunut samaa Elastollan SP806 TPU -materiaalia rullalla, jossa oli lisäksi mukana kantomuovi kiinnittyneenä TPU:n alle. Kantomuovi toimii suojana ja sen saa revittyä helposti tarvittaessa pois. Kantomuovin materiaali oli polypropeeniinilla (PP) seostettua matalan tiheyden polyetyyleeniä (PE-LD). Materiaali muistuttaa ruokakauppojen muovikassien materiaalia, mutta on hieman ohuempaa ja läpinäkyvää.

Kun ajettiin kantomuovillista TPU:ta, laboratorion paineilmaverkosta oli mahdollista saada hieman lisää painetta, joten paine nostettiin 6,5 bar:iin. Esilämmitystä ei ollut ja painopellin lämpötila oli 104 °C. Kun oli ajettu muutama metri nopeudella 0,5 m/min, säädettiin ajonopeus alle Sammolle suunnitellun minimiajonopeuden. Uudeksi nopeudeksi laskettiin painotelan pyörähdysajan perusteella noin 0,25 m/min. Myös PC-muovia ajettiin TPU:n alla.

Kun esilämmitin oli otettu pois, oli mahdollista muuttaa ajoreittiä niin, että TPU kulkeutui esilämmityspuhaltimen telineen päältä yläviistosta kuumapuristusyksikköön, jolloin substraatti oli kosketuksissa kuumaan painopeltiin kauemmin. Näin saatiin kuitenkin selvästi heikkolaatuisia kanavistoja, joten ajoreitin avulla tapahtuvaa esilämmitystä ei enää kokeiltu.

Sammon termostaatin maksimilämpötilan rajoitus 150 °C:seen oli saatu pois, joten oli mahdollisuus kokeilla kuumapuristusta yli 110 °C:n painopellin lämpötiloilla. Lyhyen ajon jälkeen ilmeni kuitenkin ongelmia, kun termostaatin lämpövastus takertui kiinni pyörivään painotelaan ja lähti pyörimään sen mukana, mikä ei ole tarkoitus.

Ennen ongelmien alkamista ehdittiin kuitenkin testata kuinka löysän TPU:n jättäminen kuumapuristussyksikön jälkeen vaikuttaa lopputulokseen. Substraatin annettiin olla tarttuneena painopeltiin noin 10 cm puristuksen jälkeen. Vertailuksi ajettiin samoilla ajoparametreilla ilman löysää. Ajonopeutena oli noin 0,25 m/min, paineena 5 bar ja lämpötilana 109 °C. Materiaalina käytettiin kantomuovillista TPU:ta.

#### **8.4 TPU:n kuumapuristaminen Picolla**

Pico-painokoneella kuumapuristettiin kanavistoja kolmena eri päivänä. Jokaisena päivänä käytettiin eri painopeltiä.

Ensimmäisessä ajossa käytetty painopelti oli vain noin 5 cm leveä, koska leveämpää tähän työhön liittyvää peltiä ei ollut ajopäivänä saatavilla. Picon kuumapuristussyksikkö on suunniteltu 20 cm leveälle pellille. Käytetty substraatti oli myös 20 cm leveää. Materiaali oli samaa kantomuovillista TPU:ta kuin Sammolla käytetty.



*KUVA 14. Picon kuumapuristusyksikkö; ajorata tulee alhaalta kuumapuristusyksikköön, jolloin substraatti esilämpenee ennen puristusta.*

Ajossa käytettiin lämmitettävää keskikovaa vastatela, joka oli huomattavasti kovempi kuin Sammon vastatela. Ajossa käytettiin taulukossa 1 listattuja ajoparametreja. Öljy/pelti merkinnällä tarkoitetaan öljyn lämpötilaksi asetettua lämpötilaa / mitattua painopellin pinnan lämpötilaa. Ajorataa vaihdeltiin ohjaamalla TPU tulemaan kuumapuristusyksikköön alhaalta (kuva 14), suoraan ja ylhäältä. Painopelti on kuumapuristusyksikössä alempana. TPU:ta ajettiin myös ilman kantomuovia, joka revittiin irti TPU:sta ennen kuumapuristusyksikköä. Lopuksi säädettiin puristusaine alle Picolla toistettavasti pidettävän minimipaineen.

TAULUKKO 1. Ensimmäisessä Pico ajossa käytetyt ajoparametrit

Vastatela: Lämmitettävä		Vastatelan kovuus: Keskikova		Kapea (n. 5 cm) Painopelti: pelti	
Ajoparametri t	Ajonopeus	Öljy/pelti	Öljy/vastatela	Paine	Ajoradan kireys
	[m/min]	°C	°C	bar	
1	0,5	107/103	110/80	5	Normaali
2	0,5	102/100	110/75	5	Normaali
3	0,5	97/96	100/74	5	Normaali
4	0,5	87/88	80/65	5	Normaali
5	0,5-2	87/85	31/37	5	Normaali
6	0,5	77/80	30/35	5	Normaali
7	0,1-5	80/77	-	0-5	Normaali

Koska leveämpää painopeltiä, joka sisältäisi opinnäytetyöhön liittyvän kanaviston, ei ollut nopeasti saatavissa, käytettiin toisena ajopäivänä toisessa VTT:n projektissa käytettyä 20 cm leveää peltiä. Pellillä oli kolme identtistä kanavistoa, jotka muistuttivat hieman tässä työssä painettavaa kanavistoa. Näin oli mahdollista tutkia TPU:n käyttäytymistä Picolle sopivan leveällä pellillä, jolloin puristusvoima ei nouse liian korkeaksi.

Toisessa ajossa käytettiin kovaa ei-lämmitettävää vastatelaa, joka pyöri hieman paremmin kuin lämmitettävä vastatela. Ajon alussa kokeiltiin kolmea eri ajoreittiä lämpötilalla 80 °C. Alhaalta tulevan ajoreitin, jossa TPU esilämpenee hieman painopeltiä vasten, todettiin antavan silminnähden parasta jälkeä. Tätä ajoreittiä käytettiin loppuissa kuumapuristuskokeissa. Ajoradan kireyttä nostettiin painopellin lämpötilan ollessa 90 °C ja sen todettiin antavan parempaa jälkeä kuin löysemmän radan, joten sitä käytettiin jatkossa. Liitteessä 3 näkyy toisessa ajossa käytetyt ajoparametrit. Liitteessä olevien parametrien lisäksi ajettiin myös 80 °C:n lämpötilalla käyttäen eri puristuspaineita (4–10 bar) ja ajonopeuksia (0,5 ja 1,0 m/min).

Tähän työhön liittyvän kanaviston sisältämä 20 cm leveä pelti saapui VTT:lle. Pellissä kanavisto toistuu kolme kertaa keskellä peltiä. Liitteestä 4 löytyy kolmannessa ajossa käytetyt ajoparametrit. Ajoreittinä oli sama kuin edellisellä kerralla eli substraatti esilämpeni hieman ennen kuumapuristusta. Ajopara-



metreilla 9 ja 14 valmistettiin suurempi määrä kanavistoja. Kun ajoparametreilla 9 oli ajettu yhtämittaa pitempi aika (noin tunti), substraattiin alkoi tulla ryppyjä. Vastatelan lämpötila oli noussut yli 60 °C:seen, minkä uskottiin olevan syy ryppejen syntyyn. Pidettiin tauko ja annettiin vastatelan jäähtyä ennen jatkamista.

## 9 KUUMAPURISTETTUJEN KANAVIEN PROFIILIEN TULKINTA

### 9.1 Sammolla kuumapuristettu PMMA

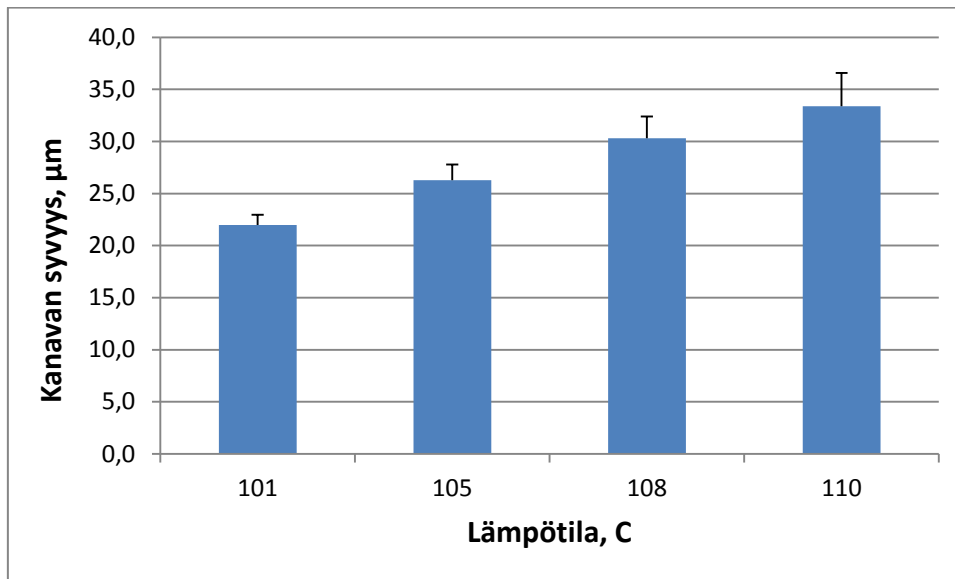
Sammolla kuumapuristettu PMMA oli välillä hyvin kupruista, mikä johtui sen vinoon vedättämisestä Sammon linjastolla. Substraatin reuna, joka ei osu kuumaan painopeltiin, ei litisty ja veny kuten puristuksiin jäävä osa. Näin erityisesti substraatin reunasta tulee kupruinen, mikä vaikeuttaa dektakilla mittaamista. Tämän takia valittiin vain yksi mittauspiste kustakin kuviosta. Mitattu kanavan kohta oli lähimpänä substraatin keskustaa, jolloin kupruisuus ei ollut ongelma.

Mitattujen kanavien profiilit olivat kaikilla käytetyillä painopellin lämpötiloilla kuvan 15 näköisiä. Liitteessä 1 on taulukoituina kanavien syvyydet ja leveydet eri lämpötiloilla. Kanavien syvyydet olivat 30  $\mu\text{m}$ :n molemmin puolin, mikä olisi ihan hyväksyttävä tulos. Kanavat eivät ole kuitenkaan profiileiltaan hyviä. Kanavan leveyden pitäisi olla noin 200  $\mu\text{m}$ . Kanavan pohja onkin noin 170  $\mu\text{m}$ :n levyinen, mutta leveydeksi saadaan noin 1400  $\mu\text{m}$ , kun mitataan kanavan reunojen huippujen välinen matka. Kanavan pohjalta nousevat seinämät lähtevät aluksi lähes pystysuoraan ylös, kunnes lähtevät kaartumaan liikaa.



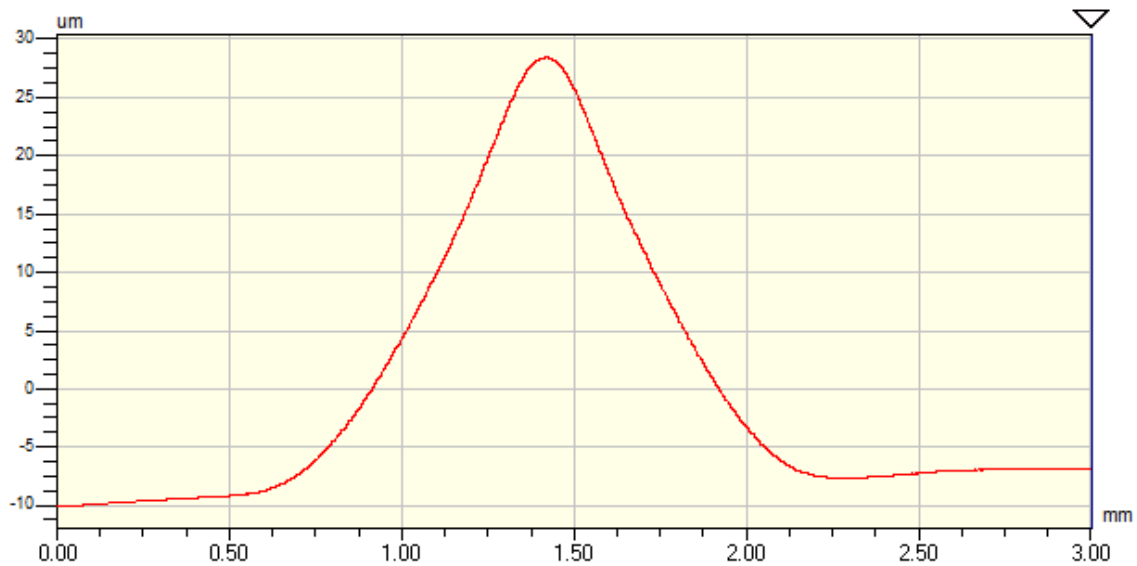
KUVA 15. Sammolla PMMA:lle kuumapuristetun kanavan profiili painopellin lämpötilalla 110 °C

Lämpötilalla oli merkitystä kanavan syvyyteen, mikä nähdään kuvasta 16. Kanavien leveyksiin lämpötilalla ei ollut vaikutusta.



