

**OPTIMASI MIKROMIXER BERBASIS RINTANGAN KOCH *SNOWFLAKES*  
*FRACTAL* UNTUK APLIKASI *LAB ON CHIP***

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagian syarat dalam memperoleh gelar  
Sarjana Sains Program Studi Fisika



oleh

Devi Fitria Nurvadila

NIM 1701330

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA**

**FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

**BANDUNG**

**2021**

Devi Fitria Nurvadila, 2021

*OPTIMASI MIKROMIXER BERBASIS RINTANGAN KOCH SNOWFLAKES FRACTAL UNTUK APLIKASI LAB ON CHIP*

Universitas Pendidikan Indonesia | [repository.upi.edu](https://repository.upi.edu) | [perpustakaan.upi.edu](https://perpustakaan.upi.edu)

DEVI FITRIA NURVADILA  
OPTIMASI MIKROMIXER BERBASIS RINTANGAN KOCH *SNOWFLAKE*  
*FRACTAL* UNTUK APLIKASI *LAB ON CHIP*

disetujui dan disahkan oleh;

Pembimbing I



Dr. Lilik Hasanah, M.Si.  
NIP 1977061620011222002

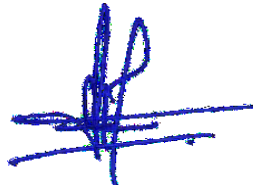
Pembimbing II



Dr. Ahmad Aminudin, M.Si.  
NIP 197211122008121001

Mengetahui

Ketua Program Studi Fisika,



Dr. Endi Suhendi, M.Si  
NIP. 197905012003121001

## ABSTRAK

Perkembangan sistem mikromixer telah menarik minat khusus sejalan dengan perkembangan perangkat *Lab on Chip* (LoC) dengan upaya miniaturisasi dan portable. Penelitian ini bertujuan: 1) Mengetahui pengaruh struktur rintangan Koch *snowflakes fractal* terhadap efisiensi pencampuran, 2) Mengetahui pengaruh struktur saluran masuk T-*vortex* terhadap efisiensi pencampuran, dan 3) Mengetahui pengaruh bilangan Reynolds (0,05-100) terhadap efisiensi pencampuran. Penelitian ini menggunakan metode simulasi pada perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* 4.6. Desain yang digunakan dalam simulasi ini terdiri dari empat struktur yang berbeda yaitu pada struktur rintangan *Secondary Snowflakes Fractal* (SSF), *Tertiary Snowflakes Fractal* (TSF), *Rounding Secondary Snowflakes Fractal* (RSSF), dan *Rounding Tertiary Snowflakes Fractal* (RTSF). Masing-masing struktur diuji berdasarkan sudut rintangan yaitu 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, dan 345°, serta kedalaman rintangannya yaitu dari rentang 0,01-0,19 mm. Kemudian struktur SSF, TSF, RSSF, dan RTSF dikombinasikan dengan struktur saluran masuk T-*vortex* untuk lebih meningkatkan efisiensi pencampurannya. Struktur geometri tersebut memiliki panjang, lebar dan tinggi 5 mm x 0,3 mm x 0,2 mm. penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan struktur mikromixer berbasis rintangan dalam aplikasi LoC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikromixer dengan struktur rintangan *Tertiary Snowflakes Fractal* (TSF) pada sudut 30° dan kedalaman 0,17 mm, serta saluran utama T-*vortex* menghasilkan performa yang lebih baik yaitu sebesar >98% pada Re rendah (0,05-100). Hasil tersebut dapat diasumsikan bahwa cairan telah tercampur secara homogen. Dengan tercapainya parameter dimensi panjang saluran <5,3 mm dan mendapatkan efisiensi pencampuran >80% yang beroperasi pada Re rendah, maka desain mikromixer ini sesuai dengan konsep divais dalam sistem LoC yang dapat diaplikasikan pada bidang analisis kimia.

