Pengembangan Metode untuk Implementasi CFD pada Analisis Penukar Panas Pipa Bersirip Skala Industri dengan Menggunakan Komputer Berkapasitas Terbatas

Nathanael P. Tandian, Agung Dwi Susanto, dan Eksa Bagas Prasasti

Program Studi Teknik Mesin, FTMD – Institut Teknologi Bandung
Gedung Labtek II, Lantai 2, Jl. Ganesa No. 10, Bandung 40132
E-mail: nathan@termo.pauir.itb.ac.id dan n4th4n.t4nd14n@gmail.com

Abstrak

Penukar panas jenis pipa bersirip (*finned tubes*) merupakan salah satu komponen sistem termal yang sudah umum diterapkan dalam industri. Perhitungan rinci dalam proses perancangan dan analisis fenomena fisik yang terjadi pada penukar panas pipa bersirip kerap kali dilakukan dengan menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Metode CFD dapat diterapkan secara rinci dan mudah untuk penukar panas jenis pipa bersirip skala kecil, namun akan menghadapi banyak kendala jika diterapkan pada penukar panas skala industri karena memerlukan sumber daya komputer yang sangat besar.

Makalah ini membahas beberapa tahap pengembangan alternatif metode implementasi CFD pada analisis penukar panas pipa bersirip skala industri dengan menggunakan komputer berkapasitas terbatas. Secara prinsip, dengan metode yang dikembangkan dilakukan dua tahap perhitungan CFD, yaitu 1) analisis CFD untuk menghitung koefisien perpindahan panas keseluruhan antara aliran udara pendingin di sisi luar penukar panas dan permukaan dalam dinding pipa penukar panas, dan 2) analisis CFD untuk menghitung medan kecepatan dan temperatur fluida di dalam pipa penukar panas. Kedua tahap analisis tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial secara terpisah dan iteratif.

Sebagai contoh kasus dalam makalah ini, berbagai metode yang dikembangkan telah diterapkan pada analisis CFD penukar panas berukuran fisik panjang x lebar x tinggi sebesar 1110 x 384,8 x 13,3 cm yang digunakan sebagai pendingin-lanjut berpendingin-udara di sebuah industri pengolah gas alam. Metode analisis CFD tersebut berhasil dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial yang bekerja pada sebuah *netbook* dengan prosesor Intel Atom N450 dan RAM sebesar 1 GB. Hasil perhitungan menunjukkan konsistensi hasil perhitungan serta peningkatan ketelitian sejalan dengan pengembangan metode yang telah dilakukan.

Kata kunci: analisis CFD, CFD, penukar panas pipa bersirip

1 Pendahuluan

Penukar panas pipa bersirip (*finned tubes*) merupakan salah satu komponen sistem termal yang umum digunakan di industri, antara lain sebagai pendingin-lanjut berpendingin-udara, pendingin-antara berpendingin-udara pada proses kompresi, atau sebagai pengembun berpendingin-udara pada sistem pembangkit daya listrik. Analisis proses yang meliputi aliran fluida dan perpindahan panas pada penukar panas pipa bersirip kerap kali dilakukan dengan menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Analisis CFD pada penukar panas pipa bersirip (khususnya untuk skala industri) memerlukan sumber daya komputer yang besar karena ukuran jarak antar sirip yang sempit membutuhkan grid/mesh yang halus, sementara itu secara keseluruhan penukar panas skala industri memiliki ukuran yang besar.

Sebenarnya paket CFD sering dapat menghitung kasus media berpori *(porous media*) yang mampu mendekati perhitungan padatan berukuran kecil dengan ruang berisi fluida di sela-selanya. Kemampuan ini dapat digunakan sebagai pendekatan dalam pemodelan pipa-pipa bersirip, namun fenomena perpindahan dalam susunan sirip penukar panas pipa bersirip bersifat anisotropik (tidak sama ke semua arah). Aliran fluida mudah mengalir dalam arah yang sejajar bidang sirip tetapi sulit atau tidak dapat mengalir dalam arah tegak lurus bidang sirip. Dengan demikian pendekatan media berpori memiliki kendala terkait sifat anisotropik penukar panas pipa bersirip.

