

## Analisis Fabrikasi Desain *Lamination Passive Mixing Microchannel* Perangkat Mikrofluidik Acrylic Menggunakan Laser CO<sub>2</sub> Daya Rendah

Badruzzaman<sup>1</sup>, Ario Sunar Baskoro<sup>2</sup>, A. Rizal Siswantoro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Indramayu

Jln. Raya Lohbener Lama No. 8 Lohbener Indramayu Jawa Barat 45252

Email : [bagus\\_200409@yahoo.com](mailto:bagus_200409@yahoo.com)

<sup>2,3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia

### Abstract

*Microfluidics device has been applied in the biomedical fields to manipulate fluids in a channel network with the dimensions between 5-500  $\mu\text{m}$ . Microfluidics device is manufactured by microfabrication process consists of design, microstructuring and back-end process. One of microfluidics application is passive mixing microchannel. In this device, the fluids will flow through the channel without any moving part and pressure from outside to produce mixing fluid. It is important to design the form of channel to produce a good lamination passive mixing microchannel. In this study, the process of channel design was performed. Low power CO<sub>2</sub> laser was used for microstructuring process as a cutting tool to produce microfluidic device on acrylic material. The parameters affect the output of the cutting process are the laser power, cutting speed and the design of channel. Surface roughness of designed channel was observed. Finally, back-end process was performed by joining process using thermal bonding method. From the experimental results, the design of lamination channel has an influence on all parameters to the surface roughness.*

**Keyword :** *Microfabrication, microfluidics, lamination passive mixing microchannel, CO<sub>2</sub> laser, acrylic material*

### Abstrak

*Perangkat mikrofluida telah diterapkan di bidang biomedis untuk memanipulasi cairan dalam jaringan saluran dengan dimensi antara 5-500  $\mu\text{m}$ . 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 yang menghasilkan pencampuran pasif lurus microchannel. Dalam penelitian ini, proses desain saluran dilakukan. Laser CO<sub>2</sub> daya rendah adalah digunakan untuk proses microstructuring sebagai alat pemotong untuk menghasilkan perangkat mikrofluida pada bahan acyilic. Parameter yang mempengaruhi output dari proses pemotongan adalah kekuatan laser, kecepatan potong dan desain channel. Kekasaran permukaan saluran yang dirancang akan diamati. Akhirnya, back-end proses dilakukan oleh proses penggabungan dengan metode ikatan termal. Dari hasil percobaan, desain saluran lamination channel memiliki pengaruh pada semua parameter untuk kekasaran permukaan.*

**Kata kunci :** *Mikrofabrikasi, mikrofluida, lamination passive mixing microchannel, laser CO<sub>2</sub>, material acrylic*

## 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 CuSO<sub>4</sub>[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

