

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini dijelaskan mengenai landasan teori yang digunakan sebagai dasar dalam perancangan sistem *lifting* pada robot *mobile* berbasis sensor *load cell* dengan metode *Finite State Machine* (FSM) dan *fuzzy logic*. Pembahasan meliputi konsep dasar robot *mobile* pada sistem *material handling* industri, prinsip kerja *load cell* berbasis *strain gauge*, metode klasifikasi berat, konsep *fuzzy logic* sebagai metode pengambilan keputusan berdasarkan kategori berat, serta konsep FSM sebagai metode pengendalian sekuensial yang bersifat deterministik.

Selain itu, dibahas pula teori mengenai aktuator linear, modul HX711, motor driver BTS7960. Teori-teori tersebut menjadi dasar dalam merancang sistem pengangkatan yang terstruktur, stabil, dan aman. Seluruh teori yang digunakan mengacu pada penelitian dan publikasi ilmiah yang relevan sehingga sistem yang dirancang memiliki dasar akademik yang kuat serta sesuai dengan perkembangan teknologi otomasi dan robotika industri saat ini.

2.1 Tinjauan Pustaka

Dari sisi pemanfaatan sensor *load cell* dalam sistem otomatis, penelitian oleh [7]. mengenai aplikasi sensor *load cell* pada purwarupa sistem sortir barang menjadi referensi penting dalam penelitian ini. Studi tersebut membahas penggunaan *load cell* sebagai input utama untuk mendeteksi berat barang yang kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data berat yang diperoleh dari *load cell* dapat digunakan untuk mengontrol aktuator dalam menentukan tindakan sistem secara *real-time*, sehingga mampu mengurangi kesalahan manusia dalam proses pemilahan barang. Konsep ini relevan dengan sistem *lifting* yang dirancang, di mana pembacaan berat tidak hanya digunakan sebagai informasi, tetapi juga sebagai parameter utama dalam menentukan ketinggian angkat secara diskrit melalui metode *Finite State Machine* (FSM), sehingga sistem dapat bekerja secara adaptif sesuai dengan kondisi beban [7].

Referensi lain yang relevan adalah penelitian dari [8], mengenai pengendalian menggunakan *Raspberry Pi* dan sensor inframerah. Penelitian ini berfokus pada sistem navigasi berbasis sensor untuk mendeteksi lintasan dan mengatur arah gerak kendaraan secara otomatis. Sistem tersebut menunjukkan bagaimana integrasi sensor dan mikrokontroler dapat meningkatkan kinerja kendaraan otomatis dalam lingkungan industri skala kecil. Walaupun belum mengimplementasikan sistem *lifting* maupun klasifikasi berat, penelitian ini memberikan gambaran mengenai arsitektur sistem yang terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak *control* [8].

Selain itu, penelitian oleh [9], mengenai sistem kontrol robotsepak bola beroda menggunakan metode *Finite State Machine* (FSM) juga menjadi dasar teori dalam tugas akhir ini. Penelitian tersebut menjelaskan bagaimana FSM digunakan untuk membagi perilaku robotke dalam beberapa *state* operasional dengan transisi yang jelas. Implementasi FSM pada robottersebut terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem serta meminimalkan kesalahan logika selama proses berjalan. Prinsip inilah yang diterapkan dalam sistem *lifting*, di mana setiap tahapan mulai dari pembacaan berat hingga proses pengangkatan dikendalikan dalam *state* yang terstruktur [9].

Penelitian mengenai kendali otomatis ketinggian air dan nutrisi pada sistem hidroponik menggunakan metode *Finite State Machine* (FSM) yang dipublikasikan pada jurnal [10], juga menjadi referensi pendukung dalam penelitian ini. Studi tersebut memanfaatkan FSM untuk mengatur proses pembacaan sensor, pengambilan keputusan, serta aktivasi aktuator seperti pompa air berdasarkan kondisi tertentu. Sistem bekerja secara sekuensial dengan *state* yang terdefinisi jelas, sehingga mampu menjaga kestabilan parameter sebelum melakukan transisi ke tahap berikutnya. Pendekatan ini sejalan dengan perancangan sistem *lifting* yang dikembangkan, di mana proses pembacaan berat, klasifikasi beban, dan pengangkatan dilakukan secara bertahap melalui *state-state* yang terstruktur untuk meningkatkan keandalan sistem kontrol [10].

Penelitian mengenai sistem navigasi berbasis *fuzzy logic Mamdani* pada alat pemandu jalan untuk penyandang tunanetra yang dilakukan pada jurnal [11], juga

menjadi referensi pendukung dalam penelitian ini. Studi tersebut memanfaatkan metode fuzzy Mamdani untuk mengolah data dari sensor ultrasonik dan sensor infrared dalam menentukan kondisi lingkungan berdasarkan kategori jarak dan suhu. Sistem kemudian memberikan respons berupa peringatan suara secara *real-time* sesuai hasil pengambilan keputusan fuzzy.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fuzzy Mamdani mampu menghasilkan keputusan yang logis, fleksibel, dan memiliki tingkat akurasi tinggi dengan waktu respons yang cepat. Pendekatan ini relevan dengan penelitian yang dikembangkan karena sama-sama memanfaatkan sensor dan metode fuzzy untuk membantu proses pengambilan keputusan otomatis berdasarkan kondisi pembacaan sensor secara *real-time*. Pada penelitian ini, metode fuzzy digunakan untuk membantu klasifikasi beban pada sistem *lifting robot mobile* sehingga proses pengangkatan dapat berlangsung lebih aman, stabil, dan sesuai dengan kapasitas beban yang diterima [11].

Sebagai dasar analisis komparatif, penulis merangkum referensi tersebut dalam Tabel 2.1 yang memuat judul penelitian, fokus pembahasan, serta persamaan dan perbedaan masing-masing penelitian terhadap sistem yang dirancang dalam tugas akhir ini.

Tabel 2. 1 *State of the Art*

No	Peneliti & Judul	Research Gap	Novelty Penelitian	
			Penelitian	ini
1	Rukmana et al. – Aplikasi Sensor Load Cell pada Purwarupa Sistem Sortir Barang	Sistem sudah menggunakan <i>load cell</i> untuk menentukan aksi otomatis berdasarkan berat, namun belum diterapkan pada sistem <i>lifting</i> dan menggunakan metode FSM	mengembangkan sistem <i>lifting</i> berbasis yang dikombinasikan dengan FSM untuk mengatur pengangkatan	secara adaptif.

No	Peneliti & Judul	Research Gap	Novelty Penelitian
		Penelitian ini berfokus pada sistem navigasi robot menggunakan sensor inframerah dan pemrosesan berbasis Raspberry Pi untuk	
	Marulitua & Setiawan (2025)	mengikuti lintasan secara otomatis. Namun, penelitian atau klasifikasi beban tersebut belum membahas	Membahas sistem <i>lifting</i> berbasis <i>load cell</i> , serta
2	<i>Berbasis Raspberry Pi dengan Sistem Pengenalan Lintasan</i>	sistem mekanisme <i>lifting</i> maupun pengolahan beban metode FSM untuk berbasis sensor <i>load cell</i> , serta manajemen <i>state</i> yang belum mengintegrasikan kompleks.	belum mengintegrasikan
		metode pengambilan keputusan berbasis <i>state</i> seperti <i>Finite State Machine</i> (FSM) dalam pengelolaan proses yang lebih kompleks.	
		Mengimplementasikan metode FSM untuk mengontrol perilaku penerapan FSM pada	Mengembangkan
	Satriyo et al. (2024)	robot beroda berdasarkan sistem <i>lifting</i> berbasis kondisi permainan, namun <i>load cell</i> untuk	
3	<i>Sistem Kontrol Robot Sepak Bola Beroda dengan FSM lifting</i>	belum diterapkan pada sistem menentukan ketinggian sensor <i>load cell</i> sebagai berdasarkan klasifikasi parameter pengambilan beban.	
		keputusan.	

No	Peneliti & Judul	Research Gap	Novelty Penelitian
4	Hutauruk, A. R. (2025) – <i>Kendali Otomatis Ketinggian Air dan Nutrisi Hidroponik Menggunakan Metode FSM</i>	Menggunakan metode FSM untuk pengambilan keputusan otomatis berdasarkan pembacaan sensor dan pengendalian aktuator pada sistem hidroponik.	Mengembangkan penerapan FSM pada sistem <i>lifting</i> robot berbasis <i>load cell</i> untuk pengangkatan adaptif berdasarkan klasifikasi beban.
5	Rifani Khairani Pohan & Sriani (2025) – <i>Rancang Bangun Alat Pemandu Jalan Untuk Penyandang Tunanetra Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani</i>	Penelitian menggunakan metode <i>Fuzzy Mamdani</i> untuk pengambilan keputusan berdasarkan sensor ultrasonik dan infrared pada sistem navigasi tunanetra, namun belum diterapkan pada sistem robot <i>mobile</i> dengan mekanisme <i>lifting</i> dan penentuan target pengangkatan berbasis sensor <i>load cell</i> .	Penelitian ini mengintegrasikan metode <i>fuzzy logic Mamdani</i> pada sistem <i>lifting</i> robot <i>mobile</i> berbasis <i>load cell</i> untuk menentukan target pengangkatan secara otomatis berdasarkan klasifikasi berat beban sehingga proses pengangkatan menjadi lebih aman, stabil, dan adaptif.

