

## Analisis Pengaruh Variasi Bentuk *Sudden enlargement* terhadap *Head loss* pada Aliran Udara Laminar (*Analysis of the Influence of Sudden enlargement Geometry Variations on Head loss in Laminar Airflow*)

Satria Agung Wibosno<sup>1)</sup>, Ali Akbar<sup>2)</sup>, A'rasy Fahrurrobin<sup>3)</sup>, Rachmat Firdaus<sup>4)</sup>, Muhammad Syahril<sup>5)</sup>

<sup>1,2,3,4)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>5)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Samudra

E-mail: <sup>1)</sup>[satriaagungwibisono@gmail.com](mailto:satriaagungwibisono@gmail.com), <sup>2)</sup>[aliakbar@umsida.ac.id](mailto:aliakbar@umsida.ac.id),

<sup>3)</sup>[arasy.fahrurrobin@umsida.ac.id](mailto:arasy.fahrurrobin@umsida.ac.id), <sup>4)</sup>[firdausr@umsida.ac.id](mailto:firdausr@umsida.ac.id),

<sup>5)</sup>[muhmadsyahril@unsam.ac.id](mailto:muhmadsyahril@unsam.ac.id)

### Abstrak

Fenomena sudden enlargement pada sistem perpipaan merupakan salah satu penyebab utama terjadinya head loss yang dapat menurunkan efisiensi aliran fluida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk sudden enlargement terhadap kehilangan energi pada aliran fluida laminar dengan menggunakan tiga variasi geometri, yaitu Square Edge, Rounded Edge, dan Projecting Edge. Pengujian dilakukan pada pipa berbahan akrilik menggunakan manometer U sebagai alat ukur tekanan dengan dua titik pengukuran, masing-masing pada diameter 12,7 mm dan 50 mm. Dua tingkat laju aliran udara diuji, yaitu 6 L/menit dan 4 L/menit. Data tekanan yang diperoleh diolah untuk menghitung kecepatan aliran dan head loss menggunakan persamaan dasar fluida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk geometri memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya head loss. Pada laju aliran tinggi (6 L/menit), geometri Square Edge menghasilkan head loss terendah, sedangkan Rounded Edge memberikan performa optimal pada laju aliran rendah (4 L/menit). Geometri Projecting Edge secara konsisten menghasilkan head loss tertinggi pada kedua kondisi. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan geometri sudden enlargement harus disesuaikan dengan kondisi operasi sistem. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perancangan instalasi perpipaan yang lebih efisien dan mendukung optimasi energi pada sistem transportasi fluida.

Kata Kunci: aliran laminar, head loss, kecepatan aliran, sudden enlargement, tekanan fluida.

### Abstract

The phenomenon of sudden enlargement in piping systems is one of the primary causes of head loss, which can significantly reduce fluid flow efficiency. This study aims to analyze the effect of various sudden enlargement geometries on energy losses in laminar airflow by evaluating three forms: Square Edge, Rounded Edge, and Projecting Edge. Experimental testing was conducted using acrylic pipes, with pressure measurements obtained from a U-tube manometer at two points corresponding to pipe diameters of 12.7 mm and 50 mm. Two airflow rates were tested, namely 6 L/min and 4 L/min. The measured pressure values were processed to calculate flow velocity and head loss using fundamental fluid mechanics equations. The results indicate that geometric variations significantly influence head loss. At higher flow rates (6 L/min), the Square Edge geometry produced the lowest head loss, while the Rounded Edge geometry demonstrated optimal performance at lower flow rates (4 L/min). The Projecting Edge consistently

*resulted in the highest head loss under both conditions. These findings emphasize that the selection of sudden enlargement geometry should be adjusted according to system operating conditions. This study is expected to serve as a reference for designing more efficient piping installations and support energy optimization in fluid transport systems.*

*Keywords:* laminar flow, head loss, flow velocity, sudden enlargement of fluid pressure.