Dalam penelitian terdahulu [1] telah dikembangkan metode untuk menganalisis penukar panas pipa bersirip dengan komputer sederhana (sumber daya terbatas), namun terdapat asumsi dalam metode tersebut yang dapat dikembangkan lanjut sehingga ketelitian metode tsb dapat ditingkatkan. Atas dasar tersebut, telah dilakukan pengembangan lanjut metode pemanfaatan paket CFD untuk menganalisis penukar panas pipa bersirip skala industri pada komputer berkapasitas terbatas.

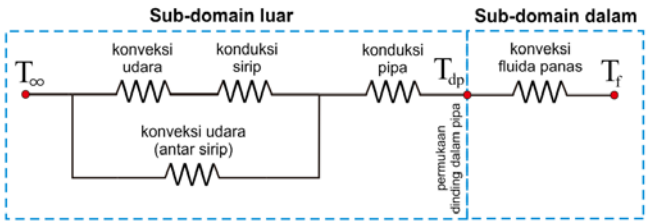
2 Metodologi

2.1 Metode Terdahulu: "Sub-Domain Seri"

Prinsip dasar metode ini telah dipublikasikan sebelumnya [1]. Pada dasarnya domain perhitungan penukar panas pipa bersirip dibagi menjadi dua sub-domain yang membentuk rangkaian termal seri. Analisis CFD juga dilakukan dalam dua tahap pada kedua buah sub-domain tersebut, yaitu:

I. sub-domain antara udara pendingin sampai dengan permukaan dalam pipa pendingin (sub-domain luar) yang digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan panas keseluruhan, U, antara aliran udara pendingin di celah-celah antara sirip penukar panas dan permukaan dalam dinding pipa penukar panas,
II. sub-domain antara permukaan dalam pipa pendingin sampai dengan fluida panas yang akan didinginkan (sub-domain dalam) yang digunakan untuk menghitung medan kecepatan dan temperatur aliran gas di dalam pipa penukar panas.

Gambar 1 memperlihatkan rangkaian termal seri yang dibentuk oleh sub-domain luar dan sub-domain dalam.



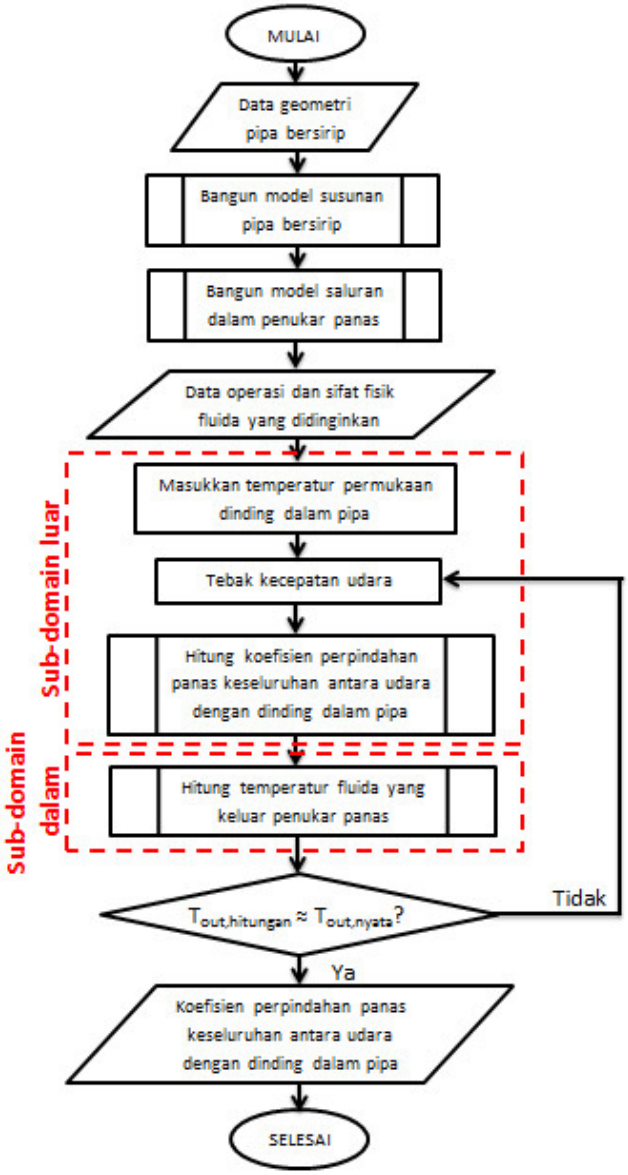
Gambar 1. Rangkaian termal seri pada domain perhitungan penukar panas pipa bersirip.