Berdasarkan beberapa studi yang menjadi dasar perancangan penelitian ini, penulis menawarkan rancang bangun sistem *lifting* berbasis *load cell* dengan kontrol *ON-OFF linear actuator* pada robot *mobile* menggunakan metode *Finite State Machine* (FSM). Sistem yang dirancang tidak hanya memanfaatkan pembacaan berat sebagai parameter dalam proses pengangkatan, tetapi juga

mengintegrasikan klasifikasi berat diskrit untuk menentukan tinggi angkat secara otomatis sesuai kategori beban. Selain itu, sistem bekerja secara sekuensial melalui beberapa *state* seperti *pre-lift*, pembacaan berat, klasifikasi, hingga pengangkatan utama, sehingga proses menjadi lebih terstruktur. Dengan demikian, penelitian ini berperan dalam mengisi kesenjangan integrasi antara sistem pengukuran berat dan kontrol berbasis *state machine* pada platform *robot mobile*, sehingga menghasilkan sistem yang lebih terstruktur, adaptif, dan representatif terhadap kebutuhan otomasi industri.

2.2 Robot Mobile

Robot mobile merupakan kendaraan otomatis yang dirancang khusus untuk melakukan pemindahan barang atau material secara mandiri tanpa intervensi manusia di dalam lingkungan industri, seperti pabrik, pergudangan, dan pusat distribusi. *Robot mobile* umumnya dilengkapi dengan sistem navigasi berbasis sensor atau jalur yang terprogram sehingga dapat bergerak mengikuti lintasan tertentu dengan akurasi tinggi. Dalam implementasinya, *robot mobile* juga sering dipadu dengan mikrokontroler, aktuator, dan mekanisme kendali lain untuk memastikan gerakannya stabil dan dapat dipercaya dalam operasi produksi yang berulang dan padat. Hal ini sesuai dengan penelitian yang menunjukkan bahwa *robot mobile* mampu bekerja secara otonom dalam mengikuti jalur dan mendukung sistem *material handling* otomatis di industri modern [12]. Contoh *robot mobile* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Robot mobile* [12]

Selain fungsi pergerakan otomatis, *robot mobile* juga dipandang sebagai komponen strategis dalam otomatisasi industri karena dapat meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan kerja dengan mengurangi ketergantungan pada tenaga manusia. Misalnya, studi analisis kebutuhan *robot mobile* untuk *material handling* pada operasi gudang menunjukkan bahwa penggunaan kendaraan otomatis ini mampu meningkatkan efektivitas proses distribusi internal serta mengurangi potensi kesalahan akibat kerja manual. Pendekatan semacam ini semakin penting terutama dalam era Industri 4.0, di mana otomatisasi proses menjadi faktor utama dalam peningkatan produktivitas dan pengelolaan logistik internal perusahaan [13].

2.3 Linear Aktuator

Aktuator linier 12V DC adalah perangkat elektromekanis yang mengubah energi listrik arus searah (DC) menjadi gerakan translasi (maju-mundur) tanpa putaran, dengan memanfaatkan motor DC yang terhubung melalui gearbox dan mekanisme ulir (*lead screw* atau *ball screw*). Perangkat ini dirancang untuk menghasilkan gaya dorong atau tarik tertentu secara presisi, misalnya hingga 1000 N, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pergerakan linier yang terkontrol, seperti meja angkat elektronik, kursi medis otomatis, pengangkat barang, dan sistem otomatisasi industri menengah [14]. Bentuk fisik dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 *Linear Aktuator* [14]

Aktuator linier bekerja berdasarkan prinsip konversi energi rotasi menjadi energi linier yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Melalui sistem mekanik dalam aktuator tersebut, motor DC yang diberi tegangan 12 V menghasilkan putaran yang

kemudian diubah menjadi gerakan lurus pada batang aktuator. Aktuator linier 12 V DC banyak digunakan di berbagai aplikasi otomasi karena keunggulannya dalam kontrol posisi presisi, konsumsi energi yang rendah, dan desain yang kompak dibandingkan sistem hidrolik atau pneumatik yang lebih kompleks.

Selain itu, desain sistem aktuator linier juga dibahas dalam penelitian *Perancangan Alat Lift Table Menggunakan Actuator Linear untuk Optimalisasi Operasional Tenaga Kerja* yang menekankan efisiensi dan keamanan pekerjaan saat mengangkat beban secara linier dalam konteks industri [14]. Dalam penerapannya, aktuator linier umumnya digunakan tidak pada kapasitas maksimum, melainkan sekitar 30%–50% dari gaya maksimum untuk menjaga keandalan dan keamanan sistem. Untuk spesifikasi linear aktuator dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Linear Aktuator [15]

Spesifikasi Linear Aktuator	Nilai	Satuan
Tegangan Operasi	12	V
Daya Maksimal	60	Watt
Arus Maksimal	5	A
Gaya Maksimum	900	N
Kecepatan Linier	10	mm/s
Stroke Length	100	mm
Gear Ratio	40 : 1	-
Jenis Motor	DC Motor	-
Mekanisme	Lead Screw	-
Duty Cycle	20	%
Suhu Operasi	-25 – 65	°C
Tingkat Proteksi	IP54	-
Material	Aluminium Alloy	-

2.3.1 Prinsip Kerja Linear

Secara umum, sistem kerja terdiri dari:

1. Motor DC 12V

Motor *DC* 12V berfungsi sebagai sumber penggerak awal yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik berupa gerakan rotasi. Ketika tegangan diberikan, motor menghasilkan putaran yang akan diteruskan ke sistem mekanik berikutnya. Komponen ini menjadi bagian utama dalam menghasilkan energi gerak pada aktuator. Kinerja motor sangat mempengaruhi kecepatan dan respons sistem secara keseluruhan.

2. Gearbox (Reduksi Gear)

Menurunkan kecepatan dan meningkatkan torsi agar mampu menghasilkan gaya dorong besar. Gearbox (reduksi gear) adalah bagian mekanik berikutnya yang menerima putaran langsung dari motor DC dan berfungsi menurunkan kecepatan rotasi sambil meningkatkan torsi yang dihasilkan. Sistem reduksi ini penting karena motor DC yang berputar cepat namun dengan torsi rendah perlu ditransformasikan menjadi gerakan dengan torsi tinggi, agar aktuator linier dapat menghasilkan gaya dorong atau tarik sesuai kapasitas desain.

3. Lead Screw / Ball Screw

Mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan linier. Lead screw atau ball screw adalah komponen mekanik yang mengubah gerakan rotasi dari gearbox menjadi gerakan linier pada batang aktuator. Mekanisme ulir ini bekerja berdasarkan pitch dan sudut ulir yang membuat mur atau bagian pengikat pada batang bergerak maju atau mundur saat poros screw berputar.

4. Limit Switch (Sakelar Batas)

Terletak di kedua ujung aktuator untuk menghentikan motor otomatis saat mencapai batas maksimal atau minimal langkah. Lead screw atau ball screw adalah komponen mekanik yang mengubah gerakan rotasi dari gearbox menjadi gerakan linier pada batang aktuator. Mekanisme ulir ini bekerja berdasarkan pitch dan sudut ulir yang membuat mur atau bagian pengikat pada batang bergerak maju atau mundur saat poros screw berputar.

5. Self-Locking Mechanism

Setelah daya dilepas, posisi aktuator tetap terkunci (tidak kembali sendiri). Self-locking mechanism adalah fitur struktural yang memungkinkan aktuator linier mempertahankan posisi batangnya meskipun daya listrik tidak lagi diberikan.

2.4 Sistem *lifting*

Sistem *lifting* adalah mekanisme yang digunakan untuk mengangkat dan menurunkan beban secara vertikal dengan memanfaatkan aktuator seperti motor listrik, aktuator linier, maupun sistem pneumatik. Sistem ini banyak digunakan dalam bidang industri, khususnya pada proses *material handling* dan otomasi untuk meningkatkan efisiensi kerja serta mengurangi beban tenaga manusia. Perkembangan teknologi menunjukkan bahwa sistem *lifting* modern banyak menggunakan aktuator linier karena memiliki keunggulan dalam hal efisiensi, kemudahan kontrol, dan keamanan operasional. Hal ini dibuktikan dalam penelitian perancangan *lift table* yang menggunakan aktuator linier sebagai penggerak utama untuk mengangkat beban secara vertikal dengan sistem yang lebih andal dan efisien [14].

