

# Analisis Pola Aliran Dua Fasa Hidrogen Dan Aquadest Pada Microchannel Dengan Sudden Expansion

I Nyoman Citta Diatmika, Made Sucipta, Made Suarda, dan Deendarlianto  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Salah satu tantangan dalam mewujudkan pengembangan ekonomi berbasis hidrogen adalah transportasi hidrogen. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi transportasi hidrogen, salah satunya dengan menggunakan aliran dua fasa. Mengidentifikasi pola aliran merupakan hal yang penting karena dengan pola aliran tertentu akan menjadikannya lebih efisien. Pemilihan fluida kerja dalam aliran dua fasa sangat memengaruhi karakteristik pola aliran. Aquadest memiliki sifat kemurniannya yang tinggi, berwarna bening, tidak berbau, dan tidak memiliki rasa. Karakteristik seperti ini menjadikannya pilihan yang tepat untuk aplikasi dalam sistem mikrofluida khususnya microchannel yang memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi. Adanya fenomena sudden expansion pada microchannel diharapkan memiliki dampak besar terhadap karakteristik aliran, termasuk perubahan tekanan, kecepatan, dan distribusi aliran. Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis pola aliran dua fasa pada microchannel dengan sudden expansion. Fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas hidrogen dan cairan aquadest. Kecepatan superficial divariasikan untuk mendapatkan pola aliran. Kecepatan superficial gas ( $j_G$ ) divariasikan pada kisaran 0,67-13,33 m/s, sedangkan untuk kecepatan superficial liquid ( $j_L$ ) berada dalam rentang 0,1-1 m/s. Karakteristik pola aliran yang terbentuk direkam menggunakan high speed camera dan pola aliran yang teramati di antaranya bubbly, slug, slug-annular, dan churn.

Kata kunci: hidrogen, aquadest, aliran dua fasa, pola aliran, microchannel

## Abstract

One of the challenges in realizing the development of a hydrogen-based economy is hydrogen transportation. Several studies have been conducted to improve the efficiency of hydrogen transportation, one of which is by using two-phase flow. Identifying the flow pattern is important because with a certain flow pattern will make it more efficient. The selection of the working fluid in two-phase flow greatly affects the characteristics of the flow pattern. Aquadest has high purity properties, is clear, odorless, and has no taste. These characteristics make it the right choice for applications in microfluidic systems, especially microchannels that have a high surface area to volume ratio. The presence of the sudden expansion phenomenon in the microchannel is expected to have a significant impact on the flow characteristics, including changes in pressure, velocity, and flow distribution. The purpose of this study is to analyze the two-phase flow pattern in microchannels with sudden expansion. The working fluids used in this study are hydrogen gas and distilled water. The superficial velocity is varied to obtain the flow pattern. The superficial gas velocity ( $j_G$ ) is varied in the range of 0.67-13.33 m/s, while the superficial liquid velocity ( $j_L$ ) is in the range of 0.1-1 m/s. The characteristics of the flow patterns formed were recorded using a high-speed camera and the observed flow patterns included bubbly, slug, slug-annular, and churn.

Keywords: hydrogen, aquadest, two-phase flow, flow pattern, microchannel

## 1. Pendahuluan

Transportasi hidrogen merupakan salah satu tantangan utama dalam mengembangkan ekonomi berbasis hidrogen. Karena densitasnya yang jauh lebih rendah daripada udara, mengakibatkan gas hidrogen mudah menyebar apabila terjadi kebocoran [1]. Sebelumnya, teknologi hidrogen cair telah digunakan untuk mengatasi masalah ini. Namun, teknologi tersebut memiliki kelemahan karena membutuhkan energi yang sangat besar untuk proses pencairannya [2]. Oleh karena itu, teknologi transportasi hidrogen harus mampu mempertahankan kerapatan gas sekaligus meningkatkan efisiensi energi. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah dengan memanfaatkan aliran dua fasa antara hidrogen dan cairan tertentu. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memberikan fleksibilitas tinggi untuk berbagai kondisi operasi dan aplikasi [3].

Aliran dua fasa adalah aliran simultan dari dua fluida yang terpisah satu sama lain baik itu fluida gas dengan cair maupun fluida gas atau cair dengan partikel padat yang telah tersuspensi [4]. Aliran ini sering dijumpai pada sektor industri misalnya dalam komponen sistem konversi energi seperti penukar kalor, evaporator, dan siklus pendingin. Pola aliran, distribusi fasa, dan dinamika interaksi antar fasa menjadi perhatian utama dalam banyak aplikasi industri dan penelitian [5]. Pada beberapa studi literatur, mengidentifikasi pola aliran merupakan hal yang penting karena pola aliran tertentu akan lebih efisien dibandingkan dengan pola aliran lainnya [6] dan [7].

