

Bidang: Teknik Mesin

Topik: Simulasi dan Permodelan Energi

STUDI NUMERIK ALIRAN DAN TORSI PADA ALIRAN *TAYLOR VORTEX* TURBULENT DENGAN PERPINDAHAN KALOR

Iman Pradana A. Assagaf¹

¹Program Studi Teknik Manufaktur Industri Agro, Politeknik ATI Makassar

iman.pradana@atim.ac.id¹

ABSTRAK

Pola aliran dan torsi pada Taylor vortex turbulent dengan perpindahan kalor telah diteliti menggunakan metode numerik. Parameter geometri pada penelitian dengan radius ratio 0, 714 dan aspect ratio 10 dengan bilangan Taylor 2463 - 9852 serta $T_i = 60^\circ\text{C}$ dan $T_0 = 100^\circ\text{C}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa vortex turbulent berupa aliran yang terjadi secara tidak teratur namun garis vortexnya masih ada dan turbulensi makin kuat ketika seiring dengan peningkatan putaran silinder dalam. Semakin tinggi bilangan Nusselt rata-rata dari dinding silinder bagian dalam menunjukkan abiliti perpindahan kalor yang lebih kuat. Peningkatan torsi atas pengaruh putaran silinder pada daerah aliran, kenaikan torsi gesekan dipengaruhi oleh sel-sel vortex pada aliran turbulent.

Kata kunci : Aliran, turbulent, perpindahan kalor, torsi.

ABSTRACT

The flow pattern and torque on Taylor vortex turbulent with heat transfer have been investigated using numerical methods. Geometric parameters in this study with a radius ratio of 0.714 and an aspect ratio of 10 with Taylor numbers 2463 - 9852 and $T_i = 60^\circ\text{C}$ and $T_0 = 100^\circ\text{C}$. The results showed that the turbulent vortex was a flow that occurred irregularly but the vortex lines were still there and the turbulence was getting stronger as the rotation of the inner cylinder increased. The higher the average Nusselt number of the inner cylinder wall indicates a stronger heat transfer ability. The increase in torque due to the influence of cylinder rotation on the flow area, the increase in friction torque is influenced by vortex cells in turbulent flow.

Keywords: Flow, turbulent, heat transfer, torque.

PENDAHULUAN

Aliran yang terjadi jika fluida viskos di dalam celah silinder tertutup antara silinder koaksial yang berputar dengan kecepatan yang berbeda diteliti oleh G.I Taylor yang kemudian dikenal dengan aliran *Taylor-Couette* [1]. Kemudian perkembangan penelitian aliran *Taylor-Couette* berbagai metode baik dengan metode experimental, metode analitis dan metode komputasi dinamik. Liu, Dong dkk [2] melakukan simulasi numerik tentang aliran dan perpindahan kalor antara silinder konsentris dengan slit wall hasilnya menunjukkan bahwa slit wall memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi medan aliran dan proses perpindahan kalornya, vortex utama di daerah annular dan vortex skala kecil di slit. Teamah, M. Ahmed dkk [3] meneliti tentang aliran Taylor-Couette multifase, transien, horizontal, aliran ini mengatur kinerja termal self-contained drum motor (SCDM) sistem penggerak. Oualli, Hamid dkk [4] melakukan simulasi dengan computational fluid dynamic tentang peningkatan turbulence pada aliran *Taylor-Couette*. K Kielczewski dkk [5] melakukan penelitian dengan metode *direct numerical simulation/spectral vanishing viscosity* tentang aliran *Taylor-Couette* dan *Batchelor flows* dengan perpindahan kalor. Hasil penelitiannya menunjukkan hasil transisi yang diperoleh untuk aliran *Taylor-Couette* 4 vortisitas *Taylor-Couette* untuk simetris dan 3 vortisitas untuk kondisi *end wall asimetris*. Sutrisno dkk [6] meneliti tentang karakteristik aliran dan torsi aliran aksial Taylor-Couette dengan perpindahan kalor hasilnya menunjukkan bahwa aliran yang terbentuk yaitu *Taylor Vortex*, *Wavy Vortex*, dan *Turbulent Vortex*. Torsi dengan aliran aksial menunjukkan bahwa ada peningkatan torsi pada pengaruh putaran silinder dan aliran aksial.

