

Studi Eksperimen *Orifice Flow Meter* dengan Variasi Posisi Pengukuran Beda-Tekanan Aliran melintasi *Orifice Plate*

Ainul Ghurri dan I Wayan Nata Septiadi
Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80362
E-mail: a_ghurri@yahoo.co.id

Abstrak

Pengujian *orifice flow meter* telah dilakukan menggunakan plat orifis dengan bevel pada sisi masuknya yang memiliki rasio diameter $\beta = 0.5, 0.6, \text{ dan } 0.7$ pada range kapasitas aliran dengan bilangan Reynolds antara ± 9270 sampai ± 27810 . Pengujian dilakukan dengan mengalirkan air melintasi plat orifis. Kapasitas aliran teoritis dihitung menggunakan persamaan Kontinuitas dan Bernoulli yang dimodifikasi dengan mengukur beda tekanan pada beberapa variasi titik pengukuran, sedangkan kapasitas aliran aktual diukur menggunakan V-notch weir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prosentase irrecoverable pressure drop terhadap maximum pressure drop semakin menurun jika rasio diameter (β) semakin besar. Untuk semua nilai β , prosentase irrecoverable pressure drop terhadap maximum pressure drop semakin turun jika kapasitas semakin besar. Pada $\beta = 0.7$, irrecoverable pressure drop mencapai nilai yang cukup rendah ($< 40\%$) pada bilangan Re rendah ($Re = \pm 12000$). Perhitungan kapasitas teoritis pada semua orifice plate yang menggunakan beda tekanan (ΔP) pada posisi $D - 0$ menghasilkan kapasitas teoritis yang paling mendekati kapasitas aktual yang terukur. Nilai tertinggi Cd orifice flow meter pada semua β yang diuji berkisar antara $1.17 \div 1$ lebih menyerupai nilai Cd nozzle flow meter; namun kecenderungannya tetap sama dengan orifice flow meter pada umumnya yaitu semakin kecil sejalan dengan kenaikan bilangan Re.

Kata kunci: Orifis, pengukuran aliran, penurunan tekanan

Abstract

Experimental study of orifice flow meter was conducted by using orifice plate with bevel having diameter ratio $\beta = 0.5, 0.6, \text{ and } 0.7$, respectively at $Re = \pm 9270 \div \pm 27810$. Water is circulated through orifice flow meter. The theoretical capacity is determined by using the mass conservation and Bernoulli equations based on the measured pressure at various pressure tap position. The actual capacity is measured by using V-notch weir. The results showed that the irrecoverable pressure drop as percentage of maximum pressure drop decreased with increasing of β and flow capacity. The theoretical capacity with $D - 0$ pressure tap position had closest value to the actual capacity. The maximum value of coefficient of discharge of the orifice meter is about $1.17 \div 1$ for all β , similar to the nozzle flow meter.

Key words: Orifice, flow measurement, pressure drop

1. Pendahuluan

Salah satu jenis *flow meter* yang paling banyak digunakan di industri adalah *flow meter* berbasis beda tekanan dimana beda tekanan tersebut dihasilkan saat fluida melintasi perubahan luas penampang, baik berupa *orifice plate* (plat orifis), *nozzle* (nosel) atau venturi. *Orifice meter* bersisi tajam (*sharp edged*) diklasifikasikan sebagai perangkat pengukur aliran yang berbiaya rendah dan *head loss* tinggi (Fox, 1994; Munson, 2002; www.EngineeringToolBox.com, 2005). Penelitian yang ekstensif telah dilakukan untuk menghasilkan pemahaman yang terus berkembang, baik mengenai perilaku dinamika fluidanya (Fossa, 2002; Morrison, 1995; Kim, 1997; Ramamurti, 1999; Zimmermann, 1999) maupun efek geometri bagian-bagiannya (Fossa, 2002; Kim, 1997; Prabu, 1996) serta pengaruhnya terhadap hasil pengukuran menggunakan *orifice flow meter*. Beberapa hasil penelitian bahkan telah merekomendasikan untuk merevisi atau melengkapi standar yang ada dalam ISO 5167. Morrison et.al. (1995) meneliti respon *orifice flow meter* dengan nilai beta yang bervariasi akibat gangguan aliran pada hulu *orifice plate*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa distribusi tekanan tidak berubah akibat gangguan aliran yang simetris terhadap sumbu lintasan aliran, sebaliknya menjadi sangat sensitif oleh adanya pusaran (*swirl*).

