

PENGARUH VISKOSITAS TERHADAP DISTRIBUSI TEKANAN RADIAL PADA ALIRAN DI ANTARA DUA SILINDER KONSENTRIS VERTIKAL

Basyirun¹

ABSTRACT

This research is conducted to know pressure distribution in the gap between the cylinder as function of R (flow radius) caused by velocity gradient on inside cylinder. Beside, it is conducted to show the influence of viscosity pressure distribution in the gap cylinders.

This research is carried out in two concentric cylinders of 200 mm high. The inside cylinder is rotated and the outer is fixed. The clearance of the cylinder is 10 mm. The fluid with varying viscosity ($\mu_1=9,86.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_2=10,036.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_3=15,283.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_4=27.40.10^{-5}$ kg/m.det.) is filled into the gap. The inside cylinder is driven by a DC motor connected to a motor speed controller. The pressure is measured at the lower of the gap with three point in difference radius.

The result show that the pressure in the gap of cylinder tends to decrease under atmospheric pressure. The highest decreasing tendency of pressure is near to the measurement point at inside cylinder. The result of the experiment shows that it has the same phenomenon with theory, although there is a difference quantitatively.

Keywords : *viscosity, cylinder concentric, Couette flow, pressure distribution*

INTISARI

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui distribusi tekanan di antara celah dua silinder sebagai fungsi R (radius aliran) yang disebabkan oleh adanya gradien kecepatan pada silinder dalam. Di samping itu penelitian ini dilakukan untuk menunjukkan pengaruh kekentalan terhadap distribusi tekanan di antara celah dua silinder.

Selanjutnya penelitian ini dilakukan pada dua silinder konsentris dengan ketinggian 200 mm, di mana silinder dalam diputar, sementara itu silinder luarnya diam, dengan jarak (celah) yaitu 10 mm. Cairan dengan variasi kekentalan ($\mu_1=9,86.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_2=10,036.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_3=15,283.10^{-5}$ kg/m.det.; $\mu_4=27.40.10^{-5}$ kg/m.det.) diisi ke dalam gap. Adapun silinder dalam diputar dengan motor listrik DC yang dihubungkan dengan alat pengontrol putaran yang dirancang sedemikian rupa. Pengukuran tekanan dilakukan pada celah bagian bawah dengan tiga titik yang radiusnya berbeda.

Hasilnya menunjukkan bahwa tekanan di celah antara dua silinder cenderung berkurang di bawah tekanan atmosfer. Kecenderungan penurunan tekanan terjadi mendekati silinder dalam. Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa fenomena yang terjadi sama dengan teori, walaupun ada suatu perbedaan secara kuantitatif.

Kata kunci: kekentalan, dua silinder konsentris, aliran Couette, distribusi tekanan

PENDAHULUAN

Aliran Couette adalah suatu bentuk aliran laminar yang terjadi di antara dua plat sejajar di mana plat yang satunya diam, sedangkan plat yang lainnya bergerak dengan kecepatan merata (Arora. 1980). Selanjutnya aliran Couette adalah penting dalam teori hidrodinamik dari pelumasan yang menggunakan pelumas oli seperti yang ditunjukkan pada celah yang sempit dari bantalan (*bearing*).

Berbagai studi tentang aliran Couette telah banyak dilakukan dan menghasilkan bermacam-macam karakteristik aliran. Adapun inti yang terpenting dari aliran antara dua silinder konsentris beserta paradigma dinamika fluida telah didokumentasikan pada peninjauan oleh Di Prima & Swinney (1985) dan Tagg (1994).

Ditunjukkan pada penelitian oleh Cole, 1965 (Takeda, 1999) di mana aliran di antara dua silinder (*Taylor-Couette*

¹ Dosen Jurusan Mesin FT Universitas Negeri Semarang

System) sering digunakan untuk meneliti transisi gerakan fluida dari laminar ke turbulen. Kemudian rezim aliran diamati dalam celah yang sempit (*narrow gap system*) dengan memutar silinder dalam dan silinder luarnya tetap (Takeda, 1999).

