



**ANALISIS KARAKTERISTIK PENCAMPURAN FLUIDA
PANAS TERHADAP FLUIDA DINGIN DI BERBAGAI
VARIASI SUDUT ELBOW 60°, 90°, 120°**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar magister
program studi teknik mesin*

TESIS

Oleh

**Agus Feriyanto
211920101005**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN
TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
MAGISTER TEKNIK MESIN
JEMBER
2023**

PERSEMBAHAN

Tesis ini saya persembahkan untuk:

1. Almarhumah Ibu Suparmi tercinta dan tersayang yang telah melahirkan saya ke dunia ini hingga saya menjadi orang yang berguna. Terima kasih atas semua support, usaha dan pengorbanannya. Semoga engkau senang disana dan husnul khotimah ibu.
2. Bapak/Ibu dirumah yang sudah rela membantu atas biaya yang telah diberikan selama masa perkuliahan hingga saat ini.
3. Guru – guru dari sekolah TK sampai SMA, Dosen – dosen yang mengajar semasa perkuliahan serta civitas akademik jurusan Teknik Mesin . Terima kasih telah sabar membimbing saya dengan memberikan ilmunya yang dapat bermanfaat bagi kehidupan masyarakat.
4. Almamater Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.

MOTO

Wahai mereka yang beriman, mintalah pertolongan kepada Allah SWT dengan sabar dan sholat. Sesungguhnya Allah SWT bersama orang – orang sabar.

(terjemahan Surat *Al – Baqarah* ayat 153) *)

Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. (terjemahan Surat *Al –*

Insyiraah ayat 5) **)

Jadilah engkau orang pertama yang berilmu (pandai), atau orang kedua yang belajar, atau orang ketiga yang mau mendengarkan ilmu, atau orang keempat yang menyukai ilmu. Dan janganlah engkau menjadi orang yang kelima maka kamu akan celaka. (H.R. Baehaqi)

*) ;**) Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al Qur'an dan Terjemahnya*. Semarang: PT. Kumudasmoro Grafindo.

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Agus Feriyanto

NIM : 211920101005

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: “*Analisis Karakteristik Pencampuran Fluida Panas Terhadap Fluida Dingin Di Berbagai Variasi Sudut Elbow 60°, 90°, 120°*”.

adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 25 Juli 2023

Yang menyatakan,



Agus Feriyanto

NIM. 211920101005

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul “*Analisis Karakteristik Pencampuran Fluida Panas Terhadap Fluida Dingin Di Berbagai Variasi Sudut Elbow 60°, 90°, 120°*” telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Selasa

Tanggal : 25 Juli 2023

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T.

NIP : 196911221997021001

(.....)

2. Pembimbing Anggota (Jika diperlukan)

Nama : Dr. Ir. Agus Triono S.T., M.T.

NIP : 197008072002121001

(.....)

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Dr. Ir. Andi Sanata S.T., M.T.

NIP : 197505022001121001

(.....)

2. Penguji Anggota 1

Nama : Dr. Ir. Salahuddin J., S.T., M.T., IPM

NIP : 197510062002121002

(.....)

ABSTRAK

Pada tesis masalah yang diambil dari penelitian ini tentang bagaimana pengaruh kecepatan aliran fluida panas terhadap fluida dingin mengenai karakter aliran pada pipa elbow dan juga pengaruh variasi elbow (60° , 90° , 120°) terhadap karakter aliran fluida. Variasi yang dilakukan pada penelitian yaitu proses pengujian yang dilakukan secara simulasi yaitu menggunakan 3 model variasi dengan sudut siku 60° , 90° , 120° dan sementara untuk proses pengujian secara eksperimen dilakukan dengan sudut siku 90° yang kemudian akan dibandingkan dengan simulasi. Kecepatan aliran berpengaruh terhadap karakter campuran aliran fluida pada pipa outlet, hal ini terbukti sesuai dengan perhitungan pada aliran fluida dalam pipa yakni nilai angka Reynold kecepatan 0,5 m/s $Re:43.853,4$ kecepatan 1 m/s $Re:87.706,8$ kecepatan 1,5 m/s $Re:131.560,2$. Sedangkan nilai major losses kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000332m, kecepatan 1,5 m/s: 0,000501m, nilai minor lossesnya kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000664, kecepatan 1,5 m/s: 0,001494m. Didapatkan juga hasil dari densitas fluida air (ρ) pada suhu 42°C : 991,4 kg/m³, untuk nilai viskositas (μ) : $0,63310^3$ N.s/m² dan juga nilai kekasaran relative pipa sebesar 0,008164. Dari perhitungannya sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan karakter masing-masing variasi berbeda, sehingga aliran yang didapatkan adalah turbulen.

Kata kunci: simulasi dan eksperimen pencampuran fluida, model turbulensi k- ϵ standard, desain variasi siku, *computational fluid dynamics* (CFD)

RINGKASAN

Berbagai macam cara mencampurkan jenis cairan salah satunya pencampuran siku merupakan perangkat yang digunakan dalam sistem perpipaan untuk mentransfer dan mencampur cairan panas dan dingin yang mungkin serupa atau jenis yang berbeda. Jenis pencampuran ini menemukan aplikasinya di banyak industri seperti polimer, pengolahan makanan dan bahkan kebutuhan air hangat. Geometri pencampuran biasanya terdiri dari siku 90 derajat berdiameter lebih besar dengan tabung kecil yang terpasang secara tangensial. Karakteristik pencampuran biasanya dipelajari melalui kontur kecepatan dan suhu di bidang aliran di dalam siku melintasi wilayah pencampuran siku. Baik komputasi maupun teknik eksperimental yang digunakan untuk memprediksi dan mengamati pola aliran fluida dan profil suhu di seluruh jalur aliran.

Perumusan masalah yang diambil dari penelitian ini tentang bagaimana pengaruh kecepatan aliran fluida panas terhadap fluida dingin mengenai karakter aliran pada pipa *elbow* dan juga pengaruh variasi *elbow* (60° , 90° , 120°) terhadap karakter aliran fluida.

Variasi yang dilakukan pada penelitian yaitu proses pengujian yang dilakukan secara simulasi yaitu menggunakan 3 model variasi dengan sudut siku 60° , 90° , 120° dan sementara untuk proses pengujian secara eksperimen dilakukan dengan sudut siku 90° yang kemudian akan dibandingkan dengan simulasi.

Kecepatan aliran berpengaruh terhadap karakter campuran aliran fluida pada pipa outlet, hal ini terbukti sesuai dengan perhitungan pada aliran fluida dalam pipa yakni nilai angka Reynold kecepatan 0,5 m/s $Re:43.853,4$ kecepatan 1 m/s $Re:87.706,8$ kecepatan 1,5 m/s $Re:131.560,2$. Sedangkan nilai major losses kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000332m, kecepatan 1,5 m/s: 0,000501m, nilai minor lossesnya kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000664, kecepatan 1,5 m/s: 0,001494m. Didapatkan juga hasil dari densitas fluida air (ρ) pada suhu 42°C : $991,4 \text{ kg/m}^3$, untuk nilai viscositas (μ) : $0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2$ dan juga nilai kekasaran relative pipa sebesar 0,008164. Dari perhitungannya sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan karakter masing-masing variasi berbeda, sehingga aliran yang didapatkan adalah turbulen.

Desain pencampuran fluida pada sudut pipa berpengaruh terhadap karakter campuran aliran fluida pada pipa outlet dibuktikan dengan profil temperature dan pola aliran yang terjadi di tiap titik suhu diberbagai variasi, yang hasilnya makin tinggi kecepatan pada inlet hot suhu yang didapat juga makin tinggi nilainya.

Intensitas turbulensi ditunjukkan dengan arah aliran, variasi sudut (60° , 90° , 120°) dengan tiga variasi kecepatan rata-rata menunjukkan aliran pada posisi Log-Layer atau berkembang penuh.

Pembandingan hasil simulasi CFD dengan hasil uji eksperimental elbow 90° sangatlah berbeda, pada hasil simulasi nilai suhu masih sangat tinggi sementara pada uji eksperimen suhu yang didapat lebih rendah, hal ini dikarenakan sebagian data yang dimasukkan pada simulasi adalah default system dari software, sementara pada proses eksperimen real nyata adanya.

PRAKATA

Alhamdulillah rasa syukur yang tiada terkira penulis haturkan hanya kepada Allah SWT atas ridhoNya Tesis ini dapat terselesaikan dengan lancar. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak – pihak yang telah membantu dan mendukung sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menimba ilmu difakultas ini.
2. Bapak Prof. Dr. Budi Setyono, M.A. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Jember yang memberikan kesempatan kepada saya untuk menjadi salah satu mahasiswa pascasarjana.
3. Bapak Dr. Muh. Nurkoyim Kustanto S.T., M.T., dan Bapak Dr. Ir. Agus Triono S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tesis yang telah sabar membimbing penulis, membagikan ilmu beliau serta memberikan saran dan motivasi kepada penulis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
4. Bapak Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T., selaku dosen wali dari penulis yang telah memberikan wejangan, motivasi dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
5. Bapak Dr. Ir. Andi Sanata S.T., M.T., dan Bapak Dr. Ir. Salahuddin Junus S.T., M.T.,IPM. selaku tim dosen penguji yang telah banyak memberikan saran demi perbaikan tesis ini.
6. Bapak/Ibu, orang tua yang selalu mendoakan, memberi wejangan yang baik-baik, mendukung, dan memberi semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Beti Septia Kurniawati selaku istri tercinta yang bisa memberikan semangat, mendoakan selalu disetiap langkah dan motivasi kepada penulis

untuk menjadi orang sukses dan dapat menjadi panutan yang baik untuk keluarga.

8. Anak tercinta penulis, Nayla Salsabila yang selalu sabar mendukung ayahnya dan memberi semangat kepada penulis dalam proses penyelesaian tesis ini.
9. Teman – teman Magister Teknik Mesin Universitas Jember, terima kasih atas waktu kebersamaan, perjuangan bersama selama ini dan alhamdulillah kita bisa lulus sesuai yang diharapkan.
10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademika jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
11. Almamaterku tercinta Universitas Jember yang menyediakan banyak layanan dan kemudahan bagi penulis dalam menuntaskan pendidikan sampai saat ini.
12. Serta semua pihak yang turut membantu sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tesis ini, oleh karena itu saran dari semua pihak sangat penulis harapkan demi perbaikan penelitian – penelitian selanjutnya. Penulis berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu di dunia Teknik Mesin.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTO.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
ABSTRAK	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR GRAFIK.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Hipotesis Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN TEORI.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	7
2.3 Pengertian Fluida.....	8
2.4 Pengertian Aliran.....	9
2.5 Aliran Fluida Dalam Pipa.....	9
2.6 Debit Aliran Fluida.....	15
2.7 Macam-Macam Aliran.....	15
2.7.1 Aliran Laminar	15
2.7.2 Aliran Turbulen.....	16

2.8 Metode Numerik.....	17
2.9 Model <i>K-Epsilon Standard</i>	17
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Metode Penelitian	18
3.2 Waktu dan Tempat Eksperimen	18
3.3 Perlengkapan Eksperimen	18
3.3.1 Alat	18
3.3.2 Bahan.....	19
3.4 Variabel Penelitian	19
3.4.1 Variabel Bebas	19
3.4.2 Variabel Terikat.....	19
3.5 Prosedur Penelitian	20
3.5.1 Pengujian Simulasi.....	20
3.5.2 Pengujian Eksperimen.....	20
3.6 Skema Eksperimen	21
3.6.1 Metode Eksperimen.....	21
3.6.2 Variasi Sudut Pengujian	22
3.6.3 Metode Simulasi.....	22
3.6.4 Perubahan Desain Geometri ke <i>Meshing</i>	22
3.6.5 Pengaturan Model Simulasi	23
3.6.6 Data Fluida	24
3.6.7 Pengaturan <i>Boundary Condition</i>	24
3.7 Diagram Alir.....	26
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Mencari kecepatan Aliran dalam Suatu Penampang	28
4.2 Mencari Nilai dari Bilangan Reynold	29
4.2.1 Hasil Hitung Reynold.....	30
4.3 Mencari Nilai dari <i>Major Losses</i>	31
4.4 Menghitung Kekasaran Relatif Pipa	33
4.5 Mencari Nilai dari <i>Minor Losses</i>	33
4.6 <i>Temperature Profile contour</i> Pengujian Simulasi Siku 60°	35

4.7 <i>Vectors Velocity Contour</i> Pengujian Simulasi Siku 60°	38
4.8 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 60°	39
4.9 <i>Temperature Profile contour</i> Pengujian Simulasi Siku 90°	40
4.10 <i>Vectors Velocity Contour</i> Pengujian Simulasi Siku 90°.....	43
4.11 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 90°	44
4.11.1 Grafik Pergerakan Suhu (°C) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 0,5 m/s Siku 90°	44
4.11.2 Grafik Pergerakan Suhu (°C) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 1 m/s Siku 90°	45
4.11.3 Grafik Pergerakan Suhu (°C) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 1,5 m/s Siku 90°	46
4.12 <i>Temperature Profile contour</i> Pengujian Simulasi Siku 120°	47
4.13 <i>Vectors Velocity Contour</i> Pengujian Simulasi Siku 120°	49
4.14 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 120°	50
BAB 5 PENUTUP	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

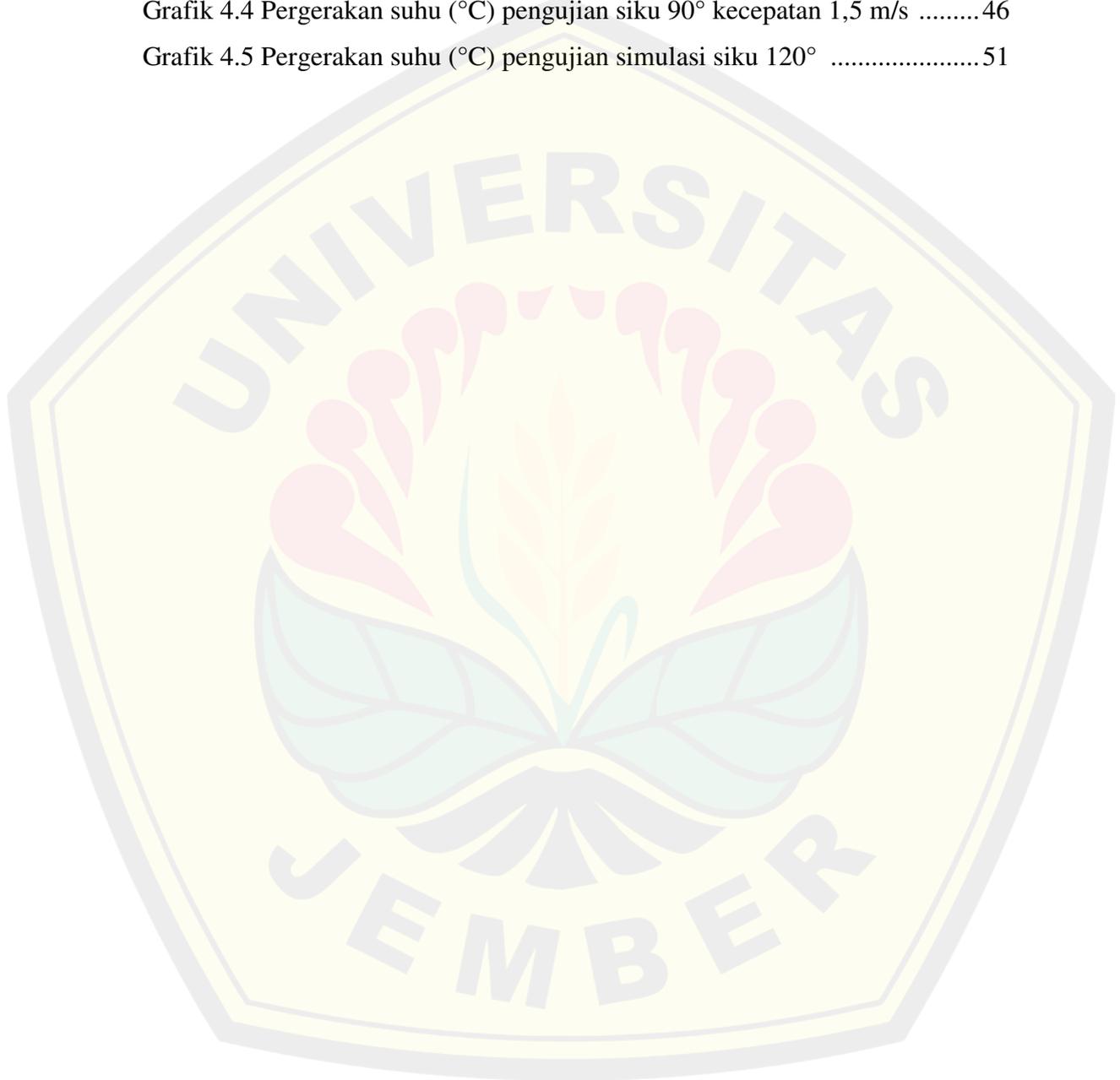
Gambar 2.1 <i>Velocity Profiles in Elbow</i>	7
Gambar 2.2 <i>Temperature profiles in Elbow</i>	7
Gambar 2.3 Grafik Kekasaran Relatif Pipa	12
Gambar 2.4 Diagram Moody	12
Gambar 2.5 Koefisien <i>Losses</i> Belokan Pipa	14
Gambar 2.6 Aliran Laminar	15
Gambar 2.7 Aliran Turbulen	16
Gambar 3.1 Letak Titik Thermocouple	21
Gambar 3.2 Alat Peraga Eksperimen	22
Gambar 3.3 Variasi Sudut Siku	23
Gambar 3.4 Geometri Siku	23
Gambar 3.5 Bentuk Mesh	24
Gambar 3.6 Pengaturan Model Simulasi <i>k-epsilon</i> Model <i>Standard</i>	24
Gambar 3.7 Properti <i>Default</i> Air pada <i>Ansys</i>	25
Gambar 3.8 Pengaturan Kecepatan Aliran Fluida Dingin dan Panas	25
Gambar 3.9 Pengaturan Suhu pada Aliran Fluida Dingin dan Panas	26
Gambar 3.10 <i>Flow Chart</i> Penelitian	27
Gambar 4.1 Kontur <i>temperature</i> pengujian simulasi siku 60°	35
Gambar 4.2 Hasil visual sudut 60° kecepatan 0,5 m/s	35
Gambar 4.3 Hasil visual 60° kecepatan 1 m/s	36
Gambar 4.4 Hasil visual 60° kecepatan 1,5 m/s	36
Gambar 4.5 Kontur <i>velocity</i> pengujian simulasi siku 60°	37
Gambar 4.6 Kontur <i>temperature</i> pengujian simulasi siku 90°	40
Gambar 4.7 Hasil visual sudut 90° kecepatan 0,5 m/s	41
Gambar 4.8 Hasil visual sudut 90° kecepatan 1 m/s	41
Gambar 4.9 Hasil visual sudut 90° kecepatan 1,5 m/s	42
Gambar 4.10 Kontur <i>velocity</i> pengujian simulasi siku 90°	43
Gambar 4.11 Kontur <i>temperature</i> pengujian simulasi siku 120°	47
Gambar 4.12 Hasil visual suhu 90° kecepatan 0,5 m/s	48

Gambar 4.13 Hasil visual suhu sudut 120° kecepatan 1 m/s48
Gambar 4.14 Hasil visual suhu 120° kecepatan 1,5 m/s49
Gambar 4.15 Kontur *velocity* pengujian simulasi siku 120° 50



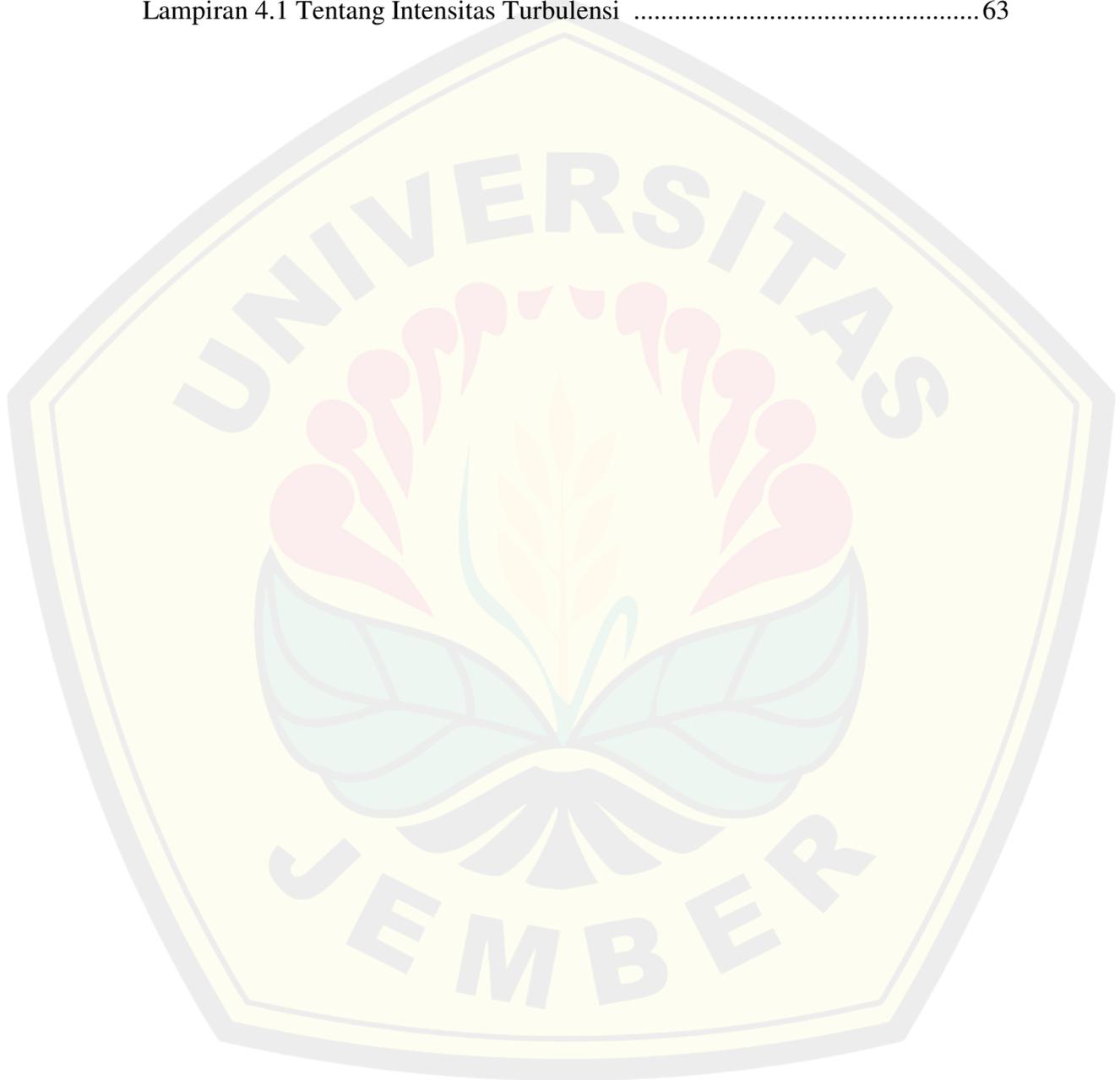
DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian simulasi siku 60°	39
Grafik 4.2 Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian siku 90° kecepatan 0,5 m/s	44
Grafik 4.3 Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian siku 90° kecepatan 1 m/s	45
Grafik 4.4 Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian siku 90° kecepatan 1,5 m/s	46
Grafik 4.5 Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian simulasi siku 120°	51



