

Performa *Thin-Thick Orifice Plate* terhadap Kerugian Energi

Mahmuddin^{*1}, Muhammad Syahrir², Muhammad Imam Arif³, Afryanto Pakambanan⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia,
Jl. Urip Sumoharjo Km.05, Kota Makassar, Indonesia, 90231.
e-mail: ^{*1}mahmuddin@umi.ac.id

Abstrak

Pengukuran laju volumetrik aliran fluida dalam sebuah pipa sangat dibutuhkan pada industri proses, khususnya industri yang memanfaatkan pipa sebagai media penyaluran fluida. Pengukuran variabel proses tersebut dilakukan untuk mengendalikannya sesuai setpoint agar mencapai optimasi proses. Orifice plate meter merupakan flow meter yang digunakan untuk mengukur laju volumetrik fluida yang mengalir di dalam pipa berdasarkan prinsip beda tekanan (differential pressure). Kinerja suatu orifice plate meter dapat diketahui dengan mengukur tekanan pada daerah upstream dan downstream. Pengukuran dilakukan dengan memasang tapping yang dihubungkan dengan selang manometer. Observasi kinerja orifice dilakukan secara eksperimental dengan menguji orifice plate meter pada rasio tebal pelat (s/d) = 0,42; 0,83; dan 1,25 dengan rasio restriksi (β)=0,5. Pengukuran tekanan daerah upstream dan downstream dilakukan pada bilangan Reynolds (Re) 6600-16500. Distribusi tekanan, discharge coefficient (C_d) dan permanent pressure loss sebagai parameter utama dalam mengklasifikasi tingkat akurasi orifice plate meter sebagai alat ukur volumetrik aliran. Persentase permanent pressure loss dengan referensi centerline pressure pada (s/d) = 0,42; 0,83; dan 1,25 masing-masing sebesar 49,87 %; 54,37 %; dan 67,27 %. Nilai rata-rata discharge coefficient (C_d) untuk (s/d) = 0,83 dengan referensi centerline pressure dan $D;0,5D$ masing-masing adalah 0,66 dan 0,76. Untuk (s/d) = 1,25 adalah 0,65 dan 0,68. Sedangkan (s/d) = 0,42 nilai C_d rata-rata diperoleh 0,73 dan mendekati dengan nilai analitis ISO 5167-2 (2013).

Kata Kunci: Rasio tebal pelat, discharge coefficient, permanent pressure loss.

Abstract

The measurement of the volumetric flow rate of fluids in a pipe is essential in process industries, particularly those utilising pipelines as fluid transport media. Such process variable measurement is conducted to control the system according to a setpoint to achieve process optimisation. An orifice plate meter is a type of flow meter used to measure the volumetric flow rate of fluids flowing inside a pipe based on the principle of differential pressure. The performance of an orifice plate meter can be determined by measuring the pressure at the upstream and downstream regions using pressure tapings connected to a manometer tube. The experimental observation of orifice performance was carried out by testing the orifice plate meter at ratios of (s/d) = 0.42, 0.83, and 1.25 with a restriction ratio (β) = 0.5. Pressure measurements at upstream and downstream regions were performed within the Reynolds number range of 6600–16500. The pressure distribution, discharge coefficient (C_d), and permanent pressure loss were considered as the main parameters in classifying the accuracy level of the orifice plate meter as a volumetric flow measurement device. The percentage of permanent pressure loss, referenced to centerline pressure at (s/d) = 0.42, 0.83, and 1.25, was found to be 49.87%, 54.37%, and 67.27%, respectively. The average discharge coefficient (C_d) at (s/d) = 0.83, with references to centerline pressure and $D;0.5D$, was 0.66 and 0.76, respectively, while for (s/d) = 1.25, the values were 0.65 and 0.68. Meanwhile, for (s/d) = 0.42, the average C_d obtained was 0.73, which is close to the analytical value given in ISO 5167-2 (2013).

Keywords: Plate thickness ratio, discharge coefficient, permanent pressure loss.

1. PENDAHULUAN

Andrew dan William [1] menyatakan bahwa *orifice plate meter* adalah suatu alat yang dapat digunakan untuk mengukur laju aliran volume di dalam saluran pipa berdasarkan prinsip perbedaan tekanan (*differential pressure*) pada bagian *upstream* dan *downstream*. Pemasangan pelat *orifice* dalam suatu sambungan pipa menyebabkan adanya perbedaan tekanan (*differential pressure*) pada daerah *upstream* dan *downstream*. Kedua sisi tersebut dipasangkan *pressure taps* untuk mengukur penurunan tekanan akibat penyempitan aliran. Penurunan tekanan yang disebabkan oleh penyempitan aliran tersebut digunakan untuk mengukur laju volumetrik aliran dengan menggunakan teorema Bernoulli [2].

Karakteristik geometri *orifice plate*, khususnya ketebalan pelat, memiliki pengaruh signifikan terhadap performa pengukuran aliran. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa variasi ketebalan pelat dapat mempengaruhi pola distribusi tekanan, zona resirkulasi, dan nilai *discharge coefficient* [3], [4]. Menurut Chisholm [5] tebal pelat *orifice* dibedakan menjadi *thin-plate orifices* ($\frac{s}{d} < 0,5$) dan *thick-plate orifice* ($\frac{s}{d} > 0,5$). Penelitian terkini menunjukkan bahwa pelat *orifice* dengan ketebalan yang berbeda menghasilkan karakteristik aliran yang berbeda pula, dimana pelat tipis cenderung menghasilkan *coefficient of discharge* yang lebih tinggi dibandingkan pelat tebal [3], [6].