## 1. PENDAHULUAN

Ilmu fisika memiliki keterkaitan yang erat dengan berbagai aspek kehidupan, salah satunya adalah kajian mengenai fluida. Fluida, termasuk udara, merupakan substansi yang mudah mengalami deformasi secara berkesinambungan [1]. Dalam berbagai aplikasi teknik, perpindahan fluida dari satu titik ke titik lainnya umumnya membutuhkan perangkat peniup atau alat sejenis untuk memberikan dorongan, serta sistem perpipaan sebagai media transportasi fluida [2][3].

Pada sistem peniupan, fluida diisap dari sisi masuk kemudian dikeluarkan melalui sisi tekan peniup. Kinerja peniup tidak hanya dipengaruhi oleh kemampuan perangkat tersebut, tetapi juga oleh karakteristik sistem penyeluran fluida. Salah satu indikator penurunan kinerja adalah *head losses*, yaitu kehilangan tekanan yang terjadi selama fluida mengalir melalui pipa penyelur [4]. *Head losses* menyebabkan energi terbuang dan menurunkan efisiensi sistem perpipaan [5].

*Head losses* terbagi menjadi dua jenis, yaitu major losses dan minor losses.

1. *Major losses* dihasilkan oleh gesekan antara fluida dan dinding pipa yang dipengaruhi oleh panjang pipa, kekasaran permukaan, kekentalan fluida, serta kecepatan aliran [6][7].
2. *Minor losses* muncul akibat adanya perubahan geometri seperti belokan, katup, sambungan, penyempitan mendadak (*sudden contraction*), serta pembesaran mendadak (*sudden enlargement*). Kondisi ini menyebabkan peningkatan turbulensi dan distribusi kecepatan yang tidak seragam pada penampang aliran[8][9].

Fenomena *sudden enlargement* terjadi ketika diameter pipa berubah secara tiba-tiba menjadi lebih besar. Perubahan mendadak tersebut menghasilkan separasi aliran dan turbulensi yang signifikan sehingga menimbulkan kehilangan energi atau *head losses* yang cukup besar. Pemahaman mengenai karakteristik kehilangan energi pada *sudden enlargement* penting untuk merancang sistem perpipaan yang efisien[10].

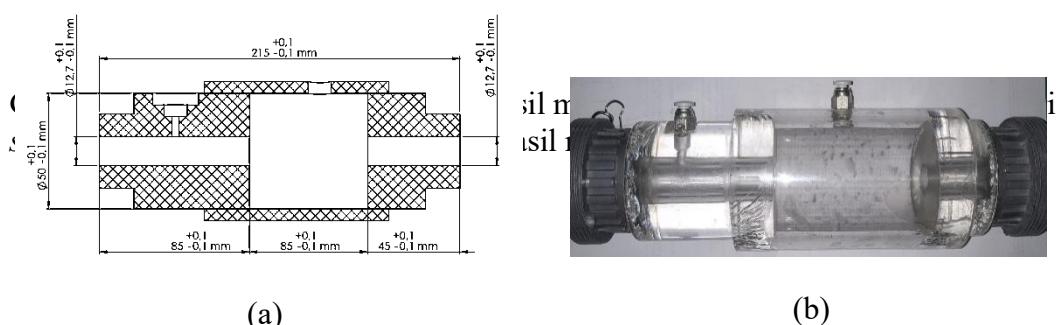
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis “Pengaruh Variasi Bentuk *Sudden enlargement* pada Aliran Fluida Laminar”. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai bentuk *sudden enlargement* yang memberikan kehilangan tekanan paling minimal, sehingga dapat dijadikan acuan dalam perancangan instalasi perpipaan dan sistem transportasi fluida lainnya.

