

STUDI NUMERIK PENGARUH JARAK TRANSISI 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, EXISTING, DAN 10D, ANTARA SECONDARY SUPERHEATER DAN BOILERBANK TUBE SERTA PENGARUH SUSUNAN TUBE ALIGNED DAN STAGGERED TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

Karisma Rizal 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

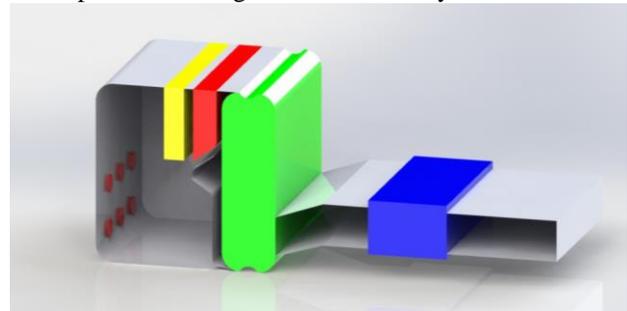
Abstrak— Rendahnya efisiensi pembangkit pada unit 1 dan 2 PLTU PT.Indonesia Power Perak menyebabkan 2 unit tersebut dimatikan secara permanen sejak 1995. Pada 2012 unit 3 dan 4 dimatikan sementara hingga efisiensi pembangkit ini dapat ditingkatkan. Penggantian bahan bakar dari MFO menjadi gas menjadi salah satu solusi yang diberikan. Solusi lain yang ditawarkan adalah dengan meningkatkan perpindahan panas *tube-tube boiler* khususnya pada *secondary superheater* dan *boilerbank tube*. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan jarak transisi antara *secondary superheater* dan *boilerbank tube* sebesar 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, *existing*, dan 10D. Fluida kerja berupa gas sisa hasil pembakaran yang diasumsikan sebagai gas ideal dengan kecepatan sebesar 5.46 m/s pada pembebanan 100% yang mengalir pada sisi eksternal tube dengan temperatur 1000 K. *Boundary condition* yang diambil adalah 3 baris *tube* pada *secondary superheater*, 2 baris *tube* pada *boilerbank tube staggered*, dan 2 baris *tube* pada *aligned boilerbank tube*. Studi numerik dilakukan secara 2 dimensi dengan aliran *steady* dengan prinsip *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 untuk membuat geometri dari domain dan *software* FLUENT 6.3.26 untuk menjalankan proses simulasi. Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan grafik Nusselt lokal pada susunan tube *aligned* dan susunan tube *staggered*, grafik Nusselt rata-rata *secondary superheater* dan *boilerbank tube* pada seluruh variasi, serta grafik perbandingan Nusselt lokal pada seluruh variasi. Susunan tube bank *Staggered* memiliki nilai Nusselt Number lokal dan rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan susunan tube bank *Aligned*. Selain itu didapatkan kesimpulan bahwa variasi jarak transisi tidak memiliki efek yang signifikan terhadap perpindahan panas pada *secondary superheater* dan *boilerbank tube* tipe *aligned*, namun memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *boilerbank tube* tipe *staggered*. Kecepatan inlet *boilerbank tube* tipe *staggered* berturut-turut pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D adalah 8.94 m/s, 7.31 m/s, 6.3 m/s, 5.64 m/s, 4.72 m/s, dan jarak transisi *existing* dan 10D dengan kecepatan sama sebesar 4.5 m/s. Peningkatan Nusselt Number tertinggi terjadi pada variasi jarak transisi 2D dengan peningkatan Nusselt pada *tube* pertama sebesar 18.98% dan pada *tube* kedua sebesar 6.97% dibandingkan dengan kondisi *existing*. *Pressure Drop* yang terjadi pada seluruh variasi menunjukkan nilai yang relatif sama.

Kata Kunci — *external flow, superheater, powerplant, jarak transisi, heat transver*

I. PENDAHULUAN

PEMBANGKIT listrik tenaga uap (PLTU) Tanjung Perak merupakan salah satu unit pembangkit dari PT. Indonesia

Power. Terdapat empat unit pembangkit tenaga uap yaitu unit 1 dan 2 dengan kapasitas 2 x 25 MW dan unit 3 dan 4 dengan kapasitas 2 x 50 MW. Seluruh unit pembangkit pada PLTU Perak menggunakan bahan bakar minyak berupa *Marine Fuel Oil* (MFO). Konsumsi bahan bakar perhari dari keempat unit pembangkit tersebut dinilai sangat boros, yaitu mencapai 550 kl per hari. Operasional dari unit pembangkit 1 dan 2 dihentikan permanen sejak 1995, dan unit pembangkit 3 dan 4 berhenti pada 2012 dengan alasan rendahnya efisiensi.