Dalam Gambar 1, T_∞ adalah temperatur udara pendingin, T_{dp} adalah temperatur permukaan dalam pipa pendingin, dan T_f adalah temperatur fluida yang didinginkan.

Beberapa anggapan atau asumsi yang digunakan pada metode ini adalah:

a. temperatur permukaan dalam pipa pendingin (T_{dp}) dianggap seragam pada setiap baris pipa, misalkan penukar panas dengan empat baris pipa, maka ada empat nilai T_{dp} berbeda, satu nilai untuk masing-masing baris pipa,
b. nilai U dianggap seragam untuk seluruh barisan pipa yang ada, karena U dianggap fungsi lemah temperatur. Nilai U dihitung atas basis beda temperatur $T_{dp} - T_\infty$.

Kedua tahap analisis CFD dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial secara terpisah dan iteratif. Nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan yang diperoleh dari analisis CFD tahap pertama digunakan pada analisis CFD tahap kedua, sedangkan distribusi temperatur dinding dalam pipa penukar panas yang didapat dari analisis CFD tahap kedua digunakan pada analisis CFD tahap pertama. Dengan demikian secara keseluruhan diperoleh sebuah *loop* proses perhitungan yang harus dilakukan secara iteratif sampai memenuhi kriteria konvergensi yang telah ditentukan sebelumnya. Proses iterasi dalam *loop* antar kedua tahap analisis CFD dilakukan secara manual. Diagram alir metodologi perhitungan U untuk metode "*Sub-Domain Seri*" ditunjukkan pada Gambar 2.

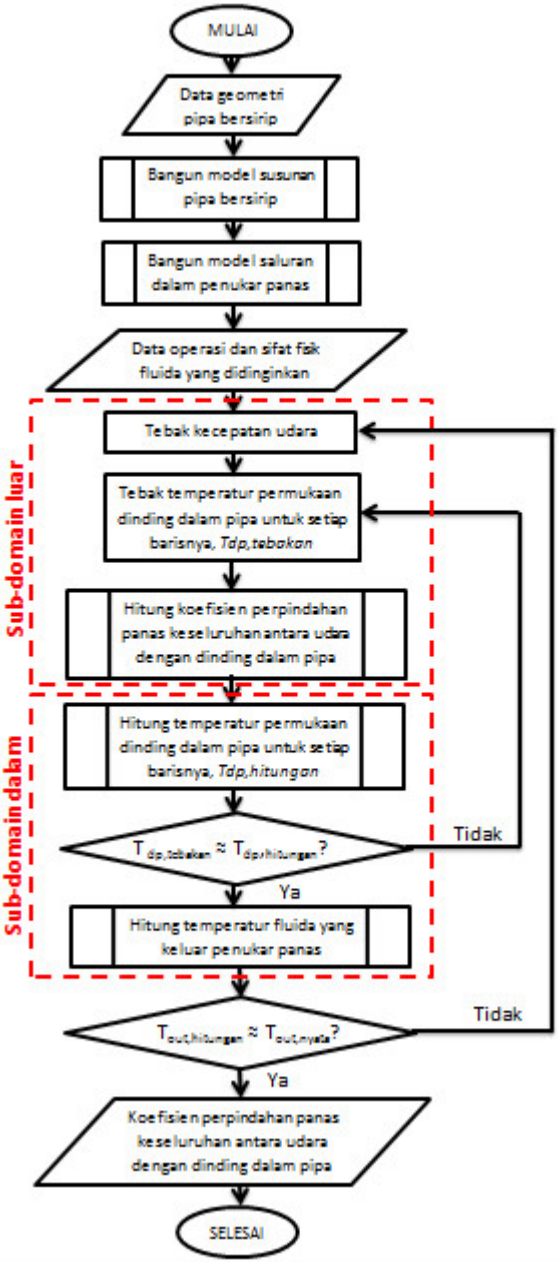


Gambar 2. Diagram alir perhitungan U untuk metode "*Sub-Domain Seri*".