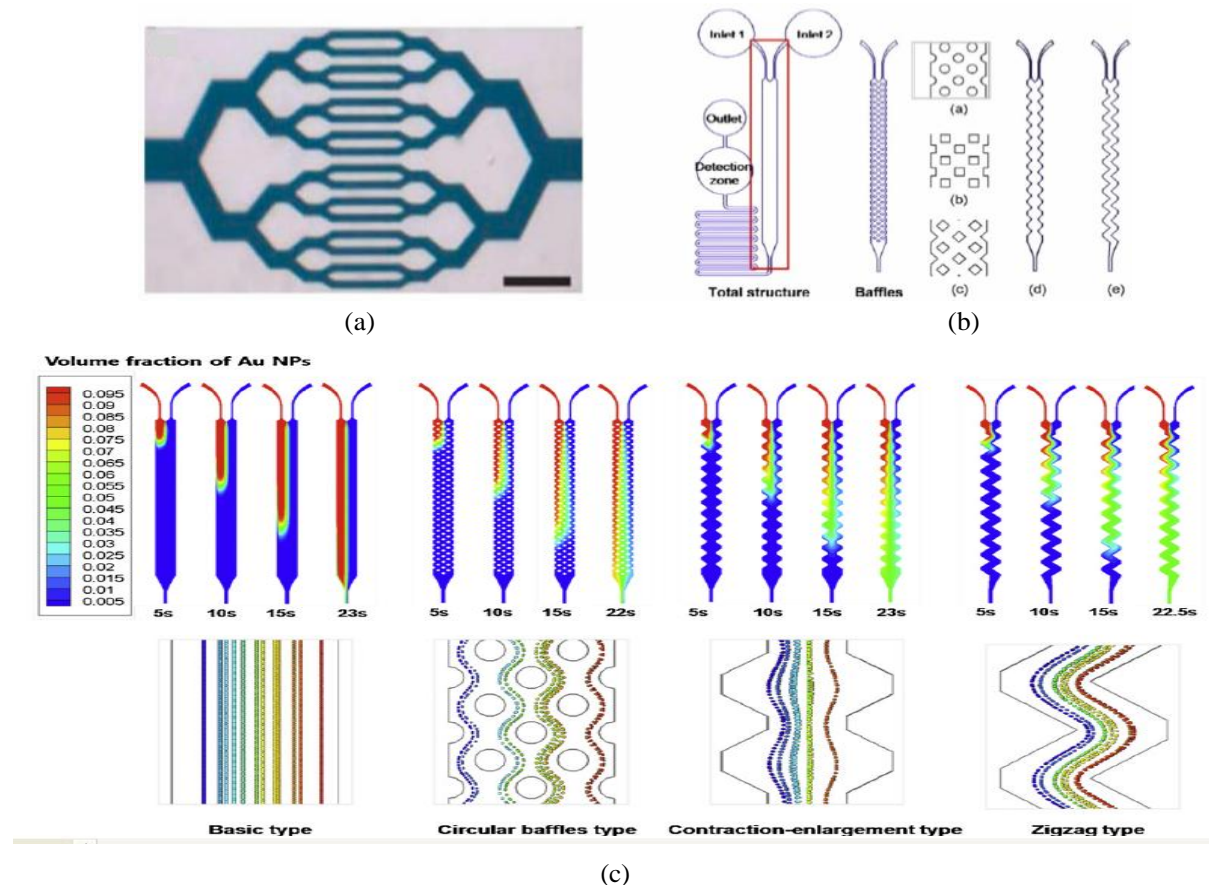
material silicon dan glass adalah *etching* [6], dan *photolithography*. Sedangkan untuk material polymer teknik pembentukan yang dapat digunakan adalah *hot embossing* [7], *injection molding* [8], *soft lithography* [9] dan *laser ablation* [10]. Hal ini yang menjadi dasar pemilihan material PMMA atau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

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 CO<sub>2</sub>[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 CO<sub>2</sub> untuk aplikasi *biomedical* dengan pengamatan hasil pemotongan laser CO<sub>2</sub> pada material gypsum [12].



Gambar 1 *Channel* menyerupai pembuluh kapiler (a) [1] *channel* untuk analisis aliran Au NPs dan CuSO<sub>4</sub> (b) dan (c) [2]

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].