Problem dari kestabilan hidrodinamik pada aliran *viscous* antara dua silinder konsentris yang berputar pertama kali dipelajari oleh Taylor (1923). Pada penelitiannya menghasilkan bahwa aliran menjadi tidak stabil ketika putaran silinder dalam melebihi beberapa nilai kritis. Ketidakstabilan yang dihasilkan adalah gerakan *steady* kedua dalam bentuk *Cellular Toroidal Vortices*, yang kita sebut *Taylor Vortices*, secara tetap di sepanjang silinder. Prediksi teorinya juga terdapat persesuaian yang baik sekali dengan eksperimennya (Chen, 1988).

Pada penelitian yang dilakukan Weisberg dkk (1997), menghasilkan bahwa gerakan *periodic axial* pada silinder dalam pada aliran *Taylor-Couette* dapat memperlambat transisi ke *Taylor vortices*.

Landasan teori yang digunakan berawal dari hukum viskositas Newton, yaitu

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \text{ atau } \mu = \frac{\tau}{du/dy} \dots \dots (1)$$

Mengasumsikan, bahwa variasi kecepatan terdapat hubungan linier dengan celah (gap), h ,

$$\frac{du}{dy} = \frac{V_1}{h} = \frac{R_1 \cdot \omega}{h} \dots \dots \dots (2)$$

Hubungan tegangan geser τ dan torsi \mathfrak{T} , dapat diturunkan sehingga menghasilkan:

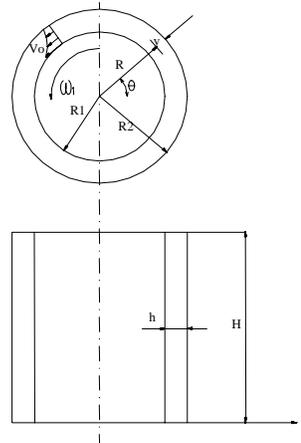
$$\tau |_{y=h} = \frac{\mathfrak{T}}{2\pi \cdot R_1^2 \cdot H} \dots \dots \dots (3)$$

Kemudian Persamaan (3) disubstitusikan ke Persamaan (1) akan menghasilkan viskositas dinamik (μ):

$$\mu = \frac{\mathfrak{T}h}{2\pi \cdot H \cdot R_1^3 \cdot \omega} \text{ atau } \mathfrak{T} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot H \cdot \omega \cdot R_1^3}{h} \dots \dots \dots (4)$$

Persamaan (4) berlaku untuk fluida Newtonian, viskositas dan putaran

konstan serta celah yang sempit ($h \ll R_1$). Berkenaan dengan celah aliran, maka dapat dicatat laporan singkat dari sistem *Taylor-Couette* (Takeda Yasushi, 1999), di mana aspek perbandingan $\Gamma = H/h = 20$, di mana $h = R_2 - R_1$.



Gambar 1. Ukuran geometris peralatan aliran Couette di antara dua silinder konsentris vertikal

Kemudian rezim aliran tergantung pada parameter yang mendeskripsikan kondisi aliran yaitu Bilangan Reynolds (Re), yang dalam kondisi ini didefinisikan:

$$Re = \frac{\omega_1 R_1 h}{\nu} \dots \dots \dots (5)$$

di mana ω_1 adalah frekwensi dari putaran silinder dalam, (ν) adalah viskositas kinematik. Sementara itu Bilangan Reynolds Reduksi (Re_{red}) didefinisikan dengan:

$$Re_{red} = Re / Re_{cri} \dots \dots \dots (6)$$

di mana aliran laminar terjadi jika $Re < Re_{cri}$. Bilangan Reynolds kritis (Re_{cri}) pada permulaan aliran *Taylor-Vortex* menurut Di Prima & Swinney (Takeda Yasushi, 1999) adalah 134,57.

