

Studi Numerik Pengaruh Posisi Sudut *Obstacle* Berbentuk *Rectangular* terhadap Perpindahan Panas pada *Tube Banks Staggered*

Rizki Anggiansyah dan Prabowo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail : prabowo@me.its.ac.id

Abstrak— *Compact heat exchanger* merupakan salah satu tipe dari alat penukar kalo (*heat exchanger*) yang memiliki luasan perpindahan panas per unit *volume* yang paling besar ($\geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ for liquids dan $\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ for gases) yang tersusun dari *fin and tube*. Dalam hal performa, *compact heat exchanger* bergantung pada pola permukaan *fin*, yakni *continuous plate fins*, *wavy fins* dan *circular fins*. *Continuous plate fins* memiliki pola permukaan *fin* yang datar dan hal tersebut mengakibatkan perpindahan panas yang terjadi relatif lebih lama dibandingkan tipe *wavy fins* dengan pola permukaan yang bergelombang. Selain merubah pola permukaan *fin*, upaya lain untuk bisa memaksimalkan proses perpindahan panas pada *continuous plate fins* juga dapat dibentuk dengan penambahan *obstacle* pada permukaannya. Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik dengan menggunakan bantuan *software Fluent 6.3.26*. Simulasi ini dikondisikan dengan menggunakan model turbulensi k-epsilon RNG dan metode *second-order upwind scheme*. Pada penelitian ini yang divariasikan adalah posisi sudut dari *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan 120° , 135° dan 150° berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*, dengan ukuran panjang *obstacle* tetap sebesar 2,5 mm dan lebar sebesar 0,5 mm pada *tube banks* yang tersusun secara *staggered*. Fluida kerja yang digunakan adalah udara yang dimodelkan sebagai gas ideal yang mengalir melintas celah antara *tube* dengan temperatur *inlet* 310 K dan temperatur *tube* konstan sebesar 347 K. Dari hasil simulasi ini didapatkan visualisasi kontur kecepatan, temperatur dan visualisasi pola aliran yang terbentuk serta pembuktian hipotesa bahwa dengan adanya penambahan *obstacle* akan meningkatkan perpindahan panas, yakni nilai Nusselt number 8,9–40,6% sebesar terhadap model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*).

Kata kunci— *fluent*, *obstacle*, *reynolds number*, *staggered tube banks*.

I. PENDAHULUAN

INDUSTRI merupakan wadah penerapan dan pengaplikasian teknologi. Salah satu teknologi yang memiliki peranan penting di dunia industri adalah alat penukar kalor (*heat exchanger*). *Heat exchanger* merupakan suatu alat yang digunakan untuk memindahkan energi panas dari dua fluida yang mengalir, baik fluida cair atau pun gas yang memiliki beda temperatur dari sistem langsung ke lingkungan atau pun bagian-bagian berbeda yang ada didalam sistem, penerapan dari hukum-hukum termodinamika dan perpindahan panas. Salah satu jenis *heat exchanger* yang banyak digunakan didunia industri gas, refrijerasi dan tata udara adalah tipe *compact heat exchanger*. *Fin and tube* jenis *compact heat exchanger* yang umum digunakan di industri maupun kebutuhan rumah tangga (*air conditioning*) dengan bentuknya yang *compact* (ringkas).

Fin and tube heat exchanger seiring dengan perkembangan jaman dituntut untuk dapat menyajikan performa (kinerja) yang sesuai dengan fungsi kerjanya melalui perubahan bentuk tipe permukaan *fin* ataupun penambahan pada permukaan *fin*.

Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian terdahulu mengenai penambahan atau modifikasi pada bagian permukaan *fin* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *tube banks* yang tersusun secara *staggered* untuk menunjang penelitian ini. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Chu, dkk (2009) didapat bahwa dengan adanya penambahan *vortex generators* yang berbentuk *rectangular* menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan panas pada variasi jumlah *rectangular winglet pair* (RWP) yang terpasang menunjukkan adanya peningkatan sebesar 28,1–43,9% untuk kasus *single-RWP*, 71,3–87,6% untuk kasus 3-RWP dan 98,9–131% untuk kasus 7-RWP [1]. Dan pada variasi jumlah RWP yang terpasang juga menunjukkan adanya peningkatan nilai *pressure drop* sebesar 11,3–25,15% untuk kasus *single-RWP*, 54,4–72% untuk kasus 3-RWP dan 88,8–121,4% untuk kasus 7-RWP. Lain halnya dengan penelitian Kanna dan Kumar (2011) didapat bahwa dengan adanya penambahan *Vortex Generators* yang terletak pada posisi 30° , 45° dan 60° *tube banks* yang tersusun secara *inline* dengan variasi Reynolds number (500–2500) menunjukkan adanya peningkatan nilai rata-rata perpindahan panas yang dihasilkan berkisar antara 10–20% pada posisi sudut 45° dan *pressure drop* akan berkurang ketika *delta winglet* pada posisi kemiringan 45° [2].

