

Analisis Fabrikasi Desain *Passive Mixing Microchannel* Perangkat Mikrofluidik Material Acrylic Dengan Laser CO₂ Daya Rendah

¹Badruzzaman, ²Ario Sunar Baskoro, ³A. Rizal Siswantoro

¹Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Indramayu
Jln. Raya Lohbener Lama No. 8 Lohbener Indramayu Jawa Barat
^{2,3}Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia
Email : bagus_200409@yahoo.com¹, ario@eng.ui.ac.id²

Abstrak

Perangkat mikrofluida telah diterapkan di bidang biomedis untuk memanipulasi cairan dalam jaringan saluran dengan dimensi antara 5-500 μm . Perangkat mikrofluida diproduksi oleh proses microfabrication yang terdiri dari desain, microstructuring dan proses back-end. Salah satu aplikasi mikrofluida adalah pencampuran pasif microchannel. Dalam perangkat ini, cairan akan mengalir melalui saluran tanpa ada bagian yang bergerak dan tekanan dari luar untuk menghasilkan pencampuran cairan. Hal ini penting untuk merancang bentuk saluran untuk menghasilkan pencampuran microchannel pasif yang bagus. Laser CO₂ daya rendah adalah digunakan untuk proses *microstructuring* sebagai alat pemotong untuk menghasilkan perangkat mikrofluida pada bahan *acrylic*. Kekasaran permukaan saluran yang dirancang akan diamati. Dalam penelitian ini, proses desain saluran dilakukan dengan metode eksperimen melalui parameter yang mempengaruhi output dari proses pemotongan yakni kekuatan laser, kecepatan potong dan desain channel. Selanjutnya dilakukan fabrikasi mikrofluidik dengan *back-end proses* melalui penggabungan metode ikatan termal. Akhirnya, Dari hasil percobaan, desain saluran 1 memiliki pengaruh pada semua parameter untuk variabel *surface roughness* dibandingkan dengan desain saluran 2.

Kata kunci: *Microfabrication, microfluidic, passive mixing microchannel, CO₂ laser, acrylic material*

Abstract

Microfluidics devices have been applied in the biomedical field to manipulate the tissue fluids in channels with dimensions between 5-500 μm . Microfluidics device manufactured by a microfabrication process consisting of design, microstructuring and back-end processes. One application of microfluidics is a passive mixing microchannel. In this device, the liquid will flow through the channel without any moving parts and the pressure from the outside to produce a fluid mixing. It is important to design the shape of the channel to generate a nice passive mixing microchannel. Low power CO₂ laser is used to process microstructuring as cutting tools to produce microfluidic devices on acrylic material. Surface roughness lines were designed to be observed. In this study, the design process channel carried by the experimental method through the parameters that affect the output of the process is the power of laser cutting, cutting speed and design channel. And then the fabrication of microfluidics with back-end processing is done by the process of merging with a thermal bonding method. Finally, From the experimental results, the design of the channel 1 has an influence on all the parameters for surface roughness compared with a channel design 2.

Key Words : *Microfabrication, microfluidic, passive mixing microchannel, CO₂ laser, acrylic material*

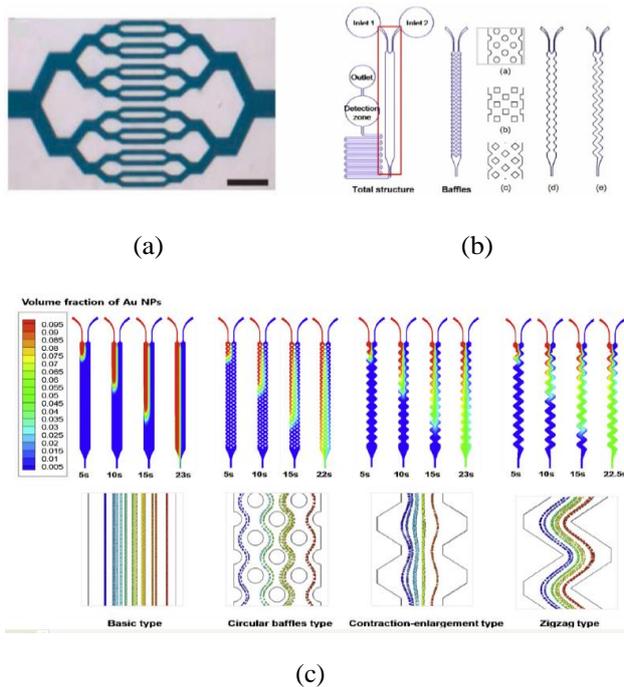
I. PENDAHULUAN

Dalam bidang biomedical, banyak konsep-konsep baru yang bermunculan dalam memecahkan berbagai masalah yang terjadi dalam bidang tersebut, salah satunya adalah pembentukan mikrofluidik dengan cara pembentukan kanal *channel* yang menyerupai jaringan pembuluh kapiler [1], biochemical untuk pengamatan karakteristik aliran Au NPs dan CuSO₄ [2] untuk bentuk *channel* yang bervariasi, dan masih banyak lagi model-model yang lainnya.