Sementara kondisi aliran menjadi tidak stabil (*unstable*) dapat diekspresikan dengan suatu karakteristik bilangan yang diketahui yaitu Bilangan Taylor, Ta , (Schlichting, 1979). Dalam kondisi ini didefinisikan:

$$Ta = \frac{V_1 \cdot h}{\nu} \sqrt{\frac{h}{R_1}} \geq 41,3 \text{ (ketidakstabilan viskos)} \dots \dots \dots (7)$$

Menganggap bahwa gaya badan dari luar diabaikan, maka tekanan jua merupakan fungsi dari R, atau :

$$P = P (R) \dots\dots\dots (8).$$

Sehingga persamaan aturnya dapat ditulis:

$$\frac{-V_{\theta}^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dR} \dots\dots\dots (9).$$

$$\frac{d^2V_{\theta}}{dR^2} + \frac{d}{dR} \left(\frac{V_{\theta}}{R} \right) = 0 \dots\dots\dots (10).$$

Persamaan (9) merupakan keseimbangan gaya sentrifugal yang bekerja pada elemen fluida dengan gaya yang dihasilkan oleh medan tekanan. Sedangkan Persamaan (10) merupakan adanya keseimbangan antara tegangan *viscous* dalam fluida. Mengintegalkan Persamaan (10), diperoleh:

$$V_{\theta} = \frac{A}{2} R + \frac{B}{R} \dots\dots\dots (11).$$

Dengan menerapkan kondisi batas $V_{\theta} = R_1 \cdot \omega_1$, pada $R = R_1$ dan $V_{\theta} = R_2 \cdot \omega_2$, pada $R = R_2$, maka didapat :

$$A = 2 \frac{R_2^2 \cdot \omega_2 - R_1^2 \cdot \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} ;$$

$$B = \frac{R_1^2 \cdot R_2^2 (\omega_1 - \omega_2)}{R_2^2 - R_1^2} \dots\dots\dots (12).$$

Di mana A dan B adalah konstanta. Mensubstitusikan Persamaan (12) ke Persamaan (11) didapat distribusi kecepatan antara dua silinder :

$$V_{\theta}(R) = \frac{1}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{(R_2^2 \cdot \omega_2 - R_1^2 \cdot \omega_1) R}{2} + \frac{R_1^2 \cdot R_2^2 (\omega_1 - \omega_2)}{R} \right] \dots\dots\dots (13).$$

Dalam kasus ini untuk silinder luar diam maka $\omega_2 = 0$, sehingga distribusi kecepatan menjadi:

$$V_{\theta}(R) = \frac{R_1^2 \cdot \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} \left[\frac{R_2^2}{R} - R \right] \dots (14).$$

Kemudian untuk mendapatkan distribusi tekanan pada celah kedua silinder adalah dengan mensubstitusikan

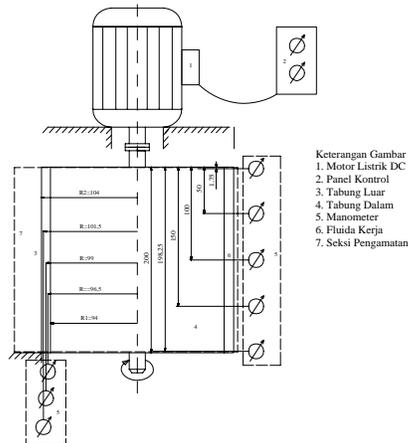
Persamaan (14) ke Persamaan (11), sehingga diperoleh :

$$dP = \rho \left[\left(\frac{R_1^2 \cdot \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} \right)^2 \left(\frac{2R_2^2}{R} - \frac{R^4}{R^3} - R \right) \right] dR \dots\dots\dots (15).$$

Integral Persamaan (15) akan diperoleh :

$$P_{(R)} = \rho \left(\frac{R_1^2 \cdot \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} \right)^2 \left(\frac{2 \cdot R_2^2 \cdot \ln R}{2R^2} - \frac{1}{2} R^2 \right) + C \dots\dots\dots (16).$$

Di mana C merupakan konstanta integrasi yang harganya tergantung, pada penerapan kondisi batas, yaitu $R = R_1$, dan $R = R_2$. Persamaan ini berlaku di mana silinder luarnya diam, atau $\omega_2 = 0$



Gambar 2. Instalasi peralatan penelitian

Susunan peralatan penelitian terpasang dalam keadaan lengkap seperti pada Gambar 2. Pada kondisi ini penelitian dijalankan untuk mencatat putaran dan distribusi tekanan sebagai fungsi R (radius aliran). Langkah yang sama dilakukan dengan memvariasikan kekentalan air dengan cara menambah zat CMC (*Carbonat Metil Catalist*) dengan komposisi berat 0,2 %; 0,3 % dan 0,4 %.

