



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI *REAL-TIME*
CFD PADA ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM
SKALA LABORATORIUM DENGAN ITHACA-FV**

SKRIPSI

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Oleh:

Lathifa Suci Ramadhani

NIM. 2202421058

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

JULI, 2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI *REAL-TIME*
CFD PADA ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM
SKALA LABORATORIUM DENGAN ITHACA-FV**

SKRIPSI

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Oleh:

Lathifa Suci Ramadhani
NIM. 2202421058

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

JULI, 2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



“Skripsi ini saya persembahkan untuk ayah, amak, keluarga, diri sendiri yang sudah berjuang, bangsa dan almamater”

"Tiada kekayaan yang lebih utama daripada akal, tiada kesendirian yang lebih menakutkan daripada kebodohan, dan tiada warisan yang lebih baik daripada pendidikan."

- Ali bin Abi Thalib -

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI

ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI *REAL-TIME* CFD PADA ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM SKALA LABORATORIUM DENGAN ITHACA-FV

Oleh:

Lathifa Suci Ramadhani

NIM. 2202421058

Program Studi Sarjana Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi

Skrripsi telah disetujui oleh pembimbing

Pembimbing 1

Dr. Candra Damis Widiawaty, S.T.P., M.T.
NIP. 198201052014042001

Kepala Program Studi
Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi

Cecep Slamet Abadi, S.T., M.T.
NIP. 196605191990031002



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

**HALAMAN PENGESAHAN
SKRIPSI**

**ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI *REAL-TIME* CFD PADA
ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM SKALA LABORATORIUM
DENGAN ITHACA-FV**

Oleh:

Lathifa Suci Ramadhani

NIM. 2202421058

Program Studi Sarjana Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang sarjana terapan di hadapan Dewan
Penguji pada tanggal 24 Juli 2026 dan diterima sebagai persyaratan untuk
memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Sarjana Terapan
Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin

DEWAN PENGUJI

No.	Nama	Posisi Penguji	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Dr. Candra Damis Widiawaty, S.T.P., M.T. NIP. 198201052014042001	Ketua		27/07 2026
2.	Ir. Andi Ulfiana, M.Si. NIP. 196208021990032002	Penguji 1		27/07 2026
3.	Fitri Wijayanti, S.Si., M.Eng. NIP. 198509042014042001	Penguji 2		27/07 2026

Depok, 27 Juli 2026

Disahkan oleh:

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si.

NIP. 197602252000121002



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lathifa Suci Ramadhani

NIM : 2202421058

Program Studi : Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi

menyatakan bahwa yang dituliskan di dalam Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri bukan jiplakan (plagiasi) karya orang lain baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat, gagasan, atau temuan orang lain yang terdapat di dalam Skripsi telah saya kutip dan saya rujuk sesuai dengan etika ilmiah.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Depok, 24 Juli 2026



Lathifa Suci Ramadhani

NIM. 2202421058



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI *REAL-TIME* CFD PADA ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM SKALA LABORATORIUM DENGAN ITHACA-FV

Lathifa Suci Ramadhani¹⁾, Candra Damis Widiawaty¹⁾, Rahmat Subarkah¹⁾

¹⁾Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, 16425, Indonesia

Email: lathifa.suci.ramadhani.tm22@mhs.wpnj.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan pemantauan kondisi (condition monitoring) secara real-time pada sistem Pipa L pompa hidram terhambat oleh beban komputasi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) konvensional yang berat dan memakan waktu lama. Penelitian ini bertujuan untuk memodernisasi simulasi numerik menggunakan teknik *Reduced Order Model* (ROM) guna mengatasi masalah latensi tersebut. Landasan teori yang digunakan mencakup prinsip mekanika fluida, seperti Bilangan Reynolds dan pressure drop, serta teknik reduksi matriks berbasis algoritma POD-Galerkin. Metode penelitian yang diterapkan adalah kuantitatif eksperimental dengan pendekatan komparatif. Data primer dikumpulkan melalui sensor flow meter digital dan pengukuran volumetrik manual, sementara data numerik diproses menggunakan library ITHACA-FV pada platform OpenFOAM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulasi ROM memiliki kinerja akurasi yang sangat baik dengan rata-rata nilai galat (MAPE) sebesar 4,84%. Dari aspek efisiensi, simulasi real-time terbukti beroperasi 88,80 kali lebih cepat dibandingkan metode *Full Order Model* (FOM). Meskipun ditemukan penurunan akurasi pada kondisi kecepatan rendah dengan galat mencapai 34,73%, model ini tetap responsif dalam memvisualisasikan dinamika aliran. Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan ROM melalui ITHACA-FV efektif dalam memangkas latensi komputasi tanpa mengorbankan fitur fisik dominan, sehingga layak diimplementasikan sebagai instrumen monitoring virtual.

