



TUGAS AKHIR – SF 184801

**Analisis Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dan
Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam
Berdasarkan Perubahan Temperatur pada Untai
FASSIP-01 Mod.1**

**Adam Sumboko
NRP 01111540000050**

**Dosen Pembimbing:
Diky Anggoro, M.Si
Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MESc.**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT – SF 184801

***Analysis of Ultrasonic Flowmeter Measurement
and Calculation of Natural Circulation Flow Rate
Based on Temperature Changes Using FASSIP-01
Mod.1***

***Adam Sumboko
NRP 01111540000050***

***Dosen Pembimbing:
Diky Anggoro, M.Si
Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MEd.***

***DEPARTEMENT PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019***

“This page intentionally left blank”

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGUKURAN
ULTRASONIC FLOWMETER DAN
PERHITUNGAN LAJU ALIRAN SIRKULASI ALAM
BERDASARKAN PERUBAHAN TEMPERATUR
PADA UNTAI FASSIP-01 MOD.1**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Fisika Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ADAM SUMBOKO
NRP. 01111540000050

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Diky Anggoro, M.Si.

NIP.19850809 201404 1 003

(.....)

Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MEd.

NIP.19690908 199703 1 005

(.....)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ANALISIS PENGUKURAN
ULTRASONIC FLOWMETER DAN PERHITUNGAN
LAJU ALIRAN SIRKULASI ALAM
BERDASARKAN PERUBAHAN TEMPERATUR
PADA UNTAI FASSIP-01 MOD.1**

Nama Mahasiswa : Adam Sumboko
NRP : 0111154000050
Departemen : Departemen Fisika FSains ITS
Dosen Pembimbing : 1. Diky Anggoro, M.Si,
2. Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MESc.

Abstrak

Analisis data mengenai perbandingan antara hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* tipe TUF-2000M terhadap nilai visualisasi dari pyrex telah dilakukan. Analisis dilakukan dengan membandingkan ketiga jenis pengukuran pada daerah *steady state*. Hasil yang didapatkan adalah hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* mengalami fluktuasi yang cukup besar yang dikarenakan faktor eksternal lingkungan seperti *noise* alat lain. Sehingga perlu dilakukan *smoothing* pada data hasil pengukuran. Selain itu, nilainya juga masih kurang akurat terhadap nilai hasil pengukuran visualisasi pyrex, sehingga perlu digunakan faktor pengali sebesar 3,47 untuk meningkatkan akurasi. Nilai rata-rata *error* setelah dilakukan penguatan sinyal sebesar 5,85%. Untuk perbandingan hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur terhadap hasil pengukuran visualisasi pyrex tidak berhasil dilakukan karena jenis aliran yang terjadi pada keadaan *steady* adalah aliran transisi, sehingga sulit dilakukan perbandingan terhadap laju aliran sirkulasi alam. Untuk membandingkannya, perlu dilakukan pengujian kembali dengan kondisi temperatur pada *heater* dan *cooler* maksimal sebesar 55°C dan 33°C pada Untai FASSIP-01 Mod.1.

Kata Kunci : Analisis Error, Sirkulasi Alam, *Ultrasonic Flowmeter*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALYSIS OF ULTRASONIC FLOWMETER MEASUREMENT AND CALCULATION OF NATURAL CIRCULATION FLOW RATE BASED ON TEMPERATURE CHANGES USING FASSIP-01 MOD.1

Name : Adam Sumboko
NRP : 01111540000050
Department : Department Physics, Faculty of Sciences, ITS
Advisor : 1. Diky Anggoro, M.Si,
2. Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MEdSc.

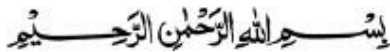
Abstract

Data analysis by comparing the results of Ultrasonic Flowmeter (FUS) type TUF-2000M measurement and the value of visualization from Pyrex measurement has been carried out. The analysis was carried out by comparing the result of measurements in steady state condition. The results of Ultrasonic Flowmeter measurements have a considerable fluctuation in each repetition because of external environmental factors such as noise from another systems. Moreover, the value of measurement is not more accurate than the value of visualization from Pyrex. So, the value must be multiplied by 3.47 to fix it. After that, the average error value becomes 5.85%. In another cases, comparing the result calculation of natural circulation flowrate based on temperature changes with visualization from Pyrex cannot done because the type of flow in pipe is transition. It's so difficult to compare the value of natural circulation based on temperature changes in transition flow's condition. To compare it, it is necessary to do the experiment again with maximum temperature water in heater and cooler is 55⁰C and 33⁰C at Untai FASSIP-01 Mod.1.

Keywords: Error Analysis, Natural Circulation, Ultrasonic Flowmeter

“This page is intentionally left blank”

KATA PENGANTAR



Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat-Nya, petunjuk-Nya atas nikmat iman, islam, dan ikhsan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* Dan Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Berdasarkan Perubahan Temperatur Pada Untai FASSIP-01 Mod.1**” dengan optimal dan tepat waktu. Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Departemen Fisika, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas bantuan, motivasi, dan juga bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik. Sehubungan dengan hal tersebut, maka penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Ibu Hidiyati dan Bapak Sholihin selaku orang tua dari penulis atas doa dan dukungannya kepada penulis.
2. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng., selaku Kepala Departemen Fisika Fakultas Sains ITS yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
3. Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc, selaku Kepala PTKRN-BATAN yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian di Laboratorim Termohidrolika PTKRN-BATAN.
4. Diky Anggoro, M.Si selaku pembimbing I pada penelitian ini sekaligus Kepala Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Fisika Fakultas Sains ITS yang telah membagi pengalaman serta memberikan pengarahan selama proses penelitian Tugas Akhir ini dan penyusunan laporan ini.
5. Dr. Mulya Juarsa, S.Si., MESc selaku pembimbing II sekaligus Kepala Laboratorium Termohidrolika PTKRN-BATAN yang telah membagi pengalaman serta memberikan pengarahan selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini.

6. Saudara Hutomo dari Universitas Padjadjaran, saudara Arif dan Aldi dari Universitas Riau, Saudara Bernard, Ryan, Ahmad dari Universitas Ibn Khaldun yang telah membantu dan memberikan saran dalam penyelesaian penelitian tugas akhir ini.
7. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian penelitian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari akan adanya kekurangan dalam penulisan laporan ini karena keterbatasan wawasan dan pengetahuan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak agar lebih baik di masa yang akan datang. Semoga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat berguna dan dimanfaatkan dengan baik sebagai referensi bagi yang membutuhkan serta menjadi sarana pengembangan kemampuan ilmiah bagi semua pihak yang bergerak dalam bidang Fisika Instrumentasi dan Elektronika. Semoga penelitian ini tidak berhenti sampai disini karena masih banyak yang harus ditelaah dari topik penelitian ini. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, 5 Juni 2019

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xvix
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Passive Cooling System</i>	7
2.2 Sirkulasi Alam	9
2.3 <i>Ultrasonic Flowmeter</i>	12
2.4 Untai FASSIP-01 Mod.1	13
2.5 Bilangan Reynold	18
2.6 Ralat, <i>Error</i> , dan Standart Deviasi	19
METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Peralatan dan Bahan	23
3.2.1 Peralatan.....	23
3.2.2 Bahan-Bahan.....	29
3.2 Langkah Kerja	30
3.3.1 Karakterisasi Termokopel.....	30
3.3.2 Karakterisasi <i>Ultrasonic Flowmeter</i> TUF-2000M	30
3.3.3 Pembuatan dan pengujian <i>Data Acquisition</i> <i>System</i>	31
3.3.4 Pengambilan Data	32
3.3.5 Analisis Data.....	33
3.3 Diagram Alir.....	33

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Hasil Pengukuran Visualisasi Laju Aliran (Pipa Pyrex)	35
4.2 Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M</i>	41
4.2.1 Akurasi.....	41
4.2.2 Presisi.....	42
4.2.3 Linearitas Arus.....	43
4.3 Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam	47
4.4 Hasil Ralat, <i>Error</i> , dan Standart Deviasi.....	58
KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	69
BIODATA PENULIS	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi Sistem Pendingin Pasif	7
Gambar 2.2. Cara Kerja <i>Ultrasonic Flowmeter</i>	12
Gambar 2.3. Konfigurasi Termokopel Pada Untai FASSIP-01 Mod.1	14
Gambar 2.4. RCS Untai FASSIP-01 Mod.1	16
Gambar 2.5. BCH-02 Untai FASSIP-01 Mod.1	17
Gambar 2.6. Untai FASSIP-01 Mod.1	18
Gambar 3.1. <i>Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M</i>	24
Gambar 3.2. <i>Burkert Flowmeter</i>	24
Gambar 3.3. Modul NI 9214	25
Gambar 3.4. Modul NI 9203	26
Gambar 3.5. NI cDAQ 9188	26
Gambar 3.6. Contoh Tampilan <i>LabVIEW</i> 2014	27
Gambar 3.7. Contoh Tampilan OriginPro2016	28
Gambar 3.8. Contoh Tampilan <i>MATLAB</i> 2016	28
Gambar 3.9. Termokopel Tipe K	29
Gambar 3.10. Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 4.1. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan I	37
Gambar 4.2. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan II	37
Gambar 4.3. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan III.....	38
Gambar 4.4. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan I.....	39
Gambar 4.5. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan II	39
Gambar 4.6. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan III	40
Gambar 4.7. Grafik Presisi <i>Ultrasonic Flowmeter TUF-200M</i> ...	42
Gambar 4.8. Grafik Linearitas <i>Ultrasonic Flowmeter</i>	43
Gambar 4.9. Program <i>LabVIEW</i> untuk <i>Ultrasonic Flowmeter</i> ...	44
Gambar 4.10. Grafik Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter</i> <i>TUF-2000M</i> Pengulangan I.....	45
Gambar 4.11. Grafik Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter</i> <i>TUF-2000M</i> Pengulangan II.....	45

Gambar 4.12. Grafik Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter</i> <i>TUF-2000M</i> Pengulangan III.....	46
Gambar 4.13. Grafik Akurasi Termokopel BCH-02.....	48
Gambar 4.14. Program <i>LabVIEW</i> untuk Pengukuran.....	49
Gambar 4.15. <i>User Interface LabVIEW</i> untuk Pengukuran	49
Gambar 4.16. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan I	50
Gambar 4.17. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan II.....	50
Gambar 4.18. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan III	51
Gambar 4.19. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan I.....	53
Gambar 4.20. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan II.....	53
Gambar 4.21. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan III.....	54
Gambar 4.22. Bilangan Reynold Pengulangan I.....	55
Gambar 4.23. Bilangan Reynold Pengulangan II	56
Gambar 4.24. Bilangan Reynold Pengulangan III.....	56
Gambar 4.25. Ralat Mutlak Debit Aliran Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M</i>	60
Gambar 4.26. Perbandingan Pengulangan I.....	61
Gambar 4.27. Perbandingan Pengulangan II.....	62
Gambar 4.28. Perbandingan Pengulangan III.....	62
Gambar 4.29. Perbaikan Hasil Pengukuran <i>Ultrasonic</i> <i>Flowmeter</i>	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kategori Sistem Keselamatan Pasif	8
Tabel 3.1. Matrik Eksperimen	32
Tabel 4.1. Nilai Akurasi <i>Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M</i>	41
Tabel 4.2. Rata-rata Pengukuran <i>Ultrasonic Flowmeter</i>	47
Tabel 4.3. Rata-rata Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam	54
Tabel 4.4. Ralat Pengukuran dan Perhitungan.....	61
Tabel 4.5. Perbandingan dan Perbaikan Hasil FUS Daerah <i>Steady</i>	63

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Penurunan Persamaan Ralat Perhitungan.....	69
Lampiran 2. Hasil Pengukuran Visualisasi Pyrex.....	75
Lampiran 3. Ralat Pengukuran.....	77
Lampiran 4. Linearitas Data Interpolasi Daerah Kenaikan Linear.....	78
Lampiran 5. Standart Deviasi Untuk Menentukan Daerah <i>Steady</i>	80
Lampiran 6. Program <i>MATLAB</i> Untuk Interpolasi Data Pengukuran Pyrex.....	80
Lampiran 7. Dokumentasi Penelitian.....	82

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kecelakaan reaktor nuklir (PLTN, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) dalam skala besar telah terjadi sebanyak tiga kali dalam kurun waktu 30 tahun. Kecelakaan PLTN jenis PWR (*pressurized water reactor*) terjadi tahun 1979 di Three Mile Island (TMI) unit 2, Pennsylvania, USA. Kecelakaan tersebut terjadi akibat gagalnya sistem pendingin reaktor dan menyebabkan terjadinya pelelehan teras reaktor namun tidak menyebabkan tersebarnya radiasi nuklir ke lingkungan. Negara USSR (Rusia) mengalami kecelakaan reaktor nuklir tipe RMBK 1000 (*Reactor Bolshoi Moshnosti Kanalye*) atau reaktor air didih dengan tenaga tinggi, yakni terjadi ledakan di teras reaktor akibat pengoprasian ilegal untuk kebutuhan militer. Kecelakaan tersebut menimbulkan bencana nuklir terbesar di dunia. Efek tersebarnya radiasi nuklir adalah seluas radius 20-mile dan menimbulkan banyak korban. Kejadian kecelakaan PLTN terakhir terjadi pada tahun 2011 di Fukushima-Daiichi, Jepang yang diinisiasi oleh peristiwa gempa raksasa dengan skala 9,2 SR. Kecelakaan Fukushima-Daiichi terjadi pada PLTN jenis BWR (*boiling water reactor*) yang menyebabkan sebagian besar teras reaktor meleleh dan merusak *reactor pressure vessel* (RPV) sehingga radiasi nuklir tersebar ke lingkungan dengan radius 2 mile. Berdasarkan ketiga kecelakaan tersebut, dua kecelakaan diakibatkan oleh gagalnya sistem pendingin aktif (tidak ada supply energi ke pompa).

Kejadian kecelakaan PLTN yang menjadi perhatian besar di dunia adalah kecelakaan reaktor Fukushima-Daiichi karena berhubungan dengan kegagalan pada sistem pendingin aktif, sehingga proses pendinginan di teras reaktor tidak terjadi. Pada dasarnya, ketika gempa terjadi, sistem kendali reaktivitas di teras reaktor berhasil berfungsi dan memadamkan reaktor sehingga reaksi fisi tidak terjadi lagi. Namun, masih ada sisa energi termal dari peluruhan radioaktif sebesar 7% dari 1553 MW_{th} atau sebesar

107 MW_{th}. Dalam kondisi tersebut, sistem pendingin seharusnya bekerja untuk mengalirkan air saat awal sistem tersebut berfungsi. Namun, sistem pendingin padam setelah satu jam sebab generator listrik mati akibat tsunami yang menggenangi genenator. Situasi tersebut dikenal dengan istilah LOFA (*loss of flow accident*), yaitu pendinginan pada teras reaktor berjalan sangat lambat akibat tidak mengalir akibat pompa sirkulasi berhenti karena tidak mendapat pasokan daya. Sehingga panas tak dapat disebarkan ke lingkungan secara efektif. Kondisi tersebut menyebabkan panas di teras reaktor berlebihan dan mengarah terjadinya pelelehan pada teras di sebagian besar reaktor (Wahono, 2011).

Berdasarkan kejadian kecelakaan PLTN Fukushima-Daiichi, diperlukan alternatif sistem keselamatan yang dapat bekerja tanpa adanya intervensi gaya dari luar (pasokan energi), sehingga reaktor tetap dapat didinginkan meskipun generator atau pompa pendingin mati. Sistem keselamatan alternatif yang dimaksud adalah sistem pendingin pasif (SPP) yang bekerja dengan memanfaatkan laju aliran sirkulasi alam. SPP diharapkan mampu memindahkan kalor hasil reaksi fisi pada reaktor ke lingkungan tanpa bantuan energi dari luar. Terkait penelitian sistem pendingin pasif, beberapa peneliti di dunia telah melakukan penelitian sejenis karena merupakan topik penelitian yang sangat menarik. Sebagai contoh hasil penelitian dari Xiao Yan, Guangfaming Fan, dan Zhongning Zun dari China yang meneliti tentang pendingin untuk rektangular untai dengan fluida dua fasa kondisi terbuka. Dalam mengukur laju aliran sirkulasi alam, mereka menggunakan *vortex flowmeter* dan *electromagnetic flowmeter*. Sehingga hanya beberapa titik saja dapat diketahui nilai laju aliran sirkulasi alam nya (Yan, Fan and Sun, 2017). Begitu juga yang dilakukan oleh Shengzhi Yu, dkk. yang meneliti fenomena laju sirkulasi alam menggunakan *electromagnetic flowmeter* pada salah satu bagian dari untai sirkulasi alam (Yu *et al.*, 2017). Masalah yang masih menjadi perhatian dan penting di dalam riset terkait penelitian laju aliran sirkulasi alam adalah keakuratan dan validasi dari alat ukurnya,

yaitu *flowmeter* yang mampu mendeteksi aliran pada kecepatan rendah.

Hampir seluruh penelitian yang telah dilakukan menggunakan *flowmeter* untuk pengukuran laju aliran sirkulasi alam. Namun, alat ukur yang terpasang hanya pada beberapa titik (permanen) saja, sehingga keakuratan untuk tiap bagian untai masih kurang. Oleh karena itu, diperlukan metode lain untuk mengukur laju aliran sirkulasi alam. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, laju aliran sirkulasi alam dipengaruhi oleh perbedaan temperatur. Ketika terjadi perbedaan temperatur dalam satu untai, maka fluida (air) akan mengalir dari temperatur yang rendah ke temperatur tinggi (Juarsa *et al.*, 2014). Artinya, besar laju aliran sirkulasi alam dapat diperoleh berdasarkan beda temperatur antara daerah di bagian panas dan daerah di bagian dingin. Penelitian dengan tujuan untuk memvalidasi hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam secara eksperimen telah dilakukan BATAN dengan membangun fasilitas eksperimen dengan skala medium (Untai FASSIP-01 Mod.1) dan skala besar (Untai FASSIP-02). Untai FASSIP-01 Mod.1 dalam hal pengukuran, memiliki beberapa *flowmeter*, salah satunya adalah *Ultrasonic Flowmeter* yang penggunaannya lebih mudah tanpa merubah sistem pemipaan. Namun, penggunaan *Ultrasonic Flowmeter* memerlukan metode pengoperasian yang spesifik. Sehingga tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis data hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dan perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur pada Untai FASSIP-01 Mod.1.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dibahas sebelumnya, penulis melakukan beberapa analisa kinerja dengan permasalahan yang ditemukan sebagai berikut:

1. Berapakah batasan minimal dan maksimal hasil pengukuran laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 menggunakan *Ultrasonic Flowmeter*?

2. Berapakah hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 berdasarkan perubahan temperatur di bagian *heater* dan *cooler*?
3. Berapakah perbandingan dari hasil perhitungan dan pengukuran laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk memperoleh:

1. Hasil pengukuran laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 menggunakan *Ultrasonic Flowmeter* yang telah tervalidasi,
2. Hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 pada kondisi yang ditentukan berdasarkan beda temperatur di daerah *heater* dan *cooler*,
3. Formulasi ralat perambatan dan hasil analisis perbandingan pengukuran dan perhitungan laju aliran sirkulasi alam Untai FASSIP-01 Mod.1 dengan menentukan standart deviasi dan analisis *error*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada:

1. Pemodelan sirkulasi alam dengan menggunakan Untai FASSIP-01 Mod.1 berbentuk rektangular,
2. Pengukuran laju aliran sirkulasi alam menggunakan *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*,
3. Perbandingan hanya dilakukan pada daerah *steady state*,
4. Temperatur maksimal air pada pipa dibagian *heater* sebesar 90°C dengan tekanan pada RCS sebesar 1,5 bar.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah dengan mengetahui hasil analisis perbandingan pengukuran menggunakan *Ultrasonic Flowmeter* dan perhitungan laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 berdasarkan beda

temperatur pada bagian *heater* dan *cooler*. Sehingga, batasan parameter eksperimen berdasarkan kemampuan flowmeter dapat ditentukan. Manfaat penelitian secara keseluruhan adalah menentukan besaran laju aliran sirkulasi alam yang dianggap akan berdampak pada durasi pendinginan reaktor secara pasif sehingga penting untuk menentukan kinerja sistem keselamatan reaktor nuklir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- BAB I : Pendahuluan**
 Bab Pendahuluan ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan.
- BAB II : Tinjauan Pustaka**
 Bab tinjauan pustaka berisi tentang teori dan konsep dasar penunjang penelitian mengenai sistem pendingin pasif pada reaktor nuklir.
- BAB III : Metodologi**
 Bab Metodologi berisi tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini.
- BAB IV : Analisa dan Pembahasan**
 Bab Pembahasan ini berisi inti dari penulisan laporan tugas akhir tentang simulasi sistem pendingin pasif pada reaktor dengan menggunakan Untai FASSIP-01 Mod.1.
- BAB VI : Penutup**
 Bab Penutup ini berisi kesimpulan umum dari hasil analisa dan disertai saran yang berlaku bagi penelitian selanjutnya.
- LAMPIRAN : Lampiran** berisi beberapa data-data penunjang penelitian.

