

PENGARUH SUDUT NOZZLE TERHADAP PERMANENT PRESSURE DROP DAN DISCHARGE COEFFICIENT PADA NOZZLE FLOW METER

Ainul Ghurri^{1*} dan SPG Gunawan Tista²

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*E-mail: a.ghurri@gmail.com

ABSTRAK

Nozzle flow meter merupakan salah satu alat ukur aliran berbasis perbedaan tekanan yang banyak digunakan dalam dunia industri dimana aliran dihitung didasarkan pada persamaan *Bernoulli* dengan menghitung *pressure drop* yang terjadi pada aliran yang melewati sebuah penghalang berbentuk *nozzle* yang dipasang dalam aliran tersebut. Pengujian *nozzle flow meter* telah dilakukan dengan menggunakan plat *nozzle* dengan rasio diameter $\beta = 0.5$ yang memiliki ketebalan 15 mm dan sudut kemiringan *nozzle* (α) sebesar 5°, 10°, 15°, 20° dan, 25°. Pengujian dilakukan pada laju alir volumetris 10 s/d 30 L/menit ekuivalen dengan bilangan Reynolds (*Re*) 9000 s/d 30000. Posisi *pressure tap* untuk *nozzle flow meter* yang diuji dipilih 1 inch di hulu aliran plat *nozzle* dan 1 inch di hilir aliran plat *nozzle*, sesuai hasil pengujian awal yang menghasilkan kapasitas aliran teoritis yang paling mendekati nilai aktualnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut *nozzle* tidak berpengaruh signifikan terhadap *permanent pressure drop* aliran melintasi plat *nozzle*, namun kecenderungannya adalah semakin menurun jika sudut *nozzle* semakin besar. *Permanent pressure drop* yang terjadi berkisar antara 60.1% pada sudut *nozzle* 25° dan yang tertinggi 63.6% pada sudut 5°. Sudut *nozzle* yang lebih besar berdampak aliran bergerak lebih konvergen menuju *vena contracta* dan meminimalisir kehilangan energi pada proses konversi dari energi tekanan menjadi energi kinetik aliran. Nilai *discharge coefficient* (*Cd*) yang dihasilkan seluruh pengujian berkisar antara 0.9 s/d 1.07 dimana angka ini tidak jauh berbeda dengan yang ditunjukkan dalam beberapa literatur dan publikasi. Nilai *Cd* yang paling mendekati literatur berdasar *Re* yang diuji adalah untuk sudut *nozzle* 20°.

ABSTRACT

Nozzle flow meter is a differential pressure flow measurement device that has widely use in industrial application. The flow is measured by calculating the pressure drop across the nozzle based on *Bernoulli's equation*. The experimental study of *nozzle flow meter* is conducted using *nozzle* with diameter ratio $\beta = 0.5$, *nozzle* width 15 mm and angle of *nozzle* entrance edge 5°, 10°, 15°, 20°, and 25°, respectively. The flow capacity was 10 - 30 L/min, equivalent to Reynolds number (*Re*) 9000 - 30000. The *pressure tap* position were 1 inch at each upstream and downstream of the *nozzle* section. The result showed that the angle of *nozzle* entrance edge had no significant effect to the *permanent pressure drop*. The *permanent pressure drop* slightly increased with the angle. The lowest *permanent pressure drop* was 60.1% relative to the maximum *pressure drop* with the *nozzle* angel 25°, and the highest was 63.6% with the *nozzle* angle 5°. The *dischage coefficients* of the *nozzle flow meter* were 0.9 – 1.07, similar to the most literature.

