



PENURUNAN TEKANAN ALIRAN AIR PADA *MULTI-HOLE ORIFICE*: PENGARUH MATERIAL DAN JUMLAH LUBANG

Fortinov Akbar Irdam^{a*}, Amnur Akhyan^a, Mustaza Ma'a^a, Fauzan Al Habib^a, Audina Khairunnisa^a, Rizky Fahreza^a, Amar Assalam El Humami^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknologi Industri, Politeknik Caltex Riau, Jl. Umban Sari No. 1 Rumbai, Pekanbaru 28265, Indonesia

*Corresponding authors at: fortinov@pcr.ac.id; (F.A. Irdam) Tel.: +62813-1047-8582

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 19 Januari 2026

Direvisi pada 19 Juli 2026

Disetujui pada 30 Juli 2026

Tersedia daring pada 31 Juli 2026

Kata kunci:

Multi-hole orifice, Aliran fluida, Penurunan tekanan, Modulus elastisitas, Karakteristik material.

Keywords:

Multi-hole orifice, *Fluid flow*, *Pressure drop*, *Elasticity's Modulus*, *Material characteristics*.

ABSTRAK

Pelat *orifice* banyak digunakan untuk mengukur laju aliran dalam pipa, tetapi penyempitan penampangnya menimbulkan kehilangan tekanan permanen yang dapat meningkatkan kebutuhan energi sistem. Kajian ini mengevaluasi pengaruh material dan jumlah lubang pada *multi-hole orifice* (MHO) terhadap penurunan tekanan aliran air. Enam konfigurasi dibuat dari kuningan, tembaga, dan aluminium dengan variasi 4 dan 9 lubang, ketebalan 0,10 mm, diameter pelat 25,4 mm, serta luas bukaan total yang relatif sama. Pengujian menggunakan air bersuhu 25 °C pada debit 50 dan 60 LPM; penurunan tekanan dihitung dari selisih tekanan *upstream* dan *downstream*. Tembaga 4 lubang menghasilkan nilai rata-rata tertinggi sebesar 0,225 bar. Rata-rata berdasarkan material adalah 0,205 bar untuk tembaga, 0,180 bar untuk kuningan, dan 0,173 bar untuk aluminium. Secara keseluruhan, MHO 9 lubang menghasilkan 0,175 bar, sekitar 11,2% lebih rendah daripada MHO 4 lubang sebesar 0,197 bar. Namun, aluminium 9 lubang menunjukkan anomali sebesar 0,200 bar dibandingkan 0,145 bar pada aluminium 4 lubang. Penyimpangan ini diduga berkaitan dengan deformasi, *pitch*, toleransi fabrikasi, dan ketebalan pelat. Jumlah lubang menunjukkan pengaruh yang lebih konsisten, sedangkan pengaruh material perlu diverifikasi dengan pengendalian geometri dan deformasi yang lebih ketat.

ABSTRACT

Orifice plates are widely used to measure pipe flow rates, but the restriction they create causes permanent pressure loss and may increase system energy demand. This study evaluated the effects of material and hole number in a multi-hole orifice (MHO) on the pressure drop of water flow. Six configurations were made from brass, copper, and aluminium with 4 and 9 holes, a thickness of 0.10 mm, a plate diameter of 25.4 mm, and an approximately constant total open area. Tests were conducted with water at 25 °C and flow rates of 50 and 60 LPM; pressure drop was calculated from the upstream-downstream pressure difference. The 4-hole copper plate produced the highest average value of 0.225 bar. Material-based averages were 0.205 bar for copper, 0.180 bar for brass, and 0.173 bar for aluminium. Overall, the 9-hole MHO produced 0.175 bar, approximately 11.2% lower than the 0.197 bar obtained with the 4-hole MHO. However, the 9-hole aluminium plate showed an anomalous value of 0.200 bar compared with 0.145 bar for the 4-hole plate. This deviation was likely related to deformation, hole pitch, fabrication tolerances, and plate thickness. Hole number showed the more consistent effect, whereas the material effect requires verification under better-controlled geometric and deformation conditions.

1. PENGANTAR

Fluida memiliki peran penting dalam berbagai sistem teknik, antara lain sebagai media penyimpanan dan penghasil energi, pendingin, pelumas, pemindah massa, peredam getaran, serta penggerak sistem mekanis (Wardhany dkk., 2025; Zhang dkk., 2025; Purwanti dkk., 2022). Oleh karena itu, karakteristik aliran perlu dipahami dan dikendalikan agar fluida dapat menjalankan fungsinya secara efisien. Dalam sistem perpipaan, fluida dialirkan melalui saluran tertutup berbentuk silinder yang disebut pipa (Singh & Heldman, 2008). Pengaturan aliran membutuhkan data laju alir dan tekanan yang akurat sebagai dasar evaluasi kinerja, pengendalian proses, serta perhitungan kebutuhan energi (Bikić dkk., 2022). Laju aliran umumnya diukur menggunakan flowmeter. Salah satu kelompok instrumen yang banyak diterapkan

bekerja berdasarkan perbedaan tekanan akibat penyempitan penampang aliran (Đurđević dkk., 2019). Ketika luas penampang mengecil, kecepatan fluida meningkat dan tekanan statis menurun sehingga terbentuk perbedaan tekanan yang dapat dikorelasikan dengan laju alir (Vemulapalli & Venkata, 2022).