Pada tugas akhir ini akan dianalisa karakteristik aliran dan perpindahan panas berdasarkan pengaruh konfigurasi susunan *tube banks* yaitu secara *staggered*, pengaruh variasi posisi sudut *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan 120° , 135° dan 150° berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point* terhadap distribusi temperatur, distribusi kecepatan, distribusi koefisien konveksi dan distribusi Nusselt number tanpa dan dengan menggunakan *Obstacle* serta melakukan pembuktian hipotesa dengan adanya penambahan *Obstacle* akan meningkatkan laju perpindahan panas yang terjadi pada permukaan *fin*.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan cara melakukan variasi posisi sudut *obstacle*, dengan memodifikasi penelitian Kristianto (2013) model *modified* (dengan adanya penambahan *Convergency Promoters* (CP's)) [3], selanjutnya

akan dilakukan simulasi numerik secara dua dimensi menggunakan *software Fluent 6.3.26*. Pada metode numerik dibutuhkan tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving* atau *processing*, dan *postprocessing*.

Tabel 1.

Properties Udara yang Dimodelkan sebagai Gas Ideal

Properties Udara Inlet	
Temperatur inlet (°C)	37
Massa Jenis (kg/m ³)	1,12812
Panas Spesifik (Cp) (KJ/kg.K)	1,0074
Viskositas Absolut (μ) (N.s/m ²)	189,32e-07
Viskositas Kinematik (m ² /s)	16,896e-06
Thermal Konduktiviti (W/m.K)	0.02704
Prandtl Number (Pr)	0.7056

Tabel 2.

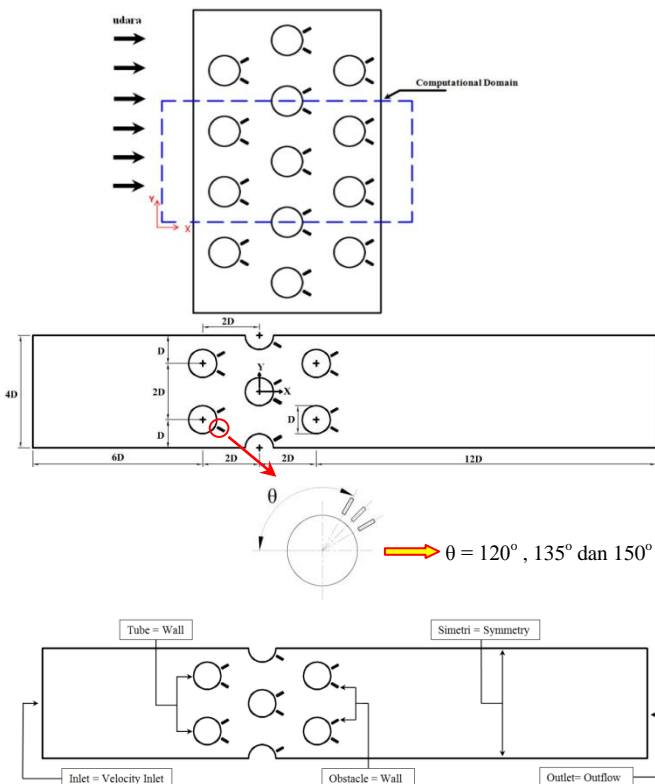
Properties Tube yang dimodelkan sebagai copper

Temperature Tube (°C)	74
Density (kg/m ³)	8933
Panas Spesifik (Cp) (KJ/kg.K)	386,136
Thermal Conductivity (W/m.K)	398,3

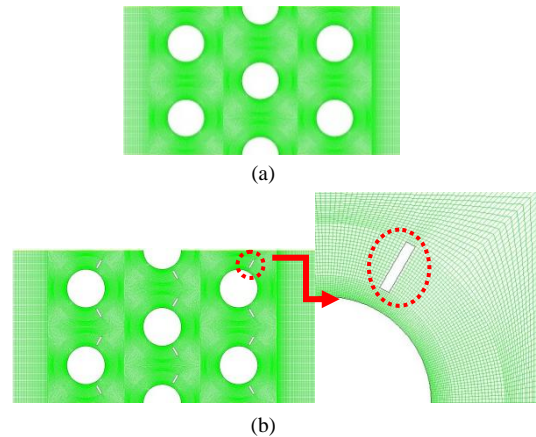
Tabel 3.

Dimensi Permodelan Tanpa dan dengan Obstacle

Dimensi tube	Nilai
Tube outside diameter (mm)	10
Transverse pitch, S _T (mm)	20
Longitudinal pitch, S _L (mm)	20
Diagonal pitch, S _D (mm)	22,36
Tube row number	3
Gap, g (mm)	1
Fin	
Air flow direction length (mm)	220
Obstacle	
Degree, θ	120°, 135° dan 150° (dari titik stagnasi)
Width, w (mm)	0,5
Length, l (mm)	2,5



Gambar 1. Domain Computational



Gambar 2. Meshing pada (a) model baseline dan (b) model modified (2D flow) A. Kondisi Kerja

Pada penelitian ini akan divariasikan posisi sudut *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan 120°, 135° dan 150° berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point* dengan kecepatan *inlet* sebesar 5m/s. Karena fluida kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah udara yang dimodelkan sebagai gas ideal, maka harus ditentukan terlebih dahulu *properties* udara, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1. Material pada *tube* yang digunakan adalah *copper* untuk *properties tube*, sebagaimana telah ditunjukkan pada tabel 2.