2.4.1 Persamaan Sistem *lifting*

Sistem *lifting* pada *robotrobot mobile* merupakan sistem mekanik vertikal yang dirancang untuk mengangkat dan menyesuaikan posisi beban berdasarkan kategori berat tertentu. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan aktuator linier sebagai penggerak utama serta sensor *load cell* sebagai elemen pengukur gaya. Dalam sistem mekanik translasi vertikal, analisis gaya sangat penting karena aktuator harus mampu mengatasi gaya berat akibat gravitasi serta mempertahankan kestabilan posisi saat pembacaan dilakukan. Prinsip dasar ini banyak diterapkan dalam penelitian sistem pengangkat otomatis berbasis aktuator linier di aplikasi robotika dan otomasi industri, termasuk implementasi sistem kontrol robot yang menggunakan aktuator dan sensor gaya pada *robot humanoid* maupun sistem *lift* [3].

Pada sistem *lifting* berbasis *linear actuator*, energi mekanik digunakan untuk mengangkat beban secara vertikal. Energi ini berasal dari konversi energi listrik menjadi energi mekanik melalui motor DC yang diteruskan ke mekanisme ulir (*lead screw*). Besarnya gaya yang dibutuhkan untuk mengangkat beban dipengaruhi oleh

massa beban dan percepatan gravitasi. Gaya tersebut dapat dinyatakan pada Persamaan (2.1).

$$F = m \times g \quad (2.1)$$

Keterangan:

F= Gaya angkat (Newton)

m= Massa beban (kg)

g= Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Dalam sistem mekanik, daya merupakan hasil dari kerja gaya terhadap kecepatan gerak. Pada sistem aktuator linier, daya mekanik digunakan untuk mengangkat beban dengan kecepatan tertentu. Persamaan daya dapat dinyatakan pada Persamaan (2.2).

$$P = F \cdot v \quad (2.2)$$

Keterangan:

P = Daya mekanik (Watt)

F = Gaya angkat (Newton)

v = Kecepatan aktuator (m/s)

Hubungan antara energi dan daya juga dapat digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan dalam proses pengangkatan. Energi merupakan hasil kerja gaya terhadap perpindahan. Persamaan energi dapat dituliskan pada Persamaan (2.3).

$$E = F \cdot s \quad (2.3)$$

Keterangan:

E = Energi (Joule)

F = Gaya (Newton)

s = Perpindahan (meter)

Selanjutnya, waktu yang dibutuhkan dapat dihitung berdasarkan hubungan energi terhadap daya seperti pada Persamaan (2.4).

$$t = \frac{E}{P} \quad (2.4)$$

Keterangan:

t = Waktu (detik)

E = Energi (Joule)

P = Daya (Watt)

Pada sistem *linear actuator*, gaya linier yang dihasilkan akan dikonversi menjadi torsi pada mekanisme ulir (*lead screw*). Besarnya torsi yang dibutuhkan untuk mengangkat beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.5).

$$T = \frac{F \cdot p}{2\pi \cdot \eta} \quad (2.5)$$

Keterangan:

T = Torsi (Nm)

F = Gaya angkat (Newton)

p = Pitch ulir (meter)

η = Efisiensi mekanik (0–1)

Karena aktuator menggunakan sistem reduksi *gearbox*, maka torsi pada motor akan berbeda dengan torsi pada beban. Hubungan antara torsi motor dan torsi beban dapat dinyatakan pada Persamaan (2.6).

$$T_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{beban}}}{\text{Gear Ratio}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

T_{motor} = Torsi motor (Nm)

T_{beban} = Torsi pada beban (Nm)

Gear Ratio = Rasio reduksi gear

Selain itu, konsumsi daya listrik pada aktuator dapat dihitung berdasarkan tegangan dan arus yang digunakan. Persamaan daya listrik ditunjukkan pada Persamaan (2.7).

$$P = V \cdot I \quad (2.7)$$

Keterangan:

P = Daya listrik (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Pada sistem kendali fuzzy, parameter utama yang digunakan sebagai input adalah *error* posisi. Nilai *error* diperoleh dari selisih antara target *lifting* dan tinggi aktual yang dibaca oleh sensor ultrasonik HC-SR04. Persamaan selisih target posisi ditunjukkan pada Persamaan (2.8).

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.8)$$

Keterangan:

$e(t)$ = Error posisi (cm)

$r(t)$ = Target *lifting* atau referensi posisi (cm)

$y(t)$ = Tinggi aktual hasil pembacaan sensor HC-SR04 (cm) Untuk mengetahui tingkat akurasi sistem penimbangan, digunakan persamaan *error* pengukuran yang membandingkan hasil pembacaan sistem dengan berat referensi. Persamaan *error* pengukuran ditunjukkan pada Persamaan (2.9).

$$Error(\%) = \left| \frac{m_r - m_s}{m_r} \right| \times 100\% \quad (2.9)$$

Keterangan:

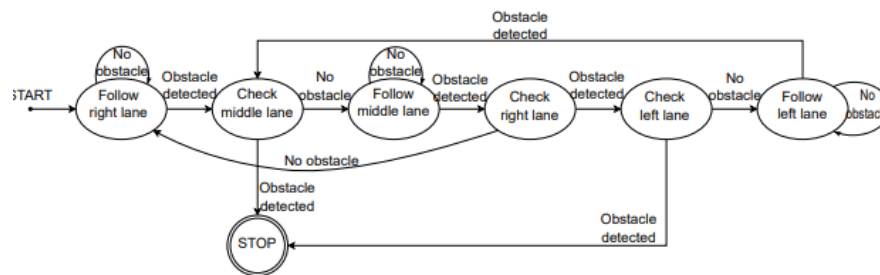
Error (%) = Persentase kesalahan pengukuran

m_r = Massa referensi (kg)

m_s = Massa hasil pembacaan sistem (kg)

2.4.2 *Finite State Machine* (FSM)

Finite State Machine (FSM) adalah model matematika yang merepresentasikan sebuah sistem sebagai kumpulan *state* terbatas serta aturan transisi antar *state* berdasarkan peristiwa (*event*). Bentuk *state* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Finite State Machine* [16]

FSM banyak digunakan dalam bidang kontrol dan robotika untuk memodelkan perilaku sistem yang berubah tergantung pada input sensor, kondisi internal, atau keputusan logika. Dalam konteks sistem robot, FSM memberikan kerangka kerja logika yang bersifat deterministic untuk menentukan perilaku robot pada setiap kondisi yang mungkin terjadi, sehingga memudahkan dalam perancangan sistem yang lebih modular dan mudah dikembangkan. Hal ini juga ditunjukkan dalam studi pada sistem robot *mobile* beroda, di mana pendekatan FSM digunakan untuk merancang sistem kontrol sehingga robot dapat bergerak dan menjalankan tugas berdasarkan urutan *state* yang telah ditentukan [16].

2.5 fuzzy logic

fuzzy logic merupakan salah satu metode dalam bidang kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang dirancang untuk meniru cara manusia dalam mengambil keputusan ketika menghadapi kondisi yang tidak pasti, ambigu, atau tidak lengkap. Berbeda dengan logika biner yang hanya memiliki dua nilai, yaitu benar (1) dan salah (0), logika fuzzy mampu merepresentasikan nilai di antara keduanya, seperti 0,2; 0,5; atau 0,8, sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih fleksibel dan mendekati pola berpikir manusia [17].

Dalam penerapannya, *fuzzy logic* memiliki beberapa tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, proses inferensi (*inference engine*), dan defuzzifikasi. Tahap fuzzifikasi berfungsi mengubah data masukan (*crisp*) menjadi nilai fuzzy. Selanjutnya, proses inferensi melakukan pengolahan data berdasarkan aturan logika IF–THEN yang telah ditentukan. Hasil dari proses tersebut kemudian dikonversi kembali menjadi nilai *crisp* melalui tahap defuzzifikasi untuk digunakan sebagai sinyal keluaran pada aktuator atau sistem control [18].

2.5.1 Struktur Dasar Logika Fuzzy

Berdasarkan struktur sistem logika fuzzy, terdapat beberapa tahapan proses utama yang digunakan dalam pengolahan data input hingga menghasilkan keputusan output, yaitu sebagai berikut:

- a. Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai input tegas (crisp) menjadi nilai fuzzy berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Pada tahap ini, setiap nilai input akan memiliki derajat keanggotaan tertentu pada masing-masing himpunan fuzzy.
- b. Inferensi atau mesin penalaran merupakan proses pengambilan keputusan berdasarkan nilai input fuzzy untuk menentukan output sistem. Pada tahap ini digunakan aturan fuzzy (rule) sebagai dasar pengolahan data. Salah satu metode inferensi yang umum digunakan adalah metode max–min. Metode tersebut bekerja dengan melakukan operasi minimum (MIN) untuk menentukan firing strength dari setiap rule fuzzy, kemudian dilanjutkan dengan operasi maksimum (MAX) untuk memperoleh hasil inferensi akhir sebelum dilakukan proses defuzzifikasi.
- c. Basis aturan (rule base) merupakan kumpulan aturan logika fuzzy berbentuk IF–THEN yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan system. Bentuk umum aturan fuzzy adalah sebagai berikut:

IF x is A THEN y is B

dimana:

- x dan y merupakan variabel fuzzy,
- A dan B merupakan nilai linguistik dari variabel tersebut

Pernyataan “IF x is A ” disebut antecedent atau premis, sedangkan “THEN y is B ” disebut consequent atau kesimpulan.