Kata Kunci: CFD Real-time, *Reduced Order Model*, ITHACA-FV, OpenFOAM, Pompa Hidram, Pipa L



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ACCURACY ANALYSIS OF REAL-TIME CFD SIMULATION RESULTS ON WATER FLOW IN AN L-PIPE OF A LABORATORY-SCALE HYDRAULIC RAM PUMP USING ITHACA-FV

Lathifa Suci Ramadhani¹⁾, Candra Damis Widiawaty¹⁾, Rahmat Subarkah¹⁾

¹⁾Study Program of Bachelor of Applied Energy Generation Engineering Technology, Department of Mechanical Engineering, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok 16425, Indonesia

Email Address: lathifa.suci.ramadhani.tm22@mhs.wpnj.ac.id

ABSTRACT

The requirement for real-time condition monitoring in hydraulic ram pump L-pipe systems is hindered by the intensive computational demand of conventional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. This study aims to modernize numerical simulations using Reduced Order Model (ROM) techniques to address these latency issues. The theoretical framework encompasses fluid mechanics principles, such as Reynolds Number and pressure drop, alongside matrix reduction techniques based on the POD-Galerkin algorithm. A quantitative experimental research method with a comparative approach was implemented. Primary data were gathered through digital flow meter sensors and manual volumetric measurements, while numerical data were processed using the ITHACA-FV library on the OpenFOAM platform. The findings reveal that ROM simulation achieves high accuracy with an average Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 4.84%. Regarding efficiency, real-time simulation operated 88.80 times faster than the Full Order Model (FOM) method. Although a decrease in accuracy was observed at low-velocity conditions with an error of 34.73%, the model remains highly responsive in visualizing flow dynamics. This research demonstrates that the application of ROM via ITHACA-FV is effective in reducing computational latency while maintaining dominant physical features, establishing for virtual monitoring instruments.

Keywords: Real-time CFD, Reduced Order Model, ITHACA-FV, OpenFOAM, Hydraulic Ram Pump, L-Pipe



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“ANALISIS AKURASI HASIL SIMULASI REAL-TIME CFD PADA ALIRAN AIR PIPA L DI POMPA HIDRAM SKALA LABORATORIUM DENGAN ITHACA-FV”**. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Terapan Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sejak masa perkuliahan sampai dengan penyusunan skripsi ini, sangat sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta.
2. Bapak Cecep Slamet Abadi, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Politeknik Negeri Jakarta.
3. Ibu Dr. Candra Damis Widiawaty, S.T.P., M.T. dan Bapak Rahmat Subarkah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis hingga penelitian dan skripsi ini selesai.
4. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin yang telah membimbing dan memberikan ilmu, pengalaman, dukungan moril, dan bantuan lainnya selama masa studi di Politeknik Negeri Jakarta.
5. Seluruh teman kelas dan ENPO seperjuangan yang sudah menjadi teman penulis selama masa studi di Politeknik Negeri Jakarta.
6. Sahabat dekat penulis yang selalu menemani, membantu dan memberikan dukungan kepada penulis dalam keadaan suka maupun duka.
7. Teman satu organisasi LDK Fikri yang sudah banyak memberikan dukungan dan perhatian untuk penulis.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

8. Serta seluruh pihak yang membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam kelancaran proses penelitian dan penyelesaian skripsi.
9. Orang tua dan keluarga tercinta yang selalu memberikan do'a, semangat serta dukungan moral dan materi kepada penulis selama mengerjakan penelitian dan skripsi hingga selesai.ss
10. Dan yang terakhir, Lathifa Suci Ramadhani, ya! diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya yang telah berjuang untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai hingga akhir.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun akan sangat penulis hargai demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	3
1.3 Pertanyaan Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.5.1 Manfaat Teoretis	4
1.5.2 Manfaat Praktis.....	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Landasan Teori.....	7
2.1.1 Pompa Hidram.....	7
2.1.2 Pipa L	8
2.1.3 <i>Internal Flow</i>	9
2.1.4 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	15
2.1.5 <i>CFD Real-Time</i>	17
2.1.6 OpenFoam	19
2.1.7 ITHACA-FV	19
2.1.8 <i>Sensor Flowrate</i>	19
2.1.9 Akusisi Data	21
2.2 Kajian Literatur.....	21
2.3 Kerangka Pemikiran	25
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Jenis Penelitian	27
3.1.1 Diagram Alir Penelitian	27
3.1.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	28
3.1.3 Objek Penelitian.....	30
3.2 Alat dan Bahan	31
3.3 Jenis dan Sumber Data Penelitian	33



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.4	Prosedur Simulasi	33
3.5.1	Tahapan CFD-FOM	34
3.5.2	Tahap CFD-ROM menggunakan ITHACA-FV (<i>online</i>).....	41
3.6	Metode Pengolahan Data	44
3.7	Metode dan Analisis Data	44
3.7.1	Analisis dan verifikasi data eksperimen.....	44
3.7.2	Validasi dan Interpretasi	46
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		47
4.1	Analisis Data Eksperimen.....	47
4.2	Perbandingan Proses Simulasi	53
4.3	Analisis dan Hasil Simulasi	56
4.3.1	Verifikasi <i>Mesh</i>	56
4.3.2	Hasil Simulasi FOM, ROM dan <i>Real-time</i> pada Medan Kecepatan	58
4.3.3	Waktu Proses Simulasi	65
BAB V PENUTUP.....		67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....		69
LAMPIRAN.....		73

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alat dan Bahan	31
Tabel 3.2 Parameter <i>boundary condition</i>	39
Tabel 3.3 Parameter model simulasi.....	39
Tabel 4.1 Hasil Data Eksperimen	48
Tabel 4.2 Hasil perhitungan bilangan reynold (Re)	49
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai <i>Pressure Drop</i>	51
Tabel 4.4 Hasil perhitungan pressure drop	58
Tabel 4.5 Hasil Mean Absolute Percentage Error (MAPE) pada medan kecepatan.....	64