B. Preprocessing

Preprocessing dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD). Tahapan *Preprocessing* terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan *computational domain* sebagaimana telah ditunjukkan pada gambar 1, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan, sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Bentuk mesh yang dipilih adalah *quadrilateral-map*. Berikut adalah Gambar *meshing* untuk pemodelan 2D model *baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*) dan model *modified* (dengan penambahan *Obstacle*), sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.

C. Processing

Pada tahapan *Processing* penelitian dilakukan dengan menggunakan *software* berbasis (CFD) yang terdiri dari tahapan dibawah ini.

- Memilih *Solver*

Pada saat membuka perangkat lunak *FLUENT* terdapat pilihan untuk menggunakan *Solver* 2D atau 3D dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). *Solver* yang digunakan adalah 2D dengan keakuratan ganda. Keakuratan ganda untuk kasus perpindahan panas yang melibatkan perbedaan konduktivitas termal yang tinggi, jika menggunakan *single precision solver* dapat mengganggu konvergensi dan atau akurasi hasil iterasi.

- Pemilihan *Turbulence Modelling*

Penentuan *turbulence modelling* yang akan digunakan dalam simulasi ini mengacu pada penelitian terdahulu bahwa untuk pemodelan ini menggunakan metode *Turbulence Modelling* tipe k-epsilon RNG (*Re-Normalization Group*). Sehingga model *turbulence* ini digunakan sebagai acuan penelitian dalam pengambilan data. Model RNG k-epsilon diturunkan dengan menggunakan metode statistik yang teliti (teori renormalisasi kelompok). Bentuk persamaan yang

digunakan sama dengan model k-epsilon *standard* tetapi melibatkan beberapa perbaikan:

1. Model RNG mempunyai besaran tambahan pada persamaan laju disipasi, epsilon, yang dapat meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba.
2. Efek putaran pada turbulensi juga terdapat pada model RNG, sehingga meningkatkan akurasi untuk aliran yang berputar (*swirl flow*).
3. Model RNG menyediakan formula analitis untuk bilangan Prandtl *turbulent*, sementara model k-epsilon *standard* menggunakan nilai bilangan Prandtl yang konstan (ditentukan oleh pengguna).
4. Model k-epsilon *standard* merupakan model untuk kasus dengan bilangan Reynolds tinggi, sedangkan model RNG menyediakan formula untuk bilangan Reynolds rendah.

• **Pemilihan Operating Condition**

Kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tekanan operasi pada fluida berupa gas ideal melalui celah diantara dua fin dan *obstacle* yang berbentuk *rectangular*. Pada penelitian ini tekanan operasi yang digunakan adalah 101325 Pa.

• **Menentukan Boundary condition**

Dalam mendefinisikan sebuah kasus, harus memasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut. Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas yang digunakan. Dalam simulasi ini menggunakan batas kondisi yang ditampilkan pada Tabel 4. Untuk aliran dua dimensi menggunakan *absolute* kriteria konvergensi sebesar $1e-06$. Setelah itu baru kemudian dilakukan perhitungan dengan perintah iterasi.

D. Postprocessing

Proses ini merupakan proses akhir dari simulasi. Dimana hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kuantitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan pola aliran dalam *compact heat exchanger* tipe *Continuous Plate fin circular tube*. Data kuantitatif berupa distribusi kecepatan dan distribusi temperatur pada *compact heat exchanger* tipe *Continuous Plate fin circular tube*. Data kuantitatif tersebut akan diolah dengan perangkat lunak *microsoft excel 2010* untuk mendapatkan nilai kecepatan lokal, koefisien konveksi lokal, Nusselt number lokal dan nusselt number rata-rata. Sehingga data kuantitatif tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk grafik yang diperoleh dari data hasil iterasi yang dilakukan oleh *software Fluent 6.3.26*.

III. HASIL DISKUSI

Dalam penelitian ini didapatkan data secara kualitatif dan kuantitatif. Analisa data secara kualitatif dilakukan dengan menampilkan pola aliran dari masing-masing model (*pathline by velocity magnitude* (kecepatan), kontur kecepatan, kontur temperatur dan karakteristik perpindahan panas yang disajikan dalam bentuk grafik meliputi pembahasan kecepatan lokal *tube*, koefisien konveksi lokal *tube*, Nusselt number lokal *tube* pada masing-masing baris pada susunan *tube* dan Nusselt number rata-rata pada *tube banks* yang tersusun secara *staggered* terhadap variasi posisi sudut *obstacle*.