Beberapa jenis pola aliran yang umum terjadi pada aliran dua fasa di antaranya, *bubbly flow*, *slug flow*, *slug-annular flow*, *annular flow*, dan *churn flow* [8]. Terbentuknya pola aliran dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, laju aliran, rasio gas-cair, diameter penampang, bentuk geometri pipa, dan sifat

material cairan [9]. Salah satu parameter yang sering digunakan dalam mengidentifikasi pola aliran adalah kecepatan superfisial. Penentuan pola aliran didasarkan pada kecepatan superfisial gas dan cair yang dilakukan oleh penelitian terdahulu yang melakukan eksperimen aliran dua fasa pada *microchannel* [10].

Pemilihan fluida kerja dalam aliran dua fasa sangat memengaruhi karakteristik pola aliran yang terbentuk. *Aquadest* sering digunakan sebagai fasa cair dalam eksperimen aliran gas-cair atau cair-cair. Karena *aquadest* memiliki sifat kemurniannya yang tinggi, berwarna bening, tidak berbau, dan tidak memiliki rasa [11]. Karakteristik ini menjadikannya pilihan yang tepat untuk aplikasi dalam sistem mikrofluida, khususnya *microchannel* yang memiliki keunggulan rasio luas area terhadap volume (*surface area-to-volume ratio*) yang tinggi sehingga memiliki laju perpindahan panas yang tinggi [12].

Menurut Prakash dan Kumar (2015), *microchannel* merupakan saluran yang dikategorikan memiliki dimensi 1–999  $\mu\text{m}$ . Sifat-sifat aliran fluida dalam saluran mikro sangat dipengaruhi oleh geometri saluran, salah satunya adalah perubahan mendadak (*sudden*) dalam dimensi saluran. *Sudden contraction* dan *sudden expansion* adalah fenomena aliran yang terjadi ketika fluida mengalir melalui bagian saluran yang tiba-tiba menyempit atau melebar. Fenomena ini memiliki dampak besar terhadap karakteristik aliran, termasuk perubahan tekanan, kecepatan, dan distribusi aliran.

Penelitian ini berfokus pada analisis pola aliran dua fasa antara gas hidrogen dan cairan *aquadest* pada *microchannel* dengan *sudden expansion*.

## 2. Dasar Teori

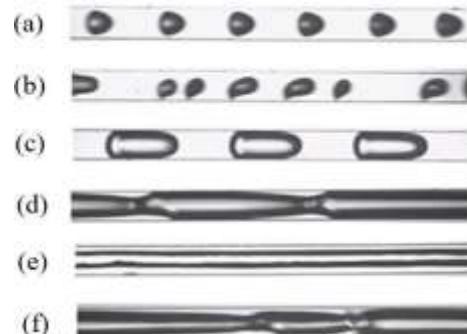
### 2.1 Aliran Dua Fasa

Aliran dua fasa adalah bagian dari aliran multi-fasa yang dibedakan berdasarkan fasa-fasa aliran (gas-cair, cair-padat, dan padat-gas), arah aliran (searah dan berlawanan arah), dan kedudukan saluran (tegak, mendatar atau miring). Pada aliran dua fasa memiliki parameter dasar meliputi pola aliran (*flow pattern* atau *flow regime*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), fraksi hampa (*void fraction*) dan perubahan tekanan (*pressure drop*) [14].

### 2.2 Pola Aliran Dua Fasa Saluran Horizontal

Pola aliran ini dipetakan berdasarkan kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) dan kecepatan superfisial *liquid* ( $j_L$ ). Dalam penamaan pola aliran merupakan suatu hal yang sifatnya subjektivitas, hal ini dikarenakan sulitnya memberikan nama pada pola aliran yang hampir serupa. Sebagai contoh, pola aliran *slug-annular* sering kali mirip dengan pola aliran *liquid ring flow*. Beberapa penelitian lain mengidentifikasi pola aliran *slug* dan *slug-annular* sebagai satu pola aliran yang disebut *intermittent flow*. Penelitian ini mengadopsi penamaan yang paling umum digunakan untuk pola aliran, baik pada *microchannel*,

*minichannel*, maupun *macrochannel*. Gambar 2.1 menunjukkan pola aliran yang umum ditemui pada aliran dua fasa dalam *microchannel* horizontal meliputi *bubbly*, *slug-bubbly*, *slug*, *slug-annular/intermittent*, *churn*, dan *annular* [15]. Setiap pola aliran tersebut memiliki karakteristiknya masing-masing.