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pompa Hidram.....	7
Gambar 2.2 Pipa Pesat (Pipa L)	8
Gambar 2.3 The Moody chart (Çengel & Cimbala, 2014)	13
Gambar 2.4 Nilai Roughness (ϵ) pipa (Çengel & Cimbala, 2014).....	14
Gambar 2.5 Nilai K elbow 90°	15
Gambar 2.6 Sensor flow rate.....	20
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	28
Gambar 3.2 Objek Penelitian	30
Gambar 3.3 Desain Pipa L	34
Gambar 3.4 <i>Mesh resolution</i> 1 (50x150x15).....	36
Gambar 3.5 <i>Mesh resolution</i> 2 (39x200x10).....	37
Gambar 3.6 <i>Mesh resolution</i> 3 (35x200x6) <i>with refinement</i>	37
Gambar 3.7 <i>Boundary</i>	38
Gambar 3.8 Data Nilai Kecepatan Inlet ROM.....	42
Gambar 3.9 Data Nilai Kecepatan Inlet Real-time	43
Gambar 4.1 Data Eksperimen Kecepatan dengan Variasi 5 Tegangan.....	48
Gambar 4.2 Nilai Friction dalam Diagram Moody.....	50
Gambar 4.3 Perhitungan Pressure Drop dengan Variasi 5 Tegangan.....	52
Gambar 4.4 Folder Simulasi CFD FOM	53
Gambar 4.5 Folder Simulasi CFD ROM	54
Gambar 4.6 Proses Simulasi Real-time	55
Gambar 4.7 Distribusi hasil medan tekanan pada <i>mesh</i> 1 (50x150x15)	56
Gambar 4.8 Distribusi hasil medan tekanan pada <i>mesh</i> 2 (39x200x10)	57
Gambar 4.9 Distribusi hasil medan tekanan pada <i>mesh</i> 3 (35x200x6) <i>with refinement</i>	57
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Kecepatan pada Variasi 150V: a) Full Order Model b) Reduced Order Model c) Real-time	59
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Kecepatan pada Variasi 175V: a) Full Order Model b) Reduced Order Model c) Real-time	59
Gambar 4.12 Hasil Simulasi Kecepatan pada Variasi 200V: a) Full Order Model b) Reduced Order Model c) Real-time	60
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kecepatan pada Variasi 225V: a) Full Order Model b) Reduced Order Model c) Real-time	60
Gambar 4.14 Hasil Simulasssi Kecepatan pada Variasi 250V: a) Full Order Model b) Reduced Order Model c) Real-time	61
Gambar 4.15 Grafik Medan Kecepatan 5 Variasi 150V, 175V, 200V, 225V, 250V.....	62
Gambar 4. 16 Grafik Waktu Proses Simulasi pada CFD FOM, ROM dan Real-time.....	65

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan teknologi penyediaan air yang hemat energi dan berkelanjutan menjadi prioritas utama, khususnya di wilayah yang memiliki keterbatasan akses terhadap jaringan listrik. Salah satu solusi teknologi tepat guna yang andal dalam mengatasi masalah ini adalah Pompa Hidram (*Hydraulic Ram Pump*). Menurut Anwar et al. (2023), pompa hidram bekerja tanpa memerlukan energi mekanik eksternal seperti motor listrik atau bahan bakar minyak, melainkan memanfaatkan konversi energi potensial air menjadi energi kinetik untuk menciptakan fenomena *water hammer* (palu air). Selain mekanisme mekanis pada badan pompa, performa sistem dalam proses distribusi air sangat bergantung pada karakteristik aliran fluida yang melewati jalur instalasi penunjangnya, salah satunya adalah saluran berbentuk Pipa L.

Aliran air di dalam Pipa L memiliki karakteristik yang kompleks karena adanya belokan (*elbow*). Palau et al. (2019) dalam studi numeriknya menjelaskan bahwa gangguan aliran (*flow perturbations*) yang disebabkan oleh fitting pipa seperti belokan dapat mendistorsi profil kecepatan dan mempengaruhi akurasi pengukuran debit jika hanya mengandalkan sensor fisik biasa dan sulit diamati secara visual. Oleh karena itu, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) diperlukan untuk memvisualisasikan perilaku aliran tersebut secara detail dan akurat (Azizah & Arsana, 2023). Penerapan CFD menggunakan perangkat lunak open-source OpenFOAM juga telah terbukti valid untuk simulasi aliran air dalam pipa tertutup (penstock), seperti yang ditunjukkan oleh penelitian Satria Putra (2022).

Meskipun CFD menawarkan akurasi tinggi, metode konvensional berbasis *Full Order Model* (FOM) memiliki kelemahan utama yaitu biaya komputasi yang mahal dan waktu simulasi yang lama.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hal ini menjadi hambatan untuk kebutuhan pemantauan kondisi (*condition monitoring*) yang membutuhkan respons cepat atau *real-time*. Wang et al. (2025) mengemukakan bahwa untuk mencapai simulasi *real-time*, diperlukan metode yang mampu mereduksi kompleksitas model tanpa mengorbankan akurasi secara signifikan. Konsep simulasi interaktif *real-time* ini didukung oleh Singhvi & Tarkhan (2017), yang menunjukkan bahwa integrasi data fisik ke dalam lingkungan simulasi memungkinkan evaluasi desain yang lebih responsif dan intuitif.

Sebagai solusi atas lambatnya CFD konvensional, metode *Reduced Order Model* (ROM) mulai diterapkan. Ghodi (2022) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penerapan algoritma ROM menggunakan *library* ITHACA-FV (*In real Time Highly Advanced Computational Application for Finite Volumes*) di OpenFOAM mampu mempercepat waktu komputasi secara signifikan (dari 78 detik menjadi 20 detik) dengan tingkat kesalahan yang sangat rendah dibandingkan model penuh. Teknologi ini memungkinkan simulasi CFD dijalankan secara *real-time* atau online bersamaan dengan operasional alat fisik, sebagaimana konsep infrastruktur streaming data yang dikembangkan oleh Maric et al. (2025).