- d. Defuzzifikasi merupakan proses mengubah hasil keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (crisp output). Input pada tahap ini berupa himpunan fuzzy hasil proses inferensi, sedangkan output yang dihasilkan berupa nilai numerik yang dapat digunakan oleh sistem kontrol. Melalui proses defuzzifikasi, sistem fuzzy dapat menghasilkan keputusan akhir berupa nilai tertentu, seperti nilai PWM pada sistem kontrol motor linear actuator.

2.5.2 Jenis Metode Fuzzy

Pada sistem inferensi fuzzy terdapat beberapa metode yang umum digunakan dalam proses pengambilan keputusan, yaitu metode Tsukamoto, metode Mamdani, dan metode Takagi-Sugeno. Setiap metode memiliki karakteristik dan mekanisme inferensi yang berbeda. Penjelasan dari masing-masing metode adalah sebagai berikut.

a. Metode Tsukamoto

Metode Tsukamoto merupakan metode inferensi fuzzy yang menggunakan fungsi keanggotaan monoton pada setiap konsekuen aturan fuzzy. Pada metode ini, setiap aturan menghasilkan output berupa nilai crisp berdasarkan hasil inferensi dari aturan tersebut. Proses penentuan output dilakukan melalui tahap defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata terpusat (center average), sehingga diperoleh nilai akhir yang tegas dari hasil kombinasi seluruh aturan fuzzy.

b. Metode Takagi-Sugeno

Metode Takagi-Sugeno atau sering disebut metode Sugeno merupakan metode inferensi fuzzy dengan aturan IF–THEN, dimana output sistem tidak berbentuk himpunan fuzzy, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear. Metode ini diperkenalkan oleh Michio Sugeno dan Takagi pada tahun 1985. Model Sugeno menggunakan fungsi keanggotaan singleton, yaitu fungsi keanggotaan yang memiliki nilai derajat keanggotaan 1 pada satu nilai crisp tertentu dan bernilai 0 pada nilai lainnya. Karena outputnya berupa konstanta atau persamaan matematis, metode Sugeno memiliki proses komputasi yang lebih sederhana dan cepat sehingga banyak digunakan pada sistem kontrol real-time dan mikrokontroler.

c. Metode Mamdani (Min–Max)

Metode fuzzy Mamdani merupakan salah satu metode inferensi fuzzy yang menggunakan aturan berbentuk IF–THEN dengan output berupa himpunan fuzzy. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 dan banyak digunakan pada sistem kontrol karena mampu meniru cara pengambilan keputusan manusia berdasarkan bahasa linguistik. Pada metode Mamdani, proses inferensi dilakukan melalui tahapan fuzzifikasi, pembentukan rule, inferensi, dan defuzzifikasi[18].

Pada penelitian ini, metode *fuzzy* Mamdani digunakan untuk mengontrol kecepatan motor *linear actuator* pada sistem *lifting* berdasarkan berat beban dan selisih target. Variabel masukan terdiri atas berat beban yang diperoleh dari sensor *load cell* HX711 serta selisih target yang dihitung dari selisih antara target ketinggian dengan posisi aktual yang dibaca menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04. Variabel keluaran berupa nilai PWM yang dikirimkan ke *motor driver* BTS7960 untuk mengatur kecepatan motor DC.

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai tegas (*crisp*) menjadi nilai fuzzy berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, sistem menggunakan kombinasi fungsi keanggotaan *left shoulder*, *triangular*, dan *right shoulder*. Pada implementasi di MATLAB maupun Arduino, ketiga bentuk kurva tersebut direpresentasikan menggunakan *Triangular Membership Function (TRIMF)* dengan parameter tertentu sehingga menghasilkan bentuk kurva yang sesuai.

Variabel input berat dibagi menjadi tiga himpunan, yaitu *light* (*left shoulder*), *medium* (*triangular*), dan *heavy* (*right shoulder*). Demikian pula dengan variabel input Selisih Target, dibagi menjadi *very close* (*left shoulder*), *close* (*triangular*), dan *far* (*right shoulder*).

Pada sistem mikrokontroler, ketiga bentuk kurva tersebut dimodelkan dalam satu algoritma fungsi keanggotaan menggunakan parameter a , b , dan c sebagai batas bawah, titik puncak, dan batas atas. Persamaan matematis yang digunakan pada sistem ini dibagi menjadi tiga kondisi:

- a) Kurva *left shoulder* (Bahu Kiri) (Kondisi $a = b$). Digunakan untuk himpunan tepi bawah (seperti *light* dan *very close*), di mana derajat keanggotaan bernilai 1 mulai dari nilai negatif hingga titik b . Dapat dilihat pada Persamaan (2.10):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{c-x}{c-b}, & a < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.10)$$

- b) Kurva *right shoulder* (Bahu Kanan) (Kondisi $b = c$). Digunakan untuk himpunan tepi atas (seperti *heavy* dan *far*), di mana derajat keanggotaan mulai naik dari titik a dan bertahan pada nilai 1 hingga tak hingga. Persamaan (2.11):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < c \\ 1, & x \geq c \end{cases} \quad (2.11)$$

- c) Kurva *triangular*, (Segitiga) (Kondisi $a < b < c$). Digunakan untuk himpunan yang berada di tengah rentang nilai (seperti *medium* dan *close*), di mana derajat keanggotaan memiliki satu titik puncak (derajat 1) di b . Persamaan (2.12) :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (2.12)$$

Keterangan

a = batas bawah himpunan fuzzy

b = titik puncak fungsi keanggotaan

c = batas atas himpunan fuzzy

$\mu(x)$ = derajat keanggotaan nilai x terhadap himpunan fuzzy segitiga.

Penggunaan kombinasi kurva bahu dan kurva segitiga ini bertujuan agar nilai input yang ekstrem (sangat kecil atau sangat besar) tidak kehilangan derajat keanggotaannya, sehingga sistem kontrol dapat merespon kondisi batas dengan stabil.

2. Basis Aturan (Rule Base)

Aturan fuzzy Mamdani direpresentasikan berdasarkan relasi variabel input dan output. Pada penelitian ini, operator logika AND diimplementasikan dengan metode Minimum (MIN) untuk menentukan *firing strength* setiap aturan. Contoh implementasi basis aturan yang digunakan pada program:

- IF Berat is *light* AND Selisih Target is *far* THEN PWM is *fast*
- IF Berat is *heavy* AND Selisih Target is *very close* THEN PWM is *slow*

3. Inferensi fuzzy

Inferensi fuzzy adalah proses menentukan nilai firing strength berdasarkan derajat keanggotaan setiap input fuzzy. Nilai firing strength diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.13) operator minimum.

$$\alpha_i = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.13)$$

Keterangan:

α_i = firing strength rule ke-i

$\mu_A(x)$ = derajat keanggotaan input pertama

$\mu_B(y)$ = derajat keanggotaan input kedua

Setelah mendapatkan *firing strength* dari semua *rule*, sistem melakukan agregasi output menggunakan operator maksimum (MAX) untuk membentuk satu daerah himpunan fuzzy keluaran gabungan (komposisi MAX-MIN)

4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses mengubah daerah hasil komposisi inferensi fuzzy kembali menjadi nilai tegas (*crisp*) berupa sinyal PWM motor (0-255). Pada penelitian ini digunakan metode *Centroid* atau *Center of Gravity (CoG)* dalam bentuk diskrit. Metode ini menentukan nilai keluaran dengan menghitung titik pusat gravitasi dari seluruh daerah keluaran fuzzy hasil proses *inferensi*.

Karena dijalankan pada mikrokontroler, perhitungan luas daerah integral diaproksimasi menggunakan penjumlahan berulang (*looping*) dengan resolusi langkah tertentu (interval PWM sebesar 5). Persamaan defuzzifikasi Centroid diskrit ditunjukkan pada Persamaan (2.14):

$$Z^* = \frac{\sum z_i \cdot \mu_{out}(z_i)}{\sum \mu_{out}(z_i)} \quad (2.14)$$

Keterangan:

Z^* = output *crisp* akhir (nilai PWM)

z_i = nilai diskrit PWM yang dievaluasi (0, 5, 10, ..., 255)

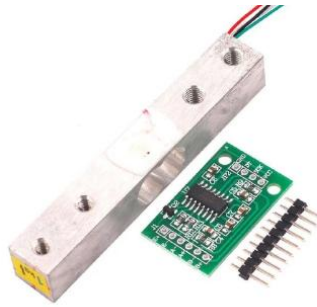
$\mu_{out}(z_i)$ = nilai derajat keanggotaan agregasi maksimum (MAX) pada titik z_i

Metode *Center of Gravity* dipilih karena mempertimbangkan seluruh daerah keluaran *fuzzy* hasil proses *inferensi*, sehingga menghasilkan nilai *crisp* yang bersifat kontinu. Karakteristik tersebut sesuai untuk sistem pengendalian kecepatan *linear actuator* yang memerlukan perubahan nilai PWM secara bertahap. Pada implementasinya, proses *defuzzifikasi* dilakukan secara diskrit dengan mengevaluasi domain PWM dari 0 hingga 255 menggunakan interval sebesar 5, sesuai algoritma yang diterapkan pada program Arduino.

