

**ANALISIS KOMPARATIF  
ALGORITMA *MULTI-SENSORFUSION*  
UNTUK PENGUKURAN AKURASI SUDUT AKTUATOR  
PADA PROTOTIPE ROBOT DELTA 3 DOF**

**Tugas Akhir**

Disusun sebagai salah satu syarat untuk  
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan Diploma IV

Oleh

M Azhar Jundur Rahman

221441012



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA OTOMASI  
JURUSAN TEKNIK OTOMASI MANUFAKTUR DAN MEKATRONIKA  
POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**

**2025**

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas Akhir yang berjudul:

**Analisis Komparatif Algoritma Multi-sensor Fusion Untuk  
Pengukuran Akurasi Sudut Aktuator Pada Prototipe Robot Delta  
3DOF**

Oleh:

M Azhar Jundur Rahman

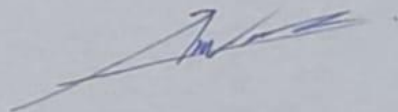
221441012

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program  
pendidikan Sarjana Terapan (Diploma IV)  
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 30 Juli 2025

Disetujui,

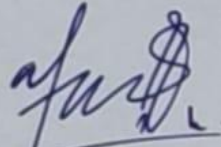
Pembimbing I,



Nur Jamiludin Ramadhan, S.Tr., M.T.

NIP 199402272020121000

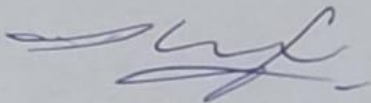
Pembimbing II,



Ahshonah Khoerunnisa S.Tr., M.T.

NIP 199311282024062001

Penguji I,



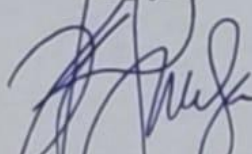
Suharyadi Pancono,

Dipl.Ing.HTL., M.T.

NIP 196701171990031004

Disahkan,

Penguji II,




Hilda Khoirunnisa,

S.Tr., M.Eng.

NIP 199704192022032012

Penguji III,



Sarosa Castrena Abadi

S.Pd., M.T.

NIP 198702252020121001

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M Azhar Jundur Rahman  
NIM : 221441012  
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : Analisis Komparatif Algoritma *Multi-sensorFusion* Untuk Pengukuran Akurasi Sudut Aktuator Pada Prototipe Robot Delta 3DOF

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para Pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 13 – 07 – 2025  
Yang Menyatakan,



M Azhar Jundur Rahman  
NIM 221441012

## PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

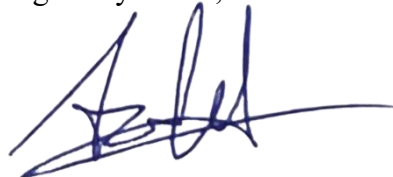
Nama : M Azhar Jundur Rahman  
NIM : 221441012  
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : Analisis Komparatif Algoritma *Multi-sensorFusion* Untuk Pengukuran Akurasi Sudut Aktuator Pada Prototipe Robot Delta 3DOF

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaanya berada dibawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 13 – 07 – 2025  
Yang Menyatakan,



M Azhar Jundur Rahman  
NIM 221441012

## **MOTO PRIBADI**

Menuntut ilmu adalah amanah dari Allah yang kutapaki dalam tuntunan-Nya, dan mengabdikan kepada negeri adalah bentuk ikhtiarku untuk menunaikannya.

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepada-Nya kami memuji, memohon pertolongan, dan mohon keampunan. Kami berlindung kepada-Nya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barang siapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan, dan barang siapa yang tersesat dari jalan-Nya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Dan aku bersaksi bahwa tiada sembah yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagi-Nya. Dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hamba-Nya dan Rasul-Nya.

Atas penunjukan dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul: “Integrasi *Multi-sensor* Sebagai Umpan Balik Untuk Meningkatkan Akurasi Sudut Aktuator Pada Robot Delta”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan (Diploma-IV) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi di Politeknik Manufaktur Bandung.