Prabu et.al. (1996) dan Zimmermann (1999) menggunakan tipe gangguan aliran yang serupa yaitu belokan tunggal dan ganda untuk mengetahui perubahan koefisien buangan (*coefficient of discharge, Cd*) *orifice flow meter*. Hasilnya menyatakan bahwa *orifice flow meter* lebih sensitif terhadap gangguan pada hulu aliran dibanding *conical flow meter*. Sementara Zimmerman merekomendasikan sebuah koreksi pada ISO 5167 (*Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices, 1991*), yaitu saran untuk mengurangi panjang minimum lintasan lurus yang diperlukan pada hulu *orifice plate* dari yang telah distandarkan dalam ISO 5167. Ramamurti dan Nandakumar (1999) menginvestigasi aliran terseparasi, aliran terseparasi yang melekat kembali, dan aliran dengan kavitasi pada plat orifis yang kecil. Hasilnya menunjukkan bahwa koefisien buangan Cd berubah signifikan akibat aliran terseparasi dan aliran dengan kavitasi. Pengujian-pengujian tersebut (Morrison, Prabu, Zimmerman, Ramamurti) semuanya menggunakan plat orifis tipis bersisi tajam.

Kim et.al. (1997) menginvestigasi efek ketebalan plat orifis pada *orifice meter* dengan rasio diameter (beta) kecil. Plat orifis tebal dalam pengujian ini memiliki $t/d = 0.55$ dan 0.7 dimana t = tebal plat orifis, d = diameter plat orifis. Hasil penelitian tidak menunjukkan kesimpulan yang meyakinkan (*not conclusive*), dan hal ini diduga disebabkan oleh sisi tajam plat orifis yang digunakan. Fossa dan Guglielmini (2002) menguji penurunan tekanan aliran air fase tunggal dan ganda melintasi plat orifis bersisi tajam yang tergolong tipis dan tebal. Rasio diameter beta ($= d/D$, d = diameter orifis, D = diameter pipa) dalam penelitian ini masing-masing 0.73 dan 0.85 . Plat orifis tebal dalam penelitian ini memiliki $t/d = 0.59$. Hasil penelitian aliran fase tunggal menunjukkan bahwa penurunan tekanan plat orifis tebal ($t/d = 0.59$) lebih kecil daripada plat orifis tipis ($t/d = 0.03$ dan 0.2).

Penelitian-penelitian yang diacu di atas menggunakan posisi titik pengukuran $D - D$ atau $D - D/2$ pada hulu dan hilir aliran (D = diameter pipa). Alasan pemilihan posisi titik pengukuran tersebut tidak disebutkan secara eksplisit. Dalam referensi-referensi dasar (Fox, 1994; Munson, 2002) juga tidak menyatakan pertimbangan pemilihan posisi titik pengukuran tersebut. Dalam referensi dasar lainnya (www.EngineeringToolBox.com, 2005) diberikan beberapa alternatif tetapi juga tidak menjelaskan alasan teknis maupun teoritisnya. Pada penelitian ini beberapa kombinasi posisi titik pengukuran dilakukan untuk mengetahui efeknya pada hasil perhitungan dan pengukuran. Dan dengan mempertimbangkan hasil-hasil penelitian terdahulu terkait dengan penurunan tekanan yang terjadi, penelitian ini menggunakan plat orifis tebal dengan sisi masuk yang diperhalus (*rounded, bevel*). *Bevel* atau sisi masuk yang diperhalus dimaksudkan untuk menghindari terjadinya separasi, pelekatan kembali dan kavitasi pada plat orifis.

Tujuan penelitian ini adalah:

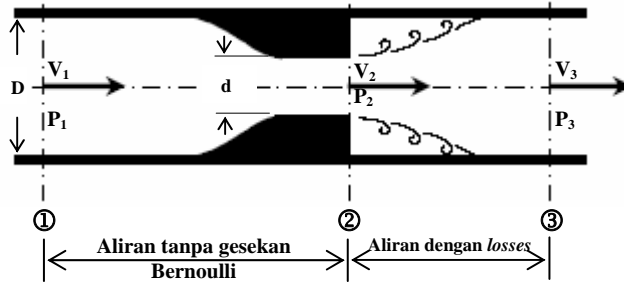
- Mengetahui pengaruh posisi titik pengukuran beda tekanan terhadap perbandingan hasil perhitungan teoritis kapasitas aliran terhadap kapasitas aktualnya.
- Mengetahui pengaruh posisi titik pengukuran beda tekanan terhadap perubahan nilai koefisien buangan (C_d) *orifice flow meter*.
- Mengetahui efek penggunaan plat orifis tebal dengan *bevel* (sisi masuk yang diperhalus) terhadap besarnya penurunan tekanan yang terjadi dibandingkan terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu pada plat orifis tipis bersisi tajam.

Manfaat penelitian yang diharapkan adalah:

- Mendapatkan posisi titik pengukuran beda tekanan *orifice flow meter* yang reliabel untuk mempermudah analisis hasil pengukuran kapasitas aliran.
- Memperbaiki *orifice flow meter* menjadi perangkat pengukur kapasitas aliran dari *low cost – high head loss* menjadi *low cost – medium head loss*.

2. Teori Dasar

Gambar 1 menunjukkan model aliran ideal melintasi nosel dalam pipa. Dalam penelitian ini *orifice plate* yang tebal dengan *bevel* pada sisi masuk ditujukan untuk menghasilkan aliran seperti dalam Gambar 1 di bawah ini. Pada jarak antara ① dan ② aliran diasumsikan tanpa gesekan. Beda tekanan antara ① dan ② dapat ditentukan berdasarkan persamaan Bernoulli.