Pelat orifice merupakan flowmeter diferensial yang banyak digunakan karena konstruksinya sederhana, andal, mudah dirawat, dan memiliki umur pakai yang panjang (Zeghloul dkk., 2018). Pelat ini menghasilkan perbedaan tekanan antara sisi upstream dan downstream yang digunakan untuk menentukan laju alir (Đurđević dkk., 2021). Meskipun demikian, pembentukan vena contracta, turbulensi, dan separasi aliran menimbulkan kehilangan tekanan permanen (*irrecoverable pressure loss*) yang dapat menurunkan efisiensi sistem perpipaan (Morris & Langari, 2012). Đurđević dkk. (2019) membandingkan single-hole orifice (SHO) dan multi-hole orifice (MHO) pada aliran gas dengan variasi rasio diameter β . Konfigurasi MHO dengan nilai β yang lebih besar menghasilkan penurunan tekanan lebih rendah, meskipun sensitivitasnya terhadap perubahan laju alir juga lebih kecil. Simulasi computational fluid dynamics (CFD) selanjutnya menunjukkan kecocokan dengan hasil eksperimen dengan kesalahan sekitar 0,65% (Đurđević dkk., 2021). Pada aliran dua fasa cair-gas, penambahan jumlah lubang pada pelat orifice dilaporkan menurunkan slip ratio dan menghasilkan penurunan tekanan yang lebih rendah (Zeghloul dkk., 2018). Temuan tersebut menunjukkan bahwa distribusi aliran melalui beberapa lubang dapat mengurangi intensitas jet dan memperbaiki pemulihan tekanan dibandingkan konfigurasi dengan jumlah lubang yang lebih sedikit.

Kajian numerik terhadap berbagai geometri pelat orifice menunjukkan bahwa bentuk streamlined approach dapat menghasilkan penurunan tekanan yang lebih rendah (Sanghani & Jayani, 2016). Studi eksperimental dan CFD lainnya juga mengonfirmasi bahwa MHO memerlukan daya pompa yang lebih kecil dibandingkan SHO pada kondisi pengujian yang setara (Hariguru & Srinivasan, 2023). Selain jumlah dan bentuk lubang, rasio ketebalan pelat terhadap diameter lubang memengaruhi pola aliran serta kehilangan tekanan. Qiao dkk. (2019) melaporkan bahwa perubahan rasio tersebut mengubah karakteristik aliran dua fasa yang melewati pelat orifice. Dengan demikian, geometri lubang, ketebalan pelat, dan distribusi bukaan perlu dikendalikan secara bersamaan. Posisi pemasangan pelat juga memengaruhi hasil pengukuran. Penurunan tekanan yang lebih besar ditemukan ketika SHO dipasang pada entrance region, yaitu saat profil kecepatan belum berkembang penuh, dibandingkan pada fully developed flow region (Akhyani & Arviansyah, 2023). Perbedaan tersebut berkaitan dengan ketidakseragaman profil kecepatan sebelum aliran mencapai kondisi berkembang penuh (Molki dkk., 2013; Sauer, 2026).

Analisis CFD terhadap variasi posisi dan ketebalan SHO menunjukkan bahwa pelat yang lebih tipis dan ditempatkan pada daerah aliran berkembang penuh menghasilkan penurunan tekanan yang lebih rendah (Irdam dkk., 2025). Temuan ini menegaskan bahwa interpretasi pengaruh jumlah lubang harus mempertimbangkan ketebalan, lokasi pemasangan, dan kualitas fabrikasi pelat. Sebagian besar kajian terdahulu berfokus pada geometri, rasio β , ketebalan, dan posisi pemasangan, sedangkan pengaruh sifat mekanik material pelat terhadap penurunan tekanan masih jarang dibahas. Perbedaan modulus elastisitas dapat memengaruhi kecenderungan deformasi dan getaran pelat ketika menerima gaya hidrodinamik, yang selanjutnya berpotensi mengubah distribusi aliran dan pembacaan tekanan. Berdasarkan kesenjangan tersebut, kajian ini mengevaluasi pengaruh material pelat—kuningan, tembaga, dan aluminium—serta jumlah lubang, yaitu 4 dan 9 lubang, terhadap penurunan tekanan aliran air dalam pipa. Kebaruan kajian terletak pada perbandingan eksperimental konfigurasi MHO dengan luas bukaan total dan ketebalan nominal yang sama, tetapi menggunakan material dengan karakteristik kekakuan berbeda. Hasilnya diharapkan memberikan dasar untuk memilih konfigurasi MHO yang menghasilkan kehilangan tekanan lebih rendah serta mengidentifikasi keterbatasan penggunaan pelat tipis pada material yang mudah terdeformasi.