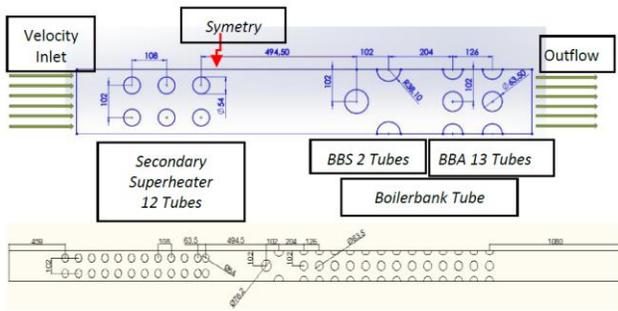
Gambar 1 Ilustrasi Boiler PT. Indonesia Power UBP Perak

Pembakaran terjadi didalam boiler secara kontinu untuk memanasi air yang melewati *tube-tube* baik secara konveksi maupun radiasi. Gas sisa hasil pembakaran mengalir dalam boiler melewati *Primary Superheater*, *Secondary Superheater*, dan *Boilerbank Tube* hingga air didalam *tube-tube* menjadi uap kering yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin.

Cara untuk meningkatkan efisiensi adalah dengan meningkatkan perpindahan panas pada bagian-bagian utama boiler yang memiliki fungsi vital, seperti *Primary Superheater*, *Secondary Superheater*, dan *Boilerbank Tube*. Pada *Primary* dan *Secondary Superheater* terjadi proses dari uap jenuh menjadi uap kering, pada *Boilerbank Tube* terjadi proses perubahan fase dari cair menjadi uap sehingga dibutuhkan penyerapan panas yang baik pada ketiga bagian tersebut.

II. METODOLOGI PERCOBAAN

Simulasi numerik dilakukan secara dua dimensi pada penelitian dengan menggunakan perangkat lunak berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk proses pembuatan domain dan iterasi. Adapun skema geometri model untuk penelitian diperlihatkan pada gambar 2 dan keterangan geometri ditampilkan pada tabel 1.



Gambar 2 Geometri *Secondary Superheater* dan *Boilerbank Tubes existing*

Tabel 1
Geometri *Secondary Superheater* dan *Boilerbank Tubes existing*

Dimensi	Value
Secondary Superheater	
Diameter luar tube (mm)	54
Jarak Transversal (ST/D)	1.889
Jarak Longitudinal (SL/D)	2
Jumlah Baris Tube	12
Boilerbank Tube Stegged	
Diameter luar tube (mm)	76.2
Jarak Transversal (ST/D)	1.338
Jarak Longitudinal (SL/D)	1.338
Jumlah Baris Tube	2
Boilerbank Tube In-Line	
Diameter luar tube (mm)	63.5
Jarak Transversal (ST/D)	1.606
Jarak Longitudinal (SL/D)	1.984
Jumlah Baris Tube	13
Jarak Transisi	
<i>Secondary Superheater</i> dan <i>Boilerbank Tube</i> (mm)	494.5
<i>Boilerbank Tube Stegger</i> dan <i>In-line</i> (mm)	204

Prosedur yang dilakukan pada penelitian secara numerik dibagi menjadi 3 tahap utama, antara lain:

A. Pre-processing

Pada tahap ini dilakukan input data, antara lain pembuatan geometri model, domain, *meshing* dan *boundary type*, seperti ditampilkan pada tabel 2. Tahap ini dilakukan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 *Meshing* model *existing* dan variasi jarak transisi dengan ditunjukkan pada gambar 3.

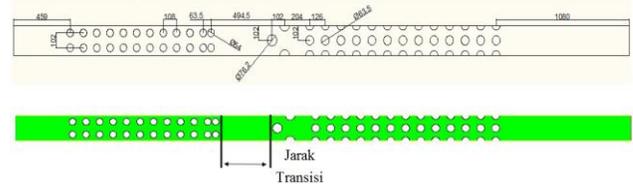
B. Processing

Tahap kedua dilakukan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3.26. Jenis *solver* yang dipilih berupa keakuratan ganda 2D. *Turbulence model* yang digunakan adalah *k-ε Renormalization Group*, mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Nurul Komari [3]. Solusi yang dilakukan berupa *second order* dan properties udara yang dimodelkan sebagai gas ideal dengan kondisi aliran *steady*, ditampilkan pada tabel 3. Lalu dilakukan proses iterasi hingga mencapai kriteria konvergensi sebesar 10^{-6} .

• **Validation of Numerical Result**

Proses ini bertujuan untuk membandingkan keakuratan nilai yang dihasilkan oleh beberapa jenis *meshing*. Validasi untuk studi ini dilakukan dengan membandingkan bilangan *Nusselt* rata-rata *tube banks* secara perhitungan teoritis menggunakan

persamaan yang dicetuskan oleh Grimison dengan hasil simulasi. Jenis *mesing* dan hasil perhitungan validasi ditampilkan pada tabel 5. Dengan perbedaan yang paling sedikit, maka dipilih *meshing* jenis D dengan jumlah *cell* sebanyak 1.546.158 *cells*.