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

	Silicon	Glass	Technical thermoplastics (e.g. PMMA, PC, PEEK)	Thermoset polymers	Elastomers
<b>Microfabrication</b>	Easy-medium	Easy-medium	Easy	Medium	Easy
<b>Structuring processes</b>	Wet and dry etching	Wet etching, photostructuring	Injection molding, hot embossing, thermoforming, laser ablation	Casting, lithography, etching	Casting
<b>Possible geometries</b>	Limited, 2D	Limited, 2D	Many, 2D, 3D	Mostly 2D, 3D possible	Mostly 2D, 3D possible
<b>Assembly</b>	Easy	Medium	Easy	Medium	Easy
<b>Interconnections</b>	Difficult	Difficult	Easy	Easy	Easy-medium
<b>Mechanical stability</b>	High	High	Low-medium	High	Very low
<b>Temperature stability</b>	High	High	Low-medium	Medium	Low
<b>Acid stability</b>	High	High	High	High	High
<b>Alkaline stability</b>	Limited	High	High	High	High
<b>Organic solvent stability</b>	High	Medium-high	Low-medium	Medium-high	Low
<b>Optical transparency</b>	No	High	Mostly high	Partly	High
<b>Material price</b>	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 ( $\mu\text{m}$ )	Mixing Index
Lamination	Wedge shaped inlets	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	Creeping structure	-	-	0.015
	Stacked shim structure	-	-	-
	Multiple splitting, stretching and recombining flows	-	-	-
	Unbalanced driving force	-	815 $\psi$	0.91
Embedded barriers	SMX	-	-	-
	Multidirectional vortices	-	4255	0.72
Twisted channels	Split-and-recombine	730	96,000	~1
Surface-chemistry	Obstacle shape	-	1000	0.98
	T-Y-mixer	-	1000	0.95

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.

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

**Bahan dan Proses Pemotongan**

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

*Channel* yang akan dibentuk menggunakan material *acrylic* dimana bahan ini akan menjadi elastic bila dikenai suhu  $60^\circ\text{C}$ . *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 3. Skema klasifikasi dimensi *channel* [15]

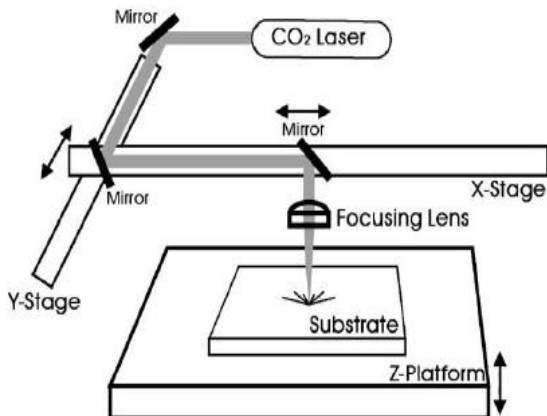
<i>Conventional channels</i>	$> 3\text{mm}$
<i>Minichannels</i>	$3\text{mm} \geq D > 200\mu\text{m}$
<i>Microchannels</i>	$200\mu\text{m} \geq D > 10\mu\text{m}$
<i>Transitional microchannels</i>	$10\mu\text{m} \geq D > 1\mu\text{m}$
<i>Transitional nanochannels</i>	$1\mu\text{m} \geq D > 0.1\mu\text{m}$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

*D* : smallest channel dimension

Tabel 4. *Properties acrylic*[16]

<i>Mechanical Properties</i>			<i>Physical Properties</i>		
<i>Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>	<i>Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
<i>Young Modulus</i>	3.2	Gpa	<i>Thermal expansion</i>	48-80	$e-6/^\circ\text{C}$
<i>Tensile strength</i>	35-62	Mpa	<i>Thermal conductivity</i>	0.000729	$\text{W/m}^\circ\text{K}$
<i>Elongation</i>	5-7,2	%	<i>Specific heat</i>	5.344	$\text{J/kg}^\circ\text{K}$
<i>Compressive strength</i>	28-97	Mpa	<i>Melting temperature</i>	1103.15	$^\circ\text{K}$
<i>Yield strength</i>	48-97	Mpa	<i>Density</i>	1190	$\text{Kg/m}^3$

Proses pemotongan ini menggunakan mesin laser CO<sub>2</sub> dimana mesin ini mempunyai spesifikasi sesuai tabel 5.