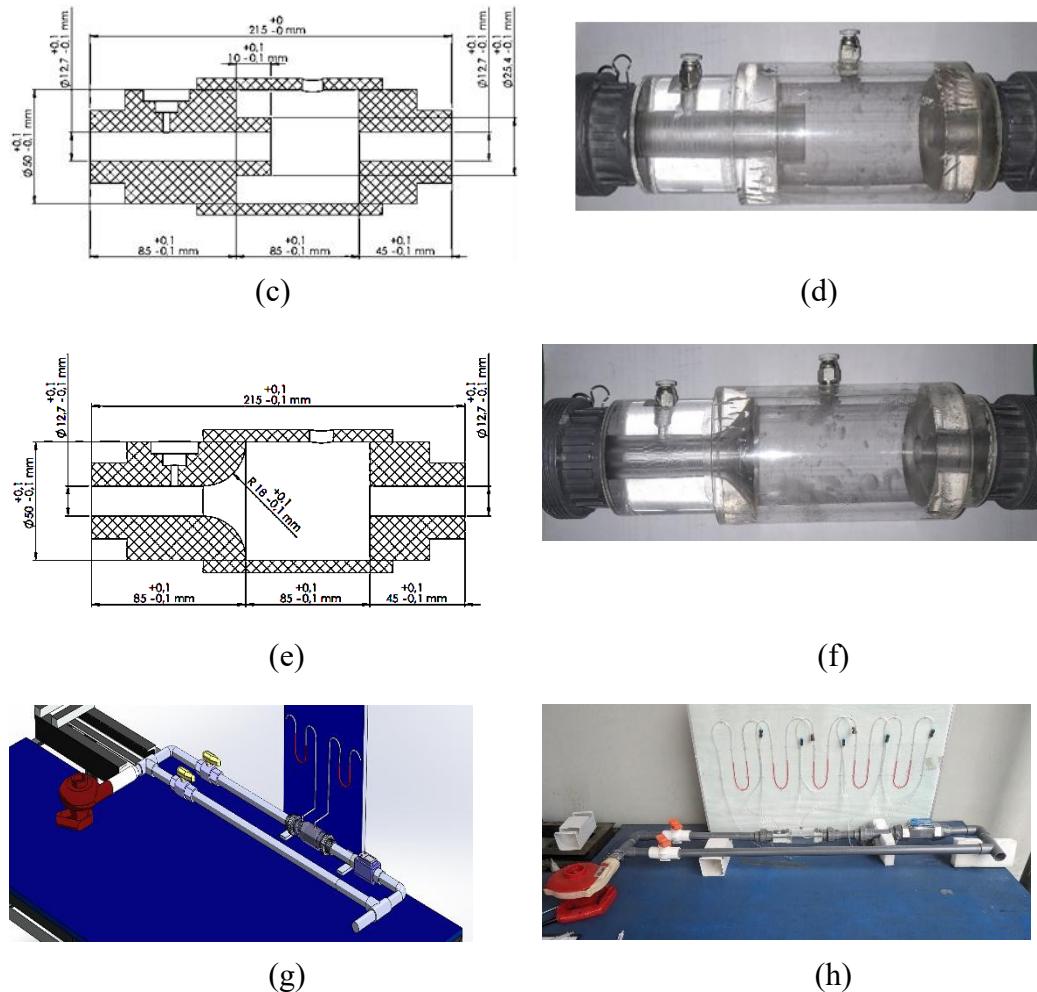
## 2. METODE PENELITIAN

### a. Desain Penelitian

Desain penelitian merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan eksperimen, terutama dalam studi mengenai fenomena *sudden enlargement*. Objek penelitian berupa pipa *sudden enlargement* berbahan akrilik yang dipilih untuk mempermudah observasi visual terhadap aliran fluida. Seluruh komponen dibuat melalui proses permesinan untuk memastikan dimensi dan toleransi sesuai dengan rancangan.

Penelitian ini menggunakan tiga variasi bentuk *sudden enlargement*, yaitu *Square Edge*, *Projecting Edge*, dan *Rounded Edge*. Selain itu, sistem instalasi dirancang untuk memungkinkan pengukuran tekanan dan kecepatan sebelum dan sesudah area *sudden enlargement*.





