

STUDI NUMERIK 2-D PENGARUH TURBULENSI ALIRAN BEBAS (*FREE STREAM TUBULENCE*) TERHADAP PERPINDAHAN PANAS ALIRAN *CROSSFLOW* SILINDER SIRKULAR TUNGGAL DAN TANDEM

Arif Kurniawan¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang
FTI-Teknik Mesin, Kampus 2 ITN Jl. Raya Karanglo, Km 2 Malang, Jatim-Indonesia
E-mail: itsarif9@gmail.com

Abstrak. Aliran yang melintasi silinder sirkular ditandai dengan adanya titik stagnasi, separasi shear layer dan terbentuknya wake. Karakteristik aliran fluida pada regime critical berupa titik separasi akan bergerak ke belakang di downstream, terbentuknya turbulen shear layer dan laminar boundary layer di upstream, ukuran vorticity pada vortex shedding menjadi sangat kecil (small-scale vortices) dan tidak beraturan. Turbulensi aliran bebas yang terjadi ditunjukkan dengan besarnya nilai turbulence intensity (Tu), sedangkan proses perpindahan panasnya yang ditunjukkan dengan parameter Nusselt number dipengaruhi oleh nilai Reynolds number, Prandtl number, dan juga nilai intensitas turbulen. Penelitian ini menggunakan studi numerik SST $k-\omega$ turbulence model, standard $k-\epsilon$ dengan memodifikasi turbulence viscosity, dan realizable $k-\epsilon$. Validasi numerik menggunakan grid independence berdasarkan Nusselt number hasil eksperimen dan Nusselt number hasil simulasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2-D, steady dan unsteady, RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) dengan pemodelan SST $k-\omega$ dan $k-\epsilon$ turbulence model. Hasil studi numerik menunjukkan hasil yang signifikan pada proses heat transfer di titik stagnasi, local heat transfer dan average heat transfer. Berdasarkan hasil simulasi, Nusselt number selain dipengaruhi oleh nilai Reynolds number dan Prandtl number juga dipengaruhi besarnya nilai turbulence intensity (Tu), terutama di titik stagnasi. Nilai Nusselt number average (Nusselt number rata-rata) hasil eksperimen Nu_{exp} dan hasil simulasi numerik Nu_{ave} menunjukkan hasil masing-masing $Tu=0,44\%$ [$Nu_{exp}=365$; $Nu_{ave}=420$], $Tu=1,34\%$ [$Nu_{exp}=590$; $Nu_{ave}=615$], $Tu=1,37\%$ [$Nu_{exp}=440$; $Nu_{ave}=465$], $Tu=1,65\%$ [$Nu_{exp}=457$; $Nu_{ave}=550$], $Tu=1,7\%$ [$Nu_{exp}=580$; $Nu_{ave}=540$], $Tu=1,9\%$ [$Nu_{exp}=632$; $Nu_{ave}=628$], $Tu=2,77\%$ [$Nu_{exp}=460$; $Nu_{ave}=548$], $Tu=2,8\%$ [$Nu_{exp}=570$; $Nu_{ave}=540$], $Tu=11,19\%$ [$Nu_{exp}=460$; $Nu_{ave}=520$].

Kata kunci: RANS, Nusselt number, intensitas turbulen (turbulence intensity), turbulence viscosity

1. Pendahuluan

Pada aliran turbulen yang melintasi silinder sirkular kemungkinan akan terjadi perbedaan amplitudo dan frekuensi dari 2 komponen aliran paralel yang mengalir secara acak dan berfluktuasi (**Lowery dan Vachon, 1974**). Hal ini sesuai dengan sifat aliran fluida yang mengalir secara turbulen yang berkarakter *high vorticity fluctuation*, vortex mengalami *stretching* pada *downstream*, dan terjadi amplifikasi (perluasan, pembesaran atau pengembangan) dari *vorticity* saat terbentuknya *laminar boundary layer* di *upstream* silinder. Fenomena terjadinya amplifikasi *vorticity* sehingga vortex pada *downstream* mengalami *stretching* sangat berpengaruh pada proses *heat transfer*. Pada saat terjadinya amplifikasi *vorticity*, *thermal boundary layer* menjadi lebih sensitif daripada *velocity boundary layer*, dimana besarnya nilai *thermal boundary layer* dipengaruhi oleh nilai *Prandtl number* fluida.