Gambar 2. Konsep proses pemotongan mesin laser CO<sub>2</sub>[17]

Tabel 5. Spesifikasi mesin laser CO<sub>2</sub> [17]

Daya	0 ~ 100 % (maks. 60 Watt)
Wavelength	10.6 $\mu\text{m}$
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

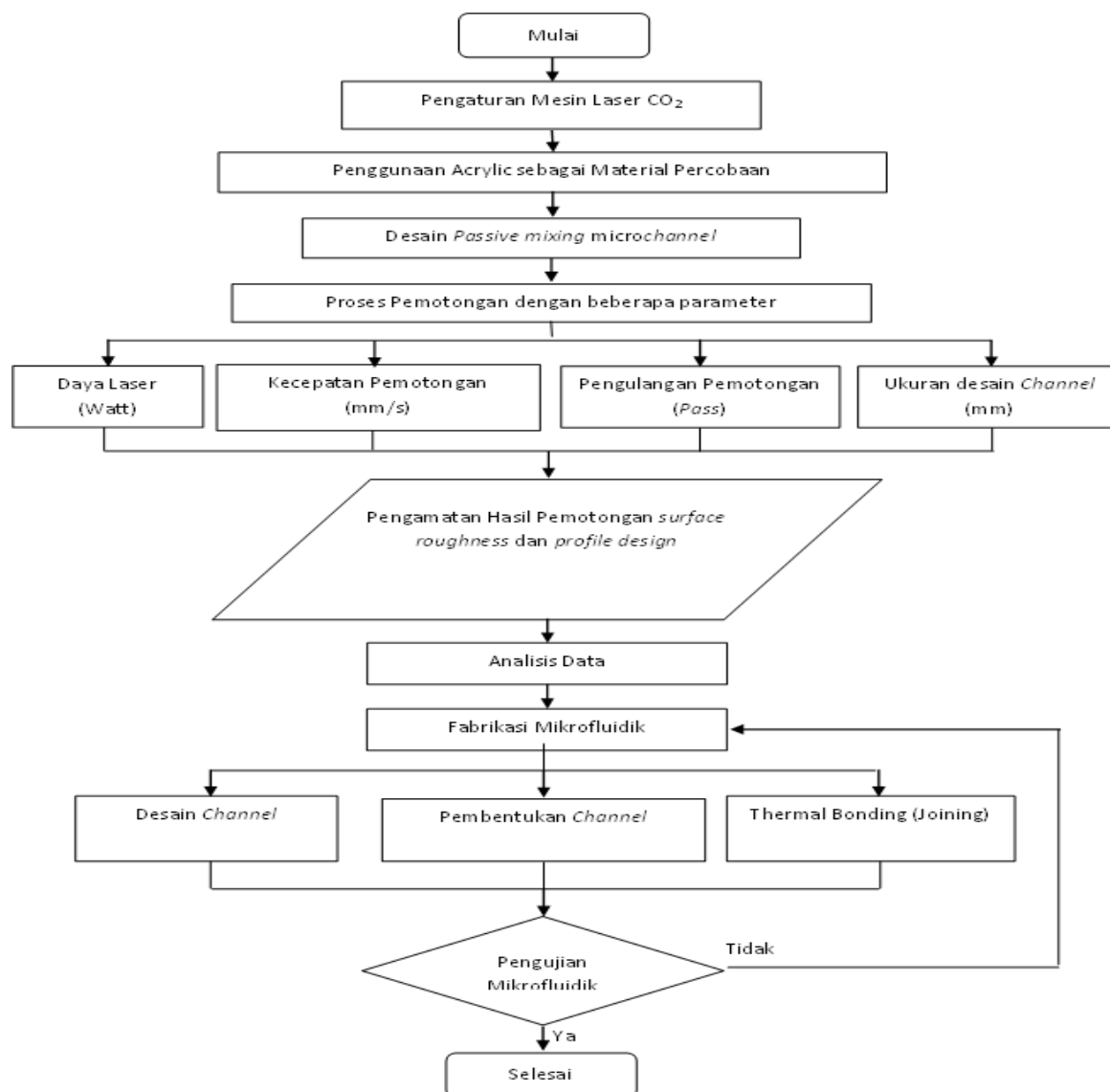
Tabel 6. Parameter Penelitian

<b>Parameter</b>	<b>Uraian</b>	<b>Satuan</b>
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	Y-Channel dan Lamination	

## METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mencari solusi dan memecahkan masalah

yang timbul dalam proses pengambilan data, adapun tahapan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram alur metode penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

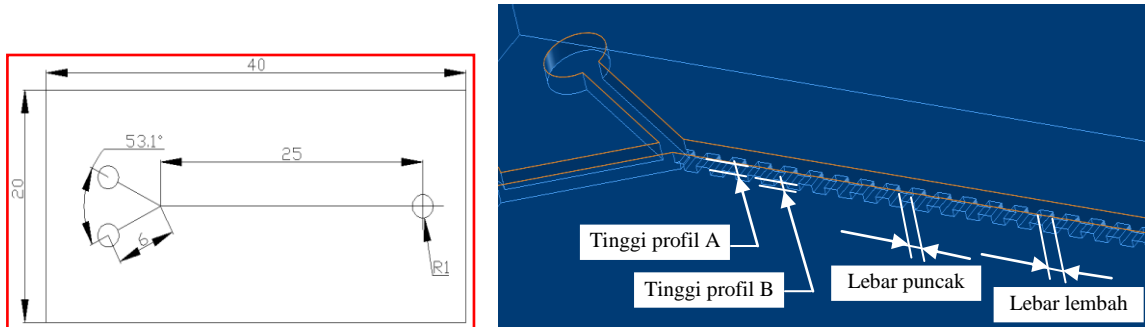
### Desain Channel

Dalam penelitian ini, desain saluran yang dibuat dengan mesin laser CO<sub>2</sub> yang 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 Y-Channel dan Lamination ini menunjukkan proses pemotongan laser dimana dalam proses pemotongan awal

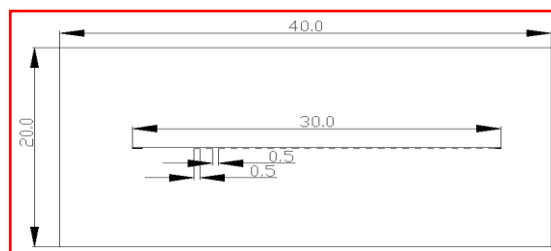
didahului oleh garis lurus kemudian dilanjutkan dengan garis putus-putus.

### Microstructuring

Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk *microstructuring* adalah *laser ablation* dengan jenis laser CO<sub>2</sub> 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.

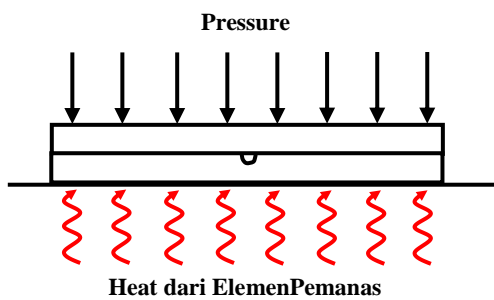


Gambar 4. Desain Channel



Gambar 5. Desain Channel Y-Channel dan Lamination

**Back-end Processing**



Gambar 6. Proses bonding metode *thermal bonding* [18]