Aliran didalam silinder konsentrik yang berputar dikarakterisasi dengan parameter geometri berupa radius ratio (η) yaitu

perbandingan antara jari-jari silinder bagian dalam (r_i) dan silinder bagian luar (r_o), aspect ratio (Γ) yaitu perbandingan antara panjang silinder (L) dan jarak celah annulus (d). Parameter dinamis berupa bilangan Taylor. Aliran transisi dengan kombinasi dari rotasi dan perpindahan kalor menentukan dinamika aliran yang terjadi dalam industri yang kompleks. Aplikatif aliran *Taylor-Couette* dapat di temukan pada turbo generators, *rotating heat pipes*, motor listrik, sistem filtrasi, *reverse osmosis*, *strelisasi liquid food* dan lainnya [7]-12]. Penelitian ini dibatasi pada paramreter geomteri dan parameter dinamik tertentu dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *computational fluid dynamic*. Tujuan dari penelitian adalah mempelajari pengaruh putaran silinder dalam terhadap aliran fluida di dalam annulus dengan perpindahan kalor.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan bantuan perangkat lunak CFD. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi computer untuk melakukan penghitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya. Persamaan atur [13] yang diselesaikan dalam penelitian ini adalah :

Persamaan kontinuitas (1) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

Persamaan *Navier-Stokes* arah radial, tangensial, aksial dengan menggunakan persamaan (2a), (2b) dan (2c) :

$$\rho \left(V_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{\partial v_\theta}{\partial t} \right) = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} - \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (2a)$$

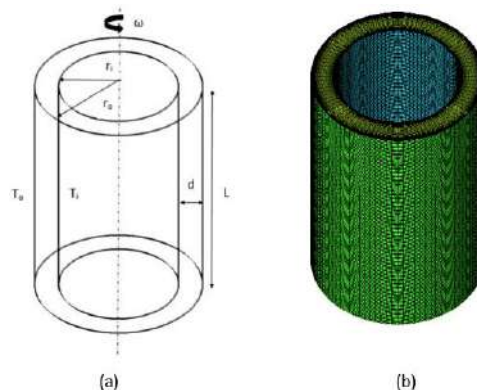
$$\rho \left(V_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + V_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_r}{\partial t} \right) = \rho g_r - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} - \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (2b)$$

$$\rho \left(V_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial t} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} - \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (2c)$$

Persamaan Energi (3) :

$$\rho c_p \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial r} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_z + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right] + \mu \Phi \quad (3)$$

Bentuk dan ukuran geometri silinder konsentris padan Gambar 1 berdasarkan pada penelitian sebelumnya [14] dengan parameter geometri yaitu radius ratio 0,716 dan *aspect ratio* 10. Jaring komputasi (grid) dibuat dengan elemen hexahedral pada arah aksial dan tangensial dan pada arah radial dengan jumlah total 1.120.111 elemen.



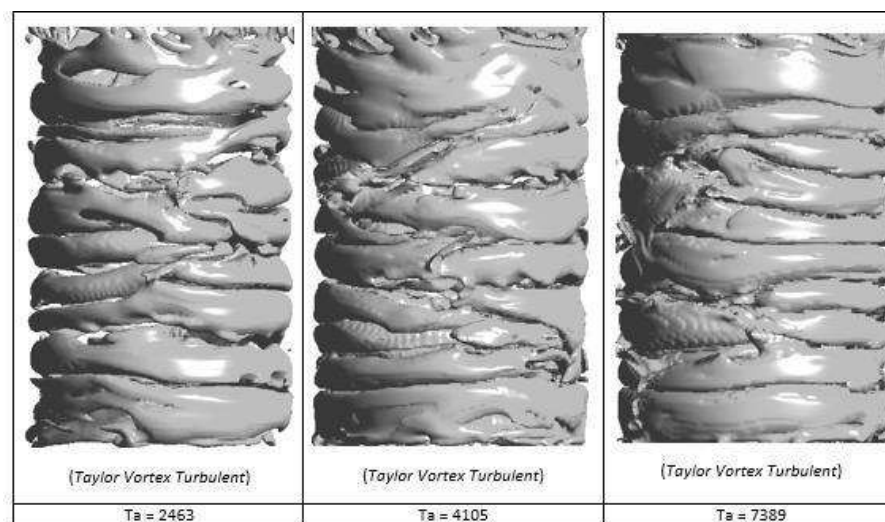
Gambar 1. Skematik geometri model penelitian pada Gambar (a) dan mesh hexahedral domain komputasi pada Gambar (b)