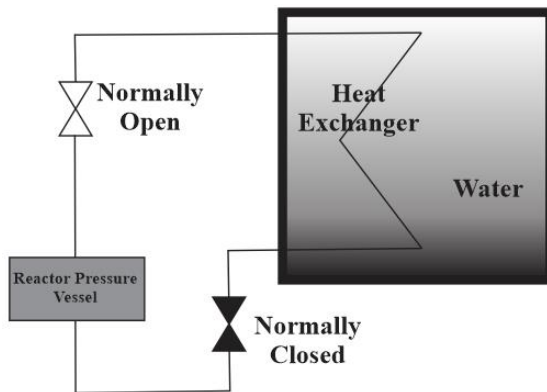
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Passive Cooling System*

Passive cooling system atau SPP merupakan sistem pendingin yang sedang diteliti dan berkembang semenjak kejadian kecelakaan nuklir yang terjadi seperti pada Reaktor Fukushima-Daiichi di Jepang. SPP merupakan konsep sirkulasi tanpa memerlukan tambahan energi dari luar, sehingga dalam keadaan sumber energi luar padam, sistem pendingin reaktor masih tetap berjalan dan panas pada teras reaktor tetap dapat dikendalikan. SPP memindahkan kalor hasil reaksi fisi nuklir pada teras reaktor ke lingkungan melalui media perantara seperti fluida cair atau gas dengan memanfaatkan perbedaan temperatur pada bagian teras reaktor dan *cooling tank* (Schulz, 2006).



Gambar 2.1. Ilustrasi Sistem Pendingin Pasif

Fluida pendingin akan mengalir dari *reactor pressure vessel* (RPV) menuju ke *cooling tank* akibat adanya beda temperatur sama seperti ketika memasak air. Air pada dasar panci pemanas seiring berjalannya waktu akan bergerak ke atas dan air yang berada di atas, akan turun ke bawah menggantikan posisi air yang berada di bawah. Syarat SPP berjalan dengan baik adalah letak *cooling tank*

lebih tinggi dari pada RPV. Hal ini bertujuan untuk mempermudah fluida bergerak ketas yang selanjutnya didinginkan oleh *cooler*. Selain tidak memerlukan energi dari luar, SPP tidak memerlukan jaringan besar untuk pendinginan seperti sistem keselamatan aktif sehingga lebih efektif dan efisien dalam penggunaannya. SPP juga dapat digunakan sebagai generator diesel darurat dan jaringan sistem pendukungnya, seperti udara, tangki penyimpanan bahan bakar, pompa, serta sistem pembungan udara (Schulz, 2006).

Kinerja sistem pasif termal hidrolik dipengaruhi oleh kondisi awal, bahan yang digunakan, tata letak, dan ketidakpastian seperti koefisien perpindahan panas, koefisien penurunan tekanan, dan parameter kritis reaktor nuklir. Beberapa hal tersebut digunakan untuk menentukan karakter dari sistem pasif secara spesifik (Burgazzi, 2007). Berdasarkan kualitatif dan analisis deterministik, terdapat parameter yang menentukan kinerja pelepasan panas pada sistem pendingin pasif, antara *pressure drop*, *heat transfer*, *surface area*, *decay heat*, *initial airflow*, *SCRAM delay*, *dampener opening delay*, *air inlet temperature*, *initial power*, *initial sodium temperature*, *steady state coreflow*, dan *fuel conductivity* (Sajith Mathews *et al.*, 2011). Menurut IAEA, sistem keselamatan pasif adalah sistem yang menggunakan komponen dan struktur yang seluruhnya pasif atau sistem yang menggunakan komponen aktif dalam jumlah yang sangat terbatas untuk menginisiasi operasi pasif berikutnya. Berdasarkan hal tersebut, dokumen IAEA mengelompokkan sistem keselamatan pasif dalam 4 kategori.

Tabel 2.1. Kategorisasi Sistem Keselamatan Pasif (IAEA, 1991)

Karakteristik	Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
Input sinyal	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak
Sumber daya / tenaga luar	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak
Bagian mekanik bergerak	Tidak	Tidak	Ada	Tidak/Ada
Air kerja bergerak	Tidak	Tidak	Ada	Tidak/Ada

Berikut ini diberikan contoh sistem untuk masing-masing kategori tersebut:

- Kategori A: Penghalang fisik terhadap pelepasan produk fisi, seperti kelongsong bahan bakar, struktur bangunan tahan gempa, pendingin teras yang hanya mengandalkan perpindahan panas secara konduksi atau radiasi.
- Kategori B: sistem pendingin darurat atau sistem *shutdown* reaktor yang bekerja dengan menginjeksikan larutan air-borat sebagai akibat adanya gangguan terhadap kesetimbangan hidrostatik antara sistem bertekanan dan kolam air luar.
- Kategori C: sistem injeksi yang terdiri atas akumulator dan tanki penyimpanan dan pipa keluaran yang dilengkapi dengan *check valves*.
- Kategori D: sistem injeksi atau pendinginan teras darurat yang bekerja dengan gaya gravitasi, dengan inisiasi oleh katup *electro-pneumatic* atau katup bertenaga baterai (IAEA, 1991).

2.2 Sirkulasi Alam

Sirkulasi alam (*natural circulation*) merupakan suatu proses pergerakan fluida tanpa adanya gaya pendorong dari luar. Sirkulasi alam memanfaatkan perbedaan temperatur fluida pada bagian panas dan dingin, pada simulasinya dapat menggunakan *heater* dan *cooler*. Ketika temperatur meningkat, densitas fluida akan menurun, sehingga fluida mengalami gaya apung yang menyebabkan fluida bergerak ke atas (terjadi pada *heater*). Selanjutnya, fluida tersebut mentransferkan kalor ke pendingin (misalnya kolam air) secara konveksi dan konduksi (terjadi pada *cooler*). Ketika kalor pada fluida pendingin berhasil ditransferkan ke air pada kolam, temperatur fluida menjadi rendah, sehingga fluida mengalami peningkatan densitas yang menyebabkan fluida perlahan akan turun akibat pengaruh gaya gravitasi. Fluida pendingin dimasukkan kembali ke dalam teras reaktor (*heater*) sehingga temperaturnya meningkat kembali, akibatnya terjadi peningkatan densitas kembali, begitu seterusnya hingga temperatur pada teras reaktor mencapai temperatur kamar (Juarsa *et al.*, 2014).

Anggap temperatur yang terdapat di *heater* disebut T_H dan temperatur pendingin yang terdapat pada kolam pendingin disebut T_C , maka densitas fluida yang dipengaruhi oleh temperatur diformulasikan seperti pada persamaan (2.1).

$$\rho(T) = 1004,789042 - 0,046283(1,8T + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8T + 32)^2 \quad (2.1)$$

Kerapatan air akan mengikuti perubahan temperatur dari *heater* hingga *cooling tank* dikarenakan ketika air memiliki temperatur tinggi, air memiliki energi kinetik yang besar (Crabtree and Siman-Tov, 1993).

Untuk menghitung laju aliran air massa $\dot{m}$ di dalam untai persegi panjang selama pendinginan dapat menggunakan persamaan (2.2).

$$\dot{m}^2 = \frac{2gH\rho_w(\rho_c - \rho_h)}{R} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$\dot{m}$ = laju alir air massa (kg/s)

H = perbedaan tinggi antara pemanas dan pendingin (m)

ρ = densitas air (kg/m³)

ρ_w = densitas air rata-rata (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

R = resistansi hidrodinamika (m⁻⁴)

Selain dengan persamaan (2.2), laju aliran massa dapat ditentukan pula dengan persamaan (2.3).

$$Q\rho_w = Av\rho_w = \dot{m} \quad (2.3)$$

Keterangan:

A = Luas daerah hidrodinamika (m²)

v = kecepatan air (m/s)

Untuk mendapatkan persamaan laju aliran v , maka substitusikan persamaan (2.2) ke persamaan (2.3), maka didapatkan persamaan baru yaitu :

$$v^2 = \frac{2gH(\rho_c - \rho_h)}{R\rho_w A^2} \quad (2.4)$$

dengan resistivitas hidrodinamika R dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.5).

$$R = \frac{64\mu L + K\rho_w v D^2}{\rho_w v A^2 D^2} \quad (2.5)$$

Keterangan:

L = panjang total pipa (m)

D = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik air (kg/m.s)

K = *loss coefficient*.

Viskositas dinamik air pada persamaan (2.5) bergantung pada temperatur yang dapat seperti pada persamaan (2.6) (IAEA, 2012).

$$\mu(T) = e^{\frac{A+CT}{1+BT+DT^2}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$A = -6.325203964$

$B = 8.705317 \times 10^{-3}$

$C = -0.088832314$

$D = -9.657 \times 10^{-7}$

T = temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

$\mu(T)$ = viskositas dinamik (Pa.s)

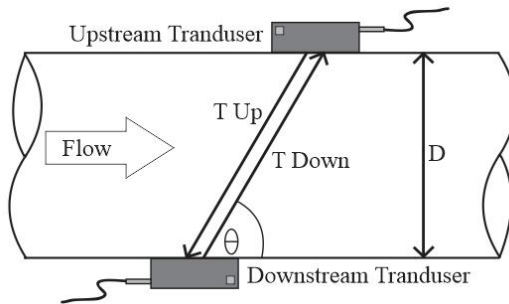
Untuk menentukan persamaan laju aliran sirkulasi alam, digunakan metode substitusi pada persamaan (2.4), (2.5), (2.6) kemudian dilakukan pempfaktoran menggunakan rumus abc,

sehingga diperoleh hasil seperti pada persamaan (2.7) berikut ini (Juarsa *et al.*, 2014).

$$v = \frac{-64\mu L + \sqrt{(64\mu L)^2 + 8gHK\rho_w D^4(\rho_c - \rho_h)}}{2H\rho_w D^2} \quad (2.7)$$

2.3 Ultrasonic Flowmeter

Ultrasonic Flowmeter adalah alat ukur laju aliran fluida yang berada pada suatu pipa penampang dengan memanfaatkan *delta transit time* dalam menentukan besaran fisis yang di ukur. *Ultrasonic Flowmeter* memiliki akurasi yang lebih tinggi dibanding dengan *flowmeter* lainnya, yaitu mencapai 0.5% dan repeatability mencapai 0.2%. Untuk beroperasi, *Ultrasonic Flowmeter* memerlukan sumber tegangan. Pada umumnya, sumber tegangan yang digunakan berkisar antara 8VDC sampai 36VDC atau 10VAC sampai 30VAC. *Ultrasonic Flowmeter* dilengkapi dengan minimal dua tranduser yang terbuat dari bahan *piezoelectric* yang berfungsi sebagai *transmitter* sekaligus *receiver* untuk pengukuran.



Gambar 2.2. Cara Kerja *Ultrasonic Flowmeter*

Untuk mempermudah ilustrasi, perhatikan Gambar 2.2. Gelombang Ultrasonik ditransmisikan dari *upstream tranduser* ke *downstream tranduser* dan sebaliknya. Jika gelombang datang dari *up* ke *down*, maka vektor kecepatan gelombang pada sumbu x

positif (searah dengan aliran air, *flow*) akan bernilai positif, sementara jika gelombang datang dari *down* ke *up*, maka vektor kecepatan gelombang bernilai negatif terhadap aliran fluida (*flow*). Jika jarak tempuh kedua jenis vektor kecepatan adalah sama, dan dengan kecepatan berbeda, maka waktu tempuh kedua jenis vektor kecepatan berbeda. Semakin besar aliran fluida didalam pipa, maka semakin besar pula selisih antara T_{up} dan T_{down} , sehingga dengan menggunakan konsep vektor didapatkan persamaan T_{up} dan T_{down} sebagai berikut:

$$t_{down} = \frac{Z}{(V_s + V \cos \theta)} \quad (2.8)$$

$$t_{up} = \frac{Z}{(V_s - V \cos \theta)} \quad (2.9)$$

dengan Z adalah jarak antara *upstream* tranduser dan *downstream* tranduser secara diagonal. Sehingga didapatkan selisih frekuensi dari transfer sinyal adalah (Rajita and Mandal, 2016):

$$\Delta f = \frac{1}{t_{down}} - \frac{1}{t_{up}} = \frac{2V \cos \theta}{Z} \quad (2.10)$$

Kecepatan laju aliran yang diukur ditentukan berdasarkan persamaan (2.11) berikut:

$$V = \frac{D}{\sin 2\theta} \times \frac{\Delta t}{t_{up} \cdot t_{down}} \quad (2.11)$$

dengan θ = sudut antara sinyal transfer dan pipa,

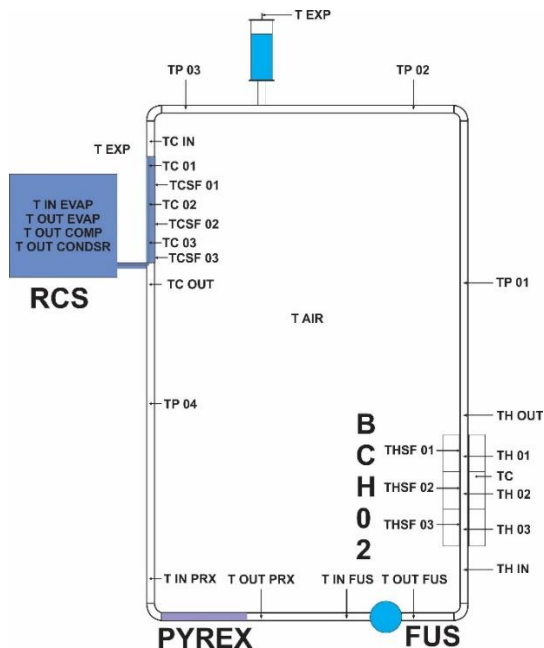
D = pipa diameter,

$$\Delta t = t_{up} - t_{down} .$$

2.4 Untai FASSIP-01 Mod.1

Untai FASSIP-01 merupakan sistem untuk menguji laju aliran sirkulasi alam jenis *rectangular loop* menggunakan fluida berupa

air. Untai ini terbuat dari Pipa SS 304 Sch 20 dengan tebal 1,5 mm, diameter luar 33,8 mm dan pipa dibuat segmen-segmen dengan panjang tiap segmen 50 cm yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk untai persegi panjang dengan total 36 segmen. Total ketinggian untai mencapai 6 m dengan lebar 3.5 m. Untai FASSIP-01 pernah dimodifikasi pada bagian *cooler* untuk meningkatkan efisiensi penyerapan kalor, dengan cara mengganti tabung pendingin dengan pendingin dari *refrigerant* (*Refrigerant Cooling System*, RCS). Untuk menandai modifikasi ini, kata “Mod.1” diletakkan setelah nama asli untai. Pada Untai FASSIP-01 Mod.1 terdapat beberapa termokopel yang terpasang untuk mengetahui besar temperatur yang ada pada air di dalam pipa. Konfigurasi pemasangan termokopel pada untai untuk penelitian ini, diperlihatkan pada Gambar 2.3. Pada Gambar 2.3 terlihat bahwa total termokopel yang digunakan berjumlah 32 buah.

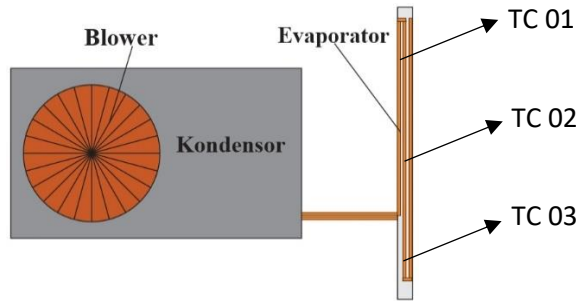


Gambar 2.3. Konfigurasi Termokopel Pada Untai FASSIP-01 Mod.1

Perhatikan Gambar 2.3. Pada Untai FASSIP-01 Mod.1 3 termokopel pada BCH-02 dan 3 termokopel pada RCS. Hasil dari pengukuran dari termokopel tersebut yang digunakan untuk menghitung laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur. Seluruh segmen pada Untai FASSIP-01 Mod.1 (kecuali pada bagian *heater* dan RCS) dilapisi *rockwool* untuk mengurangi perpindahan panas dari pipa ke lingkungan diluar daerah yang telah ditentukan. Sebenarnya, setiap segmen memiliki 2 termokopel tipe K yang terpasang pada pipa, dan apabila dibutuhkan dapat dihubungkan ke *Data Acquisition System* (DAS) NI cDAQ. Tujuan dibuatnya segmen adalah untuk memudahkan pergantian segmen dengan alat ukur atau dengan segmen yang lain yang sedang dibutuhkan untuk penelitian.

2.4.1 *Refrigerant Cooling System (RCS)*

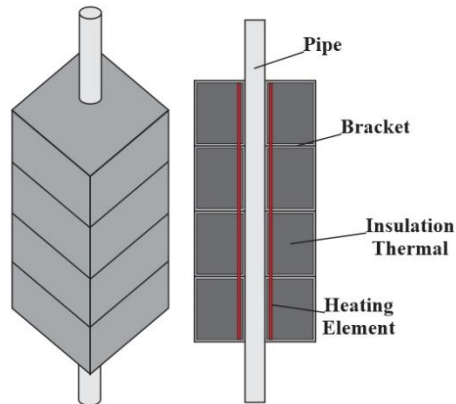
RCS adalah suatu sistem yang berfungsi sebagai pendingin pada Untai FASSIP-01 Mod.1 dengan cara menyerap kalor pada air dan membuangnya ke lingkungan. Dengan memanfaatkan zat pendingin freon, RCS mampu menghasilkan temperatur -20°C . RCS menggunakan tegangan 220VAC dan dipasang pada ketinggian 4 m dari dasar Untai FASSIP-01 Mod.1. RCS diibaratkan sebagai kolam pendingin yang menyerap kalor dari reaksi fisi reaktor dan membuangnya ke lingkungan atau dimanfaatkan. Cara kerja RCS sama seperti AC (*Air Conditioning*) namun efisiensi dari RCS hanya mencapai $\pm 5\%$. Ilustrasi RCS dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pipa-pipa tembaga yang berisikan *refrigerant*, dibuat menempel pada pipa Untai secara berputar hingga seluruh bagian dari pipa Untai tertutupi. Ketika fluida yang telah dipanaskan oleh *heater* bergerak masuk ke daerah evaporator, maka kalor yang ada pada fluida tersebut akan diserap oleh *refrigerant* pendingin RCS dan yang menyebabkan temperatur *refrigerant* meningkat. Kemudian *refrigerant* akan masuk kedalam kondensor untuk didinginkan kembali. Panas yang diserap oleh kondensor akan dihembuskan ke lingkungan menggunakan bantuan *Blower*. (Oktaviandi, 2019)



Gambar 2.4. RCS Untai FASSIP-01 Mod.1

2.4.2 Blanked Ceramic Heater-02 (BCH-02)

BCH-02 dipasang pada Untai FASSIP-01 Mod.1 untuk meningkatkan temperatur air yang ada di dalam pipa. *BCH-02* dipasang pada ketinggian 0.5 m dari dasar untai pada sisi lain dari RCS dengan beda ketinggian sebesar 2,5 m dan menggunakan tegangan 0 – 240 VAC yang dapat diatur menggunakan *voltage regulator*. *Voltage regulator* selain sebagai pengatur tegangan yang masuk ke *BCH-02*, juga berfungsi sebagai penyetabil arus yang masuk ke *BCH-02* agar tidak terjadi kelebihan arus pada *BCH-02* yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja. *BCH-02* diibaratkan sebagai teras reaktor yang dapat menghasilkan panas dari reaksi fisi yang terjadi pada reaktor. Berdasarkan, penelitian sebelumnya, efisiensi *heater* yang terpasang pada Untai FASSIP-01 Mod.1 mencapai $8 \pm 0.5\%$, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dari *BCH-02* (Fauzi, 2019). Ilustrasi untuk *BCH-02* diperlihatkan pada Gambar 2.5. *BCH-02* memiliki *heating element* yang berfungsi untuk meningkatkan temperatur air didalam pipa. Fungsi dari *ceramic* yang ada pada *BCH-02* adalah untuk menjaga temperatur *BCH-02* agar tidak dipengaruhi oleh lingkungan dan untuk mempercepat proses pemanasan karena bahan *ceramic* yang bersifat menyimpan panas dan lebih tahan dengan perubahan lingkungan sekitar.