PEMBAHASAN

Hasil pengukuran viskositas dan massa jenis fluida yang dipakai dalam eksperimen ini berikut:

Hasil pengukuran viskositas dan massa jenis fluida terlihat bahwa penambahan CMC terhadap air sedikit meningkatkan berat jenis di samping viskositasnya. Berdasarkan Bilangan Reynolds (Persamaan 5), maka spesimen 1 pada eksperimen ini aliran yang diterapkan bersifat turbulen, di mana rentangan $Re = 13954,3$ s/d $24753,5$ ($R_{red.}=103,7$ s/d $183,9$). Sedangkan pada spesimen ke-2 dan ke-3 aliran yang diterapkan bersifat transisi, dimana $Re=1418,4$ s/d $1676,8$ ($R_{red.}=10,5$ s/d $12,5$), kecuali pada spesimen ke-3, pengujian pertama alirannya

bersifat laminar dimana $Re_1=945,3$ ($R_{red.}=7,0$). Sementara itu pada spesimen ke-4, aliran yang diterapkan sebagian bersifat laminar, di mana $Re_1=541,8$ s/d $Re_5=961,2$ ($R_{red.}=4,0$ s/d $7,1$).

Kemudian berdasarkan Bilangan Taylor, Ta (Persamaan 7), maka kondisi viskos fluida kerja pada eksperimen ini menunjukkan ketidak-stabilan pada pengukuran tekanan, baik pada dinding maupun celah kedua silinder. Hasil analisa menunjukkan Bilangan Taylor yang dihasilkan berkisar dari $176,7$ (spesimen ke-4) s/d $8073,7$ (spesimen ke-1)

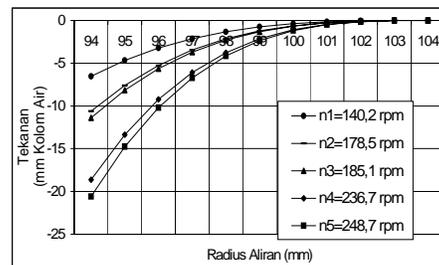
Tabel 1. Hasil pengukuran sifat fisis cairan fluida

No.	Temp. (°C)	Fluida	ν (m ² /det.)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m.det.)
1.	28 – 32	Air	$0,989 \cdot 10^{-6}$	997	$9,86 \cdot 10^{-5}$
2.		Air + 0.2% CMC	$9,73 \cdot 10^{-6}$	1031,5	$10,036 \cdot 10^{-5}$
3.		Air + 0.3% CMC	$14,60 \cdot 10^{-6}$	1046,8	$15,283 \cdot 10^{-5}$
4.		Air + 0.4% CMC	$25,47 \cdot 10^{-6}$	1075,8	$27,40 \cdot 10^{-5}$

Hasil analisa teori (Gambar 3) menunjukkan bahwa distribusi tekanan radial (Persamaan 16) pada celah antara dua silinder menurun secara menyeluruh (di bawah tekanan atmosfer) bersamaan dengan meningkatnya putaran silinder dalam. Analisa yang lebih jauh lagi yaitu pada titik dinding dalam silinder luar menunjukkan tekanan sama dengan pada kondisi putaran silinder dalam keadaan diam. Tentunya ini disebabkan karena kecepatan fluida pada dinding tersebut adalah nol.