**Kata kunci:** Mikromixer, Koch *fractal*, Efisiensi Pencampuran, Bilangan Reynolds

## **ABSTRACT**

*The development of micromixer systems has attracted special interest, in line the development of Lab on Chip (LoC) devices with efforts to miniaturization and portable. This study aims to: 1) determine the effect of the Koch snowflakes fractal barrier structure on the mixing efficiency, 2) determine the effect of T-vortex inlet structure on mixing efficiency, and 3) determine the effect of Reynolds number (0.05-100) on mixing efficiency. This study used the simulation method on the COMSOL Multiphysics 4.6 software. The design used in this simulation consists of four different structures, namely Secondary Snowflakes Fractal (SSF), Tertiary Snowflakes Fractal (TSF), Rounding Secondary Snowflakes Fractal (RSSF), dan Rounding Tertiary Snowflakes Fractal (RTSF). Each structure was tested based on the angle of obstruction, namely 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, and 345°, and the depth of the obstacle is from 0.01-0.19 mm. Then the SSF, TSF, RSSF, and RTSF structures are combined with the T-vortex inlet structure to further improve their mixing efficiency. The geometry structure has a length, width and height of 5 mm x 0.3 mm x 0.2 mm. This research was conducted to optimize the barrier-based micromixer structure in LoC applications. The results showed that the micromixer with the obstacle structure Tertiary Snowflakes Fractal (TSF) at an angle of 30° and a depth of 0.17 mm, as well as a T-vortex main channel produced better performance of >98% at low Re (0.05- 100). These results can be assumed that the liquid has been mixed homogeneously. With the achievement of the channel length dimension parameter is <5.3 mm and mixing efficiency >80% operating at low Re, the design of this micromixer is following the concept of devices in the LoC system that can be applied to the field of chemical analysis.*

**Keywords:** *Micromixer, Koch fractal, Mixing efficiency, Reynolds Number*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
KATA PENGANTAR .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
UCAPAN TERIMAKASIH.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1 Latar Belakang .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2 Rumusan Masalah Penelitian .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3 Tujuan Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4 Manfaat Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.5 Struktur Organisasi Skripsi .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB II KAJIAN PUSTAKA .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1 Mekanika Fluida.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1.1 Rapat Massa ( <i>Density</i> ) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1.2 Kekentalan (Viskositas) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1.3 Bilangan Reynolds (Re).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2 Klasifikasi aliran fluida .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2.1 Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>Non-Newtonian</i>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2.2 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Inviscid flows</i> ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

2.2.3	Aliran <i>Compressible</i> dan <i>incompressible</i>	Error! Bookmark not defined.
2.2.4	Aliran laminar dan aliran turbulen	Error! Bookmark not defined.
2.3	Persamaan Dasar Aliran Fluida	Error! Bookmark not defined.
2.3.1	Hukum Bernouli	Error! Bookmark not defined.
2.3.2	Persamaan Kekentalan Massa	Error! Bookmark not defined.
	Di mana $div(\rho u)$ mendeskripsikan neto aliran massa yang keluar dari elemen fluida.	Error! Bookmark not defined.
2.3.3	Persamaan Kekentalan Momentum Tiga Dimensi	Error! Bookmark not defined.
2.3.4	Persamaan Kekentalan Energi Tiga Dimensi	Error! Bookmark not defined.
2.3.5	Persamaan Navier Stokes	Error! Bookmark not defined.
2.3.6	Hidrolik Diameter	Error! Bookmark not defined.
2.3.7	Efisiensi Pencampuran	Error! Bookmark not defined.
2.4	Simulasi COMSOL Multiphysics	Error! Bookmark not defined.
2.4.1	<i>Laminar Flow</i> (spf)	Error! Bookmark not defined.
2.4.2	<i>Transport of Diluted Species</i> (tds)	Error! Bookmark not defined.
2.5	<i>Lab on Chip</i> (LoC)	Error! Bookmark not defined.
2.5.1	Aplikasi LoC pada Kimia Analisis	Error! Bookmark not defined.
2.5.2	Mikromixer Fluida	Error! Bookmark not defined.
2.6	Perkembangan Mikromixer Pasif	Error! Bookmark not defined.
2.6.1	Struktur T-vortex	Error! Bookmark not defined.
2.6.2	Pola Berbasis Rintangan	Error! Bookmark not defined.
2.6.3	Struktur Penyekat Koch <i>Fractal</i>	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODE PENELITIAN		Error! Bookmark not defined.9