Keywords: nozzle angle, discharge coefficient

1. Pendahuluan

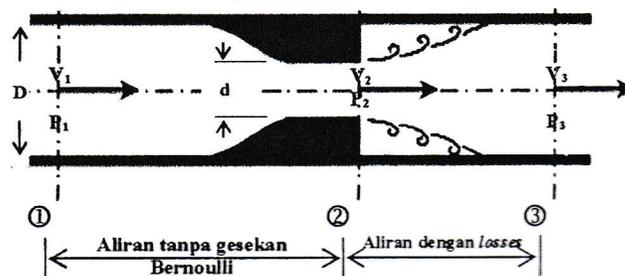
Dalam melakukan eksperimen pengukuran merupakan langkah penting yang harus dilakukan dalam menentukan jumlah besaran atau ukuran yang akan dipakai sebagai acuan untuk menentukan kebenaran hasil pemecahan secara analitis. Sehingga kesalahan yang terjadi dapat ditekan sekecil mungkin. Salah satu contoh dari jenis pengukuran tersebut adalah pengukuran besar laju aliran fluida, dimana parameter penting dari pengukuran ini adalah tekanan, kecepatan fluida, dan kapasitas atau laju alir volumetris. Oleh karena itu peranan alat ukur sangat dibutuhkan untuk mengukur besar laju aliran fluida tersebut.

Alat ukur yang dipakai dalam pengukuran aliran fluida disebut *flowmeter* dan salah satu jenisnya adalah *nozzle flow meter*. Dimana aliran dihitung dengan mengukur *pressure drop* yang terjadi pada aliran yang melewati sebuah penghalang yang dipasang dalam aliran tersebut.

Sangat terbatasnya referensi mengenai desain *nozzle flowmeter* terkait dengan kerahasiaan dan kehak-milikan (*copy right*), serta harganya yang mahal menjadikan hambatan untuk melakukan pengujian obyek bagi mahasiswa dan dosen. Oleh karena itu diperlukan pengembangan flow meter untuk keperluan kegiatan laoratorium, penelitian dan aplikasi yang lain. Pada *nozzle flowmeter*, sudut kemiringan *Nozzle* merupakan variabel *geometris* yang cukup menentukan atau mempengaruhi besarnya tekanan yang terukur sehingga dapat juga mempengaruhi tingkat keakurasiannya. Berdasarkan hal diatas, peneliti ingin membuat alat ukur aliran fluida berbasis perbedaan tekanan tipe *nozzle* dengan memvariasikan sudut kemiringan *nozzle*.

2. Teori

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:

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

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

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

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*):

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

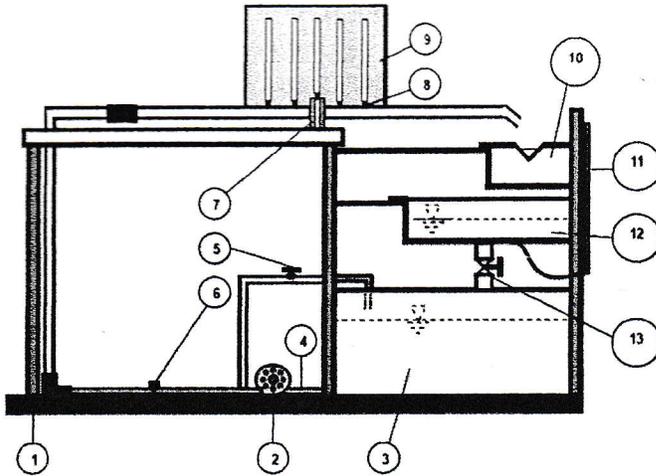
3. Metode Penelitian

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 *nozzle plate* (7), dimana pada pipa hulu dan hilir *nozzle 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 *nozzle plate* juga dipasang manometer *pressure tap* untuk mengukur tekanan pada *vena contracta* plat nosel. Pada plat tipis bersisi tajam hal ini tidak memungkinkan dilakukan; tapi dalam penelitian ini tebal plat orifis 15 mm sehingga dapat dipasang manometer. Selama mengalir melewati *nozzle 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*. *Nozzle* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Posisi *pressure tap* untuk pengukuran tekanan ditunjukkan pada Gambar 4.

