

## STUDI NUMERIK 2-D PENGARUH FREE STREAM TURBULENCE DAN MODIFIKASI TURBULENCE VISCOSITY TERHADAP PERPINDAHAN PANAS ALIRAN CROSSFLOW PADA TUBES ARRAY ALIGNED DAN STAGGERED

NUMERICAL STUDY 2-D INFLUENCE OF FREE STREAM TURBULENCE AND MODIFICATION OF VISCOSITY TURBULENCE TO HEAT TRANSFER OF CROSSFLOW ON TUBES ARRAY ALIGNED AND STAGGERED

<sup>1</sup>Arif Kurniawan, <sup>2</sup>Diah Wilis Lestarinings Basuki

<sup>1,2</sup>Fakultas Teknik, Institut Teknologi Nasional, Kampus 2 ITN Jl. Raya Karanglo KM. 2 Malang  
email : <sup>1</sup>itsarif9@gmail.com; <sup>2</sup>green\_wilis@yahoo.co.id

**Abstract.** The heat transfer in single cylinder and tube array is the basis of the concept that practical applications are widely used in the industrial world, such as determining the tube array design aligned or staggered on heat exchangers. The flow regimes characteristic of crossflow in the tube array is greatly influenced by the value of Reynolds number which is marked by the occurrence of stagnation point phenomenon, shear layer separation and wake formation, while the heat transfer process is influenced by Prandtl number. The heat transfer value is indicated by the average Nusselt number ( $Nu_{ave}$ ) and heat transfer rate ( $q$ ) parameters. This research uses numerical method 2-D RANS (standard  $k$ - $\epsilon$ , realizable  $k$ - $\epsilon$ , and  $k$ - $\omega$  SST turbulence model) by varying the value of free stream turbulence with the value of turbulent intensity ( $Tu$ ) and modifying turbulent viscosity by way of interpreting UDF (user define function). Based on the results of the research it is known that  $Tu$  has an effect on  $Nu_{ave}$  value, heat transfer rate ( $q$ ) and staggered tube arrangement is better in case of increase of heat transfer when compared with aligned tube arrangement.  $Nu_{ave}$  and  $q$  staggered tubes array rise respectively for  $Nu_{ave}$  by 2.9 % to 16.8 % and  $q$  of 10.35 % to 10.52 %.

**Keywords:** UDF,  $Nu_{ave}$ ,  $q$ , turbulent viscosity, turbulence intensity, tube array

**Abstrak.** Perpindahan panas pada silinder tunggal dan tube array merupakan basis konsep yang aplikasi praktisnya banyak digunakan di dunia industri, seperti menentukan desain susunan tube (tube array) secara aligned atau staggered pada sistem alat penukar panas (heat exchangers). Karakteristik flow regimes aliran crossflow pada tube array sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai Reynolds number yang ditandai dengan terjadinya fenomena titik stagnasi, separasi shear layer dan terbentuknya wake, sedangkan proses perpindahan panasnya banyak dipengaruhi oleh nilai Prandtl number. Besarnya nilai heat transfer ditunjukkan dengan parameter Nusselt number rerata ( $Nu_{ave}$ ) dan heat transfer rate ( $q$ ). Penelitian ini menggunakan metode studi numerik 2-D RANS (standard  $k$ - $\epsilon$ , realizable  $k$ - $\epsilon$ , dan  $k$ - $\omega$  SST turbulence model) dengan memvariasikan nilai free stream turbulence yang nilainya ditunjukkan dengan besarnya nilai turbulent intensity ( $Tu$ ) dan memodifikasi kuantitas turbulen (turbulent viscosity) dengan cara melakukan interpret UDF (user define function). Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa  $Tu$  berpengaruh pada nilai  $Nu_{ave}$ , heat transfer rate ( $q$ ) dan susunan tube secara staggered lebih baik dalam hal peningkatan terjadinya heat transfer jika dibandingkan dengan susunan tube secara aligned.  $Nu_{ave}$  dan  $q$  staggered tube array nilainya naik masing-masing untuk  $Nu_{ave}$  sebesar 2.9 % s.d 16.8 % dan  $q$  sebesar 10.35 % s.d 10.52 %.