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah penelitian terdahulu. Simanjuntak (2025) sebelumnya telah melakukan analisis CFD pada pompa hidram, namun terbatas hanya dengan menggunakan metode konvensional yang tidak *real-time*. Namun, penyelesaian persamaan tersebut melalui metode konvensional seringkali memakan waktu lama, sehingga diperlukan modernisasi melalui teknik reduksi orde model untuk menghasilkan visualisasi aliran yang lebih efisien dan cepat (Widiawaty et al., 2024). Sementara itu, alat fisik simulator pompa hidram skala laboratorium dengan spesifikasi Pipa L yang presisi telah berhasil dirancang bangun oleh Siahaan et al. (2025).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan berfokus pada pengembangan simulasi *real-time* aliran air pada Pipa L pompa hidram skala laboratorium, dengan memanfaatkan *library* ITHACA-FV pada platform OpenFOAM. Penggunaan ITHACA-FV diharapkan mampu mengatasi masalah latensi komputasi sehingga karakteristik aliran (debit dan kecepatan) dapat divisualisasikan secara sinkron dengan kondisi aktual, yang kemudian akan divalidasi menggunakan sensor flow meter dan pengukuran manual.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah penelitian ini adalah melakukan modernisasi metode simulasi CFD melalui penerapan ROM untuk mengatasi hambatan beban komputasi yang berat dan durasi simulasi yang lama pada metode konvensional FOM. Melalui simulasi CFD *real-time* menggunakan *library* ITHACA-FV, penelitian ini akan menganalisis karakteristik distribusi kecepatan dan debit aliran pada Pipa L guna menyediakan sistem pemantauan yang responsif. Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa reduksi matriks pada model numerik dapat menghasilkan visualisasi aliran yang sinkron dengan operasional alat fisik. Adapun untuk penelitian ini memiliki batasan yang telah ditentukan sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas karakteristik aliran air yang terjadi pada Pipa L pompa hidram skala laboratorium di Laboratorium Energi Politeknik Negeri Jakarta.
2. Analisis dan simulasi difokuskan pada prosedur modernisasi simulasi dari metode FOM ke ROM menggunakan platform OpenFOAM dan *library* ITHACA-FV.
3. Simulasi menggunakan kondisi aliran *steady-state* sebagai basis pengambilan data (*snapshots*) dengan variasi *velocity* yang ditentukan untuk menghasilkan output *real-time*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4. Penelitian tidak membahas mekanisme katup limbah, katup hantar, maupun efisiensi pompa hidram secara keseluruhan, melainkan hanya fokus pada performa simulasi aliran di dalam Pipa L.

1.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka pertanyaan dalam penelitian ini diantaranya yaitu:

1. Bagaimana penerapan simulasi CFD *real-time* pada aliran air di pipa L menggunakan ITHACA-FV?
2. Bagaimana tingkat akurasi hasil simulasi jika dibandingkan dengan data aktual dari sensor *flow meter* dan pengukuran manual?
3. Seberapa efisien simulasi CFD *real-time* berbasis ITHACA-FV ditinjau dari efisiensi waktu komputasi dengan FOM?

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan tujuan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Mengembangkan model simulasi CFD *real-time* pada aliran air di pipa L pompa hidram skala laboratorium dengan ITHACA-FV.
2. Menganalisis kinerja akurasi simulasi dengan membandingkan nilai *flow rate* keluaran simulasi terhadap data actual dari sensor dan validasi volumetrik.
3. Menganalisis efisiensi komputasi simulasi CFD *real-time* berbasis ITHACA-FV dengan FOM melalui perbandingan waktu simulasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1.5.1 Manfaat Teoretis

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode simulasi CFD berbasis ROM menggunakan *library* ITHACA-FV pada platform OpenFOAM.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Menjadi referensi akademik terkait penerapan simulasi CFD *real-time* untuk menganalisis karakteristik aliran fluida pada sistem perpipaan, khususnya pada Pipa L.
3. Menambah kajian ilmiah mengenai modernisasi simulasi numerik dari metode FOM menuju ROM yang lebih efisien secara komputasi.

