



TUGAS AKHIR - TM091486

STUDI NUMERIK PENGARUH PANJANG
RECTANGULAR *OBSTACLE* TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN
PANAS PADA *STAGGERED TUBE BANKS*

HASTAMA ARINTA FANNY
NRP. 2111 106 033

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



TUGAS AKHIR - TM091486

**STUDI NUMERIK PENGARUH PANJANG
RECTANGULAR *OBSTACLE* TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN
PANAS PADA *STAGGERED TUBE BANKS***

HASTAMA ARINTA FANNY
NRP. 2111 106 033

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM091486

NUMERICAL STUDY EFFECT OBSTACLE OF THE CHARACTERISTICS FLOW AND HEAT TRANSFER ON STAGGERED TUBE BANKS

HASTAMA ARINTA FANNY
NRP. 2111 106 033

Advisor
Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM091486

NUMERICAL STUDY EFFECT OBSTACLE OF THE CHARACTERISTICS FLOW AND HEAT TRANSFER ON STAGGERED TUBE BANKS

HASTAMA ARINTA FANNY
NRP. 2111 106 033

Advisor
Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014



**STUDI NUMERIK PENGARUH PANJANG
RECTANGULAR *OBSTACLE* TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
PADA *STAGGERED TUBE BANKS***

Nama : Hastama Arinta Fanny
NRP : 21.11.106.033
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRAK

Alat penukar panas merupakan komponen yang sangat penting dari banyak proses industri dan peralatan yang meliputi berbagai aplikasi teknik. Meningkatkan kesadaran untuk pemanfaatan sumber daya energi yang efektif, meminimalkan biaya operasional dan pemeliharaan operasi murah telah menyebabkan perkembangan dari alat penukar panas yang efisien seperti alat penukar panas kompak. Performa alat penukar panas kompak bergantung pada pola permukaan fin, yakni plain fins dan wavy fins. Permukaan wavy fin membuat karakteristik aliran berubah sehingga terjadi peningkatan untuk perpindahan panas. Upaya lain untuk meningkatkan proses perpindahan panas pada plain fins adalah penambahan obstacle pada permukaannya. Performa alat penukar panas dengan obstacle dapat diketahui dengan menganalisa pola aliran dan perpindahan panas yang terjadi.

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik berbantuan software Fluent 6.3.26. Simulasi ini dikondisikan dengan menggunakan model 2D-steady flow, turbulensi k-ε RNG dan metode second-order upwind scheme. Pada penelitian ini divariasikan panjang rectangular obstacle, yaitu 1,6mm, 2,5mm, dan 5mm yang membentuk sudut 135°, diukur dari stagnation point pada staggered tube bank. Fluida kerja yang digunakan adalah udara sebagai gas ideal yang mengalir melintas celah



antara tube dengan temperatur inlet 310 K dan temperatur tubes konstan sebesar 347 K.

Dari hasil simulasi ini didapatkan visualisasi kontur kecepatan, temperatur dan visualisasi pola aliran yang terbentuk serta pembuktian hipotesa bahwa dengan penambahan obstacle akan meningkatkan perpindahan panas. Penambahan obstacle dapat mengakibatkan peningkatan *pressure drop*, sebesar 60-425%. Selain itu, model modified juga akan meningkatkan nilai Nusselt number sebesar 10,3-31% terhadap model baseline (tanpa penambahan obstacle).

Kata Kunci : *Rectangular Obstacle, Reynolds Number, Staggered Tube Banks.*



NUMERICAL STUDY OF EFFECT OBSTACLE OF THE CHARACTERISTICS FLOW AND HEAT TRANSFER ON STAGGERED TUBE BANKS

Student Name : Hastama Arinta Fanny
NRP : 2111 106 033
Department : Mechanical Engineering FTI - ITS
Advisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

Abstract

Heat exchanger is a very important component of many industrial processes and equipment which covers a wide range of engineering applications. Raising awareness for the utilization of energy resources effectively, minimizing operating costs and low maintenance operation has led to the development of an efficient heat exchanger such as a compact heat exchanger. Performance compact heat exchanger depends on the fin surface patterns, such as plain fins and wavy fins. A wavy fin surface changes flow characteristics so that an increase to the heat transfer. In addition to changing the pattern of fin surface, another attempt to maximize the heat transfer process on plain fins can also be formed by the addition of obstacle on its surface.

This research was using numerical simulation method based on 6.3.26 fluent software. This simulation was conditioned by using turbulent models $k-\epsilon$ RNG and second-order upwind scheme methods. In this study, the length of the rectangular obstacle is varied, 1,6mm, 2,5mm, 5mm which makes an angle of 150° , measured from the stagnation point on staggered tube banks. The air that used by this simulation will be conditioned as ideal gasses which flows through the fins and the inlet temperature is 310 K and for tube temperature were settled 347 K..



From the simulation results obtained contour visualization speed, temperature and flow pattern visualization and verification that formed the hypothesis that the addition of obstacle will increase heat transfer. Addition obstacle can lead to increased pressure drop, by 60-425%. In addition, the modified models will also increase the value of Nusselt number of 10,3 to 31% of the baseline model (without the addition of obstacle).

Keyword : Rectangular Obstacle, Reynolds Number, Staggered Tube Banks.


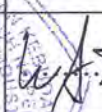
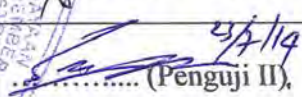
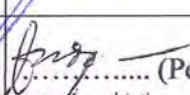
**STUDI NUMERIK PENGARUH PANJANG
RECTANGULAR OBSTACLE TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
PADA STAGGERED TUBE BANKS**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Bidang Studi Konversi Energi Program
Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

HASTAMA ARINTA FANNY
NRP. 21.11.106.033

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :	
1. <u>Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.</u> (NIP.196505051990031005)	 (Pembimbing)
2. <u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT</u> (NIP.197104051997021001)	 (Penguji I)
3. <u>Dr. Ir. Atok Setiawan, MSc.</u> (NIP.196604021969031002)	 (Penguji II), 23/7/14
4. <u>Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W., MSc.</u> (NIP.195312191981031001)	 (Penguji III) 23/07 '14

**SURABAYA
JULI 2014**

halaman ini sengaja dikosongkan



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu mengarahkan dan memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.
2. Abah Partono dan Ibu Sri Nuryati yang selama ini mendukung penulis dalam proses belajar baik dukungan moril, materil dan spiritual.
3. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT. Selaku dosen wali yang telah memberi bimbingannya selama kuliah di Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT, Bapak Dr. Ir. Budi Utomo KW, Msc, dan Bapak Dr. Ir Atok Setiawan, selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
5. Rekan satu tim tugas akhir penulis yaitu Rizki Anggiansyah, Rizza Ramadhi yang selalu memberikan dukungan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman-teman LJ 2011/2012 genap, terima kasih atas bantuan dan dukungannya selama ini. Semoga kita semua tidak lupa satu sama lain setelah keluar dari jurusan kita tercinta.
7. Rekan-rekan Alumni D3 Teknik Mesin ITS yang selalu memberikan dukungan dan semangat juang yang tinggi.



8. Rekan-rekan kontrakan Smolowaru Indah yaitu Ipunk, Tiar, Godek, Lawonk, Solie, Lukito, Junaedi yang selalu menjadi rekan belajar dan bermain selama ini.
9. Teman satu kos TMB 128 yang senantiasa saling membantu selama penulis di Surabaya.
10. Seluruh Dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS,
11. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
12. Martha Indah Hadiyani yang selalu menemani, memberikan semangat dan motivasinya setiap detik.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2014

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah.....	5
1.3. Batasan Masalah.....	5
1.4. Tujuan Penelitian.....	6
1.5. Manfaat Hasil Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Alat Penukar Kalor	9
2.2. Alat Penukar Kalor Kompak	10
2.3. Aliran Fluida Melintasi Tube Banks	11
2.4. Kays and London Model	15
2.5. Konveksi Aliran Melintasi Silinder Tunggal.....	17
2.6. Tinjauan Termodinamika.....	18
2.6.1. Sistem Refrigerasi Kompresi Uap	18
2.7. Persamaan Dasar Aliran Fluida	20
2.8. Computational Fluid Dynamics.....	21
2.8.1. Struktur Program CFD.....	21
2.8.2. Tahapan Kerja dalam CFD	21
2.9. Grid Independency	22
2.10. Penelitian Terdahulu.....	23
BAB III METODE PENELITIAN	33
3.1. Preprocessing.....	33
3.1.1. Pembuatan Model	33
3.1.2. Pembuatan Meshing.....	35
3.1.3. Variabel Penelitian.....	36
3.2. Processing.....	36



3.2.1. Pemilihan Solver.....	36
3.2.2. Pemilihan Turbulence Modelling	36
3.2.3. Pemilihan Operation Condition	36
3.2.4. Penentuan Boundary Condition.....	37
3.2.5. Solving.....	38
3.2.5.1. Solve Metode.....	38
3.2.5.2. Initialize.....	38
3.2.5.3. Iterasi	38
3.3. Grid Independency	39
3.4. Post Processing.....	41
3.5. Flowchart Penelitian.....	42
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Analisa Pola Aliran Terhadap Variasi Panjang Rectangular Obstacle.....	43
4.1.1. Model Baseline (Tanpa Penambahan Obstacle).....	44
4.1.2. Model Modified (Dengan Penambahan Obstacle) ...	45
4.2. Pengaruh Variasi Panjang Obstacle.....	48
4.2.1. Kontur Kecepatan.....	48
4.2.1.1. Model Baseline (Tanpa Penambahan Obstacle).....	49
4.2.1.2. Model Modified (Dengan Penambahan Obstacle).....	50
4.2.2. Kontur Temperatur	50
4.2.2.1. Model Baseline (Tanpa Penambahan Obstacle).....	51
4.2.2.2. Model Modified (Dengan Penambahan Obstacle).....	52
4.3. Analisa Karakteristik Perpindahan Panas Pengaruh Penambahan Obstacle Pada Tiap Baris Tube	54
4.3.1. Kecepatan Lokal Tube Model Baseline	54
4.3.2. Kecepatan Lokal Tube Model Modified	55
4.3.3. Nusselt Number Lokal Tube Model Baseline	57
4.3.4. Nusselt Number Lokal Tube Model Baseline	59
4.3.5. Nusselt Number Rata-Rata.....	62



BAB V PENUTUP	65
5.1. Kesimpulan.....	65
5.2. Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN.....	69
RIWAYAT PENULIS	89



halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Konstanta dari Persamaan 2.1 untuk Aliran Udara Melintasi Staggered Tube Banks 11

Tabel 2.2. Faktor Koreksi C_2 untuk Persamaan 2.1 untuk Staggered Tubes dengan $N_L < 10$ 11

Tabel 2.3. Kisaran Kenaikan Koefisien Perpindahan Panas Terhadap Variasi Sudut 19

Tabel 2.4. Kisaran Kenaikan Koefisien Perpindahan Panas Terhadap Variasi Jumlah RWP 19

Tabel 3.1. Geometri Compact Heat Exchanger Tipe Straight Fin Circular Tube 28

Tabel 3.2. Boundary Condition Straight Fin Circular Tube 31

Tabel 3.3. Properties Udara 31

Tabel 3.4. Skema Grid Independensi Pada Baseline 33

Tabel 3.5. Nilai Nu Avg Model Baseline 33

Tabel 4.1. Kisaran Kenaikan Nusselt Number Lokal Tube Akibat Adanya Penambahan Obstacle 53

Tabel 4.2. Kisaran Kenaikan Nusselt Number Rata-Rata Tube Akibat Adanya Penambahan Obstacle 55

Tabel 4.2. Kisaran Kenaikan Pressure Drop Akibat Adanya Penambahan Obstacle 55



halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Compact Heat Exchanger 2

Gambar 1.2 Macam-macam Tipe Permukaan Fin, (a) Plain Fin
(b) Wavy Fin..... 2

Gambar 1.3 Compact Heat Exchanger, (a) circular tubes,
continuous plate fins.(b) circular tube, wavy fins.
(c) circullar tube, circular fins..... 3

Gambar 2.1 Alat penukar panas kondensor air conditioner 7

Gambar 2.2 Compact Heat Exchanger 8

Gambar 2.3 Jenis-jenis Susunan Tube, (a) Aligned,
(b) Staggered..... 9

Gambar 2.4 Kondisi Aliran Fluida pada Tube Banks (a) Aligned
dan (b) Staggered 9

Gambar 2.5 Perpindahan Kalor dan Faktor Gesekan Untuk
Penukar Kalor (a) Circullar Tube-Continuous Fin,
(b) Circullar Tube-Circullar Fin dari Kays and
London..... 14

Gambar 2.6 Distribusi Nusselt Lokal Pada Silinder..... 14

Gambar 2.7 Gambar skema dari Sistem Refrigerasi Kompresi
Uap..... 15

Gambar 2.8 Skema Representasi Dari Siklus Refrigerasi
Termasuk Perubahan Tekanan..... 15



- Gambar 2.9 Gaya-Gaya Pada Partikel-Partikel Disetiap Elemen Fluida 16
- Gambar 2.10 Variasi dari Nilai Nusselt Number Terhadap Perbedaan Grid Number 18
- Gambar 2.11 Variasi (a) Attack Angle dan (b) Jumlah RWPs yang Terpasang Pada Section Area..... 20
- Gambar 2.12 Perbandingan Antara Nilai Reynolds Number Terhadap Koefisien Konveksi, (a) Berdasarkan Sudut Kemiringan RWPs, (b) Berdasarkan Jumlah RWPs yang Terpasang, (c) dan Berdasarkan Susunan Rectangular..... 20
- Gambar 2.13 Karakteristik Aliran Berdasarkan Distribusi Temperatur, (a) Berdasarkan Sudut Kemiringan RWPs, (b) Berdasarkan Jumlah RWPs yang terpasang, (c) dan Berdasarkan Susunan Rectangular Winglet Pairs (RWPs)..... 21
- Gambar 2.14 (a) Domain Computational (kiri), Geometri Oval Tube dan LVGs, (b) Perbedaan Konfigurasi untuk 3 Baris Tube dengan LVGs (atas(A)) dan Tanpa LVGs (bawah(B)) 23
- Gambar 2.15 Perbandingan Antara Nu_{AV} dan Re untuk Baseline Case (tanpa LVGs) dan Modified Case (dengan LVGs) 23
- Gambar 2.16 Karakteristik Aliran Berdasarkan Distribusi Temperatur pada Baseline Case (tanpa LVGs), $\alpha = 30^\circ$, dan $\alpha = 45^\circ$ 23



Gambar 2.17 Dimensi dari Winglet Vortex Genertaor terhadap posisi Oval Tube (a) Pandangan Atas dari LVGs dan Oval Tube, (b) Pandangan Samping dari LVGs ..	24
Gambar 2.18 Pengaruh Attack Angle (a) Terhadap nilai Nu_{AV} (b) terhadap friction Factor	24
Gambar 2.19 Perbedaan Meshing untuk 4 Baris Tube tanpa CPs (atas (a)) dan dengan CPs (bawah b))	25
Gambar 2.20 Distribusi <i>Nusselt Number</i> Lokal Tube Perbandingan Antara Model Baseline (tanpa penambahan CPs) dan Model Modified (dengan penambahan CPs).....	26
Gambar 2.21 <i>Nusselt Number</i> Lokal Tube Terhadap Variasi <i>Reynold Number</i>	26
Gambar 3.1 Geometry Straight Fin Circular Tube dengan Penambahan Obstacle	28
Gambar 3.2 Meshing pada Straight Fin Circular Tube dengan penambahan Obstacle	29
Gambar 3.3 Boundary Condition pada Compact Heat Exchanger Tipe Straight Fin Circular Tube dengan Penambahan Obstacle yang berbentuk Rectangular.....	31
Gambar 3.4 Kriteria Konvergensi	32
Gambar 3.5 Flowchart Penelitian	35
Gambar 4.1 Visualisasi Pathline by Velocity Magnitude.....	37



Gambar 4.2 Visualisai Pola Aliran Baseline (a) Pola Aliran by Pathline Velocity, (b) Perbesaran untuk Daerah Separasi.....	38
Gambar 4.3 Visualisai Pola Aliran Modified Dengan $S_1/l = 12$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity, (b) Perbesaran untuk Daerah Disekitar Obstacle	39
Gambar 4.4 Visualisai Pola Aliran Modified Dengan $S_1/l = 8$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity, (b) Perbesaran untuk Daerah Disekitar Obstacle	40
Gambar 4.5 Visualisai Pola Aliran Modified Dengan $S_1/l = 4$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity, (b) Perbesaran untuk Daerah Disekitar Obstacle	41
Gambar 4.6 Visualisasi Kontur Kecepatan	42
Gambar 4.7 Visualisasi Kontur Temperatur.....	44
Gambar 4.8 Temperatur Outlet.....	45
Gambar 4.9 Temperatur Average Outlet.....	46
Gambar 4.10 Distribusi Kecepatan Lokal Tube Model Baseline (Tanpa Penambahan Obstacle)	47
Gambar 4.11 Distribusi Kecepatan Lokal Tube Perbandingan antara Model Baseline (tanpa penambahan obstacle) dan Model Modeified $S_1/l = 12$ (dengan penambahan obstacle).....	49
Gambar 4.12 Distribusi Nusselt Number Lokal Tube Model Baseline (Tanpa Penambahan Obstacle).....	50



Gambar 4.13 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal
Modified dengan Baseline Pada Baris Pertama 51

Gambar 4.14 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal
Modified dengan Baseline Pada Baris Kedua..... 52

Gambar 4.15 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal
Modified dengan Baseline Pada Baris Ketiga..... 53

Gambar 4.16 Nusselt Number Rata-Rata Lokal Tube..... 54

Gambar 4.17 Nusselt Number Rata-Rata dan Pressure Drop.... 54



halaman ini sengaja dikosongkan



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Alat penukar panas merupakan komponen yang sangat penting dari banyak proses industri dan peralatan yang meliputi berbagai aplikasi teknik. Meningkatkan kesadaran untuk pemanfaatan sumber daya energi yang efektif, meminimalkan biaya operasional dan pemeliharaan operasi murah telah menyebabkan perkembangan dari alat penukar panas yang efisien seperti alat penukar panas kompak.

Alat penukar panas banyak digunakan di berbagai industri tenaga atau industri lainnya dikarenakan mempunyai beberapa keuntungan, antara lain :

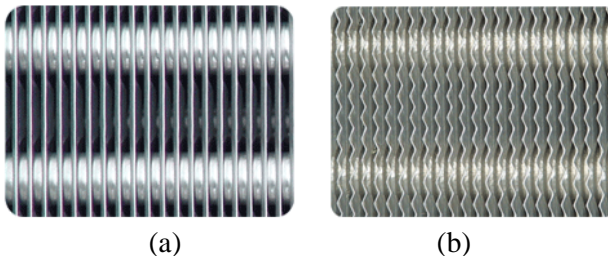
1. Konstruksi sederhana dan kokoh.
2. Biaya yang digunakan relatif murah.
3. Kemampuannya untuk bekerja pada tekanan dan temperatur yang tinggi dan tidak membutuhkan tempat yang luas.

RK Shah dalam diskusinya telah mendefinisikan "penukar panas kompak" sebagai salah satu alat penukar panas yang memiliki kepadatan luas permukaan lebih dari $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Kekompakan tersebut dicapai dengan menyediakan perpanjangan permukaan yaitu fin pada bagian aliran yang bekerja sebagai area perpindahan panas sekunder. *Compact heat exchanger* atau alat penukar panas kompak banyak digunakan di dunia industri maupun untuk keperluan sehari-hari baik untuk fluida gas dengan gas maupun gas dengan cairan, beberapa contoh penggunaannya adalah kondesor dan evaporator pada system refrigerasi dan tata udara, pendingin oli pada pesawat udara, radiator pada mesin-mesin otomotif dan lain-lain.



Gambar 1.1 Compact Heat Exchanger.
(<http://cnshenglintec.en.made-in-china.com/>)

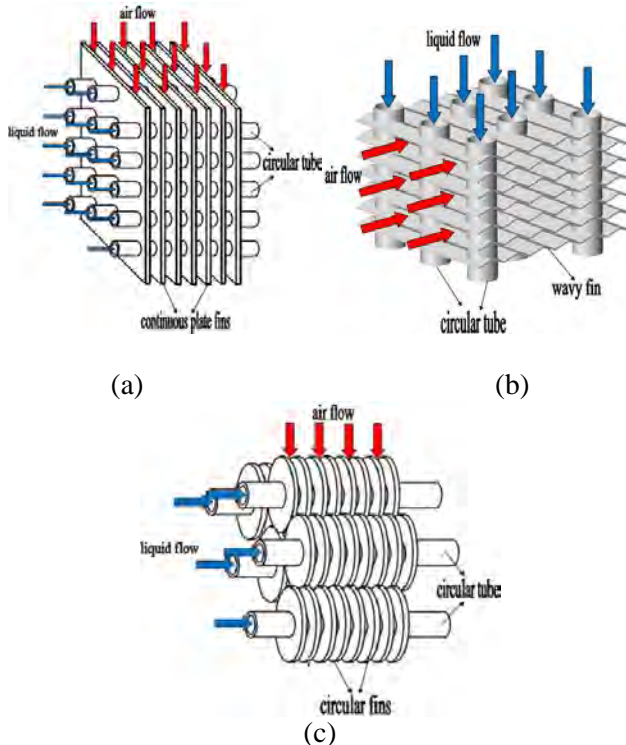
Fin (sirip) merupakan ciri khusus dari *compact heat exchanger*. Pada umumnya fluida cair mengalir sepanjang pipa dan gas mengalir pada celah diantara *fin*. Salah satu hal penting yang perlu diperhatikan dalam *heat exchanger* adalah perpindahan panasnya pada sisi udara. Untuk mendapatkan efisiensi *fin* yang tinggi perlu diperhatikan bahan dan geometri dari *fin* tersebut. Bentuk *fin* yang umum digunakan adalah *plain* (datar) dan *wavy* (bergelombang), sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 1.2 (a) dan (b).