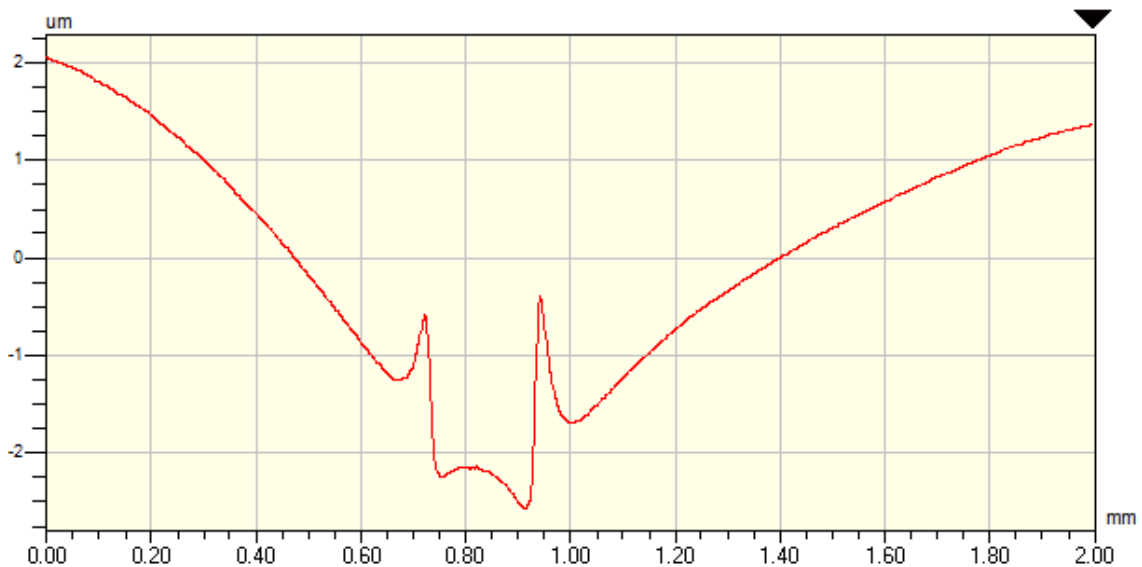
*KUVA 16. Sammolla kuumapuristettujen PMMA-kanavien syvyydet ja kanavistojen väliset keskihajonnat eri painopellin lämpötiloilla*

Sammon kuumapuristusyksikössä oleva vastatela vaikutti hyvin pehmeältä. Ensimmäisten mittaustulosten jälkeen heräsi ajatus, että vastatela antaa liikaa periksi. Tästä syystä mitattiin myös painetusta substraatista kanavan vastapuolella olevan pinnan profiili, mikä näkyy kuvassa 17. Kuvassa näkyy noin 35 µm korkea ja 1600 µm leveä kohouma. Tämä tulos viittaa siihen, että vastakela oli liian pehmeä. Kanavat eivät varsinaisesti kuumapuristu substraattiin, vaan substraatti vain lähinnä taipuu kanavien kohdalta vastatelan sisään. Kuvassa 15 nähdään haluttua kuumapuristumista vain muutaman mikrometrin syvyydestä pohjasta, minkä jälkeen alkava loiva kaari on vain taipunutta substraattia. Kuvan 16 syvyyksien tilalla olisi kenties mielekkäämpi puhua taipumisesta.



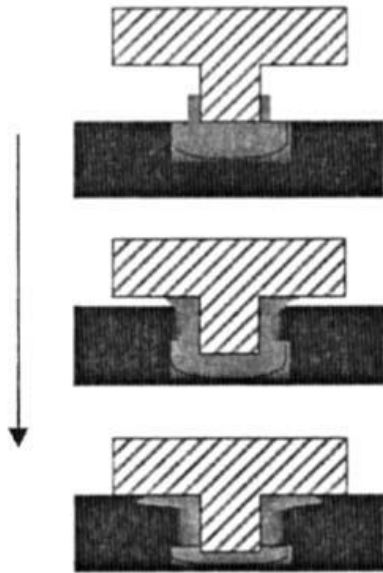
*KUVA 17. Sammolla PMMA:lle painetun kanavan vastapuolen profiili mitattuna samasta kuviosta ja kanavan kohdasta kuin kuvan 16 kanava*

Kovempaa vastatelaä simuloitiin PC-muovin avulla. Näin saatujen kanavien dektakilla mitatuista profiileista nähtiin, että kanavat olivat todella matalia. Varsinainen kanava oli alle 2  $\mu\text{m}$  syvä, mikä näkyy kuvassa 18. Tulos vahvisti käsitystä liian pehmeästä vastatelasta. Matala kanava kertoo myös, että puristusaine oli liian matala.



*KUVA 18. Sammolla PMMA:lle kuumapuristetun kanavan profiili, missä PC-muovia ajettiin PMMA:n alla*

Kuvassa 18 näkyvät piikkimäiset kohoumat kanavan reunoilla johtuvat ilmiöstä, jota kuvan 19 ylin piirustus havainnollistaa. Painopellin kuvio ei painaudu kokonaan PMMA:n sisään, jolloin pehmennyt PMMA nousee pellin kohouman reunaa myöten hieman ylöspäin.

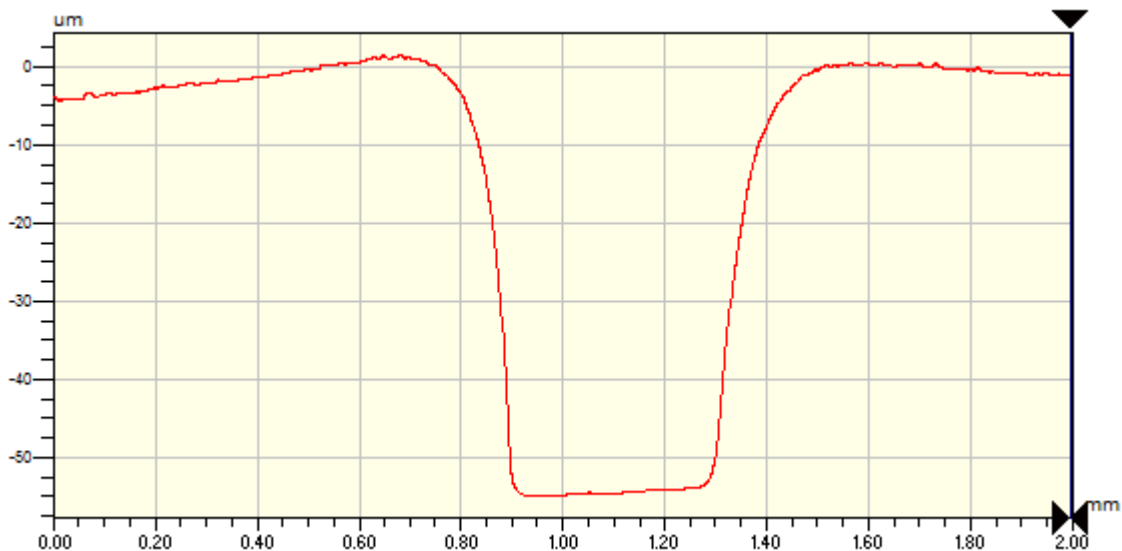


*KUVA 19. Muotin uppoaminen vaiheittain substrattiin ei-isotermisessä kuumapuristamisessa (10, s. 548)*

PMMA:lla tehdyt testit eivät vakuuttaneet, että Sammon kuumapuristusyksikköä voidaan käyttää mikronestekanavistojen valmistukseen. TPU on kuitenkin hyvin erilainen materiaali, eikä sen kuumapuristamisesta rullalta rullalle ole kokemusta.

## **9.2 Tasokuumapuristettu TPU**

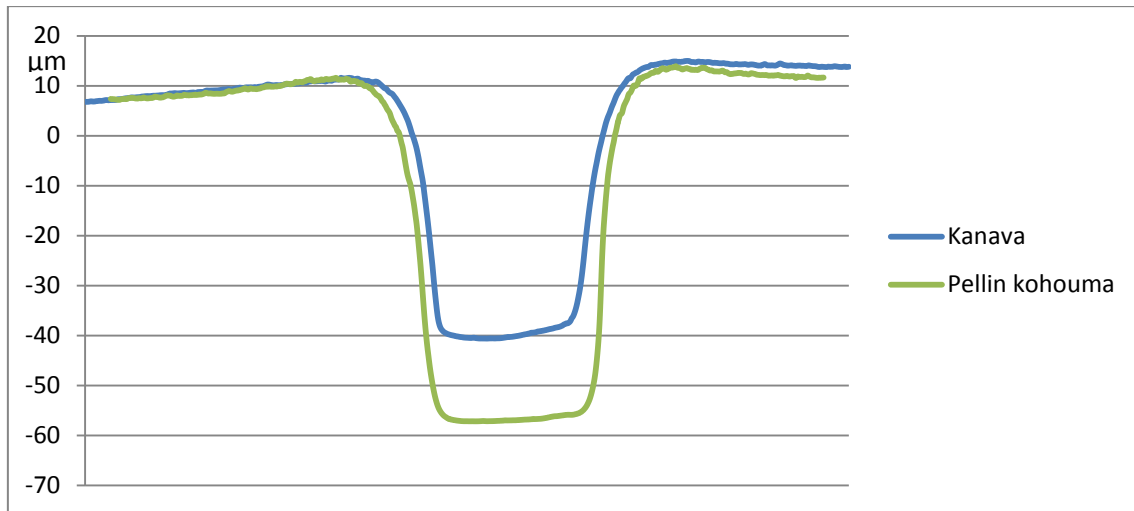
Tasokuumapuristettujen ja Sammolla valmistettujen TPU-kanavien dektakilla mitattujen profiileiden data on kerätty liitteeseen 2. Tasokuumapuristuspainokoneella painetuissa TPU-kanavistoissa olevat kanavat olivat profiililtaan hyvän mallisia ja niistä saatiin hyvät referenssimateriaalit. Kuvassa 20 nähdään tasokuumapuristetun kanavan profiili, mikä antaa hyvän kuvan onnistuneesta kuumapuristuksesta. Kuuden minuutin puristusaika varmistaa, että muotti uppoaa täysin TPU:n sisään, kuten kuvan 19 alimmassa piirustuksessa, eikä kanavan reunoille tule kohoumia. Kanavien keskisyvyys oli 50  $\mu\text{m}$  ja pohjan leveys noin 370  $\mu\text{m}$ .



*KUVA 20. Tasokuumapuristuspainokoneella TPU:lle kuumapuristetun kanavan profiili*

Tasokuumapuristuspellin ja Sammon painopellin kanssa samanlaisen pellin kanavistojen kohoumien mitatut profiilit olivat samanlaiset. Näin voidaan olettaa Sammolla käytetyn pellin olevan myös identtinen näiden kanssa. Kohoumien keskikorkeudet olivat noin 71  $\mu\text{m}$ , huipun leveys noin 370  $\mu\text{m}$  ja kohouman koko leveys noin 860  $\mu\text{m}$ .