Gambar 3 *Meshing* untuk *Secondary Superheater* dan *Boilerbank Tube* untuk aliran 2D dengan bentuk *Quadrilateral-map*

Tabel 2
Boundary Condition Secondary Superheater dan Boilerbank Tubes

Boundary Condition	Keterangan
Inlet	Type : <i>Velocity Inlet</i> Kecepatan : 5.46 m/s Temperatur : 1000 K
Outlet	Type : <i>Outflow</i>
Tubes Secondary Superheater	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 640K, 655K, 669K, 684K, 698K, 713K, 727K, 742K, 756 K , 771 K , 786 K
Tubes Boilerbank Tubes	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 579 K
Garis bantu atas dan bawah	Type : <i>Symetry</i>

Tabel 3
Properties Fluida (Udara yang dimodelkan sebagai gas ideal)

Temperature Inlet (K)	1000
Density (Kg/m ³)	0.3482
Specific Heat (Cp) (KJ/kg.K)	1141
Thermal Conductivity (W/m.K)	0.0667
Absolut Viscosity (μ) (Kg/m.s)	424.4 x 10 ⁻⁷
Prandlt Number (Pr)	0.726

C. Post-processing

Hasil simulasi numerik secara kualitatif dianalisa berdasarkan visualisasi kontur kecepatan dan temperatur. Secara kuantitatif, data hasil iterasi diolah menjadi grafik kecepatan, perbandingan bilangan *Nusselt* dan penurunan tekanan (ΔP) untuk masing-masing model variasi.

Tabel 4
Grid Independency Validation untuk 4 Jenis *meshing* model *existing*

Mesh	Jumlah Cell	Nu _D		Nu _D teoritis Grimmison
		SS	BBS	SS = 51.98 BBS = 50.82 BBA = 74.79
A	560.687	SS	55.9	7.5 %
		BBS	52.55	3.4 %
		BBA	77.69	3.8 %
B	1.189.373	SS	54.75	5.33 %
		BBS	53.98	6.21 %
		BBA	76.41	2.1 %
C	1.319.008	SS	54.22	4.31 %
		BBS	53.18	4.65 %
		BBA	74.58	0.27 %
D	1.546.158	SS	53.14	2.24 %
		BBS	52.95	4.18 %
		BBA	74.59	0.26 %

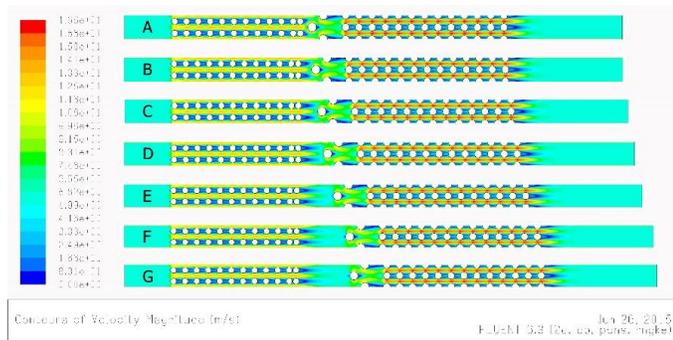
III. URAIAN PENELITIAN

Penelitian ini berfokus untuk mengetahui pengaruh variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, *existing*, dan 10D antara *secondary superheater* dan *boilerbank tube*. Kecepatan inlet aliran fluida yang digunakan adalah kecepatan konstan sebesar 5.46 m/s. Hasil yang ditampilkan berupa visualisasi kontur kecepatan dan temperatur aliran, serta data-data berupa grafik bilangan *Nu* lokal dan rata-rata serta penurunan tekanan (ΔP).

A. Analisa Visualisasi Aliran dan perpindahan Panas Pada Domain Secara Overall dalam Numerik

a. Visualisasi Kecepatan Aliran pada Domain Secara Overall

Kontur kecepatan untuk *Tube Banks* model *existing* dan model variasi pada kecepatan inlet 5.46 m/s ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4 Visualisasi Kontur kecepatan Tube Banks untuk kecepatan inlet 5.64 m/s pada variasi jarak transisi, (A) 2D, (B) 3D, (C) 4D, (D) 5D, (E) 7D, (F) model existing, dan (G) 10D

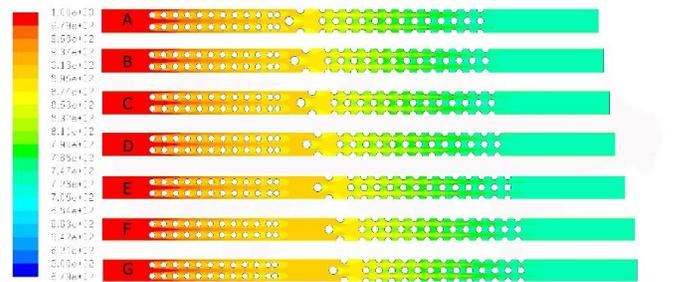
Gambar 4 menunjukkan bahwa pada model *existing* maupun variasi secara keseluruhan memiliki kontur kecepatan yang hampir sama. Namun pada daerah variasi jarak Transisi antar *Tube Banks* aliran memiliki pola yang berbeda-beda. Perbedaan terlihat saat aliran keluar dari *Secondary Superheater* hingga mengenai *Boilerbank Tubes*.