Studi numerik untuk memprediksi aliran perpindahan panas pada *high Reynolds number* yang menggunakan pemodelan *ordinary k-ε* dan *k-ω* memberikan hasil yang kurang memuaskan. Untuk memberikan hasil yang mendekati hasil eksperimen perlu dilakukan modifikasi *turbulent viscosity*. Modifikasi *turbulent viscosity* (**Durbin, 1996**) dimaksudkan untuk mereduksi perhitungan level turbulen dengan cara menaikkan produksi disipasi energi atau menurunkan produksi *turbulent kinetic energy* (**Medic dan Durbin, 2002**). Penelitian yang telah dilakukan dengan memodifikasi *turbulent*

viscosity digunakan untuk menganalisis perpindahan panas pada titik stagnasi (Szczepanic, et.al., 2004). Separasi aliran yang melewati permukaan tube bundles arrangement (tubes array) dapat menaikkan terjadinya proses perpindahan panas yang sebanding dengan naiknya Reynolds number. Naiknya heat transfer ditunjukkan dengan meningkatnya nilai Nusselt number (Nu) (El Gharbi, et.al., 2015).

Studi ini menggunakan parameter data hasil eksperimen (Lowery dan Vachon, 1974) yang hasilnya dibandingkan dengan data hasil simulasi numerik. Reynolds number eksperimen sebesar $Re_D = 1.94 \times 10^5$ dan $Re_D = 3 \times 10^5$, diameter silinder sirkular (D) 19 cm, jarak silinder tandem 2D (2x19 cm), turbulence intensity masing-masing $Tu = 0.44\%; 1.34\%; 1.37\%; 1.65\%; 1.7\%; 1.9\%; 2.77\%; 2.8\%$ dan 11.19% , kecepatan $v = 16.22$ m/s dan $v = 25.089$ m/s. Property fluida menggunakan udara $Pr = 0.707$, dengan kondisi temperatur dinding silinder sirkular dijaga konstan pada temperatur $T_w = 450$ °K, temperatur freestream $T_\infty = 300$ °K.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh modifikasi turbulent viscosity pada hasil simulasi numerik dengan membandingkan data hasil simulasi dengan data hasil eksperimen pada silinder tunggal dan untuk memprediksi nilai Nusselt number pada silinder tandem.

2. Metode Penelitian

2.1. Persamaan Dasar Aliran Fluida dan Perpindahan Panas

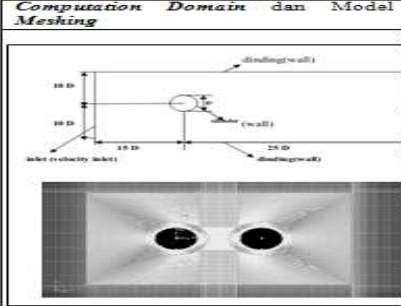
Pada studi ini, aliran diasumsikan sebagai 2-D (dua dimensi), fully developed, external flow, setting simulasi steady dan unsteady, incompressible of Newtonian fluid dan viscous fluid. Persamaan dasar aliran dan perpindahan panas:

- a. Mass Conservation
$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$
- b. Continuity
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$
- c. Momentum Conservation (Navier Stokes)
$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g + \nu \nabla^2 u \quad (3)$$
- d. Energy
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (u \cdot \nabla)T = k \nabla^2 T \quad (4)$$
- e. Nusselt Number
$$Nu = \frac{h_{conv} D}{k_{fluid}} \quad (5)$$