Gambar 1. Pola aliran pada *microchannel*: (a) *bubbly flow*; (b) *slug-bubbly flow*; (c) *slug flow*; (d) *slug-annular flow*; (e) *annular flow*; (f) *churn flow* (Feng & Zhang, 2021)

#### 1. Bubbly Flow

*Bubbly flow* umumnya terbentuk pada kecepatan superfisial gas rendah dan kecepatan superfisial *liquid* yang tinggi. Pola aliran ini memiliki karakteristik dengan adanya gelembung-gelembung kecil terdorong oleh gaya apung sehingga mengalir di bagian atas saluran.

#### 2. Slug-Bubbly Flow

*Slug-bubbly flow* termasuk ke dalam pola aliran transisi dari gelembung gas yang awalnya berupa *gas slug* menuju kondisi di mana ekor *slug* tersebut mulai pecah menjadi *gas bubbly*. Diameter dari *gas slug* dalam *slug-bubbly flow* berbeda dibandingkan dengan *slug flow*. Dalam *slug-bubbly flow*, diameter *gas slug* lebih kecil daripada diameter hidraulik saluran.

#### 3. Slug Flow

*Slug flow* ditandai dengan diskontinuitas dalam aliran gas dan cairan. Pada pola aliran ini meningkatnya kecepatan gas menyebabkan terbentuknya *elongated bubbles* melebihi panjang diameter hidraulik saluran dan dipisahkan oleh *liquid slugs* serupa dengan tinggi saluran.

#### 4. Slug-Annular Flow

Pola aliran ini umumnya terbentuk pada kecepatan superfisial gas yang relatif tinggi dan kecepatan superfisial *liquid* yang relatif rendah. Karakteristik *slug-annular flow* adalah berupa fasa gas yang mengalir di inti saluran, sedangkan fasa cair di sekeliling permukaan saluran dan membentuk cincin yang melingkar.

#### 5. Annular Flow

*Annular flow* dicirikan dengan fasa gas kontinyu yang berada di bagian tengah saluran dan diselimuti oleh fasa cair yang membentuk film kontinyu di sekeliling permukaan saluran. Pola aliran ini sering

terjadi pada kecepatan superfisial gas yang tinggi dan kecepatan superfisial *liquid* yang rendah.

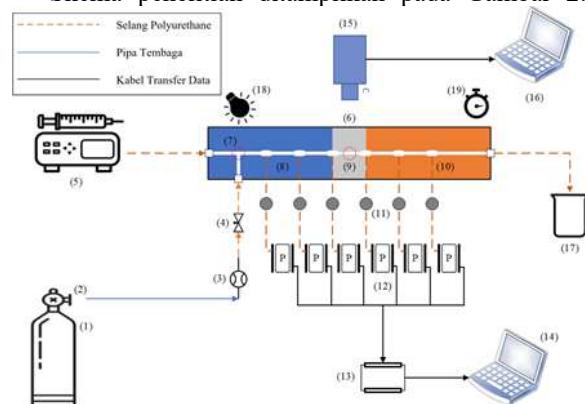
### 6. Churn Flow

*Churn flow* terbentuk pada kecepatan superfisial gas dan *liquid* yang tinggi. Fenomena ini dicirikan oleh gelembung memanjang yang tidak stabil pada bagian ekor *gas slug*. Hal tersebut menyebabkan terjadinya gangguan pada *gas slug* yang terpecah menjadi *bubble* gas kecil dan tersebar dalam *liquid slug*.