**Gambar 1.** (a) Desain Sudden enlargement Square Edge, (b) Hasil Jadi Sudden enlargement Square Edge, (c) Desain Sudden enlargement Projecting Edge, (d) Hasil Jadi Sudden enlargement Projecting Edge, (e) Desain Sudden enlargement Rounded Edge, (f) Hasil Jadi Sudden enlargement Rounded Edge, (g) Desain Instalasi, (h) Hasil Jadi Instalasi.

### b. Pengolahan Data

Data hasil pengukuran diolah menggunakan beberapa persamaan dasar fluida untuk memperoleh nilai tekanan, kecepatan, dan *head loss*. Tahapan pengolahan data dijelaskan sebagai berikut.

### c. Pengukuran Tekanan

Tekanan diukur menggunakan manometer U. Selisih tinggi kolom fluida (mm) dikonversi menjadi meter, kemudian nilai tekanan dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$P = \rho g h \quad (1)$$

dengan:

$P$  = tekanan fluida (Pa)

$\rho$  = massa jenis air ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = selisih tinggi kolom manometer (m)

### 1) Pengukuran Kecepatan Aliran

Setelah didapatkan nilai tekanan dari Persamaan (1), kecepatan aliran udara dihitung menggunakan Persamaan Bernoulli tereduksi:

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{udara}}}} \quad (2)$$

dengan:

$V$  = kecepatan aliran (m/s)

$P$  = tekanan hasil perhitungan (Pa)

$\rho_{\text{udara}}$  = massa jenis udara ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ )

### 2) Perhitungan Head loss

*Head loss* akibat *sudden enlargement* dihitung menggunakan Persamaan (3), yang membandingkan tekanan dan kecepatan di sisi *upstream* ( $h_1$ ) dan *downstream* ( $h_2$ ):

$$h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{\text{udara}}} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (3)$$

dengan:

$h_L$  = *head loss total* (m)

$P_1$  = tekanan pada posisi  $h_1$  (Pa)

$P_2$  = tekanan pada posisi  $h_2$  (Pa)

$V_1$  = kecepatan pada posisi  $h_1$  (m/s)

$V_2$  = kecepatan pada posisi  $h_2$  (m/s)

$\rho_{\text{udara}}$  = massa jenis udara ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ )

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### a. Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada tiga variasi bentuk *sudden enlargement*, yaitu *Projecting Edge*, *Square Edge*, dan *Rounded Edge*, dengan dua tingkat laju aliran udara yang melalui instalasi pipa berdiameter 1 inci, yaitu 6 L/menit dan 4 L/menit. Pengukuran dilakukan menggunakan manometer U pada dua titik, yaitu h<sub>1</sub> pada diameter 12,7 mm dan h<sub>2</sub> pada diameter 50 mm.

Tabel 1 dan Tabel 2 berikut menyajikan data perubahan tinggi kolom manometer (mm), nilai rata-rata dalam meter, tekanan, kecepatan, dan *head loss* yang dihasilkan untuk setiap variasi geometri.

*Tabel 1. Hasil Pengujian pada Laju Aliran 6 L/menit*

Laju aliran 6 Liter/menit						
No.	<i>Projecting Edge</i>		<i>Square Edge</i>		<i>Rounded Edge</i>	
	<i>Sudden Enlargement</i>					
	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)
1.	9	6	9	6	10	7
2.	8	6	8	6	9	6
3.	9	5	10	7	10	7
Rata-rata (m)	0,0086	0,0056	0,009	0,0063	0,0096	0,0066
P (Pa)	84,37	54,94	88,29	61,80	94,18	64,75
V (m/s)	11,73	9,47	12,00	10,04	12,39	10,28
hl	47,98		43,22		47,94	