2.2. Model dan Setting Simulasi

Simulasi menggunakan metode RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) model, software FLUENT dengan 3 model turbulen yaitu standard k-ε, realizabel k-ε, dan SST k-ω turbulence models. Computation domain dibuat sesuai dengan geometri kasus dari aliran fluida dan perpindahan panas yang akan diteliti, yaitu aliran melintasi (cross flow) silinder sirkular tunggal dan tandem. Model meshing menggunakan quadrilateral map yang dibuat dengan software GAMBIT. Sebelum melakukan simulasi pada FLUENT, maka harus dilakukan setting sesuai kasus dan parameter data yang akan disimulasikan. Dalam studi ini menggunakan parameter data eksperimen. Computation domain, model meshing dan setting simulasi ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Computation Domain, Model Meshing dan Setting Simulasi

Computation Domain dan Model Meshing	Settings	Pemilihan	
	Simulation type	2-D, Steady and Unsteady	
	Solver	Double precision	
	Temporal discretization	Pressure based and implicit	
	Turbulence model	2 nd order	
	Pressure-velocity coupling	k-ε, k-ω and SST	
	Momentum	Modifikasi turbulent viscosity	
	Turbulent kinetic energy (for k-ε, k-ω and k-ω SST)	STANDARD	
	Turbulent dissipation rate (for k-ε, k-ω and k-ω SST)	SIMPLEC	
	Specific dissipation rate	QUICK	
	Energy	QUICK	
		10 ⁻⁶	
	Inlet Parameter		
	A. Fluida: Udara : $Re_D = 1.94 \times 10^5$ dan $Re_D = 3 \times 10^5$, $Pr = 0.7$, $T_\infty = 300$ K, $v = 16.22$ m/s dan $v = 25.089$ m/s B. Silinder Sirkular : diameter (D) = 19 cm, $T_w = 450$ K C. Silinder Sirkular Tandem : jarak transverse pitch ($S_T = 2D = 2 \times 19$ cm)		

2.3. Modifikasi Turbulent Viscosity

Turbulence model yang dipakai pada studi ini adalah *standard k-e*, *realizable k-e*, dan *SST k- ω turbulence models* dengan dilakukan modifikasi *turbulent viscosity* (Durbin, 1996), (Medic dan Durbin, 2002).

Modifikasi *turbulent viscosity* pada *standard k-e* dan *realizable k-e*:

f. *Turbulent Kinetic Energy(k)*

$$\partial_t(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \rho P_k - \rho \varepsilon + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla k) \quad (6)$$

dimana:

$$\rho P_k = R: \nabla U = -\frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot U) + 2\mu_t |S|^2 - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot U)^2$$

$$\text{dengan } S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_j U_i + \partial_i U_j)$$

g. *Dissipation (e)*

$$\partial_t(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \frac{C_{\varepsilon 1} \rho P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{T} + \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon) \quad (7)$$

h. *Turbulent viscosity(Eddy viscosity)*

$$\mu_t = C_\mu \rho k T_t \quad (8)$$

i. *Turbulent Time Scale (T)*

$$T_t = \min \left[\frac{k}{\varepsilon}, \frac{2}{3 C_\mu} \sqrt{\frac{3}{8} |S|^2} \right] \quad (9)$$

j. *Model Konstan*

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_\varepsilon = 1.3; C_\mu = 0.09$$

Modifikasi *turbulent viscosity* pada *SST k- ω* :

k. *Turbulent Kinetic Energy(k)*

$$\partial_t(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \rho P_k - C_\mu \rho \omega k + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) \quad (10)$$

dimana:

$$\rho P_k = R: \nabla U = -\frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot U) + 2\mu_t |S|^2 - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot U)^2$$

$$\text{dengan: } S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_j U_i + \partial_i U_j)$$

l. *Spesific Dissipation Rate (ω)*

$$\partial_t(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \frac{1}{T} \left(\frac{\gamma_1}{C_\mu k} \rho P_k - \frac{\beta_1}{C_\mu} \rho \omega \right) + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) \quad (11)$$

m. *Turbulent viscosity(Eddy viscosity)*

$$\mu_t = C_\mu \rho k T_t \quad (12)$$

n. *Turbulent Time Scale (T)*

$$T_t = \min \left[\frac{1}{C_\mu \omega}, \frac{\alpha}{\sqrt{6} C_\mu |S|} \right] \quad (13)$$