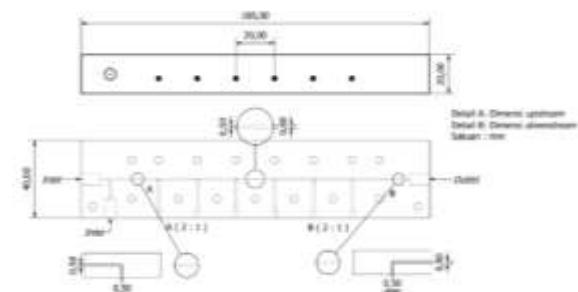
## 3. Metode Penelitian

### 3.1 Skema Penelitian

Skema penelitian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema penelitian



Gambar 3. Geometri *microchannel* dengan *sudden expansion*

Penelitian ini menggunakan *microchannel* dengan penampang persegi dan tipe *sudden expansion* (9), yang memiliki dimensi *upstream* (8)  $0,5 \times 0,5$  mm dan dimensi *sudden expansion*  $0,8 \times 0,5$  mm pada bagian *downstream* (10), sebagaimana geometri *microchannel* diperlihatkan pada Gambar 3. Gas hidrogen dialirkan dari tabung hidrogen (1) menuju *microfluidic chip* (6), dengan tekanan yang diatur menggunakan regulator (2) dan laju aliran dikendalikan melalui *flowmeter* (3). Sebelum mencapai *microfluidic chip*, saluran gas dilengkapi dengan *double needle valve* (4). Sementara itu, aliran fluida cair dikontrol oleh *syringe pump* (5) yang mengatur kecepatannya menuju *microfluidic chip*. Gas dan cairan, akan bertemu dan bercampur di titik *t-junction* (7). Tekanan masing-masing fasa diukur

dengan *differential pressure transducer* (12) yang terhubung ke titik pengukuran tekanan (*pressure tap*) (11) pada *microfluidic chip*. Data tekanan analog direkam oleh *data logger* (13) dan dikonversi menjadi data digital melalui komputer (14). Untuk mengamati pola aliran, digunakan *high speed camera* (15) yang tersambung ke laptop (16). Sinkronisasi antara pencatatan data dan pengambilan gambar dilakukan dengan bantuan *stopwatch* (19). Pencahayaan diperoleh dari lampu LED (18) yang diletakkan di bawah *microfluidic chip*. Sementara itu, saluran buangan cairan dialirkan ke gelas beaker (17) agar dapat digunakan kembali.

Pada variasi pertama, kecepatan superfisial gas diatur  $0,67$  m/s serta kecepatan superfisial cairan menjadi  $0,1$  m/s. Variasi data cairan dilanjutkan hingga mencapai nilai  $1$  m/s. Proses ini dilakukan berulang sampai kecepatan superfisial gas  $13,33$  m/s. Sehingga data yang didapat ada sebanyak  $20$  data variasi.

### 3.2 Fluida Uji

Penelitian ini menggunakan fluida cair *aquaedst* dan gas hidrogen. Spesifikasi dari fluida ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fluida kerja

Fluida	Air	Hidrogen
<i>Molecular Formula</i>	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2$
<i>Molecular Weight</i>	18	2,016
<i>Surface Tension (N/m)</i>	0,07269	-
<i>Rheological Parameter</i>	K	0,00097
	n	1,0
<i>Apparence Viscosity (mPa.s)</i>	0,97	-

## 4. Hasil dan Pembahasan

Pola aliran dua fasa diidentifikasi pada bagian *upstream* dan *downstream* *microchannel*.

### 4.1 Pola Aliran Dua Fasa Hidrogen-Aquadest

Penelitian ini menggunakan 5 variasi kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) pada rentang  $0,67 - 13,33$  m/s dan 4 variasi kecepatan superfisial *liquid* ( $j_L$ ) pada rentang  $0,1 - 1$  m/s. Berdasarkan hasil variasi  $j_G$  dan  $j_L$  didapatkan 4 pola aliran, antara lain pola aliran *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, dan *churn* untuk bagian *upstream microchannel*. Beberapa pola aliran yang terbentuk dikelompokkan ke dalam tabel penelitian sesuai dengan variasi  $j_G$  dan  $j_L$ , yang ditunjukkan pada Tabel 2 untuk aliran *upstream* dan Tabel 3 untuk aliran *downstream*.

Tabel 2. Pola aliran dua fasa hidrogen-aquadest pada saluran *upstream*

Hidrogen-aquadest		$j_L$ (m/s)			
		0,1	0,3	0,6	1
$j_G$ (m/s)	0,67	Slug	Slug	Slug	Bubbly
	2,67	Slug	Slug	Slug	Slug
	4	Slug	Slug	Slug	Slug
	7,8	Slug-Annular	Slug-Annular	Slug-Annular	Churn
	13,3	Slug-Annular	Slug-Annular	Churn	Churn