**Kata Kunci:** UDF,  $Nu_{ave}$ ,  $q$ , turbulent viscosity, turbulence intensity, tube array

## 1. Pendahuluan

Reynolds number aliran pada penelitian ini sebesar  $Re_D = 1.94 \times 10^5$  yang berkarakteristik aliran turbulen dan berada pada regime sub-critical (Beaudan, P. dan Moin, P., 1994). Aliran yang berada pada regime ini terjadi fenomena turbulent wake, separasi shear layer, periodic vortex dan terbentuk laminar boundary layer yang terseparasi di upstream silinder sirkular serta reattachment of shear layer region pada transition boundary layer. Periodic vortex flow dapat meningkatkan heat transfer (Sanijai, S., dan Goldstein, R.J., 2004), dalam hal ini adalah dapat meningkatkan nilai dari Nusselt number, baik Nusselt number lokal ( $Nu_\phi$ ) maupun Nusselt number rerata ( $Nu_{ave}$ ). Nusselt number merupakan parameter yang mengindikasikan terjadinya proses heat transfer yang nilainya sangat dipengaruhi oleh Reynolds number dan Prandtl number (Sarkar, S., et.al., 2011).

Pada aliran turbulen yang melintasi (*crossflow*) silinder sirkular yang tersusun secara *aligned* (*aligned tube array*) dan *staggered* (*staggered tube array*) maka memungkinkan terjadinya perbedaan amplitudo dan frekuensi dari 2 komponen aliran paralel yang mengalir secara acak dan berfluktuasi (Lowery dan Vachon, 1974). Karakteristik aliran fluida yang mengalir secara turbulen yaitu *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*  $k-\epsilon$  dan  $k-\omega$  memberikan hasil yang kurang memuaskan. Untuk memberikan hasil yang mendekati hasil eksperimen perlu dilakukan modifikasi *turbulent viscosity*. Modifikasi *turbulent viscosity* (Durbin, P.A., 1996) dimaksudkan untuk mereduksi perhitungan level turbulen dengan cara menaikkan produksi disipasi energi atau menurunkan produksi *turbulent kinetic energy* (Medic, G. dan Durbin, P.A., 2002).

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, N., et.al., 2015).

Studi ini menggunakan parameter data hasil eksperimen (Lowery dan Vachon, 1974) yang hasilnya dibandingkan dengan data hasil simulasi numerik sebagai validasi 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, *turbulent intensity* masing-masing  $Tu = 0.44\%$ ;  $1.37\%$ ;  $1.65\%$ ;  $1.99\%$ ;  $2.85\%$  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 turbulensi aliran bebas dan modifikasi *turbulent viscosity* terhadap nilai Nusselt number rerata ( $Nu_{ave}$ ) dan heat transfer rate ( $q$ ) untuk aliran *crossflow* pada *aligned* dan *staggered tubes array*.

## 2. Metode Penelitian

### 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:

- *Momentum Conservation (Navier Stokes)*

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g + \nu \nabla^2 u \tag{1}$$

- *Energy*

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (u \cdot \nabla)T = k \nabla^2 T \tag{2}$$

- *Nusselt Number*

$$Nu = \frac{h_{conv} D}{k_{fluid}} \tag{3}$$

- *Heat transfer rate (q)*

$$h = \frac{q}{A_t LMTD} \tag{4}$$

dimana:  $LMTD = \frac{t_a - t_{out}}{\ln \frac{t_a - t_t}{t_{out} - t_t}}$

### Model dan Setting Simulasi

Simulasi menggunakan metode 2-D RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) model, software FLUENT dengan 3 model turbulen yaitu standard k-ε, realizable 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 (crossflow) tubes array aligned dan staggered. 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. Computation domain, model meshing dan setting simulasi ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1. Setting Simulasi**