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Tabel Data Pengujian Eksperimen	56
Lampiran 2.1 Tabel Sifat-Sifat Fisik Air	59
Lampiran 3.1 Gambar-Gambar Pengambilan Data Secara Eksperimen	60
Lampiran 4.1 Tentang Intensitas Turbulensi	63



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencampuran siku adalah perangkat yang digunakan dalam sistem perpipaan untuk mentransfer dan mencampur cairan panas dan dingin yang mungkin serupa atau jenis yang berbeda. Jenis pencampuran ini menemukan aplikasinya di banyak industri seperti polimer, pengolahan makanan dan bahkan kebutuhan air hangat. *Geometri* pencampuran biasanya terdiri dari siku 90 derajat berdiameter lebih besar dengan tabung kecil yang terpasang secara tangensial. Karakteristik pencampuran biasanya dipelajari melalui kontur kecepatan dan suhu di bidang aliran di dalam siku melintasi wilayah pencampuran siku, (Mazumder, 2012). Baik komputasi maupun teknik eksperimental yang digunakan untuk memprediksi dan mengamati pola aliran fluida dan profil suhu di seluruh jalur aliran. (Sridhara, S.N. 2020)

Metode numerik melibatkan penyelesaian persamaan *Navier-Stokes* dengan model turbulensi yang sesuai di kedua persegi panjang dan koordinat lengkung. Hasilnya biasanya ditampilkan sebagai variasi pola aliran dan suhu distribusi terhadap bilangan Reynold aliran. Di medan aliran, tekanan turun di dua lokasi masing-masing di daerah hulu dan hilir dalam siku 90 derajat diamati oleh studi yang dilakukan oleh (Mazumdar Q.H. 2012), untuk multiphase mengalir. Dalam penelitian lain penulis yang sama terus menunjukkan peningkatan tekanan pada geometri siku dengan penurunan tekanan saat cairan keluar dari siku di lokasi yang berbeda. Intensitas pusaran didefinisikan dalam hal kecepatan tangensial rata-rata daerah ditunjukkan menurun secara eksponensial sepanjang aliran di daerah hilir siku, yang menghilang segera setelah jari-jari kelengkungan siku lebih besar. Kesepakatan yang baik antara CFD prediksi dengan model turbulensi *RANS* dan hasil eksperimen ditetapkan oleh (Andreas Swienty et al., 2015)

(Spedding, P.L. et al., 2008), membuat studi tentang aliran melalui siku 90 derajat dengan siku horizontal dan adjoint vertical pipa masuk. Studi ini menunjukkan peningkatan dalam parameter pencampuran. Aliran turbulen fase tunggal fluida inkompresibel melalui tikungan pipa 90° disimulasikan secara numerik oleh (P. Dutta et al., 2016), menggunakan model turbulen $k-\epsilon$. Validasi model 3D yang digunakan untuk penelitian ini ditemukan sesuai dengan laporan eksperimen. Di tempat lain investigasi adopsi model turbulensi RNG $k-\epsilon$ berdasarkan metode kelompok renormalisasi untuk menutup Persamaan *RANS* dari medan aliran internal pipa. (Hariyadi, S.P., 2017)

(Jianhua Zhang et al., 2020), membahas tentang analisis efek siku pada pipa gas tekanan tinggi, Untuk masalah kehilangan penurunan tekanan dan panjang ekivalen perhitungan siku di pipa bawah laut tekanan tinggi, proses aliran gas tekanan ultra tinggi di siku 90° disimulasikan secara numerik dengan cara CFD. Itu area aliran dalam disatukan dengan kisi heksahedral terstruktur, dan melalui solusi numerik untuk menangani persamaan *RANS* yang ditutup oleh turbulensi $k-\epsilon$ RNG model, karakteristik medan aliran di dalam pipa dipelajari, dan tekanan distribusi diperoleh. (Dutta & Nandi, 2015), dengan studi karakteristik pressure drop aliran turbulen fasa tunggal pada pipa bend untuk nomor reynolds tinggi, bahwa karakteristik penurunan tekanan dari aliran turbulen melalui tikungan pipa 90 derajat diselidiki secara numerik oleh simulasi dinamika fluida komputasi menggunakan model turbulensi $k-\epsilon$ RNG dengan fungsi dinding standar. Setelah validasi model ini terhadap hasil eksperimen yang ada, studi rinci telah dilakukan untuk menyelidiki tekanan karakteristik distribusi dan penurunan tekanan pada rentang bilangan Reynolds.

(Dhanenthiran et al., 2020) membahas analisis CFD aliran uap panas dan dingin pada siku, digunakan untuk pencampuran fluida dan panas transfer melalui cairan dalam pipa. Menggunakan pipa venturi sebagai saluran masuk panas untuk memudahkan pencampuran air panas dan dingin. Untuk memeriksa campuran yang tepat output, diameter pipa dan kecepatan aliran bervariasi dan hasil yang diperoleh dari solusi akan dibandingkan dengan menggunakan ANSYS Perangkat lunak, diagram pola mengenai kecepatan, tekanan, dan suhu. (Nugroho, A.S. &

Kustanto, H. 2013), mempelajari simulasi menggunakan program *Computational Fluid Dynamics FLUENT* untuk membentuk profil yang menarik dan hasilnya dapat diketahui.

(Sridhara, S.N. 2020), membuat penelitian tentang analisis dinamika fluida komputasi perpindahan panas dan aliran fluida di pencampuran siku. Untuk menyelidiki perpindahan panas tak termampatkan dua dimensi dan aliran fluida perilaku di siku pencampuran. Dalam karya ini, model turbulensi k- ϵ digunakan untuk mempelajari perilaku aliran fluida pencampuran di berbagai bagian lokasi hulu dan hilir siku. Pemodelan aliran dianalisis menggunakan finite pemecah dinamika fluida komputasi (CFD) berbasis metode volume, *ANSYS Fluent*. Untuk menyelidiki yang tepat output campuran, kecepatan aliran dan diameter siku bervariasi. Plot profil kecepatan dan profil suhu ditampilkan dalam domain aliran. Ditemukan bahwa dengan peningkatan kecepatan pada lubang masuk berdiameter lebih kecil, campuran Distribusi suhu dalam fluida pencampur secara efektif menunjukkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi. Ini memberikan ide yang bagus tentang distribusi dan perilaku aliran fluida yang dapat digunakan untuk desain siku yang efisien. (Liemena, A.E. 2011) membuat penelitian tentang perbandingan laju aliran massa air panas terhadap air dingin yang masuk ruangan pencampuran, selama pencampuran air panas dan air dingin, diadakan berapa banyak air panas dan air dingin yang dituangkan ke dalam ruang pencampuran, sasaran penelitiannya menentukan kecenderungan perbandingan aliran air panas dengan aliran air dingin yang menghasilkan air hangat dengan variasi temperatur.

Sehingga peneliti memutuskan untuk mensimulasikan dan melakukan eksperimen pencampuran fluida panas terhadap fluida dingin (*mixing*) di *elbow* dengan berbagai variasi sudut *elbow* 60°, 90°, 120°, yang mungkin belum di bahas di penelitian sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dari penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh kecepatan aliran fluida panas terhadap fluida dingin mengenai karakter aliran pada pipa *elbow* ?
2. Bagaimana pengaruh variasi *elbow* (60° , 90° , 120°) terhadap karakter aliran fluida ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian, untuk menyelidiki output campuran yang tepat di masing-masing variasi sudut siku (60° , 90° , 120°).

Selain tujuan umum seperti yang telah disebutkan diatas, tujuan khusus penelitian antara lain:

1. Mengetahui pengaruh kecepatan aliran fluida panas terhadap fluida dingin mengenai karakter aliran pada pencampuran pipa *elbow*.
2. Mengetahui pengaruh variasi *elbow* (60° , 90° , 120°) terhadap karakter aliran fluida.
3. Membandingkan hasil simulasi CFD dengan hasil uji eksperimental *elbow* 90° .

1.4 Batasan Masalah

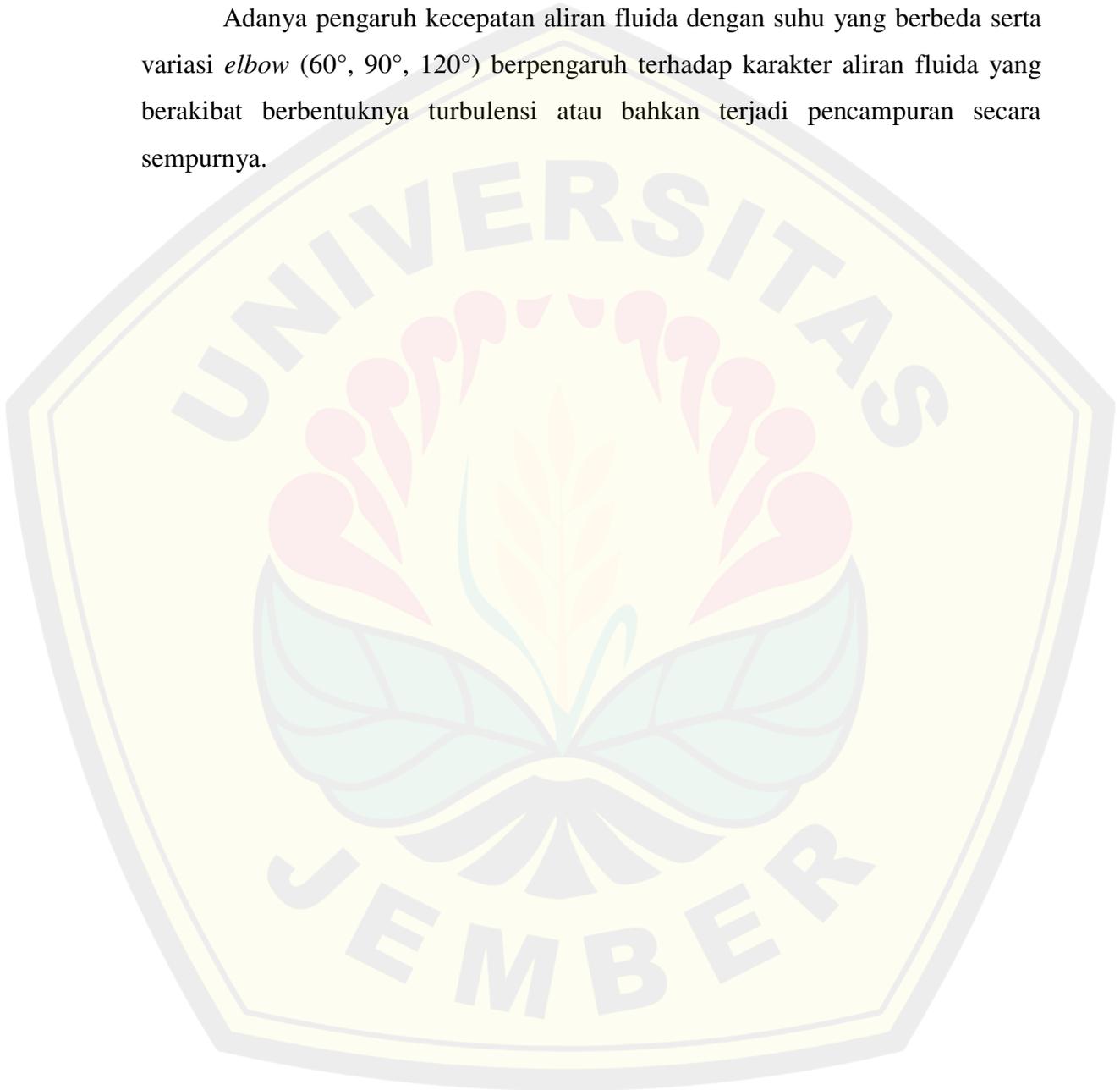
Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah agar tetap fokus pada tujuan yang telah ditetapkan. Batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dianalisa terbatas pada fluida panas, fluida dingin, dinding tabung dan sesuai dengan parameter pada saat eksperimen dengan aliran yang di campur.
2. Perpindahan panas pada dinding tabung terluar APK diabaikan karena isolator dianggap sempurna.
3. Perpindahan panas radiasi yang terjadi di abaikan.
4. Faktor pengotoran di abaikan.

5. Hanya melakukan eksperimen pada sudut 90° saja dan dibandingkan pada hasil simulasi CFD
6. Kondisi pada saat pengambilan data dianggap tunak (*steady state*).

1.5 Hipotesis Penelitian

Adanya pengaruh kecepatan aliran fluida dengan suhu yang berbeda serta variasi *elbow* (60° , 90° , 120°) berpengaruh terhadap karakter aliran fluida yang berakibat terbentuknya turbulensi atau bahkan terjadi pencampuran secara sempurna.



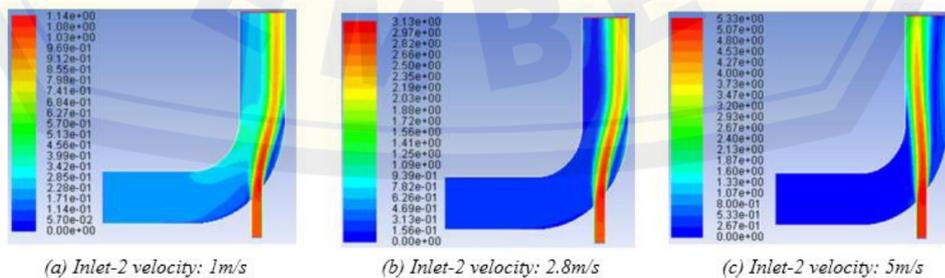
BAB 2. TINJAUAN TEORI

Ada beberapa referensi yang relevan dengan lingkup penelitian yang digunakan sebagai rujukan pustaka pada penelitian ini. Referensi disini diambil dari berbagai sumber antara lain buku teks, tesis, disertasi, jurnal dan informasi yang berkaitan dengan aliran melintasi atau yang masuk ruangan pencampuran siku.

2.1 Penelitian Terdahulu

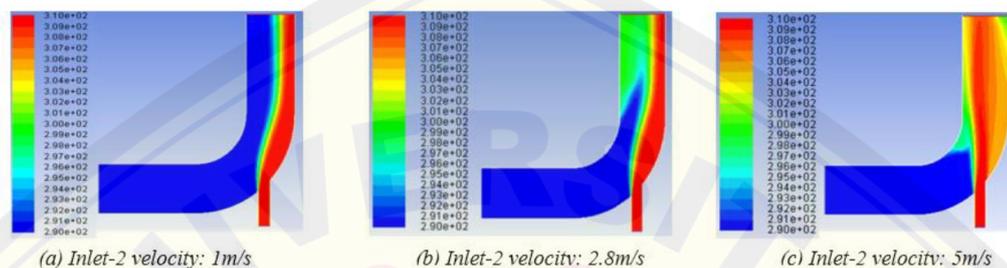
Penelitian tentang analisis dinamika fluida komputasi perpindahan panas dan aliran fluida di pencampuran siku oleh (Sridhara, S.N. 2020). Peneliti ini menganalisis menggunakan pemecah dinamika fluida komputasi (CFD), *ANSYS Fluent* untuk menyelesaikan diskritisasi persamaan, menggunakan pendekatan volume hingga dengan metode semi-implisit untuk persamaan terkait tekanan (*SIMPLE*) algoritma. Persamaan yang mengatur untuk aliran fluida tak termampatkan. Model turbulen k- ϵ standar diadopsi untuk penelitian ini. Dalam model ini, energi kinetik turbulen (k) dan tingkat disipasi turbulensi (ϵ).

Masalah yang dilakukan dinyatakan sebagai air dingin suhu 290K masuk melalui inlet berdiameter besar dengan kecepatan 0,2 m/s sedangkan air panas bersuhu 310K masuk melalui lubang masuk berdiameter kecil dengan kecepatan berbeda dari 1m/s sampai 5m/s. Ditemukan bahwa kecepatan pada saluran masuk -1, profil kecepatan di pusat siku pulih sepenuhnya bentuk turbulensi yang berkembang. Ditemukan juga bahwa dengan peningkatan kecepatan pada inlet-2 untuk berbagai nilai seperti 1m/s, 2,8m/s dan 5m/s, distribusi suhu dalam cairan campuran secara efektif menunjukkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi.



Gambar 2.1 Velocity Profiles in Elbow

Dari penelitian di atas bahwa profil kecepatan saluran masuk-1 0.2m/s dan tiga kecepatan saluran masuk-2 yang berbeda ditunjukkan pada gambar 2.1 simulasi dilakukan dengan menggunakan model turbulensi, karena efek venturi di dekat inlet-2, kecepatannya sedikit berfluktuasi dan bergeser ke atas karena pergerakan fluida yang lebih cepat. Sehingga kecepatan 5 m/s menunjukkan kebutuhan yang tepat dari pencampuran air panas dan dingin.



Gambar 2.2 Temperature profiles in Elbow

Dari penelitian di atas profil suhu adalah profil penting kedua yang perlu dipertimbangkan selain dari profil kecepatan. Suhu kontur siku pencampuran ditunjukkan pada Gambar 2.2. Terlihat bahwa aliran pencampuran yang tepat terjadi di siku hulu dekat dengan *outlet*.

2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode perhitungan dengan sebuah control dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya. Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan dibagi-bagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan meshing. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan adalah aplikasi. CFD juga merupakan analisa sistem yang mencakup aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena yang terkait. Seperti reaksi kimia dengan menggunakan simulasi berbasis komputer (*numeric*). (Jalaluddin et al., 2019)

Kontrol-kontrol penghitungan ini beserta kontrol-kontrol penghitungan lainnya merupakan pembagian ruang yang disebut meshing. Nantinya, pada setiap

titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang banyak dipakai pada proses penghitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer. Contoh lain penerapan prinsip ini adalah *Finite Element Analysis* (FEA) yang digunakan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada benda solid. (Al-Shemmeri, 2012)

2.3 Pengertian Fluida

Suatu zat yang berada pada fase cair atau gas disebut sebagai fluida. Perbedaan antara zat padat dan fluida adalah berdasarkan kemampuan suatu benda tersebut dalam menahan suatu tegangan geser atau tangensial yang akan cenderung merubah bentuknya. Benda padat dapat menahan tegangan geser yang diterimanya, sedangkan fluida akan berubah bentuk secara terus menerus mengikuti ruang yang di tempati.

Menurut (Raswari, 1986), fluida merupakan suatu zat / bahan yang dalam keadaan setimbang tak dapat menahan gaya atau tegangan geser (*shear force*). Dapat pula didefinisikan sebagai zat yang dapat mengalir bila ada perbedaan tekanan dan atau tinggi. Suatu sifat dasar fluida nyata, yaitu tahanan terhadap aliran yang diukur sebagai tegangan geser yang terjadi pada bidang geser yang dikenai tegangan tersebut adalah viskositas atau kekentalan / kerapatan zat fluida tersebut.

Fluida dapat didefinisikan sebagai suatu zat mampu alir dan dapat menyesuaikan bentuk dengan bentuk wadah yang ditempatinya, serta apabila diberikan tegangan geser, berapapun kecilnya akan menyebabkan fluida tersebut bergerak dan berubah bentuk secara terus - menerus selama tegangan tersebut bekerja. (Zainudin, 2012)

Dengan pengertian diatas maka fluida dapat dibedakan atas zat cair dan gas. Dimana kedua zat ini pun berbeda secara teknis akibat gaya kohesif. Zat cair cenderung mempertahankan volumenya dan akan membutuhkan permukaan bebas dalam medan gravitasi. Aliran muka bebas sangat dipenuhi efek gravitasi sedangkan zat gas akan memuai dengan bebas sampai tertahan oleh dinding yang

membatasinya. Gas tersebut akan membentuk atmosfer yang pada hakekatnya akan bersifat hidrostatik.

2.4 Pengertian Aliran

Fluida adalah suatu zat yang bisa berupa cairan maupun gas. Fluida dapat dengan mudah merubah bentuk, pada zat cair volume tidak akan berubah sedangkan untuk gas volume akan menyesuaikan dengan apa yang membatasinya.

Salah satu cara untuk menerangkan gerak suatu fluida adalah dengan membagi-bagi fluida tersebut menjadi elemen volume yang sangat kecil yang dapat dinamakan partikel fluida dan mengikuti gerak masing-masing partikel ini.