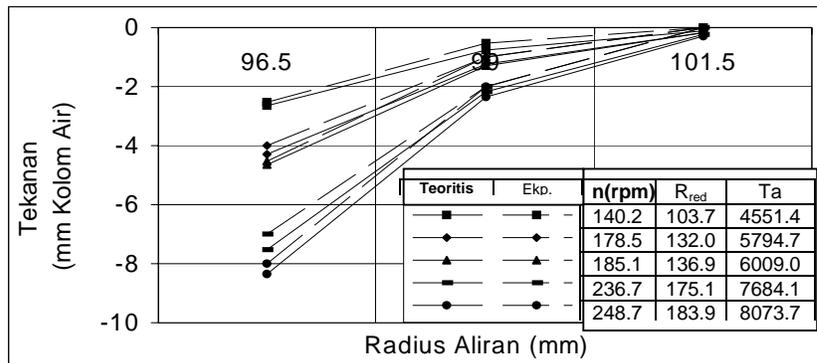
Distribusi tekanan radial yang terjadi pada celah kedua silinder secara teoritis dilukiskan pada grafik membentuk garis kurva yang bersifat logaritmik. Sementara itu terlihatnya tekanan semakin menurun (di bawah tekanan atmosfer) yang diakibatkan meningkatnya putaran silinder dalam. Selanjutnya tekanan mengecil bila titik pengukuran mendekati dinding silinder dalam. Fenomena ini sama terjadi untuk semua jenis fluida pengujian dalam satuan mm kolom air. Hal ini disebabkan, bahwa analisa yang digu-

nakan tidak melibatkan massa jenis fluida.

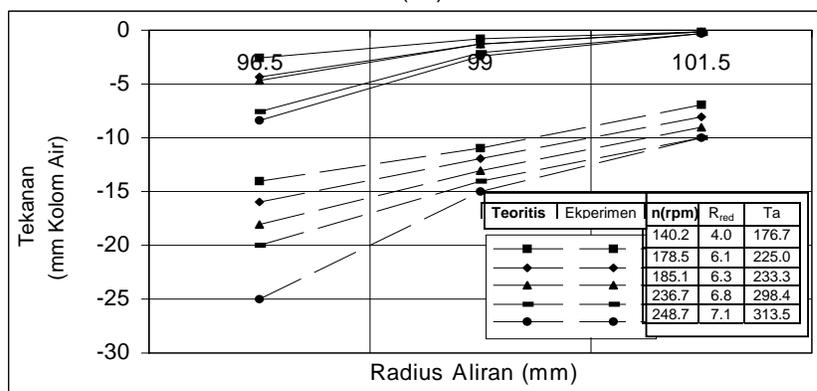


Gambar 3. Hubungan antara radius aliran (R) dengan tekanan (P) hasil teoritis untuk semua fluida pengujian

Walaupun demikian, adanya perbedaan tekanan pada masing-masing jenis fluida, tetapi fenomena yang lain menunjukkan gejala yang sama. Hasil analisa teori menunjukkan, semakin besar massa jenis fluida kerja yang mengalir pada celah kedua silinder maka, tekanan semakin kecil (di bawah tekanan atmosfer).

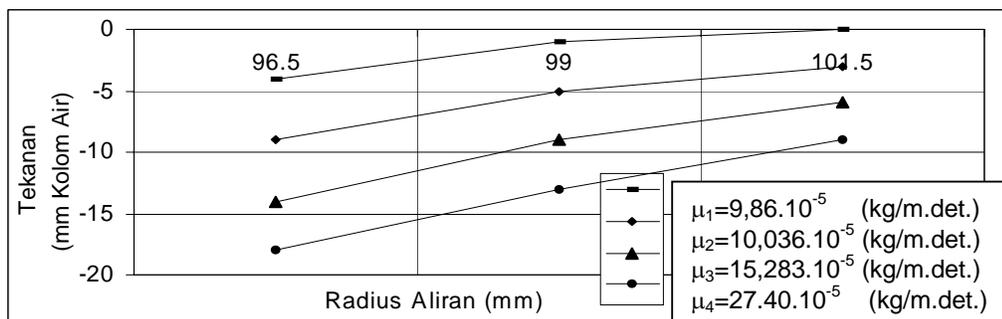


(a)



(b)

Gambar 4. Hubungan antara radius aliran (R) dengan tekanan (P). Perbandingan hasil teori dengan eksperimen:(a) $\nu=0,989 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det}$ (b) $\nu=25,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det}$



Gambar 5. Hubungan antara radius aliran (R) dengan tekanan (P) hasil eksperimen pada putaran 185,1 rpm pada berbagai viskositas

Selanjutnya hasil eksperimen secara keseluruhan (Gambar 4) menunjukkan bahwa tekanan pada celah kedua silinder terlihat akan semakin kecil akibat dinaikkannya Bilangan Reynold pada viskositas konstan. Bersamaan dengan itu kita juga melihat adanya tekanan akan lebih kecil jika berat jenis fluida semakin