Pemilihan rasio tebal pelat (s/d) dalam penelitian ini dengan melihat kemungkinan dengan perubahan (s/d) sangat berpengaruh terhadap laju aliran dan tekanan suatu fluida serta *permanent pressure loss*, sehingga perlu adanya komparasi berbagai geometri seperti: bentuk profil lubang, tebal dan rasio diameter restriksi pelat *orifice*. Studi parametrik yang komprehensif menunjukkan bahwa selain ketebalan pelat, parameter geometri lainnya seperti *beta ratio*, tipe tepi (*square*, *conical*, *quadrant*), dan jumlah lubang juga berkontribusi terhadap performa *orifice meter* [4]. Perubahan geometri pelat *orifice* juga dapat mempengaruhi nilai *discharge coefficient* (C_d). Dengan demikian, fenomena yang akan dipelajari dalam penelitian ini, adalah:

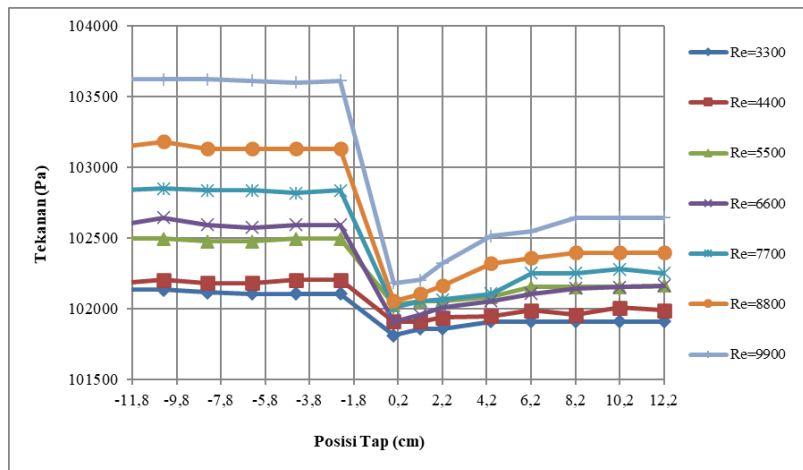
- Bagaimana keterkaitan *discharge coefficient* (C_d) dari *orifice* terhadap bilangan *Reynolds* pada tebal pelat *orifice* (s/d) = 0,42, 0,83 dan 1,25 dengan rasio restriksi (β) = 0,5.
- Bagaimana keterkaitan *permanent pressure loss* terhadap bilangan *Reynolds* pada rasio tebal pelat *orifice* (s/d) = 0,42, 0,83 dan 1,25 dengan rasio restriksi (β) = 0,5.

Selama pengukuran tekanan *upstream* dan *downstream* diasumsikan:

- Kondisi aliran *steady state*.
- Kondisi aliran fluida *incompressible flow*
- Kondisi aliran pada sisi *inlet* diasumsikan *uniform*
- Selama pengukuran dianggap proses adiabatik.

1.1 Tinjauan Pustaka

Mahmuddin dkk., [7] telah melakukan penelitian terkait karakteristik tekanan dan *discharge coefficient* pelat *orifice* pada rasio tebal pelat (s/d) = 1,66 dengan bilangan *Reynolds* 3300-9900. Tekanan pada daerah *upstream* cenderung konstan dan turun secara signifikan, kemudian meningkat pada daerah *downstream* hingga mencapai titik pemulihan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.



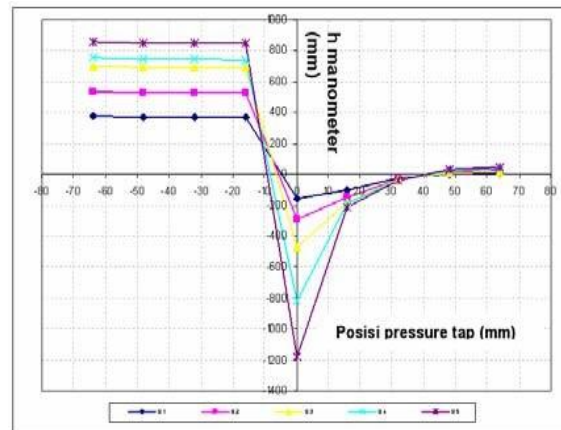
Gambar 1. Karakteristik tekanan *upstream* dan *downstream* pelat *orifice* dengan rasio tebal (s/d) = 1,66

Singh dkk. [8] melakukan prediksi aliran untuk *orifice meter* konsentris yang memiliki diameter pipa 40 mm NB (*Nominal Bore*) dan empat rasio diameter (0,40; 0,50; 0,60; dan 0,70). *Orifice meter* yang disimulasikan memiliki sudut *bevel* 30° dan ketebalan tepi 1,0 mm. Ketebalan pelat juga bervariasi dari 3,50 hingga 9,00 mm, lebih tinggi dari ketebalan yang ditentukan (3,20 mm) dalam ISO-5167-2. Hasil menunjukkan bahwa zona resirkulasi *downstream* berubah seiring perubahan ketebalan pelat *orifice*. Pelat *orifice* tebal menghasilkan nilai *coefficient of discharge* yang lebih rendah sedangkan pelat *orifice* tipis menunjukkan hasil pengukuran nilai *coefficient of discharge* yang lebih tinggi.