3.1	Alur Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	9
3.2	Desain Mikromixer Fluida Berbasis Struktur Rintangan Koch <i>Fractal</i> <b>Error! Bookmark not defined.</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	1
3.3	Tahapan Simulasi .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	5
3.4	Metode Numerik.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	7
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>	9
4.1	Pengaruh Struktur Rintangan Koch <i>Snowflakes Fractal</i> Terhadap Efisiensi Pencampuran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	9
4.1.1	Hasil Pengaruh Struktur SSF Terhadap Efisiensi Pencampuran <b>Error! Bookmark not defined.</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	9
4.1.2	Hasil Pengaruh Struktur TSF Terhadap Efisiensi Pencampuran <b>Error! Bookmark not defined.</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	3
4.1.3	Hasil Pengaruh Struktur RSSF Terhadap Efisiensi Pencampuran <b>Error! Bookmark not defined.</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	7
4.1.4	Hasil Pengaruh Struktur RTSF Terhadap Efisiensi Pencampuran <b>Error! Bookmark not defined.</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	1
4.2	Pengaruh Hubungan Saluran <i>T-vortex</i> Pada Rintangan Koch <i>Snowflake Fractal</i> Terhadap Efisiensi Pencampuran.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	5
4.3	Pengaruh Operasi Bilangan Reynolds ( $Re$ ) Terhadap Efisiensi Pencampuran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>	5
5.1	Kesimpulan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	5
5.2	Saran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	5
DAFTAR PUSTAKA .....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>	6
LAMPIRAN.....			85

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perhitungan diameter hidrolis untuk berbagai geometri	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 2.2 Perkembangan terkini mikromixer pasif pola berbasis rintangan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 2.3 Hasil Optimasi struktur penyekat Koch <i>Fractal</i>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 3.1 Parameter studi berdasarkan struktur mikromixer yang digunakan .....	42
Tabel 3.2 Sifat cairan yang digunakan .....	46
Tabel 4.1 Pengaruh kedalaman rintangan terhadap efisiensi pencampuran .....	52
Tabel 4.2 Tabel pengaruh kedalaman rintangan terhadap efisiensi pencampuran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 6
Tabel 4.3 Tabel pengaruh kedalaman rintangan terhadap efisiensi pencampuran.....	60
Tabel 4.4 Pengaruh kedalaman rintangan terhadap efisiensi pencampuran .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 4
Tabel 4.5 Hasil efisiensi pencampuran pada struktur saluran T- <i>vortex</i> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4.6 Perbandingan efisiensi pencampuran pada saluran T dan T- <i>vortex</i> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4.7 Data kecepatan aliran berdasarkan nilai Re	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4.8 Kecepatan rata-rata pada struktur rintangan SSF, TSF, RSSF, dan RTSF .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4.9 Kecepatan rata-rata pada struktur rintangan SSF, TSF, RSSF, dan RTSF dengan Re 5, 10, 50, dan 100 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4.10 Penurunan tekanan pada struktur SSF, TSF, RSSF, dan RTSF pada Re yang Diuji .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



Tabel 4.11 Perbandingan hasil pada literatur dan penelitian ..... 74

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 aliran laminar..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.2 aliran turbulen ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.3 Skema satu elemen fluida..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.4 Skema aliran massa yang keluar dan masuk pada satu elemen fluida  
..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.5 Skema komponen tegangan pada setiap permukaan dari satu elemen fluida  
..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.6 komponen tegangan pada arah x ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.7 komponen dari vektor *heat flux*..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.8 Tampilan Perangkat Lunak COMSOL Multiphysics**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.8 Skematik Divais pada LoC (Castillo-leon, 2015)**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.10 Skematik struktur T sederhana dan T-*vortex***Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.11 skematik struktur yang dikombinasikan dengan serpentine.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.1 Tahapan simulasi desain mixromixer fluida berbasis penyekat Koch *fractal* pada saluran T-*vortex* ..... **Error! Bookmark not defined.9**