Tabel 3. Pola aliran dua fasa hidrogen-aquadest pada saluran *downstream*

Hidrogen-aquadest		$j_L$ (m/s)			
		0,1	0,3	0,6	1
$j_G$ (m/s)	0,67	Slug	Slug	Slug	Bubbly
	2,67	Slug	Slug	Slug	Slug
	4	Slug	Slug	Slug	Slug
	7,8	Slug-Annular	Slug-Annular	Slug-Annular	Churn
	13,3	Slug-Annular	Slug-Annular	Churn	Churn

#### 4.1.1 Pola Aliran *Bubbly*

Pola aliran *bubbly* berdasarkan Tabel 2 dan 3 ditemukan pada kombinasi kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) yang rendah dengan kecepatan superfisial liquid ( $j_L$ ) yang tinggi. Pola aliran ini terlihat pada bagian *upstream* dan *downstream* saluran. Gambar 4 dan 5 menunjukkan contoh dari pola aliran *bubbly* yang terlihat pada penelitian ini. Pola ini dicirikan oleh kemunculan gelembung berbeda bentuk yang terdistorsi, dengan diameter yang lebih kecil dibandingkan diameter saluran [16].



Gambar 4. Pola aliran *bubbly* hidrogen-aquadest di bagian *upstream* microchannel dengan  $j_G = 0,67$  m/s dan  $j_L = 1$  m/s



Gambar 5. Pola aliran *bubbly* hidrogen-aquadest di bagian *downstream* microchannel dengan  $j_G = 0,67$  m/s dan  $j_L = 1$  m/s

#### 4.1.2 Pola Aliran *Slug*

Pola aliran *slug* berdasarkan Tabel 2 dan 3 muncul pada kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) yang rendah menuju sedang dengan kecepatan superfisial liquid ( $j_L$ ) yang rendah menuju sedang. Gambar 6 menunjukkan pola aliran *slug* pada aliran *upstream* dan Gambar 7 untuk aliran *downstream*. Pola ini dicirikan dengan adanya gelembung gas yang

memanjang dengan panjang melebihi diameter saluran dan dipisahkan oleh *liquid slug* [17].



Gambar 6. Pola aliran *slug* hidrogen-aquadest di bagian *upstream* microchannel dengan  $j_G = 0,67$  m/s dan  $j_L = 0,1$  m/s



Gambar 7. Pola aliran *slug* hidrogen-aquadest di bagian *upstream* microchannel dengan  $j_G = 0,67$  m/s dan  $j_L = 0,1$  m/s

#### 4.1.3 Pola Aliran *Slug Annular*

Berdasarkan pada Tabel 2 dan 3, pola aliran *slug-annular* ditemukan pada kondisi kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) yang tinggi dengan kecepatan superfisial liquid ( $j_L$ ) yang rendah hingga sedang. Contoh pola aliran *slug-annular* yang ditemukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8 untuk aliran *upstream* dan Gambar 9 untuk aliran *downstream*. Pola aliran ini dicirikan dengan adanya *gas slug* yang memanjang tetapi tidak terputus sepanjang saluran atau dikenal dengan fenomena *necking*.



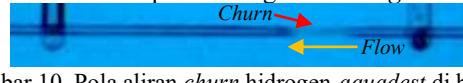
Gambar 8. Pola aliran *slug-annular* hidrogen-aquadest di bagian *upstream* microchannel dengan  $j_G = 7,8$  m/s dan  $j_L = 0,3$  m/s



Gambar 9. Pola aliran *slug-annular* hidrogen-aquadest di bagian *downstream* microchannel dengan  $j_G = 7,8$  m/s dan  $j_L = 0,3$  m/s

#### 4.1.4 Pola Aliran *Churn*

Pola aliran *churn* berdasarkan Tabel 2 dan 3, ditemukan pada kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) yang tinggi dengan kecepatan superfisial liquid ( $j_L$ ) yang sedang hingga tinggi. Contoh pola aliran *churn* yang terbentuk pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 10 untuk aliran *upstream* dan Gambar 11 untuk *downstream*. Pola aliran *churn* ditandai dengan munculnya *slug* yang tidak teratur, di mana fasa cair dan gas sulit diamati karena adanya gelembung yang tersebar atau terdispersi di bagian *tail slug*.



Gambar 10. Pola aliran *churn* hidrogen-aquadest di bagian *upstream* microchannel dengan  $j_G = 7,8$  m/s dan  $j_L = 1$  m/s



Gambar 11. Pola aliran *churn* hidrogen-aquadest di bagian *downstream* microchannel dengan  $j_G = 7,8$  m/s dan  $j_L = 1$  m/s

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan pembentukan pola aliran pada penelitian ini dipengaruhi oleh variasi kecepatan superfisial gas ( $j_G$ ) dan *liquid* ( $j_L$ ). Pola aliran yang terbentuk pada aliran hidrogen-aquadest, di antaranya *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, dan *churn*.

## Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Udayana atas pendanaan penelitian skema Riset Kampus Merdeka (MBKM) sesuai dengan kontrak Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian Nomor B/266.40/UN14.4.A/PT.01.03/2024

## Daftar Pustaka

- [1] H. Li *et al.*, 2022, *Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges*, Energy Reports, vol. 8, pp. 6258–6269.
- [2] M. Aziz, 2021, *Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety*, Energies, vol. 14, no. 18.
- [3] L. Cheng, G. Ribatski, and J. R. Thome, 2008, *Two-phase flow patterns and flow-pattern maps: Fundamentals and applications*, Appl. Mech. Rev., vol. 61, no. 1–6, pp. 0508021–0508022.
- [4] H. Kusumaningsih, W. Wijayanti, D. Widhiyanuriyawan, and M. Fauzi, 2018, *Analisis Pressure Drop Dan Pola Aliran Dua Fase ( Air-Udara ) Pada Pipa Horisontal Melalui Orifice*, J. Tek. mesin untirta, vol. IV, no. 2, pp. 14–22.
- [5] J. R. Thome, 2004, *Editorial: Two-phase heat transfer using No-Phase flow models?*, Heat Transf. Eng., vol. 25, no. 6, pp. 1–2.
- [6] B. Santoso, Indarto, Deendarlianto, and S. W. Thomas, 2012, *Fluktuasi Beda Tekanan Dari Pola Aliran Slug Air-Udara*, J. Tek. Mesinn, vol. 14, no. 2, pp. 1–6.
- [7] X. Ma, M. Tian, J. Zhang, L. Tang, and F. Liu, 2018, *Flow pattern identification for two-phase flow in a U-bend and its contiguous straight tubes*, Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 93, pp. 218–234.
- [8] P. M.-Y. Chung and M. Kawaji, 2004, *The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels*, Int. J. Multiph. Flow, vol. 30, pp. 735–761.
- [9] S. G. Nnabuife, H. Tandoh, and J. F. Whidborne, 2022, *Slug flow control using topside measurements: A review*, Chem. Eng. J. Adv., vol. 9, p. 100204.
- [10] E. V. Rebrov, 2010, *Two-phase flow regimes in microchannels*, Theor. Found. Chem. Eng., vol. 44, no. 4, pp. 355–367.
- [11] H. Khotimah, E. W. Anggraeni, and A. Setianingsih, 2018, *Karakterisasi Hasil Pengolahan Air Menggunakan Alat Destilasi*, J. Chemurg., vol. 1, no. 2, p. 34.
- [12] V. Kumar, Vikash, and K. D. P. Nigam, 2017 *Multiphase fluid flow and heat transfer characteristics in microchannels*, Chem. Eng. Sci., vol. 169, pp. 34–66.
- [13] S. Prakash and S. Kumar, 2015, *Fabrication of microchannels: A review*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., vol. 229, no. 8, pp. 1273–1288.
- [14] F. Jayadi, Sudarja, Wenang, Indarto, and Deendarlianto, 2020, *Fraksi Hampa Campuran Gliserin-Air dan Udara Pada Pipa Horizontal Berukuran Mini*, Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine, vol. 6, no. 1, pp. 1–9.
- [15] K. Feng and H. Zhang, 2021, *Pressure drop and flow pattern of gas-non-Newtonian fluid two-phase flow in a square microchannel*, Chem. Eng. Res. Des., vol. 173, pp. 158–169.
- [16] N. Shao, A. Gavriilidis, and P. Angeli, 2009, *Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels*, Chem. Eng. Sci., vol. 64, no. 11, pp. 2749–2761.
- [17] T. Zhang, B. Cao, Y. Fan, Y. Gonther, L. Luo, and S. Wang, 2011, *Gas–liquid flow in circular microchannel. Part I: Influence of liquid physical properties and channel diameter on flow patterns*, Chem. Eng. Sci., vol. 66, no. 23, pp. 5791–5803.



I Nyoman Citta Diatmika menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana, dari tahun 2021 hingga 2025, dengan fokus utama pada bidang konversi energi.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan mekanika fludia, khususnya aliran dua fasa.