Studi parametrik yang lebih mendalam dikerjakan oleh Vemulapalli & Venkata [4] melalui simulasi *computational fluid dynamics* dengan pendekatan model *k-ε* standar. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa koefisien debit mengalami kenaikan berbanding lurus dengan peningkatan rasio beta, sementara konfigurasi tepi kuadran menghasilkan kehilangan tekanan paling minimal jika dibandingkan dengan variasi tepi lainnya. Sementara itu, Leopard [9] melaksanakan investigasi numerik menggunakan pemodelan 3D untuk *orifice flow meter* bertipe *square edge* dan *quadrant edge* dengan *diameter ratio* (β) masing-masing 0,5 dan 0,7 pada setiap konfigurasi geometri. Investigasi tersebut mengaplikasikan aliran dengan angka Reynolds 5×10^3 dan 5×10^4 , dengan kondisi aliran *steady flow* serta model viskositas mengadopsi standard *k-epsilon*. Hasil simulasi mendemonstrasikan bahwa ketika fluida melewati *throat orifice*, khususnya pada tipe *square edge*, terjadi separasi aliran secara langsung. Fenomena separasi ini memicu terbentuknya aliran sekunder berbentuk *vortex* di area *downstream* dari *orifice*.

Roul [10] melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran satu fase dan dua fase (air-udara) melalui *thick* dan *thin orifice* pada *horizontal pipes* berdiameter dalam 40 mm dan 60 mm dengan perbedaan geometri *orifice*, variasi *area ratio* (σ) 0,54 dan 0,73 serta variasi ketebalan (s/d) 0,025 dan 0,59. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *pressure drop* (ΔP) akan meningkat seiring dengan menurunnya ketebalan plat *orifice* tetapi peningkatan rasio area (σ) *orifice* akan menyebabkan menurunnya nilai *pressure drop* suatu aliran yang melintasi *orifice*.

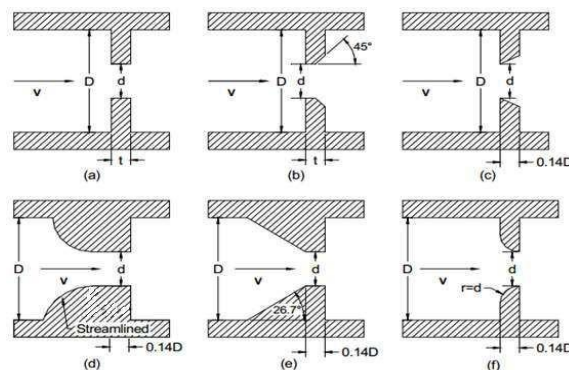
Studi terkini mengenai efisiensi energi pada *orifice meter* menunjukkan bahwa konfigurasi *multi-hole orifice* (MHO) menghasilkan rugi tekanan dan daya hilang yang lebih kecil dibandingkan *single-hole orifice* (SHO), dengan peningkatan efisiensi energi hingga 22% dan aliran yang lebih stabil [11]. Pengujian yang dilakukan oleh Septiadi [12] menganalisis penurunan *maximum pressure drop* yang terjadi serta *irrecoverable pressure drop* pada *orifice flow meter* dengan rasio diameter (β) 0,7; 0,6; 0,5 dan tebal 20 mm, seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi tekanan melintasi *orifice flow meter* dengan rasio diameter 0.5 dan tebal plat *orifice* 10 mm [12]

Perbandingan bentuk geometri *orifice* juga telah diteliti oleh Assran dkk., [6] yang membandingkan performa *orifice* lingkaran dan segitiga. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *orifice* segitiga menghasilkan *discharge coefficient* yang lebih tinggi (0,62–0,80) dan rugi tekanan yang lebih kecil dibandingkan *orifice* lingkaran pada rentang bilangan Reynolds 51.000–172.000.

Pelat *orifice* atau perangkat pengkondisi aliran dirancang secara sengaja untuk menciptakan perbedaan tekanan antara wilayah *upstream* dan *downstream* sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab terdahulu. Penggunaan pelat *orifice* sangat dominan dalam sektor industri proses, dimana sekitar 80% dari industri proses memanfaatkan pelat *orifice* sebagai alat pengukur laju aliran [9]. Gambar 3 memperlihatkan klasifikasi pelat *orifice* yang didasarkan pada karakteristik permukaan di sisi *upstream* dan *downstream* beserta konfigurasi geometrinya.



Gambar 3. Geometri pelat *orifice*: (a) *Square-Edged* (b) *Square-Edged with 45° Back-cut* (c) *Sharp-Edged* (d) *Streamlined-Approach* (e) *Sloping-Approach* (f) *Quadrant-Edged* [13]

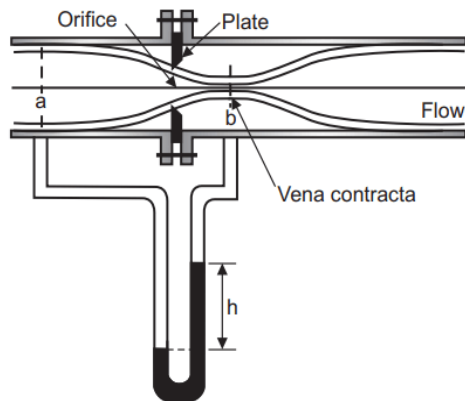
1.2 Landasan Teori

Orifice meter adalah alat pengukur aliran yang bekerja berdasarkan prinsip Bernoulli. Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa adanya hubungan antara tekanan dan kecepatan fluida.