2.6 Load cell

Load cell merupakan salah satu jenis *transducer* yang digunakan untuk mengukur beban dengan cara mengubah gaya mekanik menjadi sinyal listrik. Ketika suatu benda memberikan beban pada sensor *load cell*, sensor tersebut akan menghasilkan sinyal listrik yang besarnya sebanding dengan gaya tekan yang diterima. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan tekanan yang menyebabkan perubahan resistansi listrik. *Load cell* terdiri dari elemen elastis (pegas) yang akan mengalami deformasi ketika diberikan beban. Deformasi ini kemudian dideteksi oleh *strain gauge* yang terpasang pada badan *load cell*. Saat beban bekerja, terjadi gaya tarik dan tekan pada *strain gauge* sehingga nilai resistansinya berubah dan menghasilkan sinyal tegangan listrik. Beberapa *strain gauge* tersebut dihubungkan membentuk rangkaian jembatan Wheatstone untuk meningkatkan sensitivitas dan akurasi pengukuran.

Secara umum, *load cell* merupakan komponen utama yang terdapat pada sistem timbangan digital dan digunakan untuk mengukur massa suatu benda secara presisi. Sensor *load cell* tersusun atas beberapa konduktor, *strain gauge*, serta rangkaian jembatan Wheatstone yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan sinyal keluaran yang proporsional terhadap beban yang diberikan [19]. Bentuk fisik sensor *load cell* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 *Load cell* [15]

Untuk memperoleh sinyal keluaran yang stabil dan sensitif, dua strain gauge tersebut biasanya dikombinasikan dalam rangkaian jembatan Wheatstone sehingga menghasilkan tegangan diferensial yang proporsional terhadap besar beban. Penggunaan konfigurasi jembatan ini juga dibahas dalam penelitian rancang bangun timbangan digital berbasis *load cell* yang menunjukkan bahwa metode Wheatstone bridge mampu meningkatkan sensitivitas dan akurasi pembacaan berat [20]. Untuk spesifikasi sensor *load cell* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

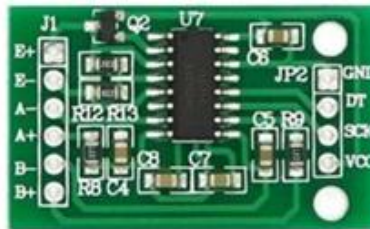
Tabel 2.3 Spesifikasi Sensor *load cell* [20].

Parameter	Nilai
Kapasitas maksimum	5 kg
Tipe sensor	Single Point Load Cell
Material	Aluminium Alloy
Rated Output	1 mV/V
Non-linearity	Maksimum $\pm 2,5$ g
Hysteresis	Maksimum $\pm 2,5$ g
Repeatability	Maksimum $\pm 2,5$ g
Zero Balance	± 75 g
Tegangan eksitasi maksimum	5 VDC
Temperatur operasi	-20°C hingga 55°C

2.7 Modul Hx711

Modul HX711 merupakan modul penguat (*amplifier*) yang umum digunakan pada sistem timbangan digital sebagai modul konversi sinyal analog ke digital (*Analog to Digital Converter/ADC*) yang terhubung dengan *load cell*. Modul ini memiliki ADC presisi tinggi 24-bit dengan penguatan input tinggi yang dirancang untuk berbagai jenis sensor tipe *bridge* (jembatan Wheatstone). HX711 memiliki dua kanal input, yaitu Kanal A dan Kanal B yang berkomunikasi secara *multiplex*. Kanal A dapat diprogram dengan penguatan 128 atau 64 (20 mV atau 40 mV), sedangkan Kanal B memiliki penguatan tetap sebesar 32, sehingga memungkinkan penyesuaian terhadap level sinyal yang berbeda [21]

HX711 merupakan modul penimbang yang bekerja dengan prinsip mengonversi perubahan resistansi yang dapat dibaca menjadi perubahan tegangan melalui rangkaian internal yang tersedia. Bentuk fisik modul HX711 ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan untuk spesifikasi HX711 dikaji pada Tabel 2.4



Gambar 2.5 Modul HX711 [21]

Tabel 2.4 Spesifikasi Modul HX711[22]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Masukan Diferensial (<i>Differential Input Voltage</i>)	± 40 mV (<i>Full-scale differential input voltage</i>)
Resolusi ADC (<i>Data Accuracy</i>)	24 bit
Frekuensi Pembaruan (<i>Refresh Frequency</i>)	80 Hz
Tegangan Operasi (<i>Operating Voltage</i>)	5 V DC
Arus Operasi (<i>Operating Current</i>)	< 10 mA
Dimensi Modul (<i>Size</i>)	38 mm $\times$ 21 mm $\times$ 10 mm

Prinsip kerja modul HX711 dimulai dari perubahan gaya mekanik yang diterima oleh *load cell* menjadi perubahan resistansi pada *strain gauge* yang tersusun dalam jembatan Wheatstone. Saat beban diberikan, *strain gauge* mengalami perubahan bentuk sehingga nilai resistansinya ikut berubah dalam jumlah yang sangat kecil. Perubahan ini menghasilkan tegangan diferensial pada keluaran sensor. Tegangan yang dihasilkan sangat kecil, biasanya hanya beberapa milivolt, sehingga tidak bisa langsung dibaca oleh mikrokontroler. Oleh karena itu, HX711 digunakan untuk memperkuat sinyal tersebut sekaligus mengubahnya menjadi data digital. Modul ini memiliki ADC 24-bit dan penguat internal (*programmable gain amplifier/PGA*) yang dapat memperbesar sinyal sebelum diproses.

Dengan adanya proses ini, perubahan berat dapat dibaca dengan cukup baik oleh sistem. Modul HX711 banyak digunakan pada sistem timbangan digital berbasis mikrokontroler, seperti pada penelitian alat ukur massa digital berbasis Arduino yang memanfaatkan HX711 sebagai penguat dan ADC [23]. Konfigurasi pin input yang terhubung dengan *load cell* ditunjukkan pada Tabel 2.5, yang menjelaskan fungsi masing-masing pin dalam membaca sinyal diferensial dari sensor. Sementara itu, Tabel 2.6 memperlihatkan konfigurasi pin catu daya dan komunikasi yang digunakan untuk menghubungkan modul HX711 dengan mikrokontroler melalui pin data (*DT*) dan clock (*SCK*).

Tabel 2. 5 Konfigurasi Pin Input Load Cell pada Modul HX711

Pin HX711	Fungsi	Koneksi ke Load Cell
E+	Tegangan eksitasi positif (Excitation+)	Merah (Power +)
E-	Tegangan eksitasi negatif (Excitation-)	Hitam (Power -)
A+	Input sinyal positif Kanal A	Hijau (Signal +)
A-	Input sinyal negatif Kanal A	Putih (Signal -)
B+	Input sinyal positif Kanal B	Tidak digunakan
B-	Input sinyal negatif Kanal B	Tidak digunakan

Tabel 2. 6 Konfigurasi Pin Catu Daya dan Komunikasi Modul HX711

Pin	Fungsi
VCC	3.3V / 5V
GND	Ground
DT (DOUT)	Data Output
SCK	Serial Clock

2.7.1 Kalibrasi *Load cell*

Setelah sinyal dari *load cell* dibaca oleh modul HX711, data yang diperoleh masih berupa nilai digital mentah atau raw value. Nilai raw tersebut belum dapat langsung menunjukkan berat sebenarnya karena masih dipengaruhi oleh *offset* sensor, karakteristik masing-masing *load cell*, serta penguatan dari modul HX711. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi untuk memperoleh faktor kalibrasi yang dapat mengubah nilai raw menjadi satuan berat.