Pada penelitian awal untuk pembentukan mikrofluidik, material yang banyak digunakan adalah *silicon* [3] dan *glass* [4] karena material tersebut memiliki sifat fisik, elektrik dan optik material yang baik, tetapi memiliki kekurangan pada proses manufaktur yaitu biaya yang diperlukan besar. Sedangkan dengan penggunaan material polymer untuk pembentukan mikrofluidik dapat mengurangi biaya dan dapat menggunakan proses manufaktur yang sederhana jika dibandingkan dengan material *silicon* dan *glass*.

Perbandingan beberapa material untuk *microstructuring* terlihat pada tabel 1 beberapa contoh material yang termasuk dalam *polymer* adalah *PolyMethyl Methacrylate* (PMMA), *Polycarbonate*, dan *Poly DimethylSiloxane* (PDMS).

Beberapa teknik pembentukan untuk mikrofluidik telah banyak dilakukan, untuk material *silicon* dan *glass* adalah *etching* [6], dan *photolithography*. Sedangkan untuk material *polymer* teknik pembentukan yang dapat digunakan adalah *hot embossing* [7], *injection molding* [8], *soft lithography* [9] dan *laser ablation* [10]. Hal ini yang menjadi dasar pemilihan material PMMA atau *acrylic* sebagai material dalam proses penelitian ini.



Gambar 1. *Channel* menyerupai pembuluh kapiler (a) [1] *channel* untuk analisis aliran Au NPs dan CuSO₄ (b) dan (c) [2]

Penggunaan laser telah dilakukan sejak 40 tahun yang lalu, baik penggunaan laser sebagai *cutting*, *drilling* dan *welding*. Dalam aplikasi biomedis, pemakaian mesin laser dilakukan karena proses pemotongan yang dilakukan laser lebih rapi, sedikit terjadi karbonisasi dan berkas serpihan hasil pemotongan relative tidak ada bila dibandingkan dengan proses konvensional.

Metode pembentukan mikrofluidik menggunakan laser telah banyak dilakukan, dengan berbagai macam jenis laser yang digunakan, khususnya untuk penggunaan mesin laser CO₂ [11].

Penggunaan laser pada penelitian ini dimaksudkan untuk melanjutkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, diantaranya adalah penggunaan laser diode untuk proses *sintering* dan pemotongan pada material *acrylic* serta penggunaan laser CO₂ untuk aplikasi *biomedical* dengan pengamatan hasil pemotongan laser CO₂ pada material *gypsum* [12].

Proses pengelasan dengan laser tersebut menghasilkan bentuk kawah las yang berbeda-beda sesuai dengan desain *channel* yang dibuat. Bentuk kawah las yang dihasilkan, bermaksud untuk mengalirkan dan mencampurkan fluida tunggal maupun campuran sesuai dengan karakteristiknya masing-masing. Proses pencampuran fluida / *fluidic mixing* yang sudah berkembang terbagi menjadi 2 macam yakni *active mixing* dan *passive mixing*.

Active mixing adalah proses pencampuran fluida dimana dalam proses pencampurannya terdapat tekanan atau *pressure* dari luar seperti pompa sehingga terjadi pergerakan fluida didalam *channel* dan mempunyai efisiensi pencampuran yang tinggi.

Passive mixing adalah proses pencampuran fluida dimana fluida yang bergerak dan part pencampur diam tanpa ada pergerakan dan tekanan dari luar atau proses pencampurannya terjadi karena bentuk desain *channel* yang khusus untuk pencampuran tersebut [13].

Dalam aplikasi mikrofluidik untuk bidang kimia dan biological, *active mixing* tidak populer digunakan karena menggunakan tekanan / *pressure* yang tinggi sedangkan *passive mixing* sangat cocok digunakan untuk bidang tersebut. Hal ini yang menjadikan dasar pemilihan *passive mixing* untuk mikrofluidik dan kegiatan yang akan dilakukan saat ini yakni pemodelan desain *passive mixing* [13].

Berbagai bentuk desain dari *microchannel* yang sudah dikembangkan, banyak menghasilkan profil yang berbeda-beda kualitasnya berdasarkan penelitian yang berkembang.