1.5.2 Manfaat Praktis

1. Memberikan alternatif sistem monitoring aliran air berbasis simulasi virtual secara *real-time* yang lebih responsif dibandingkan metode CFD konvensional.
2. Membantu proses pemantauan karakteristik aliran pada Pipa L pompa hidram melalui visualisasi distribusi kecepatan dan debit aliran secara sinkron dengan kondisi aktual alat fisik.
3. Menjadi acuan pengembangan teknologi monitoring berbasis simulasi CFD *real-time* pada sistem hidrolik dan perpipaan lainnya yang membutuhkan kecepatan komputasi tinggi.
4. Membuktikan bahwa penggunaan model ROM mampu menghemat waktu dan beban kerja perangkat keras komputer tanpa mengorbankan kualitas hasil data yang dibutuhkan.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang terlihat pada uraian di bawah ini:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan bagian awal penelitian yang menguraikan latar belakang masalah, rumusan masalah sebagai batas penelitian, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian untuk mengembangkan, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan skripsi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi kajian literatur terkait topik yang mendukung penelitian, mencakup pembahasan teoritis serta topik-topik yang menjadi fokus utama dalam penulisan skripsi ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penelitian termasuk diagram alir proses penelitian, alat dan bahan yang digunakan, teknik pengumpulan data, prosedur simulasi, serta metode analisis data.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil penelitian yang diperoleh dari pengembangan model simulasi *real-time* menggunakan ITHACA-FV pada pipa L pompa hidram skala laboratorium. Pembahasan mencakup perbandingan kecepatan komputasi antara model penuh (Full Order Model) dengan model tereduksi (Reduced Order Model), serta analisis tingkat akurasi simulasi *real-time* yang divalidasi terhadap data aktual dari sensor flow meter dan pengukuran manual.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta memberikan saran dari hasil penelitian dan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan model simulasi CFD *real-time* menggunakan *library* ITHACA-FV berhasil dilakukan, ditandai dengan adanya model tereduksi (ROM) memproses masukan data kecepatan *inlet* dari sensor secara *online* untuk memvisualisasikan profil aliran secara sinkron dan seketika.
2. Kinerja akurasi model FOM dan ROM tergolong sangat baik dengan rata-rata galat (MAPE) masing-masing sebesar 2,38% dan 4,84%. Untuk simulasi *real-time*, rata-rata galat tercatat sebesar 23,15%, di mana deviasi tertinggi (34,73%) terjadi pada kondisi tegangan rendah akibat basis reduksi *snapshot* FOM yang belum sepenuhnya memadai untuk merepresentasikan dinamika aliran turbulen lemah.
3. Metode reduksi order model terbukti sangat efisien memangkas waktu komputasi. Dibandingkan penyelesaian FOM konvensional (29,6 detik/data), pemrosesan matriks ROM (0,718 detik/data) beroperasi 41,23 kali lebih cepat, dan simulasi *real-time* (0,333 detik/data) mampu merespons 88,80 kali lebih cepat.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan kualitas dan pengembangan penelitian di masa mendatang, peneliti memberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penambahan variasi dan jumlah data pelatihan pada saat proses simulasi *offline* (FOM), terutama pada rentang parameter kondisi aliran turbulen lemah atau debit rendah. Peningkatan jumlah *snapshot* ini diharapkan mampu memperkuat basis reduksi POD-Galerkin agar lebih akurat dan dapat menekan tingginya *error* pada saat eksekusi simulasi *real-time*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Perlu dilakukan investigasi lebih lanjut mengenai penentuan jumlah *modes* yang paling optimal. Penambahan jumlah mode dapat meningkatkan akurasi dalam menangkap struktur pusaran kecil di belokan pipa, namun perlu tetap mempertimbangkan batas beban komputasi agar performa *real-time* tetap terjaga.
3. Untuk meminimalkan *delay* antara pembacaan sensor fisik dan visualisasi monitor, penggunaan perangkat keras dengan spesifikasi prosesor yang lebih tinggi atau integrasi sistem *cloud computing* sangat disarankan guna mendukung sistem monitoring virtual yang lebih presisi.





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Akmal, S. (2019). Analisa Profil Aliran Fluida Cair dan Pressure Drop pada Pipa L Menggunakan Metode Simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 1(Mei), 97–108.
- Al-Abed Allah, M., Siddiqui, O. K., Boom, P. D., Meri, Y., Toor, I. ulhaq, & Shams, A. (2026). Numerical analysis of turbulent flow-accelerated corrosion in a 90° elbow. *Results in Engineering*, 29. doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108940
- Anwar, I., Wardianto, D., & Afdal, A. (2023). Pompa Hidram (Pompa Air Tanpa Penggerak Energi Mekanik). *Jurnal Teknologi Dan Vokasi*, 1(1), 81–85. doi.org/10.21063/jtv.2023.1.1.81-85
- Apalowo, R. K., & Akisin, C. J. (2024). CFD-based investigation of turbulent flow behavior in 90-deg pipe bends. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 5(2), 53–62. doi.org/10.4995/jarte.2024.20665
- Azizah, M., & Arsana, I. M. (2023). *Pengembangan Modul Computational Fluid Dynamic di Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya*. 12(02), 37–42.
- Cabello, R., Elena, A., Popescu, P., Bonet-ruiz, J., Curcó, D., & Llorens, J. (2021). *Validation of CFD Models for Double-Pipe Heat Exchangers with Empirical Correlations*. 88(June), 1243–1248. doi.org/10.3303/CET2188207
- Caldas, A. M. A., Caldas, A. G. A., Dos Santos, C. A. C., Ochoa, A. A. V., Cézar, K. L., & Michima, P. S. A. (2020). Design, development and construction of Hall effect-based turbine meter type to measure flow in low-cost lithium bromide salt: Proposed flowmeter and first results. *International Journal of Refrigeration*, 112, 240–250. doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.01.002
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). Fluid Mechanics Fundamental and Applications. *The McGraw-Hill Companies, Inc.* (Third Edit). McGraw-Hill.
- Colin, D. L. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods: A Practical*



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting. Butterworth-Heinemann.

Ferdaus, F., & Raghukiran, N. (2021). Evaluation of The Rans Turbulence Model Predictive Capability of Flat Plate Film Cooling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 850(1). doi.org/10.1088/1755-1315/850/1/012020

Figliola, R. S., & Beasley, D. E. (2015). *Theory and design for mechanical measurementso Title* (L. Ratts (ed.); sixth edit). John Wiley & Sons, Inc.

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Mitchell, J. W. (2020). *Introduction to fluid mechanics* (tenth edit). Hoboken : Wiley, 2020.

Ghodi, R. (2022). *Studi Reduced Order Model pada Aliran Stedi Tak Mampu Mampat Navier-Stokes dengan Library ITHACA-FV*. Universitas Indonesia.