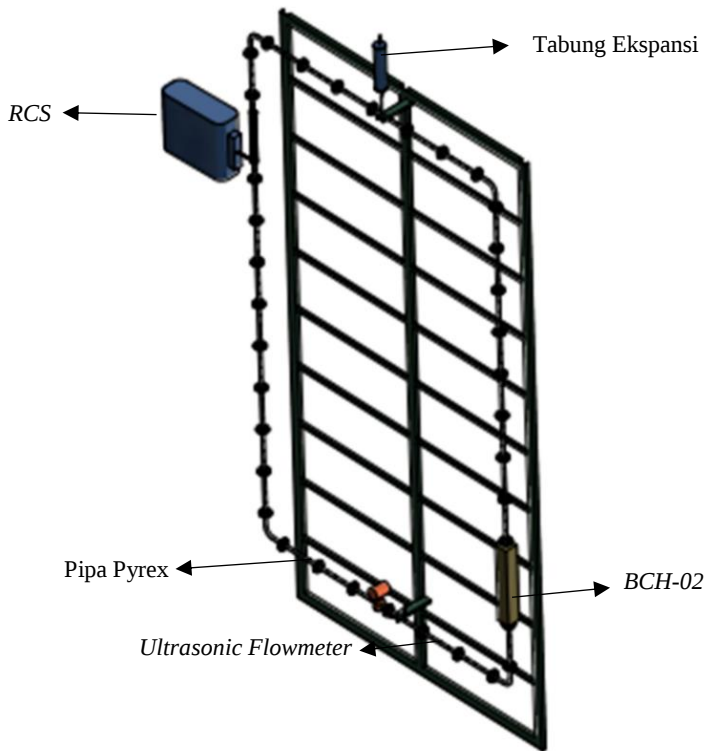
Gambar 2.5. BCH-02 Untai FASSIP-01 Mod.1

2.4.3 Tabung Ekspansi

Tabung ekspansi digunakan untuk mengontrol tekanan di dalam pipa yang ada pada Untai FASSIP-01 Mod.1, sebagai indikator level air pada Untai dan sebagai jalan keluar masuknya udara (bagian atas). Tabung ekspansi terbuat dari bahan akrilik transparan sehingga pengamatan level air mudah dilakukan. Ketika ada udara yang terjebak pada dasar pipa, maka pipa akan terus diisi hingga udara didasar pipa naik ke atas dan keluar melalui tabung ekspansi.

2.1.1 Pipa Pyrex

Pipa Pyrex (kaca transparan) berfungsi sebagai visualisasi dan validasi laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1. Tinta diinjeksikan melalui katup pada segmen sebelum pipa pyrex sehingga ketika ada aliran maka tinta akan terlihat pada pipa pyrex dan dapat diukur laju aliran sirkulasi alamnya berdasarkan pergerakan tinta yang terlihat. Tinta injektor juga dapat diganti dengan *body scrub* agar densitas fluida (air) tidak berubah. Jika densitas berubah maka pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dapat terganggu. Ilustrasi Untai FASSIP-01 Mod.1 secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Untai FASSIP-01 Mod.1 (picture by Faisal USU)

2.5 Bilangan Reynold

Untuk menentukan jenis aliran yang terjadi di dalam pipa, perhitungan tentang Bilangan Reynold perlu dilakukan. Jenis aliran pada fluida yang bergerak dapat ditentukan dengan bilangan Reynold. Bilangan Reynold adalah bilangan tak berdimensi yang pertama kali digunakan oleh ilmuwan Osborne Reynold (1842-1912). Bilangan Reynold adalah perbandingan antara gaya inersia (V_{sp}) terhadap gaya viskositas (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu.

Besar bilangan ini dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.12).

$$R_e = \frac{\rho D Q}{\mu A} \quad (2.12)$$

dengan R_e = Bilangan Reynold,
 ρ = Densitas Fluida (kg/m^3),
 D = Diameter pipa (m),
 Q = Debit Aliran (m^3/s),
 A = Luas Penampang Pipa, (m^2),
 μ = Viskositas Dinamik, (N.s/m^2).

Untuk bilangan Reynold <2000 , aliran yang terjadi adalah aliran laminar, sedangkan apabila bilangan Reynold >4000 , aliran yang terjadi adalah aliran Turbulen. Jika Bilangan Reynold berada pada rentan 2000 sampai 4000 maka jenis aliran adalah transisi dari laminar ke turbulen (Potter and Wiggert, 2008).

2.6 Ralat, Error, dan Standart Deviasi

Perhitungan ralat dalam suatu penelitian diperlukan untuk menentukan kepresisian data yang telah didapat. Ralat terbagi menjadi dua, yaitu ralat sistematis dan ralat random. Ralat meliputi kepresisian alat, akurasi alat dan cara kalibrasi alat. Selanjutnya adalah ralat random, yaitu ralat yang disebabkan karena berbagai faktor yang menyebabkan ketidakpastian dalam pengukuran. Ralat random perlu ditentukan untuk setiap kondisinya. Penurunan persamaan ralat dilakukan untuk menentukan ralat mutlak dari pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*, perhitungan berdasarkan temperatur dan pengukuran visualisasi pyrex.

Ralat mutlak yang dicari adalah ralat multak data tunggal (besaran geometri pada Untai FASSIP-01 Mod.1) dan data berulang (laju aliran sirkulasi alam). Besar ralat multak data tunggal adalah setengah dari skala terkecil alat ukur dan besar ralat multak data berulang dapat ditentukan dengan persamaan (2.13). Satuan ralat mutlak sama dengan satuan besaran yang diralat.

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.13)$$

dengan Δx = ralat mutlak,

x_i = data ke i ,

$\bar{x}$ = rata rata data,

n = jumlah pengulangan,

Ralat mutlak untuk fungsi $f(x,y,z)$ (x,y,z adalah variabel bebas) adalah (Δf) ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.14).

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2} \quad (2.14)$$

Jika x,y,z merupakan variabel terikat, maka ralat mutlak fungsi $f(x,y,z)$ atau (Δf) disederhanakan menjadi persamaan (2.15).

$$\Delta f = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| |\Delta x| + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| |\Delta y| + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right| |\Delta z| \quad (2.15)$$

Pada suatu penelitian, diperlukan pula nilai *error* dan standart deviasi dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai *error* terhadap nilai sesungguhnya dapat menggunakan persamaan (2.16).

$$E = \left| \frac{x_a - x_b}{x_a} \right| \times 100\% \quad (2.16)$$

dengan x_a adalah nilai sesungguhnya yang pada penelitian ini adalah hasil pengukuran visualisasi pyrex, dan x_b adalah nilai

pengukuran atau hipotesisi atau simulasi yang pada penelitian ini adalah hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* atau perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perbedaan temperatur. Nilai *error* yang masih dalam batas toleransi adalah nilai dibawah 10%.

Selanjutnya hal yang tidak kalah penting adalah standart deviasi, yaitu nilai yang menggambarkan keberagaman dari data yang didapatkan. Standart deviasi digunakan pada penelitian ini untuk mengetahui persebaran data yang didapat terhadap nilai rata-rata dari masing masing data. Standart deviasi dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.17) (Bevington and Robinson, 1992).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) adalah persamaan standart deviasi untuk data popilasi dengan jumlah data sebanyak n dan rata-rata data adalah $\bar{x}$. Jika ingin mengetahui standart deviasi data sampel dengan jumlah sampel n , maka nilainya dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.18).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.18)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Peralatan dan Bahan

Pada penelitian ini, ada beberapa alat, bahan dan sistem (Untai) pendukung yang diperlukan, diantaranya :

3.2.1 Peralatan

a. Untai FASSIP-01 Mod.1

Untai ini adalah sistem utama dalam penelitian ini, dimana laju sirkulasi alam terjadi dan diamati pada Untai ini. Penjelasan mengenai Untai FASSIP-01 Mod.1 sudah di bahas pada bab sebelumnya.

b. Untai Uji BETA

Untai Uji BETA atau biasa disebut UUB terdiri dari satu untai yang berbentuk persegi dilengkapi dengan pompa air berfrekuensi 5 – 50 Hz yang berfungsi sebagai sumber laju aliran air. Selain itu, terdapat *Burkert Flowmeter* yang digunakan sebagai kalibrator *Ultrasonic Flowmeter* atau untuk keperluan lainnya. Sumber air pada UUB berasal dari tabung air dengan kapasitas 700 L yang berada diatas untai. Pada untai juga terpasang katup untuk membuang udara yang terjebak didalam untai sehingga pengukuran laju aliran tidak terganggu.

c. *Ultrasonic Flowmeter* TUF-2000M

Ultrasonic Flowmeter tipe TUF-2000M yang digunakan pada penelitian ini menggunakan transduser tipe *Clamps On TS-2* yang dapat dipasang pada pipa dengan diameter 15mm sampai 100mm. Transduser TS-2 memiliki *range* temperatur antara -40°C hingga 90°C sehingga temperatur pipa pada tempat pemasangan transduser harus diperhatikan. *Ultrasonic Flowmeter* digunakan sebagai pembanding laju aliran sirkulasi alam yang didapatkan dari hasil perhitungan dengan beda temperatur antara *heater* dan RCS. Arus keluaran dari *Ultrasonic Flowmeter* dihubungkan ke *Data*

Acquisition System (DAS) NI cDAQ dan hasilnya ditampilkan dalam front panel LabVIEW2014.



Gambar 3.1. *Ultrasonic Flowmeter TUF 2000M (picture by amazon.com)*

d. *Burkert Flowmeter*

Burkert Flowmeter digunakan sebagai kalibrator *Ultrasonic Flowmeter* yang terpasang pada Uji Untai BETA. *Burkert Flowmeter* dijadikan kalibrator untuk *Ultrasonic Flowmeter* dikarenakan *Burkert Flowmeter* memiliki tingkat presisi dan akurasi yang tinggi yaitu mencapai $\pm 0.1\%$. Prinsip kerja yang digunakan pada *burkert flowmeter* ini adalah dengan menggunakan gelombang elektromagnetik.



Gambar 3.2. *Burkert Flowmeter (picture by burkert.com)*

e. Modul NI 9214

NI 9214 merupakan perangkat elektronika dari National Instrument yang berfungsi sebagai modul termokopel yang dapat digunakan pada berbagai jenis termokopel salah satunya tipe K. NI 9214 memiliki akurasi yang tinggi sehingga cocok untuk pengukuran temperatur yang mengalami perubahan kecil. Modul ini memiliki 16 kanal dengan resolusi 24 bit. Akurasi dari modul ini mencapai $0,01^{\circ}\text{C}$ untuk termokopel tipe J, K, T, E, N. Modul NI 9214 yang dibutuhkan sejumlah 2 modul karena jumlah termokopel yang terpasang ada 32.



Gambar 3.3. Modul NI 9214 (picture by ni.com)

f. Modul NI 9203

NI 9203 merupakan perangkat elektronik yang berfungsi sebagai modul analog input yang dapat digunakan untuk menerima arus dari perangkat elektronika lain agar terkoneksi satu sama lain salah satunya menerima arus keluaran dari *Ultrasonic Flowmeter*. NI 9203 memiliki 8 kanal dan maksimal *range* arus yang dapat diterima berkisar pada $\pm 20\text{ mA}$. Akurasi modul ini mencapai 0,02% pada pemakaian temperatur ruangan.



Gambar 3.4. Modul NI 9203 (picture by ni.com)

g. NI CompactDAQ 9188

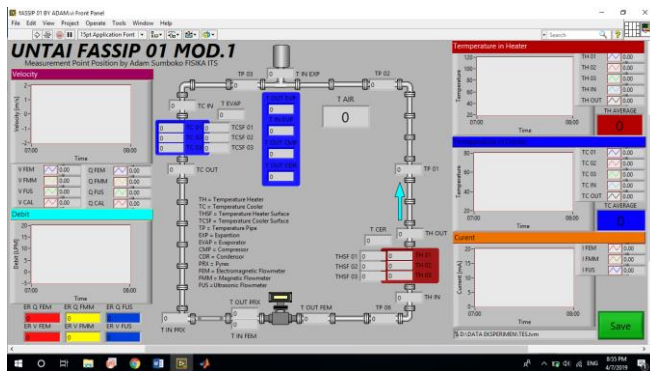
Ethernet CompactDAQ Chassis 918 merupakan perangkat elektronika yang berfungsi sebagai pengaturan waktu, sinkronisasi, dan transfer data antara modul C series I / O dan host eksternal semisal PC yang dihubungkan dengan kabel ethernet. NI cDAQ ini dapat memperoleh pengukuran tersinkronisasi lebih dari 60 modul khusus pengukuran untuk terhubung langsung ke sensor atau sinyal tertentu, dengan beberapa mesin penghitung waktu. Modul ini dapat menjalankan tugas I / O yang disesuaikan dengan perangkat keras pada tingkat yang berbeda di sistem yang sama. CDAQ ini memiliki 8 slot yang dapat dipasang untuk modul termokopel atau modul analog input lainnya.



Gambar 3.5. NI cDAQ 9188 (picture by ni.com)

h. Software LabVIEW

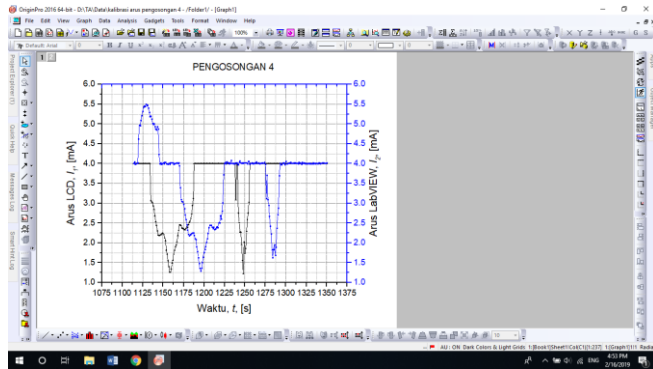
LabVIEW adalah sebuah *software* pemrograman yang diproduksi oleh National Instruments dengan konsep yang berbeda yaitu menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau blok diagram, sementara bahasa pemrograman lainnya menggunakan *text code*. Program *LabVIEW* dikenal dengan sebutan VI atau Virtual Instruments karena penampilan dan operasinya dapat meniru sebuah instrument. *LabVIEW* dapat digunakan untuk sebagai *user interface* untuk pengukuran yang dihasilkan oleh modul NI baik jenis termokopel maupun jenis analog input.



Gambar 3.6. Contoh Tampilan *LabVIEW*2014

i. Software OriginPro

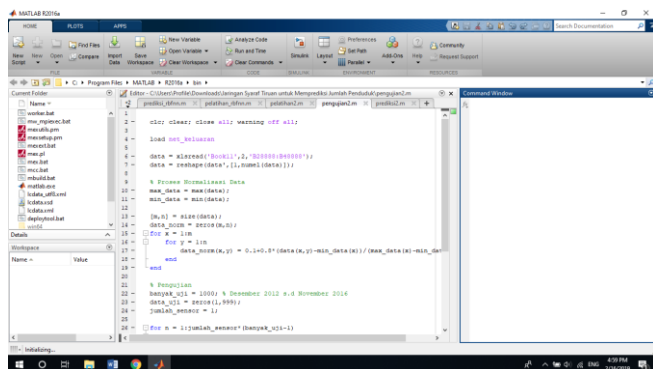
OriginPro digunakan untuk mengolah data yang telah di dapatkan kedalam bentuk grafik. OriginPro berfungsi untuk *graphing* pada data dan *fitting* pada hasil grafik yang dihasilkan, sehingga dapat diperoleh persamaan grafik yang dihasilkan berserta nilai *error* nya.



Gambar 3.7. Contoh Tampilan OriginPro2016

j. *Software MATLAB*

MATLAB atau *Matrix Laboratory* adalah sebuah *software* yang berfungsi menyelesaikan perhitungan matematika kompleks meliputi simulasi dan pemodelan, komputasi numerik dan lain sebagainya. Pada penelitian ini, *MATLAB* berfungsi untuk mencari interpolasi dari laju aliran sirkulasi alam yang didapatkan melalui pengukuran pada pipa pyrex dan melakukan perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan beda temperatur yang terhubung dengan *LabVIEW* secara *realtime*.



Gambar 3.8. Contoh Tampilan *MATLAB*2016

k. Kabel Termokopel Tipe K

Tipe K adalah tipe termokopel yang paling umum karena termokopel ini tidak mahal, akurat, dapat diandalkan, dan memiliki kisaran suhu yang luas. Tipe K umumnya ditemukan dalam aplikasi nuklir karena ketahanan terhadap radiasi cukup tinggi. Suhu kontinu maksimum adalah sekitar 1.100C. *Range* temperatur yang mampu diukur oleh tipe K ini adalah -270°C sampai 1260°C. Tingkat akurasi dari termokopel tipe K mencapai $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ pada pemakaian standar.



Gambar 3.9. Termokopel Tipe K

l. Perkakas Pendukung

Perkakas yang digunakan pada penelitian ini meliputi kunci pas, kunci inggris, *cutter*, gunting, obeng, tang, dan lain sebagainya.

3.2.2 Bahan-Bahan

Bahan bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya:

a. Air

Fluida yang digunakan sebagai media perpindahan kalor adalah air. Pemilihan air dikarenakan sistem pendingin yang diteliti akan diterapkan untuk jenis reaktor *boiling water reactor* (BWR). Selain itu air juga mudah didapatkan dan mudah diukur temperaturnya.

b. *Lem Sealant*

Lem sealant digunakan untuk menutup isi dari transduser pada *ultrasonic flowmeter* agar tidak terpengaruhi dengan kondisi lingkungan. Pemberian *lem sealant* mampu menahan gelombang yang datang dari luar sehingga *noise* lingkungan dapat diminimalisir.

c. *Grease*

Grease digunakan untuk membuat vakum daerah sekitar tempat pemasangan transduser *Ultrasonic Flowmeter* agar *noise* dari lingkungan dapat diminimalisir. Selain itu juga, *grease* digunakan untuk meningkatkan kualitas sinyal pada *Ultrasonic Flowmeter*.

3.2 Langkah Kerja

Langkah Kerja pada penelitian ini terdiri dari lima tahapan, yaitu karakterisasi dan kalibrasi termokopel dan *Ultrasonic Flowmeter*, pembuatan *Data Acquisition System* (DAS), pengujian termokopel, *Ultrasonic Flowmeter* dan DAS, pengambilan data temperatur dan *flowrate* pada Untai FASSIP-01 Mod.1 dan menganalisis data yang didapatkan.

3.3.1 Karakterisasi Termokopel

Termokopel perlu dikarakterisasi dan dikalibrasi untuk mengetahui spesifikasi dari termokopel yang digunakan. Karakterisasi dan kalibrasi dilakukan pada *thermalbed* dengan variasi temperatur. Kalibrator yang digunakan adalah STD Tipe K yang telah dikalibrasi di laboratorium khusus kalibrasi. Karakterisasi termokopel telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, sehingga data karakterisasi termokopel mengutip dari penelitian sebelumnya.

3.3.2 Karakterisasi *Ultrasonic Flowmeter* TUF-2000M

Sebelum melakukan pengukuran, *Ultrasonic Flowmeter* harus di *setting* untuk beberapa parameter tempat penggunaan alat, diantaranya adalah metode pemasangan transduser, (V, W atau Z),

pipa diameter luar, ketebalan pipa, tipe transduser yang digunakan, jenis fluida yang digunakan dan lain sebagainya. Setelah itu, pada *Ultrasonic Flowmeter* dilakukan pengecekan kualitas sinyal untuk masing masing transduser, kualitas transfer sinyal yang terjadi, dan perbandingan nilai *transit time* antara pengukuran dan perhitungan. Setelah itu, *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* dapat digunakan untuk pengambilan data penelitian.

Karakterisasi *Ultrasonic Flowmeter* dilakukan untuk menentukan nilai akurasi, presisi dan linearitas arus dari alat. Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut, kalibrasi dilakukan pada alat dengan kalibrator *Burkert Flowmeter* menggunakan sumber aliran pompa sentrifugal 6-16 Hz (naik 2 Hz) pada Untai Uji BETA dengan pengulangan sebanyak 2 kali. Uji presisi dan Akurasi dilakukan dengan menghubungkan arus keluaran pada *Ultrasonic Flowmeter* dengan NI 9203 dan NI cDAQ 9188 (mekanisme detail dijelaskan pada 3.3.3). Sementara itu, untuk menentukan linearitas arus pada alat, uji linearitas dilakukan dengan menghubungkan arus keluaran pada *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* ke multimeter digital, kemudian data direkam menggunakan *smartphone Android*. Uji linearitas arus dilakukan pada Untai FASSIP-01 Mod.1 dengan mengisi untai hingga mencapai kondisi terisi setengah pada tangki ekspansi dengan *setting* laju aliran maks sebesar 5 LPM untuk 20mA dan 0 LPM untuk 4mA serta diatur pula *damping factor* pengambilan data sebesar 30 sekon.

3.3.3 Pembuatan dan pengujian *Data Acquisition System*

Data Acquisition System atau DAS yang digunakan pada penelitian ini adalah NI cDAQ 9188 dengan 2 modul temperatur (NI 9214) dan 1 modul arus (NI 9203). Hasil rekaman dari NI 9214 berupa data temperatur dan NI 9203 data yang terekam adalah data arus. Untuk pengukuran temperatur, NI 9214 dipasang pada slot 1 dan 2 pada NI cDAQ 9188, kemudian dihubungkan ke *block diagram LabVIEW* menggunakan *tools* DAQ Assistant. Untuk pengukuran nilai arus, NI 9203 dipasang pada slot 8 NI cDAQ 9188, selanjutnya pin 4-20mA arus keluaran dari *Ultrasonic*

Flowmeter dihubungkan ke pin 7 pada NI 9023 dan dihubungkan ke *block diagram LabVIEW*. *Tools* yang digunakan pada *block diagram LabVIEW* menjadi satu dengan *tools* untuk NI 9214. Nilai yang terbaca oleh DAQ Assistant pada *LabVIEW* akan dikalikan dengan 1000 karena data yang diterima telah diturunkan 1000 kali oleh NI 9203 (spesifikasi alat). Program *LabVIEW* selanjutnya dihubungkan dengan *MATLAB* untuk mendapatkan hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perbedaan temperatur secara *realtime* dan perhitungan lainnya yang diperlukan. Seluruh data yang ditampilkan pada *LabVIEW* disimpan kedalam bentuk .lvm. Ketika seluruh program sudah selesai dibuat maka dilakukan pengujian dilakukan untuk melihat kesesuaian antara hasil pengukuran yang muncul pada tampilan *LabVIEW* dengan kondisi lapangan seperti letak pengukuran temperatur pada untai.