b. Visualisasi Perpindahan Panas Pada Domain Secara Overall

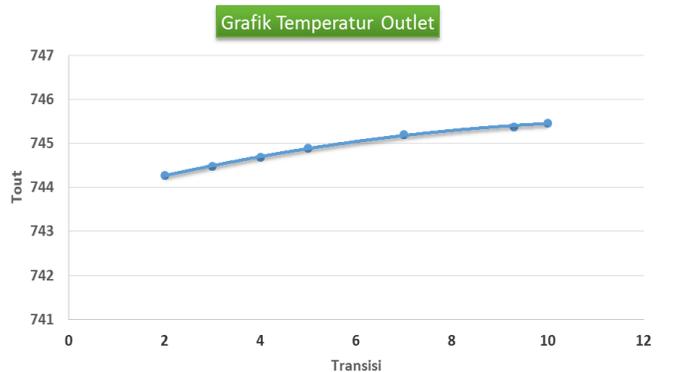
Terlihat pada Gambar 5 diatas bahwa Pada model *existing* maupun model variasi jarak transisi memiliki kontur temperatur yang serupa. Temperatur berubah seiring mengalirnya fluida. Aliran masuk dengan suhu seragam 1000 K, aliran melewati *Tube-Tube* yang kemudian panas dari aliran diserap oleh *Tube-Tube* sehingga suhu pada sisi *outlet* berkurang menjadi spektrum warna biru muda yaitu rentang suhu 700 K hingga 800 K.

Gambar 6 merupakan grafik temperatur *outlet* dari jarak transisi 2D hingga 10D. Terlihat bahwa Trend grafik mengalami kenaikan namun cukup landai. Temperatur *outlet* pada jarak transisi 2 merupakan yang paling rendah yaitu 744.27 K. Pada jarak transisi 3 memiliki temperatur outlet lebih tinggi yaitu 744.48 K. Semakin jauh jarak transisi, semakin besar temperatur *outlet*nya hingga yang tertinggi adalah jarak transisi 10D yaitu memiliki temperatur *outlet* sebesar 745.46 K. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin

dekat jarak transisi maka semakin baik perpindahan panas yang terjadi pada *Tube*. Namun, dari *trend* grafik yang landai dan selisih temperatur *outlet* yang sangat kecil yaitu 1.18 K maka dapat disimpulkan bahwa jarak transisi memiliki pengaruh terhadap perpindahan panas namun tidak signifikan.



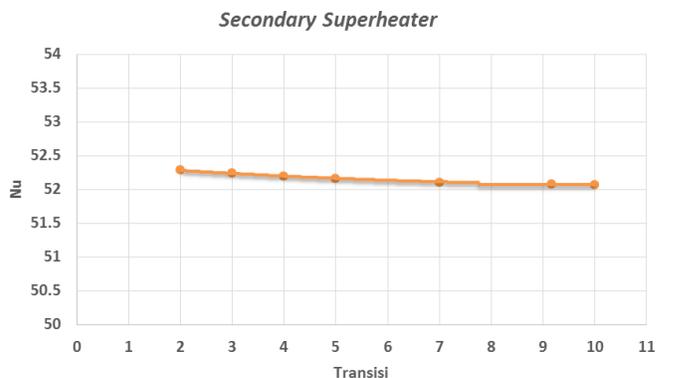
Gambar 5 Visualisasi Kontur Temperatur Tube Banks untuk kecepatan inlet 5.64 m/s pada variasi jarak transisi, (A) 2D, (B) 3D, (C) 4D, (D) 5D, (E) 7D, (F) model existing, dan (G) 10D



Gambar 6 Grafik Temperatur outlet pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing, dan 10D.

c. Analisa Distribusi Nusselt Pada Domain Secara Overall

Perpindahan panas yang terjadi pada suatu *Tube Banks* didominasi oleh perpindahan panas secara konveksi, dimana kualitas perpindahan panas secara konveksi ini dapat dilihat dari besarnya nilai Nusselt. Semakin besar nilai Nusselt dari suatu *Tube Banks* maka semakin besar pula perpindahan panas yang terjadi pada *Tube Banks* tersebut.



Gambar 7 Nusselt Number rata-rata Secondary Superheater pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing, dan 10D.