2. METODE

Kajian ini menggunakan metode eksperimental untuk membandingkan penurunan tekanan pada enam konfigurasi pelat *multi-hole orifice* (MHO), yaitu kombinasi tiga material—kuningan, tembaga, dan aluminium—dengan dua jumlah lubang, yaitu 4 dan 9 lubang. Setiap konfigurasi diuji pada debit 50 dan 60 LPM menggunakan air sebagai fluida kerja. Analisis didasarkan pada prinsip Bernoulli, pembentukan *vena contracta*, serta kemungkinan pengaruh kekakuan material terhadap deformasi pelat.

2.1 Teorema Bernoulli

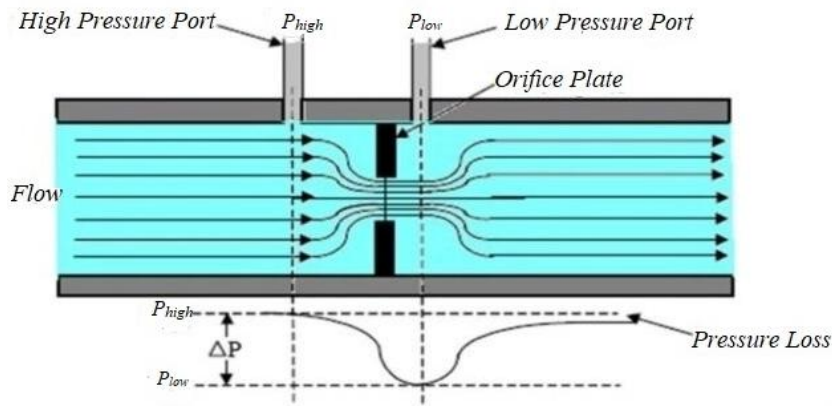
Untuk aliran tunak, inkompresibel, dan tanpa penambahan atau pengambilan energi di antara dua titik pengukuran, hubungan tekanan, kecepatan, dan elevasi dapat dijelaskan menggunakan Persamaan (1) berdasarkan teorema Bernoulli (Fox dkk., 2011). Peningkatan kecepatan pada daerah penyempitan menyebabkan penurunan tekanan statis.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gz = c \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), p menyatakan tekanan, ρ massa jenis fluida, v kecepatan aliran, g percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$, dan z elevasi terhadap titik referensi. Persamaan tersebut menjelaskan konservasi energi mekanik sepanjang garis arus pada asumsi aliran ideal. Pelat *orifice* menerapkan prinsip tersebut melalui penyempitan penampang. Fluida dipercepat ketika melewati lubang-lubang pelat, sehingga tekanan pada sisi *downstream* lebih rendah daripada tekanan *upstream*. Selisih kedua tekanan digunakan sebagai parameter utama dalam kajian ini.

2.2 Vena Contracta

Ketika fluida melewati bukaan yang lebih kecil daripada luas penampang pipa, garis arus terus menyempit sesaat setelah pelat dan membentuk daerah dengan luas aliran minimum yang disebut *vena contracta* (Fox dkk., 2011). Fenomena dan profil tekanan akibat pemasangan pelat orifice ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Vena contracta akibat pemasangan pelat orifice pada aliran fluida dalam pipa (Zhang dkk., 2026)

Vena contracta membentuk jet berkecepatan tinggi, separasi aliran, dan zona resirkulasi di sisi downstream. Proses pencampuran kembali setelah penyempitan menghasilkan disipasi energi dan kehilangan tekanan permanen (Zhang dkk., 2026). Besarnya kehilangan ini dipengaruhi oleh geometri bukaan, distribusi lubang, ketebalan pelat, dan kondisi aliran.

2.3 Tegangan dan Regangan

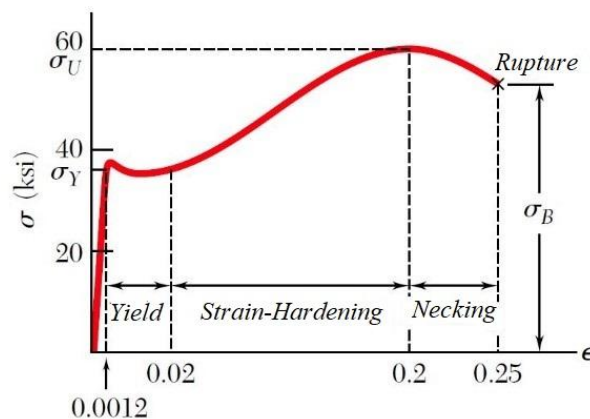
Beban hidrodinamik yang bekerja pada pelat dapat menimbulkan tegangan dan regangan. Tegangan merupakan gaya internal per satuan luas yang muncul sebagai respons terhadap pembebanan, sedangkan regangan merupakan perubahan dimensi relatif terhadap dimensi awal. Gaya dari aliran bekerja terutama tegak lurus terhadap bidang pelat, sehingga pendekatan tegangan normal digunakan untuk menjelaskan respons mekaniknya. Secara umum, tegangan normal dihitung menggunakan Persamaan (2) (Beer, 2012).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Pada Persamaan (2), σ menyatakan tegangan normal, F gaya yang bekerja pada pelat, dan A luas penampang yang menerima gaya. Hubungan ini digunakan sebagai dasar konseptual untuk menjelaskan kemungkinan deformasi akibat beban aliran, bukan untuk menghitung tegangan aktual karena gaya hidrodinamik dan deformasi tidak diukur secara langsung.