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan banyak pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat yang mendalam, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, baik secara moral maupun materi, secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Secara khusus, ucapan terima kasih ini ditujukan kepada yang saya hormati:

1. Direktur Politeknik Manufaktur Bandung, Bapak Darma Firmansyah Undayat, S.ST., M.T.
2. Ketua Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Bapak Ridwan, S.ST., M.Eng.
3. Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Ibu Nuryanti, S.T., M.Sc.
4. Para Pembimbing tugas akhir Bapak Nur Jamiludin Ramadhan, S.Tr., M.T. dan Ibu Ahshonat Khoerunnisa S.Tr., M.T.

5. Para Penguji sidang tugas akhir Bapak Suharyadi Pancono, Dipl. Ing. HTL. M.T., Ibu Hilda Khoirunnisa S.Tr.T.,M.Sc.Eng., dan Bapak Sarosa Castrena A, S.Pd., M.T.
6. Panitia tugas akhir Ibu Fitria Suryatini, S.Pd., M.T., Ibu Hilda Khoirunnisa. S.Tr.T., M.Sc.Eng., Bapak Muhammad Nursyam Rizal, S.Tr.T., M.Sc., dan Bapak Rizqi Aji Pratama, S.Pd., M.Pd.
7. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Ibu Idah Hamidah dan Bapak Dindin Rosyidin yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan pengorbanannya baik dari segi moril, materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Untuk adik-adik penulis, Hanifah Raudina Azzahra, Hanif Muhammad Riziq, Shofwan Hamid Al Rasyid, dan Musyari Rasyid Al Hamid yang telah mendukung serta mendoakan penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Teman seangkatan *Automation Engineering 2021* dan rekan Lab Robotika yang telah banyak memberi bantuan, dan semangat kepada penulis.
10. Pihak-pihak yang senantiasa membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Ya Robbal Alamin.

Bandung, Juli 2025

Penulis

## ABSTRAK

Robot Delta memerlukan akurasi sudut aktuator yang tinggi, namun sistem kendali *open-loop* yang umum digunakan belum menyediakan mekanisme umpan balik untuk verifikasi posisi secara *real-time*. Penelitian ini mengusulkan integrasi sistem umpan balik *closed-loop* berbiaya rendah dengan pendekatan fusi *multi-sensor* (IMU MPU6050 dan *rotary encoder* AS5600) untuk meningkatkan akurasi. Sembilan konfigurasi sistem diuji, menggabungkan tiga algoritma fusi dengan tiga arsitektur berbeda. Hasil pengujian kuantitatif menunjukkan bahwa Konfigurasi C5 (*Complementary Filter*, arsitektur *3-Way Independent*) mencapai akurasi statis terbaik dengan *error* absolut  $0,67^\circ$  dan deviasi standar  $0,089^\circ$ . Untuk kinerja dinamis, Konfigurasi C3 (*Weighted Average*) memberikan respons tercepat dengan *settling time* 1,1 detik dan *overshoot* minimal 1,67%, sementara Konfigurasi C4 (*Complementary Filter*) menawarkan gerakan paling stabil dengan tanpa *overshoot* (0%). Disimpulkan bahwa terdapat *trade-off* kinerja, di mana Konfigurasi C5 direkomendasikan untuk aplikasi presisi tinggi, sedangkan Konfigurasi C3 dan C4 lebih superior untuk aplikasi yang menuntut gerakan dinamis yang cepat dan stabil.

**Kata kunci:** Robot Delta 3-DOF, Fusi Multi-sensor, Umpan Balik, Akurasi Sudut, Filter Kalman, Filter Komplementer, AS5600, MPU6050.