1.2.1 Differential Pressure.

Differential pressure menjadi prinsip dasar dalam pengukuran laju aliran volumetrik fluida dan umumnya dapat diaplikasikan pada berbagai keperluan teknik. Prosedur pengukuran dilaksanakan dengan mengukur selisih tekanan yang muncul di zona *upstream* berjarak D dan zona *downstream* berjarak $0,5D$ dari pelat *orifice*. Zona *upstream* merupakan area dimana aliran

fluida belum masuk ke dalam lubang pelat *orifice*. Konfigurasi pemasangan *pressure tap* ini mengikuti standar pengukuran yang telah tervalidasi untuk beragam kondisi aliran, meski riset menunjukkan bahwa karakteristik aliran dapat berfluktuasi bergantung pada properti fluida dan kondisi operasional [14], [15]. Prinsip *differential pressure* pada *orifice meter* berlandaskan pada persamaan Bernoulli, yang menyatakan bahwa *magnitude* kecepatan dan *magnitude* tekanan dalam aliran fluida memiliki hubungan berbanding terbalik, dengan asumsi tanpa adanya perbedaan elevasi ketinggian ($\Delta z = 0$). Besaran laju aliran volumetrik (Q) didapatkan melalui perkalian antara nilai kecepatan rata-rata aliran (v) dengan luas area penampang aliran (A).



Gambar 4. Prinsip kerja *orifice meter*

Korelasi dari perbedaan tekanan dengan kecepatan memberikan cara untuk mengukur laju aliran tersebut. Tanpa adanya pengaruh viskos dan dengan asumsi pipa horizontal, penerapan persamaan Bernoulli dapat dilakukan dengan mudah. Mengacu pada Gambar 4, persamaan umum yang digunakan pada *flow meter* dengan menerapkan prinsip-prinsip persamaan Bernoulli seperti yang ditampilkan pada Persamaan (1).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g_{z01} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g_{z02} \dots\dots\dots(1)$$

Bilangan *Reynolds* menjadi parameter penting dalam karakteristik nilai *discharge coefficient* (C_d) dan mempengaruhi pola aliran serta karakteristik separasi pada *orifice* [3]. Secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan :

- Re = Bilangan *Reynolds*
- ρ = Densitas fluida (kg/m^3)
- V = Kecepatan aliran fluida (m/s)
- D = Diameter pipa (m)
- μ = Viskositas dinamis fluida (kg/m.s)

Miller [16] menggunakan persamaan sebagai berikut dalam menentukan nilai permanent pressure loss :

$$\frac{\text{permanent pressure loss}}{\text{maximum pressure drop}} (\%) = (1 - 0,24 \beta - 0,52 \beta^2 - 0,16 \beta^3) \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Nilai *coefficient of discharge* (C_d) dihitung secara analitis. *The American Society of Mechanical Engineers* (ASME) merekomendasi dengan persamaan *curve-it* [17]. Pendekatan

empiris dan numerik untuk prediksi C_d juga telah dikembangkan menggunakan teknik *machine learning* seperti *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Gene Expression Programming* (GEP) dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0.998$) untuk geometri orifice tertentu [18]. Persamaan *curev-it* tersebut digunakan untuk validasi yang dituliskan sebagai berikut:

$$C_d = f(\beta) + 91.71\beta^{2.5}Re_D^{-0.75} + \frac{0.09\beta^4}{1 - \beta^4}F_1 - 0.0337\beta^3F_2$$

dengan,

$$f(\beta) = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 \dots\dots\dots(4)$$

Korelasi faktor F_1 dan F_2 pada posisi *pressure tap*:

1. *Corner taps*: $F_1 = 0$; $F_2 = 2$
2. *D;1/2D taps*: $F_1 = 0.4333$; $F_2 = 0.47$
3. *Flange taps*:
- 4.

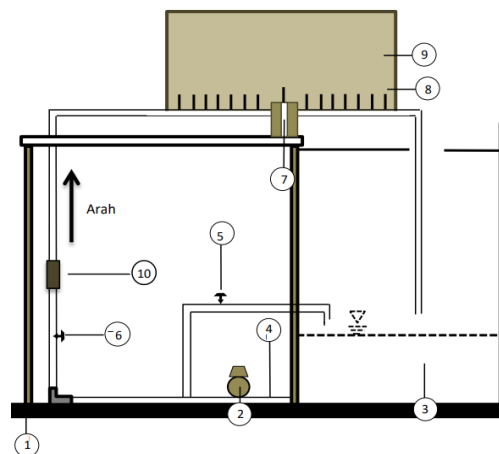
$$F_1 = \frac{1}{D(in)}; F_2 = \begin{cases} \frac{1}{D(in)}; D > 2.3 \text{ in} \\ 0.4333; 2.0 \leq D \leq 2.3 \text{ in} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

Referensi *centerline pressure* dan $D;0,5D$ menggunakan persamaan (6).

$$C_d = \frac{Q\sqrt{1-\beta^4}}{A_0\sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_{max}}{\rho}}} \dots\dots\dots(6)$$

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dan pengujian *orifice meter* ini menggunakan bahan fluida air dengan massa jenis 996 kg/m^3 dan peralatan uji seperti pada Gambar 5. Pemilihan fluida air sebagai media pengujian mengikuti praktik standar dalam karakterisasi *orifice meter*.



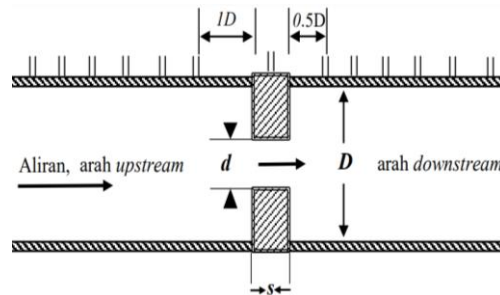
Gambar 5. Skema alat penelitian

Keterangan Gambar 5:

1. Meja atau kerangka peralatan
2. Pompa air
3. Bak air utama
4. Pipa hisap pompa (*suction line*)

5. Katup pada pipa by pass (*by pass line*)
6. Katup pada pipa alir (*discharge line*)
7. Pelat *orifice* (s/d) 0,42, 0,83 dan 1,25
8. Tap dihubungkan dengan selang manometer untuk pengukuran tekanan (*pressure tap*)
9. Papan manometer (*manometer board*)
10. *Flow meter*

Gambar 6 menunjukkan bagian *orifice plate* yang akan diuji.