Inlet Parameter	Settings	Pemilihan
Fluida: <b>Udara</b>  $Re_D = 1.94 \times 10^5$ , $Pr = 0.7$ , $T_\infty = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ , $v = 16.22 \text{ m/s}$	Simulation type	2-D, Steady dan Unsteady
	Solver	Double precision
		Pressure based and implicit
	Temporal discretization	2 <sup>nd</sup> order
	Turbulence model	Standard k-ε, Realizable k-ε, k-ω and SST
		Modifikasi turbulent viscosity
	Pressure	STANDARD
	Pressure-velocity coupling	SIMPLEC
	Momentum	QUICK
	Turbulent kinetic energy ( for k-ε and k-ω SST)	QUICK
	Turbulent dissipation rate ( for k-ε and k-ω SST)	QUICK
	Speci c dissipation rate	QUICK
	Energy	10 <sup>-10</sup>

**Tabel 2. Computation Domain dan Model Meshing**

<i>Computation Domain dan Model Meshing</i>	
	<p style="text-align: center;"><b>Geometri dan Dimensi Tubes Array</b></p> <p>A. Silinder Sirkular : <b>diameter (D) = 19 cm, <math>T_w = 177\text{ }^\circ\text{C}</math></b></p> <p>B. <b>Inline</b> Tubes Array : jarak <i>transverse pitch</i> (<math>S_T = 2 D = 38\text{ cm}</math>); jarak <i>longitudinal pitch</i> (<math>(S_L = 2 D = 38\text{ cm})</math>); jumlah tube = 4</p> <p>C. <b>Staggered</b> Tubes Array : dibuat berdasarkan inline tubes array yang diputar dengan <b>sudut putaran sebesar <math>45^\circ</math></b></p>
<p><b>Aligned Tube Array</b></p>	<p><b>Staggered Tube Array</b></p>

**Modifikasi Turbulent Viscosity**

Turbulence model yang dipakai pada studi ini adalah standard k-ε, realizable k-ε, dan SST k-ω turbulence models. Pada realizable k-ε dilakukan modifikasi turbulent viscosity (Durbin,P.A., 1996), (Medic, G. dan Durbin,P.A., 2002), sedangkan pada SST k-ω menggunakan persamaan dasarnya dan tanpa melakukan modifikasi. Modifikasi turbulent viscosity pada standard k-ε:

- *Turbulent Kinetic Energy(k)*

$$\partial_t(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \rho P_k - \rho \epsilon + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla k),$$

dimana:

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

dengan  $S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_j U_i + \partial_i U_j)$  (5)

- *Dissipation (ε)*

$$\partial_t(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \frac{C_{\epsilon 1} \rho P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon}{T} + \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \nabla \epsilon)$$
 (6)

- *Turbulent viscosity(Eddy viscosity)*

$$\mu_t = C_\mu \rho k T_t$$
 (7)