A. Analisa Pola Aliran Terhadap Variasi Posisi Sudut Obstacle berdasarkan titik pusat tube yang diukur dari stagnation point

Suatu aliran yang melintasi suatu bidang tentu akan membentuk suatu pola berdasarkan bentuk bidang yang dilewati. Dalam hal ini aliran yang akan ditinjau adalah aliran yang melewati *tube banks* yang tersusun secara *staggered* tanpa adanya penambahan *Obstacle* dan dengan adanya penambahan *Obstacle* yang berpasangan dengan *tube-tube* dengan kecepatan inlet 5 m/s untuk masing-masing posisi sudut 120°, 135° dan 150° Gambar 3.

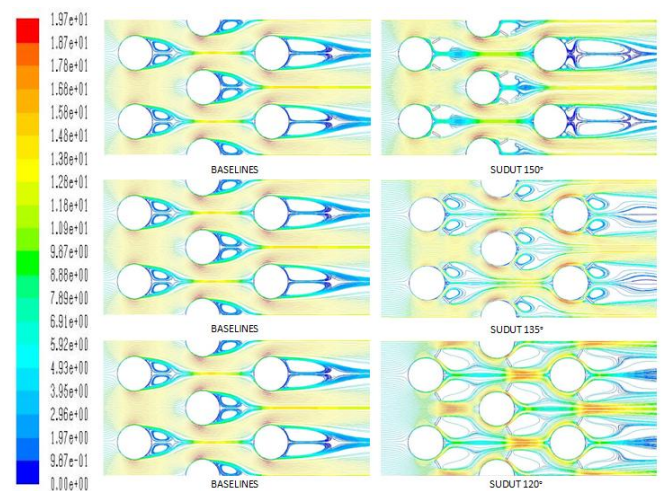
a. Model Baseline (tanpa adanya penambahan obstacle)

Berdasarkan Gambar 4, fenomena yang terlihat untuk visualisasi *pathline* model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*), dapat dilihat bahwa pola aliran yang terbentuk ketika aliran melintasi susunan *tube* terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk *tube* (titik stagnasi) pada baris berikutnya kemudian aliran terpecah mengalir ke dua arah yaitu mengalir ke bagian atas *tube* dan ke bagian bawah *tube*.

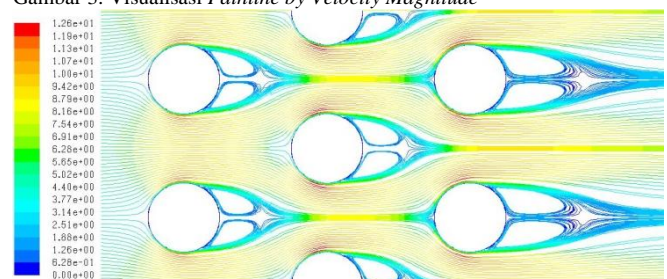
Tabel 4.

Boundary condition

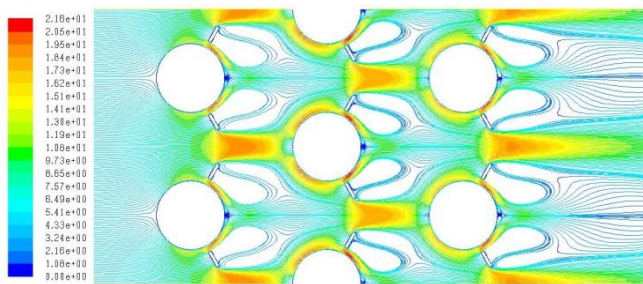
<i>Boundary condition</i>	Keterangan
<i>Inlet</i>	Type : <i>Velocity Inlet</i> Kecepatan: 5 m/s Temperatur: 37°C
<i>Outlet</i>	Type : <i>Outflow</i>
<i>Tube</i>	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 74°C Material : <i>Copper</i>
<i>Obstacle</i>	Type : <i>Stationary Wall</i>
Garis Bantu I	Type : <i>Interior</i>
Garis Bantu II	Type : <i>Symmetry</i>



Gambar 3. Visualisasi *Pathline by Velocity Magnitude*



Gambar 4. Visualisasi Pola Aliran *Baseline* (tanpa *obstacle*)



Gambar 5. Visualisasi Pola Aliran Model Modified (adanya penambahan obstacle) pola aliran by pathlines velocity.

Saat aliran mengalir di kedua bagian tersebut kecepatan lokal tube memiliki kecepatan maksimum karena adanya penyempitan celah laluan aliran. Setelah aliran melewati celah diantara kedua tube tersebut (V_{max}), aliran menuju kebagian belakang tube dan aliran terseparasi (aliran memisah).Sebagian aliran menuju tube berikutnya dan sebagian lagi berolak (vortex) dibagian belakang tube tidak langsung mengalir menuju tube berikutnya.

b. Pengaruh Adanya Penambahan Obstacle (Model Modified) pada Model Baseline.