Suatu massa fluida yang mengalir dapat dibagi menjadi tabung aliran, apabila aliran tersebut adalah tunak, waktu tabung-tabung tetap tidak berubah bentuknya dan fluida yang pada suatu saat berada di dalam sebuah tabung akan tetap berada dalam tabung ini seterusnya. Kecepatan aliran didalam tabung aliran adalah sejajar dengan tabung dan mempunyai besar berbanding terbalik dengan luas penampangnya. (Pantar,s, 1997)

Konsep aliran fluida yang berkaitan dengan aliran fluida dalam pipa adalah :

1. Hukum kekentalan Massa
2. Hukum Kekentalan energi
3. Hukum kekentalan momentum
4. Katup
5. Orifacemeter
6. Arcameter (rotarimeter). (martomo, s, 1999)

2.5 Aliran Fluida Dalam Pipa

Setiap sistem aliran fluida dalam pipa dan perpipaan harus mempertimbangkan distribusi tekanan dan penurunan tekanan yang terjadi sepanjang aliran. Sebagai contoh, sistem aliran air PDAM, sistem penyaluran bahan bakar minyak, termasuk juga *ducting system* pada AC sentral harus memperhitungkan secara hati-hati *losses* atau kehilangan energi akibat penurunan

tekanan tersebut karena mempengaruhi energi total dalam sistem. Kehilangan energi (*head losses*) tersebut terjadi akibat adanya gesekan antara fluida yang mengalir dengan permukaan pada tempat fluida mengalir, sehingga disebut juga *friction losses*.

Friction losses dibedakan menjadi dua macam. Pertama, *friction loss* di sepanjang perpipaan, disebut juga *major losses* karena *losses* akibat gesekan ini mempunyai porsi yang besar. Kedua, *friction loss* yang terjadi pada *fitting* (sambungan, belokan, perubahan penampang aliran, dsb), disebut juga *minor losses*. *Minor losses* besar jika kecepatan aliran tinggi dan banyak *fitting* di sepanjang aliran.

a. *Major losses*

Major losses terjadi akibat gesekan aliran fluida di sepanjang pipa. Besarnya *major losses* dipengaruhi oleh panjang pipa (L), diameter pipa (D), kecepatan aliran fluida (V), viskositas fluida (μ), dan material/bahan pipa. *Major losses* dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach sbb:

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

dimana $H_L = \text{Major losses (m)}$

$f = \text{Faktor gesekan (tak berdimensi)}$

$L = \text{Panjang lintasan pipa (m)}$

$D = \text{Diameter pipa (m)}$

$v = \text{Kecepatan rata-rata aliran fluida (m/s)}$

$g = \text{Gravitasi, } 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Persamaan Darcy-Weisbach di atas disebut juga persamaan tekanan-kecepatan karena memuat suku yang menunjukkan pengaruh tekanan-kecepatan aliran, yaitu $v^2/2g$.

Nilai faktor gesekan f dipengaruhi oleh rezim aliran (laminer, transisi, atau turbulen) dan material pipa. Material pipa menentukan besarnya kekasaran permukaan pipa. Rezim aliran ditentukan oleh besarnya bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.2)$$

dimana $Re = \text{Bilangan Reynold (tak berdimensi)}$

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

μ = Viskositas mutlak fluida (N.s/m^2)

Untuk aliran laminar, nilai faktor gesekan f merupakan fungsi sederhana dari Bilangan Reynold Re :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

Untuk aliran transisi, nilai faktor gesekan f dihitung dengan Persamaan Colebrook sbb:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad (2.4)$$

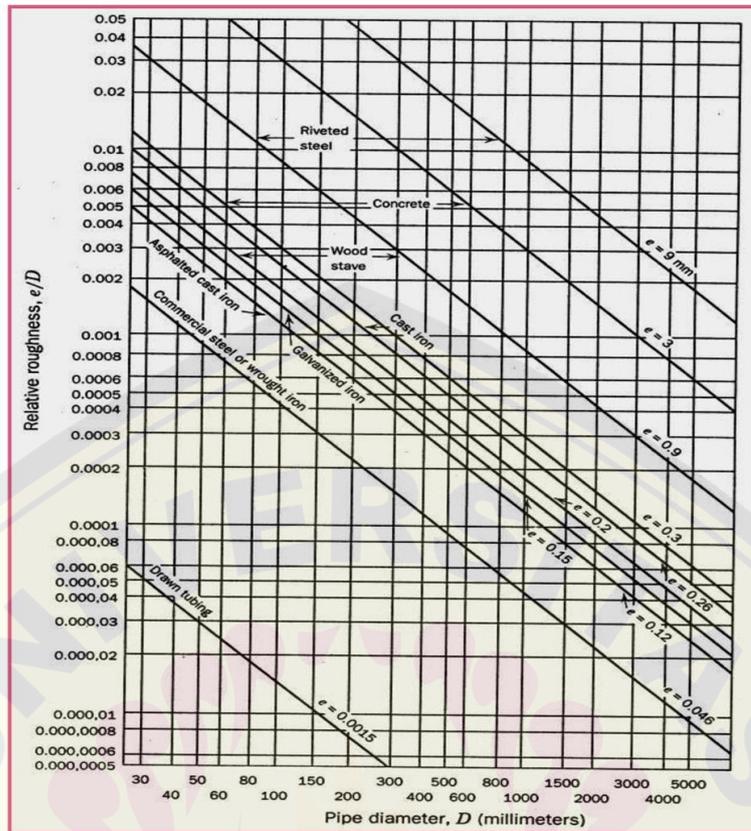
dimana ε = Kekasaran permukaan pipa (m)

ε/D = Kekasaran relatif pipa (tak berdimensi)

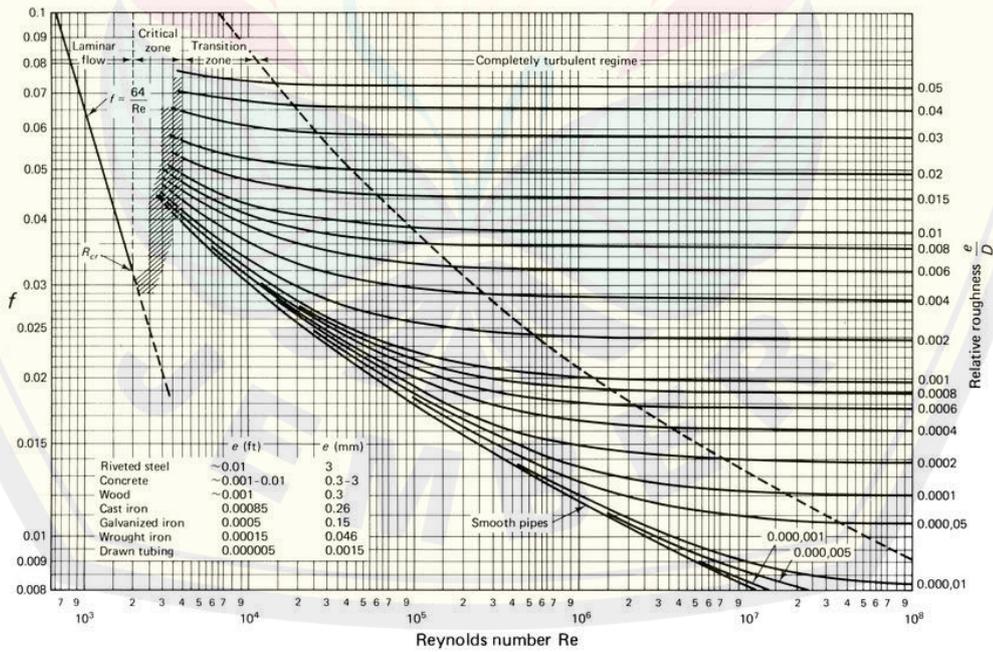
Persamaan Colebrook ini harus diselesaikan secara iteratif untuk mendapatkan nilai f . Untuk aliran turbulen, nilai faktor gesekan f ditentukan dengan urutan sbb:

- Berdasarkan data kekasaran relatif permukaan (ε/D); nilai ε/D bisa ditentukan berdasarkan diameter pipa dan material pipa dari diagram atau grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.
- Berdasarkan harga kekasaran relatif permukaan pipa (ε/D) dan Bilangan Reynold, harga f dicari dengan menggunakan Diagram Moody yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Nilai f untuk aliran transisi bisa juga dicari dengan menggunakan Diagram Moody, akan tetapi beberapa penelitian yang mengkonfirmasi ketidakakuratan menentukan nilai f aliran transisi dengan cara ini.



Gambar 2.3 Grafik Kekasaran Relatif Pipa



Gambar 2.4 Diagram Moody

b. Minor Losses

Minor losses terjadi akibat adanya perubahan arah aliran, perubahan penampang aliran dan perubahan gesekan akibat adanya *fitting* (belokan, percabangan, katup, dan sebagainya). Ada dua macam prosedur dasar untuk menghitung *minor losses*, yaitu:

- Metode Panjang Ekuivalen (*equivalent length method*)

Metode panjang ekuivalen mengasumsikan bahwa setiap *fitting* atau variasi aliran mengakibatkan *losses* yang sama dengan *losses* yang ditimbulkan oleh pipa lurus dengan panjang ekuivalen tertentu. Sebagai contoh, sebuah *gate valve* 2 inchi mengakibatkan *losses* sama besar dengan *losses* yang diakibatkan oleh pipa lurus berdiameter 2 inchi sepanjang 1.5 feet (= 0.46 m). Sehingga, dikatakan panjang ekuivalen *gate valve* adalah 1.5 feet. Panjang ekuivalen untuk semua *minor losses* digunakan dalam persamaan Darcy-Weisbach. Metode panjang ekuivalen hanya digunakan untuk aliran turbulen. Metode ini sederhana dan mudah digunakan tapi mengharuskan adanya tabel nilai ekuivalen. Panjang ekuivalen untuk *fitting* tertentu bisa berbeda-beda, tergantung pada pembuat (produsen) pipa, material, dan cara pemasangannya. Contoh panjang ekuivalen untuk beberapa *fitting* ditunjukkan dalam Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.1 Panjang Ekuivalen *Fitting* Pipa (dalam satuan *British*)

Tipe Fitting	Panjang Ekuivalen (ft)		
	Diameter Pipa (inchi)		
	1"	2"	4"
Regular 90° Elbow	5.2	8.5	13
Long Radius 90° Elbow	2.7	3.6	4.6
Regular 45° Elbow	1.3	2.7	5.5
Tee	3.2	7.7	17
180° Return Bend	5.2	8.5	13
Globe Valve	29	54	110
Gate Valve	0.84	1.5	2.5
Angle Valve	17	18	18
Swing Check Valve	11	19	38
Coupling or Union	0.29	0.45	0.65

Sumber: *Engineer-In-Training Reference Manual, 8th Ed, Michael R. Lindeburg, PE, Professional Publication, Inc. Belmont, CA, 1992*

Tabel 2.2 Panjang Ekuivalen Tak Berdimensi (L_e/D)

Type Fitting	Panjang Ekuivalen $\frac{L_e}{D}$ *)
Valve (fully open)	
Gate valve	8
Globe valve	340
Angle valve	150
Ball valve	3
Lift check valve: globe lift	600
: angle lift	55
Foot valve with strainer : poppet disk	420
: hinged disk	75
Standard elbow 90°	30
Standard elbow 45°	18
Return bend, close pattern	50
Standard tee : flow through run	20
: flow through branch	60

*) Berdasarkan rumus 2.1

- Menggunakan Koefisien *Losses*

Setiap *fitting* mempunyai koefisien *losses*, K , yang jika dikalikan dengan suku tekanan kecepatan menghasilkan besarnya *losses*.

$$M_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

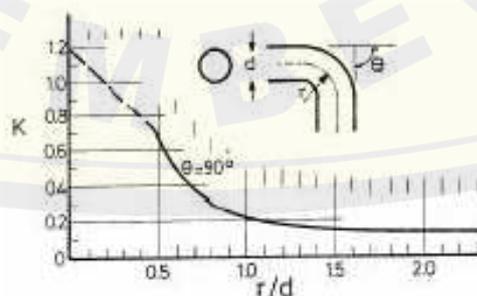
Dimana $M_L = \text{Minor losses (m)}$

$K = \text{Koefisien losses (tak berdimensi)}$

Nilai K untuk semua *fitting* ditentukan secara empiris (berdasar hasil percobaan), dan tidak dapat diturunkan secara teoritis. Beberapa koefisien *losses* bisa juga dihitung berdasarkan panjang ekuivalen yang telah diketahui.

$$K = f \cdot \frac{L_e}{D} \quad (2.6)$$

Nilai empiris koefisien *losses*, K , biasanya dipresentasikan dalam bentuk grafik atau tabel. Contoh grafik koefisien *losses* belokan ditampilkan pada Gambar 2.5.

Gambar 2.5 Koefisien *Losses* Belokan Pipa

2.6 Debit Aliran Fluida

Debit aliran fluida merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung kecepatan aliran fluida, yaitu diperlihatkan dalam persamaan

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.7)$$

Dimana : Q = debit air (m^3/s)

V = volume air (m^3)

t = waktu (s)

Kemudian dari persamaan kontinuitas akan didapatkan rumus seperti yang ditunjukkan dalam persamaan

$$Q = A \cdot v, \text{ dimana } A = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.8)$$

maka kecepatan aliran dalam suatu penampang adalah :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.9)$$

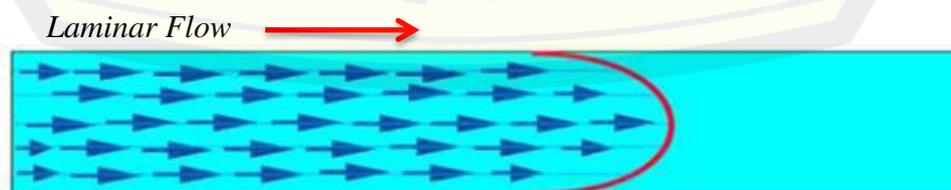
2.7 Macam-Macam Aliran

Aliran dapat digolongkan dalam berbagai bentuk meliputi: turbulen, laminar, nyata, ideal, tidak mampu balik, mampu balik, tak seragam, tak seragam, rotasional, tak rotasional.

Aliran fluida melalui instalasi (pipa) terdapat dua jenis aliran yaitu :

2.7.1 Aliran Laminar

Aliran laminar adalah gerakan fluida yang sangat teratur dan memiliki permukaan yang halus. Kata laminar berasal dari pergerakan partikel-partikel fluida yang berdekatan dan bergerak bersama dalam "*laminasi*". Fluida dengan viskositas tinggi dan bergerak dengan kecepatan rendah biasanya merupakan aliran laminar. Aliran Laminar mempunyai bilangan Reynold kurang dari 2300. Seperti halnya ditunjukkan pada gambar 2.6. (Siregar, J. F., & Sinaga, J. B., 2013)



Gambar 2.6 Aliran Laminar

2.7.2 Aliran Turbulen

Gerakan fluida yang sangat tidak teratur dan biasa terjadi pada kecepatan tinggi dan ditandai dengan fluktuasi disebut turbulensi. Aliran cairan dengan *viskositas* rendah seperti udara pada kecepatan tinggi biasanya bergolak. Aliran Turbulen mempunyai bilangan Reynold lebih dari 4000. Aliran turbulen ditunjukkan seperti pada gambar 2.7 (Yunus, A. C., 2010)



Gambar 2.7 Aliran Turbulen

Cairan dengan bentuk laminar akan lebih mudah mengalir. Dalam aliran fluida perlu ditentukan besarnya, atau arah vektor kecepatan aliran pada suatu titik ke titik yang lain. Guna mengetahui arti tentang medan fluida, kondisi rata-rata pada daerah atau volume yang kecil dapat dipilih dengan instrument yang cocok.

Pengukuran aliran bertujuan untuk mengetahui kapasitas aliran, massa laju aliran, volume aliran. Alat ukur yang digunakan tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, harga, kemudahan pembacaan, kesederhanaan dan keawetan alat ukur tersebut.

Dalam mengukur fluida kita dapat melihat tekanan, kecepatan, debit, gradien kecepatan, turbulensi dan viskositas. Ada banyak cara dalam melaksanakan pengukuran, misalnya: secara langsung, tidak langsung, gravimetrik, volumetrik, elektronik, elektromagnetik dan optik. Pengukuran debit secara langsung terdiri dari atas jumlah fluida yang melalui suatu penampang dalam batas waktu tertentu. Dalam metode tak langsung, pengukuran debit diperlukan penentuan tinggi tekanan, perbedaan tekanan atau kecepatan di beberapa titik pada suatu penampang dan dengan besaran perhitungan debit. Ada metode pengukuran yang lebih teliti yaitu penentuan gravimerik atau penentuan volumetrik dengan berat atau volume diukur atau penentuan dengan menggunakan tangki yang disesuaikan dalam suatu waktu. (Yunus, A. C., 2010)

2.8 Metode Numerik

Melibatkan penyelesaian persamaan *Navier-Stokes* dengan model turbulensi yang sesuai di pipa panjang dan koordinat lengkung. Hasilnya biasanya ditampilkan sebagai variasi pola aliran dan suhu distribusi terhadap bilangan Reynold aliran.

Persamaan *Navier-Stokes* adalah bentuk diferensial dari hukum kedua Newton tentang pergerakan dari suatu fluida. Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan dalam momentum partikel - partikel fluida hanya bergantung pada gaya viskos internal dan gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida. Dengan demikian, persamaan Navier-Stokes menjelaskan kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja pada fluida. (Welty dkk, 2004)

Persamaan *Navier-Stokes* diselesaikan untuk geometri tertentu dari aliran laminar berkembang penuh di dalam sebuah pipa bundar yang tidak horizontal. Gerakan umum dari sebuah fluida Newtonian tak mampu-mampat diatur oleh persamaan kontinuitas (kekekalan massa) dan persamaan momentum (Zhang dkk, 2006; Spurk dan Aksel, 2008; Bhattacharyya dkk, 2009; Herbst dan Skibsted, 2009; Khmelnik, 2011),

2.9 Model K-Epsilon Standard

Model ini merupakan model turbulensi semi empiris yang lengkap, dikembangkan oleh Launder & Spalding. Walaupun masih sederhana, memungkinkan untuk dua persamaan yaitu kecepatan turbulen, *turbulent velocity* dan skala panjang *length scale* ditentukan secara bebas *independent*. Kestabilan, ekonomis dari segi komputansi, dan akurasi yang cukup memadai membuat model ini sering digunakan dalam simulasi fluida dan perpindahan panas. Model *k-epsilon* merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Kesetabilan, ekonomis (dari sisi komputasi) dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model *k-epsilon* sering digunakan pada simulasi fluida dan perpindahan panas, (Sulistiya & Kasman, 2019).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang akan dilakukan adalah metode simulasi dan eksperimental dengan variasi masing-masing sudut siku (60° , 90° dan 120°), pada sebuah aliran fluida air panas terhadap air dingin yang masuk ruangan pencampuran pipa *mixing elbow*.

3.2 Waktu dan Tempat Eksperimen

Proses penelitian ini diawali dari semester ke 1 sampai semester 3 tersusun dari pencarian *referensi journal* sebagai bahan studi literatur, melakukan simulasi tentang *ansys* sesuai penelitian pada mata kuliah CVD. Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin Universitas Jember. Melakukan simulasi dan pengujian secara eksperimen untuk mendapatkan data sebagai bahan analisis dan pembahasan.

3.3 Perlengkapan Eksperimen

3.3.1 Alat

Pada penelitian tersebut terdapat beberapa alat yang perlu disiapkan, di antara :

1. *Software Ansys Fluent 2023 R1*
2. Komputer PC HP Intel® Core i7 Ram 8GB 64-bit
3. Alat Peraga *Mixing Elbow*
4. Termometer Digital 4 *channel*
5. *Thermoreader* Digital
6. *Termocouple type K probe*
7. *Stopwatch*
8. Water Heater / Pemanas Air
9. Timba reservoir 2 buah
10. Pipa diameter 2 inch
11. Pipa diameter 0,5 inch

12. *Thermocontrol Rex-C100*
13. *Water Flow Sensor*
14. Arduino uno deteksi kecepatan Aliran Air
15. Dimmer Control Listrik
16. Pompa Air

3.3.2 Bahan

Bahan – bahan yang digunakan pada saat penelitian yaitu untuk simulasi langsung menggunakan data yang ada pada *Software Ansys Fluent 2023 R1*, sedangkan untuk eksperimen menggunakan air panas dengan suhu 42°C dan air dingin 26°C.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel merupakan konstruk atau sifat yang akan dipelajari yang mempunyai nilai yang bervariasi.

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi penelitian, seperti faktor – faktor yang diukur, dimanipulasi atau dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diteliti. Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu:

1. Variasi sudut elbow (60°, 90°, 120°) pada siku pencampuran
2. Kecepatan aliran pada *inlet hot* (0,5m/s, 1m/s, 1,5m/s)

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang diakibatkan karena adanya variabel bebas seperti hasil dalam penelitian tersebut. Variabel terikat pada penelitian ini yaitu karakter aliran fluida di sepanjang pipa outlet meliputi (profil temperatur dan profil *Vectors Velocity*)

3.5 Prosedur Penelitian

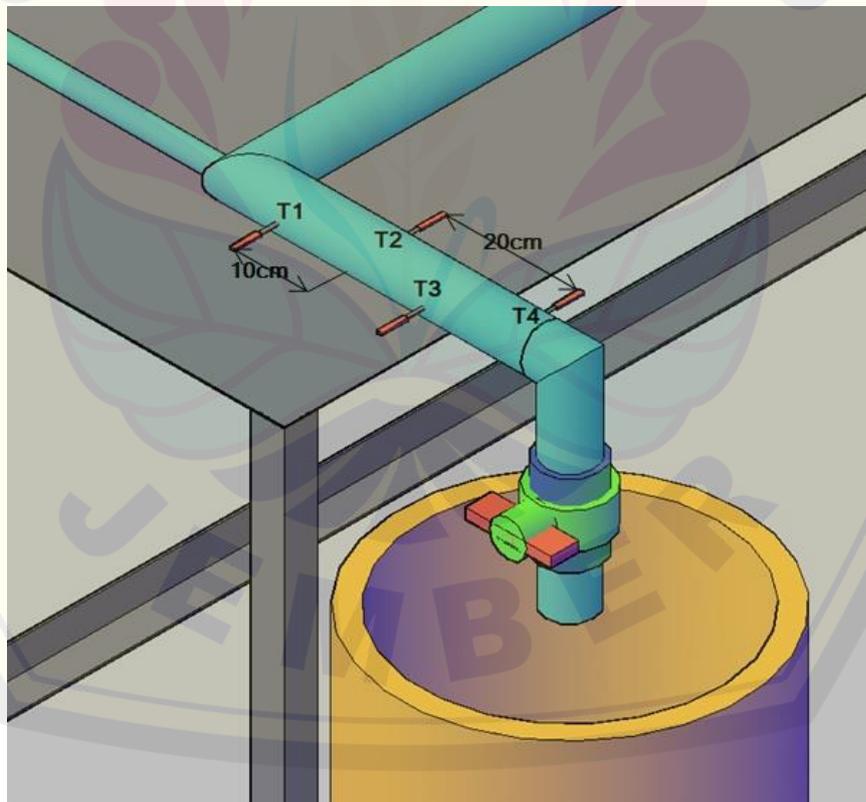
3.5.1 Pengujian Simulasi

Dalam proses ini dilakukan simulasi menggunakan software ansys fluent 2023 R1 dengan 3 variasi sudut siku (60° , 90° , 120°) dan kecepatan aliran pada *inlet hot* (0,5m/s, 1m/s, 3m/s).