## ABSTRACT

*Delta robots require high actuator angle accuracy, yet commonly used open-loop control systems do not provide a feedback mechanism for real-time position verification. This research proposes the integration of a low-cost, closed-loop feedback system with a multi-sensorfusion approach (IMU MPU6050 and AS5600 rotary encoder) to improve accuracy. Nine system configurations were tested, combining three fusion algorithms with three different architectures. Quantitative test results show that Configuration C5 (Complementary Filter, 3-Way Independent architecture) achieved the best static accuracy with an absolute error of  $0.67^\circ$  and a standard deviation of  $0.089^\circ$ . For dynamic performance, Configuration C3 (Weighted Average) provided the fastest response with a settling time of 1.1 seconds and a minimal overshoot of 1.67%, while Configuration C4 (Complementary Filter) offered the most stable motion with no overshoot (0%). It is concluded that a performance trade-off exists, where Configuration C5 is recommended for high-precision applications, whereas Configurations C3 and C4 are superior for applications demanding fast and stable dynamic motion.*

*Keywords: 3-DOF Delta Robot, Multi-sensorFusion, Feedback, Angle Accuracy, Kalman Filter, Complementary Filter, AS5600, MPU6050.*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI) .....	iii
MOTO PRIBADI .....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN .....	xvi
<b>I BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>I-1</b>
I.1 Latar Belakang .....	I-1
I.2 Rumusan Masalah .....	I-2
I.3 Batasan Masalah.....	I-3
I.4 Tujuan dan Manfaat .....	I-3
I.5 Sistematika Penulisan .....	I-4
<b>II BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>II-1</b>
II.1 Tinjauan Teori.....	II-1
II.1.1 Robot Paralel Delta .....	II-1
II.1.2 <i>Multi-sensorFusion</i> .....	II-2
II.1.3 <i>Kalman Filter</i> .....	II-2
II.1.4 <i>Complementary Filter</i> .....	II-7

II.2	Tinjauan Alat.....	II-9
II.2.1	MPU 6050 .....	II-9
II.2.2	Magnetic Encoder AS5600 .....	II-10
II.2.3	Arduino Nano.....	II-13
II.2.4	ENC28J60 .....	II-14
II.2.5	Visual Studio Code .....	II-14
II.3	Studi Penelitian Terdahulu.....	II-15
<b>III</b>	<b>BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH.....</b>	<b>III-1</b>
III.1	Elisitasi Persyaratan ( <i>Requirements List</i> ) .....	III-1
III.2	Perancangan Sistem ( <i>System Design</i> ) .....	III-1
III.2.1	<i>Overall Function (Blackbox)</i> .....	III-2
III.2.2	<i>Subfncions (Glassbox)</i> .....	III-3
III.3	Domain Spesifik Desain.....	III-3
III.3.1	Perancangan Mekanik .....	III-3
III.3.2	Perancangan Elektrik .....	III-7
III.3.3	Skema Pengujian Sistem.....	III-11
III.4	Algoritma Alur.....	III-11
III.5	Integrasi dan Implementasi Sistem .....	III-12
III.5.1	Gambaran Umum Sistem.....	III-12
III.5.2	Implementasi Perangkat Keras.....	III-14
III.5.3	Implementasi Perangkat Lunak.....	III-18
III.4.4	Integrasi Sistem.....	III-19
III.6	Verifikasi dan Validasi.....	III-19
<b>IV</b>	<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>IV-24</b>
IV.1	Data Hasil Pengujian Akurasi .....	IV-24
IV.2	Analisis Hasil Kinerja .....	IV-24

IV.2.1	Analisis Akurasi dan Konsistensi Statis.....	IV-24
IV.2.2	Analisis Perbandingan <i>Error Agregat</i> .....	IV-27
IV.2.3	Analisis Kinerja Dinamis .....	IV-28
IV.3	Pembahasan.....	IV-31
IV.4	Pengujian Kinerja Jaringan Komunikasi.....	IV-32
<b>V</b>	<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>V-35</b>
V.1	Kesimpulan .....	V-35
V.2	Saran.....	V-36
<b>VI</b>	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>xvii</b>
<b>VII</b>	<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>xx</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Studi Penelitian Terdahulu .....	II-15
Tabel III. 1 Daftar I/O Arduino.....	III-8
Tabel IV. 1 Rangkuman Hasil Statistik Pengujian Akurasi dan Konsistensi .	IV-24
Tabel IV. 2 Perbandingan <i>Error</i> Agregat antara Sistem Fusi Sensor dan Inclinometer .....	IV-27