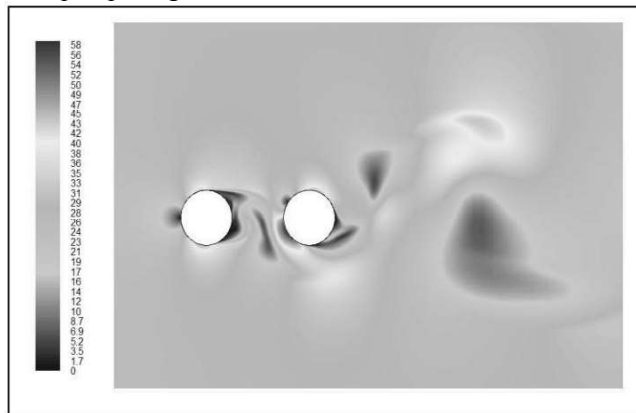
o. *Model Konstan*

$$\sigma_k = 0.5; \sigma_\omega = 0.5; \gamma_1 = 5/9; \beta_1 = 0.075; C_\mu = 0.09$$

3. Hasil dan Pembahasan

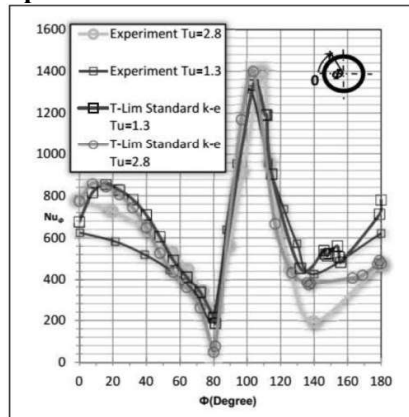
3.1. Karakteristik Aliran

Karakteristik aliran pada *regime critical* $Re_D = 1.94 \times 10^5$ dan $Re_D = 3 \times 10^5$ berupa titik separasi akan bergerak ke belakang di *downstream*, terbentuknya turbulen *shear layer* dan *laminar boundary layer* di *upstream*, ukuran *vorticity* pada *vortex shedding* menjadi sangat kecil (*small-scale vortices*) dan tidak beraturan, seperti tampak pada gambar 1.

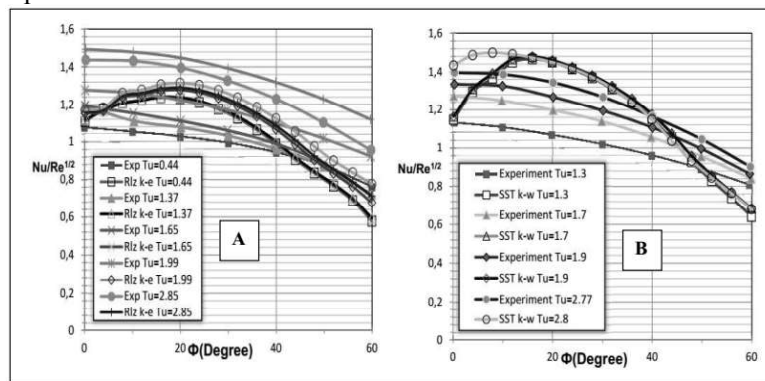


Gambar 1. Kontur aliran pada *unsteady SST k- ω turbulent model* $Re_D = 3 \times 10^5$, $Tu = 1.3$ (tanpa modifikasi *turbulent viscosity*)

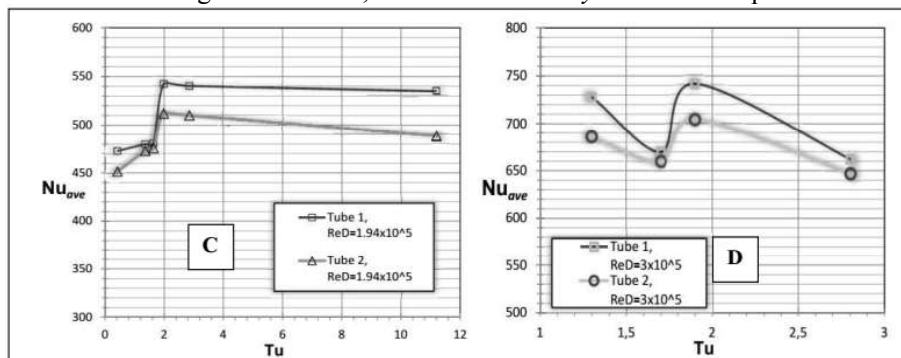
3.2. Hasil Simulasi Numerik Perpindahan Panas