Tabel 1. Perbandingan material untuk *microstructuring* [5]

	Silicon	Glass	Technical thermoplastics (e.g. PMMA, PC, PEEK)	Thermoset polymers	Elastomers
Microfabrication	Easy-medium	Easy-medium	Easy	Medium	Easy
Structuring processes	Wet and dry etching	Wet etching, photo-structuring	Injection molding, hot embossing, thermoforming, laser ablation	Casting, lithography, etching	Casting
Possible geometries	Limited, 2D	Limited, 2D	Many, 2D, 3D	Mostly 2D, 3D possible	Mostly 2D, 3D possible
Assembly	Easy	Medium	Easy	Medium	Easy
Interconnections	Difficult	Difficult	Easy	Easy	Easy-medium
Mechanical stability	High	High	Low-medium	High	Very low
Temperature stability	High	High	Low-medium	Medium	Low
Acid stability	High	High	High	High	High
Alkaline stability	Limited	High	High	High	High
Organic solvent stability	High	Medium-high	Low-medium	Medium-high	Low
Optical transparency	No	High	Mostly high	Partly	High
Material price	Medium	Medium-high	Low-medium	Medium	Low

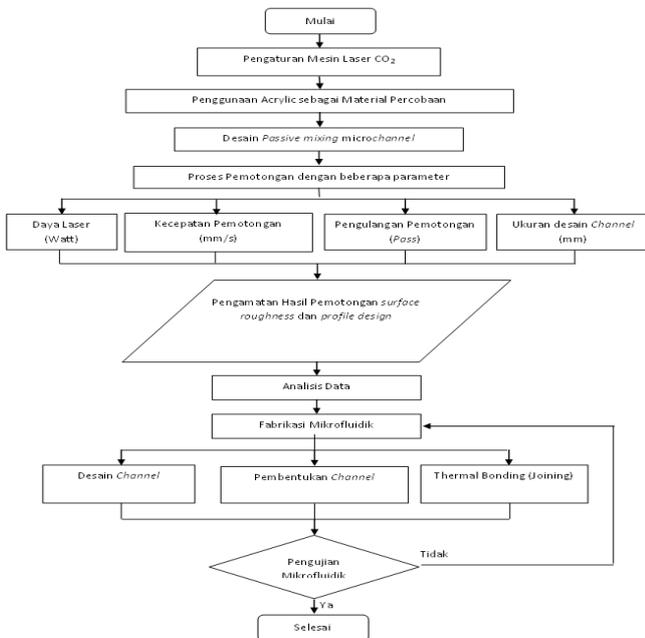
Tabel 2. Perkembangan *passive mixing* dalam 6 tahun terakhir [14]

Categories	Mixing Technique	Mixing Time (ms)	Mixing Length (μm)	Mixing Index
Lamination	Wedge shaped inlet	1	1	0.9
	90° rotation	-	-	0.95
Zigzag channels	Elliptic-shape barriers	-	-	0.96
	Folding structure	489	10,000	0.01
3-D serpentine structure	Cresting structure	-	-	0.015
	Stacked shim structure	-	-	-
	Multiple splitting, stretching and recombining flows	-	-	-
	Unbalanced driving force	-	815 μ	0.91
Embedded barriers	SMX	-	-	-
	Multidirectional vortices	-	4255	0.72
Twisted channels	Split-and-recombine	730	96,000	-1
	Obstacle shape	-	1000	0.98
Surface-chemistry	T-Y-mixer	-	1000	0.95

Dalam penelitian ini akan dilakukan pengembangan model penggabungan kategori *Y-Channel* dan *lamination* dengan model *mixing* yang berbeda dari sebelumnya.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan dalam proses pengujiannya, adapun tahapan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram alur metode penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, *channel* yang akan dibentuk mempunyai karakter *microchannel* yakni $200\mu m \geq D > 10\mu m$, sesuai dengan tabel 3.

Tabel 3. Skema klasifikasi dimensi *channel* [15]

<i>Conventional channels</i>	$> 3mm$
<i>Minichannels</i>	$3mm \geq D > 200\mu m$
<i>Microchannels</i>	$200\mu m \geq D > 10\mu m$
<i>Transitional microchannels</i>	$10\mu m \geq D > 1\mu m$
<i>Transitional nanochannels</i>	$1\mu m \geq D > 0.1\mu m$
<i>Nanochannels</i>	$0.1\mu m \geq D$