2.4 Kekakuan Material

Kekakuan menunjukkan kemampuan material mempertahankan bentuk ketika menerima beban. Material dengan kekakuan lebih tinggi mengalami regangan elastis yang lebih kecil pada tingkat tegangan yang sama, sedangkan material yang lebih lentur lebih mudah mengalami perubahan bentuk.



Gambar 2: Kurva Tegangan – Regangan pada material baja karbon rendah (Beer, 2012)

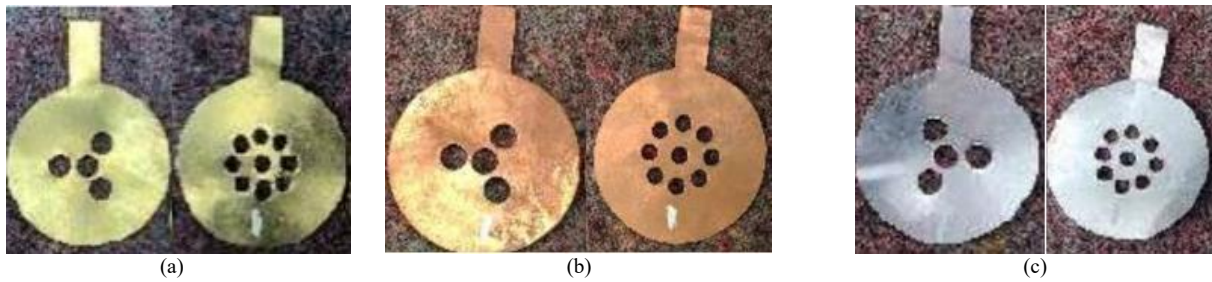
Kekakuan elastis dinyatakan melalui modulus elastisitas atau modulus Young, yaitu kemiringan bagian linier pada kurva tegangan-regangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah elastis mengikuti Hukum Hooke yang dinyatakan dalam Persamaan (3) (Beer, 2012).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Pada Persamaan (3), σ menyatakan tegangan, E modulus elastisitas, dan ε regangan. Nilai E digunakan untuk membandingkan kecenderungan kekakuan material, tetapi pengaruhnya terhadap penurunan tekanan perlu dianalisis bersama geometri, ketebalan, deformasi, dan getaran pelat.

2.5 Plat Orifice

Pelat *orifice* merupakan elemen ukur yang memanfaatkan perbedaan tekanan antara sisi *upstream* dan *downstream*. Konfigurasi yang digunakan adalah MHO dengan beberapa lubang berdiameter sama yang disusun pada permukaan pelat.



Gambar 3: Plat *orifice* 4 lubang dan 9 lubang (a) material kuningan, (b) material tembaga, dan (c) material aluminium

Tabel 1: Ukuran dari Plat *Orifice*

Jumlah Lubang	Diameter Lubang (mm)	Ketebalan Plat (mm)	Diameter Plat (mm)
4	7,50	0,10	25,4
9	5,00		

Gambar 3 menunjukkan pelat MHO dari kuningan, tembaga, dan aluminium dengan variasi 4 dan 9 lubang. Dimensi setiap konfigurasi dirangkum pada Tabel 1. Pelat memiliki diameter 25,4 mm dan ketebalan nominal 0,10 mm. Diameter setiap lubang adalah 7,50 mm untuk konfigurasi 4 lubang dan 5,00 mm untuk konfigurasi 9 lubang. Total luas bukaan dirancang relatif sama agar pengaruh jumlah lubang dan material dapat dibandingkan dengan gangguan perubahan open area ratio (OAR) yang minimal.

2.6 Kondisi Eksperimen dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan pada sistem sirkulasi tertutup yang ditunjukkan pada Gambar 4 menggunakan air bersuhu sekitar 25 °C. Air dipompa dari tangki, dialirkan melalui pipa dan pelat MHO, kemudian dikembalikan ke tangki. Debit diatur sebesar 50 dan 60 LPM dan dibaca menggunakan rotameter. Proses pemasangan serta pengaturan kondisi uji ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4: Sistem pengukuran aliran fluida dalam pipa



Gambar 5: Proses pengaturan eksperimen



Gambar 6: Pengambilan data tekanan

Tekanan diukur menggunakan *pressure gauge* pada titik *upstream* dan *downstream* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Penurunan tekanan setiap konfigurasi ditentukan sebagai selisih antara tekanan *upstream* dan tekanan *downstream*. Nilai pada kedua debit kemudian dibandingkan berdasarkan material dan jumlah lubang. Karena dokumen sumber tidak melaporkan pengulangan pengujian maupun ketidakpastian alat ukur, hasil dianalisis sebagai nilai observasi dan tidak digunakan untuk menyatakan signifikansi statistik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari pengambilan data yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2 untuk material kuningan, Tabel 3 untuk material tembaga, dan Tabel 4 untuk material aluminium.