3.5.2 Pengujian Eksperimen

Dalam proses eksperimen melakukan satu uji coba dengan elbow sudut 90° , sebagai pembanding uji simulasi.

Untuk kecepatan aliran diatur oleh dimmer control listrik yang hasilnya di tunjukkan pada lcd arduino uno sebagai pendeteksi kecepatan aliran air. Pembaca suhu menggunakan thermocouple type K probe dengan bantuan alat termometer digital 4 channel dan *thermoreader* digital. Untuk letak titik *thermocouple* berada di kelipatan 10cm setelah pusat pencampuran sepanjang 50cm sampai ujung *outlet air*. Letak titik *thermocouple* ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut:

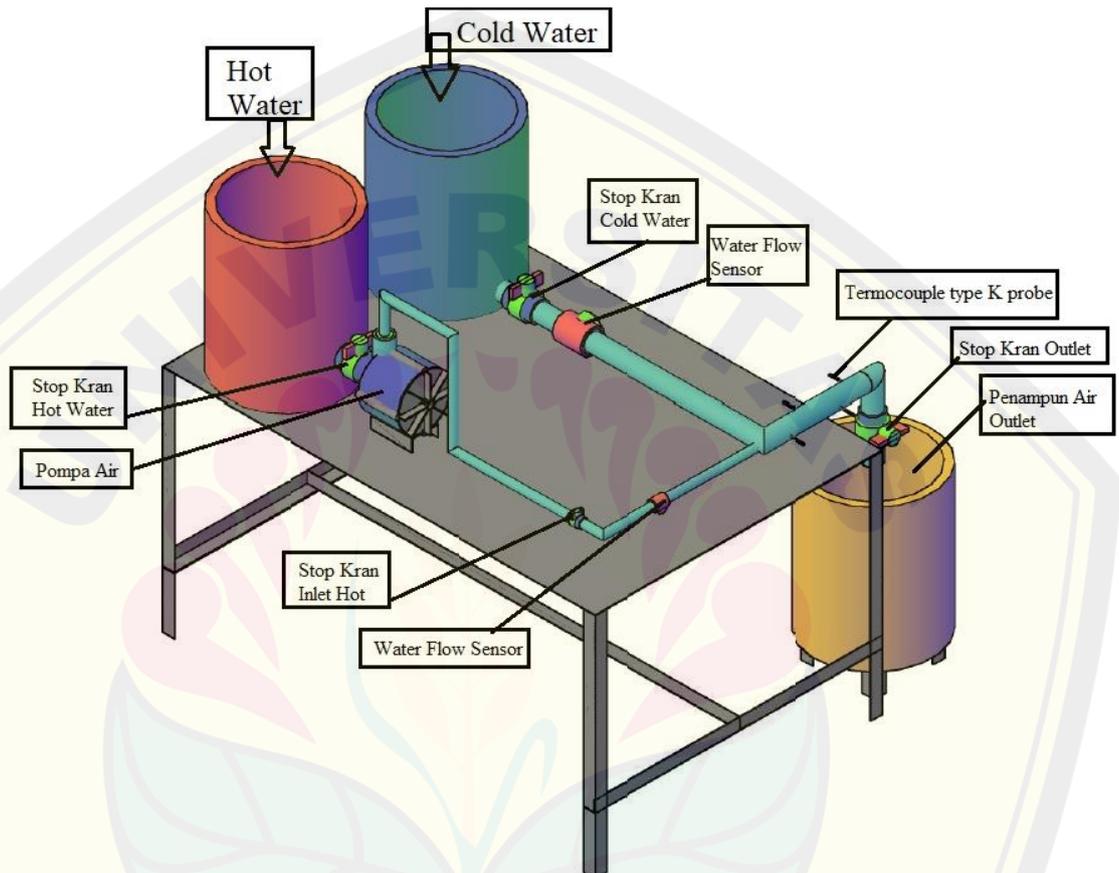


Gambar 3.1 Letak Titik *Thermocouple*

3.6 Skema Eksperimen

3.6.1 Metode Eksperimen

Untuk metode eksperimen yang akan dilakukan seperti yang tertera pada gambar 3.2 di bawah ini.



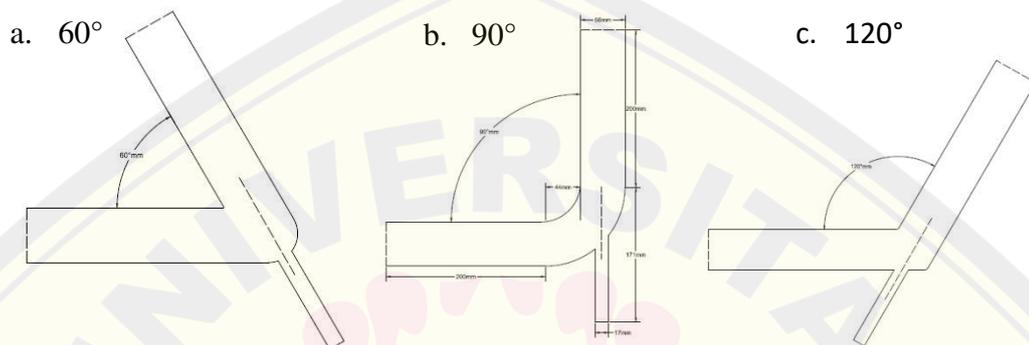
Gambar 3.2 Alat Peraga Eksperimen

Keterangan gambar 3.2:

Alat peraga mixing elbow ini menggunakan air panas dan dingin dengan suhu yang sudah di ketahui sebagai uji eksperimennya, dengan bantuan pompa air untuk proses kecepatannya dengan variasi yang sudah ditentukan juga, tujuan dari eksperimen ini mencampurkan kedua fluida untuk mengetahui karakteristik aliran yang terjadi setelah pencampuran termasuk suhu fluida yang dihasilkan.

3.6.2 Variasi Sudut Pengujian

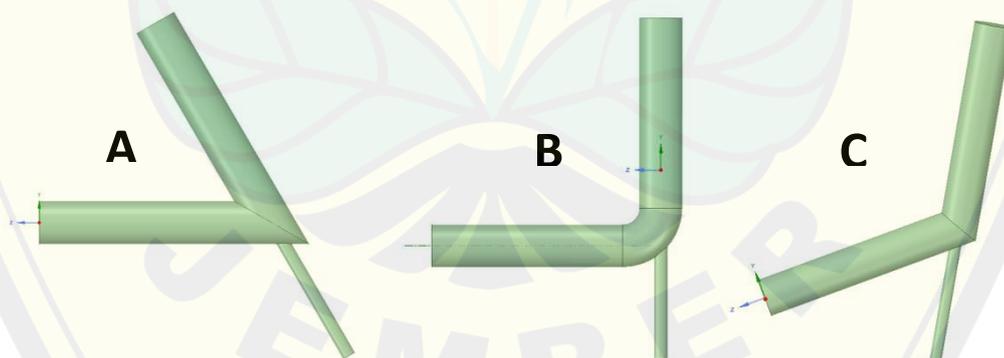
Dalam proses pengujian yang dilakukan secara simulasi yaitu menggunakan 3 model variasi dengan sudut siku 60° , 90° , 120° dan sementara untuk proses pengujian secara eksperimen dilakukan dengan sudut siku 90° yang kemudian akan dibandingkan dengan simulasi. Variasi sudut siku yang akan dilakukan seperti pada gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Variasi Sudut Siku

3.6.3 Metode Simulasi

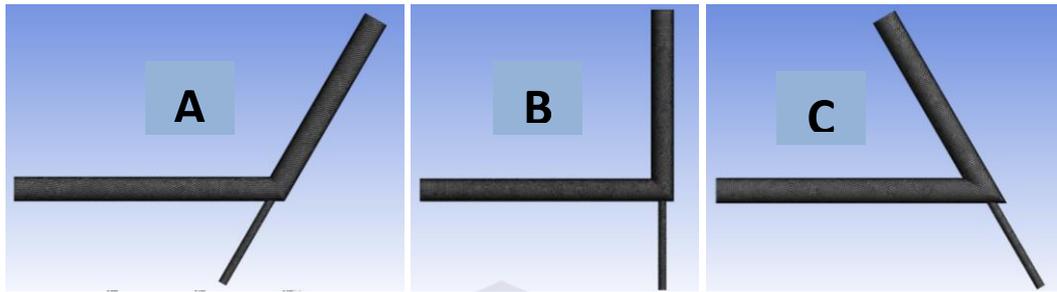
Model dan Sketsa Geometri Gambar 3.4 merupakan geometri dari masing-masing variasi siku dengan sudut yang berbeda.



Gambar 3.4 Geometri Siku (A) Sudut 60° , (B) Sudut 90° , (C) Sudut 120°

3.6.4 Perubahan Desain Geometri ke *Meshing*

Setelah proses menggambar geometri, selanjutnya proses *meshing*, detail mesh ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Bentuk Mesh (A) Sudut 60°, (B) Sudut 90°, (C) Sudut 120°

3.6.5 Pengaturan Model Simulasi

Penentuan model simulasi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6

Viscous Model

Model

- Inviscid
- Laminar
- Spalart-Allmaras (1 eqn)
- k-epsilon (2 eqn)
- k-omega (2 eqn)
- Transition k-kl-omega (3 eqn)
- Transition SST (4 eqn)
- Reynolds Stress (7 eqn)
- Scale-Adaptive Simulation (SAS)
- Detached Eddy Simulation (DES)
- Large Eddy Simulation (LES)

k-epsilon Model

- Standard
- RNG
- Realizable

Near-Wall Treatment

- Standard Wall Functions
- Scalable Wall Functions
- Non-Equilibrium Wall Functions
- Enhanced Wall Treatment
- Menter-Lechner
- User-Defined Wall Functions

Options

- Viscous Heating
- Curvature Correction
- Production Kato-Launder
- Production Limiter

Model Constants

Cmu: 0.09

C1-Epsilon: 1.44

C2-Epsilon: 1.92

TKE Prandtl Number: 1

TDR Prandtl Number: 1.3

Energy Prandtl Number: 0.85

Wall Prandtl Number:

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Prandtl Numbers

TKE Prandtl Number: none

TDR Prandtl Number: none

Energy Prandtl Number: none

Wall Prandtl Number: none

Gambar 3.6 Pengaturan Model Simulasi k-epsilon Model Standard

3.6.6 Data Fluida

Adapun data properties air yang digunakan dalam *software* simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.7

Create/Edit Materials

Name: water-liquid
 Material Type: fluid
 Chemical Formula: h2o<l>
 Fluent Fluid Materials: water-liquid (h2o<l>)
 Mixture: none

Order Materials by:
 Name
 Chemical Formula

Fluent Database...
 GRANTA MDS Database...
 User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: constant, 998.2
 Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant, 4182
 Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant, 0.6
 Viscosity [kg/(m s)]: constant, 0.001003

Gambar 3.7 Properti Default Air pada Ansys

3.6.7 Pengaturan *Boundary Condition*

Pada simulasi, kondisi batas penting untuk menentukan batasan penelitian, pengaturan kecepatan aliran setiap pipa ditunjukkan pada Gambar 3.8 dan pengaturan suhu fluida pada Gambar 3.9 berikut:

Velocity Inlet

Zone Name: inlet_cold

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
 Reference Frame: Absolute
 Velocity Magnitude [m/s]: 0.02
 Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio
 Turbulent Intensity [%]: 5
 Turbulent Viscosity Ratio: 10

(a) *Inlet Cold*

Velocity Inlet

Zone Name: inlet_hot

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
 Reference Frame: Absolute
 Velocity Magnitude [m/s]: 0.5
 Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio
 Turbulent Intensity [%]: 5
 Turbulent Viscosity Ratio: 10

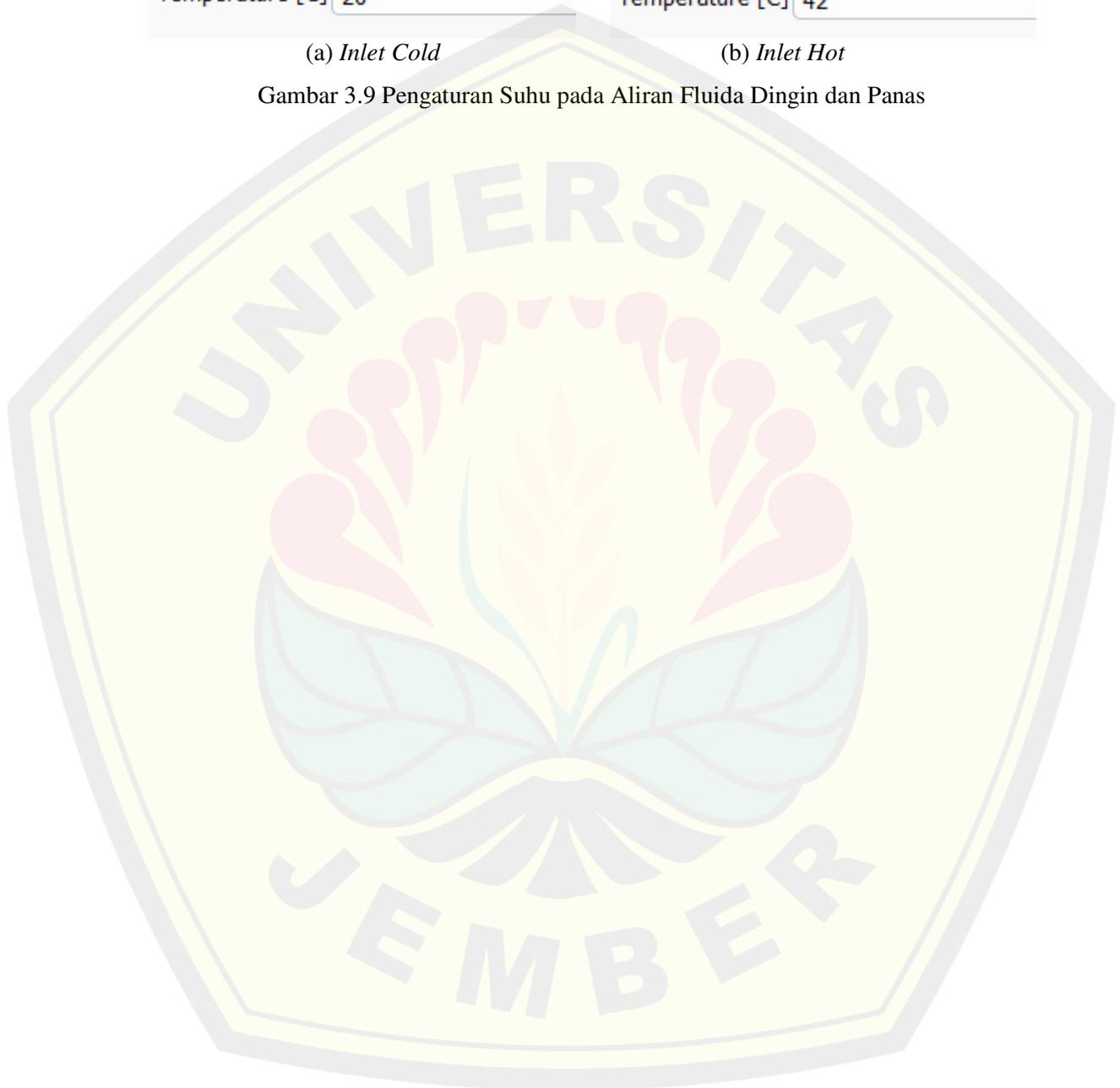
(b) *Inlet Hot*

Gambar 3.8 Pengaturan Kecepatan Aliran Fluida Dingin dan Panas

 Velocity Inlet	 Velocity Inlet
Zone Name inlet_cold	Zone Name inlet_hot
Momentum Thermal Radiation	Momentum Thermal Radiation
Temperature [C] 26	Temperature [C] 42

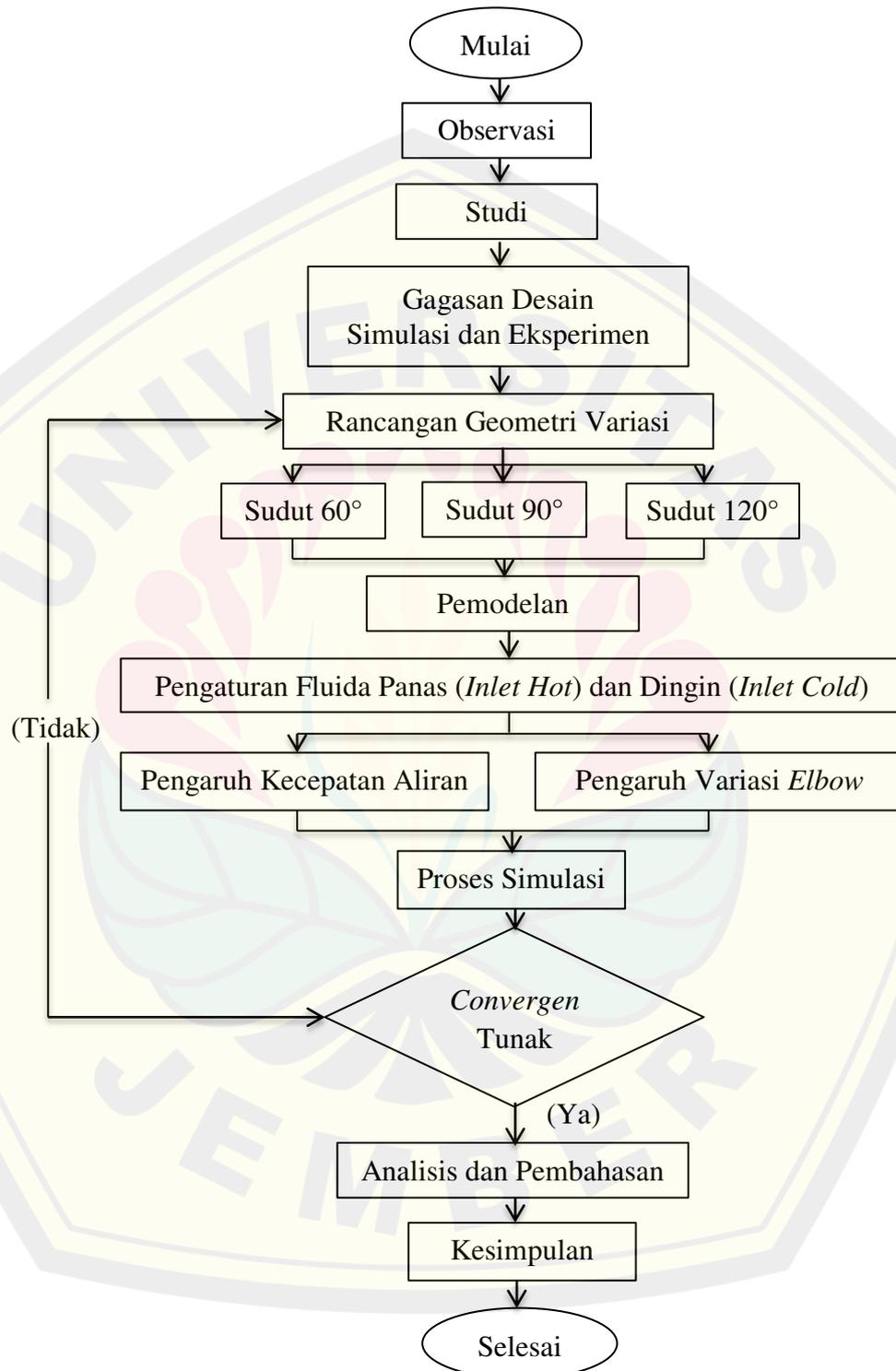
(a) *Inlet Cold*(b) *Inlet Hot*

Gambar 3.9 Pengaturan Suhu pada Aliran Fluida Dingin dan Panas



3.7 Diagram Alir

Skema penelitian yang akan dilakukan tercantum dalam gambar 3.10 berikut:



Gambar 3.10 Flow Chart Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada beberapa hal yang akan dijabarkan secara detail berdasarkan kajian eksperimen dan simulasi numerik pada penelitian ini, meliputi hasil data kualitatif (simulasi numerik) maupun data kuantitatif (eksperimen). Data yang diperoleh dari simulasi dan eksperimen meliputi data pengukuran karakter aliran yaitu profil temperatur dan profil aliran.

Dalam mengetahui aliran itu laminar atau turbulen perlu dilakukan perhitungan mencari nilai dari kecepatan aliran dalam suatu penampang, nilai *major losses*, nilai *minor losses* dan bilangan reynold. Sehingga penelitian yang dilakukan secara eksperimen dan simulasi numerik dapat diketahui hasilnya.