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi pathline model modified (Gambar 5), dapat dilihat bahwa pola aliran yang terbentuk ketika aliran akan melintasi susunan tube terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk tube (titik stagnasi) pada baris berikutnya kemudian aliran terpecah mengalir ke dua arah yaitu mengalir kebagian atas tube dan kebagian bawah tube dan aliran terpecah lagi mengalir ke bagian atas dan bawah Obstacle untuk diarahkan ke tube berikutnya. Saat aliran mengalir di kedua bagian tersebut kecepatan lokal tube memiliki kecepatan maksimum karena adanya penyempitan celah laluan aliran (antara tube dan obstacle serta obstacle yang satu dengan lainnya yang berada pada satu baris tube yang sama). Setelah aliran melewati celah sempit (V_{max}), aliran menuju kebagian belakang tube, dan aliran terseparasi (aliran memisah). Sebagian aliran menuju tube berikutnya dan sebagian lagi berolak (vortex) dibagian belakang tube dan Obstacle tidak langsung mengalir menuju tube berikutnya. Vortex yang terbentuk dibelakang tube untuk model modified ini semakin sempit dibandingkan dengan model baseline.

B. Pengaruh Variasi Posisi Sudut Obstacle

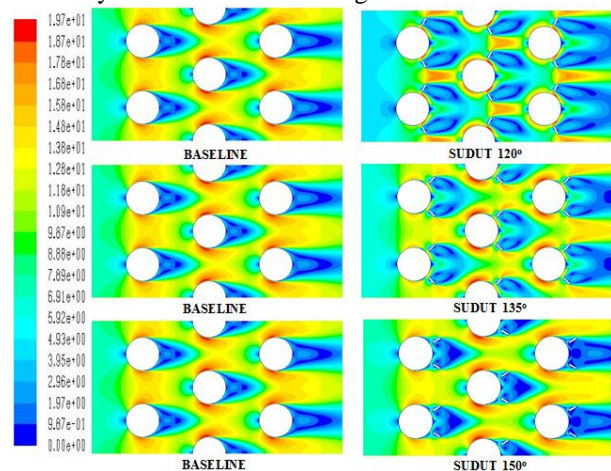
• Distribusi Kecepatan

Berdasarkan gambar 6. Terlihat visualisasi aliran berdasarkan contour of velocity magnitude untuk model baseline (tanpa adanya penambahan obstacle) dan aliran untuk model modified (dengan adanya penambahan obstacle) kecepatan inlet sebesar 5 m/s untuk masing-masing variasi posisi sudut obstacle 120°, 135° dan 150° pada tube baris pertama sampai pada baris ketiga.

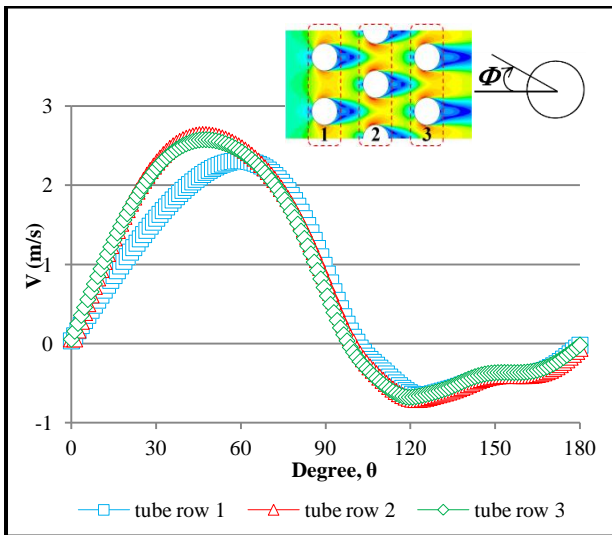
Berdasarkan pada gambar 7 mengenai grafik distribusi kecepatan lokal tube pada model baseline (tanpa adanya penambahan obstacle) dapat dilihat bahwa saat posisi aliran melintasi sudut 0°, kecepatan lokal tube akan bernilai 0 m/s untuk tube pada baris pertama. Hal ini dinamakan stagnation point, dimana aliran udara pada kecepatan tinggi harus berhenti sesaat sebelum menumbuk tube. Setelah melewati posisi tersebut, kecepatan akan mengalami akselerasi (peningkatan kecepatan) dengan kecepatan maksimumnya hingga $\theta \cong 60^\circ$. Setelah aliran melewati

posisi tersebut, aliran menuju kebagian belakang tube (sisi downstream) yang diindikasikan dengan adanya penurunan kecepatan dan adanya peningkatan tekanan (adverse pressure gradient, $\frac{\partial P}{\partial x} > 1$) pada posisi aliran melintasi sudut $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ dan kemudian aliran akan terseparasi pada sudut $\theta = 100^\circ$ dimana momentum aliran tidak mampu lagi menahan adverse pressure gradient dan effect friction. Sehingga aliran akan terlepas dari kontur body tube yang diindikasikan dengan kecepatan yang bernilai 0 m/s. Kecepatan lokal tube yang bernilai negatif dikarenakan adanya back pressure yang menyebabkan aliran berolak (vortex) pada posisi aliran sudut $102^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