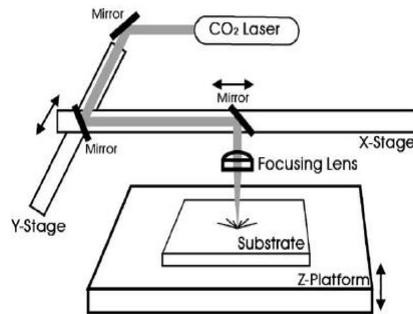
D : smallest channel dimension

Channel yang akan dibentuk menggunakan material *acrylic* dimana bahan ini akan menjadi elastic bila dikenai suhu $60^\circ C$. *Acrylic* juga memiliki beberapa ukuran, ketebalan dan aneka warna, sehingga produk yang dihasilkan menjadi lebih menarik. *Properties acrylic* ini dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. *Properties acrylic* [16]

Mechanical Properties			Physical Properties		
Properties	Value	Unit	Properties	Value	Unit
Young Modulus	3.2	Gpa	Thermal expansion	48-80	e-6/°C
Tensile strength	35-62	Mpa	Thermal conductivity	0.000729	W/m.°K
Elongation	5-7,2	%	Specific heat	5.344	J/kg.°K
Compressive strength	28-97	Mpa	Melting temperature	1103.15	°K
Yield strength	48-97	Mpa	Density	1190	Kg/m3

Proses pemotongan ini menggunakan mesin laser CO₂ dimana mesin ini mempunyai spesifikasi sesuai tabel 5.



Gambar 3. Konsep proses pemotongan mesin laser CO₂

Tabel 5. Spesifikasi mesin laser CO₂ [17]

Daya	0 ~ 100 % (maks. 60 Watt)
Wavelength	10.6 μm
Frequency mode	PWM (200 Hz - 200 KHz)
Laser head move	Pulse unit (0.1 mm/s -)
Output voltage MPC 6535	0 ~ 5 Volt
Power Laser Output	0 ~ 30 mA
Pengulangan pemotongan	1 ~ 999
Diameter beam	0,002 m atau 2 mm

Tabel 6. Parameter Penelitian

Parameter	Uraian	Satuan
Daya laser	6 ; 6,6 ; 7,2 ; 7,8 ; 8,4	Watt
Kecepatan potong	5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25	mm/s
Ukuran Desain Channel (lebar puncak x lebar lembah)	0,3 x 0,3 mm ; 0,5 x 0,5 mm ; 0,7 x 0,7 mm ; 0,3 x 0,7 mm ; 0,7 x 0,3 mm	
Desain Channel	2 desain (1 & 2)	

Desain Channel

Dalam penelitian ini, ada dua desain saluran yang dibuat dengan mesin laser CO₂. Ini memiliki 2 baris, garis lurus dan garis putus-putus. Lurus menunjukkan garis laser memotong jalan terus, sementara putus-putus baris menunjukkan bahwa laser memotong garis dengan jarak tertentu.

Desain Channel 1

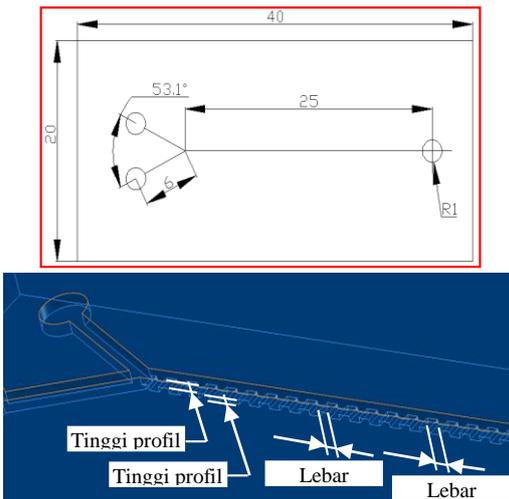
Desain ini menunjukkan proses pemotongan laser dimana dalam proses pemotongan awal didahului oleh garis lurus kemudian dilanjutkan dengan garis putus-putus.

Desain Channel 2

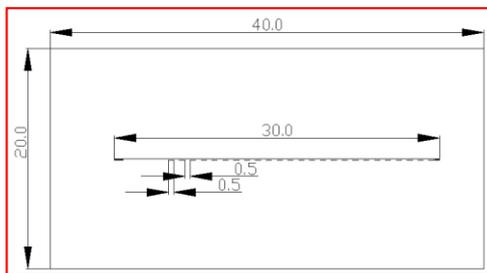
Desain ini menunjukkan proses pemotongan laser dimana dalam proses pemotongan awal didahului oleh garis putus-putus kemudian dilanjutkan dengan garis lurus.

Microstructuring

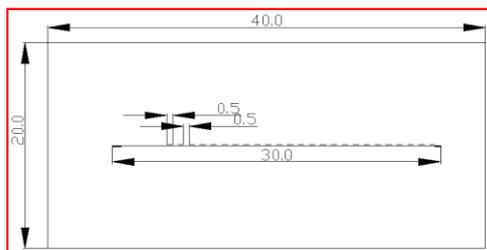
Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk *microstructuring* adalah *laser ablation* dengan jenis laser CO₂ yang ada di laboratorium manufaktur, spesifikasi mesin laser memiliki daya minimum 4,8 Watt dan maksimum 60 Watt, serta pergerakan sumbu x dan y pada *nozzle laser* sedangkan sumbu z pada pengaturan jarak antara nozzle dan benda kerja.