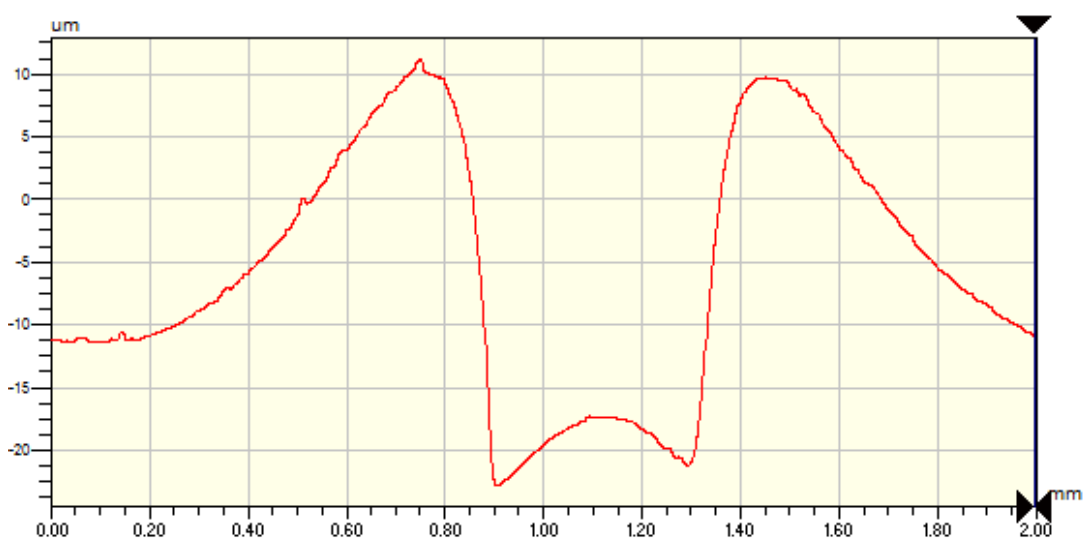
Tasokuumapuristimella valmistetut kanavat olivat noin 50  $\mu\text{m}$  syviä, joten muotin kanavisto ei kuumapuristunut täysin TPU-substraattiin. Kanavan profiili ja pellin kohouma käännettynä vertikaalisesti ympäri näkyvät kuvassa 21. Kuvasta nähdään, että molempien profiilit ovat lähes identtiset. Kanavan reunat pääsevät hieman kohoamaan, kun puristusaine vapautetaan substraatin ollessa vielä kanavan kohdalta pehmeä tai sula. Kanavat ovat laadukkaita, kun otetaan huomioon, että kyseessä oli ei-isoterminen kuumapuristus.



*KUVA 21. Muotin kohouma käännettynä vertikaalisesti ympäri ja sillä tasokuumapuristetun kanavan profiilit esitettyinä samassa kuvassa.*

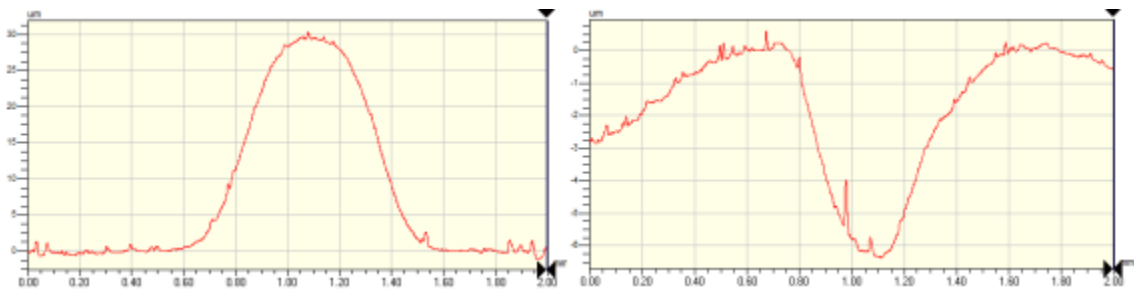
### 9.3 Sammolla kuumapuristettu TPU

Sammolla ensimmäisessä ajossa kuumapuristetun kanavan profiili (kuva 22.) oli erilainen kuin tasokuumapuristimella painetun. Myös TPU:lla, kuten PMMA:lla, kanavan reunoilla oli korkeat kohoumat. Kanavien keskisyvyys oli 24  $\mu\text{m}$  ja pohjan keskileveys noin 410  $\mu\text{m}$ . Syvyys ei välttämättä ole ihan riittävä, jotta kanavisto saataisiin kansitettua niin, että se ei menisi tukkoon. Lisäksi korkeat kanavien reunat voivat painua hieman kasaan, jos kanavistoa kansitettaessa käytetään liian korkeaa puristuspainetta.



*KUVA 22. Sammolla TPU:lle kuumapuristetun kanavan profiili*

Myös TPU:n osalta tutkittiin kanavien vastapuolen profiileja. Kuvassa 23 on Sammolla painetun ja tasokuumapuristetun kanavan vastapuolen profiilit. Kuvan 23 Sammon pintaprofiili on samasta kohdasta mutta toiselta puolelta kanavistoa kuin kuvan 22 profiili. Sammolla kuumapuristetussa näytteessä nähdään lähes 30  $\mu\text{m}$  korkea kohouma kanavan toisella puolella, mikä vahvistaa aiempia tuloksia vastatelan pehmeystä. Tasokuumapuristetussa näytteessä vastaavaa ei ole. Päinvastoin pintaprofiilissa on noin 6  $\mu\text{m}$  syvä kanava. Tämä johtuu mahdollisesti kuuman pellin tarttumisesta substraattiin. Tarttuminen on voimakkainta kanavien kohdalla, missä puristusaine substraattiin on suurin. Kun puristusaine vapautetaan, pelti vetää substraattia kanavan kohdalta hieman ylöspäin, jolloin kanavan kohdan vastakkaiselle puolelle syntyy pieni kanava. Tämä ilmiö voi myös olla syynä kuvassa 22 näkyville kohoumille kanavien ympärillä.



*KUVA 23. Substraatin pinnan profiili kanavan vastakkaiselta puolelta; vasemmalla Sammolla painettu ja oikealla tasokuumapuristettu näyte*

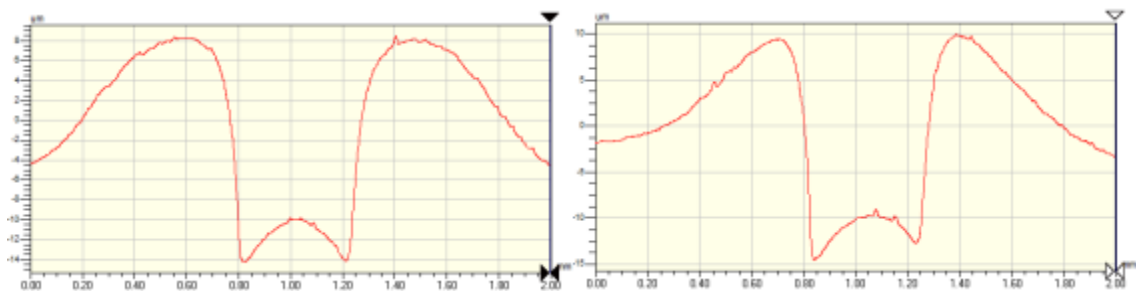
Ensimmäisellä ajokerralla saadut kanavistot eivät olleet ihan tyydyttäviä, mutta tulokset olivat kuitenkin lupaavia. Seuraavalla ajokerralla käytettiin samaa materiaalia ja myös lyhyesti samoja ajoparametreja, mutta kanavat olivat vain hieman yli 5  $\mu\text{m}$  syviä. Painopellin lämpötila mitattiin molemmilla kerroilla ennen ajojen aloittamista, jolloin se oli hieman yli 110  $^{\circ}\text{C}$ . Lämpötilaa ei sen jälkeen mitattu. Toisella ajokerralla ehdittiin tehdä kokeiluja muun muassa esilämmitinpuhaltimen kanssa, ennen kuin käytettiin samoja ajoparametreja kuin edellisellä ajokerralla. On mahdollista, että painopellin lämpötila muuttui näiden kokeilujen aikana, mikä selittäisi suuret eroavaisuudet kanavien syvyyksissä. Jatkossa lämpötila mitattiin aina ajoparametreja vaihdettaessa.



Toinen vaihtoehto on, että Sammon kuumapuristussyksikön puristuspaine ei pysy toistettavana, vaikka painemittari näyttäisi samaa arvoa.

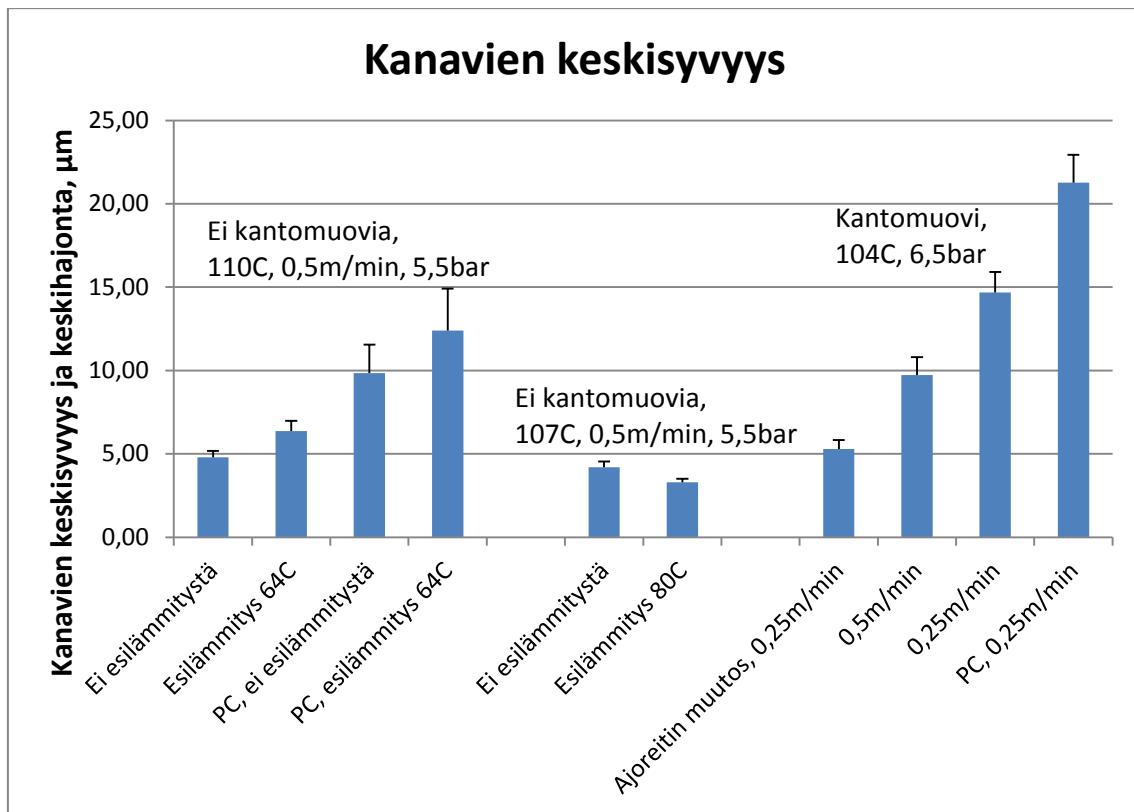
Ainoana erona ajoissa varmuudella oli, että ensimmäisellä ajokerralla kuumapuristussyksikön ja sitä seuraavan vetotelan väliin jäi löysää, jolloin TPU pysyi tarttuneena kuumaan peltiin vielä yli 10 cm puristuksen jälkeen. Toisella kerralla löysää ei ollut, jolloin TPU irtosi kuumasta painopelistä heti puristuksen jälkeen. Tämän eron uskottiin aluksi olevan syynä saatujen kanavistojen syvyyseroihin, joten asiaa tutkittiin.

Kanavien profiilien mittauksissa ei kuitenkaan havaittu eroja syvyyksissä, kun dektakilla mitattiin näytteitä, jotka oli ajettu peräkkäin samoilla ajoparametreilla, mutta osaan oli jätetty löysää kuumapuristussyksikön jälkeen. Tämä ”jätkilämmitys” kuitenkin vaikutti hieman kanavien profiileihin. Kanavien reunat olivat pyöreämmät ”jätkilämmityksen” kanssa, kuten kuvasta 24 ilmenee. Reunojen pyöreys ilmeni myös silmin nähtävänä sameutena kanavien ympärillä.