Tabel 2: Data Tekanan Material Kuningan

Jumlah Lubang	Debit (LPM)	Tekanan <i>Upstream</i> (bar)	Tekanan <i>Downstream</i> (bar)
4	50	0,22	0,02
	60	0,28	0,04
9	50	0,16	0,02
	60	0,22	0,08

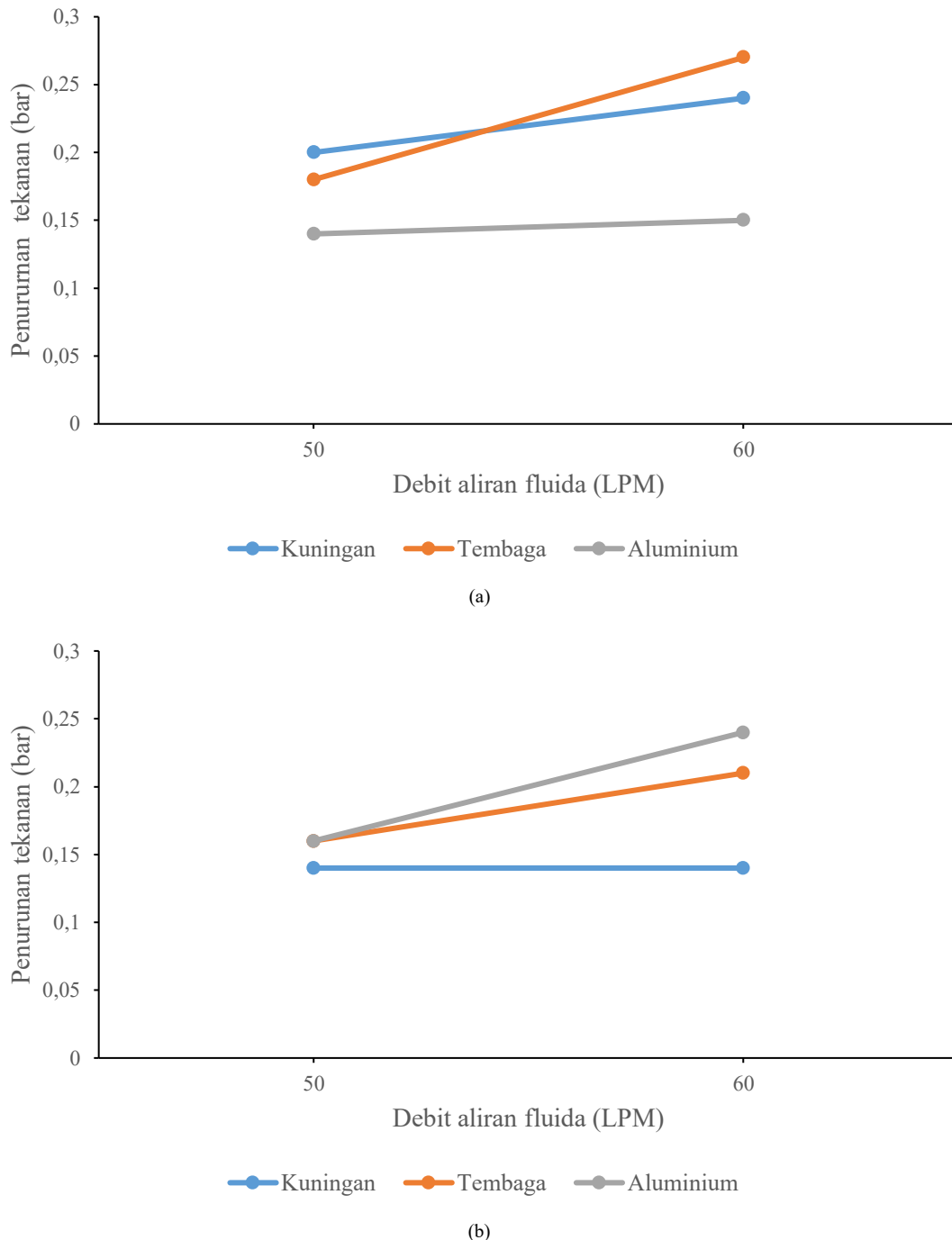
Tabel 3: Data Tekanan Material Tembaga

Jumlah Lubang	Debit (LPM)	Tekanan <i>Upstream</i> (bar)	Tekanan <i>Downstream</i> (bar)
4	50	0,26	0,08
	60	0,37	0,10
9	50	0,18	0,02
	60	0,31	0,10