Gambar 1.2 Macam-macam Tipe Permukaan Fin : (a) Plain Fin dan (b) Wavy Fin
(<http://www.shenglintec.com>)



Berikut ini beberapa jenis compact heat exchanger berdasarkan bentuk fin-nya



Gambar 1.3 Compact heat exchanger. (a) circular tubes, continuous plate fins. (b) circular tube, wavy fins. (c) circular tube, circular fins. (Gupta, 2010)

Seiring dengan berkembangnya jaman, *Fin and Tube heat exchanger* dituntut untuk dapat menyajikan performa yang sesuai dengan fungsi kerjanya melalui perubahan bentuk tipe permukaan *fin* ataupun modifikasi penambahan pada permukaan *fin*, seperti penambahan *Vortex Generator (VGs)* atau penambahan *obstacle*



Penelitian yang dilakukan oleh **He, dkk** (2012) tentang “*Analysis of Heat Transfer and Pressure Drop for Fin and Tube Heat Exchanger with Rectangular Winglet Type Vortex Generators*”, dengan adanya penambahan *vortex generators* menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan panas sebesar 28,8-34,5% untuk kasus 10° , 54,6-61,5% untuk kasus 20° , 83,3-89,7% untuk kasus 30° . Dan *Rectangular Winglet Pairs* (RWPs) yang terpasang juga menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan panas sebesar 22,7–25,5% untuk single-RWPs, 54,6-61,5% untuk 3-RWPs, dan 87,5–105,1% untuk 7-RWPs.

Dari penelitian **Ramadhan** (2012) tentang “*Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Over a Banks of Oval Tubes Heat Exchanger with Vortex Generators*” dapat disimpulkan, adanya penambahan *vortex generators* pada tiga baris *tube banks* yang tersusun secara *staggered* menunjukkan peningkatan overall Nu_{AV} sebesar 10-20,4% untuk kasus 30° dan 10,4–27,7% untuk kasus 45° dengan bentuk *tube oval*.

Berdasarkan Penelitian dari **Bevinhalli** (2013) tentang “*Numerical Simulation On Fin and Oval Tube Heat Exchanger With Longitudinal Vortex Generators*” dapat disimpulkan bahwa penambahan *Longitudinal Vortex Generators* (LVGs) menunjukkan peningkatan Nu_{AV} sebesar 13,6-32,9%. Bersamaan dengan itu faktor f juga meningkat sebesar 29,2-40,6%.

Berdasarkan penelitian terdahulu lainnya yang dilakukan oleh **Chairunnisa dan Prabowo** (2013) tentang “*Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CPs) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan $\ell/D = 0.25$, pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered*” dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan *Convergency Promoters* (CPs) menyebabkan adanya peningkatan temperatur, peningkatan Nusselt number rata-rata sebesar 47-63%, peningkatan nilai koefisien konveksi rata-rata sebesar 47-63%, dan perpindahan panas yang terjadi pada model *modified* lebih baik dibandingkan model *baseline*.



1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini mengkaji karakteristik aliran yang terjadi pada *Compact Heat Exchanger* tipe *straight fin circular tube* tanpa dan menggunakan *obstacle* dengan melakukan analisa secara numerik aliran dua dimensi.

Berdasarkan hal tersebut rumusan masalah yang dikaji meliputi:

1. Bagaimana pengaruh susunan tube staggered terhadap karakteristik aliran pada *straight fin circular tube* dengan menggunakan *fin* yang dimodifikasi dengan menambahkan *obstacle*?
2. Bagaimana pengaruh variasi panjang dari *obstacle* terhadap karakteristik aliran pada *straight fin circular tube*?
3. Bagaimana pengaruh variasi panjang dari *obstacle* terhadap distribusi temperatur pada *straight fin circular tube*?

Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa karakteristik aliran yang ditunjukkan dengan data kualitatif berupa distribusi kecepatan aliran dan distribusi temperatur, sedangkan data kuantitatifnya ditunjukkan dengan nilai kecepatan lokal tube, Nusselt number lokal, dan Nusselt number rata-rata pada permodelan tanpa dan dengan adanya penambahan *rectangular obstacle*.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam studi analisa Tugas Akhir ini yaitu:

1. Permodelan *straight fin circular tube* tanpa dan dengan menggunakan *obstacle* dibuat dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.2.30 dan disimulasikan dengan perangkat lunak FLUENT 6.3.26 dengan domain aliran dua dimensi.
2. Fluida kerja yang mengalir pada celah antar *fin* berupa fluida bertemperatur rendah (udara, yang dimodelkan gas



- ideal), properti konstan yang mengalir pada tube berupa fluida bertemperatur tinggi (refrigerant)
3. Kondisi operasi diasumsikan *uniform flow* pada sisi *inlet*.
 4. Perpindahan panas terjadi secara konveksi
 5. $Sl/1 \max = 4$.
 6. Posisi *obstacle* pada kemiringan 135° terhadap titik pusat tube diukur dari *stagnation point*, hal ini mengacu dari letak titik separasi pada single silinder yaitu $\pm 135^\circ$.
 7. Pada sisi *inlet* dikondisikan berupa *velocity inlet* dan *outflow* pada sisi outletnya.
 8. Penelitian ini hanya memakai 3 baris tube.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan pelaksanaan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh penambahan *obstacle* terhadap karakteristik aliran pada *straight fin circular tube*
2. Mengetahui pengaruh variasi panjang dari *obstacle* terhadap karakteristik aliran pada *straight fin circular tube*.
3. Mengetahui pengaruh variasi panjang dari *obstacle* terhadap distribusi temperatur pada *straight fin circular tube*.
4. Melakukan pembuktian hipotesa bahwa penambahan *obstacle* akan meningkatkan laju perpindahan panas yang terjadi pada permukaan fin.

1.5 Manfaat Hasil Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat pada semua pihak. Manfaat dari penilitan ini antara lain:

1. Memperkaya dan memperdalam wacana dalam bidang ilmu perpindahan panas dan massa khususnya mengenai alat penukar panas.
2. Pengetahuan terkait fenomena aliran secara analisa 2D karakteristik aliran dan perpindahan panas pada alat



penukar panas melalui visualisasi aliran dengan perangkat lunak Fluent 6.3.26

3. Memberikan kontribusi nyata pada pengembangan teknologi perancangan alat penukar panas demi terciptanya ketahanan energi nasional.



halaman ini sengaja dikosongkan



BAB II

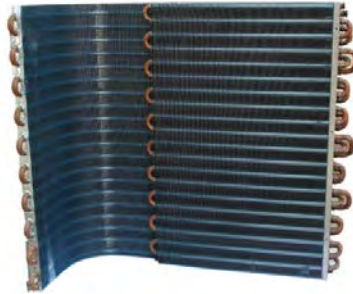
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alat Penukar Kalor

Penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah sebuah alat yang berfungsi untuk menurunkan dan atau meningkatkan temperatur sebuah sistem dengan memanfaatkan suatu media pendingin atau pemanas sehingga kalor dapat berpindah dari temperatur tinggi ke rendah. Proses perpindahan panas tersebut dapat dilakukan secara langsung maupun tidak langsung.

1. Alat penukar kalor yang langsung ialah fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu.
2. Alat penukar kalor yang tidak langsung ialah fluida panas tidak berhubungan langsung (*indirect contact*) dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panasnya itu mempunyai media perantara seperti pipa, plat atau peralatan jenis lainnya.

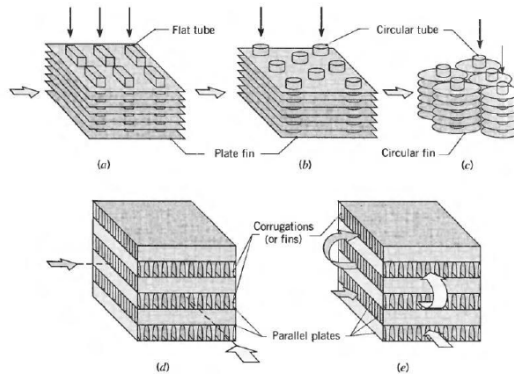
Penukar panas sangat luas dipakai dalam industri seperti kilang minyak, pabrik kimia maupun petrokimia, industri gas alam, refrigerasi, pembangkit listrik bahkan untuk penggunaan rumah tangga (*air conditioner*). Salah satu contoh sederhana dari alat penukar panas adalah kondensor pada air conditioner di mana udara memindahkan panas dari tube ke udara sekitar.



Gambar 2.1 Alat penukar panas kondensator air conditioner.
(<http://www.ecvv.com>)

2.2 Alat Penukar Kalor Kompak

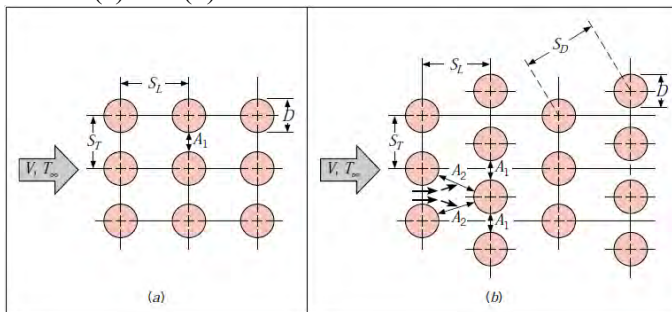
Secara bebas dapat diartikan, suatu alat penukar kalor yang memiliki luas perpindahan panas per satuan volume yang sangat besar ($> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$), alat ini mempunyai susunan dari pipa-pipa bersirip atau plat-plat bersirip yang rapat. Pipa-pipa itu bisa berupa pipa datar atau pipa bundar seperti pada Gambar 2.2a, b, dan c dan sirip-sirip itu bisa berupa plat atau melingkar seperti pada Gambar 2.2a, b, dan c. Alat penukar kalor plat paralel bisa berupa bersirip atau berlekuk-lekuk dan bisa digunakan dalam model-model operasi laluan tunggal (Gambar 2.2d) maupun laluan majemuk (Gambar 2.2e). Penukar kalor jenis ini sangat cocok untuk penerapan dalam aliran gas dengan nilai h yang rendah. Kays dan London telah mempelajari penukar kalor jenis ini secara mendalam.



Gambar 2.2 Compact Heat Exchanger. (Incropera dan DeWitt, 2002)

2.3 Aliran Fluida Melintasi Tube Banks

Berdasarkan dari tinjauan perpindahan panas, susunan tube terdiri dari dua jenis, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.3 (a) dan (b).

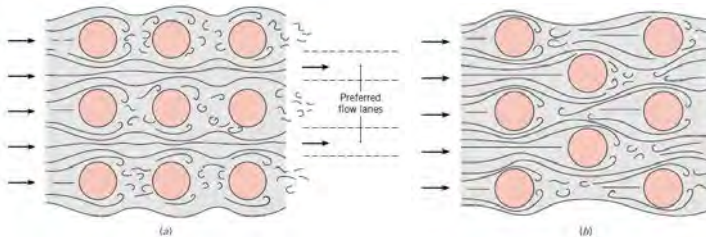


Gambar 2.3 Jenis-jenis Susunan Tube, (a) Aligned, (b) Staggered (Incropera dan DeWitt, 2002)

Dari kedua bentuk susunan tube tersebut, tentunya bentuk aliran yang terbentuk berbeda satu sama lain. dikarenakan aliran mengalir pada bagian sisi fin dan bagian sisi permukaan tube yang bersentuhan langsung dengan aliran yang mengalir tersebut.



Adapun bentuk aliran yang mengalir melintasi tube banks dapat dilihat pada gambar 2.4 (a) dan (b).



Gambar 2.4 Kondisi Aliran Fluida pada Tube Banks (a) Aligned dan (b) Staggered
(Incropera dan DeWitt, 2002)

Aliran melintasi tube pada baris pertama pada tube bank serupa dengan aliran melintasi tube tunggal secara tegak lurus. Untuk baris tube berikutnya, aliran sangat dipengaruhi oleh susunan tube. Pada susunan tube aligned, untuk baris kedua dan seterusnya telah terjadi turbulensi pada sisi upstream. Nilai koefisien konveksi sangat dipengaruhi oleh tingkat turbulensi aliran melintasi tube dan jumlah baris. Pada umumnya, koefisien konveksi akan bertambah dengan bertambahnya jumlah baris sampai kira-kira baris kelima, setelah itu hanya ada sedikit perubahan pada turbulensi dan nilai koefisien konveksi. Untuk S_T (Transversal Pitch) dan S_L (Longitudinal Pitch) yang kecil, tube pada baris pertama akan menghalangi turbulensi aliran di baris berikutnya dan heat transfer akan berkurang karena sebagian besar permukaan tube tidak akan teraliri fluida utama.

Pada umumnya, koefisien rata-rata perpindahan panas untuk tube bundle secara keseluruhan penting untuk diketahui. Untuk aliran udara yang melintasi tube bundle yang tersusun jumlah barisnya 10 atau lebih ($N_L \geq 10$), Grimson menentukan korelasi dari persamaan 2.1



Grimmison model untuk *staggered tubes arrangements* telah dikembangkan pada tahun 1937. Grimmison merumuskan Nusselt number dari susunan tube sebagai berikut

$$\overline{Nu}_D = 1,13 C_1 C_2 Re_{D,max}^m Pr^{1/3} \quad (2.1)$$

$$\left(\begin{array}{l} 2000 < Re_{D,max} < 40.000 \\ Pr \geq 0,7 \end{array} \right)$$

Dimana C_1 dan m tercantum pada tabel 2.1 dan C_2 adalah sebuah faktor koreksi untuk susunan tube yang memiliki kurang dari 10 tube ($N_L < 10$) yang tercantum pada tabel 2.2, sedangkan untuk nilai Re dapat dicari dengan persamaan 2.2

$$Re_{D,Max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (2.2)$$

Tabel 2.1 Konstanta dari Persamaan 2.1 untuk Aliran Udara Melintasi Staggered Tube Bank

S_L/d_{out}		S_T/d_{out}							
		1,25		1,5		2,0		3,0	
S_L/d_{out}	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m	
0,600	-	-	-	-	-	-	0,213	0,636	
0,900	-	-	-	-	0,446	0,571	0,401	0,581	
1,000	-	-	0,497	0,558	-	-	-	-	
1,125	-	-	-	-	0,478	0,565	0,518	0,560	
1,250	0,518	0,556	0,505	0,554	0,519	0,556	0,522	0,562	
1,500	0,451	0,568	0,460	0,562	0,452	0,568	0,488	0,568	
2,000	0,404	0,568	0,416	0,568	0,482	0,556	0,449	0,570	
3,000	0,310	0,592	0,356	0,580	0,440	0,562	0,428	0,574	

Tabel 2.2 Faktor Koreksi C_2 untuk Persamaan 2.1 untuk Staggered Tubes dengan $N_L < 10$

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_2	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99



Bilangan Reynold's, $Re_{D,max}$, berkorelasi dengan kecepatan maksimum dari aliran yang melintasi tube banks. Untuk susunan secara aligned, kecepatan maksimum terjadi di A_1 , sesuai dengan persamaan 2.3.

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk susunan secara staggered, kecepatan maksimum dapat terjadi pada jarak transversal A_1 dan jarak longitudinal A_2 . Hal itu dapat terjadi di A_2 , jika jarak antar baris tube memenuhi syarat seperti persamaan 2.4.

$$2(S_D - D) < (S_T - D) \quad (2.4)$$

Dari fluida yang bergerak dari A_1 ke A_2 , maka V_{max} terjadi di A_2 dengan syarat seperti pada persamaan 2.5.

$$S_D = \left[S_L^2 + \frac{S_T^2}{2} \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \quad (2.5)$$

Maka kecepatan maksimum pada susunan secara staggered di A_2 sesuai persamaan 2.6.

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} \quad (2.6)$$

Untuk susunan staggered, lintasan aliran utama lebih berliku-liku sehingga akan lebih banyak permukaan tube yang teraliri. Pada susunan staggered, kenaikan perpindahan panas dipengaruhi oleh tingkat lika-liku aliran terutama pada angka Reynolds yang kecil ($Re < 100$).



2.4 Kays and London Model

Kays and London model diperkenalkan pada tahun 1984 untuk menghitung kinerja dari alat penukar panas kompak. Para penulis merekomendasikan penggunaan Colburn j factor seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.2 yang menggunakan Stanton Number (St) dan Prandtl Number untuk menghitung perpindahan panas dari aliran gas ke susunan tube tak terbatas.

$$j_H = StPr^{2/3} = h/GC_p Pr^{2/3} \quad (2.7)$$

Mengatur ulang persamaan 2.2 untuk mendapatkan rumus koefisien perpindahan panas konveksi.

$$h = j_H \frac{GC_p}{Pr^{2/3}} \quad (2.8)$$

Mengetahui bahwa $Nu \equiv \frac{h d_{out}}{k}$ dan $Re = \frac{G d_{out}}{\mu}$ (untuk tube silinder), Nusselt number dapat dinyatakan sebagai :

$$Nu_{\infty} = j_H \mu C_p k^{-1} Re Pr^{-2/3} \quad (2.9)$$

Dengan $Pr \equiv \frac{\mu C_p}{k}$, maka persamaan (2.9) menjadi :

$$Nu_{\infty} = j_H Re Pr^{1/3} \quad (2.10)$$

Kays & London memberikan hubungan dari

$$j_h = C_h Re^{-0.4} \quad (2.11)$$

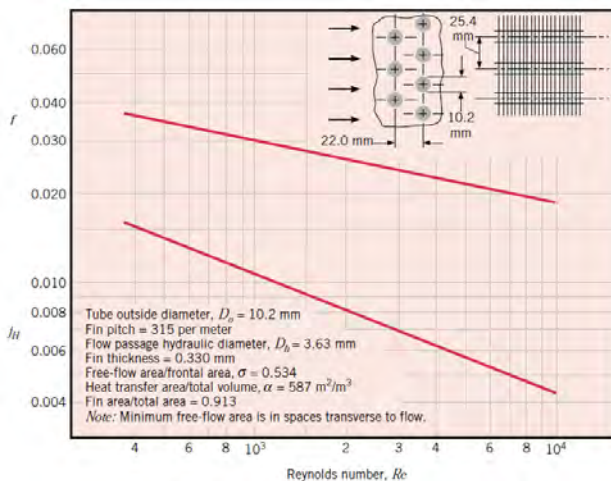
For $300 < Re < 15.000$



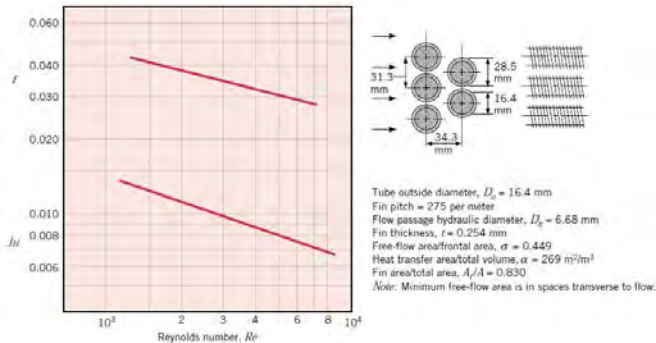
Koefisien C_h adalah fungsi dari $\left(\frac{s_T}{d_{out}}\right)$ dan $\left(\frac{s_L}{d_{out}}\right)$ dengan batas $0,2 \leq C_h \leq 0,425$.