Data yang diperoleh dalam melakukan eksperimen dan simulasi yaitu:

- Panjang pipa inlet hot dari pompa ke siku pencampuran = 217 cm
- Panjang pipa inlet cold dari bak penampung ke siku pencampuran = 105 cm
- Diameter dalam pipa inlet hot = 19 mm
- Diameter dalam pipa inlet cold = 56 mm
- Suhu aliran di pipa inlet hot = 42°C
- Suhu aliran di pipa inlet cold = 26°C
- Jarak pusat pencampuran ke outlet = 50 cm
- Jarak antar titik suhu = 10 cm
- Kecepatan Inlet cold pipa 2 inch = 2,67 Liter/menit = 0,02 m/s
- Variasi untuk pipa ½ inch Q variasi ke 1 = 8,5 Liter/menit
- Variasi untuk pipa ½ inch Q variasi ke 2 = 17 Liter/menit
- Variasi untuk pipa ½ inch Q variasi ke 3 = 26 Liter/menit
- Tabel data pengujian eksperimen terdapat pada lampiran 1

4.1 Mencari kecepatan Aliran dalam Suatu Penampang

dimana $Q = \frac{V}{t}$

Kemudian dari persamaan kontinuitas akan didapatkan rumus

$$Q = A \cdot v, \text{ dimana } A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

Maka kecepatan aliran dalam suatu penampang adalah:

$$v = \frac{Q}{A}$$

untuk pipa ½ inch variasi ke 1

$$\begin{aligned} Q &= 8,5 \text{ Liter/menit} \\ &= 0,000141667 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot r^2 \\ &= 3,14 \cdot (9,5 \text{ mm})^2 \\ &= 3,14 \cdot (0,0095 \text{ m})^2 \\ &= 0,000283385 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{Q}{A} \\ v &= \frac{0,000141667 \text{ m}^3/\text{s}}{0,000283385 \text{ m}^2} \\ v &= 0,499 = 0,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

untuk pipa ½ inch variasi ke 2

$$\begin{aligned} Q &= 17 \text{ Liter/menit} \\ &= 0,000283333 \text{ m}^3/\text{s} \\ A &= \pi \cdot r^2 \\ &= 3,14 \cdot (9,5 \text{ mm})^2 \\ &= 3,14 \cdot (0,0095 \text{ m})^2 \\ &= 0,000283385 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{Q}{A} \\ v &= \frac{0,000283333 \text{ m}^3/\text{s}}{0,000283385 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

$$v = 0,999 = 1 \text{ m/s}$$

untuk pipa ½ inch variasi ke 3

$$\begin{aligned} Q &= 26 \text{ Liter/menit} \\ &= 0,000433333 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot r^2 \\ &= 3,14 \cdot (9,5 \text{ mm})^2 \\ &= 3,14 \cdot (0,0095 \text{ m})^2 \\ &= 0.000283385 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{Q}{A} \\ v &= \frac{0,000433333 \text{ m}^3/\text{s}}{0.000283385 \text{ m}^2} \\ v &= 1,529 = 1,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

4.2 Mencari Nilai dari Bilangan Reynold

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Dalam mencari (ρ) Densitas fluida (kg/m^3) dibutuhkan table physical properties aliran air atau tabel sifat-sifat fisik air terdapat pada lampiran 2.

Didapatkan data:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{Suhu bawah } 40^\circ\text{C} &&= 992,2 \text{ kg/m}^3 \\ &= \text{Suhu pengujian } 42^\circ\text{C} &&= x \dots ? \\ &= \text{Suhu atas } 45^\circ\text{C} &&= 990,2 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$x = 992,2 + \left[\left(\frac{42-40}{45-40} \right) \cdot (990,2 - 992,2) \right]$$

$$x = 992,2 + \left[\left(\frac{2}{5} \right) \cdot (-2) \right]$$

$$x = 992,2 + (-0,8)$$

$$x = 991,4 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho \text{ suhu } 42^\circ\text{C} = 991,4 \text{ kg/m}^3$$

Dalam mencari nilai (μ) viskositas mutlak fluida (N.s/m^2) dibutuhkan table physical properties aliran air. Didapatkan data:

$$\begin{aligned}\mu &= \text{Suhu bawah } 40^\circ\text{C} &&= 0,656^{10^3} \text{ N.s/m}^2 \\ &= \text{Suhu pengujian } 42^\circ\text{C} &&= x \dots? \\ &= \text{Suhu atas } 45^\circ\text{C} &&= 0,599^{10^3} \text{ N.s/m}^2\end{aligned}$$

$$x = 0,656^{10^3} + \left[\left(\frac{42-40}{45-40} \right) \cdot (0,599^{10^3} - 0,656^{10^3}) \right]$$

$$x = 0,656^{10^3} + \left[\left(\frac{2}{5} \right) \cdot (-0,057^{10^3}) \right]$$

$$x = 0,656^{10^3} + (-0,0228^{10^3})$$

$$x = 0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2$$

$$\mu \text{ suhu } 42^\circ\text{C} = 0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2$$

4.2.1 Hasil Hitung Reynold

Angka Reynold merupakan angka yang bisa menunjukkan pola aliran fluida. Hasil penghitungan Reynold pada variasi kecepatan adalah sebagai berikut:

1. Pada kecepatan 0,5 m/s

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{(991,4 \text{ kg/m}^3) \cdot 0,5 \text{ m/s} \cdot (0,056 \text{ m})}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$\text{Re} = \frac{27,7592}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$\text{Re} = 43.853,4 \text{ (Turbulen)}$$

2. Pada kecepatan 1 m/s

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{(991,4 \text{ kg/m}^3) \cdot 1 \text{ m/s} \cdot (0,056 \text{ m})}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re = \frac{55,5184}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re = 87.706,8 \text{ (Turbulen)}$$

3. Pada kecepatan 1,5 m/s

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$Re = \frac{(991,4 \text{ kg/m}^3) \cdot 1,5 \text{ m/s} \cdot (0,056 \text{ m})}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re = \frac{83,2776}{0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$Re = 131.560,2 \text{ (Turbulen)}$$

Hasil perhitungan angka Reynold menunjukkan angka lebih dari 4000, yang berarti menurut hasil perhitungan, aliran pada semua variasi eksperimen ini adalah Turbulen seutuhnya.

4.3 Mencari Nilai dari *Major Losses*

Major losses dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

1. Pada kecepatan 0,5 m/s

$$\text{Dimana: } f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{43.853,4}$$

$$f = 0,00146$$

Sehingga:

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$H_L = 0,00146 \cdot \frac{50 \text{ cm}}{56 \text{ mm}} \cdot \frac{(0,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$H_L = 0,00146 \cdot \frac{0,5\text{m}}{0,056 \text{ m}} \cdot \frac{0,25}{19,62}$$

$$H_L = 0,00146 \cdot 8,9285 \cdot 0,0127$$

$$H_L = 0,000165 \text{ m}$$

2. Pada kecepatan 1 m/s

Dimana: $f = \frac{64}{\text{Re}}$

$$f = \frac{64}{87.706,8}$$

$$f = 0,00073$$

Sehingga:

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$H_L = 0,00073 \cdot \frac{50 \text{ cm}}{56 \text{ mm}} \cdot \frac{(1)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$H_L = 0,00073 \cdot \frac{0,5\text{m}}{0,056 \text{ m}} \cdot \frac{1}{19,62}$$

$$H_L = 0,00073 \cdot 8,9285 \cdot 0,0509$$

$$H_L = 0,000332 \text{ m}$$

3. Pada kecepatan 1,5 m/s

Dimana: $f = \frac{64}{\text{Re}}$

$$f = \frac{64}{131.560,2}$$

$$f = 0,00049$$

Sehingga:

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$H_L = 0,00049 \cdot \frac{50 \text{ cm}}{56 \text{ mm}} \cdot \frac{(1,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$H_L = 0,00049 \cdot \frac{0,5\text{m}}{0,056\text{ m}} \cdot \frac{2,25}{19,62}$$

$$H_L = 0,00049 \cdot 8,9285 \cdot 0,1146$$

$$H_L = 0,000501\text{ m}$$

4.4 Menghitung Kekasaran Relatif Pipa

Dimana: ε/D

PVC, drawn tubing, glass $\varepsilon = 0.0015\text{ ft}$

Diameter Pipa 56 mm = 2,20472 inch

$$\varepsilon/D = \frac{0.0015\text{ ft}}{2.20472/12\text{ft}}$$

$$\varepsilon/D = 0,008164$$

4.5 Mencari Nilai dari *Minor Losses*

- Menggunakan Koefisien *Losses*

Setiap *fitting* mempunyai koefisien *loss* , K, yang jika dikalikan dengan suku tekanan kecepatan menghasilkan besarnya *losses*.

$$M_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Terlebih dahulu mencari (K) Koefisien *losses* (tak berdimensi)

$$K = f \cdot \frac{L_e}{D}$$

$$K = 0,00146 \cdot \frac{0,5\text{m}}{0,056\text{ m}}$$

$$K = 0,00146 \cdot 8,9285$$

$$K = 0,01304$$

Didapatkan hasil bahwa nilai koefisien *losses*nya sebesar $K = 0,01304$

Kemudian dicarilah nilai dari *minor losses* sebagai berikut:

1. Pada kecepatan 0,5 m/s

Sehingga: $M_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$

$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{(0,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{0,25}{19,62}$$

$$M_L = 0,01304 \cdot 0,0127$$

$$M_L = 0,000165 \text{ m}$$

2. Pada kecepatan 1 m/s

Sehingga: $M_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$

$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{(1)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{0,25}{19,62}$$

$$M_L = 0,01304 \cdot 0,0509$$

$$M_L = 0,000664 \text{ m}$$

3. Pada kecepatan 1,5 m/s

Sehingga: $M_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$

$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{(1,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

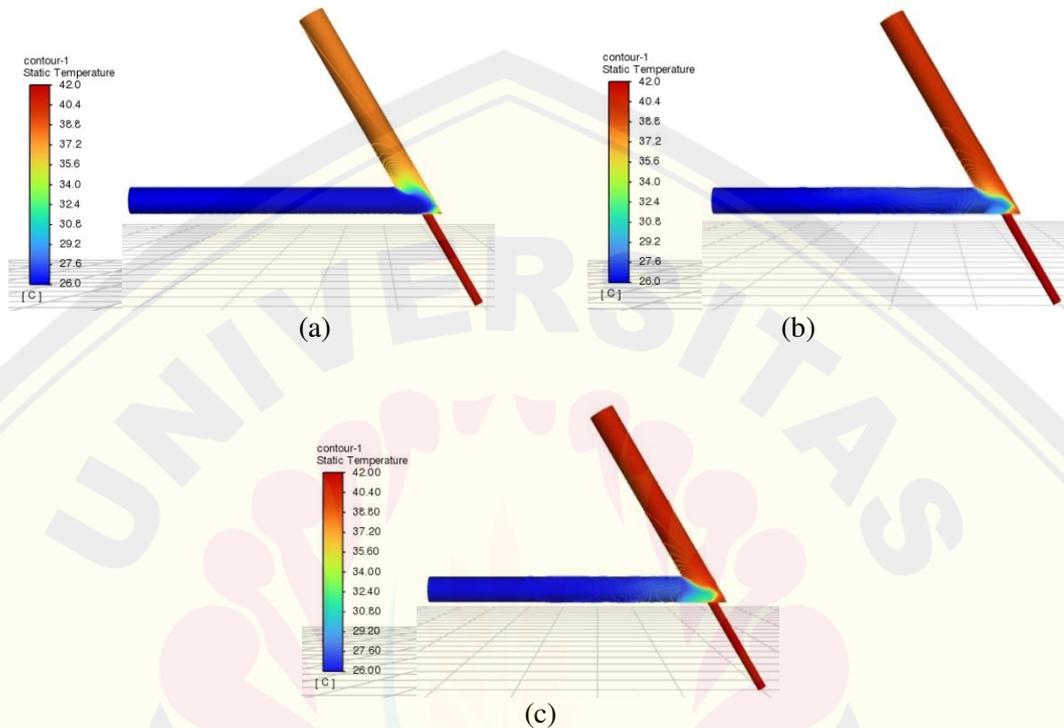
$$M_L = 0,01304 \cdot \frac{0,25}{19,62}$$

$$M_L = 0,01304 \cdot 0,1146$$

$$M_L = 0,001494 \text{ m}$$

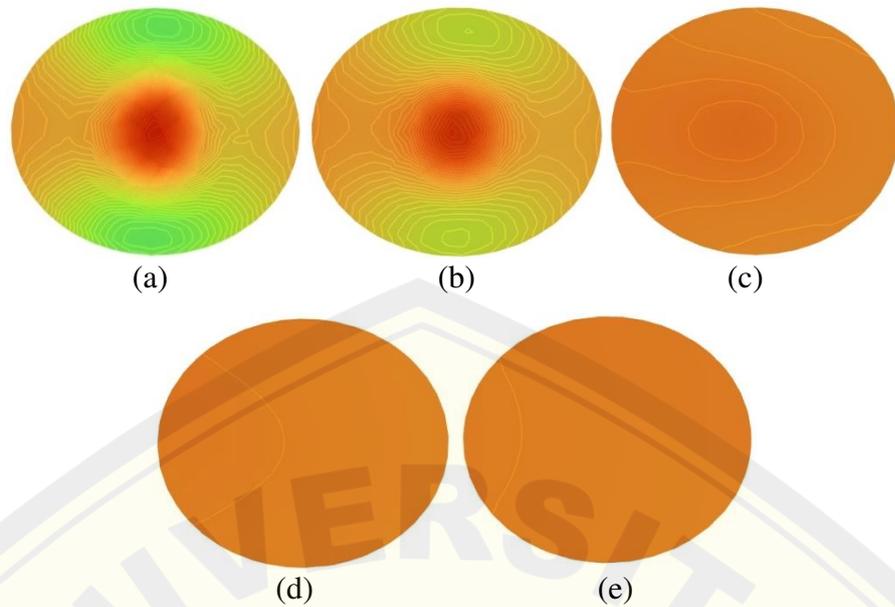
4.6 Temperature Profile contour Pengujian Simulasi Siku 60°

Dibawah ini merupakan hasil *temperature profile contour* pengujian secara simulasi pada siku 60° dengan 3 variasi kecepatan 0,5m/s, 1m/s, 1,5m/s.

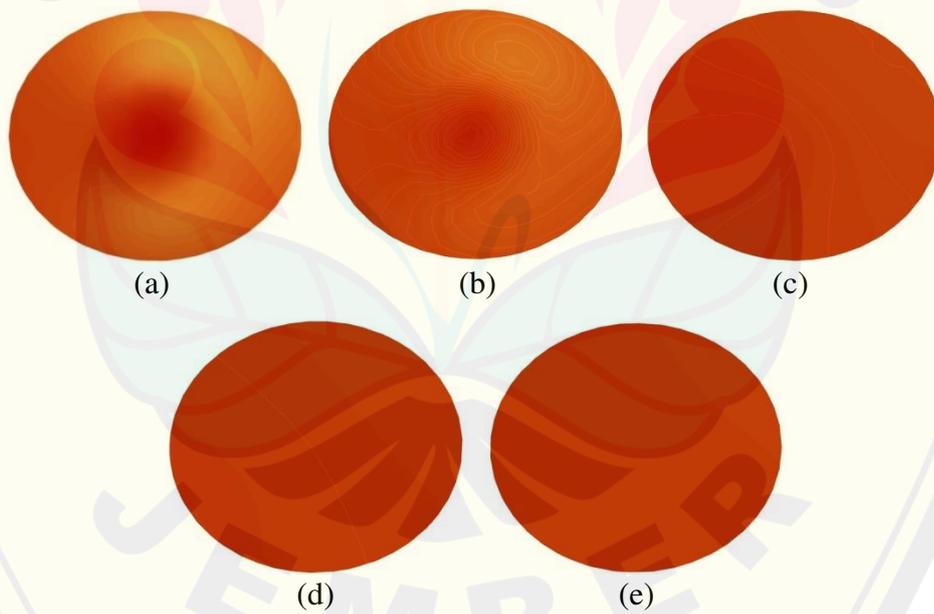


Gambar 4.1. Kontur temperature pengujian simulasi siku 60°
(a) kecepatan 0,5 m/s, (b) kecepatan 1 m/s, (c) kecepatan 1,5 m/s

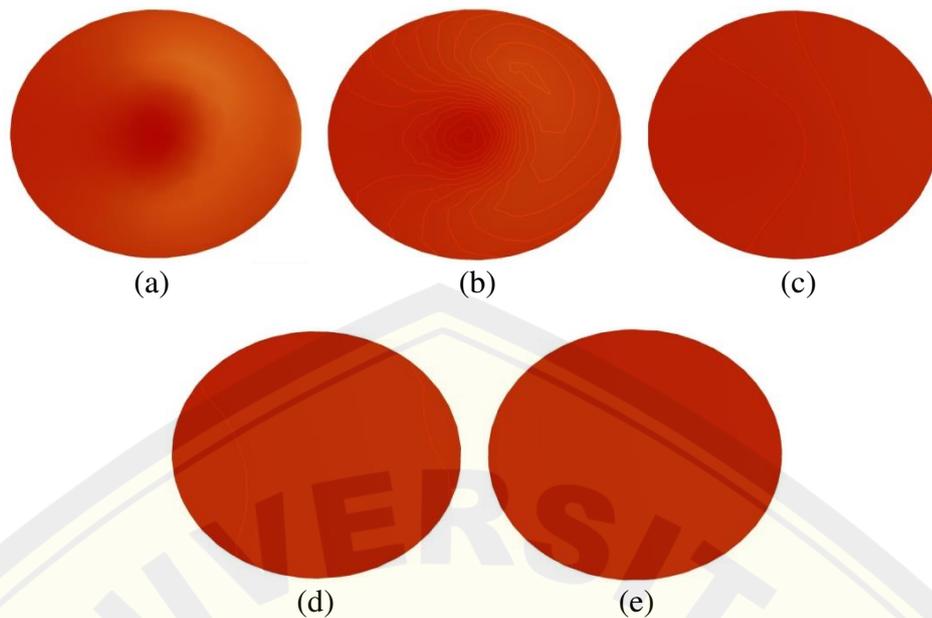
Pada gambar 4.1 terlihat kontur temperature dari model turbulensi $k-\epsilon$ standard pada siku 60° dengan kecepatan 0,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada warna orange kecokelatan atau berada pada suhu rata-rata 37,2°C. Pada kecepatan 1 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada suhu rata-rata 38,8°C, karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dibanding dengan variasi sebelumnya. Pada kecepatan 1,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi sangat tinggi pada suhu range antara 38,8 – 40,4°C. Ini terjadi karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dari pada variasi-variasi sebelumnya.



Gambar 4.2. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 60° kecepatan 0,5 m/s
 (a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4



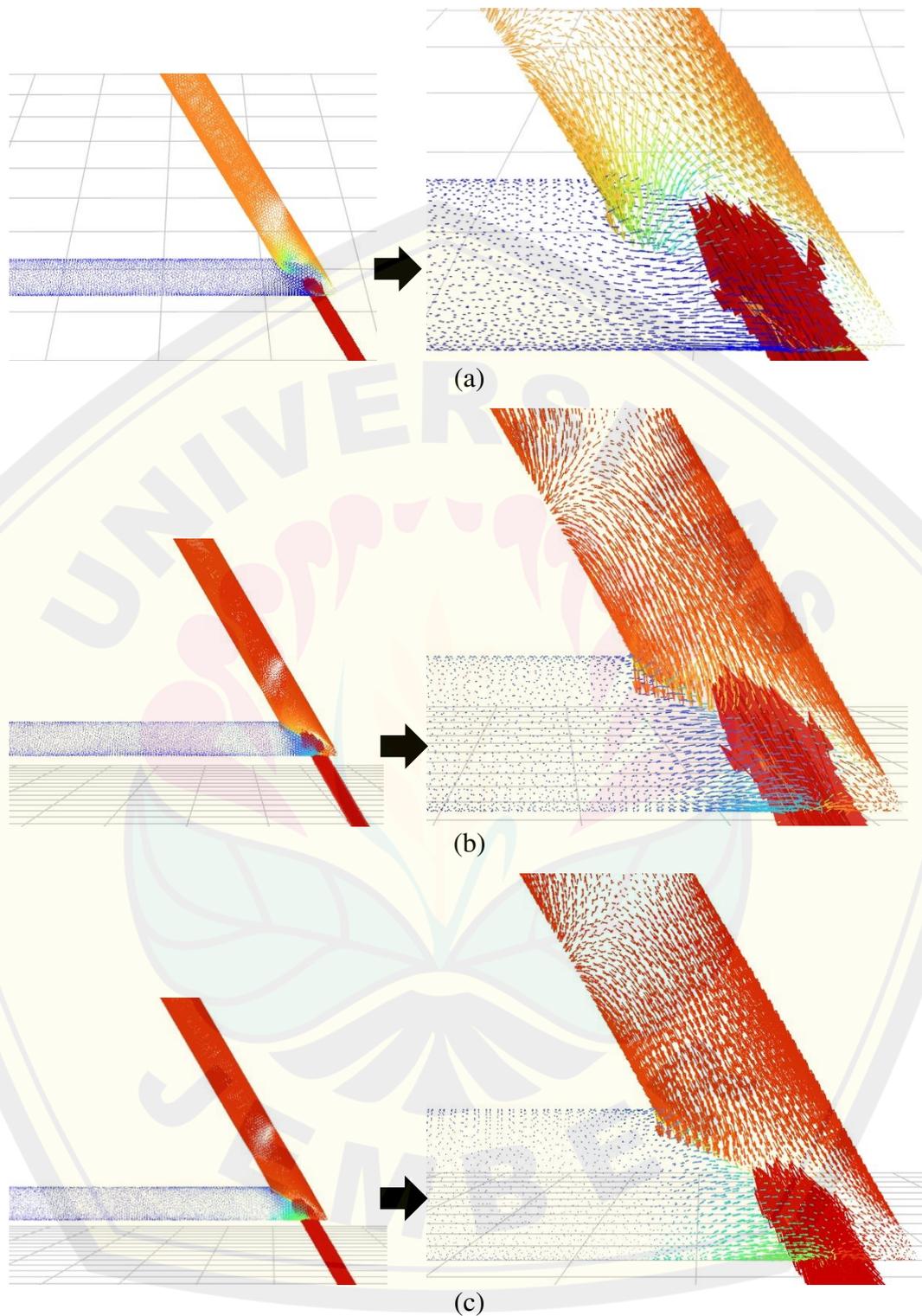
Gambar 4.3. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 60° kecepatan 1 m/s
 (a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4



Gambar 4.4. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 60° kecepatan 1,5 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4

Pada gambar 4.2, gambar 4.3 dan gambar 4.4 merupakan visual irisan tampak depan dari hasil simulasi sudut 60° , dan merupakan letak *thermocouple* yang terpasang disepanjang pipa outlet dengan jarak antar titik *thermocouple* 10 cm dengan panjang pipa outlet 50 cm dari titik pusat pencampuran. Terlihat bahwa keadaan tampak visual a dan b masih belum menyebar secara sempurna ini dikarenakan masih awal proses pencampuran atau berada di dekat pusat pencampuran, sehingga terlihat suhu dari *inlet hot* masih mendominasi dan terlihat merah belum merata secara sempurna. Sementara keadaan yang terjadi pada tampak visual c, d dan e sudah terlihat merata sepenuhnya dengan warna yang sama, ini menandakan bahwa suhu yang dihasilkan sudah tidak berubah lagi.