Tabel 4: Data Tekanan Material Aluminium

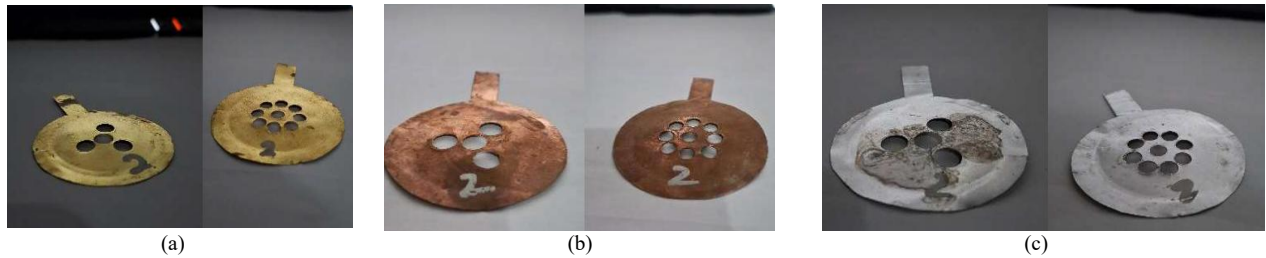
Jumlah Lubang	Debit (LPM)	Tekanan <i>Upstream</i> (bar)	Tekanan <i>Downstream</i> (bar)
4	50	0,18	0,04
	60	0,25	0,10
9	50	0,22	0,06
	60	0,34	0,10

Data tekanan *upstream* dan *downstream* untuk pelat kuningan, tembaga, dan aluminium disajikan pada Tabel 2–4. Peningkatan debit dari 50 menjadi 60 LPM umumnya meningkatkan penurunan tekanan karena kecepatan aliran dan energi kinetik yang melewati bukaan bertambah. Kecenderungan tersebut terlihat pada seluruh konfigurasi, kecuali pelat kuningan 9 lubang yang menghasilkan penurunan tekanan tetap sebesar 0,14 bar pada kedua debit. Dengan demikian, pengaruh debit bersifat dominan, tetapi respons setiap pelat tetap dipengaruhi oleh konfigurasi lubang dan kondisi fisiknya. Gambar 7 memperlihatkan perbandingan penurunan tekanan pada setiap debit. Untuk konfigurasi 4 lubang, penurunan tekanan rata-rata sebesar 0,220 bar pada kuningan, 0,225 bar pada tembaga, dan 0,145 bar pada aluminium. Untuk konfigurasi 9 lubang, nilai rata-ratanya masing-masing sebesar 0,140; 0,185; dan 0,200 bar. Jika dikelompokkan berdasarkan material, tembaga menghasilkan rata-rata tertinggi sebesar 0,205 bar, diikuti kuningan 0,180 bar dan aluminium 0,173 bar. Berdasarkan jumlah lubang, konfigurasi 9 lubang menghasilkan rata-rata 0,175 bar, sekitar 11,2% lebih rendah daripada konfigurasi 4 lubang sebesar 0,197 bar.



Gambar 7: Penurunan tekanan yang terjadi pada instalasi plat *orifice* (a) 4 lubang, dan (b) 9 lubang

Penurunan tekanan terutama disebabkan oleh percepatan aliran pada bukaan, pembentukan *vena contracta*, separasi aliran, dan pencampuran turbulen di sisi *downstream*. Pada luas bukaan total yang relatif sama, pembagian aliran melalui lebih banyak lubang membentuk beberapa jet berdiameter lebih kecil dan mendistribusikan aliran pada area pelat yang lebih luas. Distribusi tersebut dapat mempercepat pemulihan profil aliran serta mengurangi intensitas zona resirkulasi dibandingkan konfigurasi dengan jumlah lubang lebih sedikit (Idelchik dkk., 2007). Mekanisme ini mendukung nilai rata-rata penurunan tekanan yang lebih rendah pada konfigurasi 9 lubang. Kecenderungan pengurangan tekanan pada jumlah lubang yang lebih banyak terlihat pada kuningan dan tembaga, tetapi tidak pada aluminium. Pelat aluminium 9 lubang menghasilkan rata-rata 0,200 bar, sedangkan konfigurasi 4 lubangnya hanya 0,145 bar. Penyimpangan ini menunjukkan bahwa jumlah lubang bukan satu-satunya parameter yang menentukan kehilangan tekanan. Jarak antarlubang (*pitch*), keseragaman diameter dan posisi lubang, kualitas tepi hasil fabrikasi, serta perubahan bentuk pelat dapat mengubah arah jet dan distribusi aliran (Idelchik dkk., 2007). Perbedaan material juga berhubungan dengan respons mekanik pelat. Modulus elastisitas tembaga sekitar 120 GPa, kuningan sekitar 105–120 GPa, dan aluminium sekitar 70–73 GPa (Beer, 2012). Pelat yang lebih kaku cenderung mempertahankan geometri bukaan ketika menerima beban aliran, sedangkan pelat yang lebih lentur lebih mudah bergetar atau terdeformasi. Namun, data ini belum cukup untuk menyimpulkan hubungan kausal langsung antara modulus elastisitas dan penurunan tekanan karena deformasi, getaran, kekasaran, toleransi dimensi, dan gaya hidrodinamik tidak diukur. Oleh sebab itu, perbedaan nilai antar material harus dipandang sebagai hasil gabungan sifat material dan kondisi fabrikasi.