Temperatur pada silinder dalam (T_i) yaitu sebesar 60 °C dan temperatur silinder luar (T_o) adalah 100 °C. Fluida kerja dengan densitas 964,34 kg/m³, viskositas dinamik (μ) 0,00311 N.s/m², Konduktifitas termal (k) 0,672 W/m.K, kalor jenis (c_p) 4206 J/kg.K [15]. Bilangan Taylor didefinisikan $Ta = Ri\omega d/\nu$ dengan ω adalah kecepatan sudut silinder dalam dan ν adalah viskositas kinematic. Variasi putaran pada penitian ini adalah 120 sampai 480 RPM menghasilkan bilangan Taylor 2463

sampai dengan 9852. Model turbulensi yang digunakan adalah $k-\omega$ dengan akurasi yang baik untuk daerah sekitar wall. Model turbulen jenis ini banyak dipakai untuk aliran yang dengan lapis batas yang mempunyai gradient tekanan yang rendah dan pemisahan aliran dapat diprediksi dengan cepat dengan akurasi yang baik [16]. Diskretisasi persamaan menggunakan metode volume hingga dengan skema beda tengah untuk suku difusi dan skema orde dua untuk suku konveksi. Algoritma penyelesaian persamaan kontinuitas, *Navier-Stokes* dan energi menggunakan metode SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*).

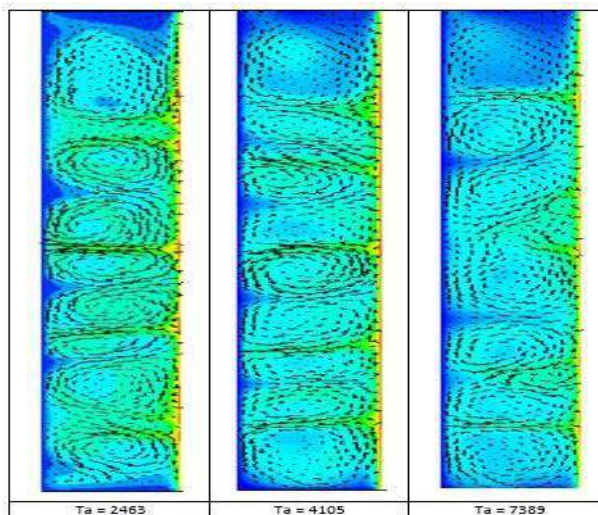
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi yang di tampilkan pada Gambar 2 berupa visualisasi vortex core region pada celah annulus. Pada bilangan Taylor 2463, 4105 dan 7389 merupakan aliran vortex turbulent berupa aliran yang terjadi secara tidak teratur namun garis vortexnya masih ada dan turbulensi makin kuat ketika seiring dengan peningkatan putaran silinder dalam.



Gambar 2. Visualisasi vortex core region pada celah annulus

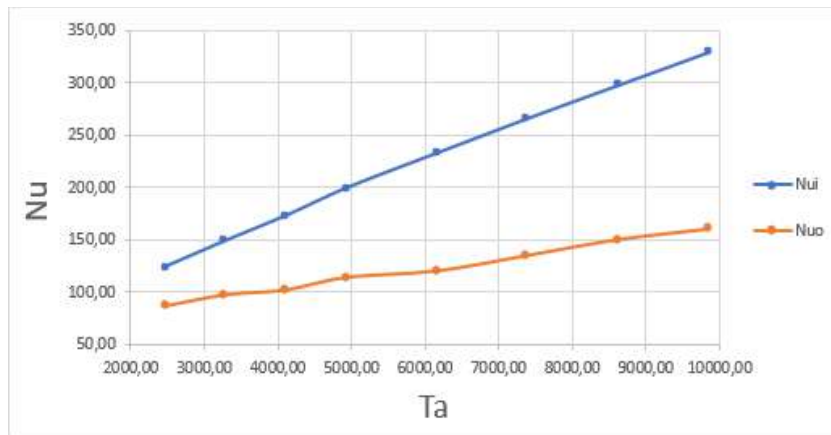
Pada Gambar 3 merupakan plot vektor kecepatan dan plot kontur kecepatan aliran vortex turbulent yang menunjukkan setiap satu pasang vortex yang mempunyai arah aliran saling berlawanan. Sehingga pertemuan aliran menuju ke sumbu pusat radius akan membentuk aliran inflow dan pada pertemuan aliran yang menjauh dari sumbu akan membentuk outflow.