Data-data geometri dan aliran dalam pengujian meliputi:

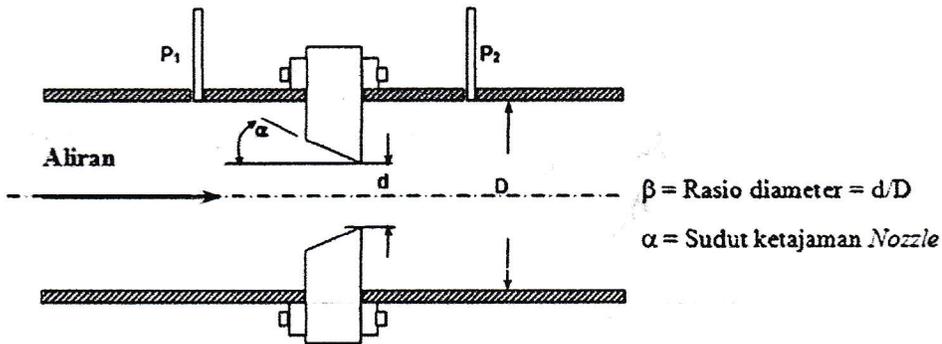
- Pipa terbuat dari akrilik transparan, berdiameter 16 mm.
- *Nozzle plate* yang diuji memiliki rasio diameter $\beta = 0.5$
- Jumlah *nozzle* yang dibuat sebanyak 5 buah dengan sudut kemiringan α masing-masing 5° ; 10° ; 15° ; 20° ; 25° .

- Manometer pengukur tekanan dipasang pada 7 titik, yaitu 1 pada plat nosel, 2 pada hulu plat nosel, dan 4 pada hilir plat orifis dengan jarak antar manometer sebesar diameter pipa, D.
- Pengujian dilakukan pada *range* bilangan Reynolds antara ± 5000 s/d ± 30000 .

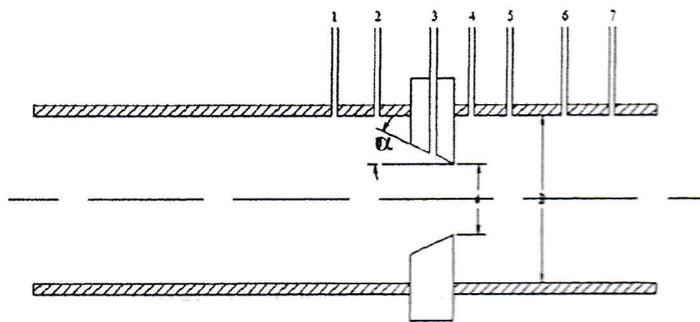


1. Test section base
2. Pump
3. Water tank
4. Suction line
5. Valve at by pass line
6. Valve at discharge line
7. Orifice plate with bevel
8. Manometer
9. Manometer board
10. V-notch weir
11. Sight glass
12. Secondary water tank
13. Valve