3.3.4 Pengambilan Data

Penelitian ini mengikuti beberapa prosedur-prosedur yang harus dilaksanakan selama penelitian berlangsung. Pertama, pastikan daerah Untai FASSIP-01 Mod.1 terbebas dari alat dan bahan yang tidak diperlukan. Selanjutnya, panel listrik untuk Untai FASSIP-01 dinyalakan, termasuk DAQ sistem yang telah dibuat. Kemudian, panel listrik untuk *heater* (BCH-02) dan *cooler* (RCS) dinyalakan bersamaan dengan perekaman data pada DAQ sistem sehingga data akan otomatis tersimpan kedalam bentuk .lvm setiap detik. Pengambilan data penelitian menyesuaikan matrik eksperimen pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Matrik Eksperimen

NO	Tegangan BCH-02	Tekanan RCS	Durasi Eksperimen	Pengulangan
1	100 Volt	1,5 bar	2 jam	3 kali
2	120 Volt	1,5 bar	2 jam	3 kali

Data yang diambil adalah data temperatur pada seluruh bagian Untai FASSIP-01 Mod.1 dan nilai arus *Ultrasonic Flowmeter* serta hasil perhitungan dari *MATLAB script* pada

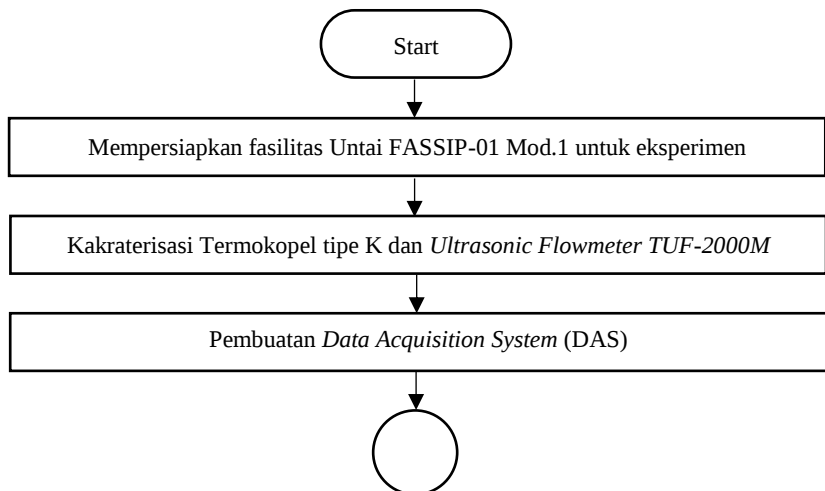
LabVIEW. Khusus untuk pengambilan data visualisasi pipa pyrex, pengambilan data dilakukan dengan melihat perubahan temperatur rata-rata pada *BCH-02*. Data diambil pada temperatur *BCH-02* $\pm 60^{\circ}\text{C}$, $\pm 70^{\circ}\text{C}$, dan $\pm 80^{\circ}\text{C}$ dengan cara tinta diinjeksikan pada tempat yang sudah disediakan kemudian diukur waktu perpindahan tinta dari satu sisi pyrex ke sisi yang lain. Setiap temperatur dilakukan pengambilan data 3 kali pada setiap perubahannya. Setiap pengambilan data visualisasi pyrex, disertakan pula temperatur yang terbaca pada *LabVIEW* untuk sinkronisasi waktu pengambilan data.

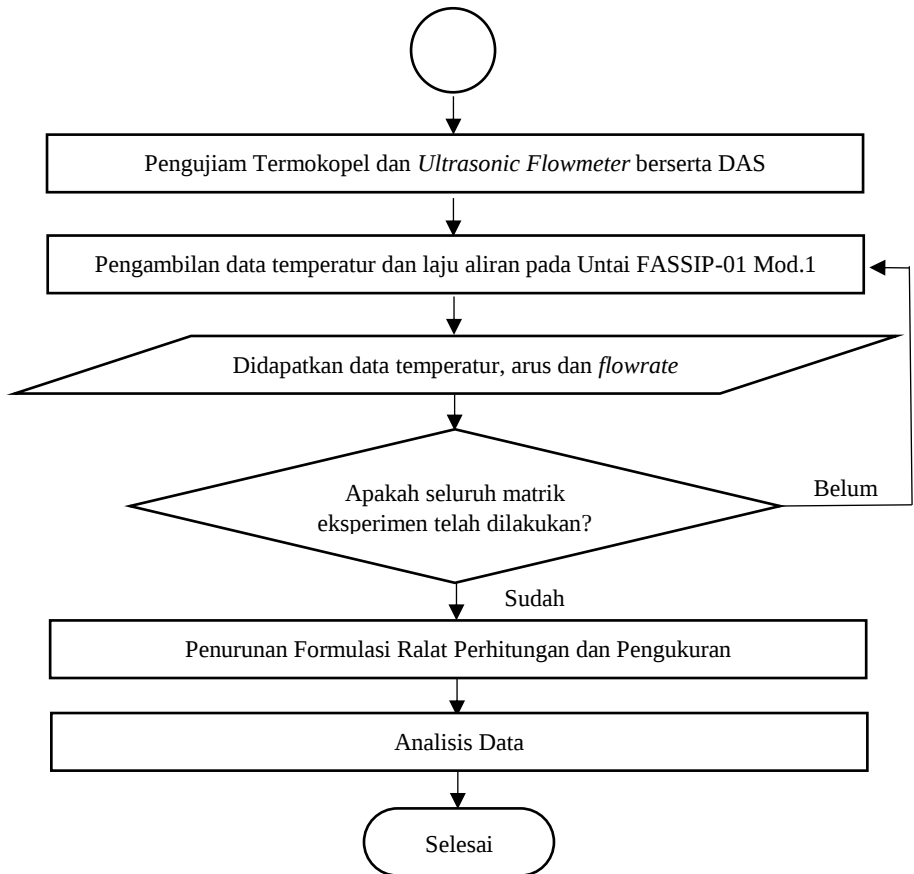
3.3.5 Analisis Data

Penelitian ini menganalisis data untuk mencari nilai *error* antara hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur dan hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dengan acuan hasil pengukuran visualisasi aliran pada pipa pyrex. Data visualisasi pyrex dilakukan interpolasi untuk mengetahui data setiap detiknya menggunakan *MATLAB*, dikarenakan injeksi tinta tidak dapat dilakukan setiap detik. Selain itu, ditentukan pula standart deviasi dan ralat untuk hasil pengukuran dan perhitungan.

3.3 Diagram Alir

Diagram alir yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.10.





Gambar 3.10. Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis data untuk mencari nilai *error* dan standart deviasi untuk dari hasil pengukuran laju aliran sirkulasi alam menggunakan *Ultrasonic Flowmeter* dan perhitungan laju sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur pada *heater* (BCH-02) dan *cooler* (RCS) serta dilakukan pula perhitungan nilai ralat untuk masing masing jenis data. Sebelum membahas data, ada beberapa prosedur dari langkah kerja yang tidak dapat dilakukan dikarenakan keterbatasan waktu dan kemampuan. Data dari variasi tegangan *heater* 120 Volt tidak dapat diambil karena keterbatasan waktu peneliti untuk pengambilan data. Selanjutnya, pada variasi tegangan 100 Volt, RCS tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya dan harus diperbaiki terlebih dahulu, namun karena kerusakannya cukup parah, perbaikan dapat memakan waktu yang lama dan melewati batas pengambilan data yang dimiliki peneliti. Sehingga data yang ditampilkan adalah data pada kondisi BCH-02 hidup dan RCS tidak berfungsi.

4.1 Hasil Pengukuran Visualisasi Laju Aliran (Pipa Pyrex)

Penelitian ini, membutuhkan suatu tolak ukur yang jelas dan dapat dipercaya yaitu nilai laju aliran sirkulasi alam yang tepat sesuai keadaan dilapangan. Hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* masih kurang dapat dipercaya karena karakteristik alatnya yang memiliki banyak *noise*. Sementara itu, untuk perhitungan sendiri, persamaan yang ada masih valid dan teruji dengan benar. Untuk itu, diperlukan data pengukuran visualisasi yang digunakan sebagai acuan. Pengukuran dilakukan dengan menginjeksikan tinta kedalam air yang sedang bergerak. Tinta dipilih untuk menghindari perbedaan densitas yang terlalu besar antara zat penginjeksi dengan zat yang akan diukur laju alirannya. Data yang didapatkan pada pengukuran visualisasi laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1 adalah data waktu tempuh tinta dari satu sisi pipa pyrex ke sisi yang lain. Untuk

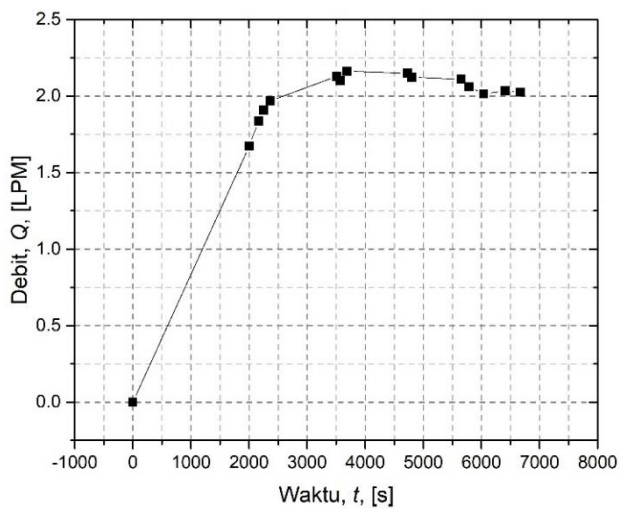
mengubahnya kedalam besaran debit, maka digunakan persamaan gerak lurus suatu benda, yaitu persamaan (4.1)

$$v = \frac{s}{t} \quad (4.1)$$

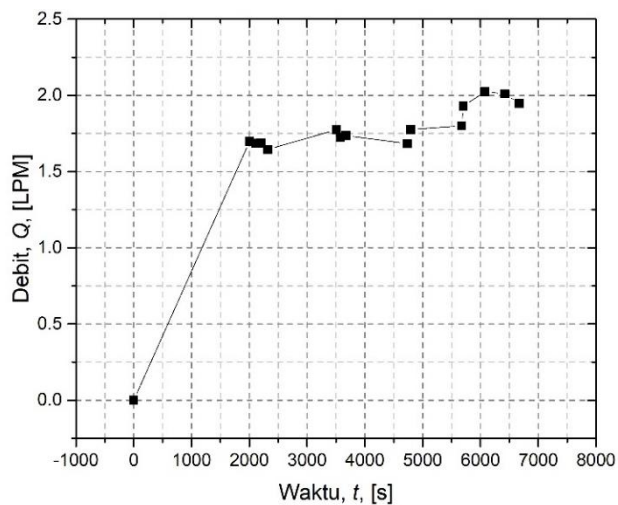
dengan v adalah kecepatan gerak tinta dari satu sisi pipa pyrex ke sisi pyrex yang lain. Setelah itu, persamaan (4.1) disubstitusikan dengan persamaan (2.3) untuk mendapatkan persamaan debit aliran terhadap waktu, sehingga didapatkan persamaan (4.2).

$$Q = \frac{s \cdot A}{t} \quad (4.2)$$

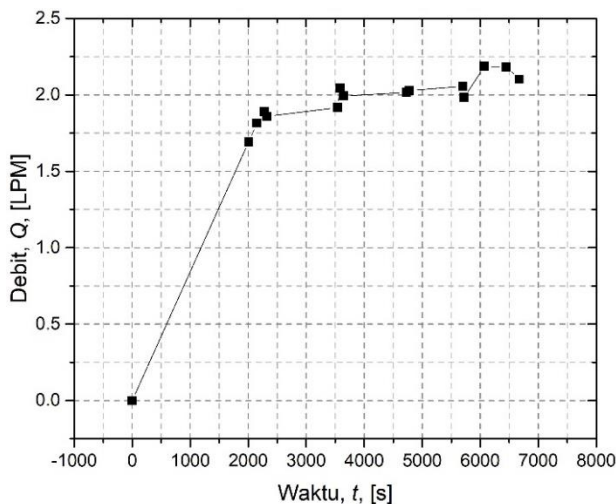
dengan nilai A adalah luas permukaan pipa sebesar $0,000745\text{m}^2$ ($r=0,0154\text{m}$) dan s adalah panjang pipa pyrex sebesar $0,46\text{m}$ (hasil pengukuran lapangan). Pengambilan data pengukuran visualisasi pyrex dilakukan tidak berdasarkan pada jeda pengambilan data terhadap waktu, namun pengambilan data didasarkan pada perubahan temperatur pada *BCH-02*. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui perubahan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan pada perubahan temperatur, bukan pada perubahan waktu. Selain data waktu tempuh tinta yang didapatkan, dicatat pula temperatur rata-rata dibagian *BCH-02* dan rata-rata temperatur pada bagian *RCS*. Setelah data temperatur didapatkan, kemudian data tersebut disinkronisasikan terhadap hasil perekaman data menggunakan *LabVIEW* yang terbaca pada saat pengambilan data waktu tempuh. Selanjutnya, dicatat urutan detik pengambilan data sebagai waktu pengambilan data. Penentuan waktu pengambilan data tidak ditentukan dengan menghitung secara terpisah dengan alat ukur lain. Hal ini bertujuan untuk menghindari ketidakpastian pada waktu pengambilan data, sehingga data yang didapatkan lebih akurat. Data Hasil pengukuran visualisasi pipa pyrex laju aliran sirkulasi alam ditampilkan pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.3.



Gambar 4.1. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan I

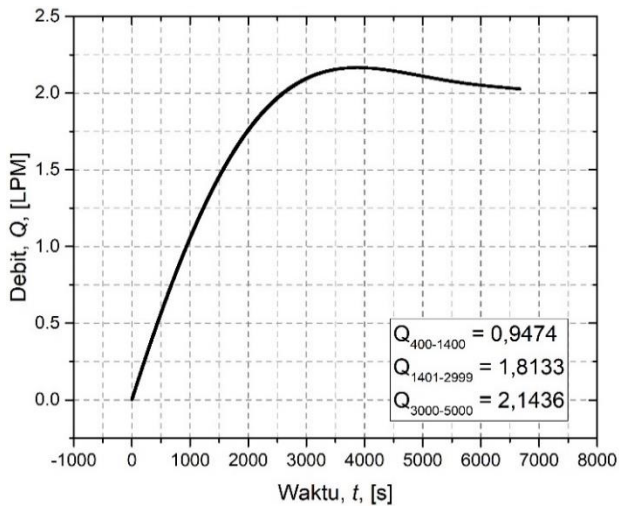


Gambar 4.2. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan II

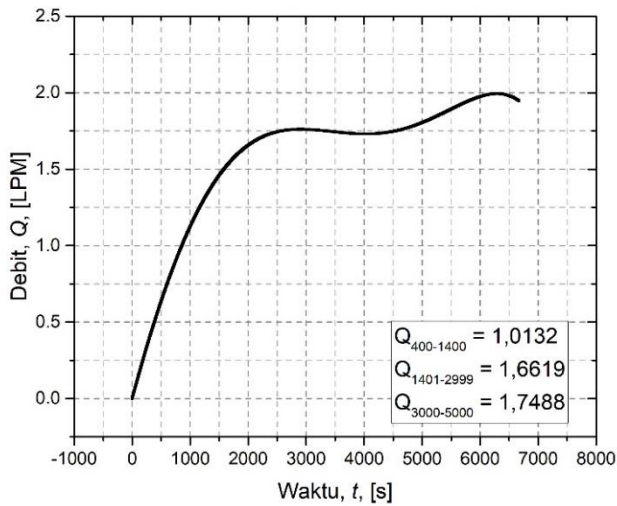


Gambar 4.3. Grafik Hasil Pengukuran Pyrex Pengulangan III

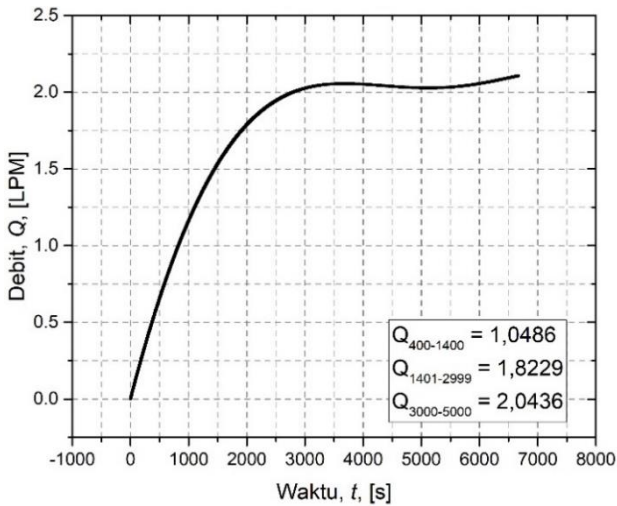
Pengukuran visualisasi pyrex tidak dilakukan setiap detik selama eksperimen berlangsung. Hal ini dikarenakan jika injeksi tinta terlalu sering dan terlalu banyak, maka densitas air yang ada di dalam pipa nilainya dapat berubah secara drastis. Sehingga, perlu dilakukan interpolasi polinomial untuk mendapatkan nilai pengukuran visualisasi pyrex setiap detiknya. Sebelum dilakukan interpolasi pada *MATLAB*, pengujian *trial error* dilakukan terlebih dahulu. Data diinterpolasikan menggunakan OriginPro untuk menentukan derajat interpolasi yang tepat untuk digunakan. Setelah dilakukan pengujian, diperoleh hasil bawah derajat interpolasi polinomial yang tepat adalah derajat 5 atau pangkat 5. Selanjutnya interpolasi dilakukan pada *MATLAB script* dengan titik-titik yang berimpitan dengan hasil interpolasi menggunakan OriginPro. Hasil interpolasi menggunakan *MATLAB* yang diambil adalah interpolasi dengan nilai *error* lebih kecil dari nilai *error* hasil interpolasi dari OriginPro. Hasil interpolasi data pengukuran pyrex ditampilkan pada grafik Gambar 4.4 sampai 4.6.



Gambar 4.4. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan I



Gambar 4.5. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan II



Gambar 4.6. Grafik Hasil Interpolasi Pengukuran Pyrex Pengulangan III

Berdasarkan Gambar 4.4 sampai 4.6, diketahui bahwa ada 3 daerah utama pada grafik laju aliran sirkulasi alam, yaitu daerah kenaikan linear, transien, dan *steady*. Daerah kenaikan linear adalah daerah dengan perubahan debit aliran yang mendekati persamaan linear, sehingga syarat yang harus dipenuhi adalah nilai *r-square* berada diatas 0,99. Maknanya, data tersebut memiliki kesamaan 99% dengan suatu persamaan linearitas. Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan daerah kenaikan linear berada pada detik ke 400-1400. Pengambilan daerah kenaikan linear tidak dimulai dari detik pertama (detik 0) dikarenakan pada detik pertama nilai *error* mencapai nilai tak hingga (nilai selisih antara data sebenarnya dan pengukuran dibagi 0). Jika nilai *error* mencapai nilai tak hingga, maka analisis yang dilakukan dapat menyebabkan ketidakakuratan dari hasil sesungguhnya. Daerah selanjutnya adalah daerah *steady*, yaitu daerah dengan nilai debit aliran yang nilainya berada hampir berhimpit dengan nilai rata-ratanya. Syarat dari daerah adalah nilai standart deviasi dari daerah berada dibawah 2%. Maknanya, data kurang bervariasi terhadap nilai rata ratanya. Setelah dilakukan

perhitungan, didapatkan *range* untuk daerah *steady* yaitu pada detik 3000 - 5000. Adapaun daerah transien, berarti daerah diantara daerah kenaikan linear dan daerah *steady* yaitu berada pada detik 1401 - 2999. Sebagai catatan, *range* masing-masing daerah untuk setiap pengulangan haruslah sama. Hal ini bertujuan untuk menghindari pengaruh dari jumlah sampel yang berbeda. Hasil interpolasi dari hasil pengukuran visualisasi pyrex dijadikan acuan *error*. Rata-rata hasil pengukuran visualisasi pyrex pada daerah kenaikan linear, transien, dan *steady* berturut-turut sebesar 1,00 LPM, 1,77 LPM, dan 1,98 LPM.

4.2 Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*

Sebelum *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* digunakan untuk pengukuran, perlu dilakukan karakterisasi untuk menentukan akurasi, presisi, dan linearitas arus dari alat.