Gambar 1. Aliran ideal melintasi nosel dalam pipa

Dengan mengasumsikan aliran mengalir horisontal (dengan demikian perbedaan elevasi tidak ada atau diabaikan); persamaan Bernoulli menjadi:

$$P_1 + 1/2 \rho V_1^2 = P_2 + 1/2 \rho V_2^2 \quad (1)$$

Dimana

P = Tekanan (Pascal)

ρ = Densitas (kg/m^3)

V = Kecepatan aliran (m/s)

Jika profil kecepatan aliran dianggap seragam pada sisi hulu dan hilir; maka persamaan kontinuitas berlaku sebagai berikut:

$$Q_{th} = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2)$$

Dimana

Q_{th} = Laju alir volumetris atau kapasitas teoritis (m^3/s)

A = Luas penampang aliran (m^2)

Dengan mensubstitusikan V_1 dari persamaan (1); maka persamaan (2) menjadi:

$$Q_{th} = A_2 \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \right]^{1/2} = \frac{\pi d^2}{4} \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)} \right]^{1/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

Jika didefinisikan rasio diameter $\beta = d/D$ persamaan (3) menjadi:

$$Q_{th} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4)$$

Dengan demikian kapasitas aliran teoritis bisa dihitung dengan mengukur beda tekanan (ΔP) antara ① dan ②.

Salah satu cara membandingkan keakuratan alat ukur aliran berbasis beda tekanan adalah dengan membandingkan kapasitas aliran aktual terhadap kapasitas aliran teoritisnya. Rasio antara kapasitas aliran aktual terhadap kapasitas aliran teoritis disebut koefisien buangan (*coefficient of discharge, Cd*):

$$C_d = \frac{Q_{actual}}{Q_{th}} \quad (5)$$

3. Metodologi Penelitian

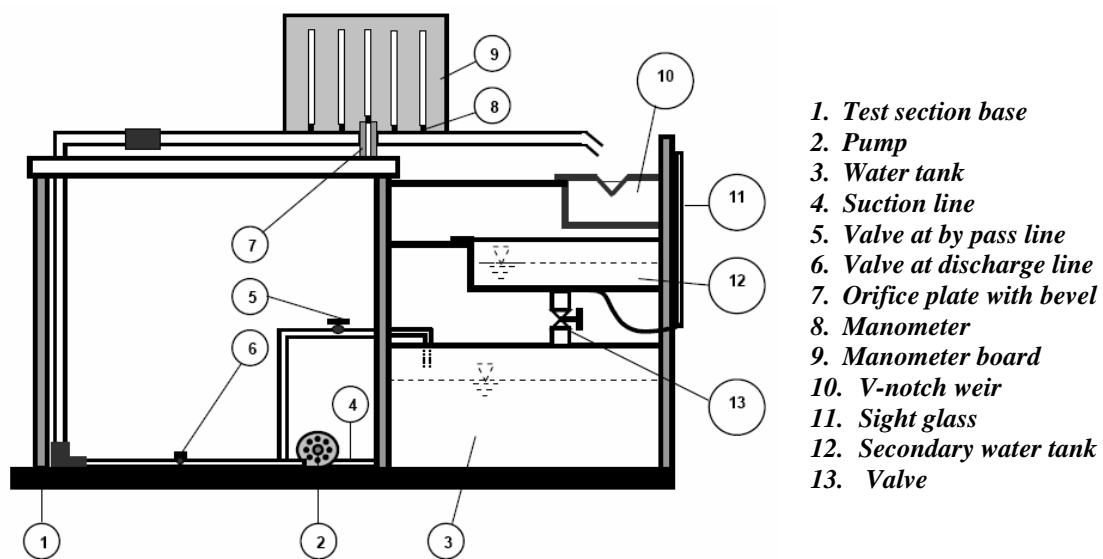
Susunan peralatan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini. Air disirkulasikan menggunakan pompa (2) dan besarnya laju alir volumetris secara sederhana dikontrol dengan menggunakan katup (6). Aliran melewati *orifice plate* (7), dimana pada pipa hulu dan hilir *orifice plate* dipasang *pressure tap* untuk manometer (8) masing-masing sebanyak 4 buah, dengan jarak D, 2D, 3D dan 4D dengan D = diameter pipa. Selain 8 manometer tersebut, tepat pada *orifice plate* juga dipasang manometer *pressure tap* untuk mengukur tekanan pada *vena contracta* plat orifis. Pada plat orifis tipis bersisi tajam hal ini tidak memungkinkan dilakukan; tapi dalam penelitian ini tebal plat orifis 10 mm sehingga dapat dipasangi manometer. Selama mengalir melewati *orifice plate*, tekanan hulu dan hilir aliran dicatat. Air kemudian dibuang ke sebuah *V-notch weir* dimana kapasitas aktual

aliran bisa langsung terbaca maupun dihitung berdasarkan ketinggian air pada *V-notch weir*. Dalam alat uji ini terdapat juga *sight glass* yang digunakan sebagai pembanding kapasitas aliran yang ditunjukkan oleh *V-notch weir*.