Gambar 4. Desain Channel

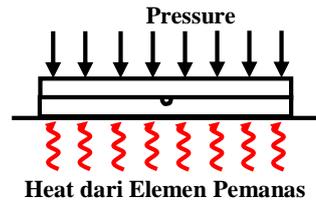


Gambar 5. Desain Channel 1



Gambar 6. Desain Channel 1

Back-end Processing



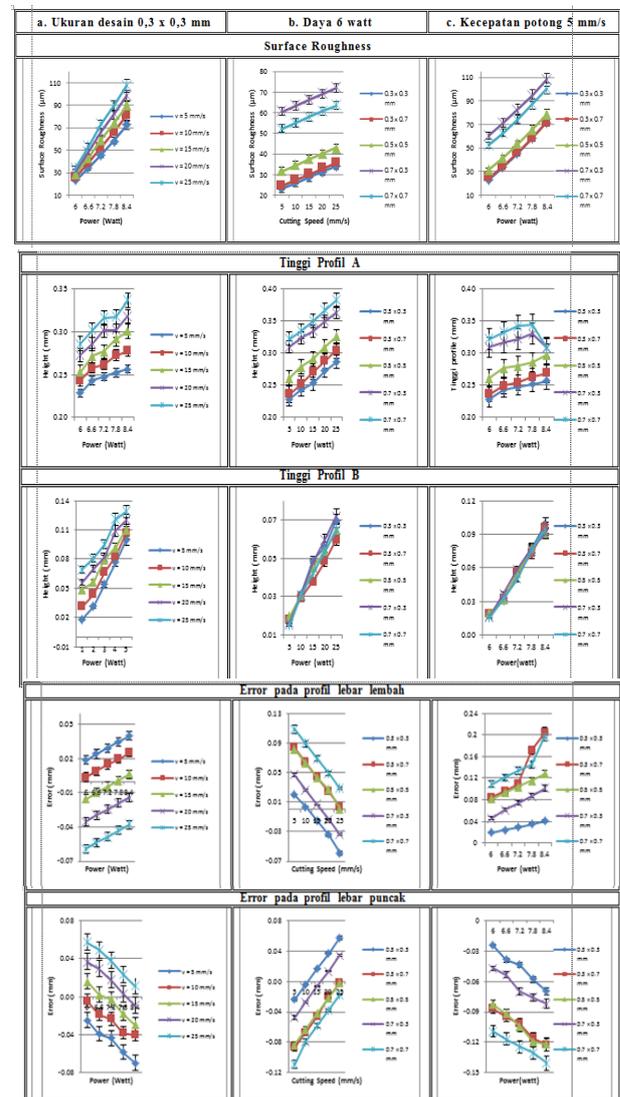
Gambar 7. Proses bonding metode *thermal bonding* [18]

Jarak Fokus Mesin Laser

Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya bahwa penentuan jarak sumbu Z terhadap hasil pemotongan benda menghasilkan jarak 29 mm karena jarak tersebut merupakan jarak fokus mesin laser yang menghasilkan kedalaman pemotongan paling besar dan sebaliknya menghasilkan lebar kawah las yang terkecil.