Persamaan 2.7 menunjukkan bahwa hubungan Kays & London sangat mirip dengan Grimison model, namun koefisien yang digunakan Kays & London dimaksudkan untuk Compact Heat Exchanger Geometries dengan $1,5 \leq \frac{s_T}{d_{out}} \leq 2,5$ dan $0,75 \leq \frac{s_L}{d_{out}} \leq 1,5$, $m = 0,6$ dan $n = 1/3$. Dengan demikian persamaan (2.7) berubah menjadi

$$Nu_{\infty} = C_H Re^{0,6} Pr^{1/3} \quad (2.12)$$



(a)

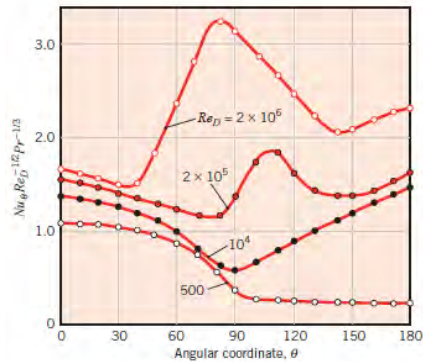


(b)

Gambar 2.5 Perpindahan Kalor dan Faktor Gesekan Untuk Penukar Kalor (a) Circullar Tube-Continuous Fin, (b) Circullar Tube-Circullar Fin dari Kays and London (**Incropera dan DeWitt, 2002**)

2.5 Konveksi Aliran Melintasi Silinder Tunggal

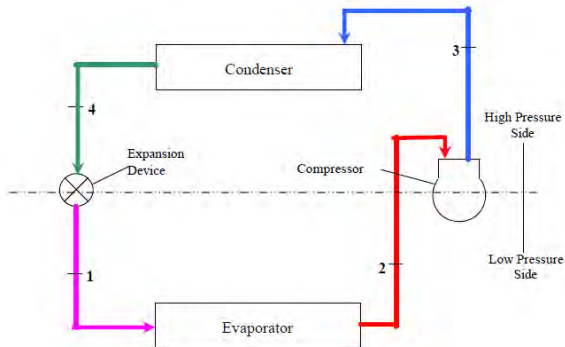
Akibat dari perbedaan profil kecepatan yaitu variasi angka Nusselt lokal pada silinder tersebut. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.6 untuk aliran dengan $Re \geq 10^5$, variasi dari Nu_θ mempunyai dua harga minimum. Penurunan harga Nu_θ yang terjadi mulai dari titik stagnasi dikarenakan pengembangan dari laminar boundary layer. Pada θ antara 80° dan 100° terjadi kenaikan harga Nu_θ , ini dikarenakan transisi boundary layer dari laminar menjadi turbulen. Dengan pengembangan turbulent boundary layer lebih lanjut, harga Nu_θ menurun lagi. Pada saat separasi aliran terjadi pada θ mendekati 140° , Nu_θ bertambah besar dikarenakan mixing didaerah wake.



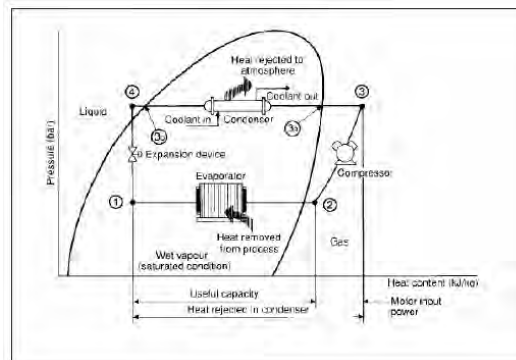
Gambar 2.6 Distribusi Nusselt lokal pada silinder. (Incropera dan DeWitt, 2002)

2.6 Tinjauan Termodinamika

2.6.1 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap



Gambar 2.7 Gambar skema dari Sistem Refrigerasi Kompresi Uap



Gambar 2.8 Skema representasi dari siklus refrigerasi termasuk perubahan tekanan.

Siklus refrigerasi yang ditunjukkan pada gambar 2.7 dan 2.8 dapat di bagi menjadi beberapa tahapan sebagai berikut :

- 1 -2. Refrigerant bertekanan rendah di dalam evaporator menyerap panas dari sekitarnya, biasanya udara maupun air. Selama proses ini berlangsung refrigerant berubah bentuk dari cair menjadi gas dan pada keluaran evaporator berupa *superheated vapor*.
- 2 – 3. Uap *superheated* masuk menuju kompresor dimana tekananya dinaikkan, temperaturnya juga akan meningkat.
- 3 – 4. Uap *Superheated* bertekanan tinggi menuju kondensor. Pada keluaran kondensor uap telah menjadi cairan.
- 4 – 1. Cairan bertekanan tinggi kemudian melewati perangkat ekspansi, mengurangi tekanannya dan mengendalikan aliran menuju ke evaporator.

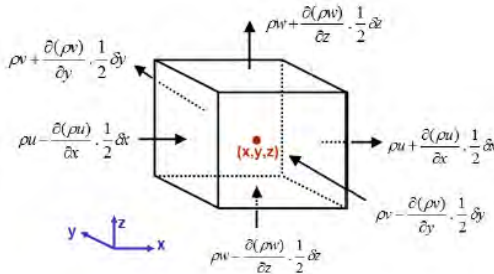
Kondensor harus mampu membuang panas yang berasal dari gabungan evaporator dan kompresor, dengan kata lain : $(1 - 2) + (2 - 3)$ harus sama dengan $(3 - 4)$.



2.7 Persamaan Dasar Aliran Fluida

Persamaan dasar fluida pada hakikatnya dapat dikembangkan dari ketiga prinsip dasar fisika yaitu kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi.

Persamaan pada suatu fluida yang mengalir dengan kondisi dua dimensi dan *incompressible flow* pada *vertical channel* dapat dituliskan sebagai berikut:



Gambar 2.9 Gaya-Gaya Pada Partikel-Partikel Disetiap Elemen Fluida

Konservasi massa (*Continuity*)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Persamaan Momentum

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Persamaan Energi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{C_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$



2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan salah satu cara penggunaan komputer untuk menghasilkan informasi tentang aliran fluida. CFD menggabungkan berbagai ilmu dasar teknologi diantaranya matematika, ilmu komputer, teknik dan fisika. Semua ilmu disiplin tersebut digunakan untuk permodelan atau simulasi aliran fluida.

Prinsip CFD adalah metode penghitungan numerik persamaan differensial, dengan menggunakan metode elemen hingga (grid) sebagai pendekatan.

2.8.1 Struktur Program CFD

Dalam proses kerjanya CFD melibatkan berbagai macam software atau program.

Program-program yang terlibat dalam CFD terbagi dua yaitu :

1. *Software* Utama
Yang dapat digunakan sebagai *software* utama di CFD adalah *Cosmosflowork* dan *Solidwork*
2. *Software* Pendukung
Yang termasuk dalam *software* pendukung di CFD adalah program *Exceed*, *GAMBIT* dan program-program CAD/CAE, seperti *AutoCad*, *CATIA*, *NASTRAN*, *ProEngineering*, dan lain-lain.

2.8.2 Tahapan Kerja dalam CFD

Secara umum langkah-langkah kerja dalam CFD terbagi atas tiga tahapan, yaitu:

1. *Preprocessor*
Preprocessor adalah tahapan di mana data umpangkan atau dimasukkan, mulai dari pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) sampai pendefinisian domain.
2. *Processor*
Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data input dengan persamaan yang terlibat secara literatif, artinya



penghitungan dilakukan hingga hasil menuju *error* terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen.

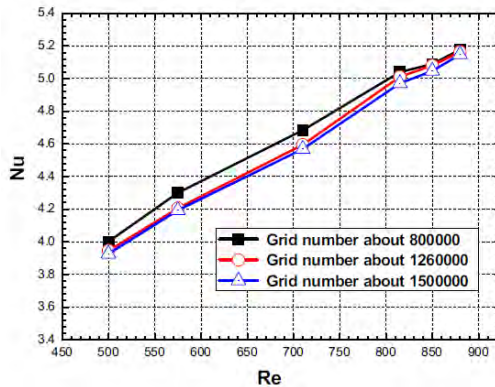
3. *Postprocessor*

Postprocessor adalah tahapan dimana perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu.

2.9 Grid Independency

Pada suatu simulasi harus dilakukan grid independensi, untuk memastikan grid yang digunakan telah independen terhadap kasus yang akan disimulasikan. Salah satu cara agar dapat menguji grid independensi adalah dengan melakukan *adapt*. *Grid* independensi sendiri adalah solusi yang konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Di dalam prakteknya *grid* independensi dilakukan dengan cara menghaluskan mesh sehingga hal tersebut dapat mengubah solusi numerik. Oleh karena itu dengan *adapt* dapat di ketahui bagian-bagian mana saja yang harus lebih dihaluskan mesh agar tidak mengubah solusi numerik. Pada pembahasan selanjutnya akan diambil contoh tentang kasus analisis perpindahan panas dan pressure drop untuk fin-and-tube heat exchanger dengan rectangular winglet-type vortex generator (Ya-Ling He, Pan Chu, dkk 2012).

Pada grid independensi ini dilakukan pembagian jumlah meshing ke dalam 3 jenis grid yang berbeda, yaitu *grid number* 800.000, 1.260.000, 1.500.000. Perhitungan dilakukan pada variasi Re dari 500 sampai 880.



Gambar 2.10 Variasi dari Nilai Nusselt number Terhadap Perbedaan Grid number (He Y.L, dkk, 2012)

Dari gambar tersebut dapat di lihat perubahan dari nilai Nusselt number rata-rata dari ketiga jenis *grid number* tersebut. Dengan *grid number* 1260000 dan *grid number* 1500000 memiliki hasil yang hampir identik, sehingga dapat disimpulkan bahwa *grid number* 1260000 menunjukkan tingkat *grid independensi* yang cocok. Pada umumnya keakuratan dari metode solusi numerik yang baik diiringi dengan meningkatnya jumlah dari *cell*. Namun penggunaan dari jumlah *cell* yang banyak akan dibatasi dengan proses dari *hardware* computer dan waktu proses dari computer tersebut. Maka semua solusi numerik diolah dengan menggunakan *grid number* 1260000.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh He, dkk (2012) yang berjudul “*Analysis of Heat Transfer and Pressure Drop for Fin and Tube Heat Exchanger with Rectangular Winglet Type Vortex Generators*”, dijelaskan bahwa penelitian ini bertujuan untuk mengkaji lebih dalam mengenai modifikasi dari permukaan fin dan pengamatan dari struktur aliran, efek dari adanya penambahan *vortex generators*. Tujuan penambahan RWPs diharapkan dapat meningkatkan laju perpindahan panas. Ada



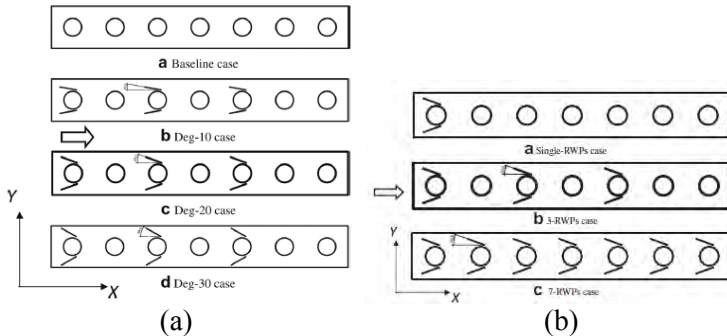
berbagai variasi yang dilakukan, yaitu permodelan dengan berbagai sudut peletakan RWPs (10° , 20° , 30°), jumlah RWPs yang dipasang pada Fin and Tube Heat Exchanger dan susunan RWPs secara inlined dan staggered arrays, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11. Penelitian ini berupa simulasi numerik dengan menggunakan software GAMBIT untuk membuat permodelannya dan disimulasikan dengan software Fluent. Pada variasi susunan RWPs secara inlined maupun secara staggered menunjukkan peningkatan perpindahan panas yang sama baiknya, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.12. Variasi sudut 10° dan 20° , menghasilkan performa j/f yang lebih baik daripada Fin and Tube Heat Exchanger tanpa RWPs. Variasi jumlah RWPs yang terpasang untuk single RWPs dan 3-RWPs, menunjukkan performa j/f yang lebih baik daripada Fin and Tube Heat Exchanger tanpa RWPs, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13.

Tabel 2.3 Kisaran Kenaikan Koefisien Perpindahan Panas Terhadap Variasi Sudut

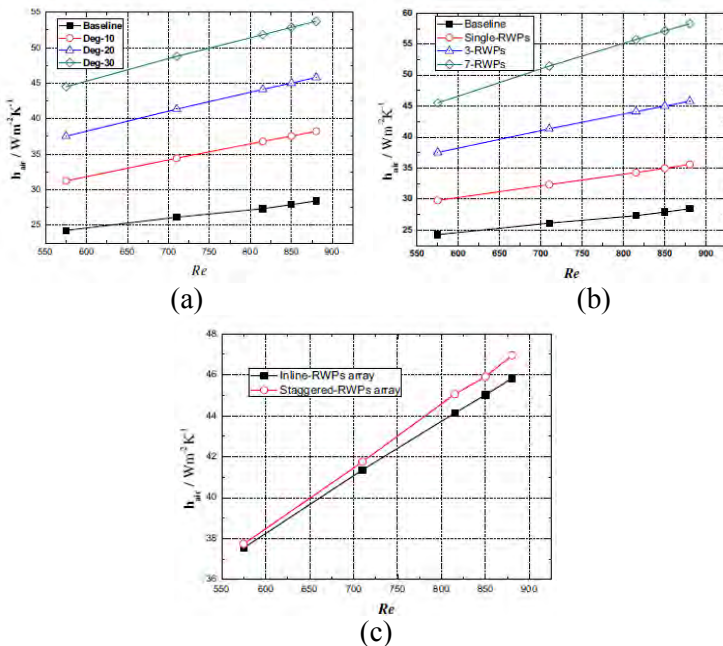
	Sudut		
	10°	20°	30°
$h_{\text{air}}/\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	28,8 - 34,5 %	54,6 - 61,5%	83,3 - 89,7%

Tabe 2.4 Kisaran Kenaikan Koefisien Perpindahan Panas Terhadap Variasi Jumlah RWPs

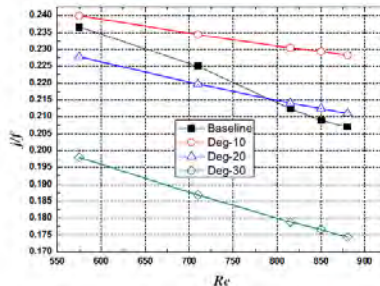
	Jumlah RWPs		
	1	3	7
$h_{\text{air}}/\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	22,7 - 22,5%	54,6 - 61,5%	87,5 - 105,1%



Gambar 2.11 Variasi (a) Attack Angle dan (b) Jumlah RWPs Yang Terpasang Pada Section Area (He Y.L, dkk, 2012)



Gambar 2.12 Perbandingan Antara Nilai Reynolds Number Terhadap Koefisien Konveksi, (a) Berdasarkan Sudut Kemiringan RWPs, (b) Berdasarkan Jumlah RWPs yang Terpasang, (c) dan Berdasarkan Susunan Rectangular (He Y.L, dkk, 2012)



(c)

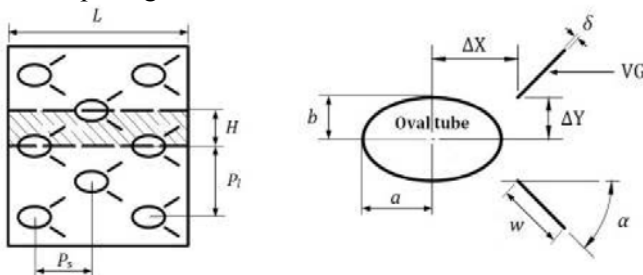
Gambar 2.13 Perbandingan Antara Nilai Reynolds Number Terhadap f/f . (He Y.L, dkk, 2012)

Penelitian yang dilakukan **Ramadhan** (2012) yang berjudul “*Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Over a Bank of Oval Tubes Heat Exchanger with Vortex Generators*”, bertujuan mengetahui pengaruh dari parameter – parameter yang berbeda dari *Longitudinal Vortex Generators* (LVGs) pada Heat Exchanger dan karakteristik aliran fluida pada susunan oval-tube Heat Exchanger, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.14. Pada penelitian tersebut diamati efek-efek *Reynolds Number* (pada range 250-1500) dan posisi peletakan vortex generators (30° dan 45°) terhadap perpindahan panasnya. Pada tiga baris tube banks yang tersusun secara staggered menunjukkan adanya peningkatan overall Nu_{AV} sebesar 10-20,4% untuk kasus 30° dan 10,4-27,7% untuk kasus 45° . Berdasarkan koefisien gesek rata-rata aliran pada permukaan, C_f , pada oval tube pertama, kedua, dan ketiga masing-masing mengalami peningkatan sebesar 33,3%, 65,6%, dan 60,5% dan ketika posisi LVGs pada kemiringan 30° dan 45° juga mengalami peningkatan C_f masing-masing sebesar 36,4%, 85%, dan 94,7%.

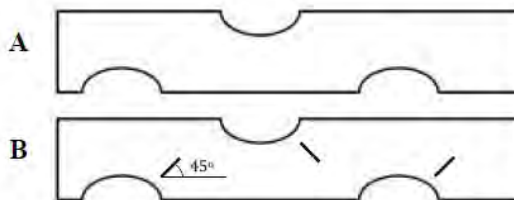
Dengan permodelan menggunakan software Gambit dan disimulasikan dengan software Fluent, karakteristik dari overall Nu_{AV} dan koefisien rata-rata gesekan aliran pada permukaan dapat diperoleh secara numerik. Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan nilai perpindahan panas, koefisien rata-rata gesekan



aliran pada permukaan dapat diperoleh secara numerik. Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan nilai perpindahan panas, koefisien rata-rata gesekan aliran pada permukaan, Reynolds Number, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.15 dan pengurangan pada jarak relatif dari posisi LVGs. Koefisien rata-rata gesekan aliran pada permukaan bernilai maksimum pada tube baris kedua dengan kemiringan LVGs sebesar 30° dan pada tube baris ketiga dengan kemiringan LVGs sebesar 45° pada jarak yang dekat antara tube dengan LVGs, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.16.



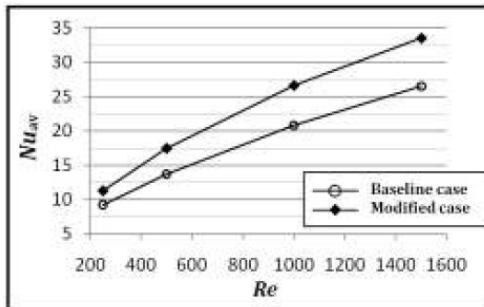
(a)



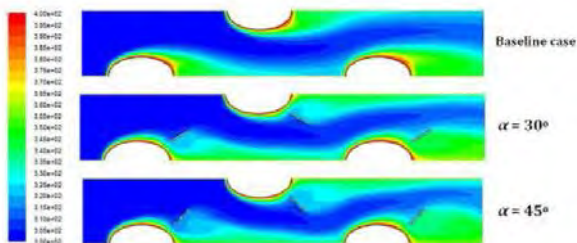
(b)

Gambar 2.14 (a) Domain Computational (kiri), Geometri Oval Tube dan LVGs, (b) Perbedaan Konfigurasi untuk 3 Baris Tube dengan LVGs (atas(A)) dan Tanpa LVGs (bawah(B))

(Ramadhan, 2012)



Gambar 2.15 Perbandingan Antara Nu_{AV} dan Re untuk Baseline Case (tanpa LVGs) dan Modified Case (dengan LVGs) (Ramadhan, 2012)

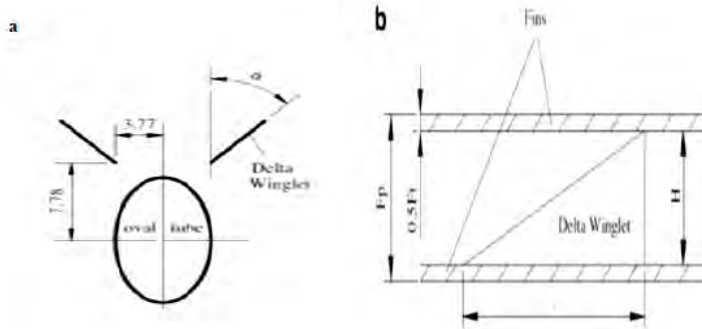


Gambar 2.16 Karakteristik Aliran Berdasarkan Distribusi Temperatur pada Baseline Case (tanpa LVGs), $\alpha = 30^\circ$, dan $\alpha = 45^\circ$ (Ramadhan, 2012)

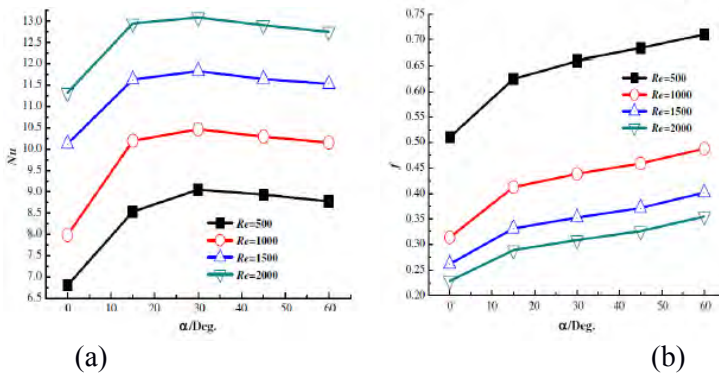
Berdasarkan penelitian **Bevinhalli** (2013) yang berjudul "Numerical Simulation On Fin and Oval Tube Heat Exchanger With Longitudinal Vortex Generators" bertujuan mengetahui pengaruh dari penambahan *longitudinal vortex generator* terhadap karakteristik aliran fluida pada susunan Oval Tube Heat Exchanger seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17 pada penelitian tersebut diamati dari efek-efek *Reynolds Number* (pada range 500-2000), posisi peletakan vortex generators (30° dan 45°). Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan koefisien perpindahan panas seiring dengan peningkatan Reynolds



numbarnya. Selain itu, nilai Nu_{AV} dan koefisien geseknya meningkat seiring bertambahnya nilai attack angle, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.17 Dimensi dari Winglet Vortex Genertaor terhadap posisi Oval Tube (a) Pandangan Atas dari LVGs dan Oval Tube, (b) Pandangan Samping dari LVGs (Bevinhalli, 2013)

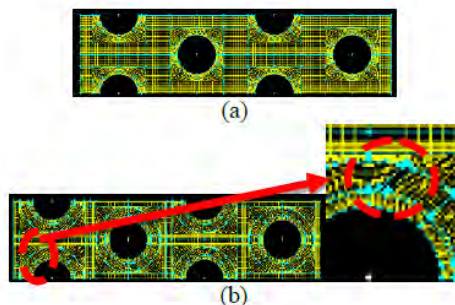


Gambar 2.18 Pengaruh Attack Angle (a) Terhadap nilai Nu_{AV} (b) terhadap friction factor (Bevinhalli, 2013)

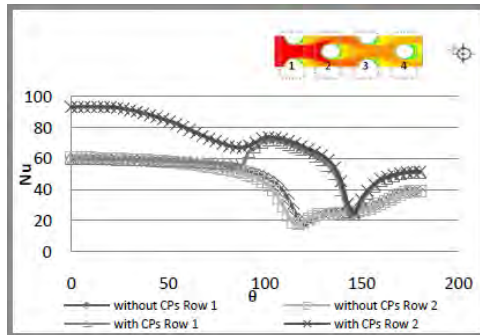
Penelitian **Chairunnisa dan Prabowo** (2013) yang berjudul “*Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CPs) terhadap Karakteristik Aliran dan P erpindahan Panas dengan*



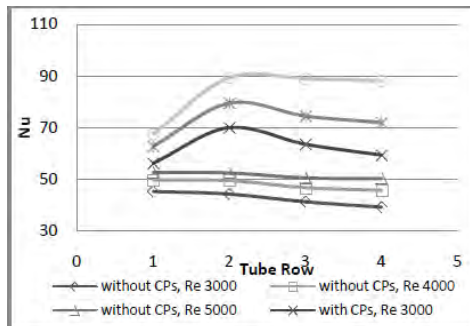
$\ell/D = 0.25$, pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered”, bertujuan mengetahui pengaruh dari penambahan CPs terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panasnya. Tujuan dari penambahan CPs diharapkan mampu meningkatkan laju perpindahan panas, posisi peletakkan CPs pada 45° , ada beberapa variasi yang dilakukan pada penelitian tersebut, yaitu dari variasi Reynold Number (3000, 4000, 5000), kecepatan inlet (3m/s, 4m/s, 5m/s). Pada empat baris tube banks yang tersusun secara staggered menunjukkan adanya peningkatan nilai Nu_{AVG} yang dihasilkan dari model *modified* dengan adanya penambahan *Convergency Promoters* (CPs), yakni besar peningkatannya berkisar antara 47-63% lebih tinggi dari pada Nusselt number pada model *baseline* seperti pada gambar 2.20. Berdasarkan nilai koefisien konveksi rata-rata yang dihasilkan, dari model *modified* dengan adanya penambahan *Convergency Promoters* (CPs) mengalami peningkatan, yakni besar peningkatannya berkisar antara 47–63% lebih tinggi dari pada koefisien konveksi pada model *baseline*. Perpindahan panas yang terjadi pada model *modified* dengan adanya penambahan *Convergency Promoters* (CPs) lebih baik dibandingkan dengan model *baseline*. Dilihat dari kenaikan nilai Nusselt number dan koefisien konveksi dan didukung juga oleh visualisasi kontur kecepatan dan kontur temperatur.