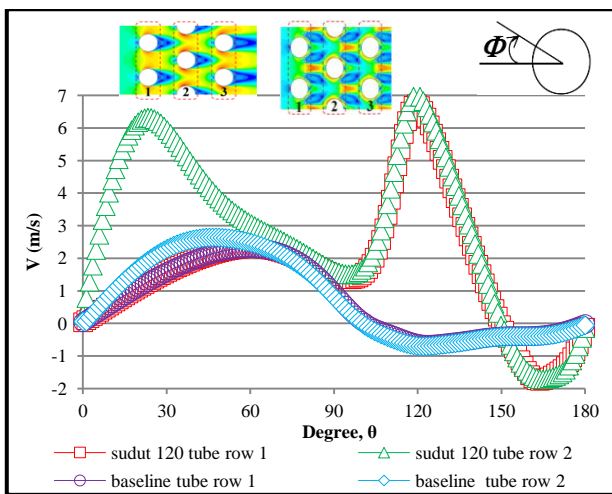
Berdasarkan gambar 8 mengenai grafik kecepatan lokal tube perbandingan antara model baseline (tanpa adanya penambahan obstacle) dan model modified (dengan adanya penambahan obstacle) tube pada baris pertama menunjukkan adanya peningkatan kecepatan (tekanan menurun, $\frac{\partial P}{\partial x} < 1$, favorable pressure gradient) pada posisi aliran $\theta \cong 60^\circ$ namun pada saat $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ tube pada baris ini memiliki kecepatan yang sama dengan tube baris pertama pada model baseline. Hal ini dikarenakan pada posisi tersebut belum adanya pengaruh dari penambahan obstacle. Saat posisi aliran $70^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$, kecepatan lokal tube mulai mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan tekanan yang terjadi (adverse pressure gradient, $\frac{\partial P}{\partial x} > 1$). Kemudian mengalami peningkatan kecepatan pada posisi aliran $95^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. Saat posisi aliran $95^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$, kecepatan lokal tube kembali mengalami penurunan. Sedangkan tube pada baris kedua, pada posisi aliran pada $0^\circ \leq \theta \leq 23^\circ$, mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan namun setelah melewati sudut 23° kecepatan lokal pada tube baris ini mengalami penurunan sampai $\theta \cong 95^\circ$. Kemudian mengalami peningkatan kecepatan kembali sampai posisi aliran pada $\theta \cong 120^\circ$ dan mengalami penurunan yang signifikan sampai posisi aliran pada $\theta \cong 150^\circ$. Untuk kedua baris tube, setelah aliran melintasi tube pada posisi sudut $\theta \cong 150^\circ$ (pada sudut ini mulai terjadinya separasi yang dikarenakan momentum aliran sudah tidak mampu lagi menahan adverse pressure gradient dan effect friction). Kecepatan lokal tube memiliki nilai yang negatif hingga $\theta \cong 180^\circ$ dikarenakan adanya back pressure yang menyebabkan aliran berolak-olak (vortex). Adanya peningkatan kecepatan kembali pada model modified ini dikarenakan selain celah sempit yang terbentuk antara obstacle satu dan yang lainnya, celah sempit lain yaitu adanya celah antara tube dengan obstacle.



Gambar 6. Visualisasi Kontur Kecepatan



Gambar 7. Distribusi Kecepatan Lokal Tube Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)



Gambar 8. Distribusi Kecepatan lokal *tube* Perbandingan antara Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*)

• Distribusi Temperatur

Berdasarkan Gambar 9. terlihat visualisasi aliran berdasarkan *contours of total temperature* aliran untuk model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) dengan kecepatan inlet 5 m/s untuk masing-masing variasi posisi sudut *obstacle* 120°, 135° dan 150° pada *tube*. Pada kedua model ini, temperatur inlet (udara) yaitu 37°C dan temperatur *tube* konstan yaitu 74°C atau masing-masing dalam satuan Kelvin yaitu 310 K dan 347 K. Distibusi temperatur untuk kedua model ini dapat diartikan dari kelompok warna yang terbentuk, dengan indikasi warna merah memiliki temperatur yang paling tinggi dan temperatur paling rendah diindikasikan oleh warna biru tua.

Berdasarkan gambar 4.9 Mengenai grafik Nusselt number lokal *tube* untuk model *baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*) dapat dilihat tren grafik Nusselt number lokal pada *tube* baris pertama sampai ketiga pada kecepatan inlet 5 m/s, yaitu pada saat $\theta \cong 0^\circ$ Nusselt number lokal *tube* memiliki nilai tertinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya daerah stagnasi (*stagnation point*) pada sudut tersebut saat kecepatan aliran udara memiliki selisih temperatur yang minimum antara dipermukaan *tube* dan udara disekitar *tube*.