Gambar 3. Plot vektor kecepatan dan plot kontur kecepatan aliran.

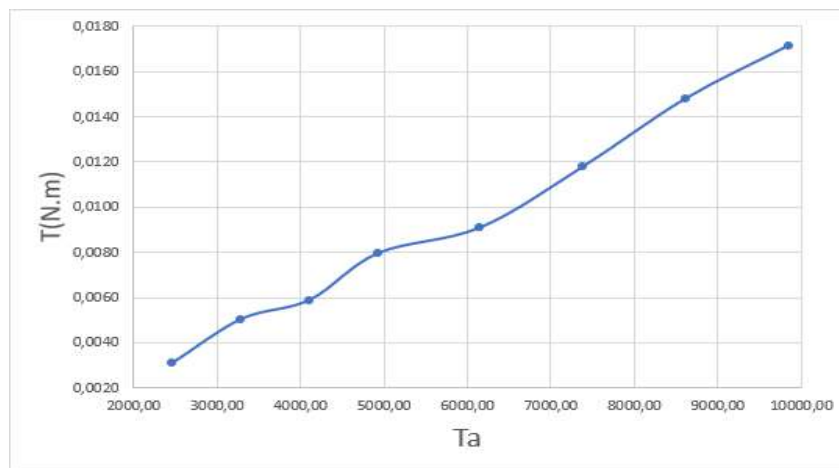
Proses perpindahan kalor yang terjadi di celah annulus adalah perpindahan kalor konveksi, konveksi pada celah annulus antara dengan dinding silinder dalam dan dinding silinder luar. Bilangan Nusselt merupakan parameter tidak berdimensi yang penting yang digunakan untuk mengekspresikan koefisien perpindahan kalor untuk perpindahan kalor konveksi. Bilangan Nusselt adalah bilangan yang tidak berdimensi yang berbanding lurus dengan diameter annulus dan koefisien kalor

konveksi dan berbanding terbalik dengan konduktivitas thermal zat yang mengalir [17]. Bilangan Nusselt rata-rata di sepanjang dinding silinder luar dan silinder dalam dihitung dalam penelitian ini. Grafik hubungan bilangan Taylor dengan bilangan Nusselt rata-rata pada Gambar 4. dalam kasus rotasi, aliran menjadi kompleks dan faktor-faktor seperti gaya sentrifugal mulai berlaku. Efek-efek ini memicu turbulensi dan pencampuran aliran yang kuat di dalam annulus dan secara signifikan meningkatkan perpindahan kalor karena konveksi. Bilangan Nusselt rata-rata pada silinder dalam lebih besar dibandingkan dengan silinder luar, hal ini menunjukkan bahwa dinding silinder bagian dalam mempunyai kemampuan perpindahan kalor yang lebih kuat.



Gambar 4. Bilangan Nusselt rata-rata pada silinder dalam dan bilangan Nusselt rata-rata pada silinder luar.

Grafik hubungan antara torsi dengan bilangan Taylor pada aliran Taylor vortex turbulent seperti terlihat pada Gambar 5. menunjukkan bahwa peningkatan torsi atas pengaruh putaran silinder pada daerah aliran, kenaikan torsi gesekan dipengaruhi oleh sel-sel vortex pada aliran turbulent. Celah annulus juga berpengaruh terhadap energi gesekan, karena faktor gesekan yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa vortisitas aliran meningkatkan torsi yang dibutuhkan untuk memutar silinder.