Dari Tabel 1, terlihat bahwa distribusi tekanan dan kecepatan menunjukkan perbedaan yang jelas antar bentuk *sudden enlargement*. Variasi *Square Edge* menghasilkan *head loss* paling rendah dibandingkan dua bentuk lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada laju aliran tinggi, geometri *Square Edge* mampu meminimalkan turbulensi sehingga energi yang hilang lebih kecil. Variasi *Rounded*

*Edge* menempati posisi kedua dengan nilai *head loss* yang moderat. Meski terdapat peningkatan turbulensi akibat pelebaran pipa, bentuk melengkung memberikan transisi aliran yang relatif lebih halus dibandingkan *Projecting Edge*. Sebaliknya, *Projecting Edge* menghasilkan *head loss* tertinggi. Hal ini mengindikasikan adanya separasi aliran yang besar akibat perubahan geometri yang ekstrem, sehingga menyebabkan turbulensi signifikan pada sisi *downstream*[11].

Tabel 2. Hasil Pengujian pada Laju Aliran 4 L/menit

No.	Laju aliran 4 Liter/menit					
	<i>Projecting Edge</i>		<i>Square Edge</i>		<i>Rounded Edge</i>	
	<i>Sudden Enlargement</i>					
	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)	$h_1$ (mm)	$h_2$ (mm)
1.	6	4	7	5	8	6
2.	7	4	7	4	9	6
3.	6	3	8	5	7	5
Rata-rata (m)	0,0063	0,0036	0,0073	0,0046	0,008	0,0056
P (Pa)	61,80	35,32	71,61	45,61	78,48	54,94
V (m/s)	10,04	7,59	10,81	8,58	11,31	9,47
$hl$	43,22		42,84		38,34	

Pada laju aliran lebih rendah (4 L/menit), perubahan tekanan dan kecepatan menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan pada 6 L/menit. Variasi *Rounded Edge* memiliki distribusi tekanan yang lebih stabil dan menghasilkan *head loss* paling rendah di antara ketiga bentuk. Hal ini menunjukkan bahwa pada laju aliran rendah, bentuk lengkung lebih efektif dalam menjaga kelancaran aliran. Variasi *Square Edge* menunjukkan performa mendekati *Rounded Edge*, sehingga tetap menjadi alternatif yang baik pada kondisi tertentu. Sementara itu, *Projecting Edge* kembali menghasilkan *head loss* terbesar, memperkuat temuan bahwa bentuk ini kurang optimal untuk efisiensi energi.

#### b. Analisis Perbandingan *Head loss*

Pada laju aliran 6 L/menit, nilai tekanan dan kecepatan menunjukkan perbedaan signifikan antar variasi geometri. Variasi *Square Edge* menghasilkan *head loss*

paling rendah dibandingkan dua geometri lainnya. Hal ini sejalan dengan temuan Lukács et al. (2021) bahwa perubahan geometri yang lebih tajam dapat meningkatkan pemisahan aliran (*flow separation*) dan pembentukan *vortex* pada daerah setelah pelebaran, sehingga meningkatkan kehilangan energi [11]. Sementara itu, *Rounded Edge* memberikan nilai *head loss* moderat karena transisi aliran yang lebih halus cenderung mengurangi separasi aliran [12]. Sebaliknya, *Projecting Edge* menghasilkan *head loss* tertinggi, sejalan dengan studi Miranda dan Oliveira (2019) yang menunjukkan bahwa *abrupt enlargement* meningkatkan distribusi kecepatan yang tidak seragam dan turbulensi lokal [13].

Pada laju aliran 4 L/menit, hasil menunjukkan pola berbeda dibandingkan laju tinggi. Variasi *Rounded Edge* menghasilkan *head loss* paling rendah, menunjukkan bahwa pada aliran laminar dengan kecepatan lebih kecil, bentuk transisi yang mulus mampu mengurangi pembentukan *eddies* dan fluktuasi kecepatan . Variasi *Square Edge* tetap menunjukkan performa baik, namun nilai *head loss*-nya sedikit lebih tinggi dibandingkan *Rounded Edge*. Variasi *Projecting Edge* kembali menghasilkan *head loss* terbesar, selaras dengan hasil penelitian Yao (2024) yang menemukan bahwa geometri dengan permukaan menonjol menyebabkan percepatan separasi aliran pada sisi upstream dan meningkatkan kerugian energi lokal [14].