Pada gambar 4.2, gambar 4.3 dan gambar 4.4 terjadi perbedaan warna, hal ini dikarenakan variasi kecepatan yang semakin tinggi menghasilkan suhu yang dihasilkan dari proses pencampuran juga semakin tinggi pula dan warna semakin merah menandakan suhu yang dihasilkan semakin panas.

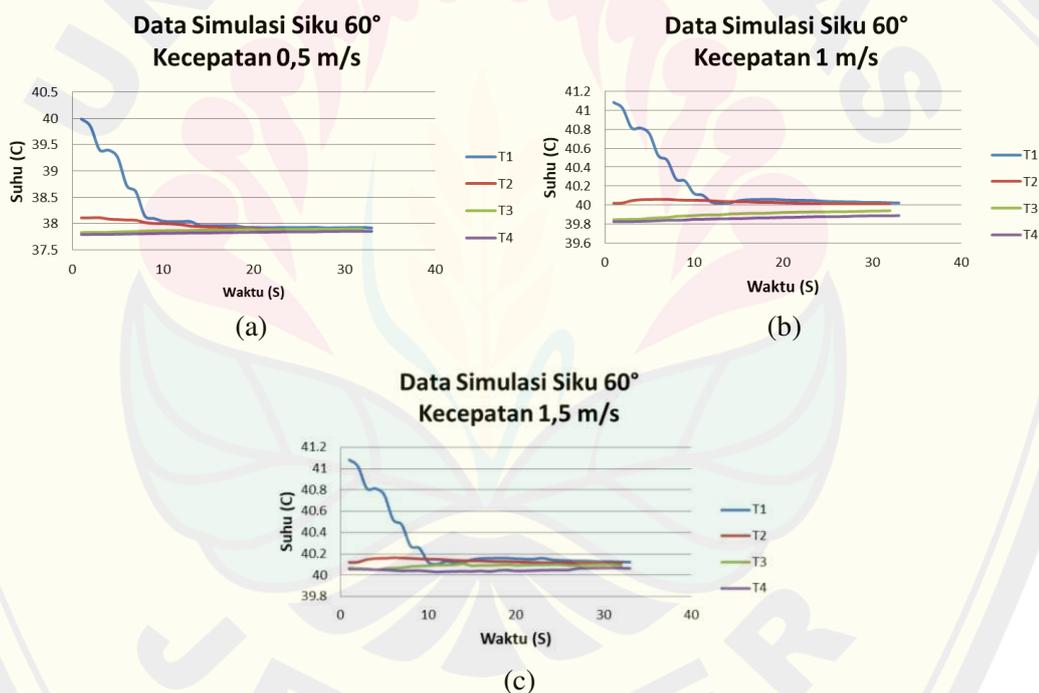
4.7 Vectors Velocity Contour Pengujian Simulasi Siku 60°

Gambar 4.5. Kontur velocity pengujian simulasi siku 60°
(a) Kecepatan 0,5 m/s, (b) Kecepatan 1 m/s, (c) Kecepatan 1,5 m/s

Dalam pemilihan turbulensi model sangat berpengaruh terhadap kondisi kecepatan aliran pada vectors velocity atau kondisi aliran yang terjadi pada proses pencampuran. Pada gambar 4.5 merupakan hasil pergerakan aliran yang terjadi secara simulasi siku 60° pada kecepatan inlet hot 0,5 m/s, 1 m/s dan 1,5 m/s. Dari ketiga variasi terjadinya turbulensi yang ditandai dengan arah aliran yang berputar atau tidak teratur.

4.8 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 60°

Hasil korelasi grafik pergerakan suhu ($^\circ\text{C}$) terhadap visualisasi aliran per detik yang terbentuk pada empat titik suhu termocouple berdasarkan hasil simulasi pada masing-masing kecepatan ditampilkan pada grafik 4.1 berikut:



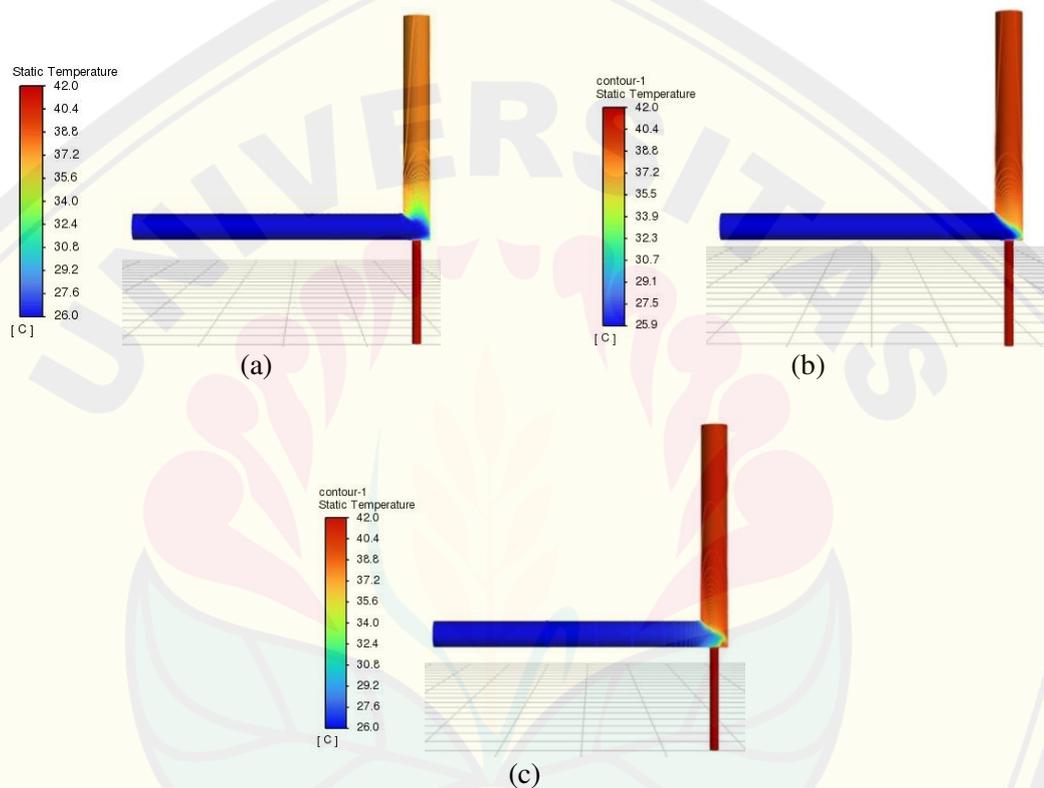
Grafik 4.1. Pergerakan suhu ($^\circ\text{C}$) pengujian simulasi siku 60°
 (a) Kecepatan 0,5 m/s, (b) Kecepatan 1 m/s, (c) Kecepatan 1,5 m/s

Grafik 4.1 adalah hasil dari pembacaan suhu tiap titik, mulai dari kecepatan aliran 0,5 m/s sampai 1,5 m/s distribusi suhu menyebar pada ruang pipa utama dan dengan data grafik yang mencapai suhu tertinggi antara 40°C - 41°C ,

ini terjadi karena suhu pada inlet hot terlalu tinggi jika dibandingkan dengan inlet cold.

4.9 Temperature Profile contour Pengujian Simulasi Siku 90°

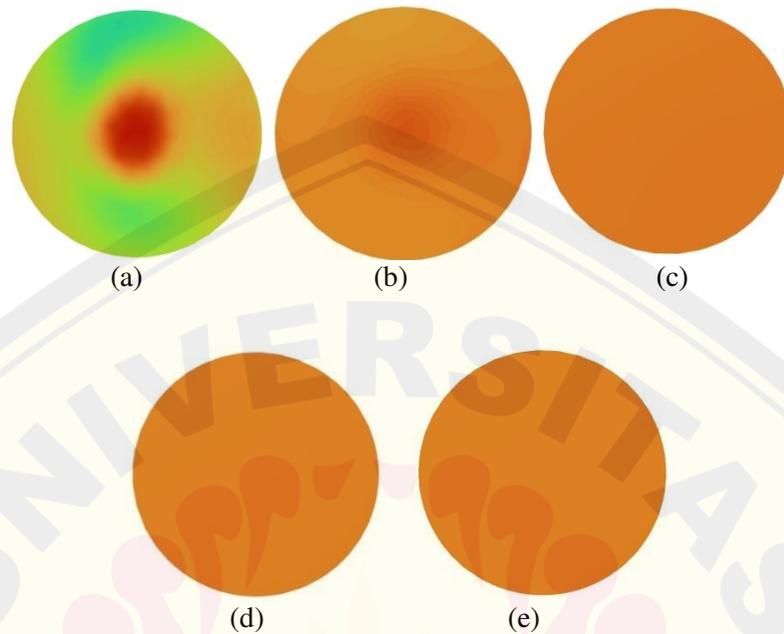
Dibawah ini terlihat profil temperatur yang terjadi pada siku 90°C pada kecepatan yang divariasasi:



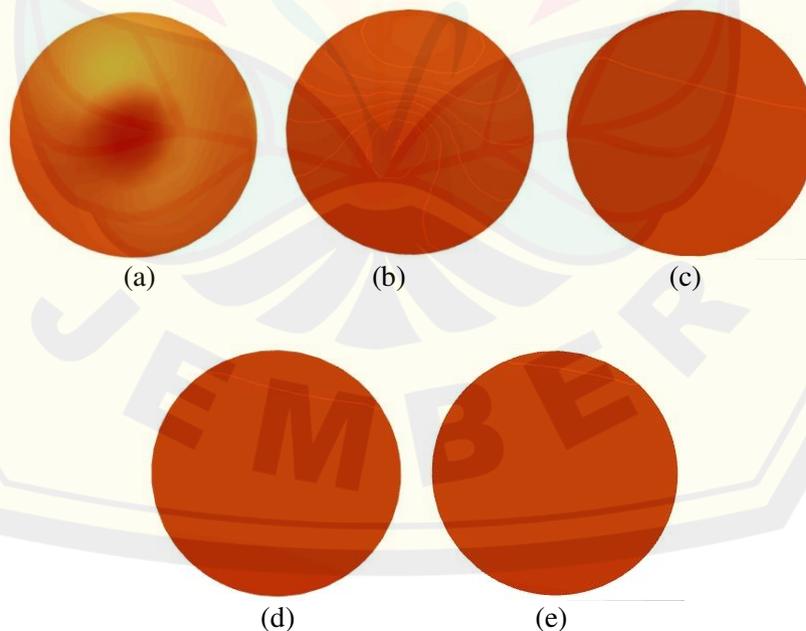
Gambar 4.6. Kontur temperatur pengujian simulasi siku 90°
(a) kecepatan 0,5 m/s, (b) kecepatan 1 m/s, (c) kecepatan 1,5 m/s

Pada gambar 4.6 terlihat kontur temperature dari model turbulensi k- ϵ standard pada siku 90° dengan kecepatan 0,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada warna orange kecokelatan atau berada pada suhu rata-rata 37,8°C. Pada kecepatan 1 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada suhu rata-rata 39,5°C, karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dibanding dengan variasi sebelumnya. Pada kecepatan 1,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi sangat

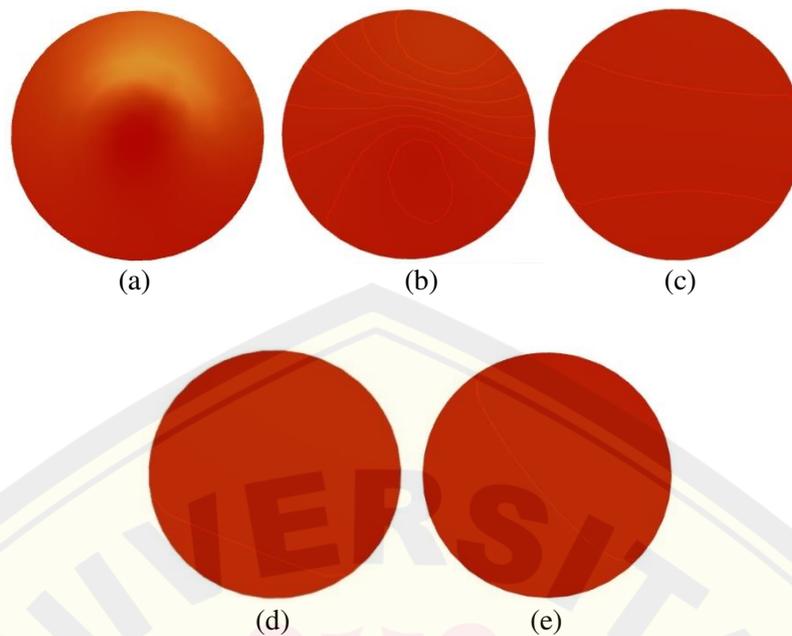
tinggi pada suhu range antara 40,6 – 40,75°C. Ini terjadi karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dari pada variasi-variasi sebelumnya.



Gambar 4.7. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 90° kecepatan 0,5 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4



Gambar 4.8. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 90° kecepatan 1 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4



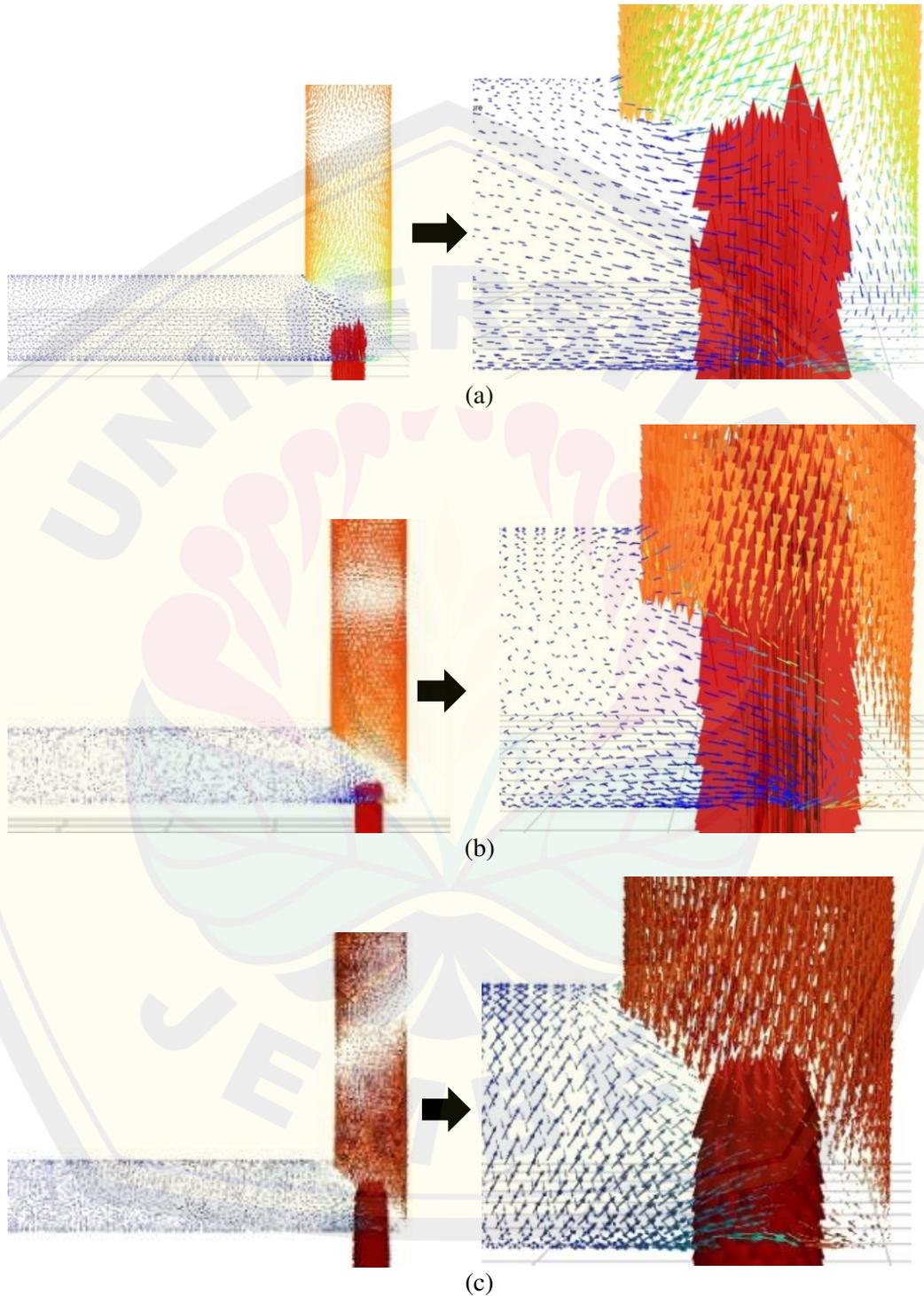
Gambar 4.9. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu sudut 90° kecepatan 1,5 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4

Pada gambar 4.7, gambar 4.8 dan gambar 4.9 merupakan visual irisan tampak depan dari hasil simulasi sudut 90° , dan merupakan letak *thermocouple* yang terpasang disepanjang pipa outlet dengan jarak antar titik *thermocouple* 10 cm dengan panjang pipa *outlet* 50 cm dari titik pusat pencampuran. Terlihat bahwa keadaan tampak visual a masih belum menyebar secara sempurna ini dikarenakan masih awal proses pencampuran atau berada di dekat pusat pencampuran, sehingga terlihat suhu dari inlet hot masih mendominasi dan terlihat merah dibagian tengah pipa ini menandakan belum merata secara sempurna. Sementara keadaan yang terjadi pada tampak visual b hampir tercampur secara sempurna walaupun ada sedikit warna merah gelap yang terlihat, sedangkan c, d dan e sudah terlihat merata sepenuhnya dengan warna yang sama, ini menandakan bahwa suhu yang dihasilnya sudah tidak berubah lagi.

Pada gambar 4.7, gambar 4.8 dan gambar 4.9 terjadi perbedaan warna, hal ini dikarenakan variasi kecepatan yang semakin tinggi menghasilkan suhu yang dihasilkan dari proses pencampuran juga semakin tinggi pula dan warna semakin merah menandakan suhu yang dihasilkan semakin panas.

4.10 *Vectors Velocity Contour* Pengujian Simulasi Siku 90°

Aliran yang terjadi pada masing-masing variasi siku 90°C, ditampilkan pada gambar di bawah ini:



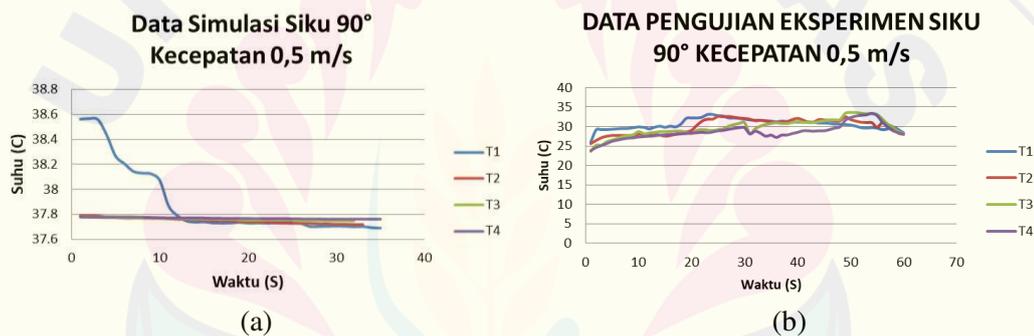
Gambar 4.10. Kontur velocity pengujian simulasi siku 90°
(a) Kecepatan 0,5 m/s, (b) Kecepatan 1 m/s, (c) Kecepatan 1,5 m/s

Dalam pemilihan turbulensi model sangat berpengaruh terhadap kondisi kecepatan aliran pada vectors velocity atau kondisi aliran yang terjadi pada proses pencampuran. Pada gambar 4.10 merupakan hasil pergerakan aliran yang terjadi secara simulasi pada kecepatan inlet hot 0,5 m/s, 1 m/s dan 1,5 m/s.

4.11 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 90°

4.11.1 Grafik Pergerakan Suhu (°C) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 0,5 m/s Siku 90°

Hasil korelasi grafik pergerakan suhu (°C) terhadap visualisasi aliran per detik yang terbentuk pada empat titik suhu termocouple berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen sebagai berikut,



Grafik 4.2. Pergerakan suhu (°C) pengujian siku 90° kecepatan 0,5 m/s
(a) Simulasi, (b) Eksperimen

Grafik 4.2 merupakan hasil dari pembacaan thermokopel pada sudut 90° di variasi kecepatan 0,5 m/s, gambar a grafik dari simulasi dan gambar b grafik pengujian eksperimen, jika diamati secara visual terjadi perbedaan grafik yang dihasilkan termasuk suhu yang dihasilkan dari proses pencampuran. Gambar a suhu yang dihasilkan dan tercampur pada suhu rata-rata 37,8°C, sementara gambar b dari hasil eksperimen suhu yang dihasilkan proses pencampuran rata-rata 31,2°C. Hal ini terjadi karena hasil eksperimen menunjukkan adanya perbedaan dengan hasil simulasi, pada proses eksperimen ada fenomena yang tidak bisa kita hindari yang membuat data tidak maksimal. Sementara pada proses simulasi merupakan hasil kerja dari *software* walaupun kenyataannya data yang

kita masukkan sama dengan data dari eksperimen. Faktor lain yang dapat mempengaruhi selisih antara hasil eksperimen dan simulasi bisa karena suhu pada keadaan sekitar atau kerugian panas yang terjadi dan juga kecepatan yang tidak stabil meskipun pada pengambilan data sudah menggunakan alat bantu pompa listrik.