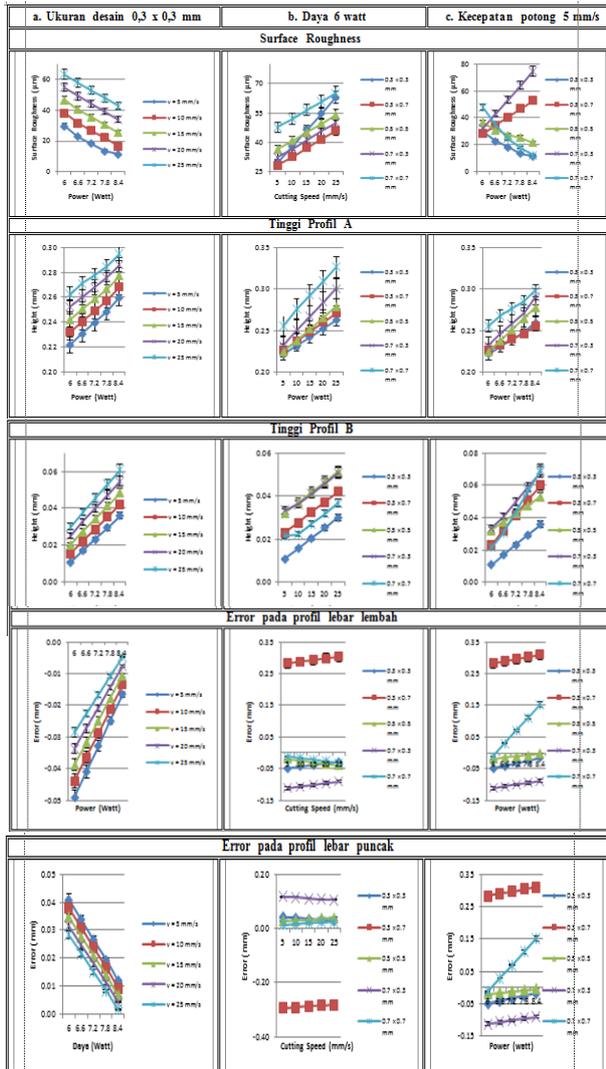
Hasil Pemotongan

Desain Channel 1



Gambar 8. Hasil Pemotongan pada desain channel 1

Desain Channel 2



Gambar 9. Hasil Pemotongan pada desain channel 2

Dalam desain *channel 1*, untuk lebar puncak x lembah 0,3 x 0,3 mm, semakin tinggi daya dan kecepatan laser dari laser cutting, semakin tinggi pula kekasaran permukaan seperti ditunjukkan pada Gambar. 8.a. Sebaliknya, dalam desain *channel 2*, kekasaran permukaan menurun seperti ditunjukkan pada Gambar. 9.a. Dalam daya laser konstan 6 Watt, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan pengelasan, maka kekasaran permukaan juga lebih tinggi untuk kedua desain *channel* masing-masing seperti ditunjukkan pada Gambar. 8.b dan 9.b. Dalam kecepatan potong konstan 5 mm/s, Semakin tinggi daya laser, kekasaran permukaan juga menjadi lebih tinggi. Dalam desain *channel 2*, beberapa kekasaran permukaan menunjukkan beberapa penurunan nilai selama peningkatan dari daya laser.

Hasil ketinggian profil A dan B untuk kedua desain *channel* menunjukkan bahwa semakin tinggi daya laser dan kecepatan potong, maka semakin tinggi pula profil dari A dan B. Dalam desain dari *channel 1*, eror dari profil lebar puncak mengalami penurunan ketika daya laser dan kecepatan potong meningkat, sebaliknya, eror dari profil lebar lembah menurun. Dalam desain *channel 2*, dengan

meningkatnya daya laser dan kecepatan potong, eror dari profil lebar puncak dan lembah cenderung menurun. Sedangkan eror lebar lembah meningkat selama peningkatan daya laser. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa permukaan akhir setelah proses pemotongan memiliki bentuk lengkungan dibandingkan dengan desain saluran yang memiliki bentuk persegi seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 10.

Untuk mengetahui pengaruh desain saluran pada kekasaran permukaan, analisis data menggunakan analisis varians (ANOVA) dilakukan. Tabel 7-12 menunjukkan analisis data efek dari parameter daya laser, kecepatan potong, ukuran puncak dan lembah untuk kekasaran permukaan dalam desain *channel 1*. Dapat disimpulkan bahwa efek dari daya laser, kecepatan potong dan ukuran puncak dan lembah telah mempengaruhi kekasaran permukaan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8, 10 dan 12.

Tabel 7. Data pengaruh ukuran antara parameter daya dan kecepatan pada ukuran desain 0,3x0,3 mm (Desain 1)

Kec. Potong (mm/s)	Daya laser (watt)				
	6	6,6	7,2	7,8	8,4
5	23.225	33.906	45.587	58.268	71.94
10	25.955	38.748	52.429	66.110	80.79
15	28.685	43.590	59.271	73.952	89.63
20	31.415	48.432	66.113	81.794	98.47
25	34.145	53.274	72.955	89.636	107.31

Tabel 8. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 7

Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Kec. Potong	1934,17	4	483,54	32,27	3,01
Daya laser	11592,40	4	2898,1	193,43	3,01
Error	239,72	16	14,98		
total	13766,29	24			

Tabel 9. Data pengaruh ukuran antara parameter kecepatan dan ukuran desain *channel* pada daya 6 watt (Desain 1)

Ukuran (mm)	Kecepatan Potong (mm/s)				
	5	10	15	20	25
0.3 x 0.3	23.225	25.955	28.685	31.415	34.145
0.3 x 0.7	24.562	27.312	30.062	32.812	35.562
0.5 x 0.5	31.647	34.467	37.287	40.107	42.927
0.7 x 0.3	60.665	63.495	66.325	69.155	71.985
0.7 x 0.7	52.342	55.132	57.922	60.712	63.502