Gambar 3.2 struktur geometri rintangan (a) *Secondary Snowflakes Fractal* (SSF), dan (b) *Tertiary Snowflakes Fractal* (TSF). ..... **Error! Bookmark not defined.3**

Gambar 3.3 truktur rintangan (a) *Rounding Secondary Snowflakes Fractal* (RSSF) (b) *Rounding Tertiary Snowflakes Fractal* (RTSF)..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.4 Struktur geometri dengan saluran T-*vortex***Error! Bookmark not defined.5**

Gambar 3.5 Diagram alur tahapan simulasi *COMSOL Multiphysics***Error! Bookmark not defined.6**

Gambar 4.1 Efisiensi pencampuran pada struktur rintangan SSF dengan sudut 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, dan 345° pada Re 1..... **Error! Bookmark not defined.9**

Gambar 4.2 Konsentrasi distribusi pada struktur rintangan SSF Re 1, dengan sudut rintangan (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 315°, (e) 330°, (f) 345° ..... 50

Gambar 4.3 Efisiensi pencampuran pada struktur rintangan TSF dengan sudut 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, dan 345° pada Re 1..... **Error! Bookmark not defined.3**

Gambar 4.4 Konsentrasi distribusi pada struktur rintangan TSF Re 1, dengan sudut rintangan (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 315°, (e) 330°, (f) 345°**Error! Bookmark not defined.4**

Gambar 4.5 Efisiensi pencampuran pada struktur rintangan RSSF dengan sudut 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, dan 345° pada Re 1..... **Error! Bookmark not defined.7**

Gambar 4.6 Konsentrasi distribusi pada struktur rintangan RSSF Re 1, dengan sudut rintangan (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 315°, (e) 330°, (f) 345°**Error! Bookmark not defined.8**

Gambar 4.7 Efisiensi pencampuran pada struktur rintangan RTSF dengan sudut 15°, 30°, 45°, 315°, 330°, dan 345° pada Re 1..... **Error! Bookmark not defined.1**

Gambar 4.8 Konsentrasi distribusi pada struktur rintangan RTSF Re 1, dengan sudut rintangan (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 315°, (e) 330°, (f) 345° **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.9 Pengaruh bilangan Re terhadap efisiensi pencampuran pada Re 0,1; 1; 10; dan 100 ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.10 Pengaruh bilangan Re terhadap efisiensi pencampuran pada Re 0,05; 0,5; 5; dan 50 ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.11 Pengaruh bilangan Re terhadap efisiensi pencampuran pada Re 0,05-100 ..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.12 kecepatan pada saluran keluar struktur rintangan TSF dengan Re 0,05. .... **Error! Bookmark not defined.**

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan SSF, dengan Re 1 ..... **Error! Bookmark not defined.**5

Lampiran 2. Contoh perhitungan dari data konsentrasi untuk mendapatkan efisiensi pencampuran ..... **Error! Bookmark not defined.**5

Lampiran 3. Data Hasil Perhitungan Efisiensi Pencampuran Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan SSF, dengan Re 1 ..... **Error! Bookmark not defined.**8

Lampiran 4. Data Hasil Perhitungan Konsentrasi Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan TSF, dengan Re 1 ..... **Error! Bookmark not defined.**8