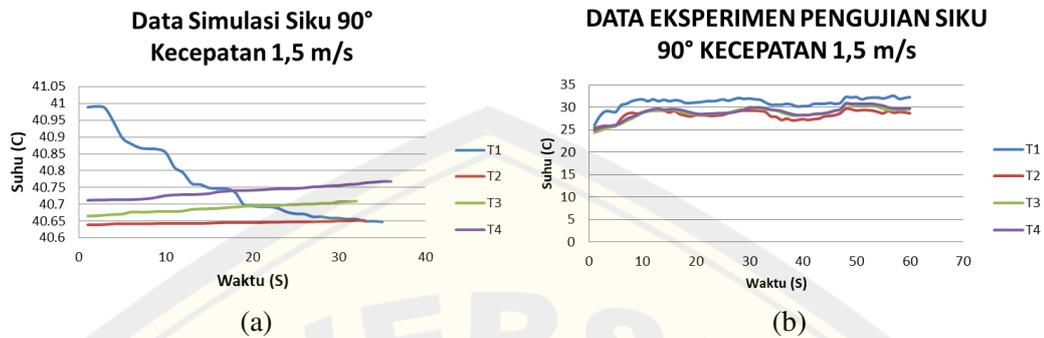
4.11.2 Grafik Pergerakan Suhu ($^{\circ}\text{C}$) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 1 m/s Siku 90°



Grafik 4.3. Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian siku 90° kecepatan 1 m/s
(a) Simulasi, (b) Eksperimen

Grafik 4.3 jika dilihat secara visual suhu yang dihasilkan lebih tinggi dari pada grafik 4.2 karena variasi kecepatannya dari *inlet hot* lebih tinggi dan mempengaruhi suhu yang dihasilkan termasuk hasil antara simulasi dan eksperimen yang berbeda. Gambar a suhu yang dihasilkan dan tercampur pada suhu rata-rata $39,5^{\circ}\text{C}$, sementara gambar b dari hasil eksperimen suhu yang dihasilkan proses pencampuran rata-rata $32,3^{\circ}\text{C}$. Fenomena ini tidak bisa kita hindari yang membuat data tidak maksimal. Sementara pada proses simulasi merupakan hasil kerja dari software walaupun kenyataannya data yang kita masukkan sama dengan data dari eksperimen.

4.11.3 Grafik Pergerakan Suhu ($^{\circ}\text{C}$) pada Kecepatan Aliran Inlet Hot 1,5 m/s Siku 90°

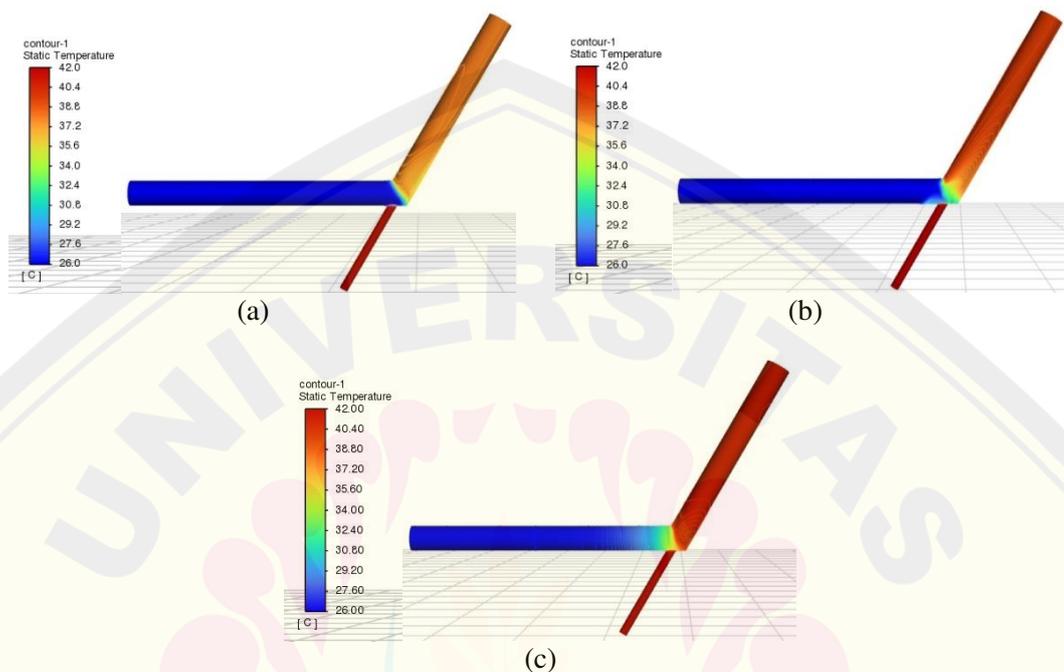


Grafik 4.4. Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian siku 90° kecepatan 1,5 m/s
(a) Simulasi, (b) Eksperimen

Grafik 4.4 jika dilihat secara visual suhu yang dihasilkan lebih tinggi karena variasi kecepatannya dari *inlet hot* lebih tinggi dari variasi sebelumnya grafik 4.2 dan 4.3 hal ini mempengaruhi suhu yang dihasilkan termasuk hasil antara simulasi dan eksperimen juga berbeda. Gambar a suhu yang dihasilkan dan tercampur pada suhu rata-rata $40,7^{\circ}\text{C}$, sementara gambar b dari hasil eksperimen suhu yang dihasilkan proses pencampuran rata-rata $33,1^{\circ}\text{C}$. Fenomena ini tidak bisa kita hindari yang membuat data tidak maksimal. Sementara pada proses simulasi merupakan hasil kerja dari software walaupun kenyataannya data yang kita masukkan sama dengan data dari eksperimen. Dari gambar a kestabilan suhu juga kurang maksimal hal ini karena kecepatan antara *inlet cold* dan *inlet hot* sangat berbeda jauh yang mengakibatkan grafik tidak stabil.

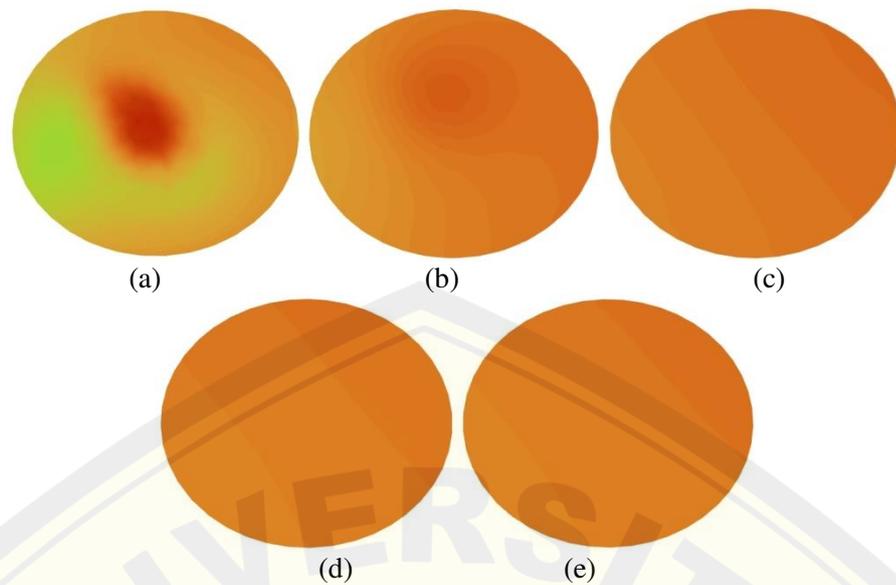
4.12 Temperature Profile contour Pengujian Simulasi Siku 120°

Dibawah ini terlihat profil temperatur yang terjadi pada siku 120° pada kecepatan yang divariasi:

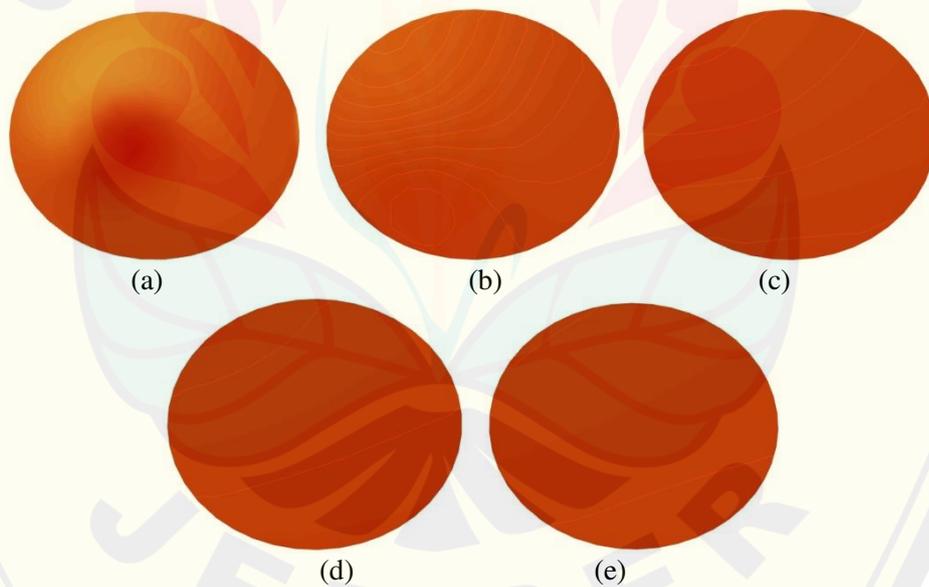


Gambar 4.11. Kontur temperature pengujian simulasi siku 120°
(a) kecepatan 0,5 m/s, (b) kecepatan 1 m/s, (c) kecepatan 1,5 m/s

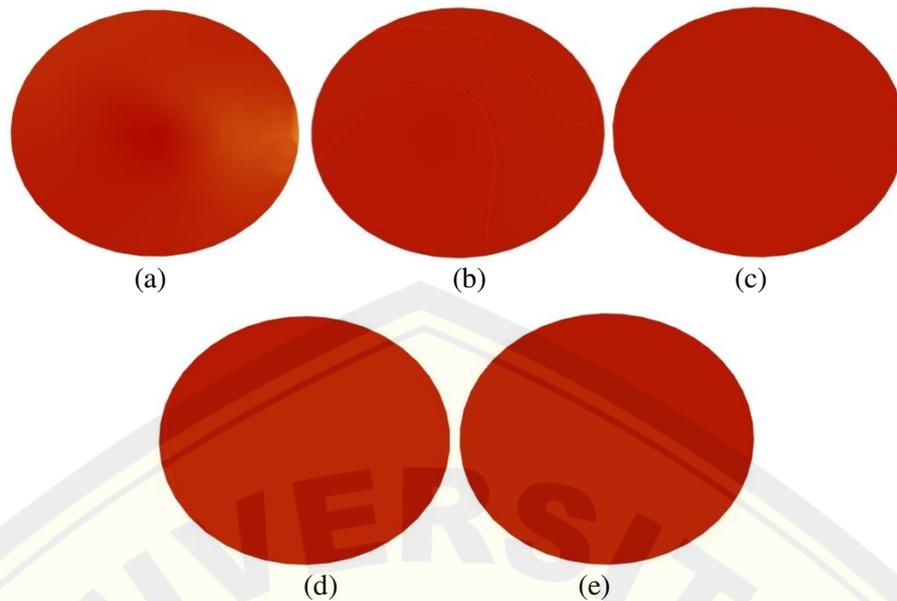
Pada gambar 4.11 terlihat kontur temperature dari model turbulensi k-ε standard pada siku 120° dengan kecepatan 0,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada warna orange kecokelatan atau berada pada suhu rata-rata 37,8°C. Pada kecepatan 1 m/s aliran pencampuran yang terjadi merata pada suhu rata-rata 39,5°C, karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dibanding dengan variasi sebelumnya. Pada kecepatan 1,5 m/s aliran pencampuran yang terjadi sangat tinggi pada suhu range antara 40,6 – 40,75°C. Ini terjadi karena kecepatan pada inlet hot lebih tinggi dari pada variasi-variasi sebelumnya.



Gambar 4.12. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu 90° kecepatan 0,5 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4



Gambar 4.13. Hasil tampak depan tiap titik suhu sudut 120° kecepatan 1 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4

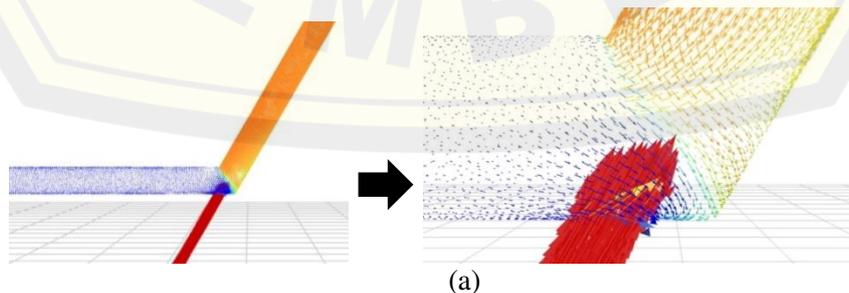


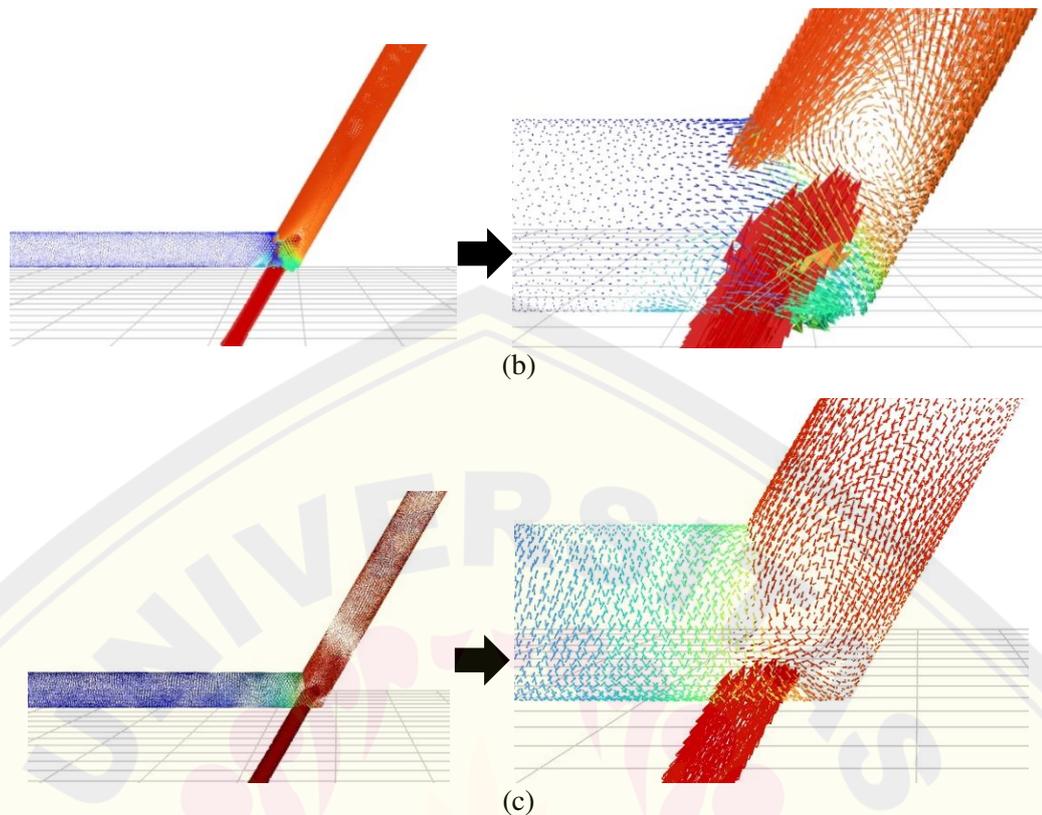
Gambar 4.14. Hasil visual tampak depan tiap titik suhu 120° kecepatan 1,5 m/s
(a) Awal tercampur, (b) T1, (c) T2, (d) T3, (e) T4

Pada gambar 4.12, gambar 4.13 dan gambar 4.14 merupakan visual irisan tampak depan dari hasil simulasi sudut 120° di setiap titik letak *thermocouple* yang terpasang disepanjang pipa *outlet*. Terlihat bahwa keadaan tampak visual b, c, d dan e sudah terlihat merata sepenuhnya dengan warna yang sama, Walaupun gambar a masih sedikit ada dominan kurang merata. Ini menandakan bahwa suhu yang dihasilkan sudah tidak berubah lagi. Sehingga desain sudut 120° lebih mendominasi untuk tercampur lebih sempurna dibanding desain sudut 60° dan sudut 90° .

4.13 *Vectors Velocity Contour* Pengujian Simulasi Siku 120°

Aliran yang terjadi pada masing-masing variasi siku 120° C, ditampilkan pada gambar 4.15 di bawah ini:



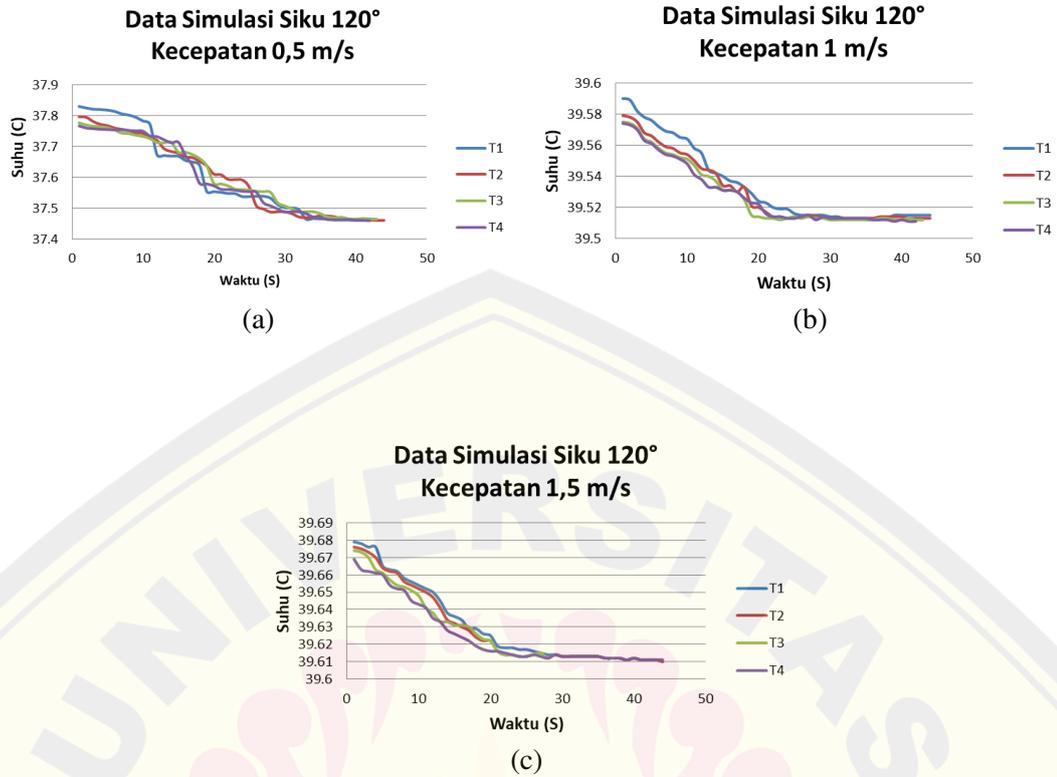


Gambar 4.15. Kontur velocity pengujian simulasi siku 120°
 (a) Kecepatan 0,5 m/s, (b) Kecepatan 1 m/s, (c) Kecepatan 1,5 m/s

Dalam pemilihan turbulensi model sangat berpengaruh terhadap kondisi kecepatan aliran pada vectors velocity atau kondisi aliran yang terjadi pada proses pencampuran. Pada gambar 4.5 merupakan hasil pergerakan aliran yang terjadi secara simulasi pada kecepatan inlet hot 0,5 m/s, 1 m/s dan 1,5 m/s.