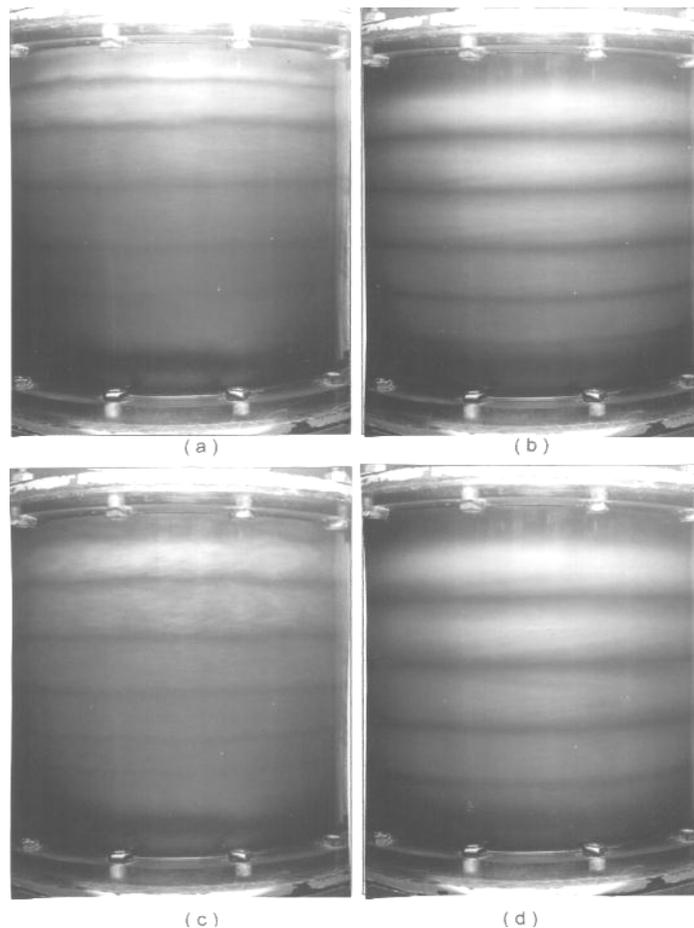
besar. Dalam hal ini terdapat persesuaian dengan hasil kajian secara teoritis.

Sementara itu dari Gambar 5, terlihat adanya pengaruh viskositas terhadap distribusi tekanan radial. Dalam hal ini terlihat semakin besar viskositas fluida kerja maka tekanan pada celah a-

kan semakin kecil (di bawah tekanan atmosfer).

Kalau pada hasil kajian teoritis sebagaimana dijelaskan di depan dimana distribusi tekanan radial pada celah dalam bentuk gambar grafik membentuk kurva melengkung yang bersifat logaritmik (Gambar 4). Hasil eksperimen terdapat persesuaian dengan kajian teoritis pada spesimen pertama yaitu air dengan $\mu=9.86 \text{ kg/m}\cdot\text{det}$ (Gambar 4 a). Secara fi-

sis hal ini bisa terjadi karena tahanan viskos pada fluida masih kecil. Tetapi pada spesimen berikut dengan adanya penambahan berat jenis fluida, terlihat adanya perubahan kontur grafik distribusi tekanan yang cenderung membentuk linier. Dalam artian fisis hal ini menginformasikan kepada kita, bahwa fenomena ini terjadi karena tahanan viskos yang dimiliki fluida adalah besar pada saat diberikan gaya sentrifugal.



Gambar 6. Visualisasi aliran untuk $\nu = 0,989 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{det}$:
 (a) $R_{red} = 235,0$; $Ta = 10183,8$ (b) $R_{red} = 257,0$; $Ta = 11281,0$ (c) $R_{red} = 257,0$; $Ta = 11281,0$
 (golakan/transisi gelombang) ; (d). $R_{red} = 257,0$; $Ta = 11281,0$ (gelombang stabil).
 Semua aliran bersifat turbulen