Gambar 2. Susunan Peralatan Eksperimen

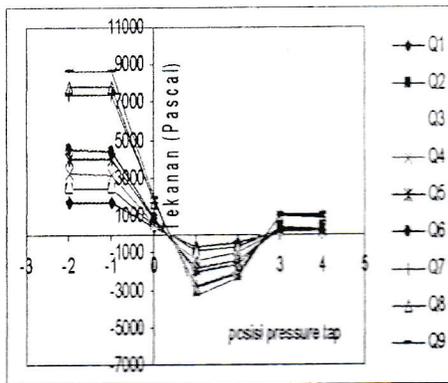


Gambar 3. Nozzle section

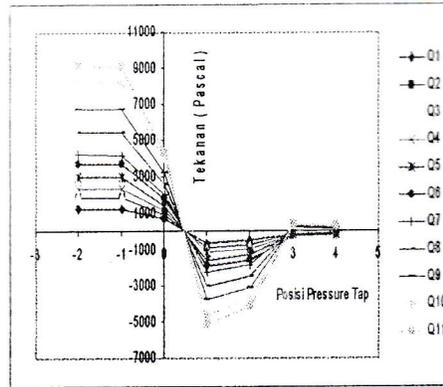


Gambar 4. Posisi pressure tap

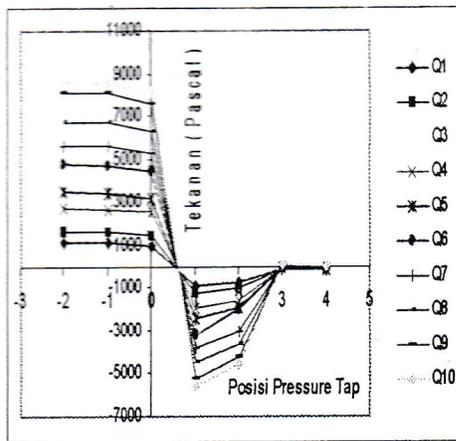
4. Hasil dan Pembahasan



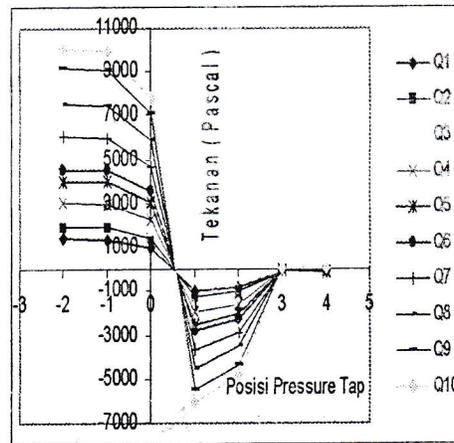
(a) $\alpha = 5^\circ$



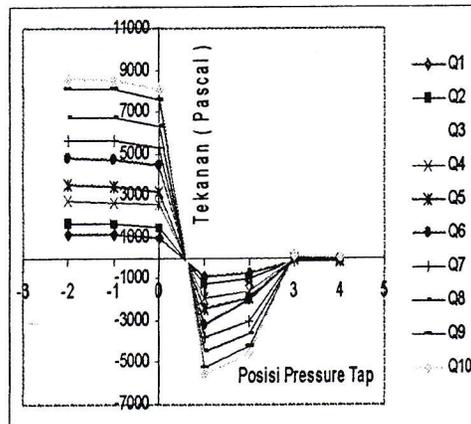
(b) $\alpha = 10^\circ$



(c) $\alpha = 15^\circ$



(d) $\alpha = 20^\circ$



(e) $\alpha = 25^\circ$

Gambar 5 Grafik distribusi tekanan pada tiap - tiap *pressure tap*

Gambar 5 menunjukkan grafik distribusi tekanan aliran sepanjang hulu dan hilir dan juga nilai tekanan di tiap - tiap *pressure tap* pada *nozzle flowmeter*, Pada sumbu x : -2, -1, 0, 1, 2, 3 dan, 4 menunjukkan posisi penempatan *pressure tap*. Dimana -2 dan -1 menunjukkan *pressure*

tap berada pada hulu Nozzle, 0 menunjukkan posisi Pressure Tap berada tepat pada nozzle. Sedangkan untuk 1, 2, 3, dan 4 menunjukkan pressure tap berada pada hilir nozzle. Pada grafik diatas menjelaskan bahwa distribusi tekanan yang ditunjukkan telah memenuhi alur aliran melintasi vena contracta, dimana tekanan terendah terjadi pada luasan penampang aliran terkecil, yaitu yang paling mendekati Nozzle (pada Gambar 5 ditunjukkan antara pressure tap 0 - 1). Setelah melewati vena contracta tekanan berangsur naik kembali tetapi tidak dapat mencapai pada tekanan awal (sebelum terjadi penghalangan oleh nozzle). Selisih tekanan hulu dan hilir inilah yang disebut non recoverable pressure drop atau disebut juga permanent pressure drop.

Untuk menghitung besarnya prosentase permanent pressure drop untuk masing – masing Nozzle adalah sebagai berikut :