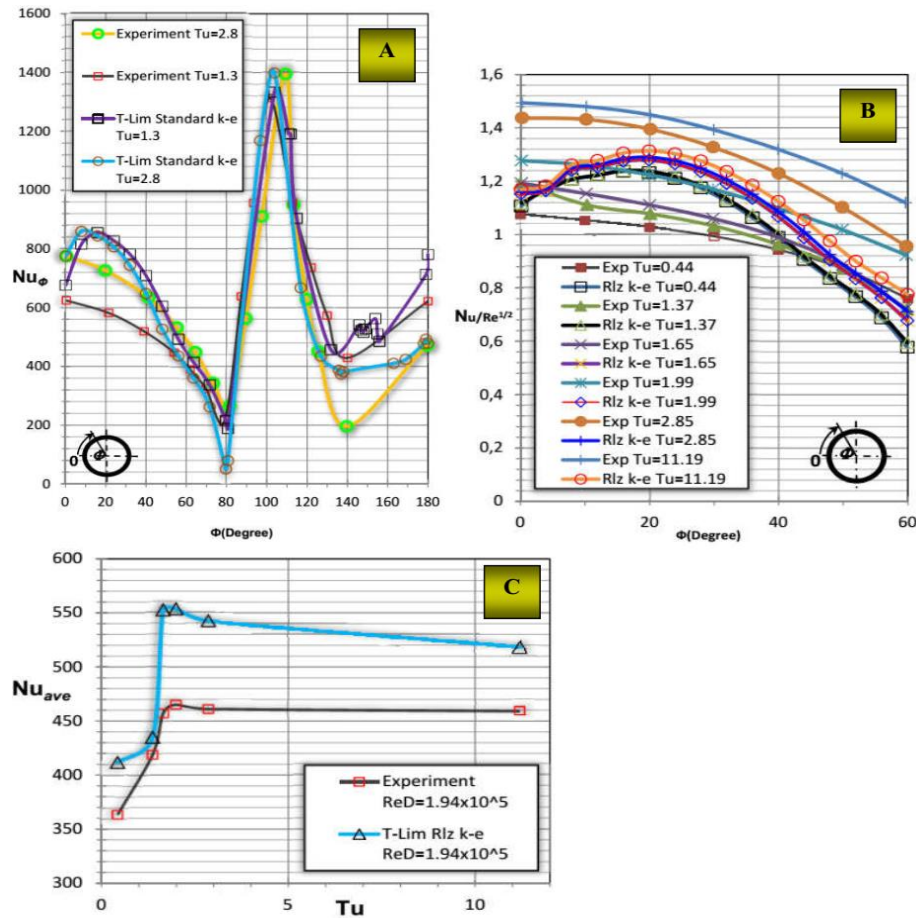
- *Turbulent Time Scale (T<sub>t</sub>)*

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

- *Model Konstan*

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

### Validasi Numerik



**Gambar 1. A. Local Nusselt number ( $Nu_{\phi}$ ) pada  $Re_D = 3 \times 10^5$ , hasil simulasi *steady standard k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity* serta data eksperimen**

**B. Nusselt number silinder tunggal pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$  saat melalui laminar *Boundary Layer*, hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity* serta data eksperimen**

**C. Pengaruh *turbulent intensity* ( $Tu$ ) pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$ , hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity* serta data eksperimen**

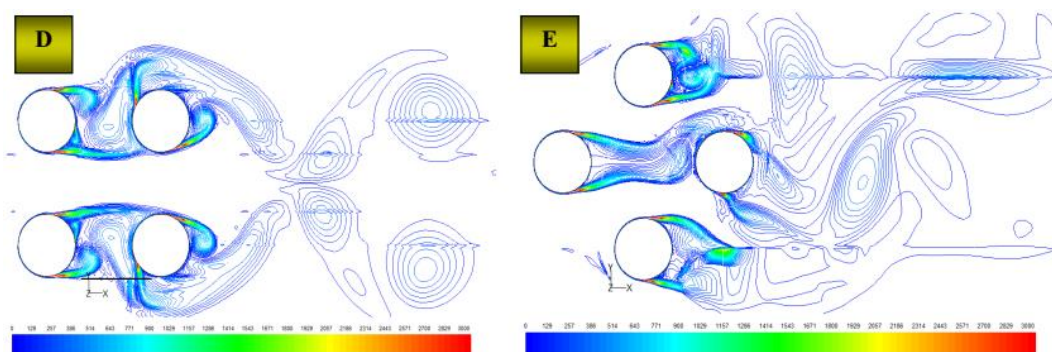
Dalam studi ini validasi numerik menggunakan parameter data eksperimen (Lowery dan Vachon, 1974) dalam menentukan *grid independence*. *Grid independence* dibuat dengan ukuran grid  $28 \times 45$ , nodes 63599 dan menghasilkan nilai simulasi numerik yang mendekati nilai eksperimen. Pada gambar 1A dan 1B error simulasi numerik sebesar 0.2% s.d 7%, sedangkan pada gambar 1C error simulasi numerik sebesar 5% s.d 12%.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik Aliran