4.2.1 Akurasi

Kalibrasi *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* dilakukan untuk menentukan tingkat keakuratan dari alat (*error* alat ukur), yaitu dengan cara membandingkan alat ukur yang akan dikalibrasi dengan nilai sesungguhnya yang sudah diketahui atau membandingkan dengan alat ukur lain yang menjadi standar kalibrator nasional. Hasil dari kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 4.1.

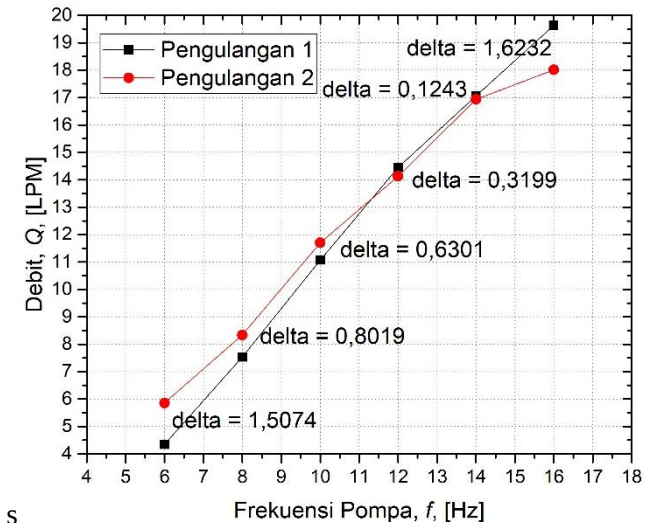
Tabel 4.1. Nilai Akurasi *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*

Frekuensi (Hz)	<i>Ultrasonic Flowmeter</i> (LPM)	Burkert Flowmeter (LPM)	<i>Error</i> (%)
6	5,1035	5,532	7,75
8	7,9354	8,445	6,03
10	11,3928	11,553	1,39
12	14,2885	14,064	1,60
14	16,9979	17,568	3,24
16	18,8239	18,987	0,86
Rata-rata <i>Error</i>			3,48

Dari Tabel 4.1, nilai pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* memiliki rata-rata *error* sebesar 3,48%, artinya tingkat keakuratan pengukuran menggunakan *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* terbilang cukup baik, sehingga hasil pengukurannya mendekati nilai sesungguhnya

4.2.2 Presisi

Nilai kepresisian suatu alat dapat ditentukan dengan cara melakukan pengulangan dalam pengukuran pada kondisi yang identik dengan selang waktu setiap pengulangan dibuat tetap. Hasil dari uji presisi ditunjukkan pada Gambar 4.7.

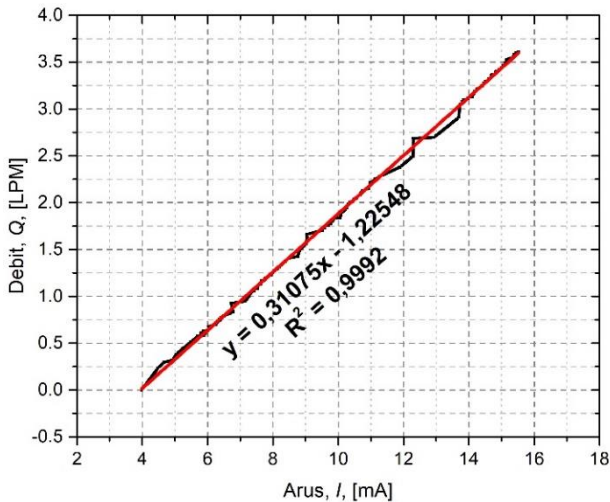


Gambar 4.7. Grafik Presisi *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*

Perhatikan Gambar 4.7, presisi *Ultrasonic Flowmeter* memiliki nilai rata-rata sebesar $\pm 0,4172$ LPM. Maknanya, *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* memiliki tingkat kepresisian yang cukup dan dapat digunakan untuk pengulangan pengambilan data.

4.2.3 Linearitas Arus

Uji linearitas arus dilakukan pada Untai FASSIP-01 Mod.1 agar kondisi saat digunakan untuk eksperimen sama dengan kondisi saat melakukan uji linearitas arus dan persamaan untuk program *LabVIEW* yang didapatkan lebih akurat. Uji linearitas arus dilakukan dengan kondisi aliran pada pengisian dikarenakan pada eksperimen sesungguhnya arah aliran sirkulasi alam searah dengan arah aliran pengisian untai. Hasil pengujian linearitas arus untuk pengisian ditunjukkan pada Gambar 4.8.



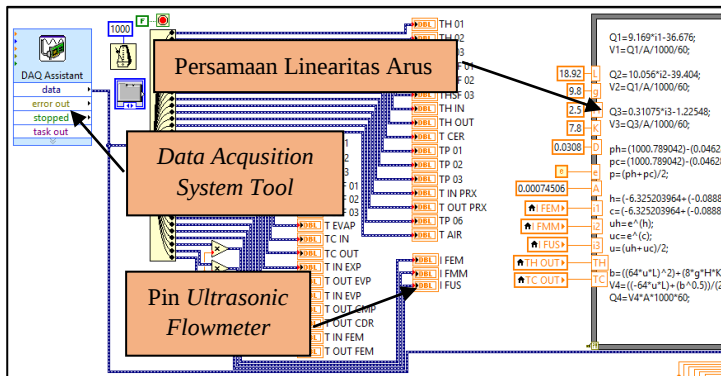
Gambar 4.8. Grafik Linearitas Arus *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*

Dari Gambar 4.8, terlihat bahwa nilai *R-Square* sebesar 0,9992, artinya persamaan (4.1) yaitu:

$$Q = 0,31075I - 1,22548 \quad (4.3)$$

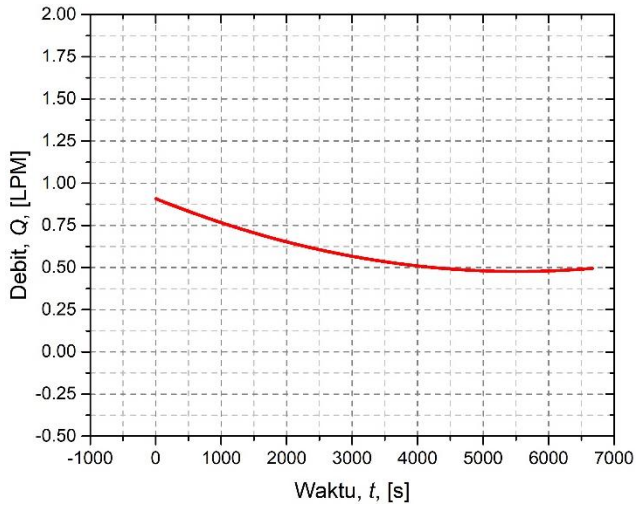
dapat digunakan sebagai acuan persamaan linearitas arus untuk program *LabVIEW* dengan catatan hanya dapat digunakan untuk *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*. Persamaan (4.3) merupakan

persamaan yang didapatkan dengan *setting* alat pada *range* laju terbaca 0 – 5 LPM. Pemilihan 5 LPM sebagai batas atas bertujuan untuk membuat *range* arus keluaran semakin pendek, sehingga arus yang dikeluarkan oleh alat lebih teliti untuk setiap laju aliran yang terbaca. Hasil dari persamaan linearitas yang didapat, dimasukkan ke dalam program *LabVIEW* yang telah dikombinasikan dengan *MATLAB*. Program *LabVIEW* yang dibuat untuk *Ultrasonic Flowmeter* ditunjukkan pada Gambar 4.9.

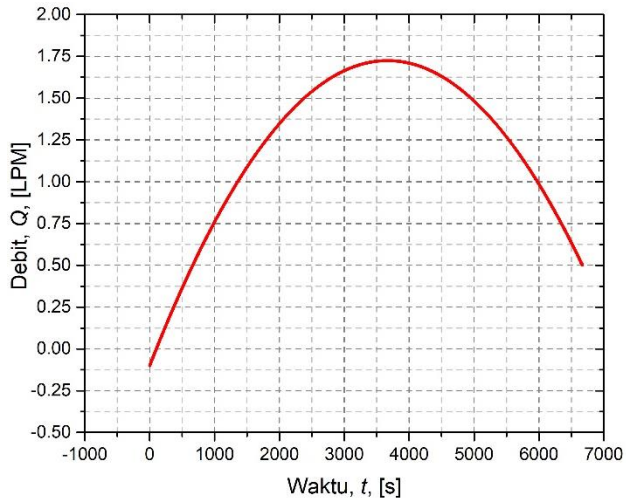


Gambar 4.9. Program *LabVIEW* *Ultrasonic Flowmeter* TUF-2000M

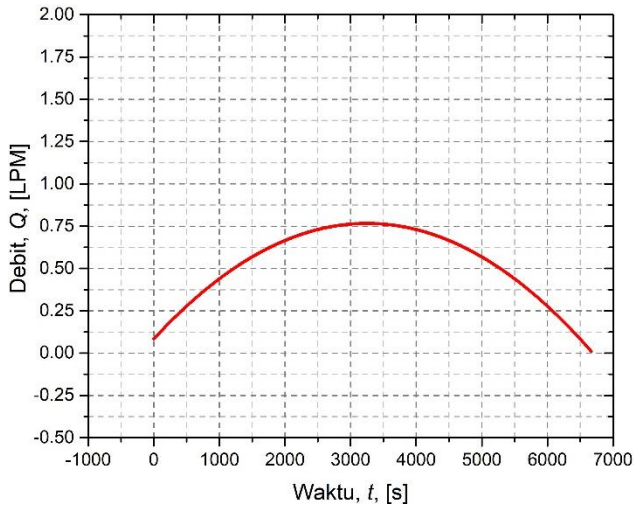
Program pada Gambar 4.9 yang dibuat khusus untuk *Ultrasonic Flowmeter*, nilai yang terbaca akan masuk ke *MATLAB* Script dan dikonversi menjadi nilai debit dengan menggunakan persamaan linearitas yang telah didapat sebelumnya. Nilai debit ini lah yang akan ditampilkan dan direkam setiap detiknya bersamaan dengan nilai arus yang terbaca sebagai *backup* data. Pada hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* diperlukan *smoothing* data karena hasil pengukuran yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang besar. Hasil pengukuran dari *Ultrasonic Flowmeter* yang telah di *smoothing* ditampilkan pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.12.



Gambar 4.10. Grafik Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* Pengulangan I



Gambar 4.11. Grafik Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* Pengulangan II



Gambar 4.12. Grafik Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* Pengulangan III

Perhatikan Gambar 4.10 sampai Gambar 4.12. Hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* sebenarnya mengalami fluktuasi yang cukup besar (hasil pengukuran sebelum *smoothing* dapat dilihat pada lampiran). Sehingga untuk membandingkan nilainya diperlukan *smoothing data* pada nilai hasil pengukuran. *Smoothing data* pada hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dilakukan menggunakan *Software OriginPro*. Metode yang digunakan adalah metode Filter Savitzky - Golay. Filter Savitzky - Golay adalah filter digital yang dapat diterapkan pada sekumpulan titik data digital untuk tujuan memperhalus data, yaitu, untuk meningkatkan presisi data tanpa mengubah kecenderungan sinyal. Hal ini dicapai, dalam proses yang dikenal sebagai konvolusi, dengan memasang *sub-set* poin data yang berdekatan berturut-turut dengan polinomial derajat rendah dengan metode kuadrat terkecil linear. Ketika titik-titik data diberi jarak yang sama, solusi analitik untuk persamaan kuadrat terkecil dapat ditemukan, dalam bentuk

satu set "koefisien konvolusi" yang dapat diterapkan ke semua *sub-set* data, untuk memberikan perkiraan kelancaran sinyal, (atau turunan dari sinyal yang dihaluskan) pada titik pusat dari setiap *sub-set*. Faktor *smoothing* yang digunakan sebesar nilai maksimal yang dapat digunakan. Hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* mengalami fluktuasi cukup besar yang dikarenakan faktor lingkungan berupa *noise* dari alat lain yang sedang digunakan saat pengukuran sedang dilakukan. Selain itu, dapat dikarenakan gelembung-gelembung atau benda kecil lain yang menyebabkan perbedaan densitas pada daerah pengukuran. Dari Gambar 4.10 sampai Gambar 4.12 didapatkan rata-rata pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* pada daerah kenaikan linear, transien dan *steady* untuk pengulangan I, II, dan III ditunjukkan pada Tabel 4.2.

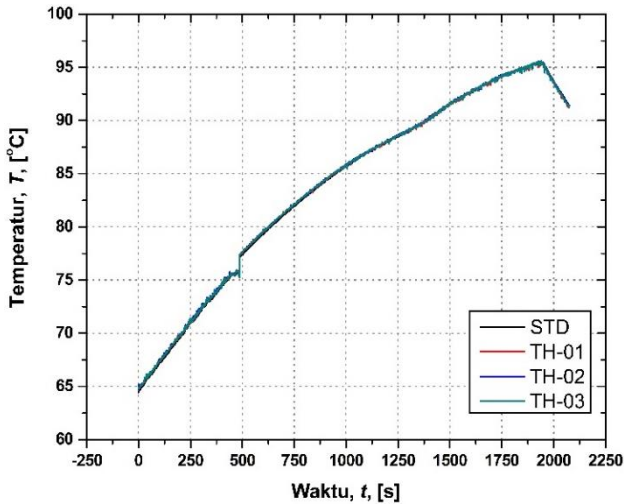
Tabel 4.2. Rata-rata Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*

Pengulangan	Debit (LPM)		
	KL	Transien	<i>Steady</i>
I	0,78	0,63	0,51
II	0,67	1,40	1,66
III	0,40	0,68	0,71
Rata ²	0,62	0,90	0,96

KL = Kenaikan Linear.

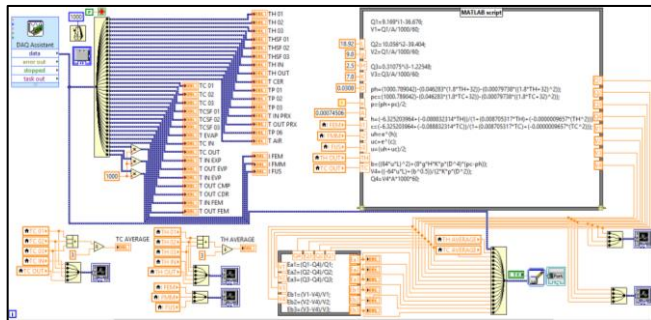
4.3 Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam

Perhitungan laju aliran sirkulasi alam memerlukan data hasil pengukuran termokopel tipe K. Namun, sebelum termokopel digunakan, perlu dilakukan karakterisasi terlebih dahulu. Pada penelitian sebelumnya, termokopel pada BCH-02 sudah dikalibrasi dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.13.



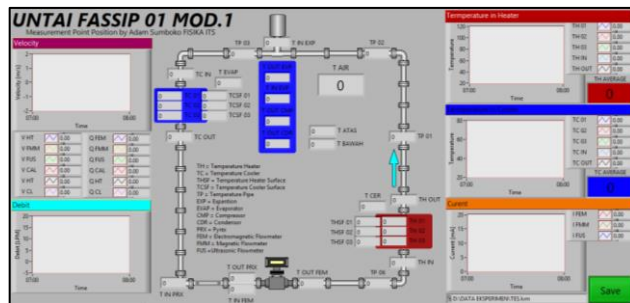
Gambar 4.13. Grafik Akurasi Termokopel pada BCH-02

Dari Gambar 4.13 terlihat bahwa nilai pembacaan dari termokopel tipe K berhimpit dengan pembacaan termokopel STD (kalibrator), ini berarti *error* dari termokopel yang digunakan adalah kecil. Nilai *error* nya untuk TH-01, TH-02, TH-03 berurutan adalah 0,17%, 0,20%, dan 0,18%. Dengan kata lain, termokopel tipe K yang digunakan layak dijadikan alat ukur untuk penelitian. Setelah itu dilakukan perhitungan laju aliran sirkulasi alam pada Untai FASSIP-01 Mod.1. Perhitungan dilakukan secara *realtime* dengan menggunakan persamaan (2.1), (2.6), dan (2.7) yang disubstitusikan kedalam *MATLAB script* pada *LabVIEW*. Pada BCH-02 dan RCS masing-masing terdapat 3 termokopel yang terpasang pada air yang melewatinya, sehingga input yang digunakan adalah rata-rata dari masing-masing termokopel pada BCH-02 dan RCS. Namun berdasarkan hasil uji program *LabVIEW*, TH-02 mengalami anomali ketika berada pada temperatur diatas 60°C sehingga rata-rata temperatur pada BCH-02 hanya TH-01 dan TH-03. Program VI *LabVIEW* ditampilkan pada Gambar 4.14



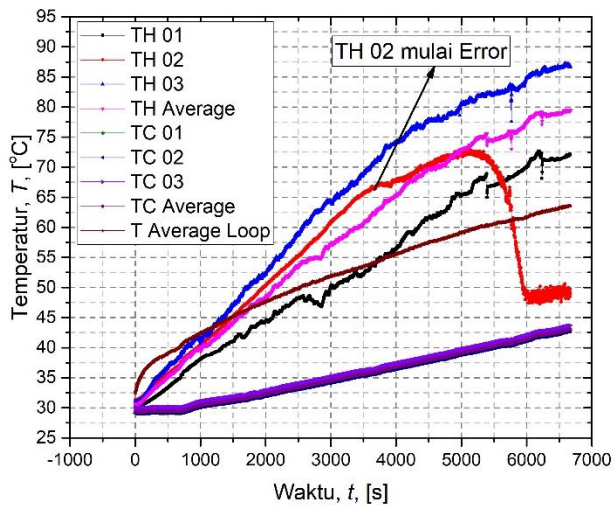
Gambar 4.14. Program *LabVIEW* untuk Pengukuran

Pada Gambar 4.14, terlihat bahwa seluruh nilai temperatur dan arus terhubung ke *tools* DAQ Assistant. *Tools* ini lah yang berfungsi merekam seluruh data yang pada NI cDAQ 9811. Untuk tampilan *user interface* keseluruhan hasil program, ditampilkan pada Gambar 4.15.

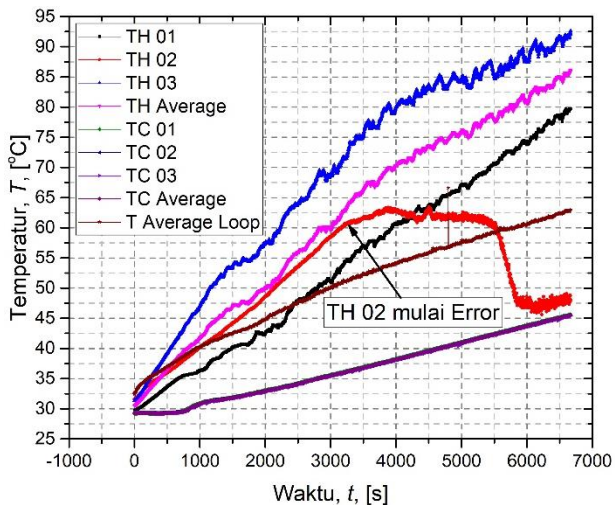


Gambar 4.15. *User Interface* Program *LabVIEW* untuk Pengukuran

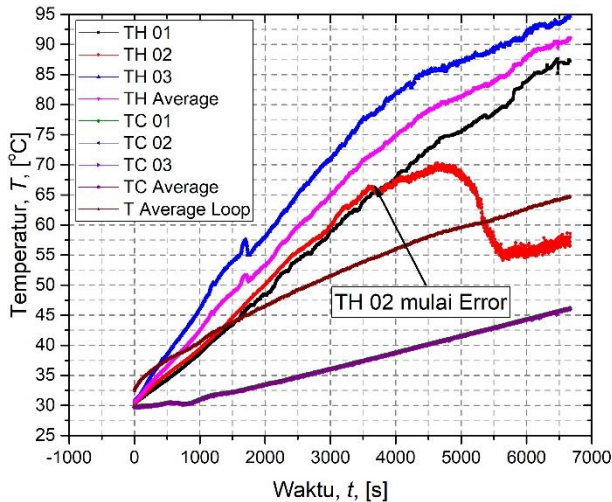
Hasil dari pengukuran termokopel pada pengulangan I, II, dan III dapat dilihat pada Gambar 4.16 sampai Gambar 4.18.