2.2 Pengembangan Lanjut: Metode "Sub-Domain Seri Termodifikasi"

Secara prinsip, metode ini hampir sama dengan metode "*Sub-Domain Seri*". Perbedaan antara kedua metode ini terletak pada asumsi yang digunakan dalam perhitungan termal penukar panas. Dalam metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*", perbaikan asumsi dilakukan melalui pemutahiran nilai temperatur permukaan dinding dalam setiap baris pipa pada *loop* iterasi. Nilai T_{dp} pada metode ini tidak lagi dianggap sama untuk semua baris pipa yang ada seperti pada

metode "*Sub-Domain Seri*" melainkan setiap baris pipa memiliki nilai T_{dp} masing-masing. Diagram alir perhitungan U dengan metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" diperlihatkan pada Gambar 3.

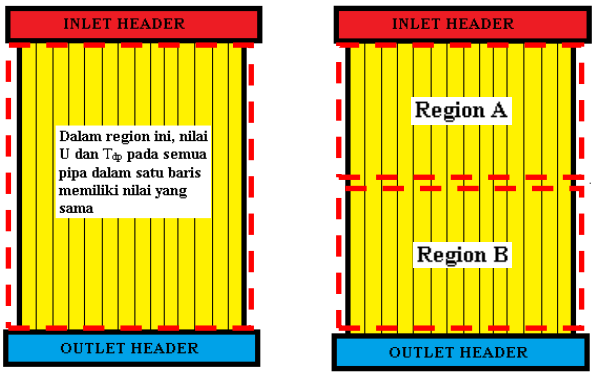


Gambar 3. Diagram alir perhitungan U untuk metode "*Sub-Domain Seri*".

2.3 Pengembangan Terkini: Metode "Sub-Domain Seri Paralel"

Metode ini merupakan pengembangan lanjut terhadap metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*". Pada metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*", diasumsikan bahwa U dan T_{dp} memiliki nilai yang sama pada setiap pipa dalam baris yang sama. Asumsi ini berlaku untuk seluruh region. Region adalah kumpulan barisan pipa yang merupakan bagian domain perhitungan. Pada metode "*Sub-Domain Seri Paralel*", domain perhitungan dibagi menjadi beberapa bagian. Metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" yang dibahas dalam makalah ini terdiri dari dua bagian, yaitu region A dan region B. Skema domain perhitungan metode ini dapat dilihat pada Gambar 4. Secara umum, pipa-pipa dalam region A dan B memiliki nilai U dan T_{dp} yang berbeda walaupun dalam satu baris.

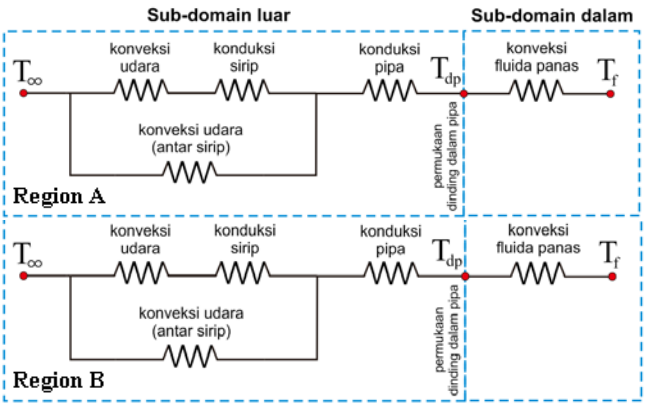
Asumsi bahwa nilai U dan T_{dp} seragam pada semua pipa dalam baris yang sama hanya merupakan pendekatan dan mungkin tidak dapat diterima untuk perhitungan yang teliti. Pembagian region bertujuan untuk memperkecil terjadinya kesalahan akibat ketidakakuratan asumsi ini.



Gambar 4. Skema pembagian region pada metode "*Sub-Domain Seri Paralel*"

Pembagian domain perhitungan menjadi region A dan B menyebabkan munculnya beberapa notasi untuk menyatakan nilai U dan T, masing-masing dalam bentuk umum U_{ij} dan T_{ij} dengan indeks i bernilai A, B, C, … yang menyatakan nama region terkait dan indeks j bernilai 1, 2, 3, … yang menyatakan nomor baris pipa. Sebagai contoh, koefisien perpindahan panas keseluruhan dan temperatur permukaan dalam dinding pipa baris pertama di region A berturut-turut dinyatakan dengan U_{A1} dan T_{A1}.