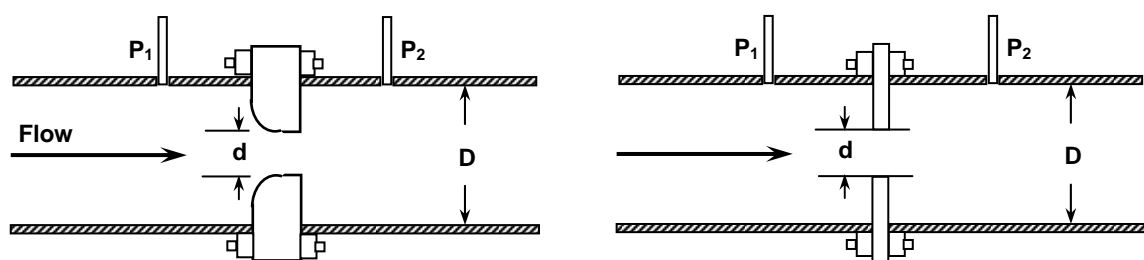
Orifice plate berukuran tebal dengan sisi masuk yang diperhalus (*bevel*) yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 (a), dan sebagai pembanding pada Gambar 3 (b) ditunjukkan *orifice plate* tipis bersisi tajam (tidak diuji dalam penelitian ini).

Data-data geometri dan aliran dalam pengujian meliputi:

- Pipa terbuat dari akrilik transparan, berdiameter 16 mm.
- *Orifice plate* yang diuji 3 buah, masing-masing memiliki rasio diameter $\beta = 0.5, 0.6, \text{ dan } 0.7$.
- Tebal *orifice plate* 10 mm, sehingga rasio tebal terhadap diameter orifis $t/d = 1.25, 1.04 \text{ dan } 0.89$; ketiganya bisa dikategorikan plat orifis tebal. Plat orifis dikategorikan tebal jika memiliki $t/d > 0.5$ (Fossa, 2002).
- Manometer pengukur tekanan dipasang pada 9 titik, yaitu 1 pada plat orifis, 4 pada hulu plat orifis, dan 4 pada hilir plat orifis dengan jarak antar manometer sebesar diameter pipa, D .
- Pengujian dilakukan pada *range* bilangan Reynolds antara $\pm 9270 \text{ s/d } \pm 27810$.



Gambar 2. Susunan peralatan eksperimen



Gambar 3. (a). *Orifice plate* tebal dengan *bevel*

(b). *Orifice plate* tipis bersisi tajam

Proses pengumpulan dan pengolahan data secara singkat dijelaskan sebagai berikut:

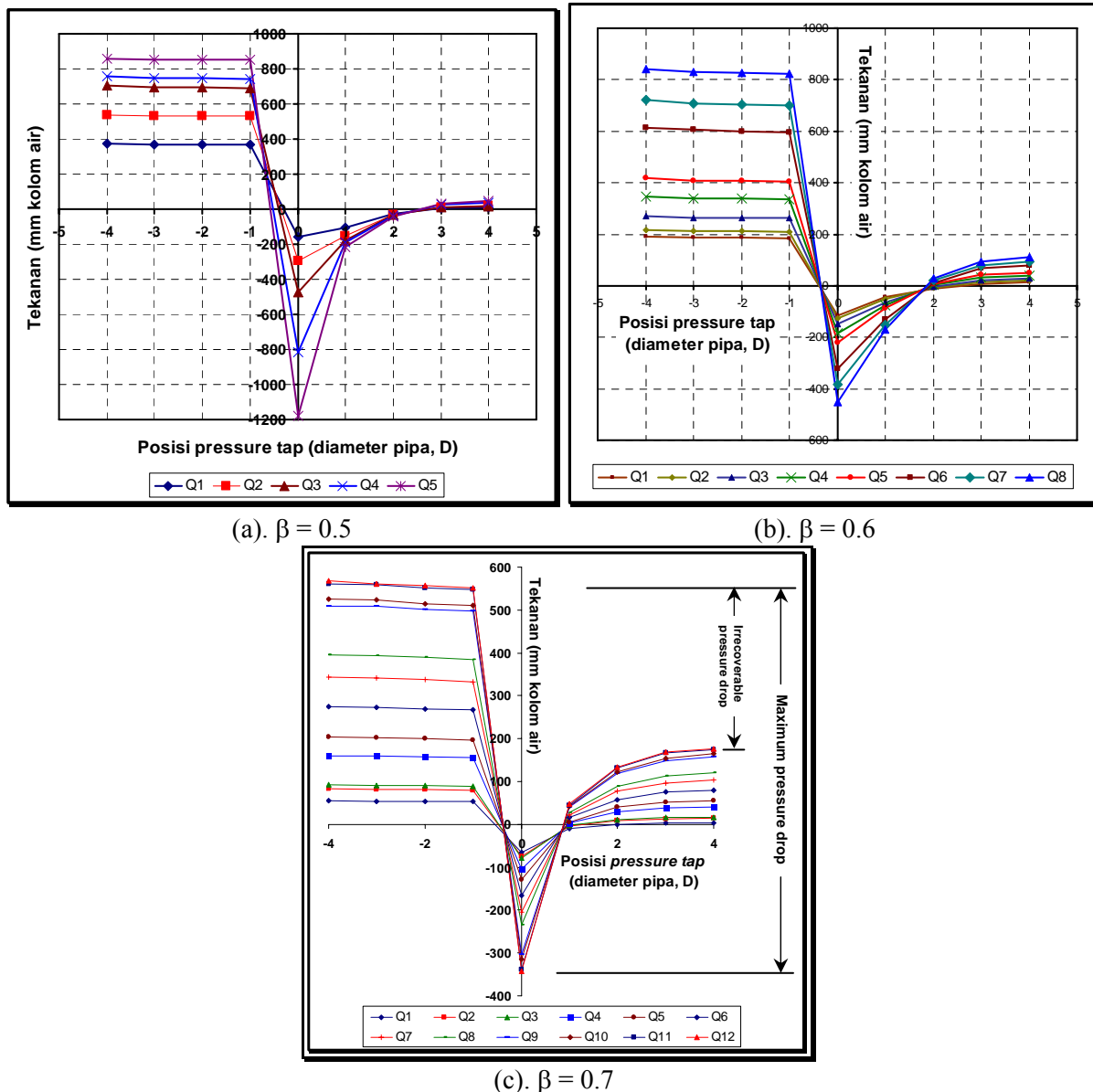
1. Mengalirkan air dengan kapasitas Q_1 , catat seluruh data tekanan dalam skala tinggi kolom air pada manometer. Tekanan pada 9 titik pengukuran tekanan dinyatakan sebagai $h_{up-4}, h_{up-3}, h_{up-2}, h_{up-1}, h_{orifice}, h_{down-1}, h_{down-2}, h_{down-3}, \text{ dan } h_{down-4}$; dimana *subscript* up-4 berarti arah *upstream* (hulu) sejauh $4D$ dari plat orifis, dan down-1 berarti arah *downstream* (hilir) sejauh $1D$ dari plat orifis.
2. Kapasitas aliran aktual (Q_{act}) diukur dengan pembacaan langsung pada *V-notch weir*.
3. Kapasitas aliran teoritis dihitung menggunakan rumus pada persamaan (4) dengan menggunakan 5 macam ΔP , yaitu $\Delta P_1 = \rho g (h_{up-1} - h_{orifice})$; $\Delta P_2 = \rho g (h_{up-1} - h_{down-1})$; $\Delta P_3 = \rho g (h_{up-1} - h_{down-2})$; $\Delta P_4 = \rho g (h_{up-1} - h_{down-3})$; $\Delta P_5 = \rho g (h_{up-1} - h_{down-4})$; semuanya dalam satuan Pascal. ΔP_1 digunakan untuk menghitung Q_{th-1} dan seterusnya sampai Q_{th-5} .

4. Percobaan diulang untuk dinilai Q_2 , Q_3 , dst.
5. Data-data tekanan, kapasitas aliran aktual dan kapasitas aliran teoritis tersebut kemudian diplotkan dalam grafik untuk didiskusikan/dibahas lebih lanjut.

Hal yang paling berbeda dalam perhitungan kapasitas teoritis pada penelitian ini, dibanding penelitian-penelitian sebelumnya adalah pengukuran ΔP antara hulu dan plat orifis. Pada penelitian-penelitian terdahulu pada umumnya ΔP diukur pada jarak $D - D$ atau $D - D/2$ pada arah hulu dan hilir plat orifis. Penggunaan nilai tekanan pada plat orifis dilakukan dengan pertimbangan teoritis bahwa persamaan Q_{th} didapatkan dengan memanfaatkan persamaan Bernoulli, dimana kondisi aliran ideal masih berlaku pada hulu sampai *vena contracta* pada plat orifis, dan selanjutnya sudah terjadi *losses*. Dari pertimbangan teoritis tersebut dugaan awal (hipotesa) dalam penelitian ini adalah bahwa perhitungan kapasitas teoritis menggunakan beda tekanan yang melibatkan titik pengukuran hulu sampai *vena contracta* akan menghasilkan nilai yang paling mendekati nilai kapasitas aktualnya. Selanjutnya variasi posisi pengukuran dalam penelitian ini dapat dinyatakan dengan $D - 0$; $D - D$; $D - 2D$; $D - 3D$; dan $D - 4D$ sedangkan beda tekanannya dinyatakan dalam ΔP_1 , $\Delta P_2 \dots \Delta P_5$ sebagaimana telah disampaikan sebelumnya.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Distribusi tekanan aliran melintasi *orifice flow meter*