*KUVA 24. Vasemmalla Sammolla ”jätkilämmityksen” kanssa kuumapuristetun ja oikealla normaalisti kuumapuristetun kanavan profiili*

Liitteen 2 dektak-mittaustuloksista nähdään, että 64 °C:n esilämmityksellä saatiin noin 30 % syvempiä kanavia kuin ilman esilämmitystä. Esilämmitys auttoi sekä polykarbonaattimuovin kanssa että ilman. Sammolla valmistettujen kanavien syvyyksiä eri ajoparametreilla on esitetty graafisesti kuvassa 25. Ilman esilämmitystä kanavat olivat syvempiä kuin 80 °C esilämmityksen kanssa. Ajoreitin muutoksen avulla saavutettu esilämmitys ei auttanut syventämään kanavia. Kun ajoreittiä muutettiin käyttäen muuten samoja ajoparametreja, kanavien syvyydet laskivat noin 15 µm:stä vain 5 µm:iin.



KUVA 25. Sammolla kuumapuristettujen kanavien syvyyksiä eri ajoparametreilla

Kun PC-muovia kuljetettiin TPU:n alla, saatiin kaikilla ajoparametreilla syvempiä ja hieman kapeampia kanavia kuin ilman PC-muovia. Kanavien reunoille ei tullut korkeita kohoumia. Kanavien profiilit muistuttivat hyvin paljon tasokuumapuristimella valmistettujen kanavien profiileja (kuva 20).

Ajonopeudella 0,25 m/min saatiin noin 15 µm syviä kanavia, kun nopeudella 0,5 m/min kanavat olivat noin 10 µm syviä. Tällä ajonopeuden muutoksella puristus aika kaksinkertaistuu, joten tulos oli odotettu.

Kantomuovillista TPU:ta käytettäessä saatiin syvempiä kanavia. Käytetty paine oli toisaalta hieman suurempi ja lämpötila kolme astetta matalampi, joten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia.

Sammolla painetut kanavistot olivat pituus- ja leveyssuunnassa samanmittaisia kuin tasokuumapuristetut kanavistot. Venymistä tai kutistumista ei siis tapahtunut. Sammolla kuumapuristetut kanavistot olivat 95 mm pitkiä, mikä oli myös kanaviston pituus painopellissä.

Lämpötilan ja paineen vaikutuksesta TPU:n käyttäytymiseen kuumapuristettaessa rullalta rullalle ei saatu selkeää kuvaa Sammolla suoritetuissa ajoissa. Tarkoituksena oli kokeilla myös korkeampia lämpötiloja, mutta tekniset ongelmat estivät suunnitelmat. Kun ongelmat oli korjattu, ei ollut enää aikaa eikä resursseja lisäkokeisiin. Korkeampi lämpötila ei mahdollisesti auttaisi kuitenkaan syventämään kanavia, koska ajoreitin muutos tai yli 80 °C:n esilämmityskään ei auttanut.

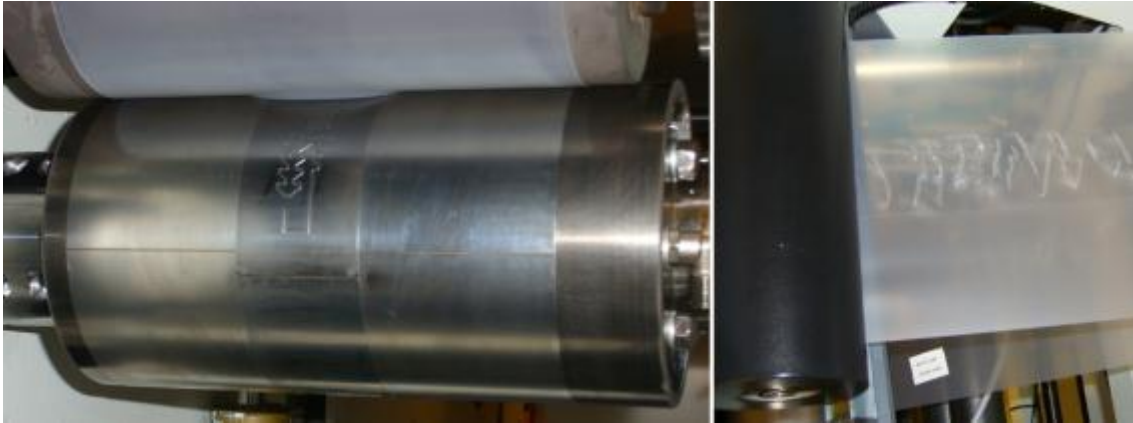
Sammon kuumapuristusyksikköön tarvitaan kovempi vastatela mikronestekavistojen kuumapuristamista varten. Tämä todettiin sekä PMMA:lla että TPU:lla tehdyillä ajoilla. Kun termostaatin 150 °C:n lämpötilarajoin saatiin pois, ei lämpötila ole este minkään polymeerimateriaalin kuumapuristamiseen. VTT:n Pico painokoneella on havaittu jo 105 °C lämpötilan ja ajonopeuden 0,5 m/min olevan riittävä kanavien kuumapuristamiseen PMMA:han. Kun PMMA:ta kuumapuristettiin Sammolla käyttäen PC-muovia simuloimaan kovempaa vastatelaa, saatiin lähes olemattomia kanavia, vaikka lämpötilan ja ajonopeuden pitäisi olla sopivat. Tämä viittaa siihen, että puristusaine on liian pieni. Pehmeän vastatelan vuoksi substraattiin kohdistuva puristusaine jakaantuu suuremmalla pinta-alalle. On vaikea varmuudella sanoa, johtuuko riittämätön puristusaine ainoastaan pehmeästä vastatelasta vai onko myös paineverkosta saatava paine liian matala.

## **9.4 Picolla kuumapuristettu TPU**

### **9.4.1 Ensimmäinen ajo**

Ensimmäisenä ajopäivänä käytettiin 5 cm leveää painopeltiä, jolloin substraattiin kohdistuu nelinkertainen puristusvoima verrattuna siihen, jos käytettäisiin Picolle normaalia 20 cm leveää peltiä. Kun pellin lämpötila oli 88–103 °C ja vastatelan 65–80 °C, TPU ruttaantui pahasti painopellin ja vastatelan välissä. Samalla painettu kanavisto kutistui huomattavasti pituussuunnassa (ajosuunnassa) ja ryppyjen takia substraatista tuli käyttökelvotonta. Kuvassa 26, jossa ajoreitti tulee ylhäältä, nähdään, kuinka koholla olevan pellin osan kohdalle kertyy pieni pussi. Kun pussi kasvoi ajon aikana suuremmaksi, se kulkeutui kuumapuristustelosten välistä aiheuttaen rypyjä ulostulevaan

substraattiin. Ryppyisyys saatiin vähenemään huomattavasti, kun puristusaine laskettiin alle Picolla toistettavasti pidettävän minimipaineen. Tällöin kanavisto painautui kuitenkin niin heikosti substraattiin, että sen häidin tuskin erotti silmällä. Millään parametreilla ei saatu käyttökelpoisia kanavistoja, joten kanavan profiilejakaan ei mitattu.



*Kuva 26. Vasemmallä Picon kuumapuristusyksikkö puristaa kanavistoa TPU-substraattiin ja oikealla näkyy ryppyinen lopputulos.*

Ryppyjen arveltiin aluksi johtuvan kantomuovin sulamisesta, joten kokeiltiin ajaa myös ilman kantomuovia. TPU ruttaantui jälleen yhtä paljon, joten kantomuovi ei ollut ryppyjen aiheuttaja. Aiheuttajaksi epäiltiin liian suurta puristusvoimaa, jonka 5 bar:n paine aiheuttaa kapeaan peltiin. Tämän takia seuraavalla ajokerralla kokeiltiin 20 cm leveää peltiä.

#### **9.4.2 Toinen ajo**

Toisessa ajossa alhaisimmalla (80 °C) lämpötilalla saadut kanavistot olivat hyvin ryppyisiä, joten kanavistojen profiileita ei ollut mahdollista mitata. Kun painopellin lämpötila oli välillä 90–110 °C, suurin osa kanavistoista ei ollut ryppyisiä. Näistä kanavistoista mitattiin kanavien profiilit kahdesta eri kohdasta. Toinen mitattava kanava oli ajolinjan suuntainen (P1) ja toinen vastainen (P2). Jokaisilla ajoparametreilla mitattiin kolme rinnakkaista kanavistoa. Mittaus-tulosten keskiarvot on taulukoitu liitteeseen 3. Pyöreiden reunojen vuoksi kanavan pohjan leveys ja kokonaisleveys oli vaikeasti määritettävissä osasta profiileista, joten leveys määritettiin kanavan syvyyden puolivälistä kanavan

reunalta toiselle. Tämä keskileveys oli määritettävissä kaikista kanavista yhdenmukaisesti.

Lisäksi liitteen 3 taulukkoon mitattiin kanavistojen kokonaispituus ja leveys sekä substraatin ryppyisyydelle annettiin lukuarvo silmämääräisesti tehdyn arvion perusteella. Kireämpi ajorata vähensi substraatin ryppyisyyttä selkeästi. Kanavistot kutistuivat pituussuunnassa huomattavasti erityisesti matalammalla 90 °C:n lämpötilalla. Käytetyssä toisen projektin painopellissä olevan kanaviston kohouman korkeudet tiedettiin olevan noin 90 µm ja leveydet mittauspisteessä P1 noin 280 µm ja mittauspisteessä P2 noin 140 µm.

Mittaustuloksista nähtiin selkeästi painopellin lämpötilan vaikutus kanavien leveyksiin. Korkeammalla lämpötilalla kanavat olivat leveämpiä. Tällöin kanavistojen kutistuminen pituussuunnassa oli pienempää. Lämpötilan ollessa 90 °C kanavistojen kokonaispituudet olivat alle 60 mm, kun painopellillä kanavisto on noin 72 mm pitkä. Korkeammilla lämpötiloilla (100 °C ja 110 °C) pituudet olivat noin 65 mm. Korkeampi paine myös kutisti kanavistoja, mikä näkyy erityisesti 90 °C:n ja 100 °C:n lämpötiloilla. Kutistumista ei tapahtunut leveyssuunnassa, sillä kanavien kokonaisleveys pysyi vakiona kaikilla ajoparametreilla.

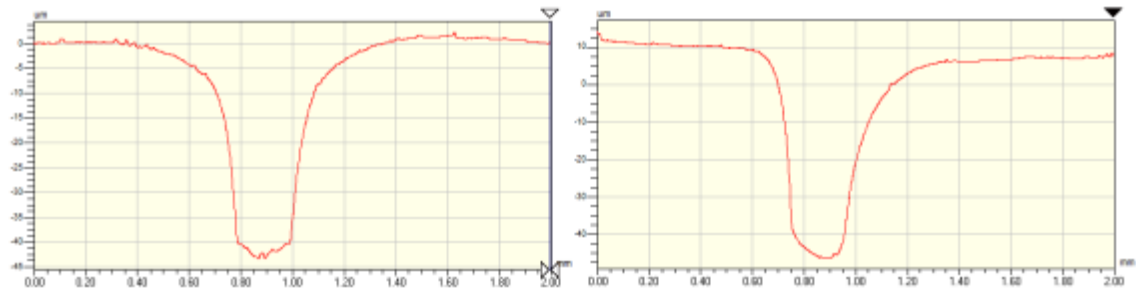
Ajonopeudella ei ollut merkittävää vaikutusta kanavien syvyyksiin tai leveyksiin. Substraatin ja painopellin välinen kosketusaika on ilmeisesti jo riittävän pitkä ajonopeudella 1,0 m/min.

### **9.4.3 Kolmas ajo**

Kolmannessa ajossa ei tullut millään lämpötilalla tai paineella huomattavasti ryppyjä. Ajon aikana havaittiin, että käytetty TPU-materiaali ei ollut täysin tasalaatuista. Ryppyjä havaittiin ilmestyvän kohtiin, joissa substraatissa oli epätasaisuutta. Löysemällä ratakireydellä ryppyjä tuli hieman enemmän kuin kireällä.