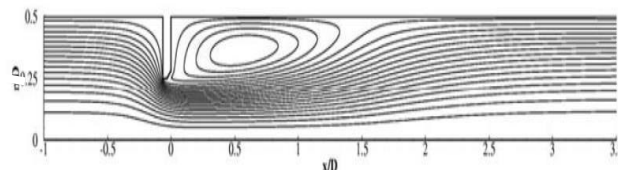
Gambar 6. Skema *orifice plate*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Tekanan

Kurva pada Gambar 8, 9 dan 10 menunjukkan distribusi tekanan fluida di sepanjang daerah *upstream* dan *downstream*. Tekanan aliran fluida pada daerah *upstream* relative konstan, namun mulai menurun ketika mendekati pelat *orifice*. Penurunan ini berlanjut hingga mencapai titik minimum di daerah *vena contracta*, sesuai dengan prinsip persamaan Bernoulli. Setelah melewati *vena contracta*, tekanan kembali meningkat secara bertahap hingga mencapai *reattachment point* di bagian *downstream*. Fenomena ini sama dengan hasil penelitian Mahmuddin dkk. [7] yang menguji performa pelat *orifice* dengan $(s/d) = 1,66$ dengan restriksi (β) = 0,5. Pola distribusi tekanan ini juga konsisten dengan hasil simulasi CFD yang menunjukkan bahwa karakteristik medan aliran sangat dipengaruhi oleh dimensi geometri *orifice*, dimana tekanan maksimum terjadi di dasar saluran dan tegangan geser meningkat seiring ukuran *orifice* [14].

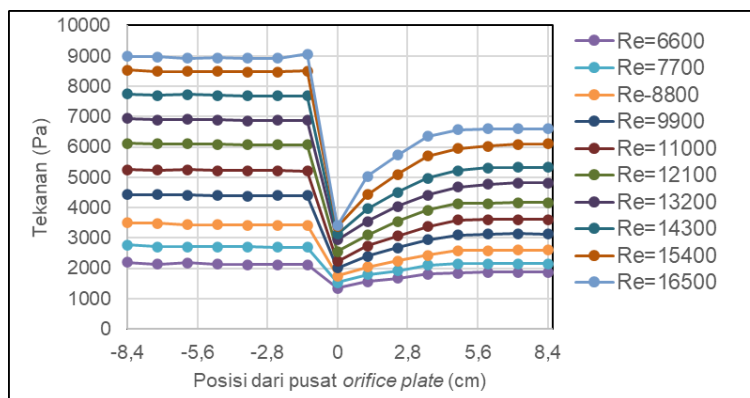
Terbentuknya zona *vena contracta* disebabkan oleh ketidakmampuan fluida untuk membelok mengikuti sudut siku-siku yang tajam pada bagian sudut pelat *orifice*. Kecepatan aliran pada *centerline velocity* mengalami peningkatan yang sangat signifikan dan berpotensi menimbulkan separasi aliran. Kondisi ini memfasilitasi pembentukan aliran sekunder berbentuk *vortex* di wilayah *downstream orifice*. Keberadaan *vortex* tersebut menciptakan efek seolah-olah fluida yang mengalir melewati penampang yang lebih sempit, yang dikenal dengan istilah *vena contracta*. Sebagaimana Gambar 7 menampilkan visualisasi hasil simulasi *streamline* ketika melewati pelat *orifice*. [9].



Gambar 7. Streamline melalui pelat *orifice* [9]

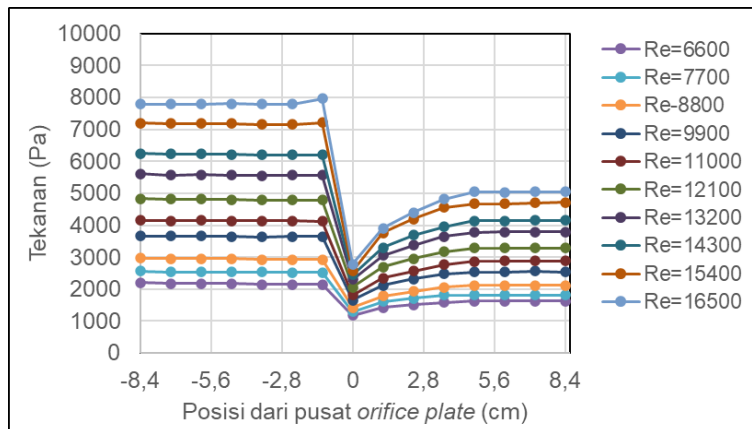
Akibat terjadinya separasi aliran, *vena contracta* terbentuk pada jarak tertentu di bagian hilir pelat *orifice*. *Magnitude* kecepatan maksimum pada zona *vena contracta* lebih tinggi dibandingkan dengan *magnitude* kecepatan aliran di area *downstream*, dan tekanan mengalami penurunan secara drastis. Fenomena ini memiliki korelasi kuat dengan level energi turbulensi yang meningkat di sekitar wilayah *orifice*, sebagaimana divalidasi oleh studi numerik menggunakan pemodelan RNG $k-\epsilon$ [14], dimana energi kinetik dapat bertransformasi menjadi energi tekanan (efek Bernoulli). Distribusi tekanan dalam kondisi ideal dapat divisualisasikan pada Gambar 8.