Gambar 7 diatas bahwa nilai Nusselt rata-rata pada *Secondary Superheater* tidak terjadi perubahan baik

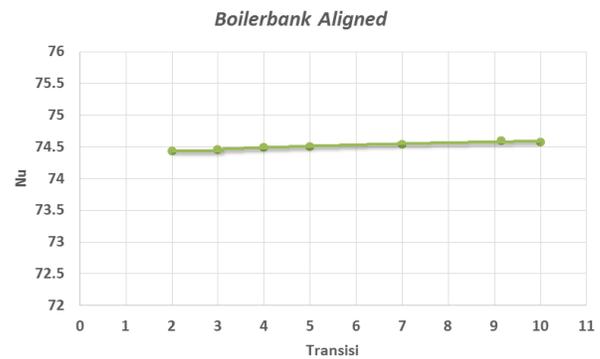
peningkatan maupun penurunan. Besar nilai Nusselt rata-rata mengalami fluktuasi pada angka 51.9 hingga 52.3 dimana nilai tertinggi ada pada variasi jarak transisi 2D yaitu sebesar 52.28 dan yang terendah pada variasi jarak transisi 10D yaitu 51.97, Sedangkan pada kondisi *existing* Nusselt rata-rata bernilai 52.08. Secara teoritis besarnya Nusselt Number dipengaruhi oleh kecepatan serta geometri suatu Tube bank. Tidak adanya perbedaan nilai Nusselt rata-rata pada *Secondary Superheater* disebabkan karena tidak adanya perubahan geometri pada keseluruhan Tube bank baik jarak *longitudinal pitch* maupun jarak *Transversal pitch*. Selain itu kecepatan dan temperatur masuk melewati *Secondary Superheater* memiliki nilai yang sama pada setiap variasi sehingga menurut perumusan Nusselt Number tidak ada perubahan.



Gambar 8 Nusselt Number rata-rata Boilerbank Tube tipe Staggered pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing, dan 10D.

Gambar 8 menunjukkan nilai Nusselt rata-rata pada *Boilerbank Tube* tipe *Staggered*. Semakin kecil jarak transisi maka nilai Nusselt rata-rata pada *Boilerbank Tube* tipe *Staggered* semakin meningkat. Nilai Nusselt tertinggi ada pada jarak transisi 2D yaitu sebesar 59.72, sedangkan nilai Nusselt terendah ada pada jarak transisi 10D yaitu 52.47. Secara kontur temperatur, semakin dekat jarak transisi antara *Secondary Superheater* dan *Boilerbank Tube* kontur temperatur memiliki warna yang sama. Namun secara kontur kecepatan semakin dekat jarak transisi maka kecepatan aliran mengenai *Boilerbank Tube* tipe *Staggered* semakin besar. Pada variasi jarak transisi jarak transisi *Boilerbank Tube* tipe *Staggered* dengan celah antar dua Tube dari *Secondary Superheater* semakin dekat, dimana pada celah tersebut terjadi kecepatan maksimum dari suatu Tubebank tipe aligned. Sehingga semakin dekat jarak transisi maka semakin besar kecepatan aliran fluida yang mengenai *Boilerbank Tube* tipe *Staggered*.

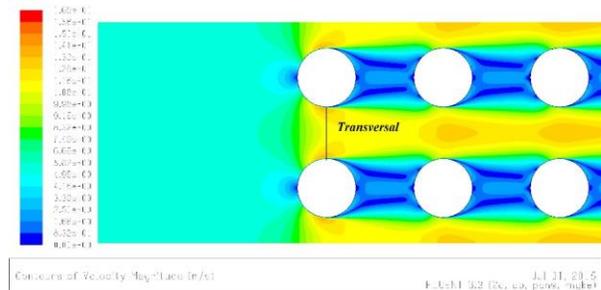
Gambar 9 menunjukkan bahwa Nusselt rata-rata untuk *Boilerbank Tube* tipe *Aligned* tidak terjadi perubahan pada semua variasi. Besar nilai Nusselt rata-rata mengalami fluktuasi pada angka 74.4 hingga 74.6 dimana nilai tertinggi ada pada variasi jarak transisi *existing* yaitu sebesar 74.59 dan yang terendah pada variasi jarak transisi 2D yaitu 74.43. Tidak adanya perbedaan nilai Nusselt rata-rata pada *Boilerbank Tube* tipe *Aligned* disebabkan karena tidak adanya perubahan geometri pada keseluruhan Tube bank baik jarak *longitudinal pitch* maupun jarak *Transversal pitch* seperti pada *Secondary Superheater*.



Gambar 9 Nusselt Number rata-rata Boilerbank Tube tipe Aligned pada variasi jarak transisi 2, 3, 4, 5, 7, existing, dan 10.

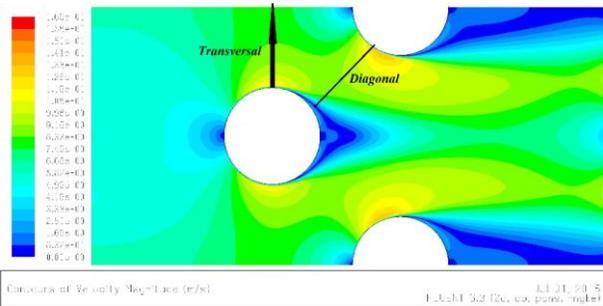
B. Analisa Visualisasi Aliran dan perpindahan Panas Pada Susunan Tube Bank tipe Aligned dan Staggered

Pada Geometri percobaan yang dianalisa dalam penelitian ini terdapat dua Tube bank dengan susunan Tube aligned. Pada pembahasan karakteristik aliran dan perpindahan panas susunan Tube Aligned ini hanya akan dibahas pada *Secondary Superheater* dengan asumsi *Boilerbank Tube* tipe *Aligned* memiliki karakteristik dan trend grafik yang sama walaupun memiliki nilai yang berbeda.