Gambar 2.19 Perbedaan Meshing untuk 4 Baris Tube tanpa CPs (atas (a)) dan dengan CPs (bawah (b)) (Chairunnisa dan Prabowo, 2013)



Gambar 2.20 Distribusi Nusselt Number Lokal Tube Perbandingan Antara Model Baseline (tanpa penambahan CPs) dan Model Modified (dengan penambahan CPs). (Chairunnisa dan Prabowo, 2013)



Gambar 2.21 Nusselt Number Lokal Tube Terhadap Variasi Reynold Number. (Chairunnisa dan Prabowo, 2013)



halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODE PENELITIAN

Dalam menyusun tugas akhir ini, metode penelitian yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2.26, dimana akan dibandingkan hasil simulasi numerik compact heat exchanger tipe straight fin circular tube tanpa atau dengan penambahan *obstacle* yang berbentuk rectangular. Simulasi numerik adalah sebuah proses simulasi berbasis perhitungan yang dilakukan oleh sebuah perangkat lunak komputer dengan mendefinisikan parameter-parameter yang sesuai dengan boundary conditionsnya, dilanjutkan proses iterasi atau pengulangan sampai tercapainya konvergensi untuk mendapatkan nilai pendekatan yang signifikan. Pada proses numerik terbagi menjadi 3 tahapan yaitu Pre Processing, Processing, dan Post Processing.

3.1 Preprocessing

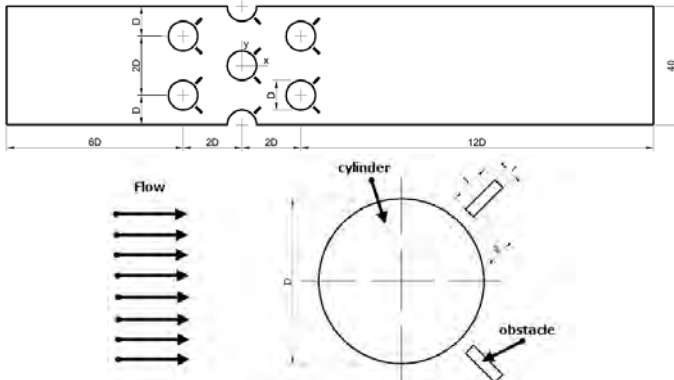
Proses ini dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD) secara numerik. Tahapan Preprocessing terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain :

1. Pembuatan model,
2. Pembuatan meshing, dan
3. Penentuan kondisi batas (*boundary conditions*) pada model.

Dari ketiga sub-tahapan diatas, semuanya diproses menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.2.30

3.1.1 Pembuatan Model

Model yang akan dibuat adalah compact heat exchanger tipe straight fin circular tube tanpa atau dengan penambahan *obstacle* yang berbentuk rectangular, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 dengan rincian ukuran tercantum pada tabel 3.1 dimana terdapat 3 baris tube yang tersusun secara staggered



Gambar 3.1 Geometry Straight Fin Circular Tube dengan Penambahan Obstacle.

Tabel 3.1 Geometri Compact Heat Exchanger Tipe Straight Fin Circular Tube

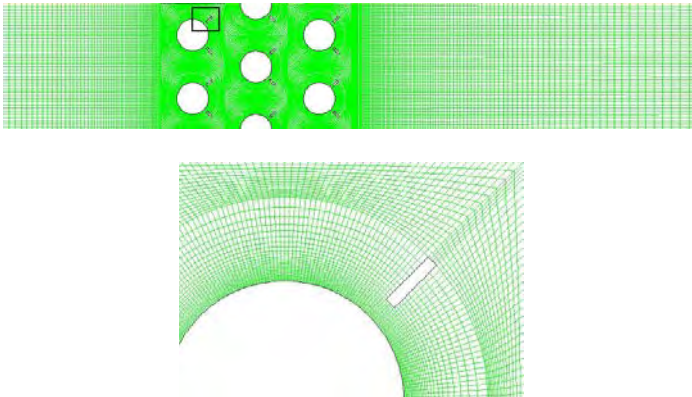
Dimensi	Nilai
Tube	
Tube outside diameter (D) (mm)	10
Transverse pitch (S_T) (mm)	20
Longitudinal pitch (S_L) (mm)	20
Diagonal pitch (S_D) (mm)	22.36
Tube row number	3
Gap (g) (mm)	1
Fin	
Air flow direction length (mm)	125
Obstacle	
Degree (θ)	135°
Width (t) (mm)	0.5
S_L/l	12; 8; 4
Length (l) (mm)	1.6 ; 2.5 ; 5



3.1.2 Pembuatan Meshing

Pemodelan yang telah dibuat dibagi menjadi elemen-elemen kecil sesuai batas dan parameter yang telah ditentukan. Bentuk mesh yang dipilih adalah *quadrilateral-map*. Setelah proses meshing, geometri model disimpan dan di-export ke bentuk format *.msh agar dapat terbaca oleh perangkat lunak FLUENT.

Meshing untuk permodelan 2D compact heat exchanger tipe *straight fin circular tube* tanpa atau dengan penambahan *obstacle* yang berbentuk *rectangular*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 3.2 Meshing pada Straight Fin Circular Tube Dengan penambahan Obstacle

Dari gambar 3.2, meshing lebih dirapatkan pada daerah sekitar tube dan *obstacle* yang berbentuk *rectangular* (didefinisikan sebagai *wall*). Perapatan meshing pada bagian geometri tersebut dilakukan untuk meningkatkan ketelitian hasil simulasi. Fenomena dan karakteristik aliran yang dianalisa secara spesifik adalah daerah celah antar fin (tube dan *obstacle*).



3.1.3 Variabel Penelitian

Dalam melakukan penelitian memerlukan variabel-variabel, yang bertujuan agar penelitian memiliki arah dan tujuan yang jelas mengenai hubungan yang akan dicari. Variabel-variabel yang ditentukan antara lain :

Variabel bebas : Panjang *obstacle*

Variabel terkontrol : Pitch tube, temperatur *inlet*, temperatur *outlet* dan *velocity inlet*.

3.2 Processing

Pada proses ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3.26 yang terdiri dari beberapa tahapan.

3.2.1 Pemilihan Solver

Pada saat membuka perangkat lunak FLUENT terdapat beberapa pilihan untuk menggunakan solver 2D/3D dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). Solver yang digunakan adalah 2D dengan keakuratan ganda.

3.2.2 Pemilihan Turbulence Modelling

Penentuan *turbulence modelling* yang akan digunakan mengacu pada penelitian terdahulu bahwa untuk permodelan ini menggunakan metode *turbulence modelling* tipe k- ϵ RNG (*Re-Normalization Group*). Sehingga model *turbulence* ini digunakan sebagai acuan peneliti dalam pengambilan data.

3.2.3 Pemilihan Operation Condition

Setelah melakukan pemilihan *turbulence modelling* langkah penting selanjutnya adalah melakukan pengaturan *operation condition*. Kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tekanan operasi pada saat udara yang dimodelkan sebagai gas ideal melalui celah diantara fin dan



obstacle yang berbentuk rectangular. Pada penelitian ini tekanan operasi yang digunakan adalah 101325 Pa.

3.2.4 Penentuan Boundary Condition

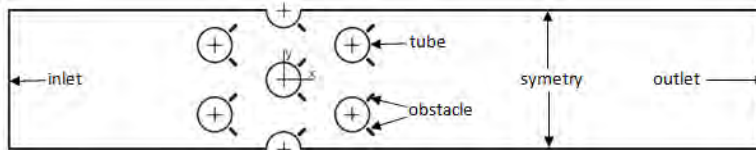
Dalam mendefinisikan suatu kasus memasukkan informasi variabel aliran pada domain kasus tersebut. Dalam simulasi ini menggunakan kondisi batas yang tertera pada tabel 3.2, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 dengan properti *fluida inlet* yang tertera pada tabel 3.3.

Tabel 3.2 Boundary Condition Straight Fin Circular Tube

Boundary Condition	Keterangan
Inlet	Tipe : Velocity Inlet Kecepatan : 5 m/s Temperatur Inlet : 310 K
Outlet	Tipe : Outflow
Tube	Tipe : Stationary Wall Temperatur : 347 K Material : <i>Copper</i>
Obstacle	Tipe : Stationary wall
Garis bantu	Tipe : Symmetry

Tabel 3.3 Properties Udara

Temperatur inlet (K)	310
Density (kg/m ³)	1,1281
Panas Spesifik (Cp) (KJ/kg.K)	1,0074
Viskositas Absolut (μ) (N.s/m ²)	189,32 e-07
Viskositas Kinematik (m ² /s)	16,896 e-6
Thermal Conductivity (W/m.K)	0,02704
Prandtl Number (Pr)	0,7056



Gambar 3.3 Boundary Condition pada Compact Heat Exchanger Tipe Straight Fin Circular Tube dengan Penambahan Obstacle yang berbentuk Rectangular

3.2.5 Solving

3.2.5.1 Solve Metode

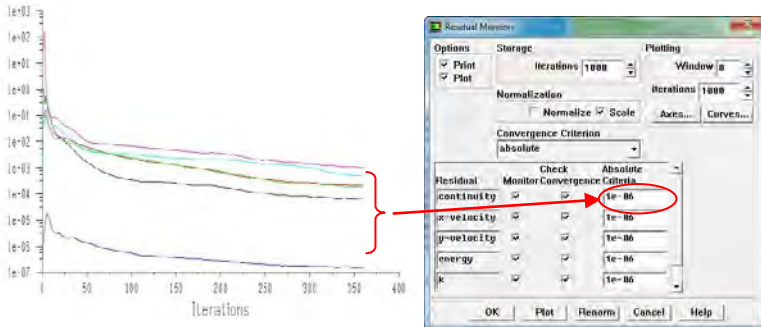
Momentum dan energy didiskritisasi dengan first order upwind scheme. Coupling antara velocity dan pressure ditampilkan dengan metode SIMPLE algoritm.

3.2.5.2 Initialize

Initialize merupakan penentuan kondisi awal agar memudahkan proses iterasi untuk mencapai kondisi konvergen, dengan menginputkan data inlet.

3.2.5.3 Iterasi

Proses iterasi adalah proses perhitungan yang berulang-ulang dari kondisi batas yang diberikan sampai konvergensi tercapai. Untuk menyimpulkan hasil iterasi telah konvergen atau belum tidak hanya cukup dengan mengamati level residual, tapi juga harus mengamati kesetimbangan balans massa dan energi. Terdapat metode yang umum dipakai untuk mengecek konvergensi hasil iterasi, yaitu Residual Konvergen. Residual Konvergen adalah berhentinya iterasi karena sudah mencapai kriteria konvergensi yang kita tentukan.



Gambar 3.4 Kriteria Konvergensi

Pada umumnya makin kecil nilai konvergensi residual yang dicantumkan dalam proses iterasi, proses iterasi akan memakan waktu yang lebih lama hingga mencapai konvergensi, begitu pula sebaliknya. Namun peningkatan nilai konvergensi residual akan meningkatkan kualitas pengolahan data yang lebih baik.

3.3 Grid Independence

Grid independency dilakukan untuk memastikan grid yang telah independen terhadap kasus yang akan disimulasikan. Pada grid independensi ini, dilakukan pembagian jumlah meshing ke dalam 4 jenis, kemudian dari jenis meshing ini akan dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Menurut Jagadesh dan Murali (2005), keakuratan dari metode solusi numerik yang baik diiringi dengan meningkatnya jumlah dari *cell*. Namun penggunaan dari jumlah *cell* yang banyak akan dibatasi dengan proses dari *hardware* computer dan waktu proses dari computer tersebut. Pada penelitian ini akan digunakan analisa *grid independency* Nusselt number. Nilai Nu akan ditampilkan pada tabel 3.4.



Tabel 3.4 Skema Grid Independensi pada baseline.

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu avg	Nu avg (Khan, dkk 2006)	Error (%)
Meshing A	23040	49,83	47	6,02%
Meshing B	39744	49,56	47	5,44%
Meshing C	55200	46,66	47	0,07%
Meshing D	64840	46,49	47	0,1%

Berdasarkan table 3.4 nilai Nu yang cenderung konstan terjadi pada meshing C dan meshing D. Salah satu pertimbangan dalam melakukan simulasi numerik adalah optimasi waktu dan memori yang digunakan, maka meshing yang digunakan adalah meshing C.

Langkah selanjutnya adalah validasi yang bertujuan untuk memastikan apakah metode penelitian telah sesuai dengan acuan yang digunakan, hal ini juga berlaku pada penelitian ini. Untuk memvalidasi metode numerik yang digunakan, data hasil numerik akan dibandingkan dengan hasil numerik yang dilakukan oleh Khan, dkk (2006) dan hasil numerik yang dilakukan oleh Chairunnisa dan Prabowo (2013) pada $Re = 3 \times 10^3$. Hasil dari validasi akan ditampilkan pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Nilai Nu avg model baseline

	Nilai Nu
Numerik (<i>present</i>)	46,66
Khan, dkk (2006)	47
Chairunnisa dan Prabowo (2013)	43,57

Table 3.5 menunjukkan perbandingan nilai Nu antara hasil numerik dan eksperimen. Hasil dari perbandingan tersebut menunjukkan bahwa nilai Nu pada penelitian numerik ini memberikan kesesuaian antara penelitian numerik Khan, dkk (2006) dan penelitian numerik Chairunnisa dan Prabowo (2013).



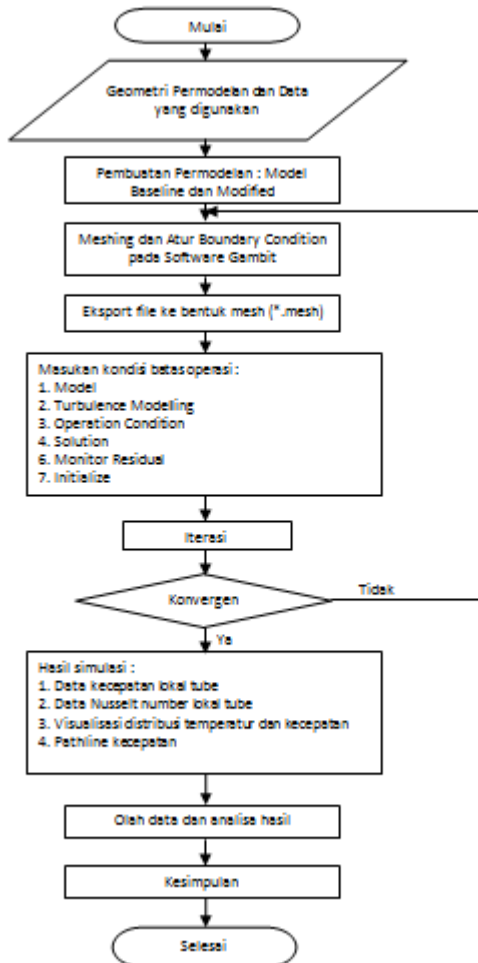
3.4 Post Processing

Proses ini merupakan proses akhir dari simulasi. Dimana hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan pola aliran dalam compact heat exchanger tipe straight fin circular tube. Data kuantitatif berupa distribusi kecepatan dan distribusi temperatur pada compact heat exchanger tipe straight fin circular tube. Data kuantitatif tersebut akan diolah dengan perangkat lunak Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai kecepatan lokal tube, nilai Nusselt number lokal, dan Nusselt number rata-rata. Sehingga data kuantitatif tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.



3.5 Flowchart Penelitian

Berikut ini adalah metode penelitian yang digunakan dalam penelitian karakteristik aliran pada straight fin circular tube yang tersusun se cara staggered, seperti yang tercantum pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Flowchart Penelitian



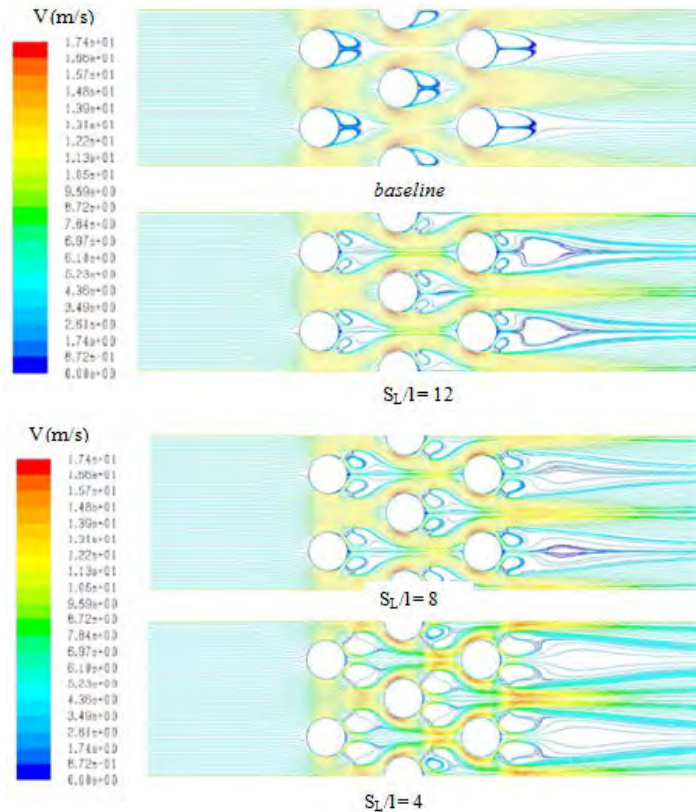
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa dan pembahasan data dari hasil numerik. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa data kuantitatif dan kualitatif. Adapun permasalahan yang akan dibahas dan ditampilkan antara lain yaitu pola aliran dari masing-masing model, kontur kecepatan, kontur temperature dan karakteristik perpindahan panas yang disajikan dalam bentuk grafik meliputi pembahasan Nusselt number lokal tube pada masing-masing baris pada susunan tube, Nusselt number rata-rata pada masing-masing baris dan Nusselt number rata-rata pada *tube banks* yang tersusun secara staggered terhadap variasi panjang rectangular obstacle. Pada masing-masing analisa akan dibandingkan antar permodelan fin and tube heat exchanger yang tanpa adanya penambahan *obstacle* dan dengan adanya penambahan *obstacle*.