Penelitian ini menggunakan Reynolds number aliran sebesar  $Re_D = 1.9 \times 10^5$ . Aliran berkarakteristik turbulen dan berada pada regime regime sub-critical. Fenomena

aliran yang terjadi ditandai dengan adanya titik stagnasi pada upstream silinder sirkular, separasi shear layer, turbulent wake dan periodic vortex pada downstream di belakang silinder sirkular, disertai terbentuknya laminar boundary layer yang terseparasi di upstream silinder sirkular serta reattachment of shear layer region pada transition boundary layer. Seperti ditunjukkan pada gambar 2D dan 2E, fenomena lain yang terjadi pada aliran ini yaitu 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. Semua fenomena yang terjadi pada aliran ini berpengaruh pada proses heat transfer yang disebabkan dengan adanya rotasi (sirkulasi) fluida dan mixing aliran sehingga pertukaran energi panas antara tube dan aliran fluida intensitasnya lebih sering terjadi.



**Gambar 2.** D. Kontur vorticity aliran *unsteady k- $\omega$  SST turbulent model* pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$  (tanpa modifikasi *turbulent viscosity*) *aligned tubes array*

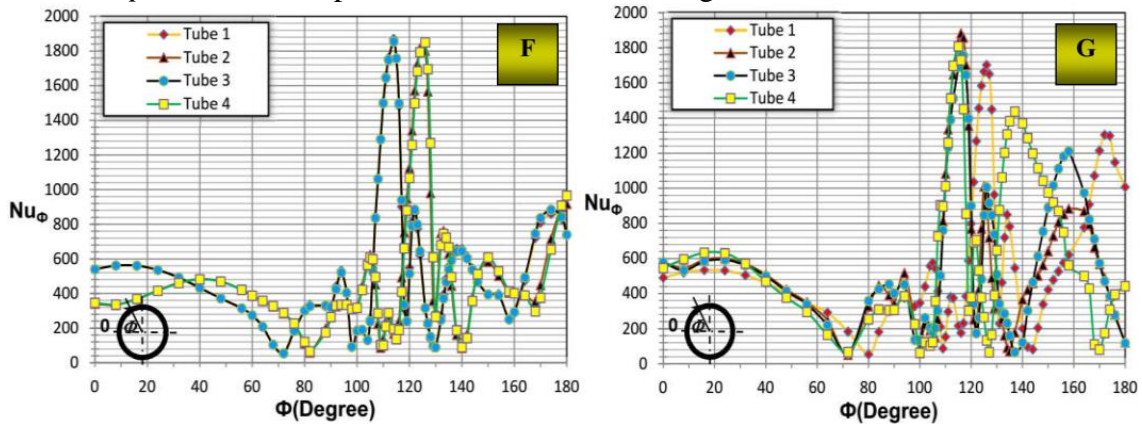
E. Kontur vorticity aliran *unsteady k- $\omega$  SST turbulent model* pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$  (tanpa modifikasi *turbulent viscosity*) *staggered tubes array*

Pengaruh dari modifikasi *turbulent viscosity* adalah bahwa modifikasi *turbulent viscosity* dapat mereduksi perhitungan level turbulen dengan cara menaikkan produksi disipasi energi atau menurunkan produksi *turbulent kinetic energy*. Berdasarkan hasil validasi numerik yang membandingkan data hasil simulasi dengan data hasil eksperimen (Lowery dan Vachon, 1974) diketahui bahwa simulasi numerik dengan modifikasi *turbulent viscosity* dapat menghasilkan nilai *Nusselt number* yang mendekati nilai eksperimen.

### Hasil Simulasi Numerik Perpindahan Panas

Pada gambar 3F dan 3G terlihat jelas bahwa *heat transfer* yang terjadi terdapat adanya perbedaan antara *staggered* dan *aligned tubes array*. Terjadi 3 kali peningkatan nilai  $Nu_{\phi}$  pada proses *heat transfer* pada *staggered tube array* sehingga hal ini menyebabkan nilai  $Nu_{ave}$  dan *heat transfer rate* ( $q$ ) *staggered tube array* lebih besar nilainya dibandingkan nilai  $Nu_{ave}$  dan  $q$  dari *aligned tube array*. Peningkatan 3 kali proses *heat transfer* yang terjadi pada *staggered tube array*, yaitu (1) saat terbentuknya laminar *boundary layer* yang terseparasi di *upstream* silinder sirkular; (2) *reattachment of shear layer region* pada *transition boundary layer*; (3) *turbulent wake* dan *periodic vortex* pada *downstream* di belakang silinder sirkular. Sedangkan pada *aligned tubes array* hanya terjadi 2 kali peningkatan proses *heat transfer*, yaitu: (1) saat terbentuknya