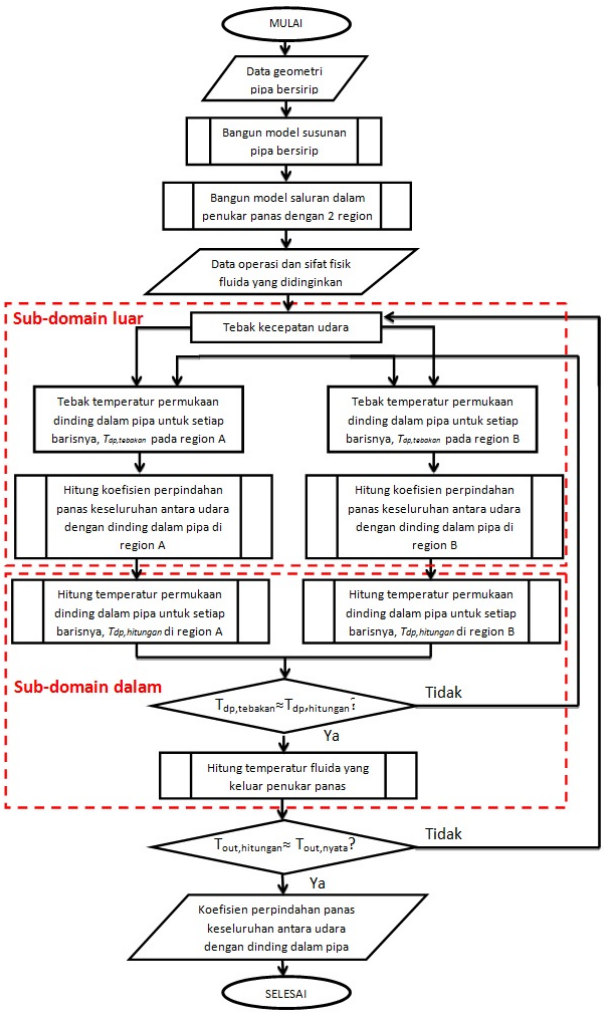
Untuk contoh kasus dalam makalah ini, domain perhitungan dibagi menjadi dua region (region A dan B) sehingga rangkaian termal pada metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" merupakan dua rangkaian termal metode "*Sub-Domain Seri*" yang dihubungkan secara paralel seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian termal metode "*Sub-Domain Seri Paralel*"

Diagram alir perhitungan nilai U kedua region dalam

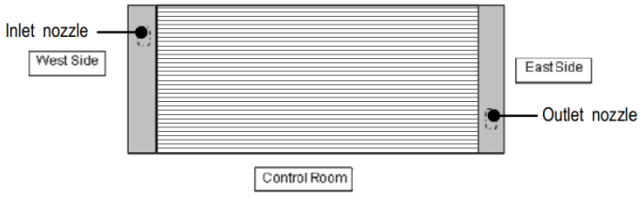
metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" mirip beberapa diagram alir metode "*Sub-Domain Seri*" yang digabungkan secara paralel seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alir perhitungan U dengan metode "*Sub-Domain Seri Paralel*".

3 Contoh Kasus

Sebagai contoh kasus, akan dianalisis penukar panas pipa bersirip satu laluan yang memiliki 398 pipa bersirip dengan diameter 5/8" x 16 *BWG* dan panjang 1110 cm yang tersusun dalam 4 barisan, yaitu: baris ke-1 (teratas) sampai dengan baris ke-4 (terbawah). Pipa-pipa pendingin tersebut tersusun dalam konfigurasi segitiga berseling dengan *pitch* 38,1 mm. Sketsa tampak atas penukar panas pipa bersirip disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Tampak atas penukar panas pipa bersirip

Pipa-pipa penukar panas memiliki sirip aluminium berbentuk lingkaran kontinu (helikal) dengan diameter luar 37 mm dan kerapatan sirip 4,3 sirip/cm. Sirip dipasang pada pipa penukar panas dengan tumpuan *overlapped*-L.

Kedua ujung setiap pipa penukar panas terhubung dengan *header*, satu ujung pipa terhubung dengan *header* masuk dan ujung lainnya terhubung dengan *header* keluar. Masing-masing *header* berbentuk balok dengan ukuran dalam 90 x 133 x 3.772 mm. Nosel masuk dan keluar *header* memiliki fitting dengan pipa berukuran 8" dan terletak di bawah *header*.