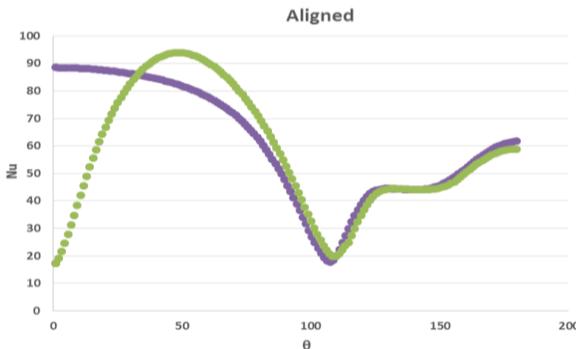


Gambar 10 Visualisasi Kontur kecepatan susunan Tube Banks Aligned pada *Secondary Superheater*.

Gambar 10 dan 11 terlihat bahwa Distribusi kecepatan lokal pada model ditunjukkan oleh spektrum warna kontur aliran. Kontur dengan spektrum warna merah memiliki nilai kecepatan yang tinggi, sedangkan kontur dengan spektrum warna biru memiliki nilai kecepatan yang rendah. Gambar 10 bahwa aliran mengalami percepatan dan mencapai kecepatan maksimum ketika melewati celah antara Tube atas dan Tube bawah pada susunan Tube Banks aligned. Gambar 11 menunjukkan bahwa terjadi percepatan aliran pada jarak *Transversal* antar Tube depan, namun spektrum warna menunjukkan bahwa pada jarak *diagonal* antar Tube depan dan belakang juga memiliki warna hijau. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada susunan Tube *Staggered* peningkatan kecepatan terjadi pada dua tempat yaitu pada jarak *Transversal* dan *diagonal Tube*. Pada Tube kedua aliran yang melewatinya memiliki kecepatan yang lebih tinggi dari pada aliran yang melewati Tube pertama. Hal tersebut dikarenakan sebelum melewati Tube kedua aliran telah mengalami percepatan pada jarak *Transversal Tube* pertama.



Gambar 11 Visualisasi Kontur kecepatan susunan Tube Banks Staggered pada Boilerbank Tube tipe Staggered

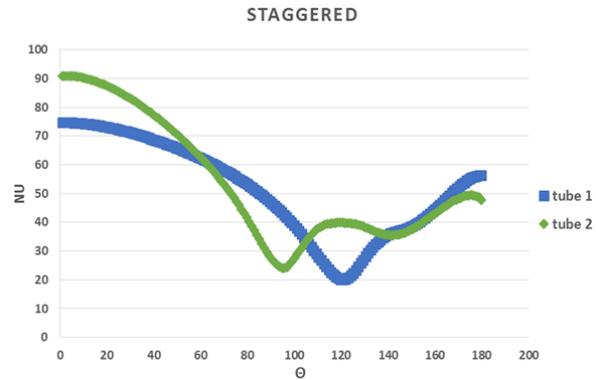


Gambar 12 Distribusi bilangan Nusselt lokal susunan Tube Banks Aligned pada Secondary Superheater. (1) Tube pertama (2) Tube kedua

Gambar 12 menunjukkan grafik Nusselt lokal untuk Tube pertama pada titik stagnasi sudut 0° memiliki nilai bilangan Nusselt tertinggi dimana pada Tube pertama tersebut aliran yang melewatinya merupakan aliran *mainflow* dengan temperatur tinggi. Seiring bertambahnya sudut *boundary layer* semakin berkembang dan aliran pada permukaan Tube mengalami perlambatan disebabkan oleh tegangan geser dari Tube. Hal tersebut menyebabkan nilai Nusselt Number turun dan mencapai nilai minimum saat *boundary layer* kecepatan mencapai nilai minimum, nilai bilangan Nusselt naik kembali setelah terjadi separasi. Separasi terjadi setelah *boundary layer* kecepatan mencapai nilai minimum, setelah mencapai titik minimum terjadi *backflow* dan terjadi adanya olakan. Hal tersebut yang menyebabkan nilai bilangan Nusselt naik kembali sampai pada sudut 180° .