### c. Pembahasan Karakteristik *Head loss*

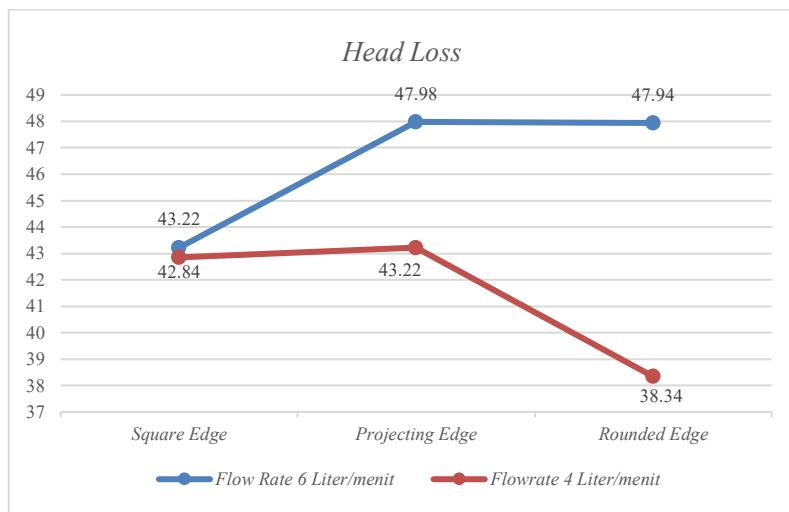
Perbedaan performa antar bentuk *sudden enlargement* dipengaruhi oleh mekanisme fisik yang terjadi ketika fluida memasuki area pelebaran mendadak. Pada geometri *Projecting Edge*, perubahan diameter yang sangat abrupt menyebabkan fluida kehilangan kontak tekanan dinding sehingga terjadi pemisahan aliran dan pembentukan *recirculation zone*. Fenomena ini diperjelas pada penelitian Dündar (2023), yang menunjukkan bahwa geometri tidak halus pada fitting pipa meningkatkan turbulensi mikro dan memperbesar koefisien kehilangan lokal [15]. Kondisi ini sesuai dengan hasil penelitian Anda yang menunjukkan bahwa *Projecting Edge* memiliki *head loss* tertinggi baik pada laju 6 L/menit maupun 4 L/menit.

Pada geometri *Rounded Edge*, radius lengkung membantu mempertahankan kestabilan aliran sehingga reduksi kecepatan lebih bertahap dan pelebaran penampang tidak langsung memicu separasi aliran. Penelitian oleh Oliveira et al. juga menemukan bahwa transisi lengkung mampu mengurangi intensitas fluktuasi kecepatan pada aliran laminar [16].

Sementara itu, *Square Edge* menunjukkan performa terbaik pada laju aliran 6 L/menit. Meskipun tepi pipa lebih tajam dibandingkan *Rounded Edge*, bentuk ini ternyata memberikan kehilangan energi lebih rendah pada kecepatan tinggi. Hal ini sesuai dengan studi lokal yang dilakukan Wibisono (2024), yang menyatakan bahwa pada debit besar, area pelebaran yang simetris dengan dinding lurus dapat menghasilkan pola aliran stabil setelah zona separasi terbentuk. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini juga sejalan dengan Rachmadani (2025), yang menunjukkan bahwa geometri *sudden enlargement* yang berbeda memberikan variasi signifikan pada besarnya *head loss* pada instalasi pipa berbahan akrilik [17].