Penukar panas dipasang mendatar dan memiliki dua kipas angin listrik di bawah barisan pipa penukar panas ke-4 serta membangkitkan aliran udara pendingin ke arah atas. Penukar panas digunakan untuk mendinginkan gas alam dari temperatur 409,7 K dengan tekanan *gage* 4,86 MPa ke temperatur 328,3 K. Sifat fisik gas alam dan kondisi operasi penukar panas diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisik dan data operasi gas

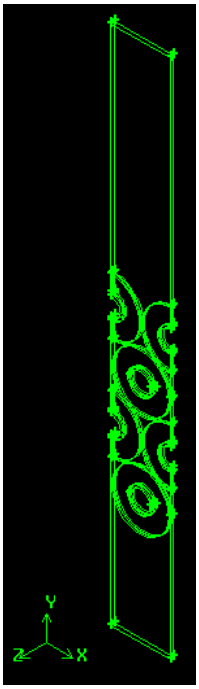
Sifat/Data Operasi	Simbol	Nilai	Satuan
Konduktivitas termal	κ	0,0363	W/m.K
Viskositas dinamika	μ	$1{,}377\times10^{-5}$	N/m^2s
Densitas massa	ρ	53,9	kg/m^3
Panas jenis isobarik	c_p	2,386	kJ/kg.K
Temperatur masuk	T_{in}	409,7	K
Temperatur keluar	T_{out}	328,3	K
Tekanan gage masuk	p_{in}	4,86	MPa
Laju alir massa	m	11,78	kg/s

Sub-domain luar perhitungan yang meliputi susunan pipa bersirip selebar *pitch* pipa diperlihatkan pada Gambar 8. Syarat batas yang diterapkan pada sub-domain luar disajikan pada Tabel 2. Orientasi arah kiri, kanan, depan, dan belakang dalam Tabel 2 mengacu pada pandangan dari arah sumbu Z positif.

Tabel 2. Syarat batas sub-domain luar

No	Daerah Batas	Jenis Syarat Batas
1	Bidang kiri/kanan udara	*Periodic BC*
2	Bidang kiri/kanan sirip	*Periodic BC*
3	Permukaan dalam potongan pipa kiri/kanan	*Wall BC* dengan temperatur konstan
4	Bidang bawah/*upstream* udara	*Velocity inlet BC*
5	Bidang atas/*downstream* udara	*Outflow BC*
6	Seluruh permukaan depan /belakang domain perhitungan	*Periodic BC*

Sub-domain dalam yang merupakan domain perhitungan berbagai medan aliran gas alam meliputi seluruh volume pedalaman penukar panas (sisi campuran gas), yang terdiri dari volume dalam *header* masuk dan keluar serta pipa-pipa penukar panas, yaitu bagian dalam seluruh komponen pada Gambar 7. Syarat batas yang digunakan pada *sub-domain dalam* disajikan pada Tabel 3.



Gambar 8. Sub-domain luar.

Tabel 3. Syarat batas sub-domain dalam

No	Daerah Batas	Jenis Syarat Batas
1	Penampang saluran masuk *header*	*Mass Flow Inlet BC*
2	Antar muka dengan dinding dalam *header*	*Wall BC:* konduksi pada dinding *header*
3	Antar muka dengan dinding pipa bersirip	*Wall BC*: perpindahan panas gabungan pada dinding pipa bersirip
4	Penampang saluran keluar *header*	*Outflow BC*

Dengan adanya data yang tersedia di atas, maka analisis CFD pada penukar panas jenis pipa bersirip ini dapat dilakukan. Kasus ini ditangani menggunakan paket FLUENT versi 6.3.26 dengan menerapkan ketiga metode yang telah telah dikembangkan, yaitu metode "*Sub-Domain Seri*", "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*", dan "*Sub-Domain Seri Paralel*".