Lampiran 5. Data Hasil Perhitungan Efisiensi Pencampuran Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan TSF, dengan Re 1 .....	89
Lampiran 6. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan RSSF, dengan Re 1 .....	89
Lampiran 7. Data Hasil Perhitungan Efisiensi Pencampuran Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan RSSF, dengan Re 1 .....	90
Lampiran 8. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Sudut pada Struktur Rintangan RSSF, dengan Re 1 .....	<b>Error! Bookmark not defined.0</b>
Lampiran 9. Data Hasil Perhitungan Efisiensi Pencampuran pada Struktur Rintangan RTSF .....	<b>Error! Bookmark not defined.1</b>
Lampiran 10. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Kedalaman Rintangan SSF, dengan Re 1 Sudut 30° .....	<b>Error! Bookmark not defined.2</b>
Lampiran 11. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Kedalaman Rintangan TSF, dengan Re 1 Sudut 30° .....	<b>Error! Bookmark not defined.3</b>
Lampiran 12. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Kedalaman Rintangan RSSF, dengan Re 1 Sudut 30° .....	<b>Error! Bookmark not defined.4</b>
Lampiran 13. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Kedalaman Rintangan RTSF, dengan Re 1 Sudut 30° .....	<b>Error! Bookmark not defined.5</b>
Lampiran 14. Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Terhadap Struktur Saluran T-vortex pada Re 1, Sudut 30°, Kedalaman 0,17 mm.....	<b>Error! Bookmark not defined.6</b>
Lampiran 15. Hasil Perhitungan Efisiensi Pencampuran pada Struktur Saluran T-vortex diberbagai Re dengan Sudut 30°, dan Kete 0,17 mm	<b>Error! Bookmark not defined.7</b>
Lampiran 16. Tahapan membuat desain dan simulasi yang telah dilakukan. ....	<b>Error! Bookmark not defined.8</b>



## DAFTAR PUSTAKA

- Alam, A., Afzal, A., & Kim, K. Y. (2014). Mixing Performance of a Planar with Circular Obstructions in a Curved Microchannel. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(3), 423–434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.09.008>
- Anggraini, L. D. F. (2019). Geometri Fraktal dan Transformasi Geometri sebagai Dasar Pengembangan Motif Batik Sekar Jagad. *Transformasi : Jurnal Pendidikan Matematika dan Matematika*, 3(1), 1–14. doi:<https://doi.org/10.36526/tr.v3i1.384>
- Ansari., Mubashshir A., Kim, K. Y., Anwar, K., & Kim, S. M. (2012). Vortex Micro T-mixer with Non-aligned Inputs. *Chemical Engineering Journal*, 181–182, 846–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.113>
- Ansari., Mubashshir A., Kim, K. Y., & Kim, S. M. (2018). Numerical and experimental Study on Mixing Performances of Simple and Vortex Micro T-Mixers. *Micromachines*, 9(5), 1–14. doi: <https://doi.org/10.3390/mi9050204>
- Ariyanti, E. S., & Mulyono, A. (2010). Otomatisasi Pengukuran Koefisien Viskositas Zat Cair Menggunakan Gelombang Ultrasonik. *Jurnal Neutrino*, 2(2), 183–192. doi: <https://doi.org/10.18860/neu.v0i0.1640>
- Balasubramaniam, L., Arayanarakool, R., Marshall, S. D., Li, B., Lee, P. S., & Chen, P. C. Y. (2017). Impact of Cross-Sectional Geometry on Mixing Performance of Spiral Microfluidic Channels Characterized by Swirling Strength Of Dean-Vortices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(9). doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa7fc8>
- Bayareh, M., Ashani, M. N., & Usefian, A. (2020). Active and Passive Micromixers: A Comprehensive Review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 147, 1–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107771>
- Bazaz, S. R., Mehrizi, A. A., & Javid, S. M. (2016). "Increasing the Efficiency of

Microfluidic Micromixer with Gaps and Baffles Using Design of Experiments Based on Taguchi Method". *Canadian Society for Mechanical Engineering (CSME) International Conference*.

Bhagat, A. A. S., Peterson, E. T. K., & Papautsky, I. (2007). A Passive Planar Micromixer with Obstructions for Mixing at Low Reynolds Numbers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(5), 1017–1024. doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/023>

Borghain, P., Arumughan, J., Dalal, A., & Natarajan, G. (2018). Design and Performance of a Three-dimensional Micromixer with Curved Ribs. *Chemical Engineering Research and Design*, 136, 761–775. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.027>

Castillo-leon, J. (2015). Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems. *Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08687-3>

Chen, X., & Zhang, S. (2017). 3D Micromixers based on Koch Fractal Principle. *Microsystem Technologies*, 24(6), 2627–2636. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3637-9>