Tabel 10. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 9

Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Ukuran	5830,49	4	1457,62	310132,22	3,01
Daya laser	387,53	4	96,88	20613,44	3,01
Error	0,0752	16	0,0047		
total	6218,09	24			

Tabel 11. Data pengaruh ukuran antara parameter ukuran desain *channel* dan daya pada kecepatan 5 mm/s (Desain 1)

Ukuran (mm)	Daya laser (watt)				
	6	6,6	7,2	7,8	8,4
0.3 x 0.3	23.225	33.906	45.587	58.268	71.949
0.3 x 0.7	24.562	34.876	46.190	58.504	71.818
0.5 x 0.5	31.647	41.976	53.304	65.633	78.961
0.7 x 0.3	60.665	71.291	82.917	94.543	108.169
0.7 x 0.7	52.342	62.922	74.503	87.083	100.664

Tabel 12. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 11

Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Ukuran	5798,80	4	1449,70	16226,59	3,01
Daya laser	7151,91	4	1787,97	20012,95	3,01
Error	1,43	16	0,0893		
total	12952,13	24			

Tabel 13. Data pengaruh ukuran antara parameter daya dan kecepatan pada ukuran desain 0,3 x 0,3 mm (Desain 2)

Kec. Potong (mm/s)	Daya laser (watt)				
	6	6,6	7,2	7,8	8,4
5	29.651	22.674	18.084	13.494	11.405
10	37.999	31.491	26.774	22.058	16.589
15	46.347	40.308	35.463	30.618	25.273
20	54.695	49.125	44.152	39.179	33.956
25	63.043	57.942	52.842	47.741	42.640

Tabel 14. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 13

Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Kec. Potong	3596,50	4	899,13	1755,02	3,01
Daya laser	1275,47	4	318,86	622,40	3,01
Error	8,1970	16	0,5123		
total	4880,17	24			

Tabel 15. Data pengaruh ukuran antara parameter kecepatan dan ukuran desain *channel* pada daya 6 watt (Desain 2)

Ukuran (mm)	Kecepatan Potong (mm/s)				
	5	10	15	20	25
0.3 x 0.3	29.651	37.999	46.347	54.695	63.043
0.3 x 0.7	28.429	32.793	37.156	41.519	45.883
0.5 x 0.5	36.459	40.822	45.186	49.549	53.912
0.7 x 0.3	32.520	36.884	41.247	45.611	49.974
0.7 x 0.7	47.628	51.992	56.355	60.718	65.082

Tabel 16. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 15

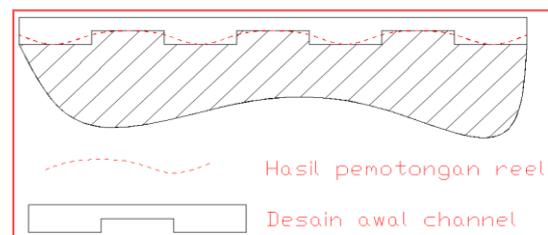
Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Ukuran	1030,32	4	257,58	32,45	3,01
Daya laser	1331,45	4	332,86	41,93	3,01
Error	127,02	16	7,94		
total	2488,79	24			

Tabel 17. Data pengaruh ukuran antara parameter ukuran desain *channel* dan daya pada kecepatan 5 mm/s (Desain 2)

Ukuran (mm)	Daya laser (watt)				
	6	6,6	7,2	7,8	8,4
0.3 x 0.3	29.651	22.674	18.084	13.494	11.405
0.3 x 0.7	28.429	34.544	40.659	46.774	52.889
0.5 x 0.5	36.459	30.706	27.046	25.386	21.725
0.7 x 0.3	32.520	43.051	53.582	64.112	74.643
0.7 x 0.7	47.628	34.981	24.425	17.881	12.315

Tabel 18. Analisis varian ukuran hasil pemotongan sesuai data pada tabel 17

Faktor	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat tengah	F hitung	F tabel
Ukuran	3632,95	4	908,24	5,59	3,01
Daya laser	17,27	4	4,32	0,03	3,01
Error	2600,66	16	162,55		
total	6250,88	24			



Gambar 10. Hasil Perbandingan antara desain *channel* dengan hasil akhir permukaan setelah proses pemotongan



Gambar 11. Hasil pembentukan *channel*

Hasil pengujian mikrofluidik telah dilakukan dengan parameter volume fluida / debit fluida 0,4 cc/mL, waktu pencampuran 928 detik, jarak pencampuran 29 mm, kecepatan pencampuran 0,031 mm/s, warna campuran hijau – merah dan warna hasil pencampuran biru kehitam-hitaman.