4 Hasil Perhitungan dan Diskusi

4.1 Perbandingan Jumlah Elemen dalam Analisis Penukar Panas Pipa Bersirip

Analisis penukar panas pipa bersirip menggunakan dua sub-domain, yaitu sub-domain dalam dan sub-domain luar. Sub-domain luar terdiri dari 181.280 elemen grid CFD dan sub-domain dalam terdiri dari 624.792 elemen grid CFD dengan panjang domain 11.100 mm. Sub-domain luar mewakili 4 baris jajaran pipa, yang secara keseluruhan meliputi 398 pipa. Jika analisis penukar panas pipa bersirip yang diuraikan dalam Bagian 3 dilakukan dengan meliputi seluruh domain perhitungan, maka dapat diperkirakan jumlah elemen yang akan terlibat sebanyak 124.505.370.000 elemen grid CFD. Jumlah ini merupakan jumlah yang sangat banyak, berkisar antara 125-ribu sampai 150-ribu kali jumlah elemen grid CFD bila perhitungan dilakukan dengan metode yang dikembangkan. Untuk menyelesaikan analisis CFD dengan melibatkan elemen sebanyak itu memerlukan sumber daya komputer yang sangat besar.

Di sisi lain, analisis contoh kasus yang dilakukan dengan metode "*Sub-Domain Seri*" atau "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" hanya melibatkan dalam analisis 806.072 elemen grid CFD dan analisis yang dilakukan dengan metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" melibatkan 987.352 elemen grid. Dengan demikian ketiga metode yang dikembangkan sangat efektif dalam memperkecil kebutuhan sumber daya komputer yang diperlukan.

4.2 Perbandingan Nilai Temperatur Rata-Rata Permukaan Dalam Dinding Pipa

Tabel 4 memperlihatkan nilai temperatur rata-rata permukaan dalam dinding pipa yang didapatkan dari analisis CFD dengan ketiga metode yang telah dikembangkan.

Tabel 4. Perbandingan nilai T_{dp}

Metode	Tdp [K]		Baris 1	Baris 2	Baris 3	Baris 4
"Sub-domain seri"	Data masukan		369.00	369.00	369.00	369.00
	Hasil	maksimum	405.81	403.65	399.90	395.89
		minimum	312.40	303.47	300.42	300.25
		rata-rata	368.50	350.99	330.18	320.89
"Sub-domain seri termodifikasi"	Data masukan		358.07	348.65	337.22	326.76
	Hasil	maksimum	404.62	403.38	401.62	398.43
		minimum	306.00	302.80	300.83	300.44
		rata-rata	358.07	348.65	337.22	326.76
"Sub-domain seri paralel"	Region A	maksimum	404.64	403.57	400.79	396.43
		minimum	328.08	317.52	308.69	306.88
		rata-rata	375.74	365.62	352.07	339.26
	Region B	maksimum	371.07	359.33	342.26	328.49
		minimum	308.64	304.45	301.76	301.35
		rata-rata	342.57	332.76	322.62	314.46

Seperti telah disampaikan sebelumnya, metode "*Sub-Domain Seri*" menggunakan asumsi bahwa temperatur permukaan dinding dalam pipa T_{dp} seragam untuk seluruh barisan pipa yang ada, sedangkan metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" menganggap nilai T_{dp} seragam hanya dalam satu jajaran baris pipa. Nilai T_{dp} pada baris yang berbeda pada umumnya tidak sama. Dalam Tabel 4 data masukan T_{dp} pada metode "*Sub-Domain Seri*" merupakan satu harga yang diasumsikan di awal perhitungan dan tidak dimutahirkan selama iterasi. Sedangkan data masukan T_{dp} pada metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" merupakan nilai yang ditebak pada setiap pemutahiran nilai T_{dp} dalam *loop* iterasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" menerapkan pemutahiran nilai T_{dp} setiap region dalam *loop* iterasi perhitungan. Dari perbandingan beda antara nilai T_{dp} tebakan dan kisaran T_{dp} hasil perhitungan yang didapat, jelas terlihat bahwa asumsi yang digunakan

pada metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" paling akurat, sedangkan yang digunakan pada metode "*Sub-Domain Seri*" paling tidak akurat.

4.3 Perbandingan Nilai U Permukaan Pipa

Tabel 5 memperlihatkan nilai U yang didapatkan dari analisis CFD dengan ketiga metode yang telah dikembangkan.

Tabel 5 Perbandingan nilai *U*

U [W/m²K]		Baris 1	Baris 2	Baris 3	Baris 4
"Sub-domain seri"		123,79	233,25	520,21	832,33
"Sub-domain seri termodifikasi"		180,60	253,03	391,43	618,84
"Sub-domain seri paralel"	Region A	156,91	231,70	380,32	620,85
	Region B	230,88	301,44	422,46	620,82

Pada Tabel 5 tampak jelas bahwa kisaran nilai U yang diperoleh dari metode "*Sub-Domain Seri*" berbeda dengan kisaran nilai U yang didapat dengan metode lainnya. Hal ini antara lain disebabkan oleh kesalahan anggapan bahwa T_{dp} seragam dan konstan yang diterapkan di metode "*Sub-Domain Seri*", sehingga menyebabkan kesalahan nilai U mengingat nilai U dikaitkan dengan beda temperatur $T_{dp} - T_{\infty}$.