4.1 Analisa Pola Aliran Terhadap Variasi Panjang Rectangular Obstacle

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* dengan kecepatan inlet 5 m /s untuk masing-masing variasi panjang *obstacle*, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.1



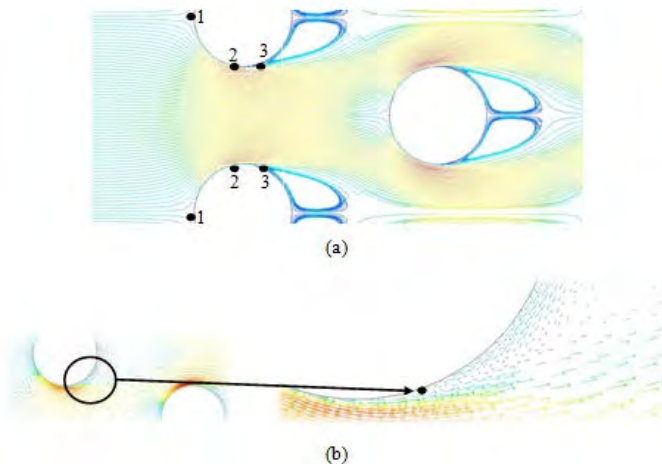
Gambar 4.1 Visualisasi Pathline by Velocity Magnitude

4.1.1 Model *Baseline* (Tanpa Penambahan *Obstacle*)

Berdasarkan gambar 4.2, fenomena yang terlihat untuk visualisasi pathline model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*), dapat dilihat bahwa pola aliran yang terbentuk ketika aliran akan melintasi tube terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk tube (titik stagnasi), ditunjukkan dengan angka 1, kemudian aliran terbagi mengalir ke dua arah yaitu mengalir ke bagian atas tube dan ke bagian bawah tube. Saat aliran melintasi kedua bagian



tersebut kecepatan lokal udara pada tube memiliki kecepatan maksimum karena adanya penyempitan celah laluan aliran (antara tube atas dan tube bawah seperti terlihat pada gambar 4.2 (a)), ditunjukkan dengan angka 2. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida, apabila fluida melewati celah yang lebih sempit (diantara kedua tube) maka kecepatannya akan meningkat. Setelah fluida melewati celah diantara kedua tube tersebut, aliran akan menuju kebagian blakang tube dan aliran terseparasi, ditunjukkan dengan angka 3. Sebagian aliran menuju tube berikutnya dan sebagian lagi berolak (vortex) dibagian blakang tube, tidak mengalir menuju tube berikutnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2 (b).



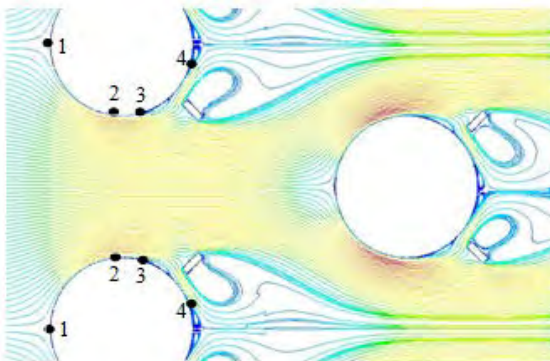
Gambar 4.2 Visualisasi Pola Aliran *Baseline* (a) Posisi V_{max} , (b) Perbesaran untuk Daerah Separasi

4.1.2 Model *Modified* (Dengan Penambahan *Obstacle*)

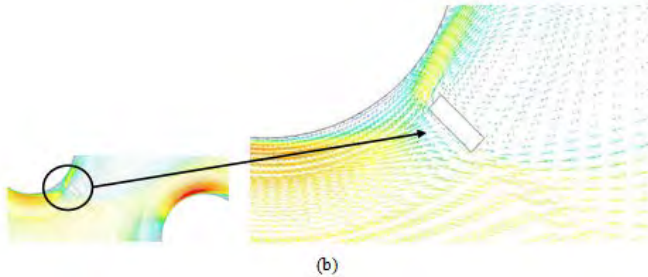
Gambar 4.3, 4.4, dan 4.5 menunjukkan *velocity pathline* pada model *modified* dengan $S_1/l = 12, 8, \text{ dan } 4$. Berdasarkan fenomena yang terlihat, dapat dilihat bahwa pola aliran ketiga model tersebut ketika melintasi *single tube* terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk tube (titik stagnasi), ditunjukkan



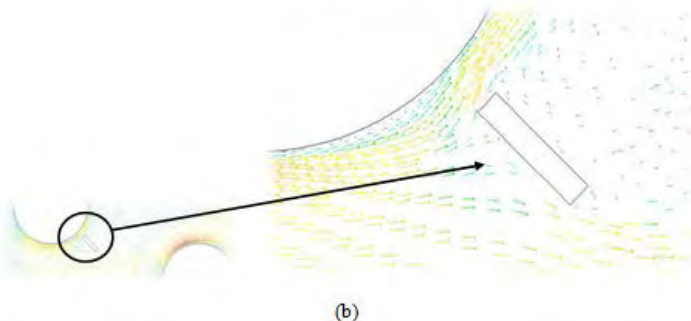
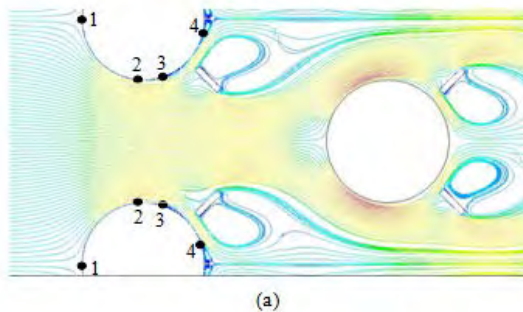
dengan angka 1, kemudian aliran terbagi mengalir ke dua arah yaitu mengalir kebagian atas dan kebagian bawah tube, pada posisi ini kecepatan udara mengalami peningkatan karena adanya penyempitan celah laluan aliran (antara tube atas dan tube bawah), ditunjukkan dengan angka 2. Setelah fluida melewati celah diantara kedua tube tersebut, aliran akan menuju kebagian blakang tube dan aliran terseparasi, ditunjukkan dengan angka 3, namun pada model dengan $S_1/l = 4$, separasi tidak terjadi pada titik ini. Kemudian sebagian aliran berolak dan sebagian aliran mengalir menuju *obstacle*, dimana saat aliran udara mengenai *obstacle*, aliran terbagi lagi, sebagian aliran diarahkan *obstacle* menuju tube selanjutnya, dan sebagian aliran mengalir melewati celah antara *obstacle* dan tube, saat aliran melintasi kedua bagian tersebut kecepatan lokal udara memiliki kecepatan maksimum karena adanya penyempitan celah laluan aliran (antara tube dan *obstacle* serta antara *obstacle* satu dengan lainnya yang berada pada satu baris tube yang sama). Aliran yang melewati celah antara tube dan *obstacle* kemudian akan mengalir ke bagian blakang tube, dan aliran akan terseparasi lagi, ditunjukkan dengan angka 4. Sebagian aliran menuju tube berikutnya dan sebagian lagi berolak (vortex) dibagian blakang tube. Vortex yang terbentuk di belakang tube untuk model *modified* ini semakin kecil dibandingkan dengan model *baseline*.



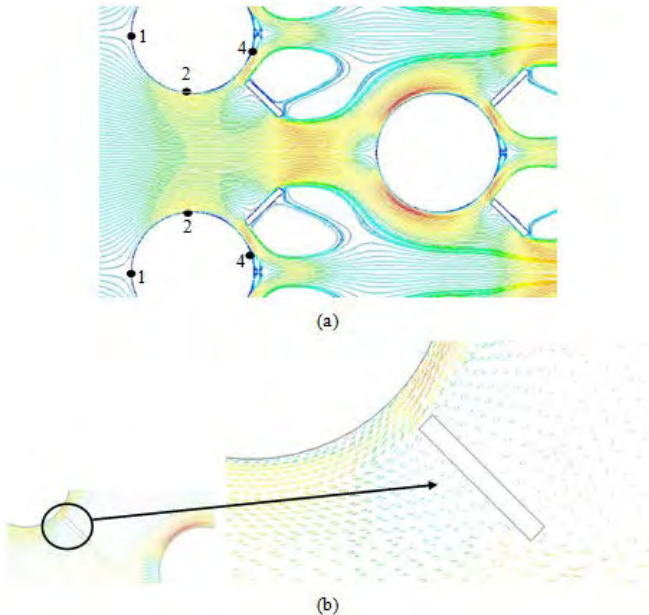
(a)



Gambar 4.3 Visualisasi Pola Aliran *Modified* dengan $S_1/l = 12$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity dan (b) Perbesaran untuk daerah disekitar Obstacle



Gambar 4.4 Visualisasi Pola Aliran *Modified* dengan $S_1/l = 8$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity dan (b) Perbesaran untuk daerah disekitar Obstacle

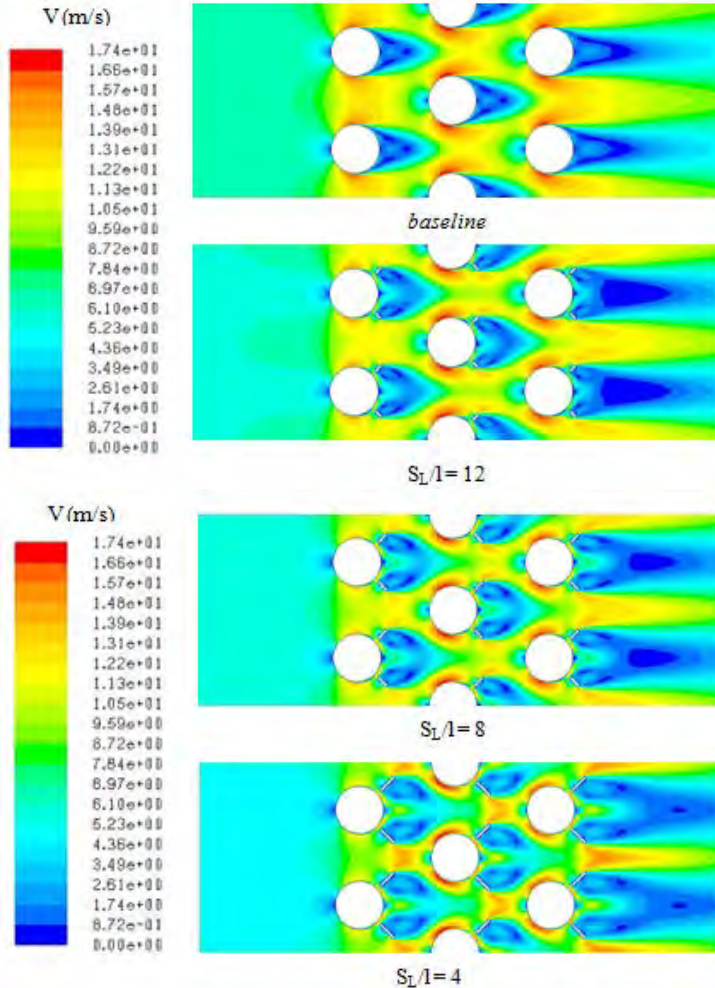


Gambar 4.5 Visualisasi Pola Aliran *Modified* dengan $S_1/l = 4$ (a) Pola Aliran by Pathline Velocity dan (b) Perbesaran untuk daerah disekitar Obstacle

4.2 Pengaruh Variasi Panjang *Obstacle*

4.2.1 Kontur Kecepatan

Berdasarkan gambar 4.6 terlihat visualisasi aliran berdasarkan *contour of velocity magnitude* untuk model *baseline* (tanpa menggunakan *obstacle*) dan aliran untuk model *modified* (dengan menggunakan *obstacle*) dengan variasi $S_1/l = 12$, $S_1/l = 8$, $S_1/l = 4$, disepanjang permukaan tube pada baris pertama sampai baris keempat.



Gambar 4.6 Visualisasi Kontur Kecepatan

4.2.1.1 Model *Baseline* (Tanpa Penambahan *Obstacle*)

Berdasarkan gambar 4.6 bagian atas merupakan fenomena kontur kecepatan model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*), dapat dilihat bahwa aliran mengalami percepatan pada



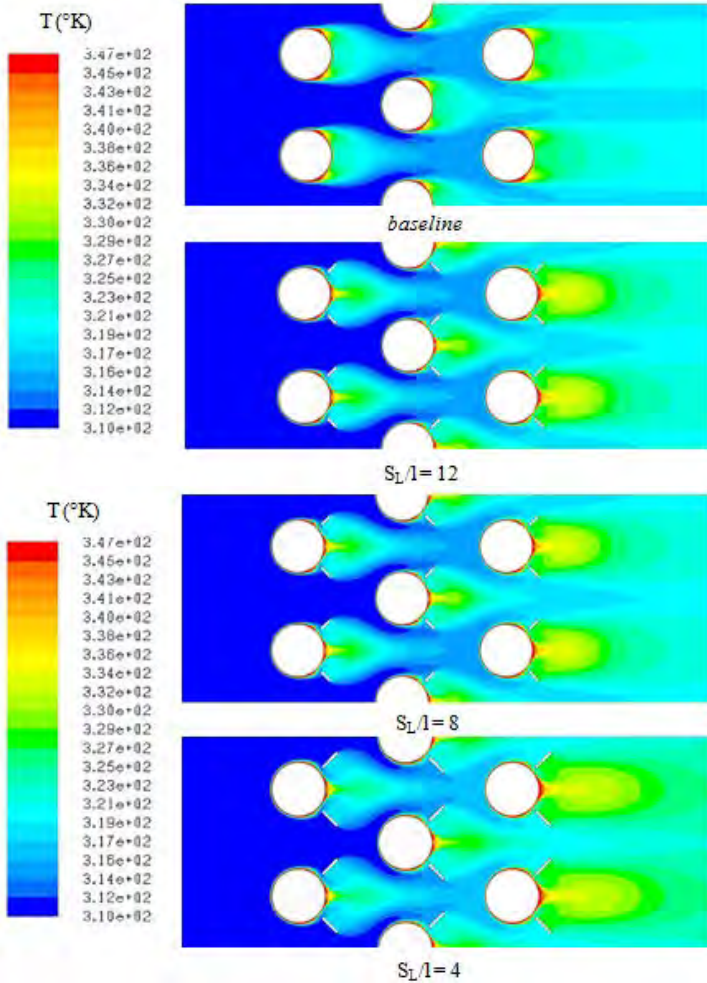
celah antar kedua tube pada baris pertama, kedua dan ketiga. Dapat kita lihat juga pada baris tube ke dua, kontur kecepatannya terlihat berwarna lebih merah, hal ini menandakan kecepatan aliran fluida yang melewati silinder pada baris kedua lebih cepat daripada kecepatan yang melewati silinder pada baris pertama.

4.2.1.2 Model *Modified* (Dengan Penambahan *Obstacle*)

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi kontur kecepatan model *modified*, dapat dilihat pada tube baris pertama, aliran mengalami kenaikan kecepatan pada celah sempit antar tube dan *obstacle* dan juga daerah penambahan *obstacle*. Pada tube baris kedua, aliran yang diteruskan oleh *obstacle* menuju tube berikutnya mengakibatkan kenaikan kecepatan di permukaan tube pada baris ini dengan kecepatan maksimum berada pada celah diantara tube dan *obstacle*. Pada tube baris ketiga mempunyai pola aliran yang relatif sama dengan tube pada baris pertama dan kedua. Hal ini berlaku terhadap ketiga model *modified*, baik untuk $S_1/l = 12, 8$ maupun 4 .

4.2.2 Kontur Temperatur

Berdasarkan gambar 4.7 terlihat visualisasi aliran berdasarkan *contour of static temperature* untuk model *baseline* (tanpa menggunakan *obstacle*) dan model *modified* (dengan menggunakan *obstacle*) dengan variasi panjang *rectangular obstacle* yaitu $S_1/l = 12, 8$ dan 4 . Pada kedua model ini, temperatur inlet (udara) yaitu 310 K dan temperatur tube konstan sebesar 347 K . Distribusi temperatur kedua model ini dapat diartikan dari kelompok-kelompok warna yang terbentuk, dengan indikasi bahwa warna biru tua memiliki temperatur yang paling rendah sedangkan warna merah mengindikasikan temperatur yang tinggi.



Gambar 4.7 Visualisasi Kontur Temperatur

4.2.2.1 Model *Baseline* (Tanpa Penambahan *Obstacle*)

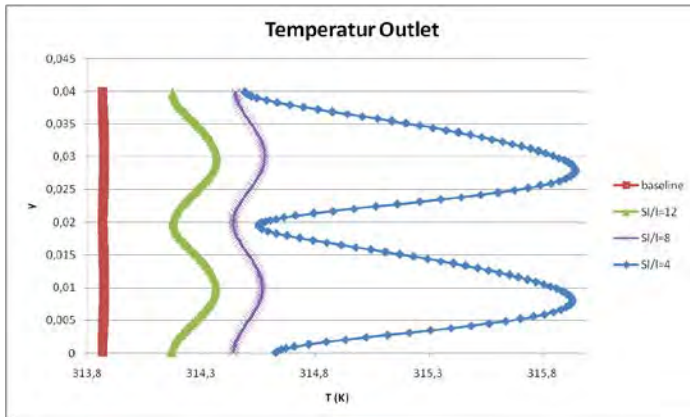
Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi kontur temperatur model *baseline* (tanpa menggunakan *obstacle*), dapat dilihat bahwa naiknya temperatur inlet pada baris kedua dan



ketiga. Naiknya temperatur inlet pada masing-masing baris membentuk tingkatan temperatur dengan temperatur terendah pada sisi inlet, pada sekitar tube baris kedua temperturnya lebih tinggi dari sekitar tube pada baris pertama, pada sekitar tube baris ketiga temperturnya lebih tinggi daripada sekitar tube baris kedua. Distribusi temperatur inlet sekitar permukaan tube terlihat bahwa adanya perubahan warna biru tua menjadi biru muda. Hal ini disebabkan temperatur tube yang lebih tinggi dari pada temperatur inlet.

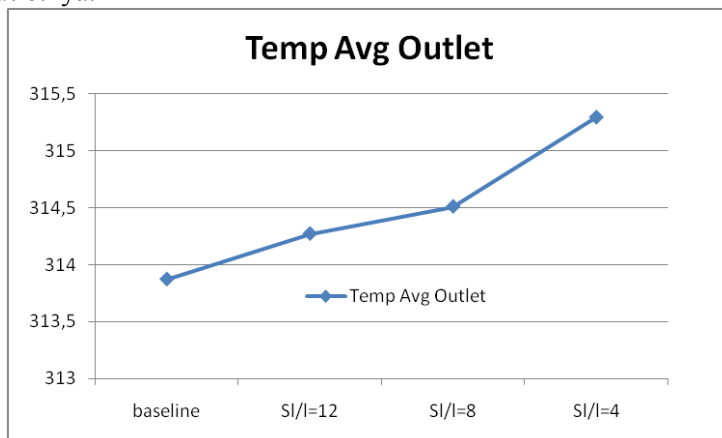
4.2.2.2 Model *Modified* (Dengan Penambahan *Obstacle*)

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi model *modified* (menggunakan *obstacle*), dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan *obstacle* yang terpasang di sekitar tube baris pertama memfokuskan temperatur udara inlet untuk menuju tube pada baris kedua, dalam hal ini dapat memaksimalkan perpindahan panas antara tube pada baris kedua dengan udara inlet, dan juga memaksimalkan perpindahan panas pada tube baris ketiga dan seterusnya. Berdasarkan visualisasi *contours of temperature* dengan adanya penambahan *obstacle* dapat dilihat antara model *baseline* dan model *modified*, temperature outlet dengan model *modified* lebih tinggi dibandingkan dengan model *baseline*, dan temperatur outlet paling tinggi terjadi pada obstacle dengan $S_1/l = 4$.



Gambar 4.8 Temperatur Outlet

Berdasarkan gambar 4.8 dan gambar 4.9, dapat dilihat adanya perbedaan antara temperatur outlet pada model *baseline* (dengan *obstacle*) dan model *modified* (dengan *obstacle*). Temperatur outlet model *baseline* lebih rendah daripada model *modified*. Dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya panjang *obstacle*, maka semakin tinggi pula temperatur outletnya.