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Konstruksi dasar robot delta[3] .....	II-2
Gambar II. 2 Diagram Alur <i>Kalman Filter</i> [8] .....	II-3
Gambar II. 3 Diagram Blok <i>Complementary Filter</i> [12] .....	II-8
Gambar II. 4 Modul MPU 6050 yang diproduksi Invensense .....	II-10
Gambar II. 5 Orientasi Sumbu Sensitivitas dan Polaritas Rotasi.....	II-10
Gambar II. 6 Modul Sensor AS5600.....	II-11
Gambar II. 7 Pembacaan Raw Angle dari magnet diametric dalam arah jarum jam oleh Sensor.....	II-12
Gambar II. 8 Gaya magnet Diametric Bz dan Jarak magnet ke sensor.....	II-13
Gambar II. 9 Arduino Nano .....	II-13
Gambar II. 10 Modul ENC28J60 .....	II-14
Gambar II. 11 Logo Visual Studio Code .....	II-15
Gambar III. 1 Metodologi V-Model VDI 2206 [33].....	III-1
Gambar III. 2 <i>Overall Function</i> .....	III-2
Gambar III. 3 <i>Subfunctions</i> .....	III-3
Gambar III. 4 Struktur pemasangan <i>mounting</i> , sensor, dan magnet diametrik pada NEMA 23 .....	III-4
Gambar III. 5 Proses Pemasangan magnet dengan bantuan <i>jig</i> .....	III-5
Gambar III. 6 Design <i>Jig</i> untuk membantu pemasangan magnet diametrik pada poros motor NEMA 23 .....	III-6
Gambar III. 7 : Perancangan <i>Casing</i> untuk PCB Modul sensor .....	III-6
Gambar III. 8 Perancangan skematik komponen .....	III-8
Gambar III. 9 Gambar Skematik PCB .....	III-10
Gambar III. 10 Render 3D PCB dengan lubang dan tata letak komponen .....	III-10
Gambar III. 11 Layout PCB .....	III-11
Gambar III. 12 Diagram Alir Sistem.....	III-11
Gambar III. 13 Gambaran Umum Sistem .....	III-13
Gambar III. 14 <i>Jig</i> Pemandu Pemasangan Magnet.....	III-14
Gambar III. 15 Proses Pemasangan Magnet Menggunakan <i>Jig</i> Pemandu.....	III-15
Gambar III. 16 Hasil Akhir Pemasangan Dudukan Sensor AS5600 .....	III-15

Gambar III. 17 Perakitan Komponen Elektronik pada PCB Kustom di Dalam <i>Casing</i> .....	III-16
Gambar III. 18 Mekanisme Pemasangan <i>Snap-fit Casing</i> Modul Sensor.....	III-16
Gambar III. 19 Posisi Pemasangan Modul pada Lengan Robot .....	III-17
Gambar III. 20 Arsitektur penggabungan data sensor .....	III-21
Gambar III. 21 Pengujian pada masing masing lengan robot delta .....	III-22
Gambar IV. 1 Analisis Respon Waktu Konfigurasi C3 pada target 30°.....	IV-29
Gambar IV. 2 Analisis Respon Waktu Konfigurasi C4 pada Target 30° .....	IV-30