Hal ini dapat dilihat seperti pada perumusan 4.3 dan ditinjau dari persamaan 4.2 dan persamaan 2.19.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \tag{4.3}$$

Dimana:

Nu = Nusselt Number

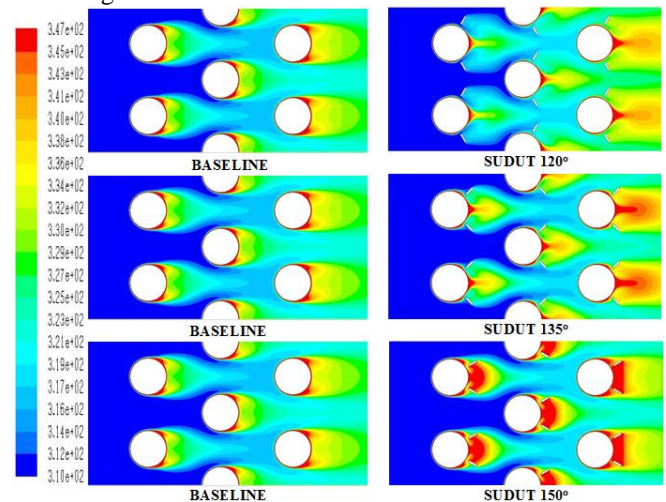
h = Koefisien *heat transfer*

D = Diameter *tube*

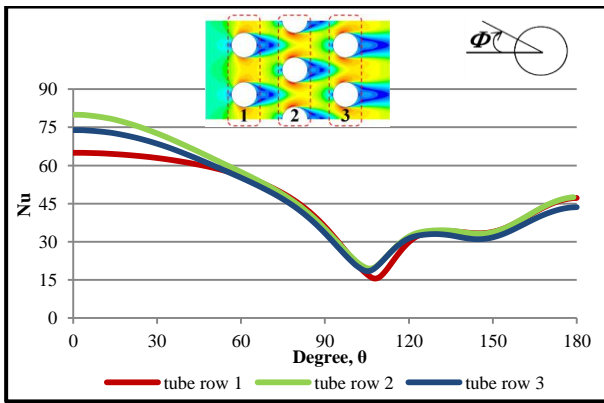
Pada trend grafik Nusselt number lokal model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 10. *Tube* pada baris pertama sampai ketiga menunjukkan adanya penurunan Nusselt number lokal saat aliran melintasi *tube* pada posisi aliran $\theta = 0^\circ$ hingga sudut mencapai $\theta \cong 110^\circ$, dimana nilai koefisien konveksinya juga mengalami penurunan dan terjadinya separasi pada nilai nusselt number minimum. Saat posisi aliran saat $110^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, kecepatan lokal *tube* mulai mengalami peningkatan, yang diindikasikan dengan peningkatan nilai koefisien konveksi lokal *tube*. Adanya peningkatan tersebut pada model *baseline* ini dikarenakan terbentuknya *vortex* pada daerah tersebut.

Dalam hal ini pengaruh besar kecilnya nilai dari koefisien konveksi lokal *tube* sangat erat kaitannya dengan besarnya nilai *heat rate* per area (q'') yang dipengaruhi oleh selisih temperatur, jika selisih temperatur udara sekitar *tube* dan permukaan *tube* kecil maka nilai *heat rate per area* (q'') besar sebanding dengan besarnya nilai koefisien konveksi lokal, dimana nilai konveksi lokal meningkat maka nilai Nusselt number juga ikut meningkat.

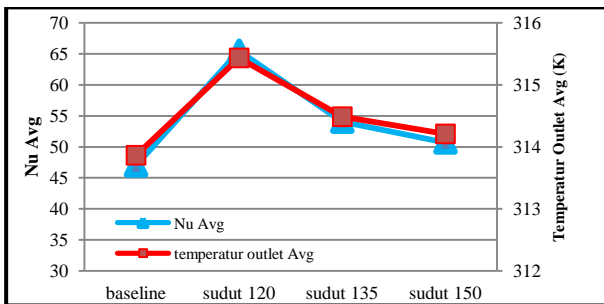
Dapat dilihat bahwa nilai Nusselt number rata-rata pada model *baseline* dan model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) setiap *row* memiliki nilai yang berbeda. Nilai nusselt number rata-rata yang diperoleh pada *tube row* 1 mengalami peningkatan dikarenakan pengaruh dari posisi sudut *obstacle*. Pada model *baseline* nilai nusselt rata-rata mempunyai nilai terendah. Pengaruh dari variasi posisi sudut *obstacle* yang berbentuk *rectangular* pada kemiringan 150°, 135° dan 120° berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*, akan menghasilkan celah antara posisi *obstacle tube* 1 dan pada *tube* 2. Semakin sempit celah yang dihasilkan maka posisi sudut *obstacle* akan lebih besar. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida ketika melewati celah sempit. Nilai Nusselt number rata-rata akan mengalami peningkatan pada *tube row* kedua dan terjadi penurunan akibat kehilangan momentum dari aliran fluida pada *tube row* ketiga.