Gambar 4.9 Temperatur Avg Outlet



4.3 Analisa Karakteristik Perpindahan Panas Pengaruh Penambahan *Obstacle* Pada Tiap Baris Tube

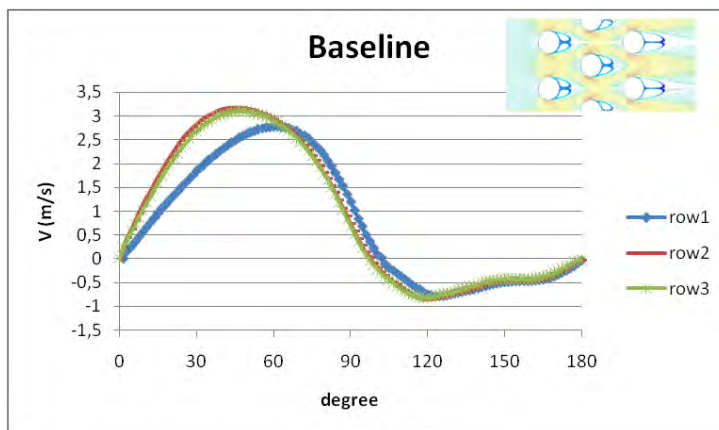
4.3.1 Kecepatan Lokal Tube Model Baseline

Berdasarkan pada gambar 4.10 mengenai grafik distribusi kecepatan lokal *tube* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dapat dilihat bahwa kecepatan lokal *tube* saat posisi aliran udara melintasi sudut 0° maka kecepatan lokal *tube* akan bernilai 0 m/s. Hal ini disebabkan adanya pengaruh *stagnation point* pada sudut tersebut, dimana aliran udara pada kecepatan tinggi harus berhenti sesaat ketika menumbuk *tube*. Selanjutnya aliran udara akan terpecah menjadi dua bagian aliran, yaitu aliran yang mengalir kebagian atas *tube* (*upper side*) dan yang mengalir kebagian bawah *tube* (*lower side*). Dimana, saat aliran melintasi kedua bagian tersebut akan terjadi peningkatan kecepatan (tekanan menurun, $\frac{\partial P}{\partial x} < 1$, *favorable pressure gradient*) sampai posisi aliran $\theta \cong 60^\circ (V_{maks})$ kondisi pada *tube* baris pertama. 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 $102^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

Pada trend grafik kecepatan lokal *tube* model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*), sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa antara *tube* pada baris pertama sampai ketiga memiliki kecepatan lokal yang berbeda-beda. *Tube* pada baris pertama menunjukkan adanya peningkatan kecepatan saat aliran melintasi *tube* hingga posisi θ



≈ 60° dan posisi aliran 60° ≤ θ ≤ 120°, kecepatan lokal *tube* mulai mengalami penurunan. Sedangkan pada *tube* baris ke dua menunjukkan adanya peningkatan kecepatan pada posisi aliran θ ≈ 46°, tetapi kecepatan *tube* pada baris kedua mengalami penurunan kecepatan saat posisi aliran melintasi sudut 46° ≤ θ ≤ 120°. Jika dilihat dari posisi aliran saat mengalami peningkatan kecepatan, maka *tube* pada baris kedua dan ketiga memiliki kecepatan lokal yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan lokal *tube* pada baris pertama.



Gambar 4.10 Distribusi Kecepatan Lokal *Tube* Model *Baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*)

4.3.2 Kecepatan Lokal *Tube* Model *Modified*

Pada trend grafik distribusi kecepatan lokal model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.11. *Tube* pada baris pertama menunjukkan adanya peningkatan kecepatan (tekanan menurun, $\frac{\partial P}{\partial x} < 1$, favorable pressure gradient) pada posisi aliran θ ≈ 60° namun pada saat 0° ≤ θ ≤ 120° *tube* pada baris ini memiliki kecepatan yang sama dengan *tube* baris pertama pada model *baseline*. Hal ini dikarenakan pada posisi tersebut belum adanya

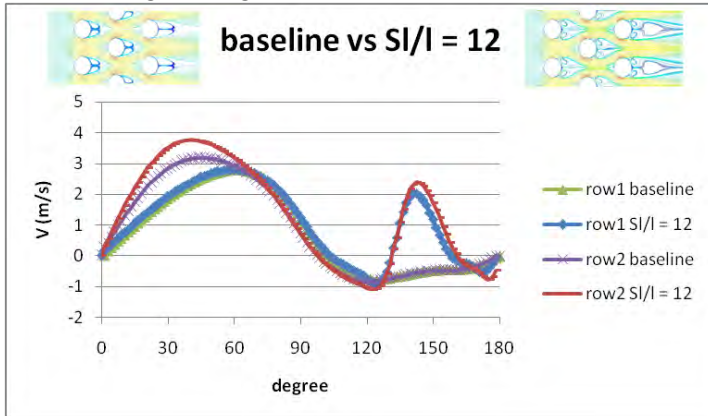


pengaruh dari penambahan obstacle. Saat posisi aliran $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$, kecepatan lokal tube, baik model *baseline* dan *modified* mulai mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan tekanan yang terjadi (*adverse pressure gradient*, $\frac{\partial P}{\partial x} > 1$). Kemudian pada model *modified* ($S_1/l = 12$), mengalami peningkatan kecepatan pada posisi aliran $120^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$. Saat posisi aliran $140^\circ \leq \theta \leq 170^\circ$, kecepatan lokal tube kembali mengalami penurunan. Sedangkan tube pada baris kedua, pada posisi aliran $0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$, mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan namun setelah melewati sudut 40° kecepatan lokal pada tube baris ini mengalami penurunan sampai $\theta \cong 120^\circ$. Kemudian mengalami peningkatan kecepatan kembali sampai posisi aliran pada $\theta \cong 146^\circ$ dan mengalami penurunan yang signifikan sampai posisi aliran pada $\theta \cong 175^\circ$. Untuk kedua baris tube, setelah aliran melintasi tube pada posisi sudut $\theta \cong 120^\circ$ (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 dengan tube.

Perbedaan distribusi kecepatan lokal tube antara model *baseline* (tanpa adanya penambahan obstacle) dan model *modified* (dengan adanya penambahan obstacle) menunjukkan bahwa antara tube pada baris pertama dan kedua untuk masing-masing memiliki kecepatan lokal tube yang berbeda-beda. Selain itu terjadi penundaan separasi sebesar 25° dari 120° pada model *baseline* dan 150° pada model *modified*, dikarenakan penambahan obstacle pada tube baris yang ditinjau, yaitu dikarenakan peningkatan kecepatan pada celah sempit antara tube dan posisi obstacle tube baris sebelumnya. Adanya penambahan obstacle sangat jelas terlihat pengaruhnya pada tube baris kedua, kecepatan lokal tube nya jauh lebih tinggi jika dibandingkan



dengan tanpa adanya penambahan obstacle (model baseline). Kenaikan kecepatan lokal tube setelah adanya penambahan obstacle masing-masing baris tube tercantum dalam tabel 4.1.



Gambar 4.11 Distribusi Kecepatan Lokal Tube Perbandingan antara Model Baseline (tanpa penambahan *obstacle*) dan Model *Modified S₁/l = 12* (dengan penambahan *obstacle*)

4.3.3 Nusselt number Lokal Tube Model *Baseline*

Berdasarkan gambar 4.12 mengenai grafik Nusselt number lokal tube untuk model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) dapat dilihat trend grafik Nusselt number lokal pada tube baris pertama sampai ketiga pada kecepatan inlet 5 m/s, yaitu pada saat $\theta \equiv 0^\circ$ Nusselt number lokal tube memiliki nilai tertinggi. Hal ini disebabkan adanya daerah stagnasi (*stagnation point*) pada sudut tersebut saat aliran udara memiliki selisih temperatur yang minimum antara dipermukaan tube dan udara disekitar tube.

Hal ini dapat dilihat seperti perumusan 4.1

$$\text{Nu}\theta = \frac{h \cdot D}{k_f} \quad h\theta = \frac{q''}{T_s - T_\infty} \quad (4.1)$$

Dimana :

Nu = Nusselt number

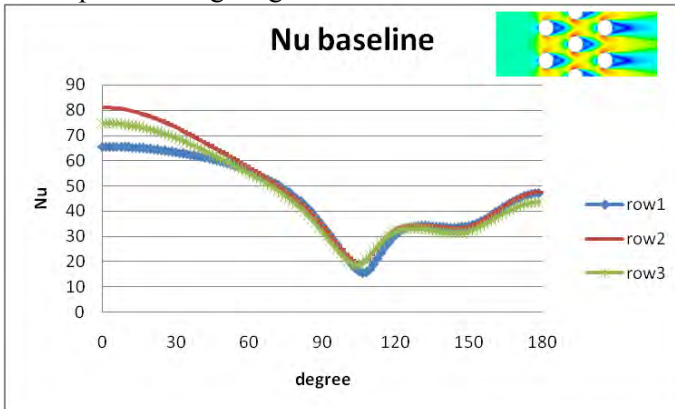
h = koefisien heat transfer

D = diameter tube



T_s = Temperatur Surface

T_∞ = Temperatur Lingkungan



Gambar 4.12 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model *Baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*)

Pada trend grafik Nusselt number lokal model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*), tube pada baris pertama sampai ketiga model *baseline* menunjukkan adanya penurunan nilai Nusselt number lokal saat aliran melintasi tube pada posisi aliran $\theta = 0^\circ$ hingga sudut mencapai $\theta \equiv 110^\circ$, dimana nilai koefisien konveksinya juga mengalami penurunan dan terjadinya separasi pada nilai Nusselt number minimum, saat posisi aliran $110^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, kecepatan lokal tube mulai mengalami peningkatan, yang diindikasikan dengan peningkatan nilai koefisien konveksi lokal tube. Adanya peningkatan tersebut pada model *baseline* ini dikarenakan terjadinya separation sehingga menyebabkan 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 temperature. Jika selisih temperatur udara disekitar tube dan permukaan tube kecil, maka nilai heat rate per area (q'') besar. Dapat disimpulkan bahwa nilai heat rate per area (q'') berbanding lurus terhadap nilai

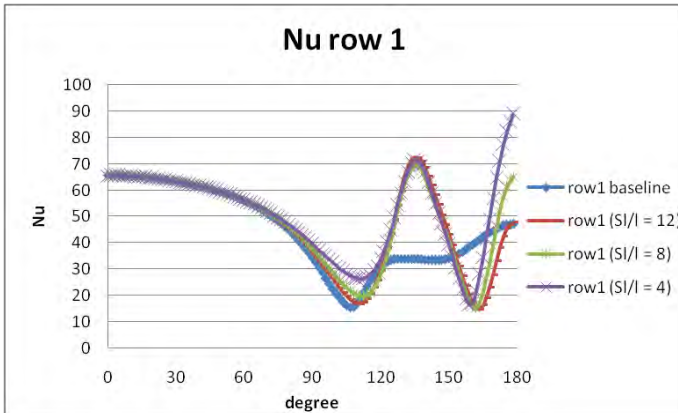


koefisien konveksi, maka nilai koefisien konveksi lokal meningkat menyebabkan nilai Nusselt number juga ikut meningkat.

4.3.4 Nusselt number Lokal Tube Model *Modified*

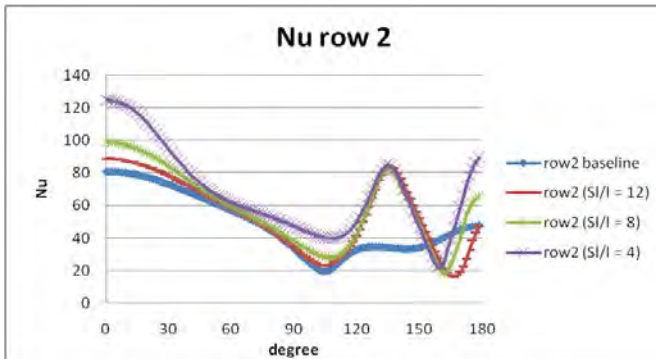
Pada trend grafik Nusselt number lokal tube *modified* (dengan penambahan *obstacle*) dengan ketiga variasi panjang *obstacle* pada baris pertama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13, titik stagnasi pada tube baris pertama ketiga model *modified* dan model *baseline* bernilai sama. Kemudian pada tube pada baris pertama ketiga model *modified* menunjukkan adanya penurunan nilai Nusselt number lokal, pada saat $0^\circ \leq \theta \leq 110^\circ$. Saat posisi aliran di $110^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$ kecepatan lokal tube baris pertama ketiga model tersebut mengalami peningkatan, kemudian mengalami penurunan hingga $\theta = 165^\circ$, kemudian mengalami peningkatan lagi hingga $\theta = 180^\circ$. Nilai nusselt number pada $\theta \equiv 110^\circ$ dan 165° mengalami peningkatan dikarenakan adanya percepatan aliran yang disebabkan oleh adanya vortex yang terbentuk.

Pada grafik menunjukkan adanya kenaikan Nusselt number lokal karena adanya penambahan *obstacle* yang mana mempengaruhi performa dari alat penukar panas tersebut. Nilai Nusselt number lokal pada tube baris pertama pada saat $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ memiliki nilai Nusselt number lokal yang sama semuanya, karena pada model *modified* untuk daerah ini belum ada pengaruh dari penambahan *obstacle* dan terjadi perbedaan setelah aliran memasuki celah seperti diantara tube dengan *obstacle*. Kenaikan Nusselt number lokal tube setelah adanya penambahn *obstacle* ketiga model *modified* lebih besar daripada model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*)



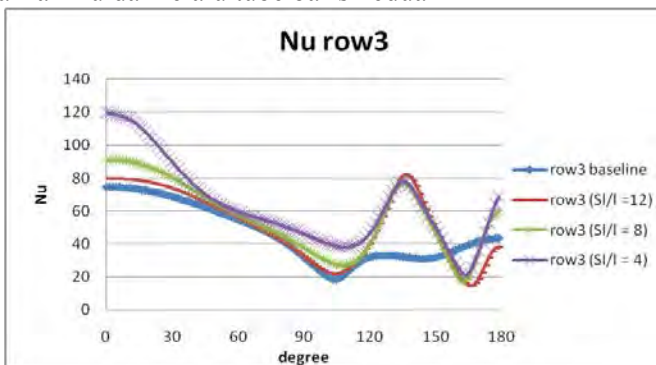
Gambar 4.13 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal *Modified* dengan *Baseline* Pada Baris Pertama

Berdasarkan gambar 4.14 grafik perbandingan Nusselt number ketiga model *modified* dan *baseline* pada baris kedua dapat terlihat adanya perbedaan Nusselt number pada titik stagnasi, pada titik stagnasi nilai dari Nusselt number pada baris kedua cenderung lebih tinggi daripada nilai dari Nusselt number pada baris pertama, hal ini dipengaruhi adanya kecepatan aliran udara yang lebih tinggi karena adanya penyempitan celah yang disebabkan oleh adanya *obstacle*, nilai Nusselt number tertinggi yaitu untuk model *modified* dengan $S_1/l = 4$ sedangkan terendah yaitu pada model *baseline*, hal ini disebabkan panjang dari *obstacle* dengan $S_1/l = 4$ dapat lebih baik dalam mengarahkan aliran fluida menuju tube pada baris berikutnya, dengan begitu kecepatan aliran fluida akan sangat cepat sehingga dapat memaksimalkan perpindahan panas yang terjadi pada tube row berikutnya.



Gambar 4.14 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal *Modified* dengan *Baseline* Pada Baris Kedua

Berdasarkan gambar 4.15 grafik perbandingan Nusselt number ketiga model *modified* dan *baseline* pada baris ketiga dapat terlihat trendline dari keempat model tersebut cenderung sama dengan trendline dari grafik pada baris kedua, yang membedakan hanya nilai dari Nusselt number yang sedikit lebih rendah daripada baris kedua, hal ini dikarenakan aliran yang sudah semakin berolak karena menumbuk tube baris kedua sehingga kecepatan aliran sudah mulai lebih rendah dibandingkan saat aliran fluida melalui tube baris kedua



Gambar 4.15 Perbandingan Distribusi Nusselt number Lokal *Modified* dengan *Baseline* Pada Baris Ketiga

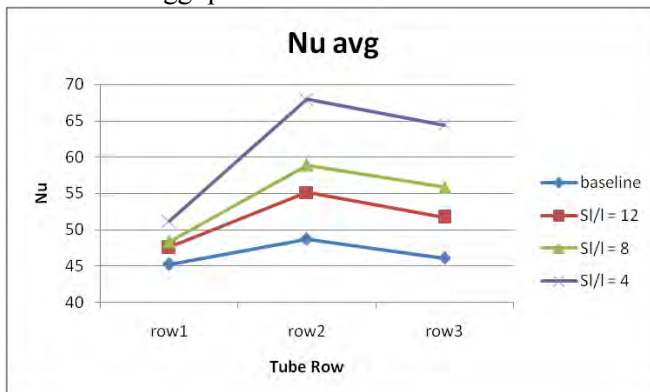


Tabel 4.1 Kisaran Kenaikan Nusselt number Lokal Tube Akibat Adanya Penambahan *Obstacle*

	Tube pada baris ke-		
	1	2	3
$S_1/l = 12$	5,2%	13,2%	12,3%
$S_1/l = 8$	6,9%	20,9%	21,1%
$S_1/l = 4$	13,1%	39,4%	39,8%

4.3.5 Nusselt Number Rata-Rata

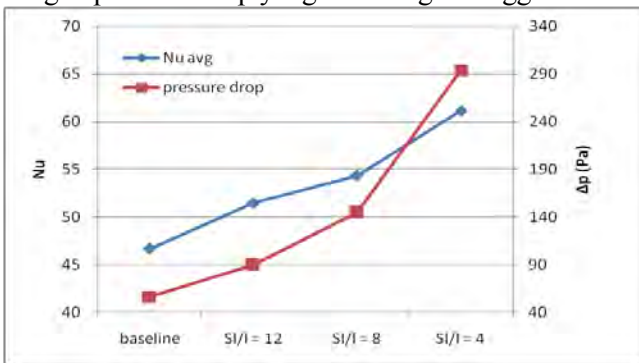
Berdasarkan gambar 4.16 mengenai nilai Nusselt number rata-rata lokal tube terhadap variasi panjang *rectangular obstacle*, dapat dilihat untuk model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) menunjukkan kenaikan yang signifikan mengenai nilai Nusselt number rata-rata untuk masing-masing baris tube. Kenaikan nilai Nusselt number rata-rata lokal tube pada baris kedua untuk model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) mengalami kenaikan yang signifikan dari model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*), untuk model *modified* dengan $S_1/l = 4$ mengalami peningkatan paling besar dari kedua model *modified* yang lain. Semakin panjang *obstacle*-nya terlihat bahwa semakin tinggi pula nilai Nusselt number lokal tube-nya.



Gambar 4.16 Nusselt Number Rata-Rata Lokal Tube



Berdasarkan gambar 4.17, dapat dilihat bahwa Nusselt number rata-rata pada model *baseline* dan *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) memiliki trendline grafik yang semakin naik seiring dengan bertambahnya panjang dari *rectangular obstacle*. Dapat disimpulkan bahwa semakin panjang *obstacle*-nya maka semakin besar pula perpindahan panas yang terjadi. Sedangkan untuk pressure dropnya, trendline grafiknya mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya panjang *obstacle*. Dapat disimpulkan bahwa, dari ketiga jenis model *modified* (dengan penambahan *obstacle*), model *modified* dengan $S_1/l = 8$ dapat menghasilkan perpindahan panas yang baik, dengan pressure drop yang tidak begitu tinggi.



Gambar 4.17 Nusselt Number Rata-Rata dan Pressure Drop

Tabel 4.2 Kisaran Kenaikan Nusselt number rata-rata Tube Akibat Adanya Penambahan *Obstacle*

<i>Obstacle</i>		
$S_1/l = 12$	$S_1/l = 8$	$S_1/l = 4$
10,3%	16,4%	31%

Tabel 4.3 Kisaran Kenaikan Pressure Drop Akibat Adanya Penambahan *Obstacle*

<i>Obstacle</i>		
$S_1/l = 12$	$S_1/l = 8$	$S_1/l = 4$
60%	159%	425%



halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil studi numerik yang dilakukan terhadap variasi dari permodelan *baseline* dan *modified* dengan penambahan *obstacle* dengan variasi panjang dari *rectangular obstacle* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Distribusi temperatur pada model *baseline* lebih rendah dengan indikasi temperatur outlet yang lebih rendah dibandingkan dengan model *modified* dengan adanya penambahan *obstacle*.
2. Nilai Nusselt number rata-rata yang dihasilkan dari model *modified* dengan adanya penambahan *obstacle* meningkat, yakni besar peningkatannya berkisar antara 10,3-31% lebih tinggi dari pada Nusselt number pada model *baseline*.
3. Perpindahan panas yang terjadi pada model *modified* dengan adanya penambahan *obstacle* lebih baik dibandingkan dengan model *baseline*. Dilihat dari kenaikan nilai Nusselt number dan didukung juga oleh visualisasi kontur kecepatan dan kontur temperatur
4. Dengan adanya penambahan *obstacle*, maka pressure drop akan mengalami peningkatan, sebesar 60-425%, lebih tinggi daripada model *baseline*.
5. Dilihat dari nilai Nusselt number rata-rata dan pressure drop, model *modified* dengan $Sl/l=8$ menghasilkan performa yang lebih baik daripada kedua model yang lainnya.



5.2 Saran

Dari hasil studi numerik yang dilakukan terhadap variasi dari permodelan *baseline* dan *modified* dengan penambahan *obstacle* dengan variasi panjang dari *rectangular obstacle* saran yang bisa digunakan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Perlu dilakukan penelitian menggunakan CFD secara 3D untuk mendapatkan penelitian yang mendekati kondisi sebenarnya.
2. Perlu dilakukan modifikasi bentuk yang lain dari *obstacle*, jarak antara *obstacle* dengan tube, derajat posisi peletakan tube dan lain sebagainya.
3. Perlu dilakukan modifikasi dalam penentuan *boundary condition inlet* dan *outlet* pada *software* Fluent untuk mendapatkan hasil penelitian yang mendekati kondisi sebenarnya.