Gulo, S. R., & Wungu, T. D. K. (2026). Analisis Distribusi Tekanan dan Kecepatan dalam Pipa Elbow Menggunakan Computational Fluid Dynamics. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 14(01), 40–49.

Husin, Z., & Saputra, M. (2020). Rancang Bangun Kombinasi Pompa Vakum Dengan Pompa Hidrolik Ram. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 4(2). doi.org/10.35308/jmkn.v4i2.1606

Izzati, A., Lasminto, U., & Damar Negara, S. (2021). Permodelan Numerik Aliran pada Pelimpah Bertangga Menggunakan Program Open FOAM. In *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* (Vol. 19, Issue 2).

Jumrianto, J. (2021). Kalibrasi Sensor Tegangan dan Sensor Arus dengan Menerapkan Rumus Regresi Linear menggunakan Software Bascom AVR. *Journal of System Information Technology and Electronics Engineering (J-SITEE)*, 1(1), 1. doi.org/10.31331/jsitee.v1i1.1718

Maharmi, B., Widyastomo, B., & Palaha, F. (2022). Water Flow Measurement-Based Data Acquisition Using Arduino Microcontroller and PLX-DAQ Software. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika*, 8(1), 107.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

doi.org/10.26555/jiteki.v8i1.23637

Maric, T., Fadeli, M. E., Rigazzi, A., Shao, A., & Weiner, A. (2025). Combining Machine Learning with *Computational Fluid Dynamics* Using OpenFOAM and SmartSim. *Meccanica*, 60(6), 1831–1850. doi.org/10.1007/s11012-024-01797-z

Oktay, T., & Eraslan, Y. (2021). *Mesh Independence Study on Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of a Quad-Rotor UAV Propeller*. 502–509.

OpenCFD Ltd. (2023). *simpleFoam*.
https://doc.openfoam.com/2306/tools/processing/solvers/rtm/incompressible/simpleFoam/

Palau, C. V., Balbastre, I., Manzano, J., Azevedo, B. M., & Bomfim, G. V. (2019). Numerical analysis of woltman meter accuracy under flow perturbations. *Water (Switzerland)*, 11(12). doi.org/10.3390/w11122622

Sari, Putra, Y. S., & Hasanuddin. (2022). Studi Aliran Air dalam Pipa Penstock pada Sistem Mikrohidro dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamics. *PRISMA FISIKA*, 10(2), 304–314.

Siahaan, M. R., Widiawaty, C. D., Hanhan, M., Gunadi, G. R., Gunawan, W., Hadi, N., Ramadhani, L. S., & Kailani, A. J. (2025). *Perancangan Simulator Pompa Hidram Skala Laboratorium dengan Metode VDI 2221*.

Silvestri, L. (2021). ScienceDirect ScienceDirect CFD modeling in Industry 4 . 0 : New perspectives for smart factories CFD modeling in Industry 4 . 0 : New perspectives for smart factories. *Procedia Computer Science*, 180, 381–387. doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.359

Singhvi, A., & Tarkhan-, N. (2017, August 7). *Integrated Occupant Motion Sensing with Real-Time CFD Simulation as a Design Assessment Tool*. doi.org/10.26868/25222708.2017.648

Stabile, G., Hijazi, S., Mola, A., Lorenzi, S., & Rozza, G. (2017). POD-Galerkin



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

reduced order methods for CFD using Finite Volume Discretisation: Vortex shedding around a circular cylinder. *Communications in Applied and Industrial Mathematics*, 8(1), 210–236. doi.org/10.1515/caim-2017-0011

Stabile, G., & Rozza, G. (2018). Finite volume POD-Galerkin stabilised reduced order methods for the parametrised incompressible Navier–Stokes equations. *Computers and Fluids*, 173, 273–284. doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.01.035

Sugiyono, D. (2022). *Metode penelitian kualitatif*. Alfabeta.

Tomaszewska-Wach, B., & Ligus, G. (2025). Assessment of the Impact of k- ϵ and k- ω Turbulence Models on the Compatibility of CFD Simulations with PIV Measurements for Flow Through a Measuring Orifice. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(22), 1–23. doi.org/10.3390/app152212204

Wang, W., Chao, Q., Shi, J., & Liu, C. (2025). Condition monitoring of axial piston pumps based on machine learning-driven real-time CFD simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 19(1). doi.org/10.1080/19942060.2025.2474676

White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (J. P. Holman & J. Lloyd (eds.); Fourth Edi). Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/doi.org/10.1007/978-3-540-74298-2_8

Widiawaty, C. D., Siswantara, A. I., Budiyo, M. A., Andira, M. A., Adanta, D., Syafe'i, M. H. G., Farhan, T. A., & Rizianiza, I. (2024). Analysis of Mesh Resolution Effect to Numerical Result of CFD-ROM: Turbulent Flow in Stationary Parallel Plate. *CFD Letters*, 16(8), 1–17. doi.org/10.37934/cfdl.16.8.117

Wilcox, D. C. (2006). Turbulence Modelling for CFD 3rd Edition. In *Turbulence Modeling for CFD* (Third edit). DCW Industries, Inc. <http://www.dcwindustries.com>

Yunus, M. R., Akbar, A., & Rachmat, F. (2025). *CFD Simulation Reveals Pressure Drop in Pipe Flow System*. 26. doi.org/10.21070/ijins.v26i4.2111