Selanjutnya, kecepatan aliran meningkat akibat fluida yang ditekan paksa menuju pelat *orifice*. Kecepatan aliran fluida mencapai maksimum mengakibatkan tekanan minimum pada *vena contracta*. Tekanan berangsur-angsur meningkat setelah menjauhi *vena contracta* yang disebut daerah *reattachment point*. Pada daerah *reattachment point*, tekanan meningkat sebanding dengan penurunan kecepatan fluida. Seperti yang diungkapkan oleh Leopard [9] dan Mahmuddin dkk. [7], tekanan berangsur-angsur meningkat setelah meninggalkan pelat *orifice* pada daerah *downstream*. Tekanan akan mengalami pemulihan kembali, yang disebut *recovery point*. Namun, tekanan pada daerah *recovery point* tidak sepenuhnya dipulihkan seperti tekanan pada daerah *upstream*. Fenomena itu disebut *irrecoverable pressure drop*.

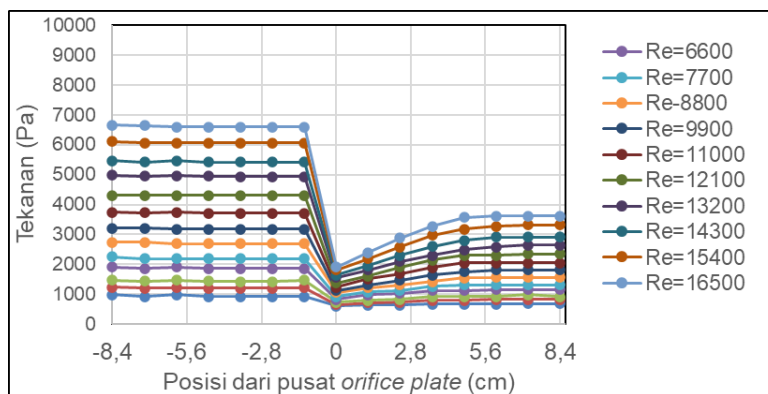


Gambar 8. Distribusi tekanan *upstream* dan *downstream* melintasi *orifice* plate dengan rasio tebal (s/d) 0,42.

Peningkatan tekanan pada titik *reattachment* berlangsung secara bertahap dan kontinyu sampai mencapai tekanan pemulihan setelah melampaui zona *vortex* atau yang disebut zona mati. Kondisi ini terjadi karena separasi aliran di tepi pelat yang mengakibatkan terbentuknya *vortex* saat meninggalkan area *downstream* akan terdorong ke arah belakang pelat *orifice*, sehingga aliran mengalami pembalikan arah. Semakin jauh lokasi pembentukan zona *vortex*, maka semakin besar pula tekanan pada titik *recovery*. Skema pembentukan *vortex* dapat dilihat sebagaimana ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 9. Distribusi tekanan *upstream* dan *downstream* melintasi *orifice plate* dengan rasio tebal (s/d) 0,83.

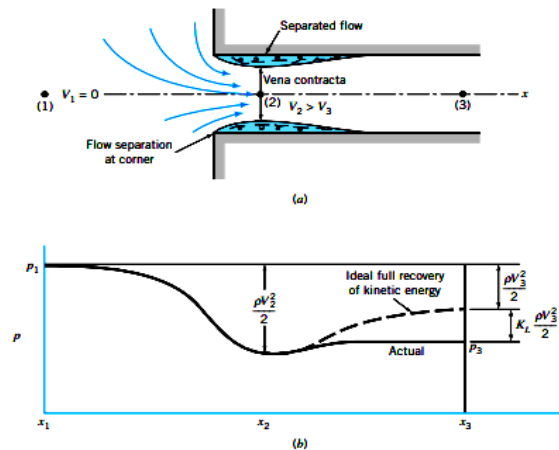


Gambar 10. Distribusi tekanan *upstream* dan *downstream* melintasi *orifice plate* dengan rasio tebal (s/d) 1,25.

Kurva pada Gambar 9 dan 10 memperlihatkan pola distribusi tekanan pada rasio tebal pelat (s/d) 0,83 dan 1,25. Tekanan pada daerah *upstream* dan *downstream* lebih kecil dibandingkan tekanan yang terjadi dengan rasio tebal pelat (s/d) = 0,42. Hal ini mengkonfirmasi temuan bahwa pelat *orifice* yang lebih tebal menghasilkan zona resirkulasi yang berbeda dan *coefficient of discharge* yang lebih rendah, sebagaimana telah diobservasi pada studi parametrik sebelumnya [4]. Selain itu, separasi aliran dan posisi *vena contracta* akan berbeda walaupun dalam pengukuran pada penelitian ini sulit diamati dengan cermat.

3.2 Permanent Pressure Loss

Pola aliran dan distribusi tekanan pada sisi *inlet* bertepi tajam yang dimulai dari zona *upstream*, penyempitan penampang, hingga zona *downstream* dapat dijelaskan melalui Gambar 10. Profil kecepatan fluida kembali ke kondisi awal ketika *streamline* fluida yang mengalami separasi bertemu kembali dengan dinding pipa atau yang sering diistilahkan sebagai *reattachment point* [9]. Pada titik *reattachment*, bentuk profil kecepatan belum sepenuhnya kembali seperti kondisi di posisi *upstream* dan tekanan aliran belum mencapai pemulihan penuh (belum *recovery*) [7], [9]. Aliran akan mencapai kondisi pemulihan tersebut pada jarak tertentu (titik *recovery*) setelah melampaui titik *reattachment*.