Pada metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" dan "*Sub-Domain Seri Paralel*" terdapat perbedaan *U* rata-rata yang cukup besar, baik terhadap nilai *U* region A maupun B. Nilai *U* rata-rata region A dan region B pun memiliki perbedaan yang cukup besar (terutama pada baris yang semakin di atas). Ini berarti anggapan yang digunakan pada metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*" (bahwa nilai *U* seragam pada setiap baris pipa) membuat analisis CFD menjadi kurang akurat. Ini juga berarti bahwa pembagian berkas pipa menjadi region A dan region B dapat meningkatkan tingkat akurasi perhitungan nilai *U* rata-rata. Tentu saja kecenderungan peningkatan akurasi nilai *U* juga dapat diharapkan melalui pembagian domain ke dalam jumlah region yang semakin banyak. Namun demikian, di sisi lain penambahan jumlah region akan diikuti dengan meningkatnya kesukaran dalam pelaksanaan perhitungan. Dengan memperhatikan dampak dari penambahan jumlah region perhitungan terhadap peningkatan akurasi perhitungan dan kesukaran pelaksanaan perhitungan, patut diduga ada suatu jumlah region yang dapat dianggap optimal. Jumlah region optimal tersebut tengah diteliti lebih lanjut oleh tim penulis.

5. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan penting yang didapat dari penelitian dalam makalah ini, antara lain:

1. Dengan adanya metode pemisahan domain (sub-domain luar dan sub-domain dalam), perhitungan CFD pada penukar panas pipa bersirip dapat dilakukan dengan menggunakan komputer berkapasitas terbatas, karena analisis CFD sub-domain luar dapat dilakukan pada beberapa pipa bersirip saja yang melibatkan sedikit elemen grid. Penghematan daya komputasi yang dapat diharapkan juga cukup besar. Pada perhitungan numerik volume proses perhitungan sebanding dengan jumlah elemen dipangkatkan suatu faktor tertentu (yang lebih besar dari satu).
2. Anggapan yang diterapkan pada metode "*Sub-Domain Seri*" menyebabkan hasil yang didapat menjadi kurang akurat. Hal ini ditunjukkan oleh perbedaan nilai U dan T_{dp} yang jauh dari hasil perhitungan dengan kedua metode lainnya.
3. Anggapan pada metode "*Sub-Domain Seri Termodifikasi*", bahwa U dan T_{dp} di setiap baris pipa memiliki nilai yang sama, menyebabkan hasil perhitungan menjadi kurang akurat. Hal ini dibuktikan oleh variasi nilai U dan T_{dp} yang cukup besar dari hasil perhitungan dengan metode "*Sub-Domain Seri Paralel*". Dengan demikian, metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" merupakan metode yang paling akurat di antara ketiga metode yang dibahas dalam makalah ini.
4. Hasil analisis CFD pada penukar panas pipa bersirip dengan menggunakan metode "*Sub-Domain Seri Paralel*" mengindikasikan bahwa pembagian berkas pipa menjadi beberapa region berpengaruh dalam meningkatkan akurasi perhitungan, sehingga dapat diperkirakan bahwa pembagian berkas pipa menjadi lebih dari dua bagian akan memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat.

6 Ucapan Terima kasih

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB atas dana yang diberikan guna keikutsertaan dalam SNTTM XI.

7 Referensi

1. Tandian, N.P. & Wiryolukito, S., Penerapan Analisis CFD untuk Memperkirakan Kondensasi pada Pendingin Lanjut Jenis Pipa Bersirip, *Proceedings SNTTM X*, Univ. Brawijaya, Malang, KE-026, (2011).
2. Susanto, A.D., *Pemanfaatan CFD dalam Studi Aliran Gas dan Usaha Pengurangan Daerah Kondensasi pada Penukar Panas Berpendingin Udara*, Tugas Sarjana, FTMD-ITB, Bandung, (2012).