Gambar 4.16. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan I



Gambar 4.17. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan II



Gambar 4.18. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur Pengulangan III

Untuk menghitung laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur, digunakan persamaan (2.1), (2.3), (2.6) dan (2.7). Contoh perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur adalah sebagai berikut:

Diketahui : $TH = 80^{\circ}\text{C}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$,
 $TC = 40^{\circ}\text{C}$, $D = 0,0308 \text{ m}^2$,
 $L = 18,92 \text{ m}$, $K = 7,8$.
 $\bar{T} = 45^{\circ}\text{C}$, $H = 2,5 \text{ m}$,
Ditanya : $Q = ?$

Jawab : untuk mendapatkan v , maka terlebih dahulu dihitung nilai densitas, dan viskositas dari air yang digunakan. Dengan menggunakan persamaan (2.1). Nilai TH adalah nilai T rata-rata dari TH-01 dan TH-03. TH-02 tidak digunakan karena mengalami kerusakan pada pengukuran diatas 60°C . sedangkan untuk TC adalah nilai rata-rata dari TC-01, TC-02 dan TC-03. Untuk $\bar{T}$ adalah nilai rata-rata temperatur yang ada pada air diseluruh sisi

pipa. Besar densitas pada *heater*, *cooler* dan pipa adalah :

$$\begin{aligned}\rho(T) &= 1004,789042 - 0,046283(1,8T + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8T + 32)^2 \\ \rho_H(T_H) &= 1004,789042 - 0,046283(1,8(80) + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8(80) + 32)^2 \\ \rho_H(T_H) &= 967,95 \text{ kg / m}^3 \\ \rho_C(T_C) &= 1004,789042 - 0,046283(1,8(40) + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8(40) + 32)^2 \\ \rho_C(T_C) &= 987,35 \text{ kg / m}^3 \\ \rho_w(\bar{T}) &= 1004,789042 - 0,046283(1,8(45) + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8(45) + 32)^2 \\ \rho_w(\bar{T}) &= 985,38 \text{ kg / m}^3\end{aligned}$$

Kemudian untuk menghitung viskositas dinamik, maka digunakan persamaan (2.6).

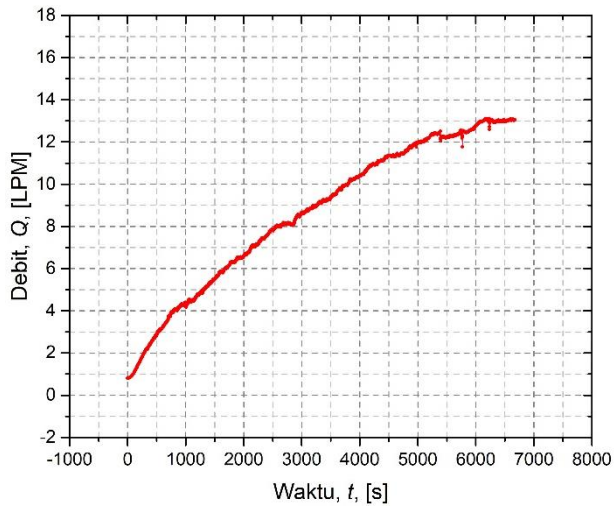
$$\begin{aligned}\mu(T) &= e^{\frac{A+CT}{1+BT+DT^2}} \\ \mu(\bar{T}) &= e^{\frac{-6,325203964+(-0,088832314 \times 45)}{1+(8,705317 \times 10^{-3} \times 45)+(-9,657 \times 10^{-7} \times (45^2))}} = 0,000595 \text{ kg / m.s}\end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai densitas dan viskositas, untuk mendapatkan nilai Q digunakan persamaan (2.3) dan (2.7).

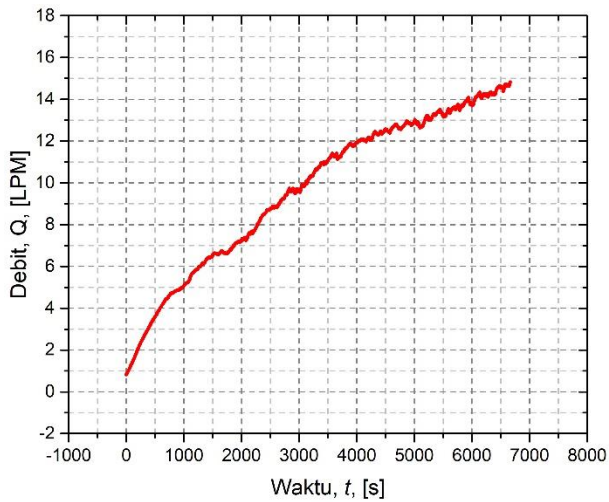
$$\begin{aligned}b &= (64\mu L)^2 + 8gHK\rho_w D^4(\rho_c - \rho_h) \\ v &= \frac{-64\mu L + \sqrt{b}}{2H\rho_w D^2} \\ b &= (64 \times 0,000595 \times 18,92)^2 + 8 \times 9,8 \times 2,5 \times 7,8 \times 985,38 \times (0,0308^4) \times (987,35 - 967,94) \\ b &= 26,8289 \\ v &= \frac{-64\mu L + \sqrt{b}}{2H\rho_w D^2} = \frac{-64 \times 0,000595 \times 18,92 + \sqrt{26,8289}}{2 \times 2,5 \times 985,38 \times (0,0308^2)} = 0,3058 \text{ m / s}\end{aligned}$$

$$Q = Av = 0,00074506 \times 0,3058 \times 1000 \times 60 = 13,6713 \text{ LPM}$$

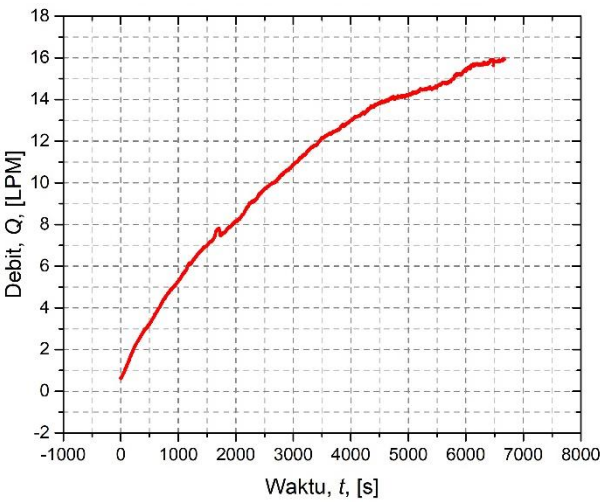
Hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam ditunjukkan pada Gambar 4.19 sampai Gambar 4.21.



Gambar 4.19. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan I



Gambar 4.20. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan II



Gambar 4.21. Grafik Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam Pengulangan III

Dari Gambar 4.19 sampai Gambar 4.21 didapatkan rata-rata hasil perhitungan laju aliran sirkulasi berdasarkan perubahan temperatur pada daerah kenaikan linear, transien dan *steady* untuk pengulangan I, II, dan III ditunjukkan pada Tabel 4.3.

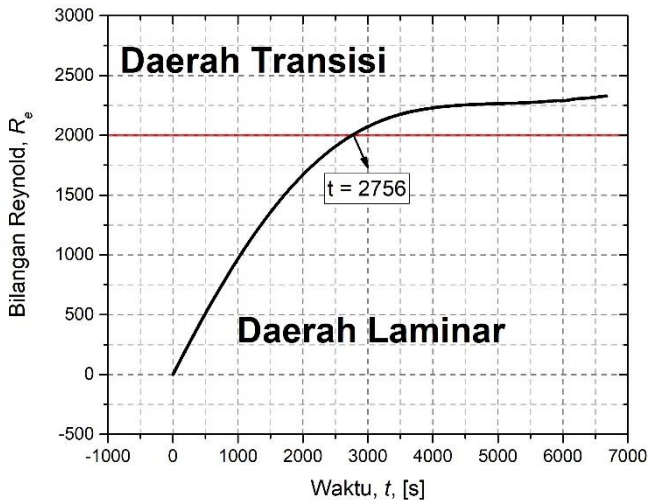
Tabel 4.3. Rata-rata Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam

Pengulangan	Debit (LPM)		
	KL	Transin	Steady
I	4,02	7,05	10,35
II	4,87	7,91	11,69
III	4,88	8,80	12,87
Rata-rata	4,59	7,92	11,64

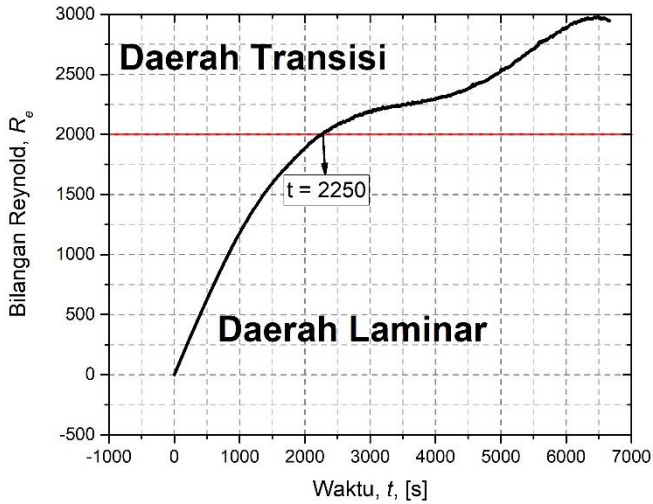
KL = Kenaikan Linear.

Untuk dapat membandingkan perhitungan dan pengukuran, hal mendasar yang harus diperhatikan adalah kondisi dari pengukuran

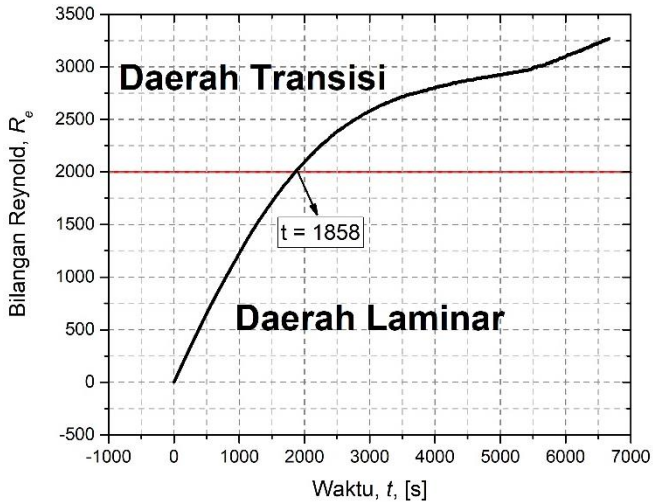
dan perhitungan yang harus identik atau sama. Persamaan (2.7) didapatkan dengan memisalkan jenis aliran yang terjadi adalah aliran laminar. Sehingga, pengukuran harus ditentukan pula jenis aliran yang terjadi. Untuk menentukan jenis aliran yang terjadi dapat menggunakan persamaan (2.12). Pada perhitungannya, densitas dan viskositas dimanik dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1) dan (2.6) sedangkan untuk debit aliran menggunakan hasil interpolasi pengukuran visualisasi pyrex. Bilangan Reynold dari hasil pengukuran visualisasi pyrex untuk pengulangan I, II dan II ditunjukkan pada Gambar 4.22 sampai Gambar 4.24.



Gambar 4.22. Grafik Bilangan Reynold Pengulangan I



Gambar 4.23. Grafik Bilangan Reynold Pengulangan II



Gambar 4.24. Grafik Bilangan Reynold Pengulangan III

Berdasarkan Gambar 4.22 sampai 4.24 terlihat bahwa bilangan Reynold kurang dari 4000 baik untuk pengulangan I, II, dan III. Ini

berarti, aliran yang terjadi adalah jenis aliran laminar dan transisi. Perbandingan harus dilakukan pada daerah jenis aliran laminar atau turbulen pada daerah *steady* untuk mendapatkan hasil yang akurat dan dapat dipertanggung jawabkan. Sementara itu, jenis aliran pada daerah *steady* adalah aliran transisi. Aliran transisi adalah aliran dengan sifat peralihan dari laminar ke turbulen. Sehingga, jenis alirannya adalah tidak laminar dan tidak turbulen. Pada jenis aliran ini, ketidakpastian mengenai koefisien gesek aliran sangat besar, padahal untuk mendapatkan perhitungan laju aliran dibutuhkan nilai koefisien gesek yang jelas dan tepat. Dengan demikian, perbandingan hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam dengan hasil pengukuran visualisasi pyrex pada daerah *steady* tidak dapat dilakukan. Untuk dapat dilakukan perbandingan, maka perlu dilakukan pengondisian Untai agar laju aliran sirkulasi alam yang terjadi adalah aliran laminar. Pengondisian untuk daerah laminar pada keadaan *steady* dapat dilakukan dengan menurunkan tegangan sumber *heater*. Sesuai Gambar 2.22 sampai Gambar 2.24, diketahui bahwa jenis aliran dibawah detik ke 2114 adalah jenis laminar. Dan pada detik ke 1858, hasil pengukuran visualisasi pyrex menunjukkan nilai 1,6 LPM, 1,6 LPM, 1,7 LPM untuk pengulangan I, II dan III dan temperatur pada *heater* dan *cooler* rata-rata berturut-turut sebesar 50°C dan 33°C (lihat Gambar 4.16 sampai Gambar 4.18). Maknanya, jika pada *heater* di-setting temperatur maksimal sebesar 50°C , maka aliran yang terjadi sudah masuk kedalam kategori aliran laminar dan pada kondisi *steady*. Sehingga, untuk dapat membandingkan antara pengukuran dan perhitungan teoritik, perlu dilakukan uji kembali pada keadaan temperatur maksimal air didalam *heater* sebesar 50°C dan pada *cooler* dijaga agar temperatur maksimalnya sebesar 33°C . Jika tegangan 100V dapat mencapai temperatur maksimal 90°C dalam selang waktu ± 2 jam, maka untuk mendapatkan temperatur 50°C diperlukan $\pm 55\text{V}$ pada selang waktu ± 2 jam pula. Hasil akan lebih baik lagi pengujian dilakukan pada kondisi RCS hidup.

4.4 Hasil Ralat, *Error*, dan Standart Deviasi

Hasil pengukuran dan perhitungan perlu dilakukan perhitungan ralat dan *error* agar diketahui kepresisian dan keakuratan terhadap nilai sesungguhnya. Sedangkan standart deviasi digunakan untuk mengetahui persebaran data *error* yang dihasilkan. Untuk menentukan ralat mutlak pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*, persamaan (2.13) digunakan untuk variabel nilai arus, dan untuk variabel nilai debit (variabel terikat) digunakan persamaan (2.15). Diketahui bahwa untuk mengkonversi arus menjadi debit, dapat digunakan persamaan linearitas yang telah didapatkan yaitu persamaan (4.3). Sehingga, persamaan ralat untuk debit yang terbaca oleh *Ultrasonic Flowmeter* ditunjukkan oleh persamaan (4.4).

$$\Delta Q_{us} = \left| \frac{\partial(0,31075I - 1,22548)}{\partial I} \right| |\Delta I|$$

$$\Delta Q_{us} = |(0,31075)(\Delta I)| \quad (4.4)$$

dengan ΔI adalah ralat mutlak arus *Ultrasonic Flowmeter*. Dengan menggunakan persamaan (4.8), nilai rata-rata untuk keseluruhan ralat debit hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* sebesar 0,26 LPM. Sedangkan, untuk daerah kenaikan linear, transien dan *steady* berturut-turut sebesar 0,11 LPM, 0,25 LPM dan 0,40 LPM. Sehingga dapat dikatakan hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* memiliki presisi yang cukup.

Selanjutnya, ralat untuk pengukuran visualisasi pyrex harus ditentukan pula. Sebenarnya, penurunan persamaan ralat pengukuran visualisasi pyrex menggunakan persamaan (2.13) untuk variabel waktu tempuh dan untuk nilai debit menggunakan persamaan (2.15). Namun, dikarenakan data pengukuran yang digunakan adalah data hasil interpolasi, maka data hasil interpolasi dapat dianggap sebagai data hasil pengukuran lapangan. Sehingga penentuan persamaan ralatnya cukup menggunakan persamaan (2.13) saja. Jika pengambilan data dilakukan setiap detiknya dengan menginjeksikan bahan injeksi tidak mengubah karakter air

maka persamaan ralat yang digunakan adalah persamaan (4.5).

$$\begin{aligned}\Delta Q_{px} &= \left| \frac{\partial Q_{px}}{\partial s} \right| |\Delta s| + \left| \frac{\partial Q_{px}}{\partial r} \right| |\Delta r| + \left| \frac{\partial Q_{px}}{\partial t} \right| |\Delta t| \\ \Delta Q_{px} &= \left| \frac{A}{t} \right| |\Delta s| + \left| \frac{2\pi s}{t} \right| |\Delta r| + \left| \frac{sA}{t^2} \right| |\Delta t|\end{aligned}\quad (4.5)$$

dengan Δs = ralat mutlak jarak tempuh (m),

Δr = ralat mutlak jari-jari pipa (m),

Δt = ralat mutlak waktu tempuh (s).

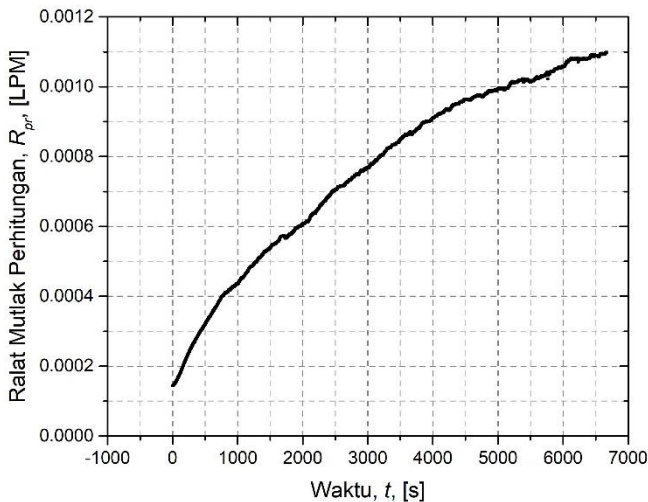
Dengan menggunakan persamaa (4.5), didapatkan nilai rata-rata dari seluruh ralat hasil pengukuran visualisasi pyrex adalah 0,06 LPM. Sementara itu, rata-rata ralat untuk daerah kenaikan linear, transien dan *steady* berturut-turut sebesar 0,03 LPM, 0,05 LPM, dan 0,12 LPM. Jika dibandingkan dengan ralat dari pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*, maka ralat hasil interpolasi dan standart deviasinya lebih kecil. Data nilai ralat ini mendukung pertanyaan bahwa hasil pengukuran visualisasi pyrex menjadi acuan bagi hasil pengukuran lainnya.

Untuk menentukan ralat debit perhitungan, digunakan persamaan (2.15) sehingga didapatkan persamaan (4.6) (penurunan persamaan (4.6) secara detail ada pada lampiran diakhir laporan).

$$\begin{aligned}Q_{pr} &= A v \\ \Delta Q_{pr} &= \left| \frac{\partial Q_{pr}}{\partial A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\partial Q_{pr}}{\partial v} \right| |\Delta v| \\ \Delta Q_{pr} &= |v \Delta A| + |A \Delta v|\end{aligned}\quad (4.6)$$

Setelah didapatkan persamaan (4.6) maka ditentukan terlebih dahulu ralat untuk temperatur, densitas, viskositas dinamik dari hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan

temperatur (seluruh hasil perhitungan ralat, dapat dilihat di lampiran pada akhir laporan ini). Setelah itu, ralat untuk kecepatan laju aliran dihitung dan kemudian debit aliran dihitung. Untuk ralat temperatur, densitas, viskositas dinamik dan kecepatan laju aliran dapat dilihat pada lampiran diakhir laporan ini. Untuk ralat debit hasil perhitungan laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur ditunjukkan oleh Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Ralat Mutlak Debit Aliran Hasil Perhitungan

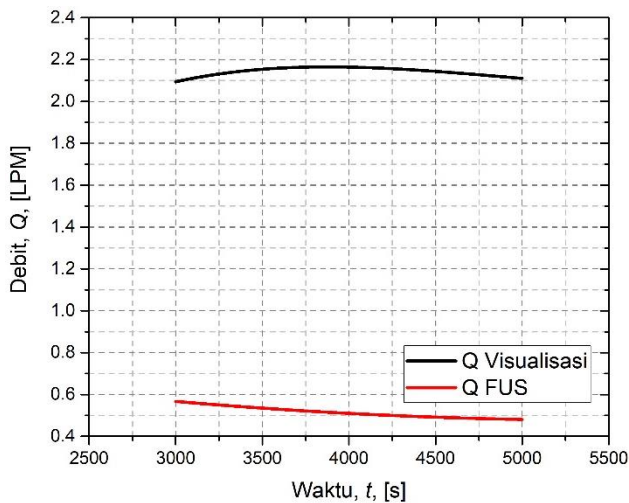
Pada Gambar 4.25, rata-rata dari seluruh ralat adalah 0,0007 LPM. Sementara itu, rata-rata ralat untuk daerah kenaikan linear, transien dan *steady* berturut-turut sebesar 0,0004 LPM, 0,0006 LPM, dan 0,0009 LPM. Dari Gambar 4.25, diketahui bahwa jika semakin besar nilai temperatur yang terukur (waktu semakin besar) maka *error* yang terjadi dari setiap pengulangannya akan semakin besar pula. Namun, nilai ralat dari hasil perhitungan ini terbilang sangat kecil. Maknanya, pengulangan I, II, dan III menunjukkan hasil perhitungan yang sama dan memiliki karakter kenaikan yang sama. Sehingga, hasil perhitungan teoritik dari laju aliran sirkulasi alam berdasarkan perubahan temperatur dapat dikatakan memiliki

presisi yang tinggi dari setiap pengulangannya. Pada tabel 4.4 ditunjukkan nilai ralat semua pengukuran dan perhitungan.