Liitteeseen 4 on kerätty dektakilla mitattujen kanavien syvyydet ja pohjan leveydet sekä kanavistojen kokonaispituudet. Taulukoidut arvot ovat jälleen kolmen samoilla ajoparametreilla valmistetun rinnakkaisnäytteen keskiarvoja.

Kanavistoista mitattiin kanavan profiilit pituussuunnassa olevasta kanavasta ja leveyssuunnassa olevasta kanavasta. Kuvassa 27 on tyypilliset pituus- ja leveyssuunnan kanavien profiilit, kun puristusaineena oli 10 bar ja painopellin lämpötilana 109 °C. Kanavien reunat ovat hieman pyöreät, mutta muuten profiilit ovat hyviä. Leveyssuunnassa olevien kanavien profiilit eivät olleet symmetrisiä, kuten kuvasta 27 näkyy. Tämä ei käytännössä kuitenkaan haittaa.



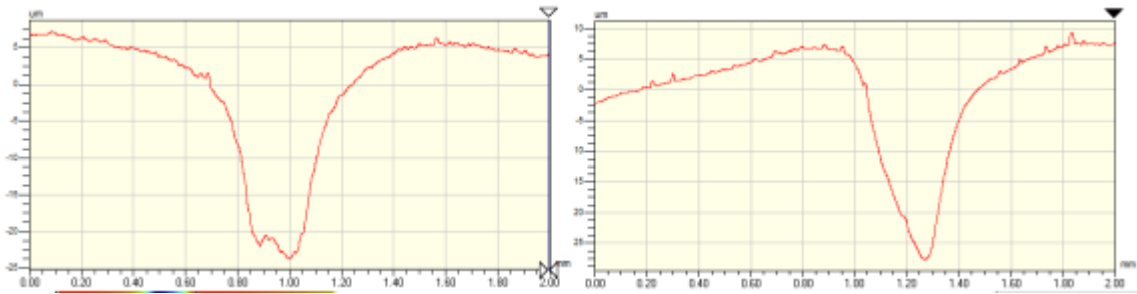
*KUVA 27. Picolla kuumapuristettujen TPU-kanavien profiilikuvia: Vasemmalla pituussuunnassa ja oikealla leveyssuunnassa olevan kanavan profiili*

Syvimät kanavat saatiin painopellin lämpötilalla 109 °C ja 10 bar:n puristusaineella, jolloin kanavien syvyydet olivat 40–63 µm. Liitteestä 4 nähdään, että kaikilla ajoparametreilla leveyssuunnan kanavat olivat syvempiä kuin pituussuunnan. Samoin kävi toisessa Pico-ajossa. Kolmannessa ajossa käytetyssä painopellissä kanavien kohoumat olivat yhtä korkeat ja leveät kaikkialla pellissä.

Leveyssuunnan kanavat olivat lisäksi kapeampia kuin pituussuunnan. Tämä ei ole yllättävää, sillä kanavistot kutistuivat huomattavasti pituussuunnassa. Korkeammalla paineella kutistuminen oli voimakkaampaa. Kanavien leveydet olivat jopa alle 200 µm, vaikka niiden pitäisi olla noin 400 µm painopellin kohoumien perusteella. Kanaviston kokonaispituus painopellillä oli 95 mm. Kanavistojen pituus oli keskimäärin noin 75 mm niillä ajoparametreilla, joilla saatiin syvimät kanavat. Kutistumista tapahtui siis yli 20 %.

Kanavien vastapuolen profiileja tutkittiin myös Picolla valmistetuista kanavista. Vastapuolen profiilit (kuva 28) muistuttavat toisella puolella substraattia olevien kanavien profiileja (kuva 27). Vastapuolen kanavien syvyydet olivat 30 µm:n molemmin puolin. Leveyssuunnassa olevan kanavan vastapuolen profiili on

vielä selkeämmin epäsymmetrinen verrattuna itse kanavaan. Vastapuolen kanavien syntyminen saattaa johtua luvussa 9.3 esitetystä ilmiöstä. Korkean puristuspuheen ja lämpötilan sekä kovan vastatelan vuoksi on myös mahdollista, että painopellin kohoumat (70  $\mu\text{m}$ ) painautuvat kokonaan läpi 200  $\mu\text{m}$  paksusta elastisesta TPU-substraatista. Osasta Picolla valmistetuista kanavistoista oli vaikea nopeasti silmin erottaa substraatin kuumapuristettu puoli.

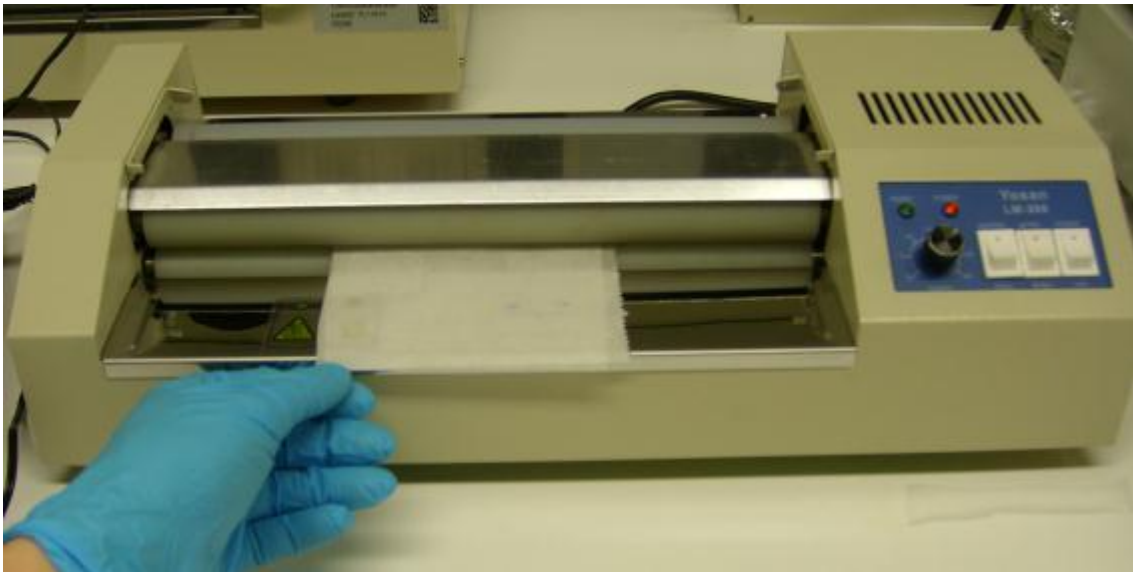


*KUVA 28. Picolla kuumapuristettujen TPU-kanavien vastapuolelta mitattuja profiilikuvia: vasemmalla pituussuunnassa ja oikealla leveyssuunnassa mitattu profiili*

## 10 KANAVISTOJEN KANSITUS

Painetut TPU-kanavistot kansitettiin eli laminoitiin TPU-materiaalilla. Kantena käytetyn TPU-kalvon toinen puoli (hotmelt) on käsitelty siten, että se muuttuu tarttuvaksi lämmön vaikutuksesta. Ennen laminoitua kansiin porattiin tai leikattiin veitsileikkurilla (knife plotter) nesteelle sisään- ja ulostuloreiät kanavien päiden kohdalle. Käytetyssä pylväsporassa oli liikuteltava alusta ja koordinaatistonäyttö, joiden avulla reikien paikat pystyttiin poraamaan tarkasti. Veitsileikkuri on laite, johon tietokoneella syötetään leikattavan kuvion ääriviivat, jolloin laite leikkaa laitteeseen asetettuun materiaaliin kyseisen kuvion.

Laminointi tehtiin kuvassa 29 näkyvällä Yosan LM-260 -laminaattorilla. Laminaattorissa on kuumennettavat pyörivät rullat, joiden lämpötilana käytettiin 120 °C–150 °C. Kansi asetettiin kanaviston päälle siten, että reiät osuivat kanavien päihin. Näyte syötettiin tavallisen leivinpaperin välissä laminaattorin läpi, jolloin saatiin valmis kansitettu kanavisto.



*KUVA 29. Kanavistojen kansitukseen käytetty Yosan LM-260 -laminaattori*

Laitteessa ei ollut mahdollista säätää painetta, jonka rullat aiheuttavat niiden välistä menevälle näytteelle. Painetta yritettiin vähentää asettamalla näytteen sivuille polykarbonaattimuovin palat, jolloin näytteeseen kohdistuva puristus-paine olisi pienempi.



### **10.1.1 Tasokuumapuristetut kanavistot**

Tasokuumapuristimella valmistettuja kanavistoja onnistuttiin kansittamaan siten, että kanavat pysyivät täysin auki. Tämä onnistui parhaiten käytettäessä laminaattorin lämpötilana 130 °C–140 °C ja laittamalla polykarbonaattikalvon palaset laminoitavan kanaviston molemmille puolille alentamaan puristus-painetta. Silmämääräisesti oli helppo todeta, että kanavisto oli kokonaan auki.

Korkeammalla lämpötilalla (150 °C) ja ilman PC-muovin palasia kanavistot eivät pysyneet täysin aukinaisina. Kanavat ovat suhteellisen leveitä, joten joustava TPU-kansimateriaali tarttui kiinni kanavan pohjaan, jos käytettiin liian korkeaa lämpötilaa eikä painetta alentavia PC-muovin paloja. Vaikka näin tapahtuikin, eivät kanavat yleensä menneet koko leveydeltään tukkoon. Tämä pystyttiin toteamaan ruiskuttamalla vettä kanavistoon. TPU-materiaalin elastisuuden vuoksi kanavat madaltuvat väliaikaisesti laminaattorin rullien aiheuttaman puristuspaineen vuoksi. Tämä on toinen syy, miksi kansimateriaali jää välillä kiinni kanavan pohjaan. Kanavistot pitäisi saada kansitettua täysin aukinaisina, jotta nesteen virtaus olisi tasaista ja ennustettavaa.

Ennen laminoitua osa kanavistoista ja kansista happiplasmattiin, jolloin TPU:n pinnasta saatiin hydrofiilisempi. Käytetty plasmaseteri oli TePla Technics Plasma GmbH. Näytteitä plasmattiin minuutin ajan 300 W:n teholla paineen ollessa 0,75 mbar:a. Plasmaus auttoi vahvistamaan laminoitua, mutta kanavat eivät pysyneet täysin aukinaisina. Entsyymikokeissa käytettiin täysin aukinaisia ei-plasmattuja kanavistoja.

### **10.1.2 Sammolla valmistetut kanavistot**

Parhaat Sammolla kuumapuristetut kanavistot olivat suurin piirtein yhtä leveitä kuin tasokuumapuristetut, mutta yli puolet matalampia, minkä vuoksi kanavistoja ei saatu laminoitua aukinaisina. Käyttämällä 130 °C:n lämpötilaa ja PC-paloja alentamaan puristus-painetta pystyttiin kansittamaan kanavistoja, jotka olivat osittain auki. Käyttämällä alle 130 °C:n lämpötiloja kansi kiinnittyi liian heikosti, joten lämpötilan alentaminen ei ollut vaihtoehto.