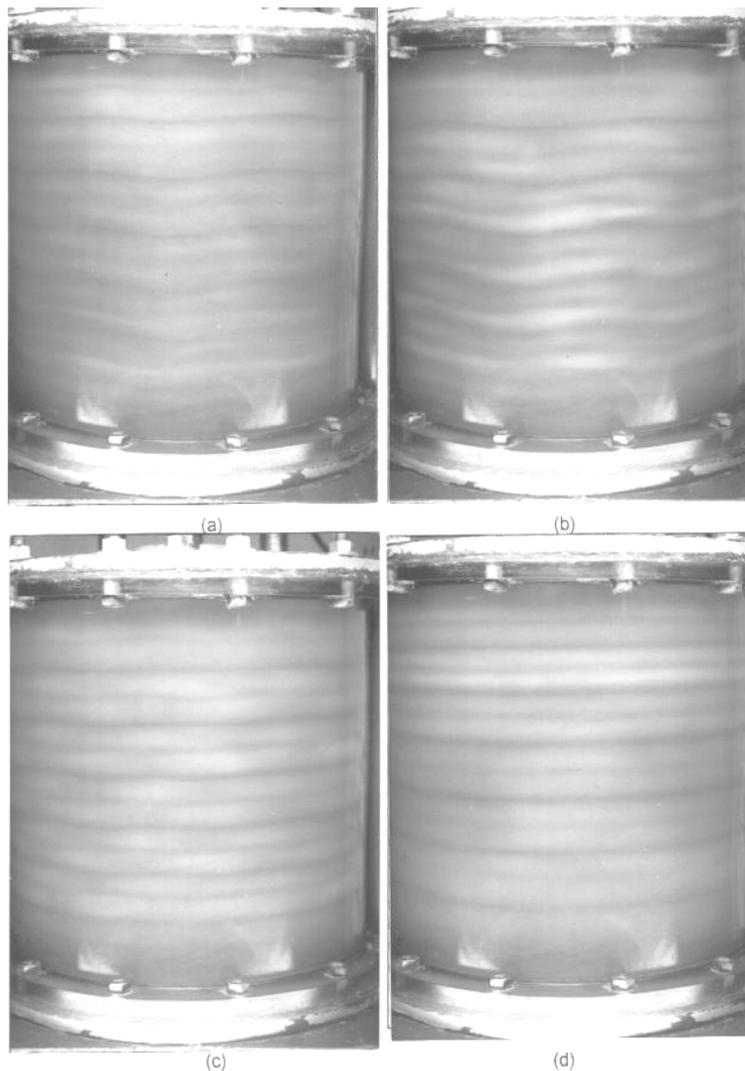
Sifat-sifat aliran berdasarkan Bilangan Reynolds yang diterapkan pada pengamatan perilaku dan visualisasi aliran dengan beberapa variasi. Untuk spesimen pertama, aliran yang diterapkan ber-

sifat turbulen pada awalnya yaitu pada $Re = 13012,9$ s/d $34584,5$ ($R_{red} = 96,7$ s/d $257,0$). Selanjutnya penurunan putaran pertama aliran masih bersifat turbulen yaitu pada $Re = 19189,7$ s/d $13282,1$ (R_{red}

=142,6 s/d 98,7). Penurunan putaran berikutnya aliran berubah sifat menjadi transisi, yaitu pada $Re=5477,0$ s/d $4561,9$ ($R_{red} = 40,7$ s/d $33,9$).

Kemudian untuk spesimen keempat aliran pertama yang diterapkan bersifat laminar pada $Re=538,3$ s/d $834,3$ ($R_{red} = 4,0$ s/d $6,2$). Selanjutnya aliran yang diterapkan berubah sifat menjadi transisi yaitu pada $Re=1063,1$ ($R_{red} = 7,9$).

Berdasarkan Bilangan Taylor Ta , maka kondisi viskos fluida kerja pada eksperimen ini menunjukkan ketidakstabilan pada pengamatan perilaku aliran. Hasil analisis menunjukkan Bilangan Taylor yang dihasilkan berkisar dari $177,1$ (spesimen ke-4) s/d $10281,0$ (spesimen ke-1)



Gambar 7. Visualisasi aliran untuk $\nu=25,47 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{det}$:
(a) $R_{red}=6.0$; $Ta=263.5$; laminar (b) $R_{red} = 6.2$; $Ta=273.0$; laminar
(c) $R_{red} = 7.9$; $Ta=396.8$; (d) $R_{red} = 7.9$; $Ta=396.8$
(setelah 5 detik). (c,d bersifat transisi).