4.14 Analisa Karakteristik Aliran pada Siku 120°

Hasil grafik pergerakan suhu ($^\circ\text{C}$) terhadap visualisasi aliran per detik yang terbentuk pada empat titik suhu termocouple berdasarkan hasil simulasi pada masing-masing kecepatan ditampilkan pada grafik 4.5 berikut:



Grafik 4.5. Pergerakan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pengujian simulasi siku 120°
(a) Kecepatan 0,5 m/s, (b) Kecepatan 1 m/s, (c) Kecepatan 1,5 m/s

Grafik 4.5 adalah hasil dari pembacaan suhu tiap titik, mulai dari kecepatan aliran 0,5 m/s sampai 1,5 m/s distribusi suhu menyebar pada ruang pipa utama dan dengan data grafik yang mencapai suhu tertinggi antara $39,61^{\circ}\text{C}$ – $39,68^{\circ}\text{C}$, ini terjadi karena suhu pada inlet hot terlalu tinggi jika dibandingkan dengan *inlet cold*.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan disajikan kesimpulan dari analisa yang telah dijelaskan secara detail pada bab sebelumnya. Selain itu akan disampaikan saran sehingga penelitian ini dapat dilanjutkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan metode dan hasil yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran berpengaruh terhadap karakter campuran aliran fluida pada pipa outlet, hal ini terbukti sesuai dengan perhitungan pada aliran fluida dalam pipa yakni nilai angka Reynold kecepatan 0,5 m/s $Re:43.853,4$ kecepatan 1 m/s $Re:87.706,8$ kecepatan 1,5 m/s $Re:131.560,2$. Sedangkan nilai major losses kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000332m, kecepatan 1,5 m/s: 0,000501m, nilai minor lossesnya kecepatan 0,5 m/s: 0,000165m, kecepatan 1 m/s: 0,000664, kecepatan 1,5 m/s: 0,001494m. Didapatkan juga hasil dari densitas fluida air (ρ) pada suhu $42^{\circ}C$: $991,4 \text{ kg/m}^3$, untuk nilai viscositas (μ) : $0,633^{10^3} \text{ N.s/m}^2$ dan juga nilai kekasaran relative pipa sebesar 0,008164. Dari perhitungannya sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan karakter masing-masing variasi berbeda, sehingga aliran yang didapatkan adalah turbulen.
2. Desain pencampuran fluida pada sudut pipa berpengaruh terhadap karakter campuran aliran fluida pada pipa outlet dibuktikan dengan profil temperature dan pola aliran yang terjadi di tiap titik suhu diberbagai variasi, yang hasilnya makin tinggi kecepatan pada inlet hot suhu yang didapat juga makin tinggi nilainya.
3. Intensitas turbulensi ditunjukkan dengan arah aliran, variasi sudut (60° , 90° , 120°) dengan tiga variasi kecepatan rata-rata menunjukkan aliran pada posisi Log-Layer atau berkembang penuh.
4. Perbandingan hasil simulasi CFD dengan hasil uji eksperimental elbow 90° sangatlah berbeda, pada hasil simulasi nilai suhu masih sangat tinggi

sementara pada uji eksperimen suhu yang didapat lebih rendah, hal ini dikarenakan sebagian data yang dimasukkan pada simulasi adalah default system dari software, sementara pada proses eksperimen real nyata apa adanya.

5.2 Saran

Masih banyak hal menarik yang bisa dikaji lebih dalam yang erat kaitannya dengan permasalahan mekanika fluida khususnya pada permasalahan pencampuran aliran, dan juga keterkaitan antara simulasi dan eksperimen yang sangat sulit untuk disamakan hasilnya.

Adapun beberapa hal yang harus diperhatikan dalam proses pengambilan data baik secara numerik maupun eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Secara numerik kualitas meshing, geometri harus diperhatikan agar dapat mendapatkan hasil kualitas karakteristik aliran yang baik.
2. Untuk pengambilan data secara numerik pemberian kondisi batas, kondisi awal serta properti fluida juga harus diperhatikan terutama jika digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimen sehingga data hasil post processing yang didapatkan bisa akurat.
3. Untuk pengambilan data secara eksperimen dengan meminimalisir ketidakpastian pengukuran dengan cara menggunakan alat ukur yang sudah dikalibrasi secara berkala dan dapat terbaca secara jelas nilai pengukurannya pada mata normal

DAFTAR PUSTAKA

- Andreas Swienty, Raja AbouAckl, & Paul Uwe Thamsen. (2015). *Numerical Prediction of Flow Patterns after Various Pipe Fittings*. *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 5(10), 542-548.
- Dhanenthiran, M., Ubahara Samy, M., & Rani, Gr. (2020). *CFD Analysis of Hot and Cold Steam Flow in an Elbow*. *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Dutta, P., & Nandi, N. (2015). Study on pressure drop characteristics of single phase turbulent flow in pipe bend for high reynolds number. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(5).
- Dutta, P., Saha, S. K., Nandi, N., & Pal, N. (2016). *Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k-ε modelling*. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 904–910.
- Hariyadi, S. (2017). Simulasi Dinamika Aliran Turbulen Pada *Flat Plate Boundary Layer* Menggunakan *Turbulent Model k – ε (Standard, Realizable, RNG)* ISSN : 2548-8090
- Jalaluddin, J., Akmal, S., ZA, N., & Ishak, I. (2019). Analisa Profil Aliran Fluida Cair Dan *Pressure Drop* Pada Pipa L Menggunakan Metode Simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(1). <https://doi.org/10.29103/jtku.v8i1.3396>
- Liu, X., Gong, C., Zhang, L., Jin, H., & Wang, C. (2020). *Numerical study of the hydrodynamic parameters influencing internal corrosion in pipelines for different elbow flow configurations*. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 122–135.
- Liemena, a.e. (2011), Perbandingan Laju Aliran Massa Air Panas Terhadap Air Dingin Yang Masuk Ruangan Pencampuran 05, (1) 1978-1105
- Lua, T.,*, D. Attingerb, S.M. Liua,c., (2013). *Large-eddy simulations of velocity and temperature fluctuations in hot and cold fluids mixing in a tee junction with an upstream straight or elbow main pipe*. *Nuclear Engineering and Design* 263 (2013) 32–41
- Mazumder, Q. H. (2012). *CFD Analysis of Single and Multiphase Flow Characteristics in Elbow*. *Engineering*, 04(04). <https://doi.org/10.4236/eng.2012.44028>

- Mazumder, Q. H. (2012). *CFD Analysis of the Effect of Elbow Radius on Pressure Drop in Multiphase Flow. Modelling and Simulation in Engineering, 2012*, 1–8.
- Mazumder, Q. H., Hassn, K., Kamble, A., & Nallamothe, V. T. (2021). *Characterization of particulated flow induced erosion in elbow geometry. Experimental and Computational Multiphase Flow, 3(2)*, 100–107.
- Nugroho, A.S. (2013), *Komputasi Dinamika Fluida Air Isian pada Elbow Ekonomiser* 30-36.
- Rizal, M. & Iis R., 2021, “Simulasi Numerik pada *Backward-Facing Step Flow* dengan Menggunakan *Near Wall Treatment Methods* dan Model *Viscous k-ε*”, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, 6 Maret 2021 ISSN 2775-5630
- S.P., S. H. (2017). Analisis Perbandingan *Velocity* Dan *Shear Stress* Perkembangan *Boundary Layer Flat Plate* Menggunakan *Turbulent Model k – ε (Standard, Realizable, RNG)*. *Jurnal Penelitian, 2(1)*. <https://doi.org/10.46491/jp.v2e1.109.27-37>
- Setyo Hariyadi., 2017, “Simulasi Dinamika Aliran Turbulen Pada *Flat Plate Boundary Layer* Menggunakan *Turbulent Model k – ε (Standard, Realizable, RNG)*” ISSN : 2548-8090 e-ISSN : 2548-810X
- Spedding, P. L., Benard, E., & Crawford, N. M. (2008). *Fluid flow through a vertical to horizontal 90° elbow bend III three phase flow. Experimental Thermal and Fluid Science, 32(3)*, 827–843.
- Sridhara, S.N. 2020, “*Computational Fluid Dynamics Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in Mixing Elbow*”. *Hindustan Institute of Technology and Sceince, 2022, 1–5*.
- Sulistiya, S., & Kasman, A. S. (2019). Validasi Model Turbulensi pada Simulasi Numerik Menggunakan Software Fluent dengan Sayap Onera M6. *Journal of Aero Technology, 2(1)*. <https://doi.org/10.29122/joat.v2i1.3817>
- Tuakia F. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung (ID) : Bandung Informatika
- Visnlu Prasad, Ruchi Khare, 2010, *Numerical Simulation for Performance of Elbow Draft Tube at Different Geometric Configuration*, Departement of Civil Engineering MA National Institute of Technology, Bhopal
- Zhang, J., Huang, H., Hu, K., & Zhang, P. (2020). *Analysis of Elbow Effect on the High Pressure Gas Pipe. Journal of Physics: Conference Series, 1600*, 012087.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Tabel Data Pengujian Eksperimen

A. Siku 90° kecepatan 0,5 m/s

Waktu Detik	Data Pengujian untuk Siku 90° Kecepatan 0,5 m/s			
	T1(0,5 m/s)	T2(0,5 m/s)	T3(0,5 m/s)	T4(0,5 m/s)
1	26	25.6	23.6	23.8
2	29.1	26.4	25.2	24.6
3	29.2	27.1	25.2	25.1
4	29.2	27.5	26.1	25.6
5	29.3	27.7	26.5	26.2
6	29.4	27.7	26.9	26.5
7	29.5	27.7	27.4	26.8
8	29.5	27.7	27.7	27
9	29.7	27.5	27.9	27.1
10	29.9	28	28.7	27.3
11	29.8	27.9	28.2	27.4
12	29.4	27.9	28.3	27.5
13	29.8	28	28.5	27.6
14	30.1	27.8	28.7	27.8
15	29.8	27.5	28.7	27.9
16	30.1	27.7	28.7	27.9
17	29.9	28	28.8	28
18	30.6	28.3	28.8	28.1
19	32.1	28.6	28.6	28.2
20	32.2	29	28.2	28.3
21	32.2	30.3	29	28.4
22	32.4	31.4	29.2	28.5
23	33.1	31.9	29.1	28.4
24	33.1	31.9	29	28.6
25	32.8	32.6	29.2	28.9
26	32.7	32.5	29.4	29
27	32.2	32.6	30.1	29.3
28	32.2	32.4	30.5	29.5
29	32.1	32.2	30.8	29.7
30	31.9	32.1	31	29.7
31	31.7	31.9	28.2	28.1
32	31.6	31.5	29.4	28.8
33	31.6	31.6	30.1	28.3
34	31.5	31.4	30.5	27.5
35	31.4	31.2	30.8	27.8
36	31.2	31.1	31	27.2
37	31.4	31.2	30.8	27.8
38	31.3	31.2	30.8	27.8
39	31.2	31.8	31	28.2
40	31.1	32.1	31.3	28.5
41	31.1	31.7	31.1	28.9
42	31.2	31.1	31	28.9
43	31.1	31.1	31	28.8
44	30.9	31.8	31.3	28.9
45	30.9	31.7	31.5	28.9
46	30.8	31.6	31.7	29.2
47	30.6	31.4	31.7	29.6
48	30.6	31.5	31.8	29.9
49	30.5	32.5	33.4	31.6
50	30.4	31.8	33.6	32.3
51	30.1	31.4	33.6	32.7
52	29.7	31.1	33.4	32.9
53	29.6	31	33.3	33
54	29.7	31	33.3	33.4
55	29.6	29.8	33.1	32.8
56	29.2	31	31.9	31.1
57	29.4	29.8	30.6	29.9
58	29.9	29.5	29.9	28.9
59	29.2	28.3	28.7	28.4
60	28.4	28	28.2	28

B. Siku 90° kecepatan 1 m/s

Data Pengujian untuk Siku 90° Kecepatan 1 m/s				
Waktu Detik	T1(1 m/s)	T2(1 m/s)	T3(1 m/s)	T4(1 m/s)
1	27.7	25.7	23.6	23.5
2	29.1	26.7	24.4	24.4
3	29.4	27.1	25.2	25.2
4	29.2	27.5	26.1	25.7
5	29.3	27.7	26.5	26.1
6	29.4	27.7	26.9	26.5
7	29.5	27.7	27.4	26.7
8	29.4	27.7	27.7	27
9	29.8	27.5	27.9	27.2
10	29.9	28	28.7	27.3
11	29.8	27.9	28.2	27.4
12	29.3	27.9	28.3	27.5
13	29.7	28	28.5	27.7
14	30	27.8	28.7	27.8
15	29.6	27.5	28.7	27.9
16	30.1	27.7	28.7	27.9
17	29.6	28	28.8	28
18	29.8	27.9	28.9	28
19	29.9	27.6	28.8	28
20	30.1	27.5	28.8	28
21	30.3	27.5	28.9	28
22	30.4	28	28.8	28
23	30.6	27.7	28.8	28
24	30.5	26.7	28.7	27.9
25	30.6	27	28.5	27.8
26	30.7	27.9	28.4	28.7
27	31.4	27.7	28.4	28.7
28	31.3	28.7	28.2	29.5
29	31.9	28.2	28.2	27.7
30	32.1	28.8	29.6	29.9
31	32.3	29.3	29.9	30
32	32.2	29.8	30.3	30.3
33	32.3	29.7	30.8	30.7
34	32.2	30	30.9	31.1
35	32.1	29.8	30.9	31.1
36	32	29.7	30.8	31.1
37	31.5	29.2	30.6	31
38	31.6	29.1	30.6	30.9
39	31.7	29.3	30.6	30.9
40	30.8	27.5	28.4	28.1
41	30	27.4	28.5	27.9
42	29.8	27.5	28.4	27.9
43	30.3	27.6	28.5	27.8
44	30.1	27.5	28.5	27.7
45	30.5	27.4	28.5	27.7
46	30.6	27.4	28.3	27.8
47	30.3	27.2	28.6	27.8
48	30.4	27.7	28.6	27.8
49	29.9	27.3	28.5	27.7
50	30.1	27.9	28.7	27.9
51	30.4	28	28.7	27.9
52	30.3	27.5	28.7	27.9
53	30.8	27.8	28.8	28
54	30.6	27.7	28.8	28
55	30.8	27.9	28.9	28
56	30.5	28.3	29	28.1
57	30.9	28.3	29	28.1
58	30.5	28.2	29.1	28.2
59	30.9	28.4	29.1	28
60	30.8	28.3	29.3	28.1

C. Siku 90° kecepatan 1,5 m/s

Data Pengujian untuk Siku 90° Kecepatan 1,5 m/s				
Waktu Detik	T1(1,5 m/s)	T2(1,5 m/s)	T3(1,5 m/s)	T4(1,5 m/s)
1	26	25.4	24.4	24.9
2	28	25.7	24.8	25.4
3	29.1	25.9	25.2	25.7
4	29.1	25.7	25.6	25.9
5	29	25.9	25.9	26.1
6	30.5	27.5	26.4	26.6
7	30.8	28.5	27	27.4
8	31.4	28.8	27.5	27.9
9	31.7	28.6	28.2	28.3
10	31.8	28.9	28.8	28.9
11	31.4	29.2	29.1	29.3
12	31.8	29.3	29.3	29.6
13	31.4	29.3	29.4	29.7
14	31.7	29.3	29.3	29.5
15	31.4	28.9	29.5	29.6
16	31.6	29.2	29.4	29.6
17	31.5	28.5	29.1	29.5
18	31	28.2	28.8	29.2
19	31	28	28.5	28.9
20	31.1	28.3	28.5	28.6
21	31.2	28.2	28.3	28.5
22	31.4	28.2	28.5	28.6
23	31.4	28.1	28.6	28.6
24	31.5	28.2	28.6	28.7
25	31.8	28.3	28.7	28.7
26	31.5	28.7	28.8	28.8
27	31.8	29.1	29.1	28.9
28	32.1	29.2	29.5	29.2
29	31.9	29.3	29.6	29.5
30	32	29.3	30.1	29.9
31	31.8	29.3	29.8	30
32	31.7	29.2	29.7	30
33	31.1	29	29.6	29.8
34	30.6	28	29.5	29.5
35	30.6	27.9	29.3	29.4
36	30.6	27.2	28.9	29.2
37	30.8	27.5	28.5	28.8
38	30.6	27.1	28.2	28.5
39	30.2	27.2	28.2	28.3
40	30.3	27.4	28.3	28.3
41	30.3	27.2	28.3	28.3
42	30.8	27.4	28.5	28.5
43	30.8	27.5	28.5	28.6
44	30.8	28	28.7	28.7
45	31	28.1	29	28.9
46	30.8	28.3	29.3	29.3
47	31	28.7	29.5	29.6
48	32.3	29.7	30.7	30.9
49	32.2	29.6	30.6	30.8
50	32.3	29.3	30.5	30.8
51	31.8	29.4	30.5	30.8
52	32.1	29.4	30.5	30.8
53	32.2	29.3	30.5	30.8
54	32.2	29	30.1	30.6
55	32	28.7	29.7	30.4
56	32.3	29.2	29.4	30
57	32.6	28.8	29.5	29.8
58	31.9	29	29.5	29.7
59	32.1	28.9	29.5	29.8
60	32.3	28.7	29.6	29.8

Lampiran 2.1 Tabel Sifat-Sifat Fisik Air

Temp. (°C)	Specific weight, γ (N/m ³)	Density, ρ (kg/m ³)	Viscosity, $10^3\mu$ (N · s/m ²)	Kinematic viscosity, $10^6\nu$ (m ² /s)	Surface tension, 100σ (N/m)	Vapor- pressure head, p_v/γ (m)	Bulk modulus of elasticity, $10^{-7}\beta$ (N/m ²)
0	9805	999.9	1.792	1.792	7.62	0.06	204
5	9806	1000.0	1.519	1.519	7.54	0.09	206
10	9803	999.7	1.308	1.308	7.48	0.12	211
15	9798	999.1	1.140	1.141	7.41	0.17	214
20	9789	998.2	1.005	1.007	7.36	0.25	220
25	9779	997.1	0.894	0.897	7.26	0.33	222
30	9767	995.7	0.801	0.804	7.18	0.44	223
35	9752	994.1	0.723	0.727	7.10	0.58	224
40	9737	992.2	0.656	0.661	7.01	0.76	227
45	9720	990.2	0.599	0.605	6.92	0.98	229
50	9697	988.1	0.549	0.556	6.82	1.26	230
55	9679	985.7	0.506	0.513	6.74	1.61	231
60	9658	983.2	0.469	0.477	6.68	2.03	228
65	9635	980.6	0.436	0.444	6.58	2.56	226
70	9600	977.8	0.406	0.415	6.50	3.20	225
75	9589	974.9	0.380	0.390	6.40	3.96	223
80	9557	971.8	0.357	0.367	6.30	4.86	221
85	9529	968.6	0.336	0.347	6.20	5.93	217
90	9499	965.3	0.317	0.328	6.12	7.18	216
95	9469	961.9	0.299	0.311	6.02	8.62	211
100	9438	958.4	0.284	0.296	5.94	10.33	207

Lampiran 3.1 Gambar-Gambar Pengambilan Data Secara Eksperimen



a. Gambar alat peraga siku 90°



b. Gambar proses pengambilan data



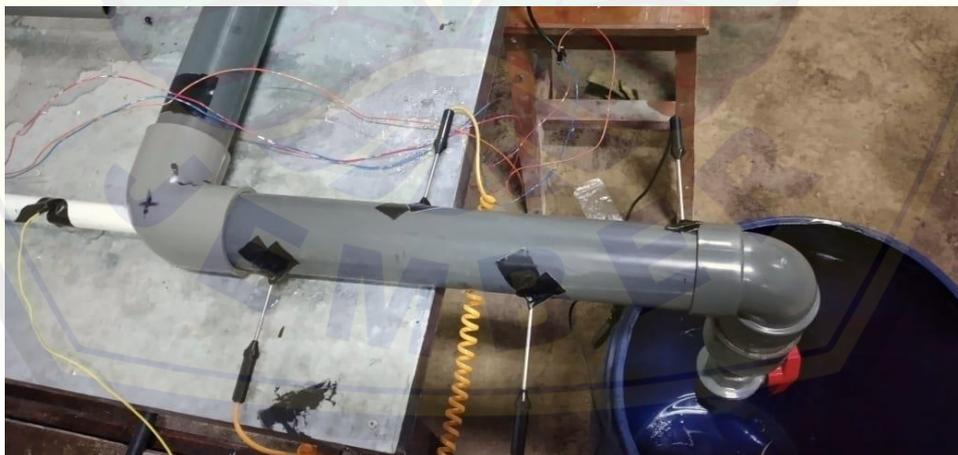
c. Arduino uno deteksi kecepatan aliran air



d. Gambar suhu yang dideteksi tiap titik



e. Data kecepatan aliran



f. Letak sensor suhu di tiap titik



g. Water flow sensor 1/2"



h. Water flow sensor 2"

Lampiran 4.1 Tentang Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi adalah tingkat fluktuasi (perubahan) turbulensi dalam aliran

A. Perhitungan Standar Deviasi Fluktuasi Kecepatan

Perhitungan standar deviasi fluktuasi kecepatan dapat dilakukan dengan persamaan:

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (\bar{U} - U_n)^2}{n-1}}$$

Dimana: u' : Fluktuasi Fluida

\bar{U} : Kecepatan Rata-rata (m/s)

U_n : Nilai kecepatan udara per sekon

n : Jumlah data yang diambil

Kecepatan 0,5 m/s, dengan 60 data

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (0,5 - 0,008)^2}{60-1}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (0,492)^2}{59}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{0,242}{59}}$$

$$u' = \sqrt{0,0041}$$

$$u' = 0,064$$

$$u' = \sqrt{0,0164}$$

$$u' = 0,128$$

Kecepatan 1,5 m/s, dengan 60 data

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (1,5 - 0,025)^2}{60-1}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (1,475)^2}{59}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{2,175}{59}}$$

$$u' = \sqrt{0,0368}$$

$$u' = 0,192$$

Kecepatan 1 m/s, dengan 60 data

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (1 - 0,016)^2}{60-1}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{\Sigma (0,984)^2}{59}}$$

$$u' = \sqrt{\frac{0,968}{59}}$$

B. Perhitungan Intensitas Turbulensi

Perhitungan intensitas turbulensi digunakan untuk menentukan jumlah tingkat fluktuasi gerakan partikel yang tidak teratur dalam suatu aliran fluida (turbulensi). Jadi semakin tinggi nilai dari intensitas turbulensi maka nilai fluktuasinya juga semakin besar. Intensitas turbulensi diperoleh dari persamaan:

$$IT = 100\% \times \frac{u'}{\bar{U}}$$

Dimana: IT : Intensitas Turbulensi
 \bar{U} : Kecepatan Rata-rata (m/s)
 u' : Fluktuasi Fluida

Kecepatan 0,5 m/s, dengan $u' : 0,064$

$$IT = 100\% \times \frac{0,064}{0,5}$$

$$IT = 100\% \times 0,128$$

$$IT = 0,128$$

Kecepatan 1,5 m/s, dengan $u' : 0,192$

$$IT = 100\% \times \frac{0,192}{1,5}$$

$$IT = 100\% \times 0,128$$

$$IT = 0,128$$

Kecepatan 1 m/s, dengan $u' : 0,128$

$$IT = 100\% \times \frac{0,128}{1}$$

$$IT = 100\% \times 0,128$$

$$IT = 0,128$$