Gambar 5. Grafik hubungan antara Torsi dengan bilangan Taylor

KESIMPULAN

Vortex turbulent berupa aliran yang terjadi secara tidak teratur namun garis vortexnya masih ada dan turbulensi makin kuat ketika seiring dengan peningkatan putaran silinder dalam. Bilangan *Nusselt* rata-rata pada silinder dalam lebih besar dibandingkan dengan silinder luar, hal ini menunjukkan bahwa dinding silinder bagian dalam mempunyai kemampuan perpindahan kalor yang lebih kuat. Peningkatan torsi atas pengaruh putaran silinder pada daerah aliran, kenaikan torsi gesekan dipengaruhi oleh sel-sel *vortex* pada aliran turbulent.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Taylor, G.I, *Sability of a Viscous Liquid Contained Between Two Rotating Cylinder*, Phil. Trans. R. Soc.Lond. A. Volume 223. 289 – 343.1923
- [2] Liu, Dong. Qi, Yuan-li. Sun, Si-liang, Wang, Ying-Ze. *Numerical Investigation Of Flow and Heat Transfer Between Concentric Cylinders With Slit Wall, Case Studies in Thermal Engineering* 22. 2020
- [3] Teamah, Ahmed M. Hamed, Mohamed S. *Investigation Of Transient Multiphase Taylor-Couette Flow*. Alexandria Engineering Journal. 2021.
- [4] H. Oualli, M. Mekadem, A. Bouabdallah, and M. Gad-El-Hak. *Enhanced Turbulence in the Taylor-Couette Flow System*, *Procedia Eng.* Volume 157, 443–450, 2016
- [5] Kielczewski, K., Tuliszk-Sznitko, E and P Bontoux, *Numerical investigation of the Taylor-Couette and Batchelor flows with heat transfer physics and numerical modelling*. Journal of Physics: Conference Series. 2014
- [6] Sutrisno, Assagaf, Iman P.A. Djoko. Wibowo, Setyawan Bekt. Iswahyudi, Sigit. *Flow and Torque Characteristic Numerical Studies in Axial Forced Taylor-Couette Flow with Heat Transfer*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology 10 (7). 197-207. 2019
- [7] D.D. Dang, X.T. Pham, P. Labbe. *CFD Analysis Of Turbulent Convective Heat Transfer In A Hydro-Generator Rotor-Stator System*. Appl. Therm. Eng. 130.17–28. 2018
- [8] W. Lian, W. Chang, Y. Xuan. *Numerical Investigation On Flow And Thermal Features Of A Rotating Heat Pipe*. Appl. Therm. Eng. 101. 92–100. 2016
- [9] A.B. Nachouane, A. Abdelli, G. Friedrich, *Numerical Approach For Thermal Analysis Of Heat Transfer Into A Very Narrow Air Gap Of A Totally Enclosed Permanent Magnet Integrated Starter Generator*. Energy Conversion Congress and Exposition 1749–1756. 2015
- [10] Prajitno. *Pengembangan Sistem Filter Putar berbasis Aliran Couette-Taylor*. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV. 2012
- [11] Lee, Sangho Lueptow, Richard M. *Rotating Membrane Filtration and Rotating Reverse Osmosis*. Journal Of Chemical Engineering Of Japan Vol. 37 No. 4. 471-482. 2004
- [12] Masuda, Hayato., Horie, Takafumie., Ohmura, Naoto., Shimoyamada, Makoto. *Intensification of Heat Sterilization Process for Liquid Foods using Taylor-Couette Flow System*. Chemical Engineering Transactions. Volume 57. 2017.
- [13] Anderson, J.D., 1995. *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill, Inc.
- [14] Nugraha, Budi, *Study Computational Fluid Dinamics Karakteristik Aliran dan Torsi Pada Aliran Taylor- Couette-Poiseuille*, Tesis Program Studi S2 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. 2014
- [15] VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf, *VDI Heat Atlas*. Springer. 2010
- [16] Wilcox, David C, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc. 3rd edition. 2006
- [17] Incropera, Frank P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons: New York. 2006