### 10.1.3 Picolla valmistetut kanavistot

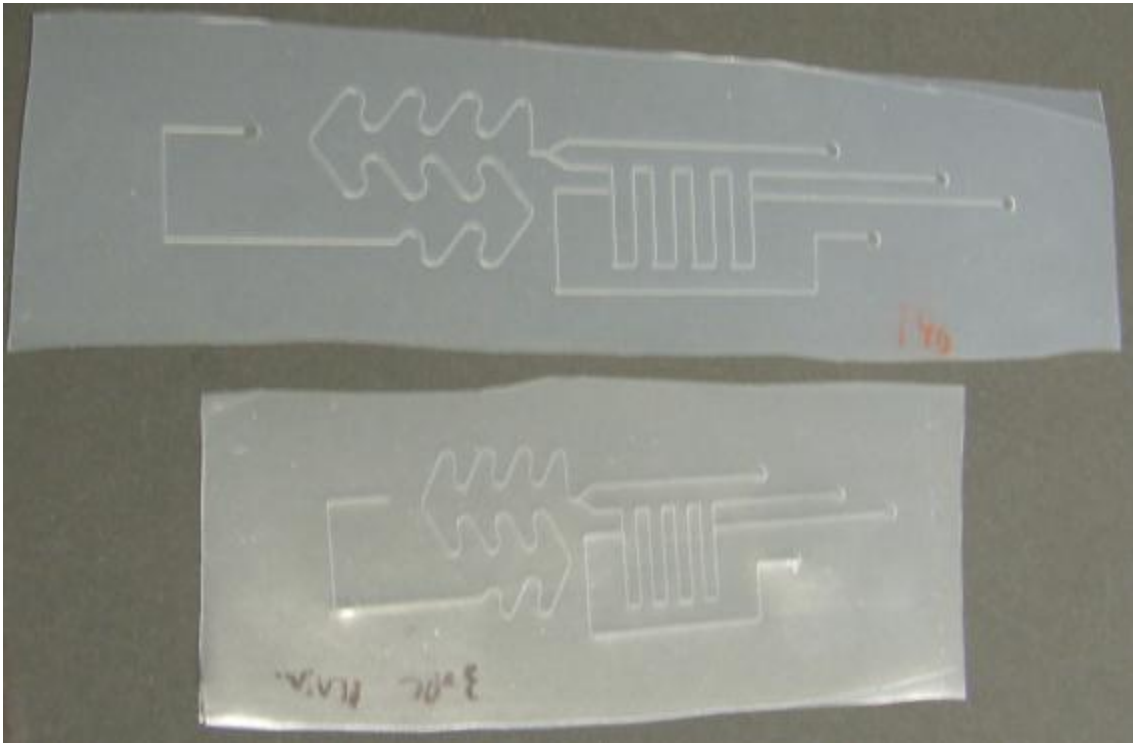
Picolla 109 °C:n lämpötilalla ja 10 bar:n paineella kuumapuristetut kanavistot menivät rullalle, kun niitä kansitettiin laminaattorilla. Tämän todettiin johtuvan Picolla kuumapuristetun materiaalin kutistumisesta laminoitaessa. Kun kanavisto kulkeutui laminaattorin läpi, sen pituus laski 77 mm:stä noin 72 mm:iin. Koska kansimateriaali ei kutistunut, kansitettu kanavisto vetäytyi rullalle. Myös 101 °C:n lämpötilalla ja 5 bar:n paineella tehtyjä kanavistoja laminoitiin. Niiden havaittiin kutistuvan vähemmän. Kanaviston pituus laski 86 mm:stä 84 mm:iin. Vaikutti siltä, että mitä enemmän kanavisto kutistui Picon kuumapuristuksessa, sitä enemmän se kutistui laminoitaessa. Kutistumista ei tapahtunut lainkaan kanaviston leveyssuunnassa, kuten ei tapahtunut Pico-ajoissakaan.

Kutistuminen ja rullalle kiertyminen ovat ongelmallisia ilmiöitä. Kutistumisen vuoksi kanavisto vetää laminoitaessa kantta kasaan aiheuttaen pientä rypytysyyttä. Vaikka osa kanavistoista saatiinkin kansitettua kanavat aukinaisina, rullalle vetäytyminen ja rypyt vaikeuttavat kanavistojen käyttöä.

Kutistumisen oletettiin johtuvan lämmöstä, joten kuumapuristetut kanavistot laitettiin uuniin ennen kansitusta. Tavoitteena oli saada kanavistot kutistumaan ennen kansitusta, jotta ne eivät menisi rullalle. Picolla 109 °C:n lämmöllä ja 10 bar:n puristuspaineella kuumapuristetusta TPU:sta leikeltiin paloja. Paloihin merkittiin 100 mm:n välimatka tussilla ja laitettiin paloja 70 °C:n ja 90 °C:n uuniin. Välimatka kutistui tunnissa 70 °C:n uunissa 100 mm:stä 90 mm:iin. Uunin lämpötilalla 90 °C välimatka oli kutistunut 85 mm:iin. Huomattavaa muutosta ei tapahtunut tunnin ja kahden tunnin uunissa pidon välillä kummallakaan uunin lämpötilalla.

Kun 70 °C:n uunissa ollut kanavisto kansitettiin, se kutistui vielä yli millimetrin ja meni hieman mutrulle. Kutistumista ei tapahtunut enää ollenkaan kanavistoilla, jotka olivat 90 °C:n uunissa ennen kansitusta. Tästä opittiin, että kanavistoja on käytettävä tunti 90 °C uunissa, jotta ne eivät kutistuisi kansitettaessa. Kutistumisen suuruutta tutkittiin enemmän laittamalla 16 kappaletta kanavistoja 90 °C:n uuniin noin 1,5 tunniksi. Kanavistojen keskimääräinen kutistuminen oli noin 14 % (liite 5). Kun otetaan huomioon Picon kuumapuristamisessa

tapahtunut kutistuminen, on kanavistojen kokonaiskutistuminen pituussuunnassa lähes 30 % verrattaessa painopellin kanaviston pituuteen (95 mm). Kuva 30 havainnollistaa kutistumisen suuruutta. Kuvassa alempana on Picolla kuumapuristettu ja uunissa (90 °C) käytetty kansitettu kanavisto. Ylempänä on vertailun vuoksi tasokuumapuristettu kansitettu kanavisto. Molempien painopellit olivat identtisiä.



*KUVA 30. Ylempänä tasokuumapuristettu kanavisto ja alempana Picolla kuumapuristettu uunissa käytetty kanavisto*

Uunissa käytettyjä kanavistoja tutkittiin dektakilla. Kanavien profiilien mittaustulokset ovat liitteessä 4. Kanavat madaltuivat huomattavasti 90 °C uunissa. Pituussuunnassa oleva kanava madaltui lähes 40 % (42 µm → 26 µm) ja leveyssuunnassa lähes 35 % (57 µm → 38 µm). Kanavien profiilit olivat samanlaisia kuin ennen uunia (kuva 27.).

Uunitetut kanavistot kansitettiin laminaattorilla 140 °C:n lämpötilalla. Kun käytettiin PC-muovin paloja lieventämään puristuspainetta, noin puolet kanavistoista pysyivät täysin aukinaisina. Kansi ei tuntunut olevan kuitenkaan kovin voimakkaasti kiinnittynyt kanavistoon. Havaittiin, että kanaviston

happiplasmaus (minuutti, 300 W) auttoi vahvistamaan kiinnittymistä. Plasmatuista kanavistoista osa laminoitui täysin aukinaisina ja niitä käytettiin entsyymikokeissa.

## 11 ENTSYMIKOKKEET

Kanavistolle oli tehty 3D-tulostimella testauskehikko. Kehikkoon voidaan liittää kuusi venttiilin sulkijaa. Venttiilien käyttöönotto olisi vienyt liikaa aikaa opinnäytetyön aikataulusta, joten venttiileitä ei käytetty. Venttiilien sulkijat olisi pitänyt kalibroida yksitellen hyvin tarkasti, jotta ne painavat kanavan tukkoon, mutta eivät paina niin kovaa, että kanavisto rikkoontuu. Kehikkoon liitettiin kaksi ruiskua, jotka asetettiin ChEmyx Nexus 3000 -pumppuun (kuva 31). Pumppuun voidaan määrittää pumppausnopeus eli nopeus, jolla neste tulee ulos ruiskuista.



*KUVA 31. Vasemmalla ChEmyx Nexus 3000 -pumppu ja oikealla Pico-kanavistojen testauskehikko*

Kehikolla keskityttiin testaamaan lähinnä kanavistojen sekoitusosion toimivuutta entsyymi- ja substraattiliuoksilla saatavan värireaktion avulla. Entsyyminä käytettiin piparjuuri-peroksidaasia (horseradish peroxidase, Sigma P8125) ja substraattina 3,3',5,5'-tetrametyyllibentsidiinia (Sigma T0440). Substraattiliuosta ei laimennettu, mutta entsyymiliuoksesta (100 mg/ml) laimennettiin 1,0 ja 0,1 mg/ml pitoiset liuokset PBS-puskuriin. Käytetyn entsyymin ja substraatin välisen reaktion synnyttämä lopputuote antoi vihreän tai sinisen värin liuokselle. Suuremmalla entsyymipitoisuudella väri oli vihertävä ja pienemmällä sininen.

## 11.1 Tasokuumapuristetut kanavistot

Kehikkoa kokeiltiin tasokuumapuristetuilla kanavistoilla. Entsyyminäyte (2 µl) ruiskutettiin tai imettiin kanaviston näytekammioon, minkä jälkeen kanavisto suljettiin kehikkoon. Kaksi kanaviston rei'istä, reiät A ja B kuvassa 5, tukittiin sinitarran avulla, koska venttiileitä ei käytetty. Polydimetyylisiloksaania (PDMS) käytettiin tiivisteinä pumpun reikien ympärillä. Substraattiliuosta pumpattiin D-kanavaan ja ilmaa tai PBS-puskuria näytekanaavaan (C-kanava). Pumppausnopeutta vaihdeltiin välillä 20–100 µl/min.

Kehikon käyttö oli vaivalloista. Kansi täytyi ruuvata sopivalla voimalla kiinni alustaan. Jos ruuveja kiristettiin liikaa, kanavat tukkiuntuivat. Jos ruuvit jätettiin liian löysälle, kanaviston ja kehikon väliset tiivisteet vuotivat.

Kanavistossa näytekanaava on paljon pidempi kuin kanava, johon substraattiliuosta pumpataan. Tästä johtuen yleensä vain substraattiliuos lähti aluksi kulkeutumaan sekoitusosioon, kun pumput käynnistettiin. Substraattiliuosta kulkeutui myös näytekakanavan puolelle. Kun näytekakanavaan kertyi tarpeeksi korkea paine, entsyymiliuoskin lähti kulkeutumaan sekoituskanavaan. Usein kanavistoon kertyi liikaa painetta, jolloin kanaviston laminointi rakoili tai pumpun ja kanaviston välisen putken tiivisteet vuotivat.

Kanaviston loppureiästä tulevasta putkesta saatiin tulemaan vihreää tai sinistä liuosta. Sekoitusosio vaikutti siis toimivan. Kehikosta näki heikosti läpi, joten varmuudella ei voitu sanoa, missä värireaktio tapahtui. Testit eivät olleet kuitenkaan kovin toistettavia monien yllä mainittujen ongelmien vuoksi.

## 11.2 Picolla kuumapuristetut kanavistot

Tärkeämpää työssä oli todeta R2R-kuumapuristettujen kuin tasokuumapuristettujen kanavistojen toimivuus. Picolla tapahtuneen kanavistojen kutistumisen vuoksi ei voitu käyttää samaa kehikkoa kuin tasokuumapuristetuilla kanavistoilla. Kehikon reikien paikat eivät enää sopineet yhteen kanavistojen reikien kanssa. Tarvittiin uusi kehikko, joka valmistettiin VTT:llä. Kuvassa 31 näkyvässä kehikossa oli läpinäkyvä kansi, jonka läpi oli mahdollista tutkia