Gambar 8: Kondisi deformasi yang terjadi pada plat orifice 4 lubang dan 9 lubang setelah eksperimen dilakukan (a) material kuningan, (b) material tembaga, dan (c) material aluminium

Konfigurasi tembaga 4 lubang menghasilkan penurunan tekanan rata-rata tertinggi sebesar 0,225 bar, bukan pelat baja maupun konfigurasi tembaga 9 lubang. Gambar 8 memperlihatkan perubahan bentuk yang lebih jelas pada beberapa pelat setelah pengujian, terutama aluminium. Ketebalan seluruh pelat dibuat sama sebesar 0,10 mm, meskipun ASME MFC-3M menetapkan batasan geometri dan ketebalan pelat berdasarkan ukuran sistem ukur. Penggunaan ketebalan yang sama untuk material dengan kekakuan berbeda berpotensi menghasilkan deformasi dan getaran yang tidak setara, sehingga menjelaskan sebagian anomali pada aluminium 9 lubang. Secara umum, hasil mendukung kecenderungan bahwa penambahan jumlah lubang menurunkan kehilangan tekanan, tetapi pengaruh material belum dapat dipisahkan secara meyakinkan dari geometri dan kualitas pelat.

4. KESIMPULAN

Variasi jumlah lubang dan material memengaruhi penurunan tekanan aliran air pada pelat multi-hole orifice. Konfigurasi tembaga 4 lubang menghasilkan penurunan tekanan rata-rata tertinggi sebesar 0,225 bar. Berdasarkan material, nilai rata-rata penurunan tekanan adalah 0,205 bar untuk tembaga, 0,180 bar untuk kuningan, dan 0,173 bar untuk aluminium. Secara keseluruhan, konfigurasi 9 lubang menghasilkan rata-rata 0,175 bar, sekitar 11,2% lebih rendah daripada konfigurasi 4 lubang sebesar 0,197 bar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembagian aliran melalui jumlah lubang yang lebih banyak cenderung mengurangi kehilangan tekanan karena distribusi jet dan pemulihan aliran menjadi lebih merata. Pelat aluminium menunjukkan penyimpangan: konfigurasi 9 lubang menghasilkan 0,200 bar, lebih tinggi daripada konfigurasi 4 lubang sebesar 0,145 bar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengaruh material tidak dapat dijelaskan hanya melalui modulus elastisitas, tetapi juga dipengaruhi oleh deformasi, getaran, pitch, toleransi fabrikasi, dan penggunaan ketebalan pelat yang sama untuk material dengan kekakuan berbeda. Oleh karena itu, konfigurasi MHO dengan jumlah lubang lebih banyak berpotensi menurunkan kehilangan tekanan, tetapi pemilihan material harus disertai pengendalian geometri dan ketebalan sesuai standar. Pengujian lanjutan perlu menggunakan pengulangan, analisis ketidakpastian, pengukuran deformasi dan getaran, variasi ketebalan sesuai ASME MFC-3M, serta pengaturan pitch yang terkontrol agar kontribusi setiap parameter dapat ditentukan secara kuantitatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Politeknik Caltex Riau, melalui Bagian Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (BP2M) atas dukungan yang telah diberikan terhadap penelitian ini melalui program Hibah Internal Penelitian untuk tahun anggaran 2025.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhyan, A., & Arviansyah, Mhd. (2023). Pengaruh Variasi Tebal Orifice Lubang Tunggal Terhadap Pressure Drop dan Discharge Coefficient Pada Daerah Entrance dan Fully Developed. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2).
- Amril, A., Tunggadewi, D. A., & Santoso, H. H. (2017). Perancangan Sistem Monitoring Meter untuk Aplikasi Meter Orifice Menggunakan Perangkat Lunak PI ProcessBook. *Jurnal Ilmiah GIGA*, 20(2), 57–63.
- Ba-abbad, M. A., Alrougy, I., & Alalweat, F. (2024). Techno-Economic Analysis of Implementing Pumped Hydro Energy Storage to Store Solar and Wind Energy in Water-Stressed Areas. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 98). Elsevier Ltd.
- Beer, F. P. . (2012). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.
- Bikić, S., Đurđević, M., Bukurov, M., & Tašin, S. (2022). Comparison of Single-Hole and Multi-Hole Orifice Energy Consumption. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(1).
- Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., & Ahmed, M. (2006). Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2), 299–304.