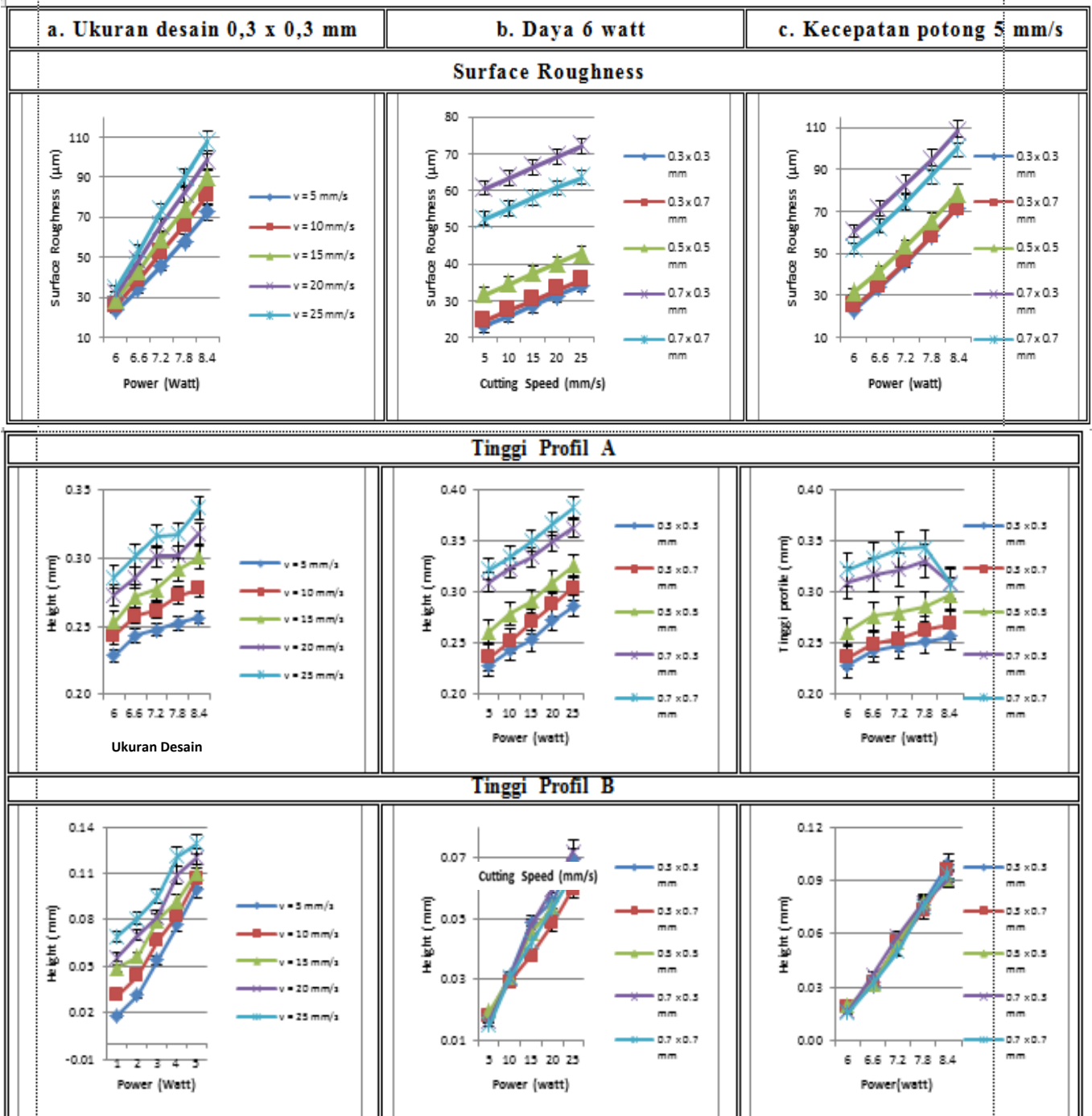
**Jarak Fokus Mesin Laser**

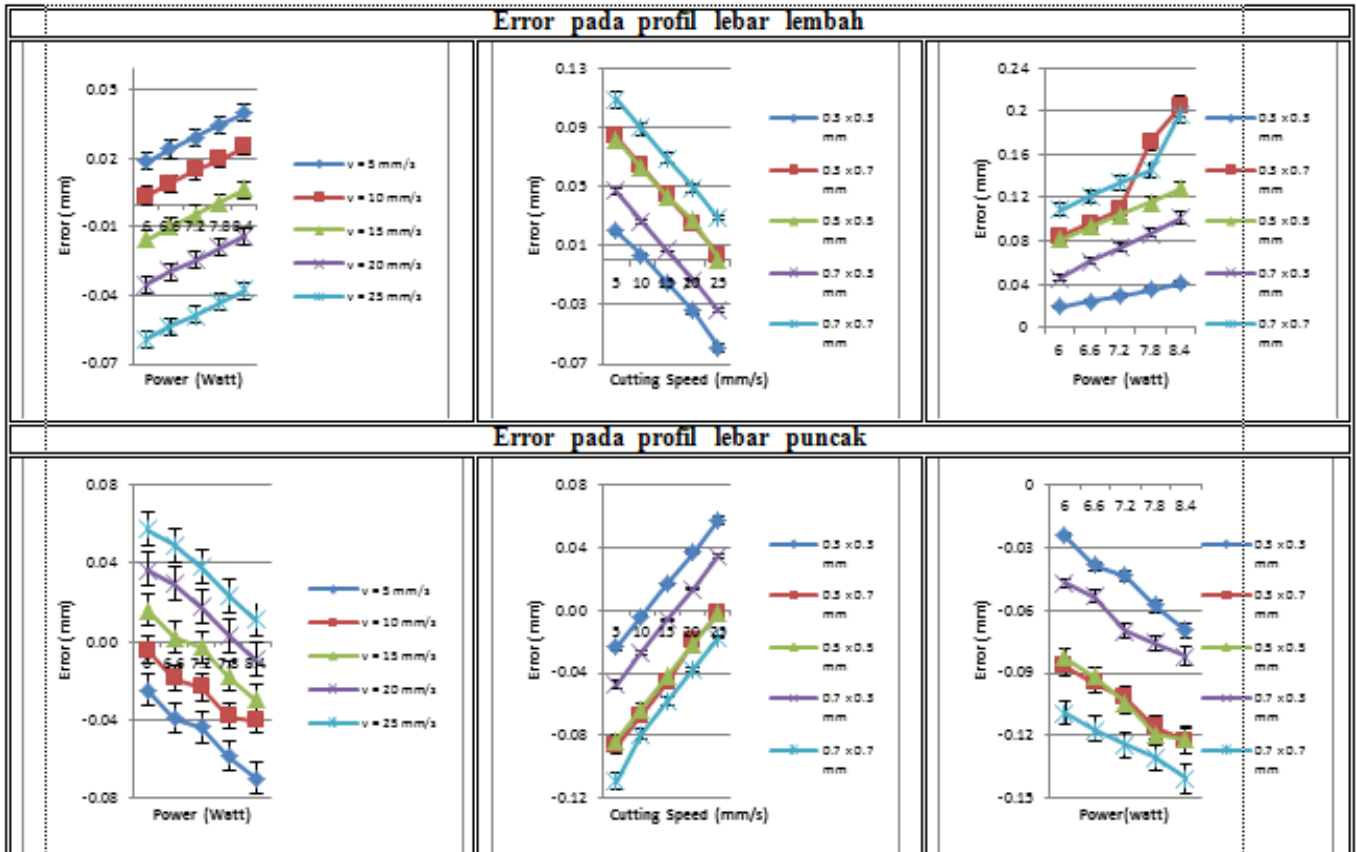
Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya bahwa penentuan jarak sumbu Z terhadap hasil pemotongan benda menghasilkan jarak 29 mm karena

jarak tersebut merupakan jarak fokus mesin laser yang menghasilkan kedalaman pemotongan paling besar dan sebaliknya menghasilkan lebar kawah las yang terkecil.

**Hasil Pemotongan**

Berdasarkan grafik di atas, dapat diketahui bahwa pada desain *channel* yang beda ukuran, semakin semakin besar daya laser maka akan semakin besar pula nilai *surface roughness* atau kekasarannya. Pada desain *channel* yang sama ukuran, semakin semakin besar daya laser maka akan semakin kecil nilai *surface roughness* atau kekasarannya.