Gambar 13 menunjukkan grafik bilangan Nusselt lokal yang terjadi pada susunan Tube Staggered Boilerbank Tube tipe Staggered. Tube 1 memiliki trend grafik yang mirip dengan Tube pertama pada susunan Tube Aligned Secondary Superheater. Hal tersebut disebabkan Tube pertama pada susunan Tube Aligned maupun Staggered aliran yang melewatinya memiliki karakteristik yang sama yaitu aliran *mainflow* yang melewatinya tidak terdapat pengaruh atau pengganggu. Namun pada Tube kedua susunan Tube Staggered memiliki trend grafik yang berbeda dari susunan Tube aligned. Pada susunan Tube Staggered, pada 0° Tube kedua memiliki nilai bilangan Nusselt yang lebih tinggi dari Tube pertama. Hal tersebut dikarenakan pada Tube kedua aliran yang melewatinya merupakan aliran dengan temperatur yang sama dengan aliran yang melewati Tube pertama. Namun dari segi kecepatan aliran melewati Tube kedua memiliki kecepatan yang lebih besar dari pada aliran yang

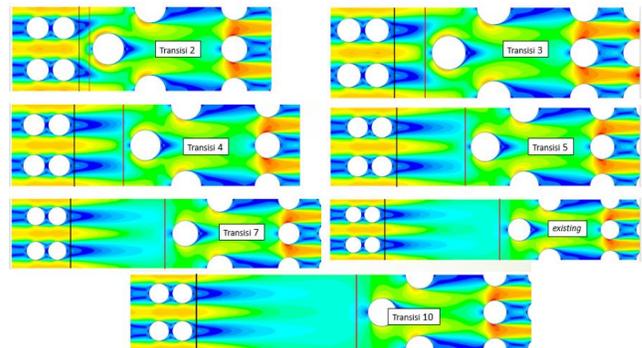
melewati Tube pertama. Hal tersebut yang menyebabkan nilai bilangan Nusselt pada Tube kedua lebih tinggi dari pada Tube pertama.



Gambar 13 Distribusi bilangan Nusselt lokal susunan Tube Banks Staggered pada Boilerbank Tube tipe Staggered. (1) Tube pertama (2) Tube kedua

C. Analisa Visualisasi Aliran dan perpindahan Panas Pada Daerah Transisi dalam Numerik

a. Analisa Visualisasi Aliran Pada Daerah Transisi model variasi



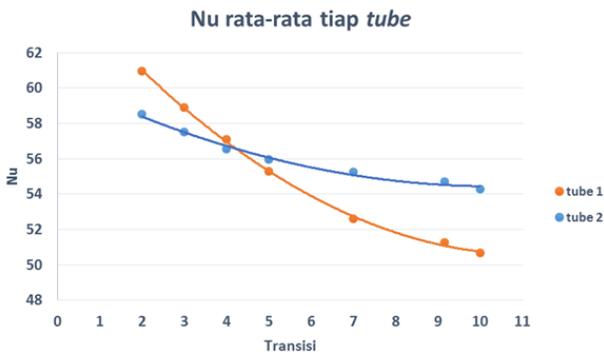
Gambar 14 Kontur kecepatan daerah transisi pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing dan 10D

Gambar 14 menunjukkan bahwa semakin dekat jarak transisi maka Tube pertama dari Boilerbank Tube tipe Staggered terkena aliran dengan spektrum warna semakin oranye. Hal tersebut berarti kecepatan aliran yang tepat mengenai Tube pertama memiliki kecepatan yang semakin tinggi seiring semakin dekatnya jarak transisi. Tube pertama maupun kedua pada Boilerbank Tube tipe Staggered sejajar dengan celah antar Tube pada Secondary Superheater, dimana pada celah tersebut terjadi kecepatan maksimum pada suatu Tube bank. Hal ini mengakibatkan semakin dekat jarak transisi semakin dekat Boilerbank Staggered dengan celah antar Tube Secondary superheater yang menyebabkan semakin besarnya kecepatan aliran mengenai Tube pada Boilerbank Tube.

b. Analisa Perpindahan Panas Pada Daerah Transisi model variasi

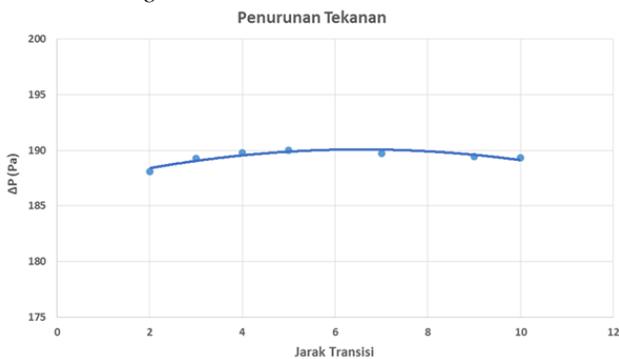
Gambar 15 menunjukkan nilai bilangan Nusselt rata-rata pada Tube 1 maupun Tube 2 bahwa nilai Nusselt rata-rata meningkat seiring dengan semakin dekatnya jarak transisi. Perubahan nilai bilangan Nusselt pada Boilerbank Tube ini lebih dominan dipengaruhi oleh kecepatan aliran yang