LAMPIRAN

Lampiran 1. *Properties of saturated water*

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Saturation Pressure $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$		Enthalpy of Vaporization $h_{\text{fg}}, \text{kJ/kg}$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$		Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$		Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient $\beta, 1/\text{K}$	Surface Tension, N/m
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Liquid
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}	0.0756
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}	0.0749
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}	0.0742
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}	0.0735
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}	0.0727
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}	0.0720
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}	0.0712
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}	0.0704
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}	0.0696
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}	0.0688
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}	0.0679
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}	0.0671
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}	0.0662
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}	0.0654
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}	0.0645
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}	0.0636
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}	0.0627
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}	0.0617
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}	0.0608
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}	0.0599

Lampiran 2. Data Kecepatan Hasil Sensor *Flow Meter*

<i>Flow Rate 150V</i>							
Tegangan (V)	Percobaan (x)	Stopwatch (mm:ss)	Waktu (s)	Volume (m^3)	D pipe (cm)	Q (m^3/s)	v (m/s)
150	1	00:42.34	42.34	0.01	2.54	0.000236	0.466
150	2	00:40.60	40.6	0.01	2.54	0.000246	0.486
150	3	00:41.90	41.9	0.01	2.54	0.000239	0.471
150	4	00:42.40	42.4	0.01	2.54	0.000236	0.466
150	5	00:41.62	41.62	0.01	2.54	0.000240	0.474

<i>Flow Rate 175V</i>							
Tegangan (V)	Percobaan (x)	Stopwatch (mm:ss)	Waktu (s)	Volume (m^3)	D pipe (cm)	Q (m^3/s)	v (m/s)
175	1	00:28.86	28.86	0.01	2.54	0.000347	0.684
175	2	00:28.74	28.74	0.01	2.54	0.000348	0.687
175	3	00:28.74	28.74	0.01	2.54	0.000348	0.687

- Hak Cipta :**
- Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 - Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

175	4	00:28.78	28.78	0.01	2.54	0.000347	0.686
175	5	00:28.73	28.73	0.01	2.54	0.000348	0.687

<i>Flow Rate 200V</i>							
Tegangan (V)	Percobaan (x)	Stopwatch (mm:ss)	Waktu (s)	Volume (m3)	D pipe (cm)	$Q (m^3/s)$	$v (m/s)$
200	1	0:23.93	23.93	0.01	2.54	0.000418	0.825
200	2	0:23.80	23.8	0.01	2.54	0.000420	0.830
200	3	0:24.85	24.85	0.01	2.54	0.000402	0.795
200	4	0:24.05	24.05	0.01	2.54	0.000416	0.821
200	5	0:23.06	23.06	0.01	2.54	0.000434	0.856

<i>Flow Rate 225V</i>							
Tegangan (V)	Percobaan (x)	Stopwatch (mm:ss)	Waktu (s)	Volume (m3)	D pipe (cm)	$Q (m^3/s)$	$v (m/s)$
225	1	0:21.49	21.49	0.01	2.54	0.000465	0.919
225	2	0:21.42	21.42	0.01	2.54	0.000467	0.922
225	3	0:21.65	21.65	0.01	2.54	0.000462	0.912
225	4	0:21.39	21.39	0.01	2.54	0.000468	0.923
225	5	0:21.76	21.76	0.01	2.54	0.000460	0.907

<i>Flow Rate 250V</i>							
Tegangan (V)	Percobaan (x)	Stopwatch (mm:ss)	Waktu (s)	Volume (m3)	D pipe (cm)	$Q (m^3/s)$	$v (m/s)$
250	1	0:20.35	20.35	0.01	2.54	0.000491	0.970
250	2	0:20.82	20.82	0.01	2.54	0.000480	0.948
250	3	0:20.37	20.37	0.01	2.54	0.000491	0.969
250	4	0:20.75	20.75	0.01	2.54	0.000482	0.952
250	5	0:20.59	20.59	0.01	2.54	0.000486	0.959