DAFTAR PUSTAKA

- Bevinhalli (2013) “*Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer over a Bank of Oval-Tubes Heat Exchanger with Vortex Generators*”. Anbar Journal for Engineering Sciences 5 (1), 88-108.
- Chairunnisa dan Prabowo (2013) “*Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CPs) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan $l/D = 0.25$, pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered*”. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- Gupta, Munish. (2010) “*Numerical Study of Heat Transfer Enhancement In A Plate-Fin Heat Exchanger Using Rectangular Winglet Type Vortex Generator*”. Departemen Of Mechanical Engineering National Institute of Technology, 1-184
- He, Y.L., Chu, Pan, Tao, W.Q., Zhang, Y.W., Xie, Tao, (2012). “*Analysis of heat transfer and pressure drop for fin and tube heat exchangers with rectangular winglet type vortex generators*”. Applied Thermal Engineering 30, 1-14.
- Incropera, Frank P., Dewitt, David P., Bergman, Theodore L., and Lavine Adrienne S, (2002) “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, Edisi Kelima, John Wiley & Sons, Inc, Singapore
- Jiangsu Changfa Refrigeration Co., Ltd. (2014) Air Exchanger, <URL:<http://www.ecvv.com/product/2115407.html>
- Khan, W.A., Culham, J.R., Yovanovic, M.M, (2006). “*Convection heat transfer from tube banks in crossflow:*



Analytical approach". International Journal of Heat and Mass Transfer 49, 1-8

Ramadhan, Abdulmajeed A. (2012) "*Numerical Simulation On Fin and Oval Tube Heat Exchanger With Longitudinal Vortex Generators*". Anbar Journal for Engineering Sciences 5 (1), 88-108.

Shah, R. K. dan Sekulic, Dusan P. (2003) "*Fundamentals of Heat Exchanger*". Canada: John Willey and Sons, 2003

Shanghai Shenglin M&E Technology Co., Ltd. (2014), Tube Fin Heat Exchanger, <URL:<http://cnshenglintec.en.made-in-china.com>>

Shanghai Shenglin M&E Technology Co., Ltd. (2014) Straight fin and Wavy Fin, <URL:<http://www.shenglintec.com/Html/heat/134055529.html>>



RIWAYAT PENULIS



Penulis dilahirkan di Sragen pada tanggal 08 September 1990 dengan nama Hastama Arinta Fanny. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bpk Partono dan Ibu Sri Nuryati. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu di SDN 008 Balikpapan, SMP Patra Dharma 2 Balikpapan, SMAN 5 Balikpapan, dan D3 Teknik Mesin FTI – ITS Surabaya. Setelah lulus studi Diploma pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi ke tahap sarjana

melalui program Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis diterima pada bulan Januari 2012 dan menyelesaikan studi pada bulan Juli 2014. Penulis memiliki hobi bermain futsal, berenang, badminton, dan juga bersepeda.

Banyak kegiatan pelatihan – pelatihan dan seminar – seminar yang diikutinya selama menjadi mahasiswa D3 Teknik Mesin FTI – ITS. Untuk mengisi kekosongan penulis senang belajar *Software* Autocad, Fluent, Solidwork, dan lain-lain.

hastamafanny@yahoo.com

hastamafanny@gmail.com



halaman ini sengaja dikosongkan



LAMPIRAN

➤ *Grid independency*

- Model modified (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 12$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu avg
Meshing A	24288	54,68
Meshing B	38352	59,23
Meshing C	68520	51,47
Meshing D	77160	50,86

- Model modified (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 8$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu avg
Meshing A	24912	58,95
Meshing B	39456	59,09
Meshing C	68520	54,35
Meshing D	77160	53,76

- Model modified (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 4$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu avg
Meshing A	22068	67,68
Meshing B	38548	58,76
Meshing C	71880	61,16
Meshing D	88668	60,82



- Data permodelan *Baseline* (tanpa penambahan *obstacle*)

Baseline	row 1		row 2		row 3	
Sudut	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu
0	0	65,54842	0	81,01087	0	74,74847
2	0,155925	65,58267	0,270331	81,00235	0,244049	74,7405
3	0,255984	65,59593	0,443409	80,96319	0,399937	74,7177
5	0,357831	65,58657	0,616816	80,86908	0,556234	74,66622
6	0,459523	65,52817	0,789332	80,74472	0,712962	74,59395
8	0,560224	65,45281	0,960376	80,51987	0,868202	74,42398
9	0,660061	65,37958	1,126478	80,20409	1,019863	74,21204
11	0,759077	65,30077	1,287602	79,87567	1,168305	73,99955
12	0,857113	65,21616	1,444306	79,53815	1,313857	73,77933
14	0,954194	65,127	1,596191	79,1693	1,456016	73,5328
15	1,050112	65,02695	1,74254	78,76615	1,594179	73,25974
17	1,144903	64,92158	1,883041	78,33323	1,728091	72,96276
18	1,2387	64,80464	2,017268	77,86922	1,85733	72,63911
20	1,330924	64,6594	2,145155	77,37778	1,981748	72,29044
21	1,421011	64,49069	2,266002	76,8492	2,100622	71,90755
23	1,508987	64,31177	2,380258	76,30258	2,214243	71,50581
24	1,594997	64,12662	2,487952	75,72387	2,32249	71,072
26	1,679059	63,93506	2,587573	75,08447	2,42395	70,58252
27	1,761065	63,73493	2,67812	74,40351	2,517636	70,05322
29	1,840862	63,52457	2,761328	73,72496	2,604923	69,52062
30	1,918283	63,30304	2,836706	73,01516	2,685263	68,95576
32	1,99324	63,0711	2,903631	72,27924	2,758042	68,36336
33	2,065601	62,82766	2,962236	71,52225	2,823146	67,7446
35	2,135302	62,5746	3,012988	70,7518	2,880792	67,10686
36	2,202326	62,31025	3,056301	69,97352	2,931255	66,45301
38	2,266376	62,03374	3,092966	69,19809	2,97473	65,78785



39	2,328128	61,76008	3,123505	68,42526	3,012127	65,12471
41	2,387176	61,46957	3,147996	67,64767	3,043712	64,45588
42	2,442717	61,15714	3,165569	66,84829	3,068983	63,76939
44	2,494497	60,82498	3,175922	66,03139	3,086993	63,05484
45	2,54243	60,47488	3,179553	65,20642	3,09778	62,32318
47	2,58646	60,10871	3,177162	64,38141	3,1022	61,58454
48	2,626422	59,72473	3,169202	63,55731	3,100574	60,84097
50	2,662026	59,32197	3,156057	62,73359	3,093657	60,09798
51	2,693331	58,90323	3,138089	61,91572	3,081008	59,3453
53	2,719964	58,45992	3,11642	61,11353	3,064139	58,60843
54	2,742264	58,00815	3,090085	60,30134	3,043018	57,86821
56	2,760106	57,53838	3,058226	59,47746	3,016315	57,11145
57	2,772401	57,03699	3,021194	58,64889	2,983878	56,34394
59	2,778624	56,50566	2,979452	57,81673	2,946199	55,56921
60	2,778649	55,94517	2,932971	56,97738	2,903399	54,78531
62	2,772295	55,35474	2,881733	56,12891	2,855458	53,98963
63	2,75929	54,73159	2,825432	55,26764	2,802015	53,17777
65	2,739169	54,0732	2,764466	54,39773	2,743309	52,35275
66	2,711637	53,37857	2,698373	53,51127	2,678963	51,50789
68	2,676117	52,64273	2,627905	52,62145	2,60949	50,65341
69	2,632678	51,87215	2,552243	51,7046	2,534623	49,77628
71	2,580704	51,0533	2,46953	50,74576	2,452688	48,85723
72	2,520627	50,19816	2,379468	49,74952	2,362729	47,89406
74	2,452054	49,29335	2,281937	48,71335	2,264669	46,88875
75	2,373477	48,32182	2,177059	47,63279	2,158602	45,83494
77	2,283877	47,28004	2,06457	46,52046	2,044103	44,74293
78	2,183499	46,16827	1,946488	45,34498	1,923389	43,58877
80	2,071742	44,98555	1,817866	44,09506	1,791793	42,35554
81	1,95141	43,74342	1,681986	42,775	1,652202	41,04721



83	1,817263	42,40328	1,536083	41,39364	1,502066	39,6739
84	1,676124	40,96768	1,384643	39,94195	1,345952	38,2244
86	1,524514	39,44065	1,22714	38,41176	1,183615	36,69496
87	1,360492	37,82315	1,065081	36,81303	1,01697	35,0937
89	1,192493	36,1192	0,900709	35,15056	0,848176	33,4245
90	1,020207	34,32352	0,736988	33,43616	0,681163	31,70893
92	0,846552	32,4519	0,576035	31,67273	0,518175	29,94085
93	0,675345	30,51723	0,421172	29,89308	0,362483	28,15907
95	0,511034	28,54303	0,275544	28,11937	0,218172	26,39307
96	0,356621	26,54566	0,141774	26,37633	0,087994	24,66341
98	0,216465	24,57104	0,03134	24,69859	-0,0432	23,02232
99	0,093991	22,64131	-0,09438	23,13263	-0,13929	21,48844
101	0,02801	20,79048	-0,18704	21,6615	-0,22947	20,06752
102	-0,10816	19,04971	-0,27425	20,44328	-0,31232	19,08444
104	-0,18457	17,44816	-0,35319	19,70561	-0,38488	18,52804
105	-0,25239	16,27297	-0,42404	19,42583	-0,44862	18,55397
107	-0,30958	15,56237	-0,48752	19,85304	-0,50944	19,33945
108	-0,36376	15,74467	-0,55145	20,93645	-0,57152	20,7472
110	-0,42176	16,98509	-0,61441	22,53119	-0,62908	22,50981
111	-0,48131	18,9633	-0,67275	24,35927	-0,68135	24,30463
113	-0,54091	21,21731	-0,72555	26,15539	-0,72893	26,01867
114	-0,60101	23,45774	-0,77196	27,83917	-0,76783	27,64742
116	-0,65754	25,63063	-0,80903	29,41879	-0,79622	29,08937
117	-0,70672	27,63449	-0,83511	30,80506	-0,81563	30,31071
119	-0,74825	29,4156	-0,85226	31,96684	-0,82252	31,2535
120	-0,77634	30,8857	-0,8579	32,87084	-0,82011	31,92601
122	-0,79193	32,00775	-0,85384	33,52021	-0,81086	32,42769
123	-0,79602	32,87181	-0,84185	33,9818	-0,79461	32,74728
125	-0,78755	33,45366	-0,82369	34,25304	-0,7753	32,91137



126	-0,77075	33,78534	-0,80343	34,41863	-0,75601	32,98179
128	-0,75052	33,92939	-0,78206	34,47828	-0,73735	33,00536
129	-0,73072	33,99412	-0,7621	34,49264	-0,71893	32,97806
131	-0,71249	34,01562	-0,74354	34,4771	-0,69926	32,92445
132	-0,69571	34,04662	-0,72524	34,46743	-0,67612	32,77089
134	-0,67785	34,0324	-0,70418	34,38886	-0,65162	32,56216
135	-0,65936	33,98475	-0,68099	34,24535	-0,62524	32,3205
137	-0,64011	33,90979	-0,65667	34,06097	-0,5974	32,04093
138	-0,61958	33,83243	-0,63132	33,87734	-0,56986	31,75341
140	-0,5974	33,70933	-0,60507	33,66043	-0,54371	31,50523
141	-0,57578	33,60063	-0,5803	33,4785	-0,51924	31,3009
143	-0,55478	33,52451	-0,55726	33,34644	-0,4976	31,16429
144	-0,53516	33,49614	-0,5369	33,29199	-0,47922	31,11964
146	-0,51753	33,53024	-0,51948	33,3232	-0,4643	31,1755
147	-0,50268	33,65247	-0,50563	33,46306	-0,453	31,34297
149	-0,49082	33,87775	-0,49529	33,72069	-0,4451	31,6273
150	-0,48191	34,21401	-0,48826	34,10026	-0,44013	32,02581
152	-0,47568	34,66123	-0,48401	34,59658	-0,43748	32,52988
153	-0,47188	35,22049	-0,48212	35,20499	-0,43641	33,13
155	-0,46996	35,89384	-0,48208	35,92555	-0,43611	33,81134
156	-0,46887	36,6694	-0,48285	36,75156	-0,4358	34,56189
158	-0,46741	37,5264	-0,483	37,65722	-0,43451	35,36997
159	-0,46437	38,44063	-0,48126	38,61568	-0,4311	36,21226
161	-0,45868	39,38622	-0,4765	39,59962	-0,42466	37,0633
162	-0,44957	40,33923	-0,468	40,58639	-0,4146	37,90377
164	-0,43657	41,28908	-0,45531	41,56847	-0,4006	38,72196
165	-0,41889	42,23123	-0,43749	42,54326	-0,38234	39,51625
167	-0,39567	43,13658	-0,41359	43,47233	-0,35925	40,27265
168	-0,36667	43,98648	-0,38353	44,34194	-0,33117	40,97222



170	-0,33171	44,75737	-0,34717	45,12586	-0,29818	41,60247
171	-0,29147	45,42486	-0,30527	45,80909	-0,26081	42,14409
173	-0,24655	46,01533	-0,25828	46,41157	-0,2197	42,61503
174	-0,19677	46,50038	-0,20617	46,90653	-0,17481	43,00096
176	-0,14344	46,86341	-0,15031	47,2759	-0,12715	43,28869
177	-0,08818	47,10245	-0,09244	47,51938	-0,07797	43,47887
179	-0,03054	47,21285	-0,03194	47,63273	-0,02718	43,56684
180	-0,0305	47,21222	-0,03193	47,63272	-0,02709	43,56675

- Data permodelan *Modified* (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 12$

SI/l = 12	row 1		row 2		row 3	
sudut	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu
0	0	65,46877	0	88,61948	0	79,85211
2	0,154472	65,50294	0,339865	88,58665	0,291489	79,83527
3	0,254274	65,51841	0,562385	88,55584	0,482592	79,84218
5	0,355797	65,51198	0,78523	88,44144	0,67499	79,81458
6	0,457216	65,45701	1,004778	88,28605	0,865706	79,77351
8	0,557677	65,38506	1,223709	88,09142	1,058443	79,70984
9	0,657309	65,31564	1,437686	87,73502	1,247315	79,50377
11	0,75616	65,24104	1,643655	87,29392	1,431696	79,28834
12	0,854077	65,161	1,842021	86,8367	1,612571	79,08306
14	0,951082	65,07662	2,033359	86,36618	1,790062	78,86541
15	1,046977	64,98177	2,217241	85,86113	1,963363	78,61768
17	1,141787	64,88153	2,392669	85,3119	2,131637	78,33508
18	1,235652	64,77025	2,559125	84,72291	2,294224	78,01758
20	1,328008	64,63115	2,71587	84,09074	2,450547	77,664
21	1,418283	64,46854	2,862886	83,4255	2,599894	77,27074
23	1,506494	64,2957	2,999307	82,71148	2,741715	76,8362



24	1,592786	64,1166	3,124986	81,96476	2,875058	76,35345
26	1,677173	63,93109	3,240961	81,19625	2,999974	75,83631
27	1,759546	63,73699	3,345765	80,36488	3,11635	75,27485
29	1,839752	63,53259	3,437947	79,47043	3,222032	74,63845
30	1,917612	63,31679	3,517028	78,53107	3,316115	73,94593
32	1,993039	63,09046	3,585213	77,59232	3,398855	73,21797
33	2,065886	62,85214	3,642218	76,6211	3,471595	72,47357
35	2,136079	62,60401	3,686738	75,61069	3,532788	71,67442
36	2,203614	62,34423	3,719713	74,5805	3,581592	70,83135
38	2,268116	62,07072	3,741557	73,53527	3,61899	69,96035
39	2,330326	61,80097	3,755613	72,52734	3,645555	69,07182
41	2,389874	61,51449	3,761977	71,5161	3,664043	68,20257
42	2,445937	61,20598	3,758358	70,47533	3,673641	67,30832
44	2,498255	60,87762	3,74465	69,41819	3,672447	66,37764
45	2,546765	60,53167	3,72224	68,35654	3,660876	65,42805
47	2,591446	60,17029	3,692066	67,29503	3,640178	64,46649
48	2,632148	59,79201	3,6547	66,23908	3,610924	63,49653
50	2,66865	59,39633	3,611256	65,19532	3,574241	62,52887
51	2,700939	58,98512	3,562196	64,16537	3,53043	61,56091
53	2,72881	58,55205	3,509875	63,17114	3,481463	60,61675
54	2,75235	58,10827	3,453079	62,17142	3,428171	59,6836
56	2,77169	57,65137	3,39047	61,16317	3,369019	58,73724
57	2,785847	57,16535	3,322746	60,15855	3,303647	57,78327
59	2,794192	56,65053	3,250588	59,15913	3,232809	56,82904
60	2,796552	56,10765	3,174435	58,16372	3,15718	55,87512
62	2,792872	55,53807	3,09402	57,16716	3,07667	54,91681
63	2,782927	54,93897	3,010256	56,17773	2,991933	53,95937
65	2,766388	54,30825	2,92257	55,18294	2,902824	52,99608
66	2,742889	53,64444	2,832244	54,20389	2,810281	52,04011



68	2,712132	52,94589	2,738644	53,21626	2,714111	51,07808
69	2,673856	52,21114	2,64003	52,20177	2,612947	50,0911
71	2,628004	51,4398	2,535148	51,15847	2,505207	49,0725
72	2,574416	50,63472	2,425069	50,0978	2,391941	48,0333
74	2,513387	49,79413	2,309522	49,02356	2,272324	46,97486
75	2,444007	48,90125	2,190601	47,91369	2,149397	45,88152
77	2,365094	47,9482	2,064277	46,77154	2,018544	44,75011
78	2,276375	46,93661	1,933366	45,58073	1,882236	43,56796
80	2,178097	45,86409	1,793258	44,34282	1,737254	42,34059
81	2,070114	44,73709	1,649233	43,0755	1,587831	41,07323
83	1,955158	43,56044	1,500031	41,74823	1,432899	39,74393
84	1,827698	42,29979	1,345651	40,3709	1,272977	38,36333
86	1,69491	40,96186	1,18764	38,94663	1,109763	36,9331
87	1,553717	39,54909	1,027342	37,47861	0,944902	35,45617
89	1,40103	38,06831	0,866544	35,97544	0,780046	33,94001
90	1,245931	36,523	0,707199	34,4446	0,618236	32,40359
92	1,087385	34,90864	0,551058	32,89864	0,461092	30,84622
93	0,927274	33,23742	0,400702	31,36368	0,311087	29,30346
95	0,768824	31,52132	0,258133	29,85762	0,170931	27,79922
96	0,614456	29,7686	0,125906	28,40388	0,047343	26,35789
98	0,467487	28,00865	0,027122	27,03065	-0,08492	25,01499
99	0,330554	26,25699	-0,11622	25,77652	-0,18906	23,80157
101	0,205925	24,54541	-0,21685	24,65488	-0,28436	22,7033
102	0,095669	22,89793	-0,30978	23,69472	-0,37472	22,0227
104	-0,02152	21,34207	-0,39882	23,19715	-0,45881	21,7017
105	-0,09192	19,91645	-0,48252	23,05318	-0,53366	21,77915
107	-0,16435	18,62145	-0,558	23,30682	-0,60036	22,40343
108	-0,23308	17,65678	-0,62656	24,08311	-0,66428	23,47632
110	-0,29511	17,09764	-0,69207	25,27567	-0,72404	24,91677



111	-0,35289	17,01157	-0,75333	26,80198	-0,77768	26,60158
113	-0,4094	17,64507	-0,808	28,59613	-0,82497	28,41442
114	-0,46981	18,95995	-0,856	30,55157	-0,86461	30,33886
116	-0,53098	20,83863	-0,90142	32,70531	-0,89762	32,36254
117	-0,59385	23,17711	-0,94681	35,15595	-0,93436	34,60281
119	-0,66339	25,98988	-0,99593	38,04475	-0,98176	37,24526
120	-0,74058	29,39597	-1,04608	41,47307	-1,03623	40,41686
122	-0,81965	33,40996	-1,08541	45,49278	-1,0826	44,03077
123	-0,88736	38,16426	-1,09819	49,96475	-1,10935	47,95634
125	-0,91356	43,51735	-1,07071	54,76685	-1,10788	52,34553
126	-0,87655	49,0008	-0,9898	59,64259	-1,05867	56,93578
128	-0,75475	54,43558	-0,82991	64,57413	-0,95184	61,54812
129	-0,53153	59,73412	-0,59048	69,41814	-0,77113	66,16615
131	-0,22732	65,17738	-0,26966	75,20273	-0,50374	71,32875
132	0,242081	68,76535	0,21636	78,76153	-0,15369	75,63359
134	0,589669	71,56342	0,583273	81,99856	0,302729	79,57186
135	1,062421	72,48324	1,101529	83,33075	0,744348	81,48888
137	1,418318	72,265	1,517242	83,51813	1,197076	82,03538
138	1,7116	71,00718	1,884903	82,51425	1,592098	81,20288
140	1,91338	68,53606	2,156887	79,8359	1,896186	78,66602
141	2,007887	65,39133	2,318732	76,49218	2,081555	74,97323
143	2,017681	61,85118	2,390686	72,51313	2,156063	70,4243
144	1,942801	58,15415	2,364331	68,30085	2,115227	65,66371
146	1,80525	54,46689	2,268727	64,16081	1,995394	61,03954
147	1,628745	50,77866	2,122754	60,11358	1,823521	56,63914
149	1,403	47,02678	1,945062	56,14454	1,624236	52,44432
150	1,176529	43,12294	1,721507	52,09104	1,385612	48,29825
152	0,917564	39,16777	1,487926	47,93808	1,161578	44,17696
153	0,662828	35,20273	1,225538	43,78927	0,907155	40,13905