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan grafik data hasil uji coba disimpulkan bahwa desain *channel* 1 mempunyai pengaruh pada semua parameter perbandingan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan sedangkan desain *channel* 2 terdapat beberapa parameter yang mempunyai pengaruh

dan beberapa parameter tidak mempunyai pengaruh terhadap *surface roughness* hasil pemotongan.

Hal ini menunjukkan bahwa desain *channel 1* lebih tepat digunakan dibandingkan dengan desain *channel 2* karena hasil *surface roughness channel 1* mempunyai pengaruh pada proses percepatan pencampuran mikrofluidik.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Han Wei Hou, Wong Cheng Lee, Man Chun Leong, Surabhi Sonam, Sri Ram Krishna Vedula, and Chwee Teck Lim, *Microfluidics for Applications in Cell Mechanics and Mechanobiology*, Cellular and Molecular Bioengineering, Vol. 4, No. 4, December 2011 pp. 591-602 DOI: 10.1007/s12195-011-0209-4.
- [2]. Wonjin Jeon, Chee Burm Shin, *Design and simulation of passive mixing in microfluidics systems with geometric variation*, Chemical Engineering Journal 152 (2009) 575-582.
- [3]. Youli Li, Thomas pfohl, Joon Heon Kim, Mario Yasa, Zhiyu Wen, Mahn Won Kim and Cyrus R. Safiya, *selective surface modification in silicon microfluidics channels for micromanipulation of biological macromolecules*, Biomedical Microdevice 3:3, 239-244, 2001.
- [4]. Qiuping Chen • Qiuling Chen • Gabriele Macci0ni Adrian0 Sacco • Luciano Scaltrito • Monica Ferraris • Sergio Ferrero, *Fabrication of large-area microfluidics structures on glass by imprinting and diode-pumped solid state laser writing techniques*, Microsyst Technol (2011) 17:1611-1619 DOI 10.1007/s00542-011-1348-1.
- [5]. Holger Becker & Claudia Gärtner, *Polymer microfabrication technologies for microfluidics systems*, Anal Bioanal Chem (2008) 390:89-111, DOI 10.1007/s00216-007-1692-2.
- [6]. C. Hnatovsky, r.s. taylor, e. Simova, p.p. rajeev, d.m. rayner, v.r. bhardwaj, p.b. corkum, *Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching*, Appl. Phys. A 84, 47-61 (2006), DOI: 10.1007/s00339-006-3590-4.
- [7]. Cheng-Hsien Wu, and Hsien-Chang Kuo, *Parametric study of injection molding and hot embossing in polymer microfabrication*, Journal of Mechanical Science and Technology 21 (2007) 1477-1482.
- [8]. G. Fu • S. B. T0r • D. E. Hardt • N. H. L0h, *Effects of processing parameters on the micro-channels replication in microfluidics devices fabricated by microinjection molding*, Microsyst Technol (2011) 17:1791-1798 DOI 10.1007/s00542-011-1363-2.
- [9]. Y. Xia and G. M. Whitesides, , "soft lithography", Annu. Rev. Mater. Sci.1998, 28, 153-184.
- [10]. Devalckenaere M, Jadin A, Kolev K, Laude LD. *Excimer laser ablation of polycarbonate-based plastic substrates*. Nucl Instrum Methods B 1999;151: 263-7.
- [11]. J.M. Li, C. Liu, L.Y. Zhu, *The formation and elimination of polymer bulges in CO2 laser microfabrication*, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4814-4821.
- [12]. Ario Sunar Baskoro, Herwandi, KGS Ismail, Agus Siswanta, Gandjar Kiswanto, *Analysis of Cutting Process of Materials Using Low Power Laser Diode and CO2*, 118006-3535 IJMME-IJENS © December 2011 IJENS.
- [13]. Nguyen N, Wu Z (2005) Micromixers – a review. J Micromech Microeng 15:R1
- [14]. Chia-Yen Lee, Chin-Lung Chang, Yao-Nan Wang and Lung-Ming Fu, *Microfluidic Mixing: A Review*, International Journal of Molecular Sciences, ISSN 1422-0067.
- [15]. Satish G. Kandlikar, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*.
- [16]. Kaysons, *Physical Properties of Acrylic Sheets*, Akrylik furniture dan accessories.
- [17]. Manual Book Laser Engraving & Cutting Control System DSP5.3 V1.6, May 2010.
- [18]. Xuelin Zhu Æ Gang Liu Æ Yuhua Guo, Yangchao Tian, *Study of PMMA thermal bonding*, Microsyst Technol (2007) 13: 403-407 DOI 10.1007/s00542-006-0224-x.