mengenaunya, efek dari susunan geometri dari *Secondary Superheater*. Hal tersebut ditunjukkan pada pembahasan sebelumnya bahwa semakin dekat jarak transisi maka kecepatan aliran mengenai *Tube* akan semakin tinggi. Ketika kecepatan aliran tinggi maka nilai bilangan Reynold akan semakin tinggi pula, dan semakin tinggi nilai bilangan Reynold maka nilai bilangan Nusselt akan semakin tinggi pula. perbedaan nilai bilangan Nusselt seluruh variasi pada *Tube 2* tidak sebesar pada *Tube 1* hal tersebut dikarenakan pada seluruh variasi perbedaan kecepatan aliran mengenai *Tube 1* lebih besar dibandingkan perbedaan kecepatan aliran mengenai *Tube 2*. Nilai bilangan Nusselt pada jarak transisi 2D dibandingkan kondisi *existing* meningkat 18.98 % pada *Tube 1* dan 6.97 % pada *Tube 2*.



Gambar 15 Grafik Nusselt rata-rata Tube 1 dan 2 pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing, dan 10D

D. Penurunan Tekanan (Pressure Drop) pada Tube Banks Model Existing dan Model Variasi



Gambar 16 Grafik penurunan tekan pada variasi jarak transisi 2D, 3D, 4D, 5D, 7D, existing, dan 10D

Gambar 16 menunjukkan penurunan tekanan pada masing-masing variasi jarak transisi. Kecepatan fluida yang mengalir sebesar 5.46 m/s terjadi penurunan tahanan yang berbeda-beda pada masing-masing jarak transisi L/D antara *Secondary Superheater* dan *Boilerbank Tube*. Penurunan tekanan pada 2D adalah sebesar 188.08 Pa, lalu pada 3D terjadi penurunan tekanan yang lebih besar hingga pada sekitar 7D terjadi penurunan tekanan paling besar dan pada jarak *existing* dan 10D memiliki nilai penurunan tekanan yang relatif sama.

IV. KESIMPULAN

Dari analisa yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Jarak Transisi tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kontur aliran dan perpindahan panas terhadap domain secara *overall*. Namun memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas yang terjadi pada *Boilerbank Tube* susunan *Staggered*,
2. Susunan *tube bank Staggered* memiliki nilai Nusselt Number lokal dan rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan susunan *tube bank Aligned*,
3. Kecepatan aliran *inlet* mengenai *Boilerbank tube* susunan *Staggered* paling tinggi pada jarak transisi 2 yaitu sebesar 8.94 m/s, kemudian jarak transisi 3 sebesar 7.31 m/s, jarak transisi 4 sebesar 6.3 m/s, jarak transisi 5 sebesar 5.64 m/s, jarak transisi 7 sebesar 4.72 m/s, dan jarak transisi 8 dan 10 dengan kecepatan sama sebesar 4.5 m/s,
4. *Tube* pertama dan kedua *Boilerbank tube* susunan *Staggered* pada jarak transisi 2 memiliki peningkatan Nusselt Number sebesar 18.98 % dan 6.97% dari kondisi *existing*,
5. Penurunan tekanan yang terjadi pada seluruh variasi menunjukkan nilai yang relatif sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih Bapak Ridwan dan Ibu Siti Indiah atas dukungan yang diberikan kepada penulis selama ini. Serta penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof.Dr.Eng.Ir. Prabowo, M.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan dan arahnya dalam proses penyusunan jurnal ilmiah. Ucapan terima kasih dan hormat kepada semua dosen, karyawan dan mahasiswa Teknik Mesin ITS yang telah banyak mengajarkan ilmu dan pengalaman bermanfaat untuk penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Necati Mahir and Zekeriya Altaç. (2008). *Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements. International Journal of Heat and Fluid Flow* 29 (2008) 1309–1318.
- [2] Dongkyun Lee, Joon Ahn, Seungwon Shin. (2013). *Uneven longitudinal pitch effect on tube bank heat transfer in cross flow. Applied Thermal Engineering* 51 (2013) 937e947.
- [3] Nurul Komari dan Prabowo. 2014. Studi Numerik Pengaruh Penambahan Rectangular Obstacle Terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas pada *Staggered Tube Banks* dengan $\ell/D = 0,2$. *Jurnal Teknik POMITS* Volume 2(1), ISSN: 2337-3539.
- [4] Incropera, Frank P., De Witt, David P. (2002). *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [5] Moran, Michael J. dan Shapiro, H.N. 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics (5th Edition)*. Inggris: John Wiley & Sons.
- [6] Fox, Robert W., Pritchard, P.J. dan McDonald, Alan T. 2010. *Introduction to Fluid Mechanics (7th Edition)*. Asia: John Wiley & Sons.
- [7] Jagadeesh, P. dan Murali.K. 2005. *Application of Low-Re Turbulence Models for Flow Simulations Past Underwater Vehicle Hull Forms. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*