Chen, X., & Zhao, Z. (2017). Numerical Investigation on Layout Optimization of Obstacles in a Three-dimensional Passive Micromixer. *Analytica Chimica Acta*, 964, 142–149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.01.066>

Chen, Y., & Kim, C. N. (2018). Numerical Analysis of the Mixing of Two Electrolyte Solutions in an Electromagnetic Rectangular Micromixer. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 60, 377–389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.11.025>

Chen, X., Zhang, S., Wu, Z., & Zheng, Y. (2019). A Novel Koch Fractal Micromixer with Rounding Corners Structure. *Microsystem Technologies*, 25(7), 2751–2758. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04296-4>

- Chen, Y., Chen, X., & Liu, S. (2020). Numerical and Experimental Investigations of Novel Passive Micromixers with Fractal-Like Tree Structures. *Chemical Physics Letters*, 137330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137330>
- Churski, K., Kaminski, T. S., Jakiela, S., Kamysz, W., Baranska-Rybak, W., Weibel, D. B., & Garstecki, P. (2012). Rapid Screening of Antibiotic Toxicity in an Automated Microdroplet System. *Lab on a Chip*, 12(9), 1629–1637. doi: <https://doi.org/10.1039/c2lc21284f>
- Cortes-Quiroz, C. A., Azarbadegan, A., Zangeneh, M., & Goto, A. (2010). Analysis and Multi-criteria Design Optimization of Geometric Characteristics of Grooved Micromixer. *Chemical Engineering Journal*, 160(3), 852–864. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.029>
- Damayanti, Y. P. (2012). *Simulasi Temperature Control System pada Internal Flow Fluida Viscous dengan Menggunakan Perangkat Lunak Cfd (Computational Fluid Dynamics)*. (Skripsi). Sekolah Sarjana, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Fauzan, I. B., Rahmita, N., & Mochady, B. I. (2015). Evaluasi Kondisi Operasi Proses Pencampuran Bahan Pada Pembuatan Produk Chloroprene Rubber (Studi Deskriptif Di Industri Polimer). *Fluida*, 11(1), 34–39. <https://doi.org/10.35313/fluida.v11i1.557>
- Gumilar, T. (2016). Pengukuran Massa Jenis Fluida dengan Menggunakan Roberval Balance. *Prosiding SKF 2016*.
- Gidde, R. R., Pawar, P. M., Ronge, B. P., Misal, N. D., Kapurkar, R. B., & Parkhe, A. K. (2018). Evaluation of the Mixing Performance in a Planar Passive Micromixer with Circular and Square Mixing Chambers. *Microsystem Technologies*, 24(6), 2599–2610. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3686-0>
- Harahap, R. (2011). *Penurunan Persamaan Navier Stokes dalam Bentuk Persamaan Diferensial untuk Gerak Fluida Laminer*. (Skripsi). Sekolah



Sarjana, Universitas Sumatera Utara, Medan.

- Huang, C. Y., Hu, Y. H., Wan, S. A., & Nagai, H. (2020). Application of Pressure-Sensitive Paint for the Characterization of Mixing with Various Gases in T-Type Micromixers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119710>
- Julius, L. A. N., Jagannadh, V. K., Michael, I. J., Srinivasan, R., & Gorthi, S. S. (2016). Design and Validation of On-chip Planar Mixer based on Advection and Viscoelastic Effects. *Biochip Journal*, 10(1), 16–24. doi: <https://doi.org/10.1007/s13206-016-0103-1>
- Karthikeyan, K., Sujatha, L., & Sudharsan, N. M. (2017). Numerical Modeling and Parametric Optimization of Micromixer for Low Diffusivity Fluids. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16(3). doi: <https://doi.org/10.1515/ijcre-2016-0231>
- Kastner, J., Kockmann, N., & Woias, P. (2009). Convective Mixing and Reactive Precipitation of Barium Sulfate in Microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 30(1–2), 148–157. doi: <https://doi.org/10.1080/01457630802293720>
- Keçili, R., Ghorbani-Bidkorbeh, F., Dolak, İ., & Hussain, C. M. (2020). Era of Nano-Lab-on-a-Chip (LOC) Technology. *Handbook on Miniaturization in Analytical Chemistry*, 1–17. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819763-9.00001-5>
- Kuo, J. N., & Li, Y. S. (2017). Centrifuge-based Micromixer with Three-Dimensional Square-Wave Microchannel for Blood Plasma Mixing. *Microsystem Technologies*, 23(7), 2343–2354. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2950-z>
- Li, L., Chen, Q. De, & Tsai, C. T. (2014). Three Dimensional Triangle Chaotic Micromixer. *Advanced Materials Research*, 875–877, 1189–1193. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1189>