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> Daftar Tuntutan ( <i>Requirements List</i> ) .....	xx
<b>Lampiran 2</b> Tabel Hasil Pengujian Akurasi .....	xxii
<b>Lampiran 3</b> <i>Drawing AS5600 Mounting</i> .....	xxxii
<b>Lampiran 4</b> <i>Drawing Cover Sensor Module</i> .....	xxxii
<b>Lampiran 5</b> <i>Drawing Jig Magnet</i> .....	xxxii
<b>Lampiran 6</b> <i>Drawing Casing Module</i> .....	xxxii
<b>Lampiran 7</b> <i>Render Design PCB</i> .....	xxxiii
<b>Lampiran 8</b> Data Pengujian Akurasi Pembacaan Sudut.....	xxxiv
<b>Lampiran 9</b> Dokumentasi Pengerjaan Alat .....	xlvii
<b>Lampiran 10</b> Github Proyek Tugas Akhir .....	xlvii

## DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol/Singkatan	Kepanjangan/Arti
3-DOF	3 Degrees of Freedom
MPU6050	Microprocessor Unit 6050
KF	<i>Kalman Filter</i>
CF	<i>Complementary Filter</i>
WA	<i>Weighted Average</i>
$\theta_T$	Target Angle
$\theta_A$	Actual Angle
RMSE	Root Mean Square <i>Error</i>
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic <i>Controller</i>
IMU	Inertial Measurement Unit
ENC28J60	Ethernet <i>Controller</i> Chip
VS Code	Visual Studio Code

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Dalam proses pengembangan prototipe robotika untuk keperluan penelitian, validasi kinerja aktuator memegang peranan krusial. Tanpa data pengukuran yang presisi, upaya penyempurnaan algoritma kendali menjadi tidak optimal[1], [2], [3]. Robot Delta kerap dipilih dalam berbagai aplikasi *pick-and-place* karena keunggulannya dalam hal kecepatan, namun sebagian besar prototipe yang dikembangkan di lingkungan akademik masih belum memiliki sistem untuk validasi posisi angular dari motor penggerak yang terintegrasi dengan sistem robot. Akibatnya, kesenjangan antara posisi target dan posisi aktual lengan robot tidak dapat diverifikasi, yang membatasi analisis kinerja secara keseluruhan[3], [4], [5], [6].

Penelitian sebelumnya oleh Pamungkas dkk[7] telah merancang sebuah prototipe robot paralel Delta 4-DoF yang dikendalikan melalui antarmuka jaringan. Hasil pengujian pada prototipe tersebut menunjukkan waktu respons sistem sebesar 1,02 detik, dengan *error* posisi rata-rata pada *end-effector* sebesar 9,6 mm untuk sumbu X dan 5,2 mm untuk sumbu Y, yang menghasilkan *error* resultan 11,2 mm. Data kuantitatif ini mengonfirmasi adanya deviasi yang signifikan antara posisi target dengan posisi aktual, sekaligus menyoroti kebutuhan akan sistem pengukuran eksternal untuk validasi kinerja yang lebih presisi[7].

Sebagai solusi atas keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pengukuran eksternal berbasis fusi multi-sensor. Sensor *magnetic encoder* AS5600 mampu membaca posisi absolut poros motor dengan resolusi tinggi (12-bit), namun pembacaannya dapat dipengaruhi oleh isu mekanis sistem, seperti *backlash*[8]. Di sisi lain, *Inertial Measurement Unit* (IMU) MPU6050 dapat mengestimasi orientasi dengan *update rate* yang sangat cepat, namun memiliki kelemahan inheren berupa *drift* pada data giroskop untuk pengukuran jangka panjang[9]. Dengan menggabungkan data dari kedua sensor melalui teknik fusi, diharapkan kelemahan pada satu sensor dapat dikompensasi

oleh kelebihan sensor lainnya, sehingga menghasilkan data pengukuran sudut yang lebih akurat dan stabil[1], [10], [11]. Fokus utama penelitian ini adalah membandingkan tiga algoritma fusi yang populer yaitu *Kalman Filter*, *Complementary Filter*, dan *Weighted Average* dengan mengevaluasi *trade-off* antara kompleksitas komputasi dan ketepatan estimasi. *Kalman Filter* dikenal sebagai *estimator* optimal untuk sistem linier dengan *noise* Gaussian, namun memerlukan sumber daya komputasi yang lebih tinggi. Sementara itu, *Complementary Filter* dan *Weighted Average* menawarkan alternatif yang lebih ringan secara komputasi[1], [10], [12].

Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini adalah perancangan sistem pengukuran sudut *real-time* berbasis fusi sensor AS5600 dan MPU6050 untuk prototipe robot Delta. Analisis kuantitatif yang membandingkan kinerja sembilan konfigurasi berbeda yang terdiri dari tiga algoritma dan tiga arsitektur fusi; dan memberikan rekomendasi konfigurasi optimal sebagai dasar untuk pengembangan sistem kendali prototipe robot delta di masa depan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi fondasi untuk implementasi kontrol gerak yang lebih presisi dan pada prototipe robot Delta.

## **I.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana metode integrasi komponen mekanik, elektronik, dan perangkat lunak yang efektif untuk membangun sistem pengukuran sudut pada aktuator Robot Delta?
2. Bagaimana perbandingan performa akurasi dan respon sistem saat menggunakan algoritma fusi *Kalman Filter*, *Complementary Filter*, dan *Weighted Average*?
3. Di antara arsitektur fusi yang diuji (*Sequential*, *3-Way Independent*, dan *Hierarchical*), manakah yang menunjukkan kinerja paling optimal dalam skenario pengujian yang dilakukan?

### I.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini berfokus pada perancangan, implementasi, dan analisis kinerja sistem pengukuran sudut. Penelitian tidak sampai pada tahap implementasi sistem kendali *closed-loop* atau modifikasi untuk optimalisasi akurasi robot.
2. Pengujian tidak dilakukan pada robot delta dalam aplikasi industri berskala besar, namun fokus pada pengujian dalam skala prototipe laboratorium yang dikembangkan oleh Pamungkas dkk.
3. *Microcontroller* dan sensor yang digunakan dibatasi pada perangkat *open-source*.
4. Analisis perbandingan algoritma fusi terbatas pada *Kalman Filter*, *Complementary Filter*, dan *Weighted Average*.

### I.4 Tujuan dan Manfaat

Berdasarkan rumusan masalah di atas, berikut adalah tujuan penelitian yang dapat dirumuskan:

1. Mengimplementasikan metode integrasi komponen mekanik, elektronik, dan perangkat lunak yang efektif untuk membangun sistem pengukuran sudut yang fungsional pada aktuator Robot Delta.
2. Menganalisis perbandingan performa akurasi dan respon sistem yang dihasilkan oleh algoritma fusi *Kalman Filter*, *Complementary Filter*, dan *Weighted Average*.
3. Mengevaluasi dan merekomendasikan konfigurasi algoritma beserta arsitektur fusi yang menunjukkan kinerja terbaik berdasarkan hasil eksperimen.

Adapun hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan data perbandingan kuantitatif mengenai performa berbagai algoritma dan arsitektur fusi sensor pada aplikasi robotika, yang dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

2. Menghasilkan sebuah sistem pengukuran yang tervalidasi dan rekomendasi konfigurasi optimal. Hasil ini diharapkan dapat menjadi fondasi untuk pengembangan sistem kendali *closed-loop* yang lebih presisi pada prototipe robot di masa mendatang.

### **I.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika Tugas Akhir ini dibahas dengan penjabaran sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi gambaran umum tentang landasan teori, menjelaskan istilah dan ilmu terkait, serta meninjau hasil penelitian terdahulu dengan topik atau kajian yang sama.

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH, berisi langkah-langkah penyelesaian tugas akhir, meliputi gambaran umum sistem, perancangan sistem, dan perencanaan pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi pemaparan hasil pengujian yang dilakukan pada beberapa domain dan sistem, dengan memperhatikan tuntutan yang harus dicapai.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan yang diperoleh dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.