#### d. Visualisasi *Head loss*

Untuk memperjelas perbedaan antar variasi bentuk *sudden enlargement*, hasil penelitian divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 2. Grafik ini menunjukkan besarnya *head loss* untuk setiap bentuk pada kedua variasi laju aliran.



Gambar 2. Grafik *Head loss* pada Berbagai Bentuk *Sudden enlargement*

Grafik *head loss* (Gambar 2) memperjelas bahwa setiap variasi bentuk memiliki karakteristik yang berbeda terhadap perubahan laju aliran. Pada laju tinggi, *Square*

*Edge* paling optimal karena aliran memiliki momentum cukup besar untuk melewati tepi tajam tanpa terjadi separasi yang signifikan. Namun pada laju rendah, *Rounded Edge* menjadi geometri terbaik karena aliran laminar lebih sensitif terhadap bentuk dinding dan lebih mudah mengalami separasi pada tepi yang tajam. Fenomena ini selaras dengan penjelasan teori oleh Fiorillo (2024), yang menyebut bahwa pola aliran laminar sangat dipengaruhi oleh kontur dinding dan gradien tekanan lokal [17].

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

##### a. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian terhadap tiga variasi bentuk *sudden enlargement*—*Projecting Edge*, *Square Edge*, dan *Rounded Edge*—pada dua laju aliran yaitu 6 L/menit dan 4 L/menit, dapat disimpulkan bahwa bentuk geometri memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besarnya *head loss*. Pada laju aliran tinggi (6 L/menit), bentuk *Square Edge* menunjukkan performa paling efisien karena menghasilkan *head loss* terendah dibandingkan dua variasi lainnya. Sementara itu, pada laju aliran rendah (4 L/menit), bentuk *Rounded Edge* memberikan performa terbaik akibat transisi aliran yang lebih halus sehingga kehilangan energi lebih kecil. Di sisi lain, bentuk *Projecting Edge* secara konsisten memberikan *head loss* terbesar pada kedua kondisi laju aliran, yang menunjukkan bahwa geometri ini menimbulkan separasi aliran dan turbulensi lebih tinggi. Secara umum, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan bentuk *sudden enlargement* harus mempertimbangkan laju aliran operasional karena tidak ada satu geometri yang unggul dalam semua kondisi.

##### b. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas rentang laju aliran agar karakteristik performa setiap geometri dapat diamati pada kondisi operasi yang lebih beragam. Selain itu, penggunaan metode visualisasi aliran seperti *smoke flow*, tracer particles, atau teknik PIV dapat memberikan gambaran yang lebih detail mengenai pola turbulensi dan separasi aliran yang terjadi pada masing-masing geometri. Pengembangan simulasi berbasis CFD juga dapat menjadi pelengkap analisis eksperimen untuk memprediksi perilaku aliran secara lebih komprehensif.

Selain itu, variasi material pipa dan perbedaan kekasaran permukaan perlu diteliti untuk melihat pengaruh faktor tersebut terhadap kehilangan energi. Penambahan variasi sudut dan rasio pelebaran juga akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai optimasi desain *sudden enlargement* pada sistem perpipaan nyata.