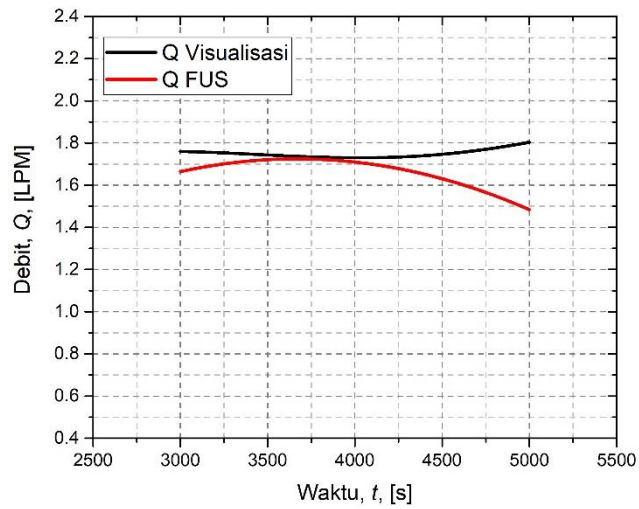
Tabel 4.4. Ralat Pengukuran dan Perhitungan

Jenis Data	Ralat Mutlak (LPM)			
	KL	Transien	Steady	Rata
Pengukuran FUS	0,11	0,25	0,40	0,26
Pengukuran Visualisasi	0,03	0,05	0,12	0,06
Perhitungan Teori	0,0004	0,0006	0,0009	0,0007

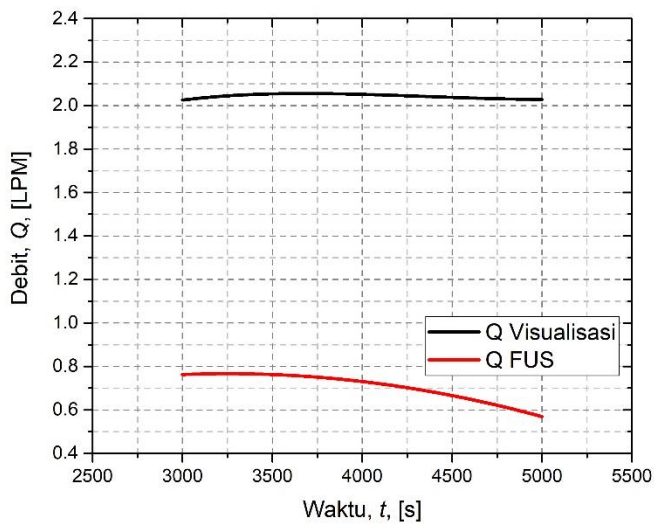
Selanjutnya, ditentukan nilai perbandingan antara hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dengan hasil pengukuran visualisasi pyrex. perbandingan antara pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dengan hasil pengukuran visualisasi pyrex ditunjukkan pada Gambar 4.26 sampai 4.28.



Gambar 4.26. Perbandingan Pengulangan I



Gambar 4.27. Perbandingan Pengulangan II



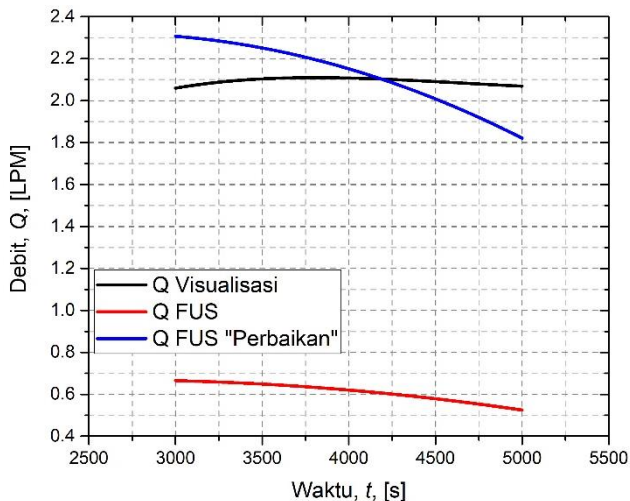
Gambar 4.28. Perbandingan Pengulangan III

Dari Gambar 4.26 sampai Gambar 4.28 didapatkan nilai *error* dan standart deviasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Pebandingan dan Perbaikan Hasil FUS Daerah *Steady*

Pengulangan	Error Rerata (%)	Standart Deviasi (%)
F US I	76,00	1,23
F US II	4,01	4,58
F US III	65,33	2,80

Pada Tabel 4.5, pengulangan II sebelum digunakan faktor pengali nilai *error* nya masih dalam batas toleransi yaitu *error* 10%, sehingga tidak perlu dilakukan perhitungan faktor pengali. Namun, dari pengulangan lainnya, nilainya sangat besar. Sehingga perlu dilakukan perhitungan faktor pengali untuk mengurangi nilai *error* nya. Sehingga didapatkan grafik hasil perbaikan seperti pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29. Perbaikan Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*

Dari Gambar 4.29, nilai faktor pengali yang didapatkan adalah sebesar 3,47 dengan *error* rata-rata setelah perbaikan sebesar 5,58% dan standart deviasi *error* sebesar 3,43%. *Error* terbesar setelah dilakukan perbaikan adalah sebesar 12% dan *error* terkecil sebesar 0%. Nilai faktor pengali tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*. Faktor pengali tersebut didapat dengan cara membagi hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* dengan hasil pengukuran visualisasi pyrex, dengan catatan hasil pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* perlu dilakukan *smoothing* seperti dicontohkan sebelumnya. Adapun nilai standart deviasi pada tabel sebelum perbaikan nilainya lebih kecil dibandingkan dengan setelah perbaikan. Ini berarti, *error* yang ada sebelum perbaikan tidak terlalu bervariasi terhadap nilai rata-ratanya, atau dapat dikatakan *error* pada daerah *steady* cenderung konstan. Hasil setelah dilakukan perbaikan, nilai standart deviasinya menjadi sedikit lebih besar, artinya, nilai *error* yang dihasilkan tidak sekonstan sebelum dilakukan perbaikan. Substansi pada perbaikan nilai *error* adalah perubahan nilai *error* yang dihasilkan sebelum dan sesudah perbaikan. Jika setelah dilakukan perbaikan nilai *error* menjadi lebih kecil, maka perbaikan dikatakan berhasil dengan catatan nilai standart deviasi masih dikatakan tidak bervariasi. Jika *error* setelah perbaikan menjadi lebih berkurang namun standart deviasi menjadi besar, artinya nilai faktor pengali kurang dapat merepresentasikan dari keseluruhan data yang dilakukan perbaikan. Pada hasil perbaikan baik nilai *error* maupun nilai standart deviasi memiliki nilai yang kecil, sehingga faktor pengali yang digunakan dapat dijadikan acuan untuk pengukuran selanjutnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, maka dari penelitian ini disimpulkan beberapa hal diantaranya:

1. Hasil Pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* untuk daerah kenaikan linear, transien dan *steady* berturut-turut sebesar 0,62 LPM, 0,90 LPM, dan 0,96 LPM.
2. Hasil Perhitungan Laju Aliran Sirkulasi Alam berdasarkan perbedaan temperatur pada *heater* dan *cooler* untuk daerah kenaikan linear, transien, dan *steady* berturut-turut sebesar 4,59 LPM, 7,92 LPM, dan 11,64 LPM.
3. Persamaan ralat perambatan yang didapat untuk pengukuran *Ultrasonic Flowmeter*, Perhitungan, dan pengukuran visualisasi pyrex berturut-turut sebagai berikut:

$$\Delta Q_{us} = |(0,31075)(\Delta I)|$$

$$\Delta Q_{px} = \left| \frac{A}{t} \right| |\Delta s| + \left| \frac{2\pi s}{t} \right| |\Delta r| + \left| \frac{sA}{t^2} \right| |\Delta t|$$

$$\Delta Q_{pr} = |v \cdot \Delta A| + |A \cdot \Delta v|$$

Hasil pengukuran visualisasi pyrex pada daerah kenaikan linear, transien dan *steady* berturut-turut sebesar 1 LPM, 1,77 LPM, dan 1,98 LPM. Perbandingan antara perhitungan teoritik dengan hasil visualisasi pyrex tidak dapat dilakukan dikarenakan pada daerah *steady* jenis aliran yang terjadi adalah aliran transisi, sehingga sulit dilakukan perhitungan. Setelah dibandingkan, pengukuran *Ultrasonic Flowmeter* perlu dilakukan penguatan sinyal untuk meningkatkan akurasi. Faktor pengali yang dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pengukuran *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M* adalah 3,47.

5.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian ini, saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penggunaan *Ultrasonic Flowmeter* tipe TUF-2000M perlu diperhatikan kondisi aliran yang akan diukur, serta setting alat yang benar benar harus spesifik sesuai *manual booknya* seperti ditentukan faktor pengali dan faktor redaman.
2. Perhitungan Laju aliran Sirkulasi Alam berdasarkan perbedaan temperatur harus menggunakan batasan-batasan yang sesuai dengan kondisi lapangan.
3. Alat dan bahan harus benar-benar dalam kondisi baik sebelum memulai penelitian.
4. Analisis perbandingan dapat dilakukan pada waktu daerah *steady* yang cukup lama dan dengan pengulangan yang lebih banyak agar didapatkan hasil yang lebih akurat.
5. Perlu dilakukan penelitian ulang untuk mengetahui perbandingan antara hasil pengukuran visualisasi pyrex dengan perhitungan teoritik pada daerah *steady* dengan jenis aliran laminar. Kondisi tersebut dapat dicapai dengan mengatur tegangan *heater* agar temperatur maksimal pada air di *heater* sebesar 50°C dan di temperatur air di *cooler* sebesar 33°C atau menggunakan *setting* tegangan *heater* sebesar $\pm 55V$ selama ± 2 jam.

DAFTAR PUSTAKA

Bevington, P. R. and Robinson, D. K. (1992) *Data Reduction And Error Analysis For The Physical Sciences Second Edition*. New York: McGraw-Hill Companies.

Burgazzi, L. (2007) '*Thermal-hydraulic passive system reliability-based design approach*', *Reliability Engineering and System Safety*, 92(9), pp. 1250–1257. doi: 10.1016/j.res.2006.07.008.

Crabtree, A. and Siman-Tov, M. (1993) '*Thermophysical properties of saturated light and heavy water for Advanced Neutron Source applications*', Oak Ridge National Laboratory. doi: 10.2172/6306919.

Fauzi, A. (2019) '*Perhitungan Laju Aliran Massa Pada Pipa Bagian Heater Berdasarkan Perubahan Daya Di Untai Fassip-01 Mod.01*'. Bogor: Universitas Ibn Khaldun.

IAEA (1991) '*Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants*', *Iaea-Tecdoc-626*, (September), p. 20.

IAEA (2012) *Natural Circulation Phenomena and Modelling for Advanced Water Cooled Reactors*, *Iaea-Tecdoc-1677*.

Juarsa, M. et al. (2014) '*Preliminary Study on Mass Flow Rate in Passive Cooling Experimental Simulation During Transient Using NC-Queen Apparatus*', *Atom Indonesia*, 40(3), p. 141. doi: 10.17146/aij.2014.333.

Oktaviandi, R. (2019) '*Perhitungan Laju Aliran Massa pada Pipa Bagian Cooler Berdasarkan Perubahan Kemampuan Pnedinginan RCS Untai FASSIP-01 Mod.1*'. Bogor: Universitas Ibn Khaldun.

Potter, M. and Wiggert, D. C. (2008) *Schaum's Outline Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill Companies. Available at: <http://www.amazon.co.uk/Schaums-Outline-Fluid-Mechanics-Series/dp/0071487816>.

Rajita, G. and Mandal, N. (2016) 'Review on transit time ultrasonic flowmeter', *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2016*, (January 2016), pp. 88–92. doi: 10.1109/CIEC.2016.7513740.

Sajith Mathews, T. et al. (2011) 'Passive system reliability analysis using Response Conditioning Method with an application to failure frequency estimation of Decay Heat Removal of PFBR', *Nuclear Engineering and Design*, 241(6), pp. 2257–2270. doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.03.049.

Schulz, T. L. (2006) 'Westinghouse AP1000 advanced passive plant', 236 (January), pp. 1547–1557. doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.03.049.

Wahono, T. (2011) *Kenapa Reaktor Fukushima Meledak*, *Kompas.com*. Available at: <https://sains.kompas.com/read/2011/03/16/06422681/Kenapa.Reaktor.Nuklir.Fukushima.Meledak> (Accessed: 5 February 2019).

Yan, X., Fan, G. and Sun, Z. (2017) 'Study on flow characteristics in an open two-phase natural circulation loop', *Annals of Nuclear Energy*, 104, pp. 291–300. doi: 10.1016/j.anucene.2016.12.038.

Yu, S. et al. (2017) 'Experimental and numerical study on single-phase flow characteristics of natural circulation system with heated narrow rectangular channel under rolling motion condition', *Annals of Nuclear Energy*. Elsevier Ltd, 103, pp. 97–113. doi: 10.1016/j.anucene.2017.01.008.

LAMPIRAN

1. Penurunan Persamaan Ralat Perhitungan

Untuk ralat mutlak perhitungan laju aliran sirkulasi digunakan persamaan (2.13) dan (2.15). Pada Untai FASSIP-01 Mod.1 terdapat 2 termokopel yang terpasang pada BCH-02 dan 3 termokopel pada RCS yang digunakan untuk perhitungan, sehingga rata rata dari ketiga termokopel perlu dilakukan ralat perambatan. Tabel 1 adalah bentuk tabel data dari lapangan saat dilakukan eksperimen.

Tabel 1. Bentuk Pengambilan Data

Pengulangan ke	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{H1}	T_{H3}	T
1	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...
Rata-Rata	$\bar{T}_{C1}$	$\bar{T}_{C2}$	$\bar{T}_{C3}$	$\bar{T}_{H1}$	$\bar{T}_{H3}$	$\bar{T}$
Ralat Mutlak	$\Delta\bar{T}_{C1}$	$\Delta\bar{T}_{C2}$	$\Delta\bar{T}_{C3}$	$\Delta\bar{T}_{H1}$	$\Delta\bar{T}_{H3}$	$\Delta\bar{T}$

Untuk menentukan ralat mutlak (ΔT) masing masing T_{C1} , T_{C2} , T_{C3} , T_{H1} , T_{H2} , T_{H2} dan T digunakan persamaan (2.13). Nilai $\bar{T}_C$ adalah nilai rata rata dari nilai $\bar{T}_{C1}$, $\bar{T}_{C2}$ dan $\bar{T}_{C3}$, sehingga $\bar{T}_C$ adalah variabel terikat. Ralat multak untuk $\bar{T}_C$ dicari dengan menggunakan persamaan (2.15) sebagai berikut.

$$\bar{T}_C = \frac{\bar{T}_{C1} + \bar{T}_{C2} + \bar{T}_{C3}}{3}$$

$$\Delta\bar{T}_C = \left| \frac{\partial \bar{T}_C}{\partial \bar{T}_{C1}} \right| |\Delta\bar{T}_{C1}| + \left| \frac{\partial \bar{T}_C}{\partial \bar{T}_{C2}} \right| |\Delta\bar{T}_{C2}| + \left| \frac{\partial \bar{T}_C}{\partial \bar{T}_{C3}} \right| |\Delta\bar{T}_{C3}|$$

$$\Delta \bar{T}_C = \frac{1}{3}(|\Delta \bar{T}_{C1}| + |\Delta \bar{T}_{C2}| + |\Delta \bar{T}_{C3}|)$$

Hal yang serupa dilakukan pada $\bar{T}_H$, sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned}\bar{T}_H &= \frac{\bar{T}_{H1} + \bar{T}_{H3}}{2} \\ \Delta \bar{T}_H &= \left| \frac{\partial \bar{T}_H}{\partial \bar{T}_{H1}} \right| |\Delta \bar{T}_{H1}| + \left| \frac{\partial \bar{T}_H}{\partial \bar{T}_{H3}} \right| |\Delta \bar{T}_{H3}| \\ \Delta \bar{T}_H &= \frac{1}{2}(|\Delta \bar{T}_{H1}| + |\Delta \bar{T}_{H3}|)\end{aligned}$$

Selanjutnya, nilai densitas air ditentukan menggunakan persamaan (2.1) yang merupakan fungsi dari variabel bebas T. Namun, dikarenakan nilai T yang dimasukkan merupakan nilai rata-rata, sehingga persamaan (2.1) menjadi fungsi variabel terikat. Oleh karena itu, ralat mutlak dari densitas air atau persamaan (2.1), yaitu ($\Delta \rho$), dicari menggunakan persamaan (2.15) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta \rho &= \left| \frac{\partial \rho}{\partial T} \right| |\Delta T| \\ \frac{\Delta \rho}{|\Delta T|} &= \left| \frac{\partial}{\partial T} (1004,789042 - 0,046283(1,8T + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8T + 32)^2) \right| \\ \frac{\Delta \rho}{|\Delta T|} &= \left| \frac{\partial}{\partial T} (1004,789042) - \frac{\partial}{\partial T} (0,046283(1,8T + 32)) - \frac{\partial}{\partial T} (7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8T + 32)^2) \right| \\ \frac{\Delta \rho}{|\Delta T|} &= |0 - (0,046283 \times 1,8) - (0,00511670224T + 0,100189116)| \\ \Delta \rho &= |(0,0051T + 0,1835)\Delta T|\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai $\rho(T)$ dan $\Delta \rho$ untuk $\bar{T}_C$, $\bar{T}_H$ dan $\bar{T}$ sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\rho_C &= 1004,789042 - 0,046283(1,8\bar{T}_C + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8\bar{T}_C + 32)^2 \\
\Delta\rho_C &= |(0,0051\bar{T}_C + 0,1835)\Delta\bar{T}_C| \\
\rho_H &= 1004,789042 - 0,046283(1,8\bar{T}_H + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8\bar{T}_H + 32)^2 \\
\Delta\rho_H &= |(0,0051\bar{T}_H + 0,1835)\Delta\bar{T}_H| \\
\rho_w &= 1004,789042 - 0,046283(1,8\bar{T} + 32) - 7,9738 \times 10^{(-4)}(1,8\bar{T} + 32)^2 \\
\Delta\rho_w &= |(0,0051\bar{T} + 0,1835)\Delta\bar{T}|
\end{aligned}$$

Selanjutnya dicari persamaan ralat mutlak viskositas dinamik yaitu persamaan (2.6). Variabel yang terdapat pada persamaan (2.6) merupakan sejatinya merupakan variabel bebas, namun nilai T yang disubstitusikan adalah hasil rata-rata beberapa nilai T, sehingga persamaan nya menjadi persamaan variabel terikat. Oleh karena itu, untuk menentukan ralat mutlak persamaan (2.6), digunakan persamaan (2.15).

$$\begin{aligned}
\Delta\mu &= \left| \frac{\partial\mu}{\partial\bar{T}} \right| |\Delta\bar{T}| \\
\frac{\Delta\mu}{|\Delta\bar{T}|} &= \left| \frac{\partial}{\partial\bar{T}} \left(e^{\frac{A+C\bar{T}}{1+B\bar{T}+D\bar{T}^2}} \right) \right| = \left| \left(e^{\frac{A+C\bar{T}}{1+B\bar{T}+D\bar{T}^2}} \right) \frac{\partial}{\partial\bar{T}} \left(\frac{A+C\bar{T}}{1+B\bar{T}+D\bar{T}^2} \right) \right| \\
\frac{\Delta\mu}{|\Delta\bar{T}|} &= \left| \left(e^{\frac{A+C\bar{T}}{1+B\bar{T}+D\bar{T}^2}} \right) \left(\frac{C(1+B\bar{T}+D\bar{T}^2) - ((A+C\bar{T})(B+2D\bar{T}))}{(1+B\bar{T}+D\bar{T}^2)^2} \right) \right| \\
\Delta\mu &= \left| \mu \left(\frac{C - AB - 2AD\bar{T} - CD\bar{T}^2}{(1+B\bar{T}+D\bar{T}^2)^2} \right) \right| |\Delta\bar{T}|
\end{aligned}$$

Selanjutnya mencari persamaan ralat mutlak untuk persamaan (2.7) digunakan persamaan (2.14) dan persamaan (2.15). Persamaan (2.7) mengandung dua jenis variabel yang berbeda, yaitu terikat dan bebas. Untuk memudahkan perhitungan, dikelompokkan variabel bebas pada persamaan (2.7).