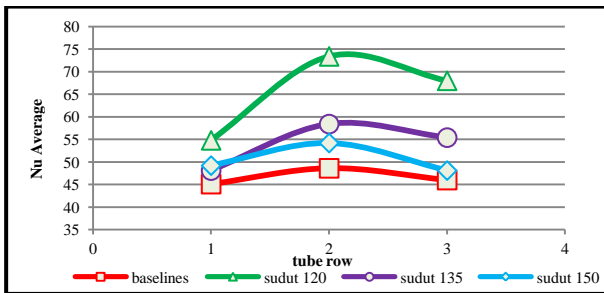
Gambar 9. Visualisasi Kontur temperatur



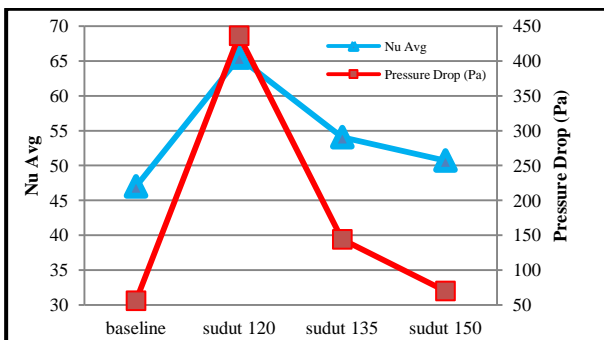
Gambar 10. Distribusi Nilai Nusselt number Lokal Tube Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)



Gambar 11. Temperatur Rata-rata *Outlet* dan Nilai Nusselt number Rata-rata



Gambar 12. Nusselt number rata-rata lokal *tube*



Gambar 13. Nusselt number Rata-rata dan *Pressure Drop*

Berdasarkan gambar 11 Dapat dilihat bahwa nilai Nusselt number rata-rata lokal *tube* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) setiap *row* memiliki nilai yang berbeda. Nilai nusselt number rata-rata yang diperoleh pada *tube row* 1 mengalami peningkatan dikarenakan pengaruh dari posisi sudut *obstacle*. Pada model *baseline* nilai nusselt number rata-rata mempunyai nilai terendah. Pengaruh dari variasi posisi sudut *obstacle* yang berbentuk *rectangular* pada kemiringan 150°, 135° dan 120° berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*, akan menghasilkan celah antara posisi *obstacle tube* 1 dan pada *tube* 2. Semakin sempit celah yang dihasilkan maka posisi sudut *obstacle* akan lebih besar. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida

ketika melewati celah sempit. Nilai Nusselt number rata-rata akan mengalami peningkatan pada *tube row* kedua dan terjadi penurunan akibat kehilangan momentum dari aliran fluida pada *tube row* ketiga.

Berdasarkan gambar 12 dapat dilihat bahwa nilai Nusselt number rata-rata dan *Pressure Drop* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) memiliki trend grafik yang semakin meningkat seiring dengan perubahan posisi sudut dari *obstacle* (150°, 135° dan 120°). Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil posisi sudut *obstacle* (berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*) maka semakin besar nilai Nusselt number rata-rata dan *Pressure Drop*-nya. Diharapkan dengan adanya penambahan *obstacle* proses perpindahan panasnya menjadi lebih baik akan tetapi nilai *pressure drop*nya tidak besar.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan pada hasil dan pembahasan diatas, maka dapat disimpulkan mengenai pengaruh posisi sudut *obstacle* terhadap karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas melewati *tube banks* yang disusun secara *staggered* untuk studi kasus posisi sudut *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan 120°, 135° dan 150°, diantaranya :

1. Pengaruh konfigurasi susunan *tube* yang tersusun secara *staggered* pada model *baseline* memiliki rata-rata temperatur *outlet* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan model *modified* karena adanya penambahan *obstacle*.
2. Nilai Nusselt number rata-rata yang dihasilkan dari adanya penambahan *obstacle* meningkat seiring dengan bertambah besarnya posisi kemiringan sudut pada *obstacle*, yakni besar peningkatannya berkisar antara 8,9-40,6% lebih tinggi dari pada nilai Nusselt number rata-rata pada model *baseline*.
3. Perpindahan panas yang terjadi dengan adanya penambahan *obstacle* lebih baik jika dibandingkan dengan model *baseline*. Dilihat dari kenaikan nilai Nusselt number dan koefisien konveksi dan didukung dengan visualisasi kontur kecepatan dan temperatur.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Chu, Pan, He, Y.L., Tao, W.Q., (2009). "Three-Dimensional Numerical Study of Flow and Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators in Fin-and-Tube Heat Exchangers". Journal of Heat Transfer ASME Vol 131, 1-9.

[2] Kannan, K.Thirumalai dan Kumar, B.Senthil. (2011) "Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Plate-Fin and Tube Heat Exchangers with Different Shaped Vortex Generators". International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) 2, 2231-2307.

[3] Kristianto, Oktavianus, Danny. (2013) "Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CPs) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan $l/D = 0.15$, pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered". Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.