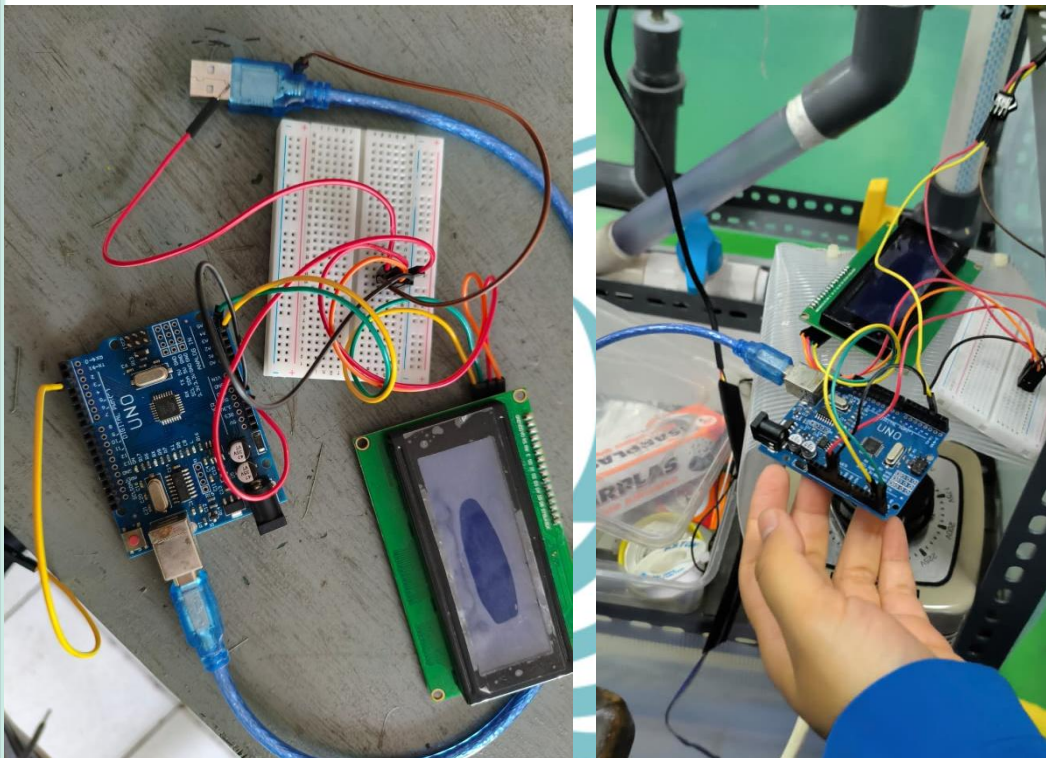


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

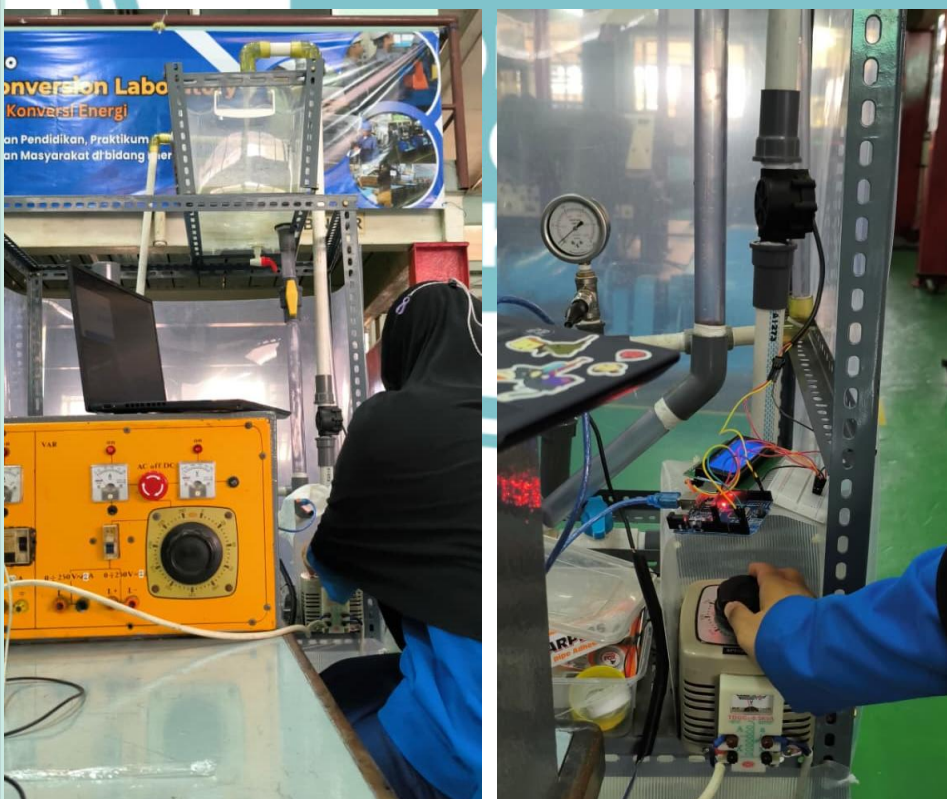
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3. *Lay Out* Arduino



Lampiran 4. Proses Pengambilan Data Simulasi *real-time*





© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 7. Folder Setelah *Running*

Matrices	27/07/2026 13:04	File folder
Offline	27/07/2026 13:04	File folder
POD	27/07/2026 13:04	File folder
Reconstruction	27/07/2026 13:21	File folder
red_coeff	27/07/2026 13:17	File folder
supremizer	27/07/2026 13:04	File folder
weightsSUP	27/07/2026 13:04	File folder

Lampiran 8. Folder Reconstruction Hasil dari *Real-Time*

1	27/07/2026 13:05	File folder
2	27/07/2026 13:05	File folder
3	27/07/2026 13:05	File folder
4	27/07/2026 13:05	File folder
5	27/07/2026 13:05	File folder
6	27/07/2026 13:05	File folder
7	27/07/2026 13:05	File folder
8	27/07/2026 13:05	File folder
9	27/07/2026 13:05	File folder
10	27/07/2026 13:05	File folder
11	27/07/2026 13:05	File folder
12	27/07/2026 13:05	File folder
13	27/07/2026 13:05	File folder
14	27/07/2026 13:05	File folder
15	27/07/2026 13:05	File folder
16	27/07/2026 13:05	File folder
17	27/07/2026 13:05	File folder
18	27/07/2026 13:05	File folder
19	27/07/2026 13:05	File folder
20	27/07/2026 13:05	File folder
21	27/07/2026 13:05	File folder
950	27/07/2026 13:17	File folder
951	27/07/2026 13:17	File folder
952	27/07/2026 13:17	File folder
953	27/07/2026 13:17	File folder
954	27/07/2026 13:17	File folder
955	27/07/2026 13:17	File folder
956	27/07/2026 13:17	File folder
957	27/07/2026 13:17	File folder
958	27/07/2026 13:17	File folder
959	27/07/2026 13:17	File folder
960	27/07/2026 13:17	File folder
constant	27/07/2026 13:21	File folder
system	27/07/2026 13:21	File folder
0	27/07/2026 13:04	File
real.foam	27/07/2026 13:21	FOAM File