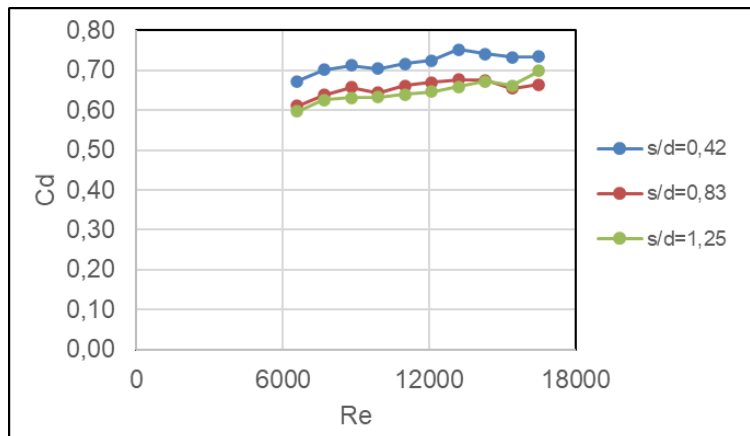
Gambar 11. Skema pola dan distribusi tekanan pada orifice [19].

Tekanan aliran juga pulih pada *reattachment point*. Akan tetapi, tekanan aliran tidak sepenuhnya dipulihkan seperti yang telah diuraikan sebelumnya. Selisih nilai tekanan *upstream* dengan tekanan tekanan pulih dapat disebut *permanent pressure loss*. *Permanent pressure loss* adalah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan aliran fluida yang disebabkan oleh gesekan di dinding dan serta gesekan internal fluida itu sendiri. *Permanent pressure loss* merupakan indikator penting efisiensi energi pada *orifice meter*, dimana konfigurasi geometri yang optimal dapat mengurangi kehilangan energi [11].

Vena contracta dan *reattachment point* berkaitan dengan rasio tebal pelat *orifice* (s/d) dan bilangan *Reynolds*. Bilangan *Reynolds* dapat mempengaruhi letak *vena contracta* dan *reattachment point*. Hasil pengukuran tekanan arah *downstream* menghasilkan pemulihan tekanan dan *reattachment point* yang berbeda pada masing-masing rasio tebal pelat (s/d) dan bilangan *Reynolds*. *Permanent pressure loss* dengan referensi *centerline* pada rasio tebal pelat (s/d) = 0,42; 0,83; dan 1,25 masing-masing sebesar 49,87 %; 54,37 %; dan 67,27 %. Nilai tersebut divalidasi dengan Miller [16] dan hasilnya 71,0%. Hasil ini menunjukkan bahwa pelat *orifice* tipis (s/d = 0,42) menghasilkan *permanent pressure loss* yang paling rendah, sejalan dengan temuan bahwa pengurangan ketebalan pelat dapat menurunkan *pressure drop* secara signifikan, meskipun peningkatan rasio area juga berkontribusi dalam menurunkan nilai *pressure drop* [3], [10].

3.3 Discharge Coefficient

Perhitungan *discharge coefficient* (C_d) menggunakan referensi *centerline pressure* dengan *maximum pressure drop* dan tekanan arah *upstream* dan *downstream* masing-masing di titik pengukuran D dan 0,5D terhadap pelat *orifice* sebagai tekanan referensi. Sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Singh dkk. [8], pelat *orifice* tebal menghasilkan nilai C_d yang lebih rendah. Hasil ini juga dikonfirmasi oleh penelitian terkini yang menunjukkan bahwa pelat dengan ketebalan lebih besar (4 mm) menghasilkan *discharge coefficient* maksimum 0,718 pada bilangan *Reynolds* tinggi, dimana tekanan minimum terjadi tepat setelah *orifice* [3]. Sedangkan hasil penelitian pada pelat *orifice* tipis dan tebal diperoleh nilai C_d seperti yang diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Coefficient of discharge (C_d) dengan variasi (s/d) pada bilangan Reynolds 6600-16500.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian eksperimen performa pelat *orifice* dengan variasi rasio tebal pelat, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Tekanan pada daerah *upstream* dan *downstream* pelat *orifice* tipis-tebal untuk rasio tebal pelat (s/d) = 0,42 menghasilkan tekanan yang tinggi dibandingkan pada (s/d) = 0,83 dan 1,25. Nilai C_d yang diperoleh masing-masing sebesar 0,73; 0,66; dan 0,65.
2. *Permanent pressure loss* yang rendah terjadi pada pelat *orifice* tipis (s/d) = 0,42 dengan rata-rata 49,87 %.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pelat *orifice* dengan rasio tebal (s/d) = 0,42 memiliki performa terbaik dengan nilai C_d yang mendekati standar ISO 5167-2 (2013) dan kehilangan tekanan permanen yang paling rendah. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pemilihan geometri pelat *orifice* yang optimal untuk aplikasi pengukuran aliran dalam industri proses

5. SARAN

Perlu dilakukan penelitian terhadap alat ukur serupa untuk aliran fluida dua fasa, baik secara eksperimen maupun numerik, guna memperluas pemahaman tentang karakteristik aliran multifase melalui pelat *orifice*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andrew, W. G., 1979, *Applied Instrumentation in the Process Industries*, Ed. 2. Gulf Publishing Company, Houston. <https://archive.org/details/appliedinstrumen0001andr>
- [2] Prasanna, M. A., Seshadri, V., dan Kumar, Y., 2016, Analysis of Compressible Effect in the Flow Metering By Orifice Plate Using CFD, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, No. 4, Vol. 2, 170–180, <https://ijsrset.com/home/issue/view/article.php?id=IJSRSET162420>
- [3] Akhyan, A. dan Fadhli, F., 2023, Pengaruh Variasi Tebal Orifice dan Bilangan Reynolds (Re) terhadap Penurunan Tekanan (Pressure Drop) pada Entrance Region, *Quantum Teknika: Jurnal Teknik Mesin Terapan*, No. 2, Vol. 4, 75–82, doi: 10.18196/jqt.v4i2.16154.
- [4] Vemulapalli, S. dan Venkata, S. K., 2022, Parametric analysis of orifice plates on measurement of flow: A review, *Ain Shams Engineering Journal*, No. 3, Vol. 13, 101639,