Tahap awal kalibrasi dilakukan dengan menentukan nilai *offset*, yaitu nilai pembacaan sensor ketika tidak diberikan beban. Nilai raw bersih diperoleh dari selisih antara nilai raw saat sensor diberi beban dengan nilai raw *offset*. Secara matematis, nilai raw bersih dapat dinyatakan pada Persamaan (2.14).

$$\text{Rawbersih} = \text{Rawbeban} - \text{Rawoffset} \quad (2.14)$$

Keterangan:

$\text{Raw}_{\text{bersih}}$: Nilai raw HX711 setelah dikurangi *offset*

$\text{Raw}_{\text{beban}}$: Nilai raw HX711 saat diberi beban

$\text{Raw}_{\text{offset}}$: Nilai raw HX711 saat tanpa beban

Setelah nilai raw bersih diperoleh, faktor kalibrasi dapat dihitung dengan membandingkan nilai raw bersih terhadap berat referensi yang digunakan. Faktor kalibrasi berfungsi sebagai nilai pembagi agar hasil pembacaan sensor dapat dikonversi menjadi satuan berat. Persamaan faktor kalibrasi ditunjukkan pada Persamaan (2.15).

$$Fk = \frac{\text{Rawbersih}}{W_{\text{ref}}} \quad (2.15)$$

Keterangan:

F_k : Faktor kalibrasi sensor *load cell*

Raw_{bersih} : Nilai raw HX711 setelah dikurangi *offset*

W_{ref} : Berat referensi yang digunakan saat kalibrasi

Dengan menggunakan faktor kalibrasi tersebut, berat hasil pembacaan *load cell* dapat dihitung melalui Persamaan (2.16).

$$W = \frac{Raw_{bersih}}{W_{ref}} \quad (2.16)$$

Keterangan:

W : Berat hasil pembacaan sensor

Raw_{bersih} : Nilai raw HX711 setelah dikurangi *offset*

F_k : Faktor kalibrasi sensor *load cell*

Apabila berat yang diperoleh masih dalam satuan gram, maka konversi ke kilogram dilakukan menggunakan Persamaan (2.17).

$$W_{kg} = \frac{W_{gram}}{1000} \quad (2.17)$$

Keterangan:

W_{kg} : Berat dalam satuan kilogram

W_{gram} : Berat dalam satuan gram

2.8 Driver Motor BTS7960

Motor driver BTS7960 atau yang sering dikenal sebagai modul IBT-2 merupakan perangkat driver H-bridge DC berarus tinggi yang digunakan untuk mengendalikan motor DC pada sistem otomasi dan robotika. Modul ini menggunakan dua half-bridge BTS7960 yang digabungkan menjadi full-bridge, sehingga mampu mengontrol arah dan kecepatan motor. Driver ini bekerja pada tegangan sekitar 6 V hingga 27 V dan mampu menangani arus yang cukup besar, sehingga cocok digunakan untuk motor DC dengan kebutuhan daya menengah hingga tinggi. Selain itu, BTS7960 dapat menerima sinyal logika 3,3–5 V dari mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32.

Pengendalian kecepatan motor dilakukan menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*), yaitu dengan mengatur nilai *duty cycle* dari 0 hingga 100%

untuk mengontrol kecepatan putaran motor secara bertahap. Arah putaran motor diatur melalui dua sinyal PWM yang bekerja secara independen. Dalam beberapa penelitian, modul BTS7960 digunakan sebagai driver H-bridge yang mampu mengendalikan motor DC secara stabil dan efisien, terutama pada sistem yang membutuhkan arus besar dan pengendalian arah yang presisi [24]. Bentuk fisik motor driver dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Driver BTS7960 [24]

Selain itu, modul driver BTS7960 juga dilengkapi dengan fitur proteksi yang penting untuk pengoperasian motor DC berarus tinggi. Proteksi tersebut meliputi *overcurrent*, *overtemperature*, dan hubungan pendek, yang berfungsi untuk mencegah kerusakan saat terjadi lonjakan arus atau perubahan beban secara tiba-tiba. Modul ini juga memiliki isolasi antara rangkaian logika dan power, sehingga gangguan dari sisi daya tidak langsung mempengaruhi mikrokontroler.

Konfigurasi *H-bridge* memungkinkan motor berputar maju dan mundur dengan mengatur sinyal PWM pada pin kontrol RPWM dan LPWM, serta pin enable (R_EN dan L_EN). Ketika salah satu sisi diberi sinyal PWM dan sisi lainnya dalam kondisi LOW, motor akan berputar ke satu arah. Sebaliknya, jika sinyal dibalik, maka arah putaran motor juga akan berubah. Penggunaan metode PWM dalam pengendalian motor ini membuat sistem menjadi lebih efisien dan responsif. Hal ini juga banyak diterapkan pada berbagai sistem kontrol motor DC di bidang industri dan robotika [25] Spesifikasi *motor driver* dapat dilihat pada Tabel 2.7 dan untuk mengkonfigurasi *driver* dimuat pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 7 Spesifikasi driver BTS7960 [26]

Parameter	Spesifikasi
Tipe Driver	H-Bridge (Dual Half Bridge)
Tegangan Operasi Motor	5,5–27 V DC
Tegangan Logika	5 V
Arus Maksimum	43 A
Frekuensi PWM Maksimum	25 kHz
Resistansi ON (RDS(on))	16 mΩ (typ.)
Proteksi	Overcurrent, Overtemperature, Overvoltage, Undervoltage, Short Circuit
Diagnosis Arus	Current Sense dan Status Flag
Antarmuka Kendali	RPWM, LPWM, R_EN, L_EN

Tabel 2. 8 Konfigurasi Pin Motor Driver BTS7960 (IBT-2)

Nama Pin	Jenis	Fungsi	Keterangan
RPWM	Input	Kontrol PWM sisi kanan	Mengatur arah dan kecepatan (arah maju jika aktif)
LPWM	Input	Kontrol PWM sisi kiri	Mengatur arah dan kecepatan (arah mundur jika aktif)
R_EN	Input	Enable sisi kanan	Mengaktifkan half-bridge kanan (HIGH = aktif)
L_EN	Input	Enable sisi kiri	Mengaktifkan half-bridge kiri (HIGH = aktif)
VCC	Input	Tegangan logika	3.3V – 5V dari mikrokontroler
GND	Ground	Ground logika & sistem	Harus terhubung dengan ground mikrokontroler

Nama Pin	Jenis	Fungsi	Keterangan
B+	Power Input	Tegangan motor positif	6V – 27V DC
B-	Power Input	Ground motor	Ground supply motor
M+	Output	Terminal motor positif	Ke motor DC
M-	Output	Terminal motor negatif	Ke motor DC

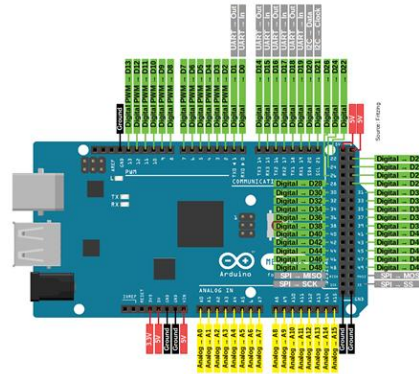
2.9 Atmega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan mikrokontroler yang berbasis ATmega2560. Arduino Mega 2560 memiliki 54 pin digital *input/output*, di mana 15 pin dapat digunakan sebagai *output* PWM, 16 pin sebagai *input* analog, dan 4 pin sebagai UART (*port serial hardware*). Selain itu, papan ini dilengkapi dengan kristal osilator 16 MHz, koneksi USB, jack *power*, header ICSP, serta tombol *reset*. Seluruh fitur tersebut mendukung kinerja mikrokontroler dalam berbagai aplikasi. [27].



Gambar 2.7 Arduino Mega 2560 [27]

Pada Gambar 2.7 ditunjukkan mikrokontroler Arduino Mega 2560, yang merupakan suatu *Integrated Circuit* (IC) yang di dalamnya terdapat *Central Processing Unit* (CPU), *Read Only Memory* (ROM), *Random Access Memory* (RAM), serta *input/output*. Mikrokontroler dapat melakukan proses pengolahan data berdasarkan program yang telah dimasukkan, karena di dalamnya telah tertanam CPU [28]. Gambar 2.8 merupakan *datasheet* pin Arduino Mega 2560, sedangkan pada Tabel 2.9 ditampilkan spesifikasi dari Arduino Mega 2560.



Gambar 2.8 Pin Out Arduino Mega 2560 [28]

Tabel 2. 9 Spesifikasi Arduino Mega 2560 [29]

Parameter	Spesifikasi
Mikrokontroler (<i>Microcontroller Chip</i>)	ATmega2560
Tegangan Operasi (<i>Operating Voltage</i>)	5 V
Tegangan Masukan yang Disarankan (<i>Recommended Input Voltage</i>)	7–12 V DC
Batas Tegangan Masukan (<i>Input Voltage Limit</i>)	6–20 V DC
Pin Digital I/O	54 pin
Pin PWM	15 pin
Pin Masukan Analog (<i>Analog Input Pins</i>)	16 pin
Arus Maksimum per Pin I/O (<i>DC Current per I/O Pin</i>)	20 mA
Arus Maksimum Pin 3.3 V	50 mA
Memori Flash (<i>Flash Memory</i>)	256 KB (8 KB digunakan untuk <i>bootloader</i>)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Kecepatan Clock (<i>Clock Speed</i>)	16 MHz

2.10 Push Button

Push button merupakan komponen elektronika yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan dua titik atau lebih dalam suatu rangkaian elektronika. Push button adalah salah satu jenis saklar yang akan menghubungkan dua titik atau lebih saat tombol ditekan, dan akan memutuskan hubungan tersebut saat tombol tidak ditekan [30]. Bentuk fisik *push button* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 PushButton [30]