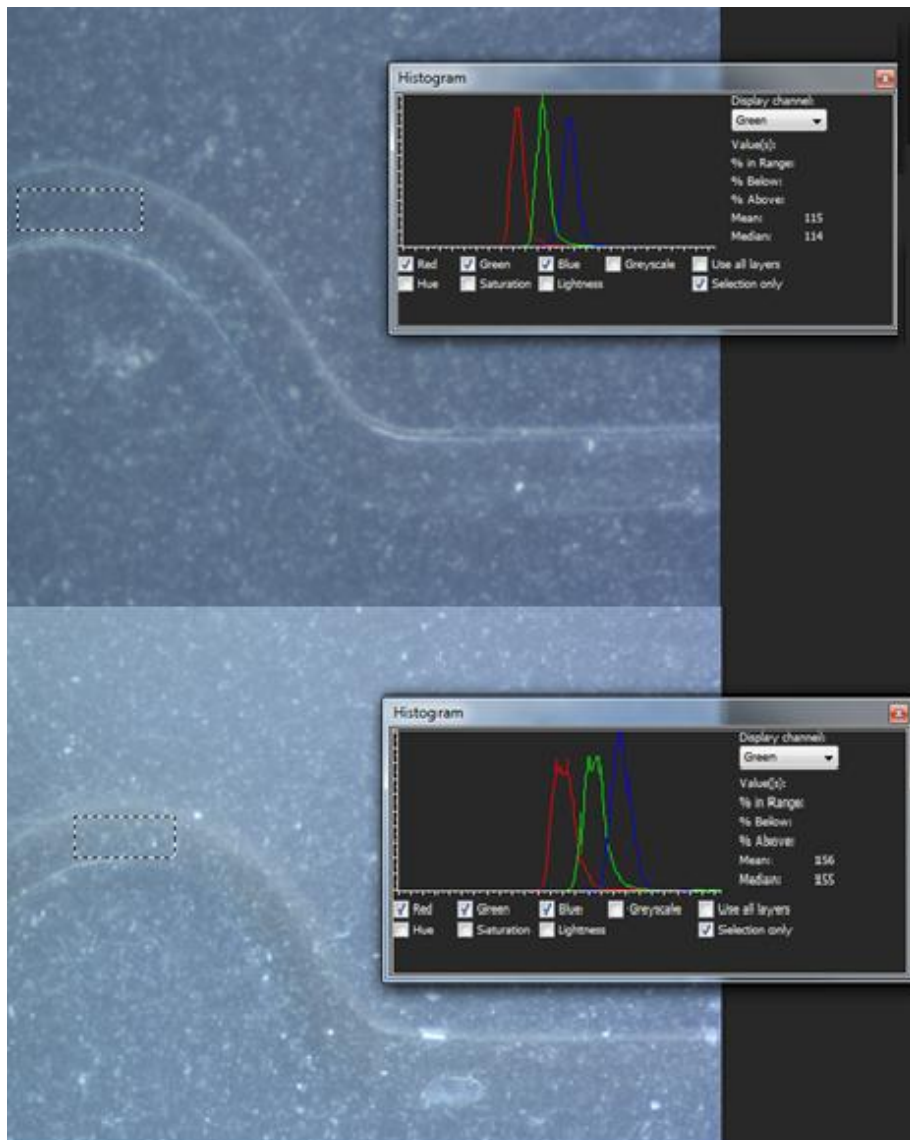
värireaktion tapahtumista. Yksinkertaistetussa kehikossa ei ollut edes mahdollista käyttää venttiileitä.

Tasokuumapuristetuilla kanavistoilla tehdyissä testeissä havaittiin, että substraattiliuos ja entsyyminäyte on vaikea saada pumpattua yhtä aikaa rinnakkain kanaviston sekoitusosioon. Picolla valmistetuilla kanavistoilla substraatti- ja näyteliuoksia ei pumpattu eteenpäin vaan imettiin loppureikään liitetyn ruiskun avulla sekoituskanavaan. Tyhjä ruisku asetettiin ChEMyx Nexus 3000 -pumppuun, jolla on mahdollista myös imeä. Näin liuokset kulkeutuisivat varmuudella kohti sekoitusosiota eikä kanavistoon kertyisi painetta.

Entsyyminäytettä (1,0 mg/ml) imettiin ensin noin 1 µl näytekanaavaan. Substraattiliuosta pipetoitiin tippa (10–20 µl) kanavan päässä olevan reiän päälle. Kehikon kantta ei kiinnitetty, koska alipaineen avulla kanaviston loppureikä tiivistyi automaattisesti ruiskun päähän. Kun pumppu laitettiin päälle, ensimmäisenä kanaviston sekoitusosioon edennyt liuos jatkoi kulkuaan. Tämä liuos oli yleensä substraattiliuos. Toinen liuos, yleensä entsyyminäyte, ei enää liikkunut eteenpäin. Tämä johtui mahdollisesti ilmataskusta, joka jäi entsyyminäytteen ja sekoitusosion väliin. Molemmat liuokset täytyi saada virtaamaan sekoitusosioon ilman, että kumpaankaan lähtökanaavaan jää ilmataskuja. Tämä onnistui rajoittamalla substraattiliuoksen virtaamista painamalla kanavaa kevyesti esimerkiksi tasapääruuvimeisselillä, jolloin kanava oli vain osittain aukinaisena. Tällöin myös entsyyminäyte lähti virtaamaan sekoituskanavaan.

Värireaktion tapahtumista sekoituskanavassa tarkkailtiin mikroskoopilla, johon oli liitetty värikamera. Kuvassa 32 ylhäällä on kameralla otettu kuva kanaviston sekoitusosioista, jossa virtaa pelkkä kirkas substraattiliuos. Alhaalla olevassa kuvassa on myös entsyyminäytettä virrannut sekoituskanavaan substraattiliuoksen lisäksi. Liuoksen väri muuttui selkeästi vihertäväksi, vaikka se ei välttämättä hyvin kuvassa näy. Väriin muutokselle olisi mahdollista antaa numeerinen arvo esimerkiksi vertailemalla kuvien värihistogrammeja kanavan kohdalta. Kuten kuvasta 32 nähdään, histogrammit ovat erilaiset. Kanavisto jouduttiin kuitenkin ottamaan pois mikroskoopin alta, jotta entsyyminäyte saatiin virtaamaan sekoituskanavaan painamalla substraattiliuoksen kanavisto osittain

tukkoon. Kun kanavisto laitettiin takaisin mikroskoopin alle, ei se enää ollut täysin samassa kohdassa kuin aiemmin. Kuvan 32 valokuvat eivät ole siis täysin vertailukelpoisia. Esimerkiksi kuvien kirkkauksissa on eroa.



*KUVA 32. Kaksi valokuvaa mikroskoopin näkymästä tarkennettuna kanaviston sekoitusosion loppuosaan: Ylemmässä kuvassa kanavistossa virtaa pelkkä substraatti ja alemmassa kuvassa entsyyminäyte on sekoittunut substraattiin.*

Entsyyminäyte ja substraatti saatiin sekoittumaan kanavistossa. Sekoituksen toteuttaminen oli kuitenkin vaikeaa. Se onnistui ainoastaan, kun molemmat liuokset saatiin kulkeutumaan sekoituskanavaan ilman, että kanavistoon jäi ilmataskuja. Liuosten sekoitustapa ei vaikuttanut olevan käytännöllinen, ja sitä tulisi kehittää.



## 12 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli valmistaa termoplastisesta polyuretaanimateriaalista entsyymimittauksiin soveltuvia kanavistoja rullalta rullalle -painokoneella. Kummallakaan työssä käytetyllä R2R-painokoneella TPU-materiaalin kuumapuristus ei sujunut ongelmitta. Ongelmat olivat hyvin erityyppisiä painokoneiden välillä.

Parhaat Sammolla valmistetut kanavistot saatiin, kun simuloitiin kovaa vastatela. Polykarbonaattimuovin kuljettaminen kuumapuristettavan substraatin alla ei ole pysyvä ratkaisu, vaan Sammon kuumapuristussyksikköön tarvitaan kovempi vastatela mikronestekanavistojen valmistamiseen. Valmistetut kanavat olivat profiileiltaan hyviä, mutta vain hieman yli 20 µm syviä. Sammon suurin mahdollinen puristuspaine ei ollut riittävän korkea, sillä Sammolla käytetty lämpötila todettiin riittäväksi Picolla. Puristuspaine jakaantuu laajemmalle alueella pehmeän vastatelan vuoksi. TPU-substraatin alla oleva PC-muovi estää substraatin painautumisen vastatelan sisään. Se ei kuitenkaan estä puristuspaineen leviämistä laajemmalla alueelle. Käytetty puristuspaine olisi mahdollisesti ollut riittävän korkea, jos olisi käytetty kovempaa vastatela.

Picolla ei ollut ongelmia saada kanavistoista tarpeeksi syviä. Painopellin lämpötilalla 109 °C ja 10 bar:n puristuspaineella saatiin noin 50 µm syviä kanavia. Kanavien pohjien leveydet olivat kuitenkin vain noin 200 µm, kun tasokuumapuristimella ja Sammolla valmistetut kanavat olivat hieman alle 400 µm leveitä. Kanavien leveyksien lisäksi myös kuumapuristettu TPU-materiaali ja samalla siihen painetut kanavistot kutistuivat pituus- eli ajosuunnassa noin 20 %. Leveyssuunnassa kutistumista ei tapahtunut lainkaan. Pituussuunnan kutistumisen suuruus korreloi positiivisesti puristuspaineen kanssa ja negatiivisesti lämpötilan suhteen.

Mikäli Picolla aiotaan tulevaisuudessa kuumapuristaa kanavistoja TPU-materiaaliin, on kutistuminen otettava huomioon kanaviston suunnittelussa. Toinen parempi vaihtoehto on parannella ajoparametreja sellaisiksi, että merkittävää kutistumista ei tapahdu, mutta kanavista saataisiin silti riittävän

syviä. Käytetty vastatela oli hyvin kova eikä antanut ollenkaan periksi. Hieman pehmeämpää vaihtoehtoa voisi kokeilla. Työssä käytettiin 200 µm paksua TPU-kalvoa. Eri paksuisen TPU-substraatin käyttäytymistä kuumapuristuksessa voitaisiin myös tutkia.

Picolla kuumapuristetussa TPU-materiaalissa oli jännitteitä vielä ajon jälkeenkin. Jännitteet purkautuivat lämmön vaikutuksesta kanavistoja kansitettaessa, jolloin materiaali kutistui vielä lisää vetäen kansitetun kanaviston rullalle. Jännitteet poistettiin käyttämällä kanavistoja 90 °C:n uunissa ennen laminointia. Uunissa kanavistot kutistuivat ja kanavat madaltuivat noin 50 µm:stä noin 30 µm:iin. Uunitetut kanavistot eivät enää kutistuneet laminoitaessa.

Kanavistot saatiin kansitettua aukinaisina, vaikka ne eivät olleet paljoakaan syvempiä kuin Sammon syvimät kanavistot, jotka eivät pysyneet kokonaan auki kansitettaessa. Picolla painettujen kanavien leveydet olivat noin puolet Sammolla saatujen leveyksistä. Joustava kansimateriaali ei pääse tarttumaan kapean kanavan pohjaan niin helposti kuin leveämpään. Tasokuumapuristimella valmistetut kanavistot olivat riittävän syviä, jolloin ne pystyttiin kansittamaan ilman, että kansi tarttui kiinni kanavan pohjaan.

Kanavistojen kansittamiseen olisi voitu käyttää muutakin metodia laminaattorin sijasta, esimerkiksi tasokuumapuristinta. Käyttämällä hyvin pientä puristus-painetta tasokuumapuristimella, jolloin TPU ei painuisi kasaan, olisi ehkä Sammollakin kuumapuristettuja kanavistoja saatu kansitettua kanavat aukinaisina. Rullien avulla laminointi on kuitenkin nopeampi tapa, mikä voidaan myös integroida R2R-kuumapuristamisen kanssa samaan prosessiin. Tästä syystä työssä käytettiin laminaattoria.

Picolla valmistetuissa kansitetuissa kanavistoissa neste virtasi hyvin. Kanavistojen soveltuvuutta niiden lopulliseen käyttötarkoitukseen ei testattu kattavasti. Aikataulusyistä venttiileitä ei käytetty. Venttiilien soveltuvuutta käytetystä TPU-materiaalista valmistettuihin kanavistoihin ei ole syytä epäillä, sillä nesteen virtaus pysähtyi kanavistossa, kun kanavaa painettiin ulkoapäin tukkoon. Kun painaminen lopetettiin, neste virtasi taas.

Kanaviston sekoitusosa ei toiminut käytännössä yhtä helposti kuin oli suunniteltu. Värireaktion aiheuttavat entsyyminäyte ja substraattiliuos oli vaikea saada virtaamaan yhtä aikaa sekoitusosaan. Liuokset saatiin lopulta sekoittumaan kanaviston sekoituskanavassa, mikä todettiin värin muodostumisen perusteella. Tämä vaati kuitenkin paljon työtä ja pientä säätöä. Ongelmat liuosten sekoituksessa vaikuttivat johtuvan kanaviston rakenteesta eikä TPU-materiaalista tai kanavien profiileista.