Gambar 7. Hasil Pemotongan pada desain channel

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

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	Fhitung	Ftabel
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			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, F hitung kolom (parameter daya) lebih besar dari F tabel dan F hitung baris (parameter kecepatan) lebih besar dari F tabel dimana dapat disimpulkan bahwa

untuk parameter daya laser dan kecepatan pemotongan sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan.



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

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			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, F hitung kolom (parameter kecepatan) lebih besar dari F tabel dan F hitung baris (parameter ukuran desain *channel*) lebih besar dari F tabel dapat

disimpulkan bahwa untuk parameter kecepatan laser dan ukuran desain *channel* sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan.

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

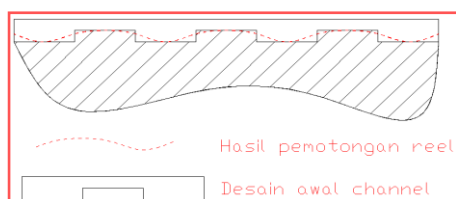
Ukuran (mm)	Daya laser (watt)				
	6	6,6	7,2	7,8	8,4
0.3 x 0.3	23.225	33.906	45.587	58.268	71.949
0.3 x 0.7	24.562	34.876	46.190	58.504	71.818
0.5 x 0.5	31.647	41.976	53.304	65.633	78.961
0.7 x 0.3	60.665	71.291	82.917	94.543	108.169
0.7 x 0.7	52.342	62.922	74.503	87.083	100.664

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			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, F hitung kolom (parameter ukuran desain *channel*) lebih besar dari F tabel dan F hitung baris (parameter daya) lebih besar dari F tabel dapat disimpulkan bahwa untuk parameter ukuran desain *channel* dan daya sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan.

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.



Gambar 8. Hasil Perbandingan antara desain *channel* dengan hasil akhir permukaan setelah proses pemotongan



Gambar 9. Hasil pembentukan *channel*

## KESIMPULAN

Berdasarkan grafik data hasil uji coba disimpulkan bahwa desain *Y-Channel* dan *Lamination* mempunyai pengaruh pada semua parameter pembandingan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan. Hal ini menunjukkan bahwa desain *channel-Y-Channel* dan *Lamination* tepat digunakan karena setiap parameter yang ada mempunyai pengaruh terhadap *surface roughness*.

Hasil analisis secara eksperimen menunjukkan bahwa parameter-parameter yang ditentukan dalam penelitian ini mempunyai pengaruh yang besar terhadap hasil pencampuran mikrofluidik dari desain *channel* yang baru.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Han Wei Hou, Wong Cheng Lee, Man Chun Leong, Surabhi Sonam, SriRam 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 microfluidic systems with geometric variation*, Chemical Engineering Journal 152 (2009) 575-582.
- [3]. Youli Li, Thomas pfohl, Joon Heon Kim, Mario Yasa, Zhiyu Wen, MahnWon Kim and Cyrus R. Safiya, *selective surface modification in silicon microfluidic channels for micromanipulation of biological macromolecules*, Biomedical Microdevice 3:3, 239-244, 2001.
- [4]. Qiuping Chen • Qiuling Chen • Gabriele Maccioni Adriano Sacco • Luciano Scaltrito • Monica Ferraris • Sergio Ferrero, *Fabrication of large-area microfluidic structures on glass by imprinting and diode-pumped solidstate 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 microfluidic 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. A84, 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. Tör • D. E. Hardt • N. H. Löh, *“Effects of processing parameters on the micro-channels replication in microfluidic 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>*, 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 DSP5.3V1.6, May 2010.
- [18]. Xuelin Zhu & Gang Liu & Yuhua Guo, Yangchao Tian, *Study of PMMA thermal bonding*, Microsyst Technol (2007) 13: 403-407 DOI 10.1007/s00542-006-0224-x.