Switch push button adalah saklar tekan yang berfungsi untuk menghubungkan atau memisahkan bagian-bagian dari suatu instalasi listrik satu sama lain. Suatu sistem saklar tekan (*push button*) terdiri dari saklar tekan *start*, *stop*, *reset*, serta saklar tekan untuk kondisi darurat (*emergency*). Push button memiliki dua jenis kontak, yaitu NC (*normally closed*) dan NO (*normally open*). Sebagai perangkat penghubung atau pemutus, *push button switch* hanya memiliki dua kondisi, yaitu *ON* dan *OFF* (1 dan 0). Kondisi *ON* dan *OFF* ini sangat penting karena semua perangkat listrik yang menggunakan sumber energi listrik memerlukan kedua kondisi tersebut [31]. Untuk spesifikasinya ditampilkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Spesifikasi PushButton [30]

Parameter	Nilai	Keterangan
Tipe	PBS-33B	Model push button
Diameter Lubang Mounting	12 mm	Ukuran lubang panel pemasangan
Rating Arus	1 A	Arus maksimum yang dapat dialirkan
Tipe Kontak	NO	Normally Open

Parameter	Nilai	Keterangan
Tipe Kerja	Push to ON	OFF saat dilepas, ON saat ditekan
Suhu Operasi	-25 – +85 °C	Rentang suhu lingkungan kerja
Resistansi Kontak	50 mΩ	Hambatan pada kontak saat terhubung
Resistansi Isolasi	100 MΩ	Hambatan isolasi antar terminal

2.11 LCD I2C

LCD (*Liquid Crystal Display*) merupakan salah satu media tampilan yang menggunakan kristal cair sebagai elemen utama untuk menampilkan informasi. LCD dapat menampilkan karakter atau gambar karena terdiri dari banyak titik cahaya (piksel), di mana setiap piksel dibentuk oleh kristal cair. Meskipun disebut sebagai titik cahaya, kristal cair tidak memancarkan cahaya sendiri, melainkan memanfaatkan cahaya dari sumber lain (*backlight*).

LCD 16x2 mampu menampilkan hingga 32 karakter, yang terdiri dari 2 baris, dengan masing-masing baris menampilkan 16 karakter [32]. Bentuk fisik LCD 16x2 ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 LCD I2C [32]

Pada Gambar 2.10 ditunjukkan LCD 16×2 yang pada umumnya menggunakan 16 pin sebagai jalur kontrol. Penggunaan seluruh pin tersebut dinilai kurang efisien karena membutuhkan banyak pin pada mikrokontroler. Oleh karena itu, digunakan modul driver I2C (*Inter-Integrated Circuit*) agar jumlah pin yang digunakan dapat dikurangi [32]. Dengan menggunakan modul I2C, LCD 16×2 hanya memerlukan dua pin untuk komunikasi data, yaitu SDA dan SCL, serta dua

pin untuk catu daya. Dengan demikian, hanya diperlukan empat pin yang dihubungkan ke Arduino Mega, yaitu :

- a. GND : Terhubung ke ground
- b. VCC : Terhubung dengan 5V
- c. SDA : Sebagai I2C data dan terhubung ke pin Digital
- d. SCL : Sebagai I2C data dan terhubung ke pin Digital

2.12 Sensor Ultrasonik HC-SR04

HC-SR04 menggunakan prinsip pantulan gelombang ultrasonik untuk mengukur jarak. Ketika gelombang tersebut terpantul, maka penerima pada sensor akan memberikan sinyal pulsa ke mikrokontroler. Cara kerja sensor ultrasonik adalah dengan mengubah besaran fisis/bunyi menjadi besaran Listrik [33]. Sensor ini digunakan untuk mengukur jarak benda dari 2cm - 4m dengan akurasi 3mm. Tampilan fisik sensor diperlihatkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Sensor Ultrasonik HC-SR04 [29]

Sensor ultrasonik HC-SR04 ini terdapat transmitter yang berfungsi untuk memancarkan gelombang ultrasonik yang akan diterima, lalu timer akan secara otomatis dapat aktif dan pin echo akan berada pada keadaan tinggi. Gelombang ultrasonik yang dikeluarkan oleh sensor akan bekerja dengan cara memantul saat gelombang tersebut bertemu dengan penghalang pada saat gelombang merambat. Gelombang ultrasonik yang dipantulkan selanjutnya akan diterima oleh receiver dan mengubah keadaan pin echo menjadi low. Rentan jarak obyek dengan sensor ultrasonik bisa dihitung dilihat dari berapa lama waktu pin echo ketika dalam keadaan high. Jarak antara transmitter dan halangan bisa dihitung, yaitu melalui persamaan (2.18) dibawah ini dan untuk prinsip kerja dapat dilihat pada Gambar 2.12.

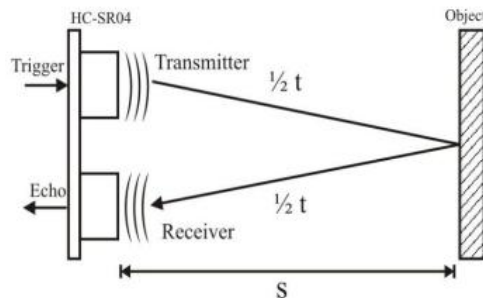
$$S = v.t / 2 \quad (2.18)$$

Keterangan :

S = jarak dalam satuan meter (m)

v = kecepatan dalam satuan meter per sekon (340 m/s)

t = waktu dalam satuan sekon (s)



Gambar 2.12 Prinsip kerja HC-SR04 [32]

2.13 Modul Step Down XL4005

XL4005 bekerja menggunakan metode *switching* dengan frekuensi sekitar 180 kHz sehingga memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan regulator linear. Modul ini memiliki rentang tegangan masukan sekitar 5 V hingga 32 V DC dan menghasilkan tegangan keluaran yang dapat diatur mulai dari 0,8 V hingga 30 V DC. Prinsip kerja XL4005 dilakukan dengan mengatur *duty cycle* sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Ketika transistor *switching* aktif, energi disimpan pada induktor dan saat transistor nonaktif, energi dilepaskan menuju beban melalui dioda dan kapasitor sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil [34]

Pada penelitian ini, modul *step-down* XL4005 digunakan untuk menurunkan tegangan sumber menjadi 5 V sebagai catu daya mikrokontroler dan sensor. Penggunaan modul XL4005 dipilih karena memiliki efisiensi tinggi, ukuran yang kecil, serta mampu menyuplai arus yang cukup besar untuk kebutuhan sistem elektronik. Bentuk fisik modul dapat dilihat pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Buck Converter 5V [34]

Modul ini banyak digunakan pada sistem elektronika karena mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan arus keluaran yang cukup besar. Selain itu, XL4005 memiliki beberapa spesifikasi teknis yang mendukung kinerja modul dalam berbagai aplikasi elektronika. Spesifikasi modul *step-down* XL4005 dapat dilihat pada **Tabel 2.11** berikut.

Tabel 2. 11 Spesifikasi Buck Converter [34]

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Tegangan input	5 V – 32 V DC	V
Tegangan output	0,8 V – 30 V DC	V
Arus maksimum	5	A
Frekuensi switching	180	kHz
Efisiensi	Hingga 95%	%
Proteksi	Short circuit dan overheat	-

2.14 Baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) 12V 12Ah

Baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) merupakan salah satu jenis baterai *rechargeable* (dapat diisi ulang) yang menggunakan material *lithium iron phosphate* sebagai katoda dan karbon grafit sebagai anoda. Baterai ini termasuk dalam keluarga baterai *lithium-ion* yang memiliki keunggulan dalam hal stabilitas termal, keamanan, serta umur siklus yang panjang dibandingkan dengan jenis baterai *lithium-ion* lainnya [35].

Struktur kimia LiFePO₄ yang stabil menyebabkan baterai ini memiliki ketahanan yang tinggi terhadap suhu panas serta mampu meminimalkan risiko terjadinya *thermal runaway*. Dengan demikian, kemungkinan terjadinya kebakaran atau ledakan akibat suhu tinggi menjadi lebih rendah dibandingkan dengan baterai *lithium-ion* konvensional [36].