155	0,429849	31,24851	0,951804	39,64316	0,667934	36,14314
156	0,225967	27,3913	0,687618	35,53563	0,44752	32,20851
158	0,063786	23,75851	0,441017	31,53967	0,253098	28,39726
159	-0,06778	20,41147	0,226246	27,75182	0,094289	24,80838
161	-0,15127	17,49718	0,075762	24,26511	0,035645	21,50656
162	-0,20846	15,48617	-0,13185	21,16294	-0,1187	18,53603
164	-0,24619	14,96391	-0,23342	18,49598	-0,17655	16,23703
165	-0,27146	16,38562	-0,31386	16,88468	-0,21208	14,74407
167	-0,30379	19,19724	-0,37285	16,35274	-0,23303	14,74151
168	-0,36035	23,04469	-0,41993	17,15033	-0,25256	16,22352
170	-0,4412	27,838	-0,47587	19,2419	-0,28435	18,99758
171	-0,51625	33,1812	-0,55899	22,53854	-0,33106	22,82733
173	-0,54258	38,34979	-0,67126	27,20178	-0,37008	27,30166
174	-0,49906	42,55923	-0,75603	32,95155	-0,36874	31,68064
176	-0,39445	45,46034	-0,75815	38,43091	-0,30935	35,19751
177	-0,25924	47,05956	-0,67142	43,34068	-0,21425	37,3585
179	-0,07937	47,89187	-0,48276	47,18022	-0,06856	38,48479
180	-0,07916	47,88187	-0,48246	47,17322	-0,06556	38,48279

- Data permodelan *Modified* (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 8$

Sl/l = 8	row 1		row 2		row 3	
Sudut	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu
0	0	65,47343	0	98,76645	0	91,28766
2	0,153625	65,50745	0,447692	98,64872	0,388968	91,16991
3	0,253477	65,5246	0,744043	98,59095	0,659692	91,1542
5	0,354985	65,51999	1,038647	98,4199	0,928678	91,07264
6	0,456426	65,46677	1,32926	98,176	1,19553	90,93763
8	0,556915	65,39563	1,613567	97,86543	1,458149	90,75458



9	0,656574	65,32702	1,893711	97,4975	1,719241	90,53671
11	0,755458	65,25329	2,164442	96,93718	1,973439	90,15497
12	0,853418	65,17414	2,420648	96,22605	2,216993	89,67073
14	0,950466	65,09052	2,662603	95,47314	2,450358	89,16642
15	1,046416	64,99661	2,891438	94,7021	2,674327	88,64797
17	1,141273	64,89681	3,106911	93,88965	2,888263	88,09001
18	1,235186	64,78633	3,30758	93,01609	3,090775	87,4757
20	1,327604	64,64814	3,492568	92,08372	3,280438	86,79957
21	1,417945	64,48603	3,660813	91,08897	3,456446	86,06586
23	1,506214	64,31349	3,812479	90,05023	3,6177	85,27072
24	1,592562	64,13465	3,946707	88,95113	3,763979	84,42482
26	1,677007	63,94944	4,063597	87,8131	3,894175	83,51413
27	1,759442	63,75572	4,165062	86,65673	4,008349	82,55953
29	1,839717	63,55177	4,249504	85,42773	4,108077	81,57336
30	1,917655	63,33653	4,314753	84,12441	4,190235	80,49266
32	1,99317	63,11083	4,362068	82,78571	4,253996	79,35127
33	2,066116	62,87327	4,392117	81,41999	4,300192	78,16876
35	2,136422	62,62601	4,408166	80,06785	4,330644	76,97128
36	2,204086	62,36729	4,409093	78,69008	4,346421	75,75537
38	2,268743	62,0951	4,398375	77,35824	4,347951	74,53346
39	2,331112	61,82643	4,378187	76,0513	4,339307	73,35578
41	2,39085	61,5417	4,346057	74,71854	4,319735	72,16699
42	2,447151	61,23535	4,301871	73,37848	4,287259	70,95022
44	2,499742	60,90934	4,247754	72,05179	4,243377	69,73226
45	2,548566	60,56607	4,18564	70,74668	4,190086	68,52516
47	2,593606	60,20762	4,116469	69,4653	4,129026	67,33631
48	2,634707	59,83257	4,042282	68,21951	4,060989	66,16782
50	2,671683	59,44099	3,963318	66,99974	3,988384	65,03392
51	2,704476	59,03005	3,882775	65,84374	3,910819	63,9191



53	2,732973	58,60408	3,801046	64,72043	3,832395	62,87254
54	2,757123	58,16528	3,715913	63,60213	3,752291	61,84165
56	2,777191	57,71513	3,627232	62,49907	3,668139	60,81129
57	2,792275	57,23707	3,536042	61,41999	3,580442	59,79638
59	2,801673	56,7305	3,443131	60,36507	3,490236	58,80201
60	2,8052	56,19665	3,348404	59,32805	3,398187	57,82741
62	2,802851	55,63739	3,252491	58,31457	3,304009	56,86596
63	2,794434	55,05045	3,155469	57,32045	3,208606	55,92594
65	2,779692	54,43373	3,058293	56,35715	3,111665	54,99869
66	2,758224	53,78547	2,96064	55,40717	3,014534	54,10215
68	2,729882	53,10574	2,860224	54,44466	2,916271	53,20715
69	2,694233	52,39077	2,756055	53,47679	2,814163	52,29244
71	2,651527	51,64486	2,649835	52,51869	2,708299	51,37651
72	2,601287	50,86083	2,539683	51,54391	2,600206	50,46841
74	2,544169	50,05115	2,427244	50,55726	2,488325	49,52897
75	2,479663	49,20222	2,310528	49,57354	2,372833	48,58935
77	2,406448	48,29726	2,191571	48,56578	2,253321	47,63387
78	2,324108	47,33857	2,065661	47,52319	2,129838	46,64981
80	2,233014	46,3292	1,93596	46,46772	1,999623	45,633
81	2,133331	45,26901	1,802626	45,38431	1,86601	44,60219
83	2,025985	44,16481	1,664796	44,26561	1,727919	43,53106
84	1,910817	43,00922	1,522728	43,11521	1,585269	42,42874
86	1,78842	41,78897	1,37723	41,93511	1,438806	41,29361
87	1,658076	40,50191	1,228891	40,72816	1,289036	40,1259
89	1,521987	39,15585	1,079218	39,50335	1,137329	38,93473
90	1,378345	37,76347	0,928847	38,25363	0,984378	37,71408
92	1,23284	36,3243	0,779005	36,99316	0,831389	36,47697
93	1,085584	34,84088	0,631612	35,73737	0,680367	35,23774
95	0,938404	33,32403	0,487884	34,49536	0,532493	34,00211



96	0,793214	31,78139	0,349202	33,28605	0,389391	32,79058
98	0,652861	30,23713	0,217587	32,14519	0,253583	31,63728
99	0,518951	28,69389	0,094946	31,07778	0,126384	30,53808
101	0,39364	27,18816	-0,03624	30,12357	-0,02634	29,5399
102	0,278571	25,73362	-0,13566	29,29928	-0,11033	28,65551
104	0,1746	24,35974	-0,23359	28,64871	-0,21003	27,93437
105	0,082693	23,09154	-0,32404	28,13046	-0,30205	27,33679
107	-0,01835	21,95421	-0,40913	27,95971	-0,38741	27,03685
108	-0,07698	20,99893	-0,48937	28,06981	-0,46668	27,02624
110	-0,14118	20,24114	-0,56407	28,56105	-0,54122	27,3706
111	-0,20145	19,77552	-0,62793	29,32429	-0,60404	27,97565
113	-0,25742	19,73379	-0,68384	30,38613	-0,6588	28,86562
114	-0,31283	20,16254	-0,73109	31,86247	-0,70541	30,1721
116	-0,36276	21,11233	-0,77182	33,76303	-0,74558	31,90439
117	-0,41011	22,64773	-0,80249	36,1295	-0,77639	34,07677
119	-0,45344	24,89318	-0,81689	39,03414	-0,79287	36,78553
120	-0,48771	27,8915	-0,80638	42,44403	-0,78618	40,00937
122	-0,49192	31,63536	-0,75734	46,38287	-0,74293	43,75272
123	-0,45171	35,94052	-0,65526	50,7226	-0,64947	47,76392
125	-0,3366	41,30282	-0,47159	56,0599	-0,48041	52,67053
126	-0,14937	46,75109	-0,22335	61,10951	-0,24423	57,56428
128	0,195438	52,2045	0,17344	66,15049	0,122015	62,2261
129	0,569556	57,47366	0,590284	71,1127	0,521678	66,78512
131	1,05345	62,08352	1,107405	75,52852	0,993131	70,93034
132	1,585182	65,59521	1,683667	78,78004	1,539574	73,95674
134	2,108864	68,24983	2,254532	81,27177	2,076005	76,2882
135	2,577839	69,31807	2,77726	82,12474	2,56822	77,09784
137	2,926512	68,94943	3,184233	81,47503	2,953082	76,52021
138	3,151292	67,43049	3,46799	79,58542	3,223234	74,79442



140	3,23992	64,77158	3,612154	76,45362	3,362832	71,9229
141	3,185177	61,53185	3,605242	72,63324	3,361798	68,42319
143	3,035496	58,08675	3,491139	68,59719	3,262278	64,73249
144	2,805604	54,61224	3,281409	64,52777	3,075372	61,02643
146	2,528314	51,22421	3,004327	60,58276	2,828337	57,43949
147	2,212293	47,83653	2,688627	56,67751	2,545875	53,89568
149	1,87704	44,31196	2,302309	52,60735	2,206475	50,23926
150	1,521893	40,59857	1,922822	48,29938	1,86008	46,35467
152	1,140979	36,73884	1,482145	43,86626	1,471155	42,32378
153	0,783549	32,78968	1,050828	39,35323	1,073809	38,19128
155	0,461049	28,82191	0,655403	34,83687	0,702937	34,01567
156	0,191508	24,96279	0,313504	30,39385	0,374466	29,87735
158	-0,03496	21,35603	-0,05239	26,18053	0,107287	25,90827
159	-0,16665	18,06934	-0,16936	22,35968	-0,10884	22,26859
161	-0,26155	15,69455	-0,30683	19,33217	-0,25137	19,08065
162	-0,3222	15,17447	-0,40257	18,23334	-0,35064	17,33804
164	-0,36679	17,55125	-0,47184	19,88721	-0,41882	17,66338
165	-0,41335	21,64495	-0,5321	23,68525	-0,47129	20,4113
167	-0,49494	26,44179	-0,61932	28,41387	-0,53631	24,38167
168	-0,63476	32,05192	-0,75734	33,93691	-0,64454	29,21279
170	-0,81077	38,72293	-0,92641	40,43543	-0,79341	34,99264
171	-0,94431	45,86205	-1,04279	47,4553	-0,91929	41,53959
173	-0,97174	52,40071	-1,0431	53,63195	-0,9428	47,72147
174	-0,8803	57,52451	-0,9362	58,61849	-0,85274	52,55606
176	-0,70589	61,24232	-0,7392	62,18767	-0,68035	56,09357
177	-0,46019	63,5877	-0,47446	64,42016	-0,43711	58,15685
179	-0,13769	65,06081	-0,1344	65,90083	-0,12463	59,50229
180	-0,23692	65,05081	-0,34404	64,0083	-0,12569	59,02285



- Data permodelan *Modified* (dengan penambahan *obstacle*) $S_1/l = 4$

SI/l = 4	row 1		row 2		row 3	
Sudut	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu	V (m/s)	Nu
0	0	65,47467	0	125,077	0	119,6771
2	0,154004	65,50799	0,825015	124,5278	0,809641	119,1828
3	0,253868	65,5232	1,358787	124,272	1,344363	118,8726
5	0,355401	65,5161	1,883142	123,9198	1,867993	118,5328
6	0,45683	65,45986	2,395438	123,3775	2,378956	118,0222
8	0,557278	65,38557	2,891159	122,7246	2,873329	117,3955
9	0,656862	65,31325	3,367466	121,9586	3,346911	116,6439
11	0,755633	65,23532	3,823048	121,0438	3,799971	115,7562
12	0,85343	65,15151	4,250109	119,9161	4,221781	114,6358
14	0,950282	65,06315	4,650016	118,6085	4,617105	113,3732
15	1,045979	64,96393	5,008697	116,9715	4,970214	111,7797
17	1,140567	64,8596	5,322469	115,0984	5,276484	109,9352
18	1,234179	64,74382	5,593145	113,1227	5,537524	107,983
20	1,326239	64,60004	5,822097	111,0571	5,755141	105,9413
21	1,416197	64,43329	6,008612	108,8886	5,92857	103,7959
23	1,504085	64,25683	6,151041	106,609	6,056546	101,5444
24	1,590056	64,07465	6,250988	104,2608	6,140526	99,22406
26	1,674136	63,88665	6,309794	101,8533	6,18303	96,86197
27	1,756225	63,69072	6,331492	99,44315	6,188506	94,51825
29	1,836181	63,48529	6,321788	97,08577	6,162814	92,23433
30	1,913842	63,26933	6,278874	94,70659	6,103414	89,91515
32	1,989133	63,04378	6,203332	92,29348	6,012524	87,58208
33	2,061919	62,80722	6,097169	89,87027	5,894148	85,27306
35	2,132138	62,56184	5,975035	87,60889	5,76314	83,13838
36	2,199797	62,30583	5,842817	85,45712	5,621893	81,0849



38	2,264531	62,0371	5,693927	83,30756	5,465594	79,05009
39	2,327083	61,77294	5,530895	81,21473	5,298424	77,08924
41	2,387089	61,49308	5,360164	79,20907	5,126668	75,22525
42	2,443745	61,1923	5,186004	77,29852	4,954163	73,46245
44	2,496793	60,87257	5,010889	75,48685	4,78314	71,8025
45	2,546174	60,53629	4,838598	73,78853	4,617077	70,25688
47	2,59188	60,18548	4,670595	72,19418	4,457214	68,81626
48	2,633742	59,8186	4,511204	70,74238	4,307476	67,51433
50	2,671603	59,4357	4,361577	69,39962	4,168346	66,3145
51	2,705353	59,03749	4,217995	68,11238	4,036173	65,16999
53	2,734984	58,62036	4,079464	66,88965	3,909996	64,08998
54	2,760293	58,18964	3,946935	65,74296	3,790843	63,08545
56	2,781699	57,75136	3,821352	64,67415	3,679143	62,15359
57	2,798401	57,28743	3,702317	63,67448	3,574687	61,28774
59	2,809629	56,79603	3,590767	62,75119	3,477208	60,48334
60	2,815206	56,27881	3,486226	61,89099	3,386504	59,73646
62	2,815151	55,73769	3,388597	61,09294	3,302189	59,0428
63	2,809373	55,17198	3,295503	60,32946	3,223291	58,38924
65	2,79766	54,57907	3,20471	59,58618	3,147119	57,74966
66	2,779694	53,95793	3,115356	58,86907	3,07176	57,12095
68	2,755319	53,30873	3,027357	58,17492	2,997195	56,50728
69	2,724248	52,62918	2,940066	57,49649	2,92277	55,90287
71	2,686614	51,92196	2,853254	56,83518	2,847928	55,30199
72	2,642218	51,18335	2,766788	56,18491	2,772352	54,70466
74	2,591453	50,42141	2,679894	55,5409	2,695809	54,10946
75	2,534436	49,63076	2,590729	54,87802	2,617644	53,50312
77	2,470177	48,80121	2,498301	54,20089	2,535939	52,87235
78	2,398137	47,92747	2,403054	53,51385	2,449151	52,2062
80	2,318487	47,01214	2,304638	52,80803	2,357254	51,51823



81	2,231531	46,0576	2,202383	52,08121	2,261342	50,81542
83	2,138005	45,06955	2,096376	51,33668	2,161353	50,09035
84	2,038533	44,05258	1,986668	50,57199	2,056953	49,34148
86	1,933889	42,9974	1,873181	49,7865	1,948142	48,56742
87	1,821905	41,90147	1,756121	48,98246	1,835028	47,76867
89	1,706893	40,76739	1,635892	48,16379	1,718013	46,94993
90	1,588624	39,59701	1,5132	47,33477	1,597814	46,11542
92	1,462776	38,4032	1,38861	46,49817	1,474912	45,26886
93	1,3387	37,21073	1,263186	45,66112	1,350804	44,42108
95	1,214633	35,9964	1,137215	44,8237	1,225523	43,56588
96	1,091735	34,78794	1,012514	44,00956	1,101404	42,73434
98	0,97153	33,58804	0,889456	43,21203	0,978546	41,90843
99	0,856015	32,42184	0,770038	42,46757	0,859119	41,13293
101	0,746245	31,29174	0,655261	41,7718	0,744706	40,40245
102	0,643606	30,22693	0,546187	41,15115	0,635594	39,72571
104	0,54932	29,24313	0,4445	40,6303	0,533829	39,1431
105	0,464188	28,36412	0,351668	40,22656	0,440989	38,66531
107	0,389032	27,6182	0,268664	39,95807	0,35812	38,3129
108	0,324662	27,03837	0,197158	39,8644	0,286659	38,1143
110	0,271604	26,65494	0,138846	39,97044	0,228328	38,1033
111	0,230484	26,50567	0,095371	40,30857	0,185207	38,31496
113	0,202604	26,64395	0,069293	40,92359	0,159691	38,78097
114	0,190189	27,12652	0,064106	41,86886	0,154769	39,54673
116	0,196994	28,01443	0,085483	43,21424	0,175266	40,67396
117	0,227955	29,39591	0,140536	45,0016	0,227051	42,20369
119	0,294923	31,31156	0,236552	47,2826	0,317991	44,18336
120	0,398992	33,864	0,389607	49,96623	0,459395	46,55899
122	0,600341	37,04651	0,58502	53,21547	0,650519	49,42741
123	0,81085	40,74216	0,937051	57,00173	0,950788	52,75021



125	1,165702	44,96008	1,229652	60,97162	1,248982	56,33302
126	1,600729	49,5396	1,736972	65,35956	1,703845	60,23153
128	2,13072	54,30773	2,299957	69,94149	2,218671	64,33305
129	2,747134	59,03657	2,941714	74,39105	2,807189	68,35283
131	3,426671	63,47748	3,649247	78,51404	3,455442	72,10154
132	4,118094	67,15003	4,368375	81,78585	4,115242	75,1096
134	4,766661	69,97622	5,047524	84,16973	4,740769	77,3575
135	5,304376	71,28298	5,616428	84,93099	5,269343	78,16835
137	5,647637	71,04933	5,993249	84,0781	5,624473	77,55597
138	5,798336	69,49002	6,18028	81,86121	5,814391	75,82393
140	5,746752	66,67085	6,164805	78,32835	5,833387	72,98614
141	5,482841	63,0295	5,936327	74,01996	5,675139	69,57621
143	5,078995	59,08392	5,561356	69,4336	5,408401	66,09044
144	4,568039	55,11521	5,062793	64,82861	5,062293	62,75359
146	3,999074	51,27381	4,492209	60,35781	4,668705	59,64134
147	3,369318	47,4002	3,823773	55,81178	4,242441	56,61567
149	2,755515	43,38079	3,153334	51,11757	3,771153	53,52112
150	2,070423	39,20753	2,410907	46,33319	3,271718	50,25987
152	1,423781	34,93889	1,674632	41,53788	2,743343	46,79856
153	0,846498	30,7302	1,005958	36,90482	2,166301	43,15547
155	0,370605	26,60148	0,443007	32,4701	1,599494	39,43066
156	0,047222	22,59658	0,051991	28,16714	1,060606	35,69157
158	-0,25899	19,02063	-0,3428	24,2958	0,577585	32,03524
159	-0,42626	16,58652	-0,58736	21,81421	0,175209	28,49428
161	-0,54416	17,24774	-0,77659	22,87123	-0,17043	25,17377
162	-0,64991	21,80833	-0,94772	27,02589	-0,42331	22,41758
164	-0,77462	28,20707	-1,12679	33,04786	-0,6273	21,12856
165	-0,95774	34,65163	-1,33059	39,3331	-0,79953	22,39016
167	-1,21659	41,44274	-1,5595	45,76351	-0,95342	25,86488



168	-1,51289	49,02516	-1,78267	52,50002	-1,10306	30,5771
170	-1,74791	57,07422	-1,93797	59,51186	-1,264	35,68708
171	-1,83853	64,67656	-1,96992	66,16701	-1,43339	41,10912
173	-1,78151	71,02606	-1,8805	72,09517	-1,59655	46,83959
174	-1,61388	77,23206	-1,68458	77,88643	-1,70089	52,90144
176	-1,29137	82,22944	-1,34005	82,92369	-1,69893	58,70672
177	-0,85325	85,96609	-0,87132	86,7139	-1,59451	63,85609
179	-0,25084	89,0144	-0,24609	89,5013	-1,39965	68,82178
180	-0,22084	89,04404	-0,26088	86,5013	-1,35965	68,85178



halaman ini sengaja dikosongkan