laminar boundary layer yang terseparasi di *upstream* silinder sirkular dan (2) *turbulent wake* dan *periodic vortex* pada *downstream* di belakang silinder sirkular.



**Gambar 3. F. Surface Nusselt number ( $Nu_{\phi}$ ) aligned tubes array pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$ ,  $Tu=0.44\%$ , hasil simulasi unsteady realizable k-e turbulent model dengan modifikasi turbulent viscosity**

**G. Surface Nusselt number ( $Nu_{\phi}$ ) staggered tubes array pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$ ,  $Tu=0.44\%$ , hasil simulasi unsteady realizable k-e turbulent model dengan modifikasi turbulent viscosity**

Perbedaan terjadinya proses heat transfer antara *staggered* dan *aligned tubes array* lebih jelas lagi dengan memperhatikan data perhitungan dan hasil simulasi yang ditampilkan pada tabel 3 dan tabel 4. Dari tabel 3 dan tabel 4 dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai *Nusselt number* rerata ( $Nu_{ave}$ ) dan *heat transfer rate* ( $q$ ) *staggered tube array* terhadap *aligned tube array*.

Pada tabel 3, kondisi simulasi dilakukan dengan memvariasikan nilai *turbulent intensity* ( $Tu$ ) sebesar 0.44%, 1.37%, 1.65%, 1.99%, 2.85, dan 11.99%. Dalam kondisi ini, hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa nilai *Nusselt number* rerata ( $Nu_{ave}$ ) *staggered tube array* nilainya lebih besar dibandingkan dengan *aligned tube array* yang terjadi di *tube 1* s.d *tube 4*. Nilai peningkatan terbesar  $Nu_{ave}$  *tube 1* terjadi pada  $Tu= 11.99\%$  sebesar 3.8%;  $Nu_{ave}$  *tube 2* terjadi pada  $Tu= 1.37\%$  sebesar 13.5%;  $Nu_{ave}$  *tube 3* terjadi pada  $Tu= 2.85\%$  sebesar 9.9%;  $Nu_{ave}$  *tube 4* terjadi pada  $Tu= 1.99\%$  sebesar 16.8%.

**Tabel 3. Peningkatan nilai *Nusselt number* rerata ( $Nu_{ave}$ ) *Staggered* terhadap *Aligned Tubes Array***

Tu	Nu <sub>ave</sub> ALIGNED				Nu <sub>ave</sub> STAGGERED				Peningkatan nilai Nu <sub>ave</sub> STAGGERED terhadap ALIGNED			
	Tube 1	Tube 2	Tube 3	Tube 4	Tube 1	Tube 2	Tube 3	Tube 4	Tube 1	Tube 2	Tube 3	Tube 4
0.44	492.8	454.6	493.2	451.9	509.4	520.9	539.1	542.6	3.3 %	12.7 %	8.5 %	16.7 %
1.37	492.3	454.5	493.0	451.6	506.8	525.7	546.4	542.0	2.9 %	13.5 %	9.8 %	16.7 %
1.65	492.4	454.5	492.9	451.6	507.2	524.9	546.2	542.1	2.9 %	13.4 %	9.8 %	16.7 %
1.99	492.5	454.5	493.4	451.8	510.0	521.6	539.3	542.9	3.4 %	12.9 %	8.5 %	16.8 %
2.85	492.9	454.8	492.9	452.2	507.3	525.3	546.8	542.1	2.8 %	13.4 %	9.9 %	16.6 %
11.99	492.2	454.6	492.5	452.3	511.8	521.6	538.4	543.2	3.8 %	12.8 %	8.5 %	16.7 %