- Di Lorenzo, G., Romano, D. G., Carozza, A., & Pagano, A. (2025). Nanofluids as Coolants to Improve the Thermal Management System of a High-Power Aircraft Electric Motor. *Electronics (Switzerland)*, 14(5).
- Đurđević, M., Bukurov, M., Tašin, S., & Bikić, S. (2021). Numerical Study of Single-Hole and Multi-Holes Orifice Flow Parameters. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14(1), 215–226.
- Hameed, R. M., Kareem, A. H., Marhoon, I. I., Eleiwi, M. A., & Majdi, H. S. (2025). Optimizing Magnetorheological and Performance of Vehicles Suspension (MR) Damper, the Role of Ferromagnetic Particle Diameter. *Journal Europeen Des Systemes Automatisés*, 58(6), 1245–1256.
- Hariguru, T. M., & Srinivasan, S. (2023). The Effect of Differential Pressure and Permanent Pressure Loss on Multi-Hole Orifice Plate. *Measurement Science Review*, 23(5), 227–236.
- Irdam, F. A., Tanjung, M., & Akhyan, A. (2025). CFD Analysis of Orifice Placement and Thickness on Pressure Drop in Entrance and Fully-Developed Flow Regions. *Jurnal Dinamis (Scientific Journal of Mechanical Engineering)*, 13(2), 8–16.
- Chidraoui, A. M., Minvielle, Z.A., Coste, P., Raimondi, N. D. M., & Cabassud, M. (2025). Mass Transfer Investigation in Liquid-Liquid Two-Phase Flow in A Corrugated Millichannel. *Chemical Engineering Journal Advances*, 22.
- Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Khanna, N. (2022). Analysis of Vegetable Oil-Based Nano-Lubricant Technique for Improving Machinability of Inconel 690. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 708–721.
- Mangengke, J. S., & Marsudi, S. (2024). Analysis of Cooling System Abnormalities in Diesel Generators at MV. Meratus Kahayan. *Jurnal Aplikasi Pelayaran Dan Kepelabuhanan*, 14(2), 107–113.
- Purwanti, A., Setyo Arbintarso, E., Setyowati Rahayu, S., Rahayu Gusmarwani, S., Puri Dwi Pangestu, M., & Prayogo, W. (2022). Optimization Of Biogas Production From Tofu Wastewater. *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology JEEST*, 09(01), 24–29.
- Rampen, W., Munko, M. J., Dubon, S. L., & Cuthill, F. (2025). Regenerative Structural Fatigue Testing with Digital Displacement Pump/Motors †. *Actuators*, 14(3).
- Sauer, V. M. (2026). *Flow Development in the Entrance Region of Slender Converging Pipes*.
- Siswanto, Y., Widhy Wirakusuma, K., Bahri Pratama, A., Panas, P., Ganda, P., & Fluida, A. (2024). Rancang Bangun Alat Penukar Panas Tipe Pipa Ganda Kajian Aliran Berlawanan Arah. *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, (1), 114–121.
- Song, Y., Zhuang, Z., Wang, X., Fang, Q., Cheng, Z., & Zhang, T. (2024). Vibration Damping and Noise Reduction of A New Non-Newtonian Fluid Damper in A Washing Machine. *Actuators*, 13(1).
- Sukri, S., Syamsuddin, U., Musthofa, I., Artika, K. D., & Merpatih, M. (2025). Pengaruh Temperatur Water Coolant dan Air Biasa terhadap Konsumsi Bahan Bakar pada Mesin Bensin Daihatsu Taruna Efi 1.6. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 60–67.
- Sutisna, N. A., & Munajad, M. (2020). Perhitungan Sistem Hidrolik Untuk Penggerak Pisau pada Mesin Penghapus Marka Jalan. In *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics* (Vol. 5, Number 2).
- Tang, T. Q., Hsu, S. Y., Dahiya, A., Soh, C. H., & Lin, K. C. (2021). Numerical Modeling of Pulsatile Blood Flow through A Mini-Oxygenator in Artificial Lungs. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 208.
- Vemulapalli, S., & Venkata, S. K. (2022). Parametric Analysis of Orifice Plates on Measurement of Flow: A Review. In *Ain Shams Engineering Journal* (Vol. 13, Number 3). Ain Shams University.
- Wardhany, A. K., Monika, D., Ariansyah, R., Lubis, M. R., Arifin, M., & Aji, A. D. (2025). Performance Analysis of Micro-Hydro Plants Using Crossflow Turbines at Varying Water Fall Heights. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 62–68.
- Zaini, M. I. A., Mustapha, M., Nazri, N. S., Rosli, N. N., Mutalib, M. A., Sulong, W. M. W., Ibrahim, M. A., & Fudholi, A. (2025). Innovative Water-Cooling System for Enhanced Energy Efficiency in Photovoltaic-Thermal System. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70.
- Zare, S., & Kargari, A. (2024). Process Intensification in The Direct Contact Membrane Distillation (DCMD) Desalination by Patterning Membrane Surface: A CFD Study. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 205.
- Zhang, C., Yang, X., Jiang, Y., Zhao, W., & Yu, J. (2025). Evaluation of the Hydrodynamic Impacts of Tidal Turbine Arrays in Jiaozhou Bay. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1).
- Zhang, X., Yang, L., Gong, H., Bao, W., Wang, B., Zheng, C., Shao, C., & Cui, Z. (2026). Flow Behavior and Entropy Production in Microcapillary-Based Joule–Thomson Refrigeration under Various Inlet-To-Outlet Pressure Ratios. *International Journal of Refrigeration*, 185, 42–53.
- Zhou, Y., Qian, L., & Bai, W. (2023). Sloshing Dynamics of A Tuned Liquid Multi-Column Damper for Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbines. *Ocean Engineering*, 269.
- Zidan, M. A., & Chalim, A. (2024). Pengaruh Laju Alir Gliserin Terhadap Efisiensi Pertukaran Panas Dalam Shell and Tube Heat Exchanger. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 10(3), 664–673.