Työssä käytetyn Elastollan SP806 TPU -materiaalin käyttäytyminen R2R-kuumapuristamisessa eri lämpötiloilla ja paineilla jäi vielä hieman epäselväksi. Materiaalin ajosuunnassa tapahtuvaa kutistumista Picolla ei osattu odottaa. Kutistuminen oli voimakkainta matalammalla painopellin lämpötilalla ja korkeammalla puristusaineella. Elastisen TPU:n olisi voinut olettaa päinvastoin venyvän. Useat muovimateriaalit kutistuvat niitä kuumennettaessa, mutta lämpötilan ja kutistumisen välinen korrelaatio oli TPU:n tapauksessa negatiivista.

Rajoitetut resurssit priorisoitiin käyttökelpoisten kanavistojen saamiseen eikä työssä käytetyn TPU-materiaalin ominaisuuksien tutkimiseen. Työssä onnistuttiin lopulta valmistamaan käyttökelpoisia mikronestekanavistoja termoplastisesta polyuretaanimateriaalista. R2R-kuumapuristuksessa käytetyissä ajo-parametrissa ja olosuhteissa on kuitenkin vielä parannettavaa.

## LÄHTEET

1. Nguyen, Nam-Trung – Wereley, Steven T. 2002. Fundamentals and Applications of Microfluidics. Artech House.
2. Hardt, Steffen – Schönfeld, Friedhelm 2007. Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis Systems. Springer.
3. Wikipedia. 2012. Vapaa tietosanakirja. Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminar\\_and\\_turbulent\\_flows.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminar_and_turbulent_flows.svg). Hakupäivä 4.2.2013.
4. Yeo, L. P. – Ng S. H. – Wang Z. F. – Xia, H. M. – Wang, Z. P. – Thang, V. S. – Zhong, Z.W. – Rooij, N. F. de 2009. Investigation of hot roller embossing for microfluidic devices. Journal of Micromechanics and Microengineering vol. 20, nro 1
5. Höök, Tuula 2010. Polymeerimateriaalit. Saatavissa: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould\\_injmoulding\\_materials\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf) Hakupäivä 4.2.2013
6. Prisacariu, Cristina 2011. Polyurethane Elastomers: From Morphology to Mechanical Aspects. Wien: Springer-Verlan.
7. Elastollan SP806 data sheet. Saatavissa: <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=43686&U=1&E=26741>. Hakupäivä 4.2.2013.
8. Koleva, Milena. Polymetyylimetakrylaatti (PMMA). Suom. Sanna Nykänen. Saatavissa: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PMMA\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PMMA_FI.pdf). Hakupäivä 4.2.2013.
9. Holger, Becker – Ulf, Heim 2000. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures. Sensors and Actuators vol. 83. S. 130–135.
10. Juang, Yi-Je – James Lee, L – Koelling, Kurt W. 2002. Hot Embossing in Microfabrication Part I: Experimental. Polymer Engineering and Science vol. 42, nro. 3. S. 539–550.
11. Sahli, M – Malek, Khan – Gelin, J.C. 3D modelling and simulation of the filling of cavities by viscoelastic polymer in roll embossing process. Inter-

national Journal of Material Forming vol. 2, nro 1. S. 725-728. Springer-Verlag.

12.VTT. 2012. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/vtt/index.jsp>. Hakupäivä [4.2.2013](#).

## **LIITTEET**

Liite 1 Sammolla kuumapuristettu PMMA

Liite 2 Sammolla kuumapuristettu TPU

Liite 3 Picolla kuumapuristettu TPU, toinen ajo

Liite 4 Picolla kuumapuristettu TPU, kolmas ajo

Liite 5 Pico-kanavistojen kutistuminen 90 °C uunissa (1,5 h)



		Ajoparametrit						Dektit mittausten tulokset					
Kantomuovillinen TPU	Nopeus, m/min	Painotelan lämpö, C	Paine (bar)	Esilämmitys, C	Muuta	Mittauspisteitten lkm.	Kanavan keskisyyvyys [um]	Syvyden keskinäisyys [%]	Kanavan pohjan leveys [um]	Pohjan leveyden keskinäisyys [%]	Kanavan kokonaisleveys [um]	Kokonaisleveyden keskinäisyys [%]	
Ei	-	101-103	6	-	Tasokuumapuristettu	9	50,23	5,23	366,11	0,83	766,00	2,64	
Ei	0,5	112*	5,5	64	Löysää puristuksen jälkeen	9	24,01	9,24	409,89	1,34	665,00	1,70	
Ei	0,5	112*	5	-		6	4,78	8,13	421,83	0,59	588,67	1,64	
Ei	0,5	112*	5	64		6	6,37	9,51	420,83	1,62	608,17	3,00	
Ei	0,5	112*	5	-	PC alla	6	9,84	17,33	349,50	1,24	527,50	3,29	
Ei	0,5	112*	5	64	PC alla	6	12,40	20,30	351,00	1,42	542,50	2,24	
					*lämpötila mitattiin ainoastaan kerran ajopäivän alussa								
Ei	0,5	107	5,5	80		3	3,30	6,06	415,33	0,86	562,67	1,50	
Ei	0,5	107	5,5	-		3	4,20	7,94	422,67	0,42	575,33	2,24	
Kyllä	0,50	104,00	6,50	-		6	9,73	10,96	417,17	0,92	678,50	1,89	
Kyllä	0,25	104,00	6,50	-		6	14,68	8,38	404,50	2,06	671,00	2,43	
Kyllä	0,25	104,00	6,50	-	PC alla	6	21,27	7,89	360,17	1,17	639,17	5,29	
Kyllä	0,25	104,00	6,50	-	Ajoreitin muutos	4	5,30	9,91	412,25	0,91	616,50	1,74	
Kyllä	0,25	109,00	5,00	-	Löysää puristuksen jälkeen	6	20,03	6,21	398,50	1,84	782,00	3,71	
Kyllä	0,25	109,00	5,00	-		3	19,55	3,75	402,67	1,21	667,00	0,50	



Ajoparametrit		Substraatin rypyyisyys, asteikko 0-5		P1, pituussuunnassa oleva kanava		P2, leveysuunnassa oleva kanava		Kanaviston pituus [mm]	Kanaviston leveys [mm]		
Ajoneopeus [m/min]	Painopellin lämpötila [C]	Paine [bar]	Radan kireys	Kanavan Syvyyden keskisyvyys [µm]	Kanavan Leveyden keskisyvyys [µm]	Kanavan Syvyyden keskisyvyys [µm]	Kanavan Leveyden keskisyvyys [µm]				
1	93/89	4	Löysä	25,3	332,7	2,7	8,0	35,1	144,7	57,5	22,0
1	93/89	5	Löysä	27,3	324,7	1,4	4,0	32,7	135,0	56,5	22,0
1	93/89	7	Löysä	33,0	315,3	1,1	4,9	48,6	132,7	54,0	22,5
1	93/89	4	Kireä	27,2	319,3	2,8	5,1	41,9	152,3	59,0	22,0
0,5	93/89	4	Kireä	27,0	322,7	3,0	5,6	41,1	145,7	59,5	22,0
0,5	93/89	5	Kireä	42,3	317,3	2,8	4,0	60,7	151,0	58,0	22,0
0,5	93/89	7	Kireä	53,9	317,3	1,8	6,7	66,7	176,3	51,0	22,0
0,5	103/99	4	Kireä	39,3	347,3	5,2	3,5	40,3	163,3	66,0	22,0
0,5	103/99	5	Kireä	39,0	348,0	4,2	1,2	41,3	171,0	67,0	22,0
0,5	103/99	7	Kireä	44,3	346,0	2,3	3,2	47,9	181,7	60,5	22,0
1	103/99	4	Kireä	34,3	338,0	2,0	2,4	39,9	182,7	68,5	22,0
1	103/99	5	Kireä	36,1	340,7	4,2	1,6	42,3	176,3	68,0	22,0
1	103/99	7	Kireä	43,7	338,7	1,7	9,4	50,0	194,7	61,0	22,0
0,5	113/110	4	Keskikireä	38,6	348,0	2,7	4,3	39,8	191,7	67,0	22,0
1	113/110	4	Keskikireä	39,6	344,0	2,7	2,3	39,1	205,0	68,0	22,0
1	113/110	5	Keskikireä	37,0	356,7	1,0	4,5	39,7	210,3	67,0	21,5
1	113/110	7	Keskikireä	41,5	365,3	0,9	3,3	46,3	214,7	65,5	22,0
0,5	113/110	5	Keskikireä	39,0	350,0	1,9	5,7	41,4	204,3	65,5	22,0
0,5	113/110	7	Keskikireä	41,7	358,0	0,7	5,6	47,6	199,3	64,5	22,0

Asteikko:

0 = ei rypyyjä

5 = paljon rypyyjä, käyttökelvoton

Kanaviston pituus

painopellillä oli 72 mm

Ajoparametrit	Ajoparametrit				P1, pituussuunnassa oleva kanava				P2, leveysuunnassa oleva kanava				Kanaviston pituus [mm]
	Nopeus [m/min]	Painopelin lämpötila [C]	Paine [bar]	Radan kireys	Kanavan keskisyvyys [µm]	Syvyiden keskisyvyys [%]	Kanavan pohjanleveys [µm]	Levyden keskisyvyys [%]	Kanavan keskisyvyys [µm]	Syvyiden keskisyvyys [%]	Kanavan pohjanleveys [µm]	Levyden keskisyvyys [%]	
1	0,6	103/101	5	Kireä	28,2	3,0	226,7	0,4	43,9	4,0	185,0	2,7	86,5
2	0,5	98/96	5	Kireä	20,9	7,9	224,0	1,8	34,8	11,5	198,3	0,8	80,0
3	0,5	98/96	7	Kireä	37,3	9,5	205,3	0,9	51,1	3,7	173,0	3,1	74,0
4	0,5	103/99	5	Kireä	22,6	8,3	226,0	1,2	30,6	8,4	199,3	1,2	82,0
5	0,5	108/104	5	Kireä	26,5	3,7	227,3	0,8	35,5	4,6	198,7	2,9	84,0
6	0,5	108/104	7	Kireä	27,0	6,9	227,3	1,4	39,7	2,8	189,3	2,3	79,0
7	0,5	112/109	5	Kireä	30,3	3,4	228,7	0,8	39,1	7,2	206,7	5,4	86,0
8	0,5	112/109	7	Kireä	29,7	12,7	226,0	1,2	37,4	3,1	199,3	1,9	81,0
9*	0,5	112/109	10	Kireä	42,2	10,5	211,3	1,1	51,3	10,3	185,0	0,7	77,0
10	0,5	112/109	10	Kireä	41,9	3,6	220,0	1,2	63,3	10,7	203,7	3,5	77,0
11	0,5	112/109	10	Löysä	41,2	6,6	194,7	0,5	62,0	0,9	185,3	1,7	72,5
12**	0,5	112/109	10	Löysä	44,6	5,8	199,3	0,0	50,7	3,4	171,7	2,5	74,5
13**	0,5	112/109	10	Kireä	52,4	6,1	181,5	2,4	55,0	4,5	168,5	1,6	74,0
14**	0,5	112/109	10	Normaali	55,1	4,9	188,7	3,1	58,9	5,0	176,7	2,0	73,5
	*Ajoparametrit 9 jälkeen vaihdettiin uusi rulla, kun edellinen loppui.												
	**Ajoparametreilla 12-14 ei ollut kantomuovia.												
90C uunitettu***	0,5	112/109	10	Kireä	25,7	14,1	196,0	3,6	37,6	8,0	143,5	4,6	67,0

\*\*\*Mittavat näytteet tehty ajoparametreilla 9 ja 10. Mitattiin 9 rinnakkaisista kanavistoa.

Kanavan pituus, mm			
Ennen uunia	Uunin jälkeen	Kutistuminen prosentteina	
78,5	67,0	14,6	
78,5	65,0	17,2	
76,0	68,5	9,9	
76,0	68,5	9,9	
79,0	67,0	15,2	
76,0	68,5	9,9	
78,5	66,0	15,9	
79,0	67,0	15,2	
79,5	67,0	15,7	
80,0	67,5	15,6	
79,5	68,0	14,5	
78,0	66,0	15,4	
79,5	67,5	15,1	
79,5	68,0	14,5	
78,0	66,0	15,4	
79,5	67,5	15,1	
Keskiarvo	78,4	67,2	14,3
Keskihajonta	1,02	0,81	1,67