Tabel 4 merupakan hasil simulasi dan perhitungan yang menunjukkan bahwa nilai *heat transfer rate* ( $q$ ) *staggered tube array* nilainya lebih besar dibandingkan dengan *aligned tube array* yang terjadi di *tube 1* s.d *tube 4*. Kondisi simulasi dilakukan

dengan memvariasikan nilai *turbulent intensity* (Tu) sebesar 0.44%, 1.37%, 1.65%, 1.99%, 2.85, dan 11.99%. Dari tabel 3 diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai *heat transfer rate* (q) *staggered* terhadap *aligned tubes array*.

**Tabel 4. Peningkatan nilai Heat Transfer Rate (q) Staggered terhadap Aligned Tubes Array**

Tu	q ALIGNED	q STAGGERED	Peningkatan nilai q STAGGERED terhadap ALIGNED
0.44	26.87165 kW	29.97258 kW	10.35 %
1.37	26.85544 kW	30.09740 kW	10.77 %
1.65	26.85414 kW	30.09134 kW	10.76 %
1.99	26.86638 kW	29.99782 kW	10.44 %
2.85	26.87495 kW	30.10792 kW	10.74 %
11.99	26.85771 kW	30.01517 kW	10.52 %

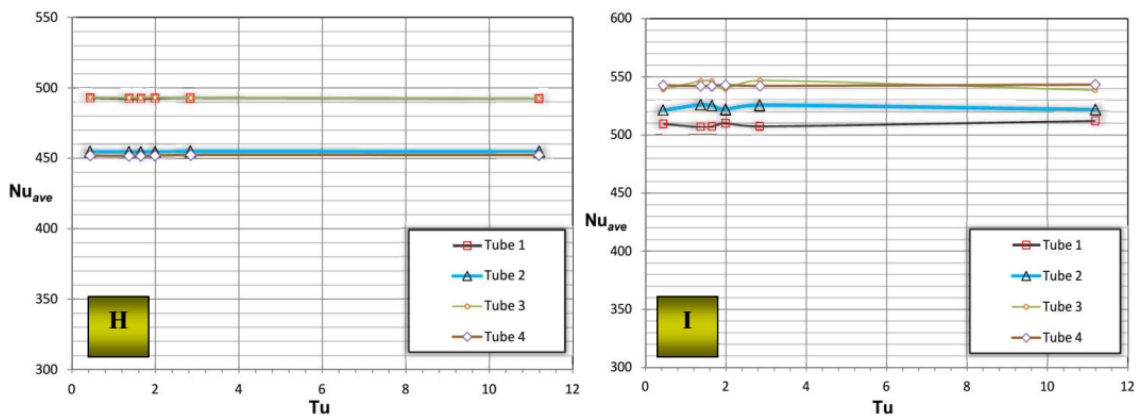
Peningkatan nilai q terbesar terjadi pada Tu= 1.37% sebesar 10.77%, sedangkan peningkatan nilai q terkecil terjadi pada Tu= 0.44% sebesar 10.35%.

Data tabel 3 dan tabel 4 menunjukkan bahwa proses *heat transfer* yang terjadi pada *staggered tubes array* lebih baik daripada *aligned tubes array* yang diketahui dengan adanya peningkatan nilai *Nusselt number* rerata ( $Nu_{ave}$ ) dan *heat transfer rate* (q) *staggered* terhadap *aligned tubes array*. Hal yang menyebabkan proses *heat transfer* yang terjadi pada *staggered tubes array* lebih baik daripada *aligned tubes array* adalah karena (1) pada *staggered tubes array* terjadi peningkatan fluktuasi aliran sehingga sirkulasi dan *mixing* aliran intensitasnya lebih sering terjadi; (2) pada *staggered tubes array* terjadi peningkatan kecepatan aliran di celah-celah *tubenya* sehingga *thermal boundary layer thickness* ( $\delta_T$ ) *staggered tubes array* menjadi lebih sensitif jika dibandingkan dengan yang terjadi pada *aligned tubes array*, sesuai dengan persamaan (Oertel, H., 2010):

$$\delta = \sqrt{\nu \cdot t} \tag{9}$$

$$\delta_T \propto \frac{1}{\sqrt{Pr}} \delta \tag{10}$$

dimana:  $\nu$  = viskositas kinematik fluida ( $m^2s^{-1}$ ),  $\delta$  = *velocity boundary layer thickness* (m),  $\delta_T$  = *thermal boundary layer thickness* (m) dan t = waktu (s)