Gambar 2. *Local Nusselt number* (Nu_ϕ) pada $Re_D = 3 \times 10^5$, hasil simulasi *steady standard k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity* serta data eksperimen^[1]
Pada gambar 2, *Local Nusselt number* secara umum terjadi peningkatan dengan bertambahnya nilai *turbulence intensity* terutama nilai *Nusselt number* pada daerah stagnasi dan *Local Nusselt number* saat melalui *laminar boundary layer*. Sedangkan didaerah *wake*, nilai *Local Nusselt number* cenderung terjadi penurunan.



Gambar 3. (A) *Nusselt number* silinder tunggal pada $Re_D = 1.94 \times 10^5$ saat melalui laminar BL, hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi, *turbulence viscosity* serta data eksperimen^[1]; (B) *Nusselt number* silinder tunggal pada $Re_D = 3 \times 10^5$ saat melalui laminar BL, hasil simulasi *unsteady SST k-w* dengan modifikasi, *turbulence viscosity* serta data eksperimen^[1]



Gambar 4. (C) Pengaruh Tu , silinder tandem pada $Re_D = 1.94 \times 10^5$, hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity*; (D) Pengaruh Tu , silinder tandem pada $Re_D = 3 \times 10^5$, hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity*
Pada gambar 3 (A) dan 3 (B) terlihat bahwa *turbulence intensity* dapat menaikkan nilai *Nusselt number* terutama *Nusselt number* pada titik stagnasi. *Nusselt number* rata-rata (Nu_{ave}) terjadi peningkatan dengan naiknya *turbulence intensity*, kemudian nilainya akan konstan seperti pada gambar 4 (C).

Pada gambar 4 (D), *Nusselt number* pada kenaikan T_u dengan *range* yang berdekatan nilainya naik turun yaitu terjadi pada *Reynolds number* yang lebih tinggi $Re_D=3 \times 10^5$. Pada silinder tandem, *Nusselt number* rata-rata (Nu_{ave}) pada *tube* 1 nilainya cenderung lebih besar dibandingkan *tube* 2, seperti terlihat pada gambar 4 (C) dan 4 (D).

4. Simpulan

1. Peningkatan nilai *turbulence intensity* secara umum dapat menaikkan nilai *Nusselt number*, baik *Nusselt number* rata-rata maupun *Local Nusselt number* di titik stagnasi ($Nu_{\phi=0}$) dan *Local Nusselt Number* saat melalui *laminar boundary layer*. Sedangkan pada daerah *wake* nilai *Nusselt number* cenderung terjadi penurunan.
3. Pada silinder tandem, *Nusselt number* rata-rata (Nu_{ave}) pada *tube* 1 nilainya cenderung lebih besar dibandingkan *tube* 2.

DaftarPustaka

- [1]. Lowery, G.W. dan Vachon, R.I., 1974. *The Effect of Turbulence on Heat Transfer from Heated Cylinder*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 18: p. 1229-1242.
- [2]. Durbin,P.A., 1996. *On the k-ε stagnation point anomaly*, International Journal Heat and Fluid Flow, vol. 17, no. 1, Februari 1996.
- [3]. Medic,G. dan Durbin,P.A., 2002. *Toward Improved Prediction of Heat Transfer on Turbine Blades*, Journal of Turbomachinery, vol. 124: p. 187-192.
- [4]. Szczepanic, K.,et.al., 2004. *A Numerical Study of Heat Transfer from a Cylinder in Crossflow*, 15th Australian Fluid Mechanics Conference, 13-17 Desember 2004.
- [5]. El Gharbi, N., et.al., 2015. *Numerical Optimization of Heat Exchangers with Circular and Non-circular Shapes*, Case Studies in Thermal Engineering 6 (2015) 194-203