Tegangan nominal baterai LiFePO₄ bergantung pada jumlah sel (cell) yang digunakan. Setiap sel LiFePO₄ memiliki tegangan nominal sebesar 3,2 V. Oleh karena itu, untuk menghasilkan tegangan 12 V diperlukan 4 sel yang disusun secara

seri. Tegangan nominal baterai dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.19) berikut:

$$V_{nom} = N_{cell} \times 3.2 \quad (2.19)$$

Keterangan :

V_{nom} = tegangan nominal baterai (V)

N_{cell} = jumlah sel

Kapasitas baterai menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus dalam jangka waktu tertentu. Kapasitas dinyatakan dalam satuan ampere-hour (Ah) dan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.20) berikut:

$$C = I \times t \quad (2.20)$$

Keterangan :

C = kapasitas baterai (*ampere-hour*, Ah)

I = arus beban (*ampere*, A)

t = waktu operasi (*hour*, jam)

Selain itu, untuk mengetahui arus yang dibutuhkan oleh suatu sistem berdasarkan daya dan tegangan yang digunakan, dapat digunakan hubungan dasar antara daya, tegangan, dan arus. Hubungan tersebut dinyatakan dalam Persamaan (2.21) berikut:

$$I = \frac{P}{V} \quad (2.21)$$

Keterangan :

I = arus listrik (A)

P = daya listrik (W)

V = tegangan listrik (V)



Gambar 2.14 Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) 12V 12Ah [36]

Tabel 2. 12 Spesifikasi Baterai LiFePO_4 12V 12Ah [36]

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Tegangan nominal	12	V
Kapasitas	12	Ah
Energi	144	Wh
Tegangan <i>cut-off</i>	10–11	V
Siklus pengisian	2000–4000	siklus
Arus maksimum	10–20	A
Suhu pengisian	0–45	°C
Suhu operasi	–20–60	°C

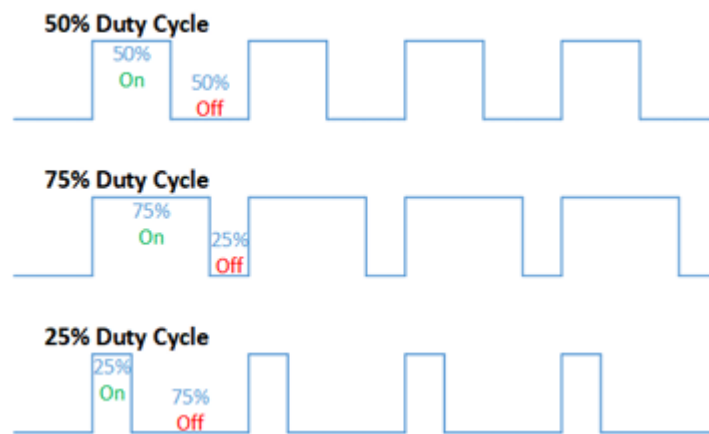
Berdasarkan **Tabel 2.12** tersebut, baterai LiFePO_4 12 V 12 Ah memiliki keunggulan berupa umur siklus yang panjang, kestabilan tegangan selama proses *discharge*, serta efisiensi energi yang tinggi. Karakteristik ini sangat penting dalam aplikasi sistem kendali, seperti pada robot *mobile* dan sistem *lifting*, karena dapat menjaga performa aktuator tetap stabil dan mengurangi penurunan kinerja akibat fluktuasi tegangan [37]. Selain itu, baterai LiFePO_4 juga memiliki tingkat *self-discharge* yang rendah sehingga mampu mempertahankan kapasitas dalam jangka waktu yang lebih lama. Oleh karena itu, baterai ini sangat cocok digunakan sebagai sumber daya pada sistem yang membutuhkan keandalan tinggi dan penggunaan jangka panjang .

2.15 Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) adalah metode yang cukup efektif untuk mengendalikan kecepatan motor DC. PWM ini bekerja dengan membuat gelombang persegi yang memiliki frekuensi tetap, rasio (*duty cycle*) pulsa tinggi terhadap pulsa rendah yang telah ditentukan, yang bisa diatur dari 0% hingga 100%. Rasio pulsa tinggi terhadap pulsa rendah digunakan untuk mengatur penyambungan (*switch*) suplay tegangan terminal motor DC. Semakin besar lebar pulsa tinggi dari

pada pulsa rendah berarti penyambungan suplay tegangan terminal motor mendapat porsi waktu yang lebih lama, menyebabkan kecepatan motor semakin besar.

PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah sebuah metode pengendalian motor dengan cara mengatur lebar pulsa yang dikirimkan pada frekuensi yang tetap ke motor. Sinyal pengendali hanya berupa sinyal *on* dan *off*. Dengan mengatur perbandingan lamanya sinyal *on* dan *off* yang diberikan, maka dapat diperoleh perubahan kecepatan pada motor, atau yang dikenal dengan *duty cycle*. *Duty cycle* adalah waktu sinyal pada kondisi on dibandingkan dengan periode sinyal [38] Dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Variasi *duty cycle*.

Semakin lama waktu sinyal berada pada kondisi ON, maka semakin besar tegangan rata-rata yang diterima oleh motor sehingga kecepatan putarnya meningkat. Sebaliknya, apabila waktu ON semakin pendek, tegangan rata-rata yang diterima motor akan semakin kecil sehingga kecepatan putarnya menurun. Dengan prinsip tersebut, PWM mampu menghasilkan pengaturan kecepatan motor secara efisien tanpa mengubah besar tegangan sumber. Periode sinyal PWM dapat dinyatakan pada persamaan (2.22) sebagai berikut.

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \quad (2.22)$$

sedangkan frekuensi PWM dihitung menggunakan persamaan (2.23)

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.23)$$

dengan:

T = periode sinyal PWM (detik)

T_{ON} = waktu sinyal HIGH

T_{OFF} = waktu sinyal LOW

f = frekuensi PWM (Hz)

Nilai *duty cycle* dihitung berdasarkan perbandingan antara waktu sinyal berada pada kondisi ON terhadap total satu periode sinyal PWM. Persamaan (2.24) yang digunakan untuk menghitung *duty cycle* adalah

$$Duty Cycle = \frac{T_{ON}}{T} \times 100\% \quad (2.24)$$

atau dapat dituliskan pada persamaan (2.25) sebagai berikut :

$$Duty Cycle = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \times 100\% \quad (2.25)$$

2.16 Sensor MPU6050

Sensor MPU6050 merupakan sensor *Micro Electro Mechanical System* (MEMS) yang memiliki *accelerometer* tiga sumbu dan *gyroscope* tiga sumbu dalam satu modul. Pada penelitian ini, sensor MPU6050 hanya dimanfaatkan sebagai *accelerometer* untuk mengukur perubahan sudut mekanisme *lifting* selama proses pengangkatan beban. Pembacaan sudut tersebut digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi besarnya osilasi yang terjadi pada sistem. Implementasi pada penelitian ini tidak menggunakan data *gyroscope*, *Kalman filter*, maupun *Complementary filter*, melainkan menghitung sudut secara langsung menggunakan data percepatan pada sumbu Y dan Z melalui fungsi $\text{atan2}()$ sesuai dengan program yang diimplementasikan pada mikrokontroler. Penggunaan metode tersebut dipilih karena mampu memberikan perhitungan sudut yang sederhana dan sesuai untuk pengamatan perubahan kemiringan pada sistem *lifting*.

2.16.1 Pengukuran Osilasi Menggunakan Sensor MPU6050

Sensor MPU6050 merupakan sensor *Micro Electro Mechanical System* (MEMS) yang mampu mendeteksi perubahan gerakan pada suatu sistem. Pada penelitian ini, sensor MPU6050 digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi pada mekanisme *lifting* selama proses pengangkatan beban. Pembacaan sensor

dilakukan secara kontinu selama aktuator bergerak naik, kemudian data getaran absolut (*getaranAbs*) direkam melalui komunikasi serial untuk dianalisis lebih lanjut. Data tersebut digunakan sebagai *performance indicator* dalam proses *tuning open-loop membership function fuzzy*. Semakin kecil nilai osilasi yang diperoleh, maka sistem *lifting* memiliki respons yang semakin stabil sehingga parameter *membership function* tersebut dipilih sebagai parameter terbaik[39].

Data hasil pembacaan sensor berupa nilai getaran absolut (*getaranAbs*) selanjutnya diolah untuk memperoleh nilai osilasi menggunakan metode standar deviasi. Sebelum menghitung standar deviasi, terlebih dahulu dihitung nilai rata-rata data getaran menggunakan Persamaan (2.26).

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i \quad (2.26)$$

dengan:

$\bar{G}$ = rata-rata data getaran

G_i = nilai *getaranAbs* pada data ke- i

n = jumlah data pengukuran

Setelah nilai rata-rata diperoleh, besarnya osilasi dihitung menggunakan persamaan standar deviasi sebagai berikut.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}{n-1}} \quad (2.27)$$

dengan:

σ = nilai osilasi (*standard deviation*)

G_i = nilai *getaranAbs* hasil pembacaan sensor MPU6050 pada data ke- i

$\bar{G}$ = rata-rata data getaran

n = jumlah data pengukuran

Nilai standar deviasi digunakan sebagai indikator performa dalam penelitian ini karena mampu menunjukkan besarnya penyebaran data getaran selama proses *lifting*. Semakin kecil nilai standar deviasi yang diperoleh, maka amplitudo getaran yang dihasilkan semakin kecil sehingga sistem memiliki respons yang lebih stabil. Sebaliknya, semakin besar nilai standar deviasi menunjukkan bahwa sistem menghasilkan osilasi yang lebih tinggi selama proses pengangkatan beban. Oleh karena itu, hasil *tuning open-loop membership function fuzzy* dievaluasi

berdasarkan nilai standar deviasi dari data getaranAbs, sehingga *membership function* yang menghasilkan nilai osilasi paling kecil dipilih sebagai parameter akhir sistem.