$$\text{Non recoverable pressure drop} = (a - b / a) \cdot 100 \%$$

Dimana : a = Rentang tekanan tertinggi dengan tekanan terendah

b = Rentang tekanan terendah dengan tekanan tertinggi setelah halangan

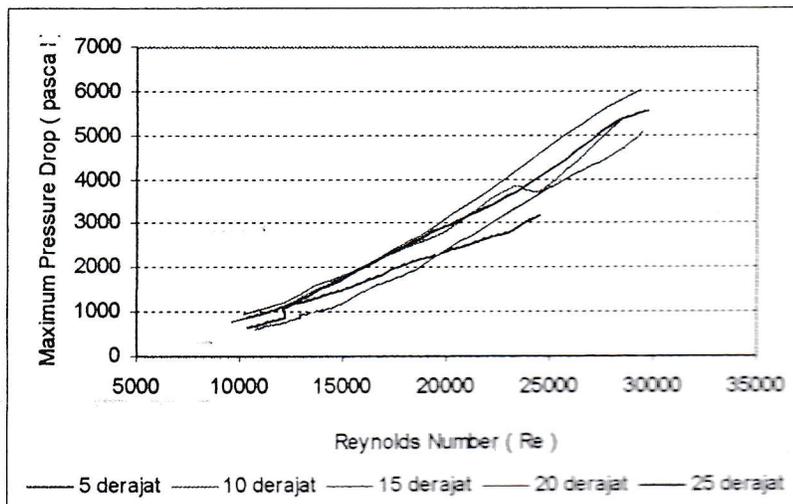
Untuk $\alpha = 5^\circ$:

$$\begin{aligned} \text{Permanent pressure drop} &= \frac{(8718,73 + 3207,54) - (3207,54 + 1136,8)}{8718,73 + 3207,54} \cdot 100\% \\ &= 0,6357 \cdot 100\% \\ &= 63,57\% \end{aligned}$$

Maka besarnya prosentase non recoverable pressure drop untuk masing – masing Nozzle adalah sebagai berikut :

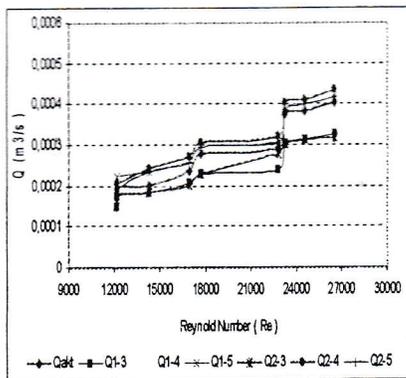
1. Nozzle dengan $\alpha = 5^\circ$, permanent pressure drop = 63,6 %
2. Nozzle dengan $\alpha = 10^\circ$, permanent pressure drop = 61,43 %
3. Nozzle dengan $\alpha = 15^\circ$, permanent pressure drop = 60,54 %
4. Nozzle dengan $\alpha = 20^\circ$, permanent pressure drop = 61,92 %
5. Nozzle dengan $\alpha = 25^\circ$, permanent pressure drop = 60,1 %

Terlihat bahwa prosentase permanent pressure drop paling rendah terjadi pada $\alpha = 25^\circ$. Berarti bahwa tekanan yang pulih pada $\alpha = 25^\circ$ lebih rendah dibanding dengan α yang lain, hal ini disebabkan dengan lebih besarnya sudut kemiringan Nozzle, yang berpengaruh pada besarnya pressure drop yang terjadi. Namun secara keseluruhan perbedaan Permanent Pressure Drop tidak terlalu besar.

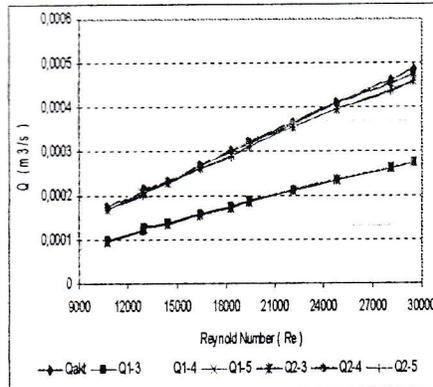


Gambar 6 Grafik Maximum Pressure Drop

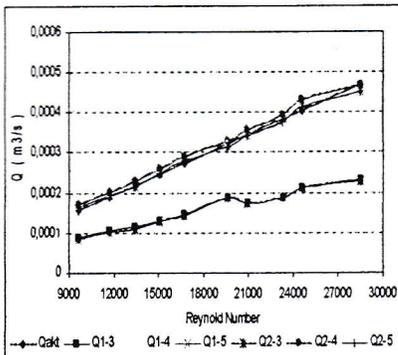
Pada Gambar 6 juga ditunjukkan, *pressure drop* meningkat sejalan dengan meningkatnya kapasitas aliran (ditunjukkan dengan bilangan *Reynolds*). Ini berarti semakin besar kapasitas aliran maka *maximum pressure drop* makin tinggi, sedangkan semakin kecil kapasitas aliran maka *pressure drop* yang terjadi semakin rendah. Sama halnya dengan *non recoverable pressure drop*, semakin besar kapasitas aliran dan *pressure drop*, *non recoverable pressure drop* semakin besar, begitu juga sebaliknya. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa secara umum *pressure drop* semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya sudut kemiringan *nozzle*.