Misalkan:

$$a = 64L$$

$$b = 8gHKD^4$$

$$c = 2HD^2$$

Sehingga persamaan (2.7), menjadi :

$$v = \frac{-\mu \cdot a + \sqrt{(\mu \cdot a)^2 + b \cdot \rho_w (\rho_c - \rho_h)}}{c \cdot \rho_w}$$

Ralat perambatan untuk a, b, dan c ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.14). sehingga didapatkan :

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial L}\right)^2 (\Delta L)^2} = \left(\frac{\partial a}{\partial L}\right) (\Delta L)$$

$$\Delta a = \left(\frac{\partial(64L)}{\partial L}\right) (\Delta L) = 64(\Delta L)$$

$$\Delta b = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial H}\right)^2 (\Delta H)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial K}\right)^2 (\Delta K)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial D}\right)^2 (\Delta D)^2}$$

$$\Delta b = \sqrt{(8gKD^4)^2 (\Delta H)^2 + (8gHD^4)^2 (\Delta K)^2 + (32gHKD^3)^2 (\Delta D)^2}$$

$$\Delta b = 8gD^3 \sqrt{(KD)^2 (\Delta H)^2 + (HD)^2 (\Delta K)^2 + (4HK)^2 (\Delta D)^2}$$

$$\Delta c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial H}\right)^2 (\Delta H)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial D}\right)^2 (\Delta D)^2}$$

$$\Delta c = \sqrt{(2D^2)^2 (\Delta H)^2 + (4HD)^2 (\Delta D)^2}$$

$$\Delta c = 2D \sqrt{(D)^2 (\Delta H)^2 + (2H)^2 (\Delta D)^2}$$

Maka, persamaan ralat untuk persamaan (2.7) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
v &= \frac{-\mu.a + \sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_h)}}{c.\rho_w} \\
\Delta v &= \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \mu}\right)^2 (\Delta \mu)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \rho_w}\right)^2 (\Delta \rho_w)^2 +} \\
&\quad \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial \rho_c}\right)^2 (\Delta \rho_c)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \rho_H}\right)^2 (\Delta \rho_H)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial c}\right)^2 (\Delta c)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial \mu} &= -\frac{a}{c.\rho_w} + \frac{\left(\frac{a^2.\mu}{\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}\right)(c.\rho_w) - 0.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial \mu} &= \frac{a}{c.\rho_w} \left(\frac{a.\mu}{\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}} - 1 \right) \\
\frac{\partial v}{\partial a} &= -\frac{\mu}{c.\rho_w} + \frac{\left(\frac{a.\mu^2}{\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}\right)(c.\rho_w) - 0.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial a} &= \frac{\mu}{c.\rho_w} \left(\frac{a.\mu}{\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}} - 1 \right) \\
\frac{\partial v}{\partial b} &= 0 + \frac{\frac{\rho_w(\rho_c - \rho_H)(c.\rho_w)}{2\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}} - 0.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial b} &= \frac{(\rho_c - \rho_H)}{2c\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}} \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_w} &= \frac{\mu.a}{c.\rho_w^2} + \left(\frac{\frac{b(c.\rho_w)(\rho_c - \rho_H)}{2\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}} - c.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_c - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial v}{\partial \rho_w} &= \frac{\mu.a}{c.\rho_w^2} + \left(\frac{b(c.\rho_w)(\rho_C - \rho_H) - 2c[(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)]}{2(c.\rho_w)^2 \sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} \right) \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_w} &= \frac{\mu.a}{c.\rho_w^2} - \left(\frac{2(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}{2c(\rho_w)^2 \sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} \right) \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_C} &= 0 + \frac{\frac{b.\rho_w(c.\rho_w)}{2\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} - 0.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_C} &= \frac{b}{2c\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_H} &= 0 + \frac{\frac{-b.\rho_w(c.\rho_w)}{2\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} - 0.\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial \rho_H} &= \frac{-b}{2c\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}} \\
\frac{\partial v}{\partial c} &= 0 + \frac{0.c.\rho_w - \rho_w \sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}}{(c.\rho_w)^2} \\
\frac{\partial v}{\partial c} &= \frac{-\sqrt{(\mu.a)^2 + b.\rho_w(\rho_C - \rho_H)}}{c^2 \rho_w}
\end{aligned}$$

Untuk menentukan ralat debit perhitungan, digunakan persamaan (2.3) dan (2.15) sehingga didapatkan persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned}
Q_{pr} &= A.v \\
\Delta Q_{pr} &= \left| \frac{\partial Q_{pr}}{\partial A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\partial Q_{pr}}{\partial v} \right| |\Delta v| \\
\Delta Q_{pr} &= |v.\Delta A| + |A.\Delta v|
\end{aligned}$$

2. Hasil Pengukuran Visualisasi Pyrex

Tabel 2. Hasil Pengukuran Visualisasi Pyrex Pengulangan I

Detik Ke	t (s)	S (m)	A (m ²)	V (m/s)	Q (lpm)
0	0	0,46	0,000745	0	0
2002	12,28	0,46	0,000745	0,0374	1,6746
2169	11,19	0,46	0,000745	0,0411	1,8377
2253	10,77	0,46	0,000745	0,0427	1,9093
2361	10,45	0,46	0,000745	0,0440	1,9678
3509	9,66	0,46	0,000745	0,0476	2,1287
3571	9,78	0,46	0,000745	0,0470	2,1026
3683	9,51	0,46	0,000745	0,0484	2,1623
4725	9,57	0,46	0,000745	0,0481	2,1488
4798	9,68	0,46	0,000745	0,0475	2,1243
5651	9,75	0,46	0,000745	0,0472	2,1091
5787	9,98	0,46	0,000745	0,0461	2,0605
6041	10,21	0,46	0,000745	0,0451	2,0141
6411	10,11	0,46	0,000745	0,0455	2,0340
6672	10,15	0,46	0,000745	0,0453	2,0260

Tabel 3. Hasil Pengukuran Visualisasi Pyrex Pengulangan II

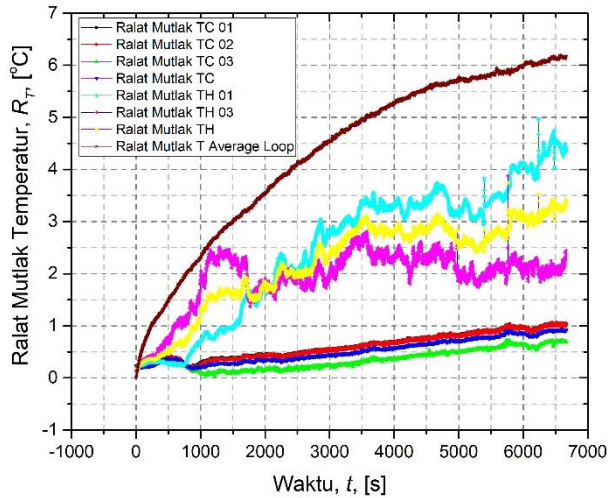
Detik Ke	t (s)	S (m)	A (m ²)	V (m/s)	Q (lpm)
0	0	0,46	0,000745	0	0
2005	12.12	0,46	0,000745	0.0380	1.6967
2113	12.21	0,46	0,000745	0.0377	1.6842
2207	12.19	0,46	0,000745	0.0377	1.6869
2321	12.5	0,46	0,000745	0.0368	1.6451
3507	11.59	0,46	0,000745	0.0397	1.7742
3578	11.93	0,46	0,000745	0.0386	1.7237
3673	11.84	0,46	0,000745	0.0388	1.7368
4735	12.22	0,46	0,000745	0.0376	1.6829
4796	11.58	0,46	0,000745	0.0397	1.7758
5675	11.42	0,46	0,000745	0.0403	1.8007
5701	10.66	0,46	0,000745	0.0432	1.9290

6077	10.16	0,46	0,000745	0.0453	2.0240
6411	10,11	0,46	0,000745	0,0455	2,0340
6672	10,15	0,46	0,000745	0,0453	2,0260

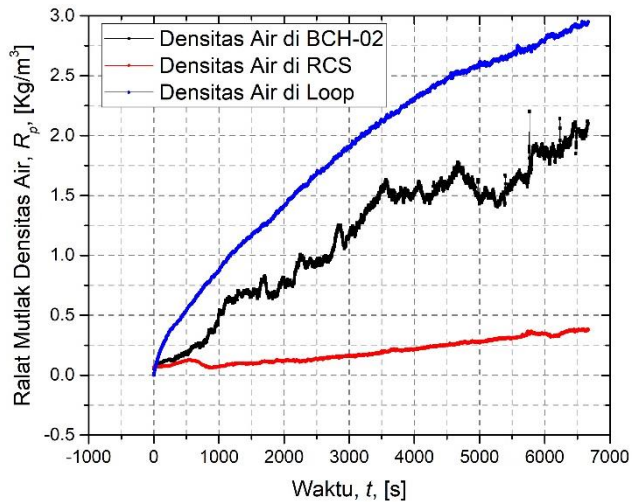
Tabel 4. Hasil Pengukuran Visualisasi Pyrex Pengulangan III

Detik Ke	t (s)	S (m)	A (m ²)	V (m/s)	Q (lpm)
0	0	0,46	0,000745	0	0
2009	12.15	0,46	0,000745	0.0379	1.6925
2150	11.33	0,46	0,000745	0.0406	1.8150
2274	10.89	0,46	0,000745	0.0422	1.8883
2326	11.06	0,46	0,000745	0.0416	1.8593
3538	10.73	0,46	0,000745	0.0429	1.9165
3584	10.07	0,46	0,000745	0.0457	2.0421
3647	10.32	0,46	0,000745	0.0446	1.9926
4727	10.2	0,46	0,000745	0.0451	2.0160
4781	10.14	0,46	0,000745	0.0454	2.0280
5697	10	0,46	0,000745	0.0460	2.0564
5722	10.37	0,46	0,000745	0.0444	1.9830
6070	9.41	0,46	0,000745	0.0489	2.1853
6450	9.42	0,46	0,000745	0.0488	2.1830
6670	9.78	0,46	0,000745	0.0470	2.1026

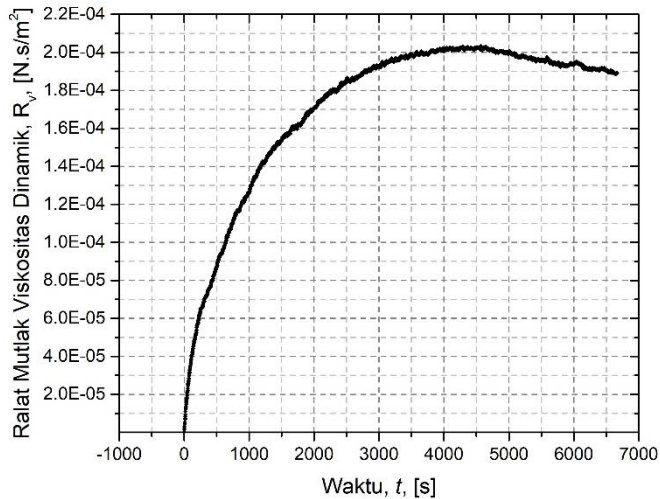
3. Ralat Pengukuran



Gambar 1. Grafik Nilai Ralat Mutlak Pengukuran Temperatur

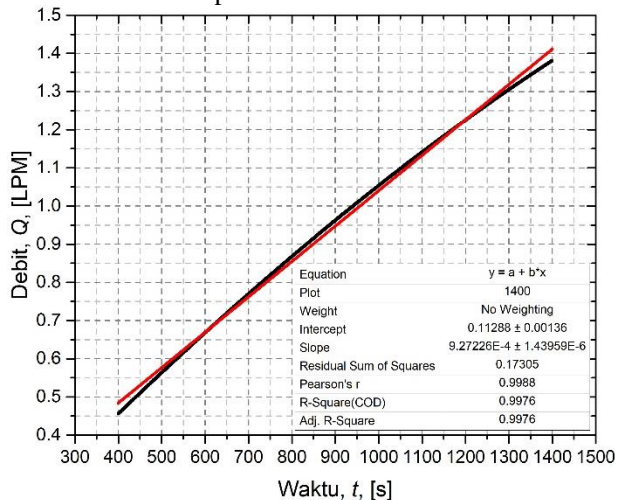


Gambar 2. Grafik Nilai Ralat Mutlak Densitas Air pada Untai

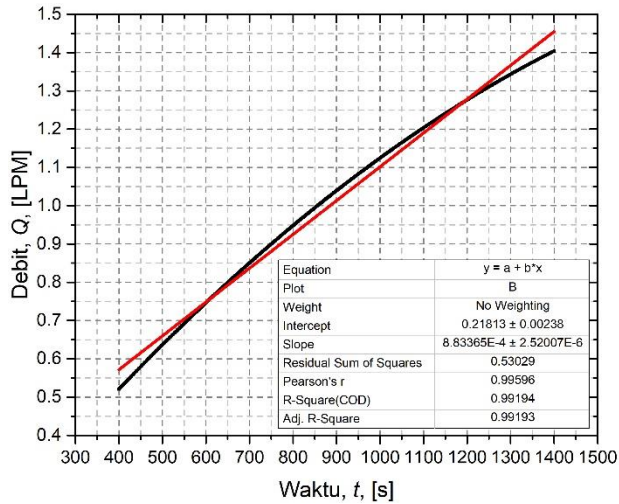


Gambar 3. Grafik Nilai Ralat Mutlak Viskositas Dinamik Air

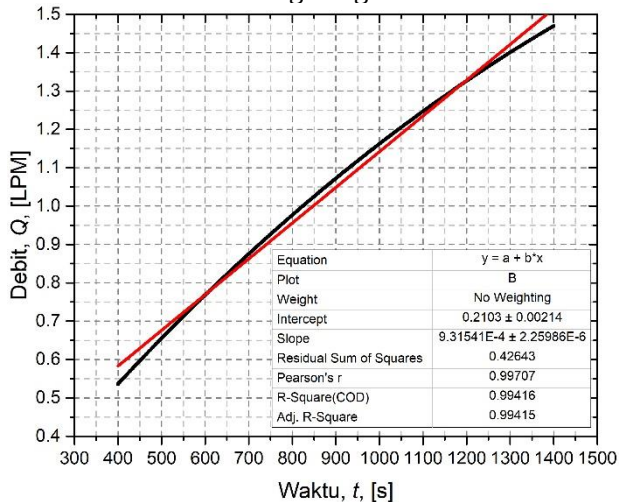
4. Linearitas Data Interpolasi Daerah Kenaikan Linear



Gambar 4. Grafik Linearitas Daerah Kenaikan Linear Pengulangan I



Gambar 5. Grafik Linearitas Daerah Kenaikan Linear Pengulangan II



Gambar 6. Grafik Linearitas Daerah Kenaikan Linear Pengulangan III

5. Standart Deviasi untuk Penentuan Daerah *Steady State*

Tabel 5. Standart Deviasi Penentuan Daerah *Steady State*

Range Data	Pengulangan I		Pengulangan II		Pengulangan III	
	STD (%)	STE (%)	STD (%)	STE (%)	STD (%)	STE (%)
2500-5000	4,88	0,09	1,63	0,03	2,53	0,05
3000-5000	1,89	0,04	1,78	0,04	0,94	0,02
3000-5500	2,67	0,05	4,38	0,09	0,98	0,02
3000-6000	3,61	0,06	7,49	0,13	1,03	0,02
3000-6500	4,37	0,07	9,63	0,16	1,53	0,02

STD = Standart Deviasi

STE = Standart *Error*

6. Program *MATLAB* Untuk Interpolasi Data Pengukuran Pyrex

```
clear;clc;
x=xlsread('Combinasi3','Sheet1','G1:G6'); %Data waktu pengambilan
y=xlsread('Combinasi3','Sheet1','H1:H6'); %Data Debit Aliran

xcari=6450; %Nilai Debit yang dicari

n=length(x);
for i=1:n;
    sb(i,1)=y(i);%sb = transpose matrik y
end
for i=2:n;
    for j=1:n-i+1;
        sb(j,i)=(sb(j+1,i-1)-sb(j,i-1))/(x(j+i-1)-x(j));
    end
end

jumlah=sb(1,1);
for i=2:n;
    z=sb(1,i);
    for j=1:i-1;
        z=z*(xcari-x(j));
    end
    jumlah=jumlah+z;
newton=jumlah;
end
a = zeros(n-1,n);%membuat matrix hasil perkalian polinomial
```

$a(1,6)=sb(1,1); \% \text{perkalian dengan } b0$

$a(2,5)=sb(1,2); \% \text{perkalian dengan } b1$
 $a(2,6)=-(sb(1,2)*x(1));$

$a(3,4)=sb(1,3); \% \text{perkalian dengan } b2$
 $a(3,5)=-sb(1,3)*(x(2)+x(1));$
 $a(3,6)=x(2)*x(1)*sb(1,3);$

$a(4,3)=sb(1,4); \% \text{perkalian dengan } b3$
 $a(4,4)=-sb(1,4)*(x(1)+x(2)+x(3));$
 $a(4,5)=sb(1,4)*((x(1)*x(2))+(x(1)*x(3))+(x(2)*x(3)));$
 $a(4,6)=-sb(1,4)*x(1)*x(2)*x(3);$

$a(5,2)=sb(1,5); \% \text{perkalian dengan } b4$
 $a(5,3)=-sb(1,5)*(x(1)+x(2)+x(3)+x(4));$
 $a(5,4)=sb(1,5)*((x(1)*x(2))+(x(3)*x(4))+((x(1)+x(2))*(x(3)+x(4))));$
 $a(5,5)=-sb(1,5)*(((x(1)+x(2))*(x(3)*x(4)))+((x(1)*x(2))*(x(3)+x(4))));$
 $a(5,6)=sb(1,5)*x(1)*x(2)*x(3)*x(4);$
 $a(6,1)=sb(1,6); \% \text{perkalian dengan } b5$
 $a(6,2)=-sb(1,6)*(x(1)+x(2)+x(3)+x(4)+x(5));$
 $a(6,3)=sb(1,6)*x(5)*((x(1)+x(2)+x(3)+x(4)))+$
 $((x(1)*x(2))+(x(3)*x(4))+((x(1)+x(2))*(x(3)+x(4))));$
 $a(6,4)=-sb(1,6)*((x(5)*((x(1)*x(2))+(x(3)*x(4))+$
 $((x(1)+x(2))*(x(3)+x(4)))+((x(3)*x(4))*(x(1)+x(2)))+$
 $(x(1)*x(2)*(x(3)+x(4))))));$
 $a(6,5)=sb(1,6)*((x(1)*x(2)*x(3)*x(4))+$
 $(x(5)*((x(3)*x(4))*(x(1)+x(2)))+$
 $(x(1)*x(2)*(x(3)+x(4))))));$
 $a(6,6)=-sb(1,6)*x(1)*x(2)*x(3)*x(4)*x(5);$

$Intersept=a(1,6)+a(2,6)+a(3,6)+a(4,6)+a(5,6)+a(6,6);$

$B1=a(2,5)+a(3,5)+a(4,5)+a(5,5)+a(6,5);$

$B2=a(3,4)+a(4,4)+a(5,4)+a(6,4);$

$B3=a(4,3)+a(5,3)+a(6,3);$

$B4=a(5,2)+a(6,2);$

$B5=a(6,1);$

$hasil=zeros(1,n);$

$hasil(6)=Intersept;$

$hasil(5)=B1;$

$hasil(4)=B2;$

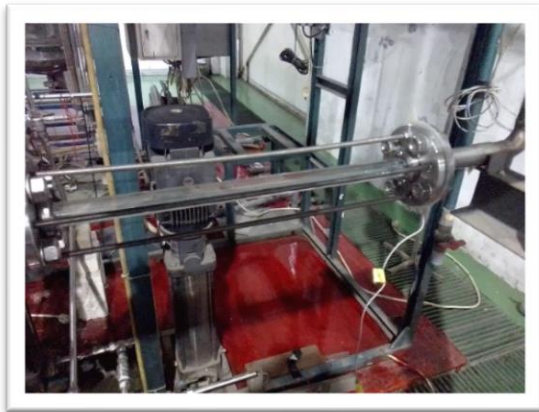
$hasil(3)=B3;$

$hasil(2)=B4;$

$hasil(1)=B5;$

$hasil$

7. Dokumentasi Penelitian



Gambar 7. Pipa Pyrex Terpasang pada Untai FASSIP-01 Mod.1



Gambar 8. Pemasangan *Ultrasonic Flowmeter* pada Untai Uji Beta



Gambar 9. Untai FASSIP-01 Mod.1



Gambar 10. Tampilan *Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M*



Gambar 11. Setting Alat Ultrasonic Flowmeter TUF-2000M



Gambar 12. Untai FASSIP-01 Mod.1 dari Samping

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis yaitu Adam Sumboko, dengan nama panggilan Adam. Penulis dilahirkan di Kebumen pada tanggal 15 Oktober 1996. Penulis merupakan anak dari pasangan Sholihin dan Hidiyati. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis yaitu, TK Masyithoh Banten lulus tahun 2003, SDN Cangkudu 1 dan SDN 04

Binangun lulus tahun 2009, SMPN 3 Bantarsari lulus tahun 2012, SMAN 2 Kebumen lulus tahun 2015. Tahun 2015 masuk ke Departemen Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SNMPTN. Penulis mengambil bidang minat Instrumentasi Elektronika. Pengalaman semasa kuliah penulis dalah satunya pernah menjadi Ketua BEM Fakultas Sains ITS periode 2017/2018 dan pernah menjadi Asisten Praktikum Fisika Dasar I dan Elektronika I. Motto penulis adalah “Hidup Sekali, Harus Berarti”, karena sejatinya segala sesuatu yang dilakukan tak ada artinya apabila tidak bermanfaat untuk orang sekitar kita.

adamsum15@gmail.com