- Lv, S., Jiang, F., Qi, G., Chen, X., & Li, X. (2020). Pressure Drop of Liquid–Solid Two-Phase Flow in A Down-Flow Circulating Fluidized Bed. *Powder Technology*, 375, 136–145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.077>
- Makgwane, P. R., & Ray, S. S. (2014). Synthesis of Nanomaterials by Continuous-flow Microfluidics: A Review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(2), doi: [1338–1363. https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9129](https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9129)
- Maryanto. (2019). *Investigasi Simulasi 3 Dimensi Karakteristik Aliran pada Model Geometri Pompa Hidram Menggunakan Computationan Fluid Dynamics*. (Skripsi). Sekolah Sarjana, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta.
- Meisel, I., & Ehrhard, P. (2006). Electrically-excited (Electroosmotic) Flows in Microchannels For Mixing Applications. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 25(4), 491–504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2005.12.002>
- Pasirayi, G., Auger, V., M. Scott, S., K.S.M. Rahman, P., Islam, M., O’Hare, L., & Ali, Z. (2012). Microfluidic Bioreactors for Cell Culturing: A Review. *Micro and Nanosystemse*, 3(2), 137–160. <https://doi.org/10.2174/1876402911103020137>
- Pawinanto, R. E., Yunas, J., & Hashim, A. M. (2019). Design Optimization of Active Microfluidic Mixer Incorporating Micropillar on Flexible Membrane. *Microsystem Technologies*, 25(4), 1203–1209. doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4134-5>
- Pawinanto, R. E., Yunas, J., & Hashim, A. M. (2020). Micropillar based active microfluidic mixer for the detection of glucose concentration. *Microelectronic Engineering*, 234(September), 111452.
- Pratama, W. (2013). Tinjauan Pustaka. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1, 5–33.
- Priyanto, E. S. (2017). "Analisa Aliran Fluida pada Pipa Acrylic Diameter 12,7 mm

- (0,5 inci) dan 38,1 mm (1,5 inci)". Mr Reza Chandra (Penyunting), Eprints Repository Software.
- Rachmat, F. (2011). *Efek Panjang Pipa Terhadap Aliran Berkembang Penuh untuk Air Tawar dan Larutan Biopolimer Cairan Bebas Hasil Fermentasi*. (Skripsi). Sekolah Sarjana, Universitas Indonesia, Depok.
- Raza, W., & Kim, K. Y. (2020). Unbalanced Split and Recombine Micromixer with Three-Dimensional Steps. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(9), 3744–3756. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00682>
- Rohman, A. S., Mulyanti, B., Pawinanto, R. E., Pantjawati, A. B., & Design, A. (2020). "The Optimization of Microfluidic Mixer Based on Meander Structure". 2020 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer and Informatics Engineering (IC2IE) (hlm. 80–84).
- Setiawan, I., Nurrohman, & Al Kindi, H. (2018). Analisa Pressure Drop dengan Penambahan Zat Aditif Cairan Coolant Pada Pipa Silinder Menggunakan Metode Empiris dan Metode Eksperimen. *AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(1), 1. doi: <https://doi.org/10.32832/ame.v4i1.985>
- Setiawan, D. (2008). *Hambatan Gesek Aliran Lumpur Dalam Pipa 1/2" Dan Pipa Spiral P/Di = 4,3*. (Skripsi). Sekolah Sarjana, Universitas Indonesia, Depok.
- Sheen, H. J., Hsu, C. J., Wu, T. H., Chu, H. C., Chang, C. C., & Lei, U. (2007). Experimental Study of Flow Characteristics and Mixing Performance in A PZT Self-Pumping Micromixer. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 139(1-2), 237–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.031>
- Shi, H., Zhao, Y., & Liu, Z. (2020). Numerical Investigation of the Secondary Flow Effect of Lateral Structure of Micromixing Channel on Laminar Flow. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 321, 128503. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128503>