**Gambar 4. H. Pengaruh Tu aligned tubes array pada  $Re_D = 1.94 \times 10^5$ , hasil simulasi unsteady realizabel k-e dengan modifikasi turbulence viscosity**



### **Pengaruh *Tu staggered tubes array* pada $Re_D = 1.94 \times 10^5$ , hasil simulasi *unsteady realizable k-e* dengan modifikasi *turbulence viscosity***

Pengaruh *turbulent intensity* ( $Tu$ ) pada *staggered tube array* lebih signifikan daripada *aligned tube array*, hal ini bisa dilihat pada gambar 4H dan gambar 4I. Pada gambar 4H, grafik yang ditampilkan cenderung konstan, sedangkan pada gambar 4I, grafik yang ditampilkan naik turun. Pada gambar 4I grafiknya naik turun, hal ini karena fluktuasi aliran yang melintasi *tube* yang tersusun secara *staggered* lebih sering terjadi daripada *tube* yang tersusun secara *aligned*.

#### **4. Kesimpulan**

1. Pengaruh penggunaan metode modifikasi *turbulent viscosity* dapat menurunkan besarnya level *turbulent kinetic energy*, sehingga juga mereduksi perhitungan level turbulen dengan cara menaikkan produksi disipasi energi. Jika diaplikasikan pada simulasi numerik hasilnya adalah dapat memberikan prediksi yang lebih akurat pada proses perpindahan panas di titik stagnasi, laminar *boundary layer* dan *transition boundary layer*.
2. *Turbulence intensity* pada peningkatan nilai  $Nu_{ave}$  di susunan masing-masing *tube* 1 s.d *tube* 4 lebih signifikan pengaruhnya pada *staggered tube array* daripada *inline tube array*.
3. Proses terjadinya perpindahan panas (*heat transfer*) aliran *crossflow* pada *staggered tube array* lebih baik daripada *aligned tube array*.

#### **Daftar Pustaka**

- Beaudan, P. and Moin, P. (1994), Numerical Experiments on The Flow past a Circular Cylinder at Sub- Critical Reynolds Number, Research in Stanford University California.
- Durbin, P.A. (1996), On the  $k-\epsilon$  stagnation point anomaly, International Journal Heat and Fluid Flow, Vol. 17, no.1, February 1996.
- El Gharbi, N., et.al. (2015), Numerical optimization on heat exchangers with circular and non-circular shapes, Case Studies in Thermal Engineering 6 (2015) 194-203.
- Kieft, R., et.al. (2007), Near-wake effects effects of a heat input on the vortex-shedding mechanism, International Journal of Heat and Fluid Flow 28 (2007) 938-947.
- Lowery, G.W. and 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.
- Medic, G. and Durbin, P.A. (2002), Toward Improved Prediction of Heat Transfer on Turbine Blades, Journal of Turbomachinery, 2002, Vol. 124, 187-192.
- Oertel, H. (2010), Prandtl Essentials of Fluid Mechanics, 3rd edition, Springer.
- Sarkar, S., et.al. (2011), Unsteady wake dynamics and heat transfer in forced and mixed convection past a circular cylinder in cross flow for high Prandtl numbers, International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) 3536-3551.
- Szczepanic, K., et.al. (2004), A Numerical Study of Heat Transfer from a Cylinder in Crossflow, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, 13-17 December 2004.
- Sanjai, S., and Goldstein, R.J. (2004), Forced convection heat transfer from a circular cylinder in crossflow to air and liquids, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 4795-4805.