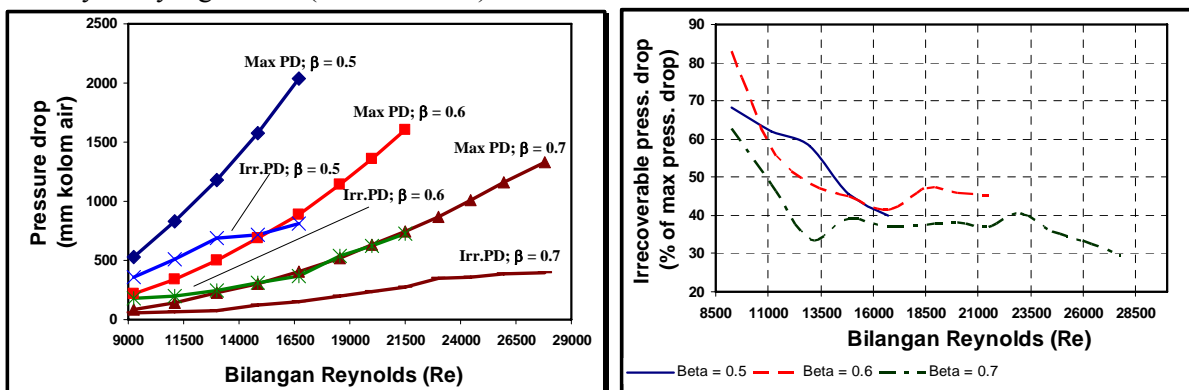


Gambar 4. Distribusi tekanan aliran melintasi *orifice flow meter*

Gambar 4 menunjukkan grafik distribusi tekanan aliran sepanjang hulu dan hilir dan juga nilai tekanan pada plat orifis. Distribusi tekanan yang ditunjukkan telah memenuhi natur aliran melintasi *vena contracta*, dimana tekanan terendah (sebaliknya kecepatan aliran menjadi yang tertinggi) terjadi pada luasan penampang aliran minimum, yaitu pada plat orifis. Setelah melewati *vena contracta* tekanan berangsur naik kembali namun tidak bisa mencapai nilai tekanan semula. Selisih tekanan hulu dan hilir inilah yang disebut sebagai *irrecoverable pressure drop* atau *non-recoverable pressure drop* atau *permanent pressure drop*, secara grafis ditunjukkan pada Gambar 4 (c). Pola distribusi tekanan pada *orifice plate* $\beta = 0.5, 0.6$ dan 0.7 bisa dikatakan serupa, namun nilai tekanan tertinggi dan terendah lebih besar pada *orifice plate* dengan $\beta = 0.5$ diikuti 0.6 dan 0.7 ; hal ini bisa dipahami karena dengan pada $\beta = 0.5$ luas penampang minimum atau *vena contracta*-nya paling kecil.

Pada ketiga pengujian, semakin besar kapasitas aliran maka *maximum pressure drop* makin besar, sedang *irrecoverable pressure drop* juga semakin besar dengan peningkatan yang makin turun, ditunjukkan pada Gambar 5 (a). Hal ini sesuai dengan persamaan (4), dimana besarnya *pressure drop* proporsional terhadap kuadrat kapasitas aliran. Artinya semakin besar kapasitas aliran yang harus diukur menggunakan *orifice flow meter*, maka kerugian energi aliran juga semakin besar.

Besarnya *irrecoverable pressure drop* sering ditampilkan sebagai prosentase dari *maximum pressure drop*, ditunjukkan pada Gambar 5 (b). Dari Gambar 5 (b) terlihat bahwa besarnya prosentase *irrecoverable pressure drop* semakin berkurang dengan kenaikan kapasitas (dinyatakan dalam bilangan Reynolds, Re). Hal ini berarti semakin besar kapasitas, kemampuan aliran untuk memulihkan tekanan juga semakin meningkat. Pada $\beta = 0.7$ prosentase *irrecoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* sudah cukup rendah ($< 40\%$) pada bilangan Reynold yang rendah ($Re = \pm 12000$).



(a) Maximum dan irrecoverable pressure drop;