- Simanjuntak, H. F. P., Manik, P., & Santosa, A. W. B. (2016). Analisa Pengaruh Panjang dan Bentuk Geometri Lunas Bilga Terhadap Arah dan Kecepatan Aliran (Wake) Pada Kapal Ikan Tradisional (Studi Kasus Kapal Tipe Kragan). *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(4), 345–352.
- Thomas, S., Ameal, T., & Guilkey, J. (2010). Mixing Kinematics of Moderate Reynolds Number Flows in a T-channel. *Physics of Fluids*, 22(1), 013601. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3283063>
- Tran-Minh, N., Dong, T., & Karlsen, F. (2013). An Efficient Passive Planar Micromixer with Ellipse-like Micropillars for Continuous Mixing of Human Blood. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 117(1), 20–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.05.007>
- Tran-Minh, N., Karlsen, F., Dong, T., & le-The, H. (2014). "A Simple and Low Cost Micromixer for Laminar Blood Mixing: Design, Optimization, and Analysis". *Communications in Computer and Information Science*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.05.007>
- Tseng, L. Y., Yang, A. S., Lee, C. Y., & Hsieh, C. Y. (2011). CFD-based Optimization of a Diamond-Obstacles Inserted Micromixer with Boundary Protrusions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(2), 210–222. doi: <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015365>
- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamic, *Longman Scientific & Technical, England*, pp 11-25.
- Viktorov, V., Mahmud, M. R., & Visconte, C. (2016). Design and Characterization of a New H-C Passive Micromixer Up to Reynolds Number 100. *Chemical Engineering Research and Design*, 108(100), 152–163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.12.005>
- Wang, H., Iovenitti, P., Harvey, E., & Masood, S. (2002). Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing In Microchannels. *Smart Materials and Structures*, 11(5), 662–667. doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/5/306>

- Yang, A. S., Chuang, F. C., Chen, C. K., Lee, M. H., Chen, S. W., Su, T. L., & Yang, Y. C. (2015). A High-Performance Micromixer Using Three-Dimensional Tesla Structures For Bio-Applications. *Chemical Engineering Journal*, 263, 444–451. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.034>
- Yu, S., Jeon, T. J., & Kim, S. M. (2012). Active Micromixer Using Electrokinetic Effects in the Micro/Nanochannel Junction. *Chemical Engineering Journal*, 197, 289–294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.044>
- Zhang, S., Chen, X., Wu, Z., & Zheng, Y. (2019). Numerical Study On Stagger Koch Fractal Baffles Micromixer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 1065–1073. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.009>
- Zhang, Y., Ge, S., & Yu, J. (2016). Chemical And Biochemical Analysis On Lab-On-A-Chip Devices Fabricated Using Three-Dimensional Printing. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 85, 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.09.008>
- Zhang, S., Chen, X., Wu, Z., & Zheng, Y. (2019). Numerical Study on Stagger Koch Fractal Baffles Micromixer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 1065–1073. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.009>

**DAFTAR PUBLIKASI**

Nurvadila, D. F., Pawinanto, R. E., Mulyanti, B., Aminuddin, A., Wulandari C. and Hasanah, L. 'The Optimization of Koch Fractal Micromixer with Snowflakes Structure' (dikirim ke International Conference on Mathematics and Science Education (ICMScE))

Nurvadila, D. F., Hasanah, L., Mulyanti, B., Aminuddin, A., Wulandari, C., Yunas, Jumril. and Pawinanto, R.E. 'Optimizing of Meander Structure-based Micromixer at Low Reynolds Number' (dikirim ke Nanotechnology Malaysia Annual Symposium (Nanosym))