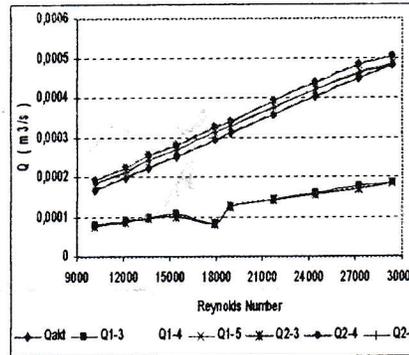
(a) $\alpha = 5^\circ$



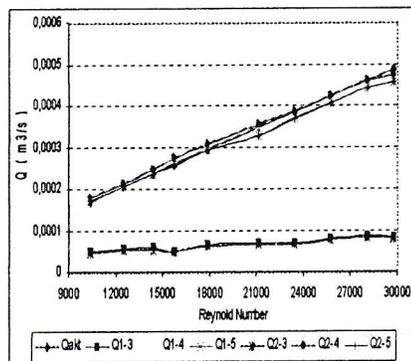
(b) $\alpha = 10^\circ$



(c) $\alpha = 15^\circ$



(d) $\alpha = 20^\circ$



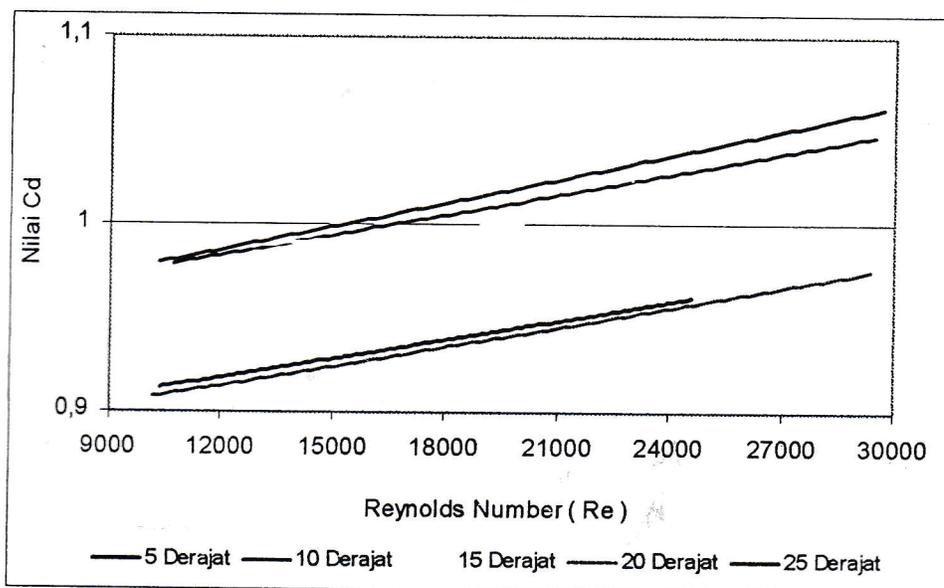
(e) $\alpha = 25^\circ$

Gambar 7. Grafik perbandingan Q_{akt} terhadap Q_t pada posisi pengukuran ΔP

Pada analisa data, perhitungan Q_t dilakukan dengan menggunakan enam kombinasi ΔP yaitu ΔP_{1-3} , ΔP_{1-4} , ΔP_{1-5} , ΔP_{2-3} , ΔP_{2-4} dan ΔP_{2-5} . Kemudian dibandingkan terhadap hasil pengukuran kapasitas aktualnya (Q_{akt}).