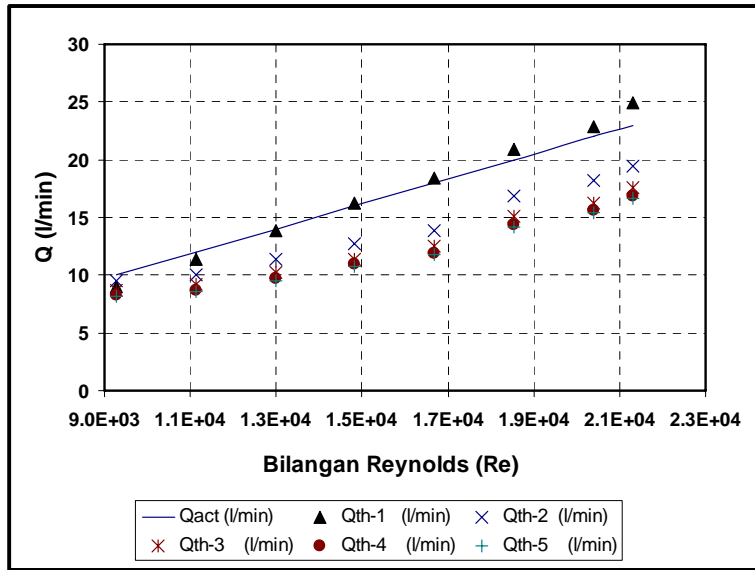
(b) Irrecoverable PD sebagai prosentase max. PD

Gambar 5. Maximum dan Irrecoverable pressure drop

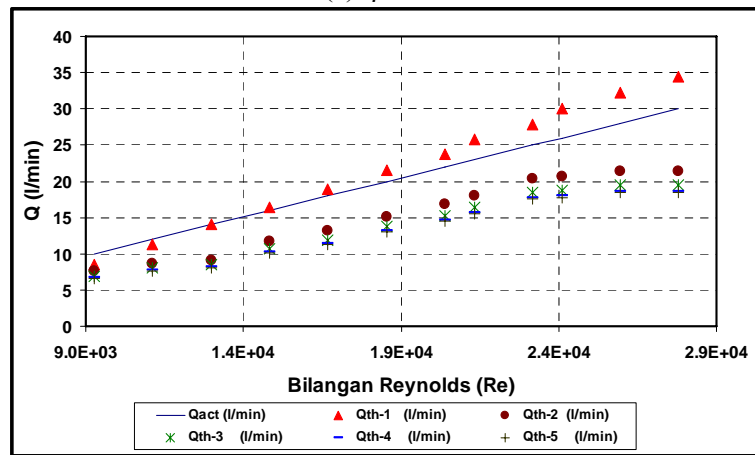
4.2. Perbandingan Q_{act} dan Q_{th} pada berbagai variasi titik pengukuran beda tekanan

Distribusi tekanan aliran melintasi *orifice flow meter* pada Gambar 4 di atas masih menyisakan pertanyaan menarik, terutama untuk tekanan pada sisi hilir plat orifis. Tekanan sampai pada jarak $4D$ arah hilir plat orifis baru menunjukkan nilai yang konstan. Sebagaimana telah disebutkan pada bagian awal, kebanyakan riset terdahulu menempatkan *pressure tap* pada jarak $D/2$ atau D arah hilir plat orifis sedangkan dari *plotting* distribusi tekanan pada posisi tersebut masih terjadi pemulihan tekanan. Untuk menjawab hal tersebut dilakukan perhitungan Q_{th} menggunakan 5 kombinasi ΔP sebagaimana telah dijelaskan dalam Metodologi Penelitian, kemudian dibandingkan terhadap hasil pengukuran kapasitas aktualnya (Q_{act}); hasilnya ditampilkan pada Gambar 6 di bawah ini.

Dari grafik pada Gambar 6, baik untuk $\beta = 0.5, 0.6$ maupun 0.7 tampak bahwa hasil Q_{act} mendekati sama dengan Q_{th-1} , yaitu Q_{th} yang dalam perhitungannya menggunakan beda tekanan terukur antara titik pada hulu plat orifis dan titik tepat pada plat orifis. Pada posisi pengukuran beda tekanan yang lain, Q_{th} semakin menjauhi nilai Q_{act} dengan kecenderungan data yang agak berbeda. Jika nilai Q_{th-1} digunakan untuk memplot *coefficient of discharge* (C_d)-nya dengan sendirinya C_d -nya bernilai sekitar 1, ditunjukkan pada Gambar 7.

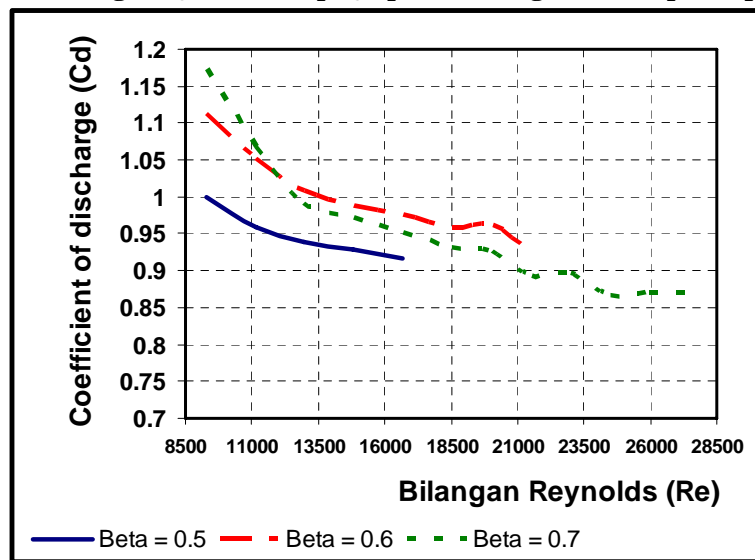


(a). $\beta = 0.6$



(b). $\beta = 0.7$

Gambar 6. Perbandingan Q_{act} terhadap Q_{th} pada berbagai variasi posisi pengukuran ΔP