## 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ucapan terima kasih kepada seluruh staff di ruang lingkup Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan maupun teman-teman seperjuangan yang telah membantu dalam keberhasilan penelitian ini.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Maulana and W. Sujana, “Analisa Variasi Foot Valve Dan Jatuh Air Terhadap Karakteristik Pada Pompa Sentrifugal,” *Flywheel*, vol. 12, no. 2, pp. 10–13, 2021.
- [2] D. Arighi Dwi Hersandi, “Pengaruh Jenis Fluida Pendinginan Terhadap Kapasitas Radiator Pada Sistem Pendnginan Mesin Daihatsu Xenia 1300cc,” *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 3, pp. 41–52, 2018.
- [3] Baharuddin, B. Shintarayu, and Y. L. Sialla, “Pengaruh Variasi Sambungan dan Katup terhadap Perubahan Kecepatan , Pressure Drop dan Koefisien Gesek pada Aliran Fluida dalam Pipa,” *J. Ris. Teknol. Terap. Kemaritiman*, vol. 2, no. 2, pp. 73–77, 2023, doi: 10.25042/jrt2k.122022.05.
- [4] I. Syahrizal and D. Perdana, “Kajian Eksperimen Instalasi Pompa Seri dan Paralel Terhadap Efisiensi Penggunaan Energi,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 194–200, 2019.
- [5] A. Fahrudin and M. Mulyadi, “Rancang Bangun Alat Uji *Head losses* Dengan Variasi Debit Dan Jarak Elbow 900 Untuk Sistem Perpipaan Yang Efisien,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 32–35, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.680.
- [6] L. Zeghadnia, J. L. Robert, and B. Achour, “Explicit solutions for turbulent flow friction factor : A review , assessment and approaches classification,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 243–252, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.10.007.
- [7] H. Alkindi, H. Santosa, and E. Sutoyo, “Analisis *Head losses* Pada Circulating Fluida Air Dalam Dua Jenis Pipa,” *J. Ilm. Tek. Mesin AME*, vol. 9, no. 1, pp. 51–56, 2023.

- [8] J. González, A. Meana-Fernández, I. V. Pérez, and J. M. F. Oro, “Minor Loss Coefficient for Abrupt Section Changes in a Cylindrical Pipe Using a Numerical Approach,” *Fluids*, vol. 9, 2024, doi: 10.3390/fluids9070152.
- [9] M. H. Nguyen and T. S. Ha, “Minor *Head loss* Analysis of Laminar Fluid Flow in Complex Geometries,” *J. Sci. Tech.*, vol. 18, no. 3, pp. 5–18, 2023, doi: 10.56651/lqdtu.jst.v18.n03.728.
- [10] A. Arabi, Y. Salhi, Y. Zenati, E.-K. Si-Ahmed, and J. Legrand, “Journal of Petroleum Science and Engineering Experimental investigation of sudden expansion ’ s influence on the hydrodynamic behavior of different sub-regimes of intermittent flow,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 205, p. 108834, 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2021.108834.
- [11] E. Lukacs and J. Vad, “Flow topology and loss analysis of a square-to-square sudden expansion relevant to HVAC systems : A case study,” *J. Build. Eng.*, vol. 41, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102802.
- [12] P. Gavriilidis and K. Roberts, “Comparison of robotic vs laparoscopic vs open distal pancreatectomy. A systematic review and network meta-analysis,” *HPB*, vol. 21, May 2019, doi: 10.1016/j.hpb.2019.04.010.
- [13] G. B. Arundhati, M. Bahrul, and R. Indrayati, “Collective Food Security under the Framework of the ASEAN Community : A Reflection from Indonesia ’ s Food Policy,” *J. Law*, vol. 6, no. 1, pp. 1–26, 2019.
- [14] T. Yao, “Research on the Local *Head loss* Coefficient in Short- Tube Hydraulic Testing,” in *Proceedings of the 2024 3rd International Conference on Applied Mechanics and Engineering Structures (AMES 2024)*, 2024. doi: 10.2991/978-94-6463-473-0.
- [15] O. Dündar, I. H. Özölçer, and E. Doğan, “Experimental and Numerical Determination of *Head loss* Coefficients of Two-Way Surcharged Manholes,” *Water*, vol. 15, 2023.
- [16] C. G. Carson, J. L. Cummings, R. J. Poole, K. Zografos, and M. S. N. Oliveira, “Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics Multiple inlet sudden expansion flow of power-law fluids,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 320, p. 105102, 2023, doi: 10.1016/j.jnnfm.2023.105102.
- [17] F. Fiorillo, L. Esposito, M. Ginolfi, and G. Leone, “New Insights into Turbulent and Laminar Flow Relationships,” *Water*, vol. 16, 2024.