- doi: 10.1016/j.asej.2021.11.008.
- [5] Chisholm, D., 1985, Two-Phase Flow in Heat Exchangers and Pipelines, *Heat Transfer Engineering*, No. 2, Vol. 6, 48–57, doi: 10.1080/01457638508939624.
 - [6] Assran, M. H., Shenouda, B., dan Mohamed, H. I., 2024, Characteristics of flow through orifice-meter, *Journal of Engineering Sciences*, No. 3, Vol. 52, 159–175, doi: 10.21608/jesaun.2024.269216.1311.
 - [7] Mahmuddin, M., Muhammad, S., dan Nurisma, M., 2023, Studi Eksperimental Performance Orifice Plate pada Bilangan Reynolds Rendah, *J-Move. Jurnal Teknik Mesin*, No. 3, Vol. 5, 26–31, <https://jurnal.ft.umi.ac.id/index.php/jmove/article/view/409>
 - [8] Singh, R. K., Singh, S. N., dan Seshadri, V., 2010, Performance evaluation of orifice plate assemblies under non-standard conditions using CFD, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, No. 6, Vol. 17, 397–406, [https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10866/4/IJEMS 17\(6\) 397-406.pdf](https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10866/4/IJEMS 17(6) 397-406.pdf)
 - [9] Leopard, R. A., 2017, Studi Numerik Performa Square Edge dan Quadrant Edge orifice Flow Meter dengan Variasi Rasio Diameter, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://core.ac.uk/download/pdf/291463234.pdf>
 - [10] Roul, M. K. dan Dash, S. K., 2012, Numerical Modeling of Pressure drop due to Single-phase Flow of Water and Two-phase Flow of Air- water Mixtures through Thick Orifices, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, No. 4, Vol. 3, 544–551, <https://ijettjournal.org/assets/volume-3/issue-4/IJETT-V3I4P216.pdf>
 - [11] Bikić, S., Đurđević, M., Bukurov, M., dan Tašin, S., 2022, Comparison of single-hole and multi-hole orifice energy consumption, *Advances in Mechanical Engineering*, No. 1, Vol. 14, doi: 10.1177/16878140221075461.
 - [12] Septiadi, W. N., 2008, Studi Eksperimental Orifice Flow Meter dengan Variasi Tebal dan Posisi Pengukuran Beda Tekanan Aliran Melintasi Orifice Plate, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM*, No. 1, Vol. 2, 61–68, [http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1357894&val=982&title=studi eksperimental orifice flow meter dengan variasi tebal dan posisi pengukuran beda tekanan aliran melintasi orifice plate](http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1357894&val=982&title=studi%20eksperimental%20orifice%20flow%20meter%20dengan%20variasi%20tebal%20dan%20posisi%20pengukuran%20beda%20tekanan%20aliran%20melintasi%20orifice%20plate)
 - [13] Sanghani, C. R., Jayani, D. C., Dobariya, C. R., Sabhadiya, G. K., dan Gohil, J. R., 2016, Comparative Analysis of Different Orifice Geometries for Pressure Drop, *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering*, No. 10, Vol. 2, 494–498, <https://www.ijste.org/articles/IJSTE2110113.pdf>
 - [14] Sanahmadi, B., Heydari, M., Gohari, S., dan Shabanlou, S., 2022, Effects of side orifice dimensions on characteristics of flow field in rectangular channels, *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, No. 1, Vol. 9, 16–22, doi: 10.22126/arww.2020.4916.1156.
 - [15] Golijanek-Jędrzejczyk, A. dan Mrowiec, A., 2023, Cylindrical orifice testing in laminar flow with the orifice diameter ratio $\beta = 0.5$, *Scientific Reports*, No. 1, Vol. 13, 1–8, doi: 10.1038/s41598-023-42451-0.
 - [16] Miller, R. W., 1996, *Flow Measurement Engineering Handbook*, Ed. 3. McGraw-Hill, New York. https://archive.org/details/flowmeasuremente0000mill_f9v5/page/n7/mode/2up
 - [17] White, F. M., 2011, *Fluid Mechanics*, Ed. 7. McGraw-Hill, New York. [https://archive.org/details/FluidMechanics7thEdFrankM.WhiteMcGrawHill2011/Fluid Mechanics 7th ed - Frank M. White \(McGraw-Hill, 2011\)](https://archive.org/details/FluidMechanics7thEdFrankM.WhiteMcGrawHill2011/FluidMechanics7th%20ed%20-%20Frank%20M.%20White%20(McGraw-Hill,%202011))
 - [18] Elshaarawy, M. K. dan Hamed, A. K., 2024, Predicting discharge coefficient of triangular side orifice using ANN and GEP models, *Water Science*, No. 1, Vol. 38, 1–20, doi: 10.1080/23570008.2023.2290301.
 - [19] Munson, M., Young, B. R., Hardani, D. F., dan Wibi, H., 2004, *Mekanika Fluida*, Fourth., Erlangga, Jakarta.