Dari grafik diatas pada Gambar 7, nilai Q_{t2-5} yang dalam perhitungannya menggunakan beda tekanan $P_2 - P_5$ (dalam penempatan *pressure tap* 1 inchi di hulu dan hilir aliran) lebih mendekati nilai Q_{akt} . Pada posisi pengukuran beda tekanan yang lain (ΔP_{2-4} ; ΔP_{1-4} ; ΔP_{1-3} , ΔP_{1-5} dan ΔP_{2-4}), Q_t semakin menjauhi Q_{akt} . Penempatan *pressure tap* (hilir aliran) yang lebih mendekati *vena contracta* cenderung menghasilkan nilai Q_t yang menjauhi nilai Q_{akt} .

Untuk $\alpha = 5^\circ$ jangkauan pengukuran yang dihasilkan lebih pendek di banding dengan *Nozzle* yang lain dengan nilai kapasitas aliran yang kecil dan nilai *Reynolds* yang rendah.



Gambar 8. Grafik hubungan antara nilai C_d dengan bilangan *Reynolds* Untuk seluruh sudut kemiringan *Nozzle*.

Dikarenakan nilai Q_{t2-5} yang paling mendekati nilai Q_{akt} , maka nilai C_d yang dipakai untuk memplotkan ke dalam grafik adalah C_{d2-5} , pada Gambar 8 menunjukkan grafik trend line perubahan nilai C_d pada bilangan *Reynolds* yang semakin meningkat

Nilai C_d terendah *Nozzle* pada semua pengujian adalah 0.90 (pada $\alpha = 5^\circ$), sedangkan nilai C_d tertinggi adalah 1,07 (pada $\alpha = 25^\circ$). Pada Gambar 8 menunjukkan grafik nilai C_d pada semua *Nozzle* yang menghasilkan trend yang terus naik, dimana mula - mula pada Re rendah C_d yang dihasilkan rendah dan sejalan dengan kenaikan Re , C_d yang dihasilkan juga naik.

5. Kesimpulan

Pengujian *nozzle flowmeter* telah dilakukan dengan menggunakan plat *nozzle* dengan rasio diameter $\beta = 0,5$ yang memiliki ketebalan 15 mm dan sudut kemiringan *nozzle* adalah $\alpha = 5^\circ$, 10° , 15° , 20° dan, 25° menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. *Maximum pressure drop* tertinggi terjadi pada *nozzle flowmeter* dengan $\alpha = 20^\circ$ diikuti $\alpha = 25^\circ$, 15° , 10° dan 5° . Prosentase *non recoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure*

- drop* semakin turun jika sudut kemiringan semakin besar. Untuk semua nilai α , *non recoverable pressure drop* semakin meningkat jika kapasitas aliran semakin besar.
2. Pada *nozzle* dengan $\alpha = 25^\circ$, prosentase *non recoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* adalah yang paling rendah dengan nilai prosentase $\pm 60\%$. Namun secara keseluruhan perbedaannya tidak terlalu besar.
 3. Perhitungan kapasitas teoritis pada semua *nozzle* yang menggunakan beda tekanan $P_2 - P_3$ dengan penempatan *pressure tap* 1 inchi di titik hulu dan hilir pada plat *nozzle* ternyata menghasilkan kapasitas teoritis yang paling mendekati kapasitas aktual.
 4. Nilai C_d yang dihasilkan oleh semua *nozzle* yang di uji adalah 0,90 s/d 1,07 untuk $\beta = 0,5$, sedangkan pada literatur adalah berkisar antara 0,94 s/d 0,995. Dari hasil pengujian nilai C_d yang paling mendekati literatur adalah pada $\alpha = 20^\circ$ mulai bilangan *Reynolds* 15000 sampai 29000.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami sampaikan kepada Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, Dirjen Dikti yang telah membiayai penelitian ini dengan dana Penelitian Desentralisasi skim Hibah Bersaing; melalui Surat Perjanjian Penugasan dari LPPM Universitas Udayana Nomor: 175.2/UN14.2/PNL.01.03.00/2013.

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.
- , 2001, *Water Measurement Manual: A Water Resources Technical Publication*, Water Resources Research Laboratory, US Department of Interior, Bureau of Reclamation, Chapter 14 – Measurement in Pressure Conduit, pp. 14(1 – 27).