KESIMPULAN

Tekanan pada celah antara dua silinder terlihat menurun secara keseluruhan pada tiga titik pengukuran, bersamaan dengan meningkatnya putaran silinder dalam. Tekanan mengecil bila titik pengukuran mendekati dinding silinder dalam. Terdapat persesuaian hasil eksperimen dengan kajian teoritis hanya pada air $\mu = 9,86 \cdot 10^{-5}$ kg/m.det. Kecenderungan derajat kesalahan yang semakin membesar antara eksperimen dengan teoritis pada pengukuran distribusi tekanan pada celah kedua silinder bila viskositasnya semakin membesar.

Adanya pengaruh viskositas dinamis terhadap visualisasi aliran pada batas Bilangan Reynolds tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktur dan Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa P-AU-Ilmu Teknik UGM dan Kepala laboratorium Teknik Mesin Fakultas Teknik UNNES atas diijinkannya melaksanakan penelitian ini. Demikian juga kepada semua pihak yang telah membantu hingga penelitian ini selesai dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, K.R., 1980, *Fluid Mechanics Hydraulics and Hidraulics Machines*, Standard Publishers Distributors 1705-B Nai Sarah, New Delhi.
- Chen, C.K, and Chang, M.H, 1988, Stability of Hydromagnetic Dissipative Couette Flow with non-Axisymmetric Disturbance, *J. Fluid Mech.*, 366, 135-158.
- Di Prima, C., and Swinney, H.L., 1985, *Hydrodynamic Instabilities and the Transition to Turbulence*, Springer. (?)
- Nagata, M., 1998, Tertiary Solution and Their Stability in Rotating Plane Couette Flow, *J. Fluid Mech.*, 358, 357-378.
- Schlichting, H, 1979, *Boundary-Layer Theory*, MC Graw Hill, New York.
- Tagg, R., 1994, Couette-Taylor Problem, *Nonlinear Sci Today* 4(3), 1-25.
- Takeda, Y., 1986, Velocity Profile Measurement by Ultrasound Doppler

Shirt Method, *Instl. J. Heat Fluid Flow*, 7, 313-318.

Takeda, Y., 1986, Quasi-Periodic State and Transition to Turbulence in A Rotating System, *J. Fluid Mech.*, 389, 81-89.

Weisberg, A.Y., Kevrekidis, A.G., and Smith, A.J., 1997, Delaying Transition in Taylor-Couette Flow with Axial Motion of the Inner Cylinder, *J. Fluid Mech.*, 348, 141-151.

NOMENCLATURE

Huruf Roman

- A konstanta
B konstanta
C konstanta integrasi
 F_1 gaya sentrifugal pada silinder dalam, N
 $h = R_2 - R_1$ (selisih radius silinder luar dengan silinder dalam), m
H tinggi tabung (silinder), m
 R_1 radius silinder dalam, m
 R_2 radius silinder luar, m
P tekanan, N/m² dan mm kolom air
 V_1 Kecepatan silinder dalam, m/det
W daya, W
 $y = R_2 - R$, (selisih radius silinder luar dengan radius aliran pada celah), m
R rotasi kecepatan, m
n jumlah putaran, rpm

Huruf Yunani

- V_θ distribusi kecepatan, m/det
 τ tegangan geser, N/m²
 ζ torsi, N.m
 $\omega_1 = 2 \pi \cdot n_1 / 60$ (frekwensi dari putaran silinder dalam), rad/det
 $\omega_2 = 2 \pi \cdot n_2 / 60$ (frekwensi dari putaran silinder luar), rad/det
 π = konstanta (3,1415...)
 $\Gamma = H / h$ (aspek perbandingan)
 ρ massa jenis, kg/m³
 ν viskositas kinematis, m²/det
 μ viskositas dinamis, kg/m.det

Bilangan tak berdimensi

- Re Bilangan Reynolds
 Re_{cri} Bilangan Reynolds kritis
 $R_{red.}$ Bilangan Reynokd Reduksi
Ta Bilangan Taylor