Gambar 7. C_d orifice flow meter pada berbagai kapasitas pengujian

Nilai tertinggi C_d orifice pada semua pengujian terjadi pada Re rendah dan semakin turun sejalan dengan kenaikan Re. Hal demikian memang karakteristik nilai C_d orifice flow meter, sedang pada nozzle flow meter nilai C_d justru semakin besar dengan kenaikan Re (Fox, 1994;

Munson, 2002). Namun nilai C_d yang tinggi berkisar antara $1.17 \div 0.87$ ini lebih menyerupai nilai C_d *nozzle flow meter* daripada C_d *orifice flow meter* (berkisar $0.6 \div 0.7$). Ketebalan plat orifis dan *bevel* pada sisi masuknya diduga berhasil membuat aliran melintasi *orifice flow meter* dalam penelitian ini menyerupai aliran pada nosel. Sebagian besar referensi dasar dan hasil penelitian terbaru menyatakan bahwa C_d *orifice flow meter* < 1 meskipun ada juga yang menghasilkan $C_d > 1$ (Kim, 1997). Fox (1994) menyatakan bahwa nilai C_d *orifice flow meter* dapat bernilai lebih dari satu.

5. Kesimpulan

Pengujian *orifice flow meter* telah dilakukan menggunakan plat orifis dengan *bevel* pada sisi masuknya yang memiliki rasio diameter, $\beta = 0.5, 0.6, \text{ dan } 0.7$ pada *range* kapasitas aliran dengan bilangan Reynolds antara ± 9270 s/d ± 27810 menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

- 1) *Maximum pressure drop* tertinggi terjadi pada *orifice flow meter* dengan $\beta = 0.5$ diikuti $\beta = 0.6$ dan 0.7 .
- 2) Prosentase *irrecoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* semakin menurun jika rasio diameter (β) semakin besar. Untuk semua nilai β , prosentase *irrecoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* semakin turun jika kapasitas aliran semakin besar.
- 3) Pada *orifice flow meter* dengan $\beta = 0.7$, prosentase *irrecoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* mencapai nilai yang cukup rendah ($< 40\%$) pada bilangan Re rendah ($Re = \pm 12000$).
- 4) Perhitungan kapasitas teoritis pada semua *orifice plate* yang menggunakan beda tekanan (ΔP) pada posisi $D - 0$ atau beda tekanan antara titik hulu sejauh D (diameter pipa) dan titik pada plat orifis menghasilkan kapasitas teoritis yang paling mendekati kapasitas aktual yang terukur.
- 5) Nilai tertinggi C_d (*coefficient of discharge*) *orifice flow meter* pada semua β yang diuji berkisar antara $1.17 \div 1$ lebih menyerupai nilai C_d *nozzle flow meter*; namun kecenderungannya tetap sama dengan *orifice flow meter* pada umumnya yaitu semakin kecil sejalan dengan kenaikan bilangan Re.

Daftar Pustaka

- Fossa, M., Guglielmini, G., 2002, *Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and thick orifices*, Experimental Thermal and Fluid Science, 26, pp. 513-523.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., 1994, *Introduction to Fluid Mechanics*, 4th edition, John Wiley & Sons, New York.
- Kim, B.B., Pak, B.C., Cho, N.H., Chi, D.S., Choi, H.M., Choi, Y.M., and Park, K.A., 1997, *Effects of cavitation and plate thickness on small diameter ratio orifice meters*, Flow Meas. Instrum., Vol. 8, No. 2, pp. 85-92.
- Morrison, G.L., Hauglie, J., DeOtte, Jr, R.E., 1995, *Beta ratio, axisymmetric flow distortion and swirl effects upon orifice flow meters*, Flow Meas. Instrum., Vol. 6, No. 3, pp. 207-216.
- Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H., 2002, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4th Edition, John Wiley & Sons, USA.
- Prabu, S.V., Mascomani, R., Balakrishnan, K., and Konnur, M.S., 1996, *Technical Note: Effect of upstream pipe fittings on the performance of orifice and conical flowmeters*, Flow Meas. Instrum., Vol. 7, No. 1, pp. 49-54.
- Ramamurti, K., Nandakumar, K., 1999, *Characteristics of flow through small sharp-edged cylindrical orifices*, Flow Measurement and Instrumentation, 10, pp. 133-143.
- Zimmermann, H., 1999, *Examination of disturbed pipe flow and its effects on flow measurement using orifice plates*, Flow Measurement and Instrumentation, 10, pp. 223-240.
- , 2005, *Orifice, nozzle and venturi flow rate meters*, www.EngineeringToolBox.com.