



TUGAS AKHIR (AE43250)

ANALISA PERFORMANSI KINERJA SENSOR LIDAR UNTUK REKONSTRUKSI VOLUMETRIK 3D BERBASIS *TRAPEZOIDAL NUMERICAL INTEGRATION*

**AHMAD NANDA AULIA RAHMAN
NRP. 0921040024**

**DOSEN PEMBIMBING
RYAN YUDHA ADHITYA, S.T., M.T.
ZINDHU MAULANA AHMAD PUTRA, S.ST., M.Tr.T**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025**



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (AE43250)

**ANALISA PERFORMANSI KINERJA SENSOR LIDAR
UNTUK REKONSTRUKSI VOLUMETRIK 3D BERBASIS
TRAPEZOIDAL NUMERICAL INTEGRATION**

**AHMAD NANDA AULIA RAHMAN
NRP. 0921040024**

**DOSEN PEMBIMBING
RYAN YUDHA ADHITYA, S.T., M.T.
ZINDHU MAULANA AHMAD PUTRA, S.ST., M.Tr.T**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISA PERFORMANSI KINERJA SENSOR LIDAR UNTUK REKONSTRUKSI VOLUMETRIK 3D BERBASIS *TRAPEZOIDAL* *NUMERICAL INTEGRATION*

Disusun Oleh:

Ahmad Nanda Aulia Rahman
0921040024

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi Teknik Otomasi
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 22 Juli 2025
Periode Wisuda : Oktober 2025

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Edy Setiawan, S.T., M.T.
2. Zindhu Maulana Ahmad Putra, S.ST., M.Tr.T.
3. Dimas Pristovani Riananda, S.ST., M.T.
4. Mirza Ardiana, S.Tr.T., M.Tr.T.

NUPTK

(3843757658130122)
(7255772673130273)
(9363771672130193)
(8435776677230172)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T.
2. Zindhu Maulana Ahmad Petra, S.ST., M.Tr.T.

NUPTK

(9948769670130352)
(7255772673130273)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,


Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP. 198008162008121001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Agus Khumaidi, S.ST., M.T.
NIP. 199308172020121004

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR BEBAS PLAGIAT

 PPNS PENGAKHIRAN PENGAKHIRAN PENGAKHIRAN	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
--	--	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Ahmad Nanda Aulia Rahman

NRP. : 0921040024

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/D4 Teknik Otomasi

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**ANALISA PERFORMANSI KINERJA SENSOR LIDAR UNTUK
REKONSTRUKSI VOLUMETRIK 3D BERBASIS *TRAPEZOIDAL*
*NUMERICAL INTEGRATION***

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 25 Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,


(Ahmad Nanda Aulia Rahman)
NRP. 0921040024



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan ridho-Nya, sehingga Tugas Akhir berjudul “**Analisa Performansi Kinerja Sensor Lidar untuk Rekonstruksi Volumetrik 3D Berbasis Trapezoidal Numerical Integration**” dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat penyelesaian studi pada Program Studi Teknik Otomasi, Diploma IV, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis menyampaikan terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan doa, dukungan, dan bimbingan. Ucapan terimakasih ini, penulis sampaikan khususnya kepada:

1. Ayah Mashadi dan Ibu Mahillawati tercinta atas kasih sayang, doa, dan semangat yang tiada henti untuk penulis.
2. Kakak-kakak tercinta, Ahmad Amril Nurman, S.T. dan Ahmad Widi Santoso, S.Sn. yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan kepada penulis.
3. Secara khusus, penulis juga ingin berterima kasih kepada diri sendiri yang telah berjuang sejauh ini dan mampu bertahan menghadapi berbagai tantangan serta rintangan tanpa memilih untuk menyerah. Semoga segala ilmu dan pengalaman yang diperoleh selama masa studi ini dapat menjadi bekal yang bermanfaat serta membawa keberkahan, baik di dunia maupun di akhirat.
4. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T.,M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Bapak Agus Khumaidi, S.ST.,M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
7. Bapak Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah membimbing, mengarahkan, dan memberi motivasi penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.

8. Bapak Zindhu Maulana Ahmad Putra, S.ST., M.Tr.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah membimbing dan mengarahkan penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
9. Seluruh Dosen Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama penulis menjalankan studi.
10. Kepada seluruh keluarga besar tim robot tari Artship PPNS, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan, kebersamaan, serta semangat yang telah diberikan. Lingkungan tim yang penuh kekeluargaan dan kerjasama telah menjadi motivasi berharga bagi penulis, tidak hanya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, tetapi juga dalam menambah pengalaman, wawasan, dan pembelajaran yang sangat berarti.
11. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Semoga segala kebaikan tersebut mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan ke depan. Besar harapan penulis, karya ini dapat memberi manfaat, baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca

Penulis,

Ahmad Nanda Aulia Rahman

ANALISA PERFORMANSI KINERJA SENSOR LIDAR UNTUK REKONSTRUKSI VOLUMETRIK 3D BERBASIS *TRAPEZOIDAL NUMERICAL INTEGRATION*

Ahmad Nanda Aulia Rahman

ABSTRAK

Penelitian ini membahas rekonstruksi volumetrik tiga dimensi untuk mengukur volume gabah dalam silo menggunakan sensor lidar dengan metode *trapezoidal numerical integration*. Tiga sensor yang digunakan yaitu Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-Lidar A1. Garmin V3 dan V3HP dipadukan dengan mikrokontroler ESP32 serta aktuator Dynamixel AX-12 untuk menghasilkan pemindaian dua sumbu (x, y). Sementara itu, RP-Lidar A1 tetap menggunakan Dynamixel AX-12 untuk sumbu X, sedangkan sumbu Y menggunakan data sudut bawaan sensor lidar. Data hasil pemindaian diproyeksikan ke grid untuk membentuk model permukaan yang kemudian dihitung volumenya menggunakan pendekatan *trapezoidal numerical integration*. Pengujian dilakukan pada silo berbentuk tabung berkapasitas 1.500 liter dengan variasi massa gabah 13,3 kg, 30,8 kg, dan 42,6 kg, serta lima kondisi permukaan berbeda. Hasil menunjukkan bahwa Garmin V3HP memiliki akurasi terbaik dengan rata-rata galat 10,92%, diikuti Garmin V3 sebesar 15,28%, sedangkan RP-Lidar A1 mencapai 23,57%. Dengan demikian, sensor paling aplikatif adalah lidar V3HP, meskipun akurasi keseluruhan masih perlu ditingkatkan melalui strategi pemindaian yang lebih optimal.

Kata Kunci : Lidar, *Trapezoidal*, Silo, Data TXT, *Localhost*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERFORMANCE ANALYSIS OF LIDAR SENSOR EFFICIENCY FOR 3D VOLUMETRIC RECONSTRUCTION USING TRAPEZOIDAL NUMERICAL INTEGRATION BASE

Ahmad Nanda Aulia Rahman

ABSTRACT

This research discusses the implementation of three-dimensional volumetric reconstruction to measure the volume of rice grains in a silo using lidar sensors with the trapezoidal numerical integration method. Three sensors were employed: Garmin V3, Garmin V3HP, and RP-Lidar A1. The Garmin V3 and V3HP were integrated with an ESP32 microcontroller and Dynamixel AX-12 actuators to perform two-axis (x, y) scanning. Meanwhile, the RP-Lidar A1 still utilized the Dynamixel AX-12 for the X-axis, while the Y-axis was obtained from the sensor's built-in angular data. The scanning results were projected onto a grid to generate a surface model, and the volume was subsequently calculated using the trapezoidal numerical integration approach. Experiments were conducted on a cylindrical silo with a capacity of 1,500 liters under different rice grain mass variations of 13.3 kg, 30.8 kg, and 42.6 kg, as well as five surface conditions (concave, highly concave, peaked, nearly flat, and half-filled). The results showed that Garmin V3HP achieved the highest accuracy with an average error of 10.92%, followed by Garmin V3 with 15.28%, while RP-Lidar A1 exhibited the largest error at 23.57%. Therefore, the most applicable sensor for this system is the Garmin V3HP, although overall accuracy still needs to be improved through more optimal scanning strategies.

Keywords: Lidar, Trapezoidal, Silo, TXT Data, Localhost.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian terdahulu	5
2.1.1 Silo.....	6
2.1.2 <i>Trapezoidal</i>	8
2.1.3 <i>Point-clouds</i>	10
2.1.4 <i>Moving Average</i>	10
2.1.5 Perangkat Keras Yang di Gunakan.....	11
2.1.6 ESP-32.....	12
2.1.7 Dynamixel AX-12	13
2.1.8 Garmin LIDAR-Lite V3	14
2.1.9 Garmin LIDAR-Lite V3HP.....	16
2.1.10 RP LIDAR A1	17
2.1.11 Power Supply.....	18
2.1.12 Regulator XL4005	19
2.1.13 Buzzer 12v.....	20

2.1.14 Laptop Asus X415DAP	20
2.1.15 <i>Push Button</i>	21
2.2 Perangkat Lunak Yang di Gunakan	21
2.2.1 <i>Eagel</i>	22
2.2.2 Arduino IDE.....	23
2.2.3 <i>Visual Studio Code</i>	25
2.2.4 Node Js.....	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Konsep Penelitian	29
3.1.1 Konsep Sistem	29
3.1.2 Alur Kerja Sistem	30
3.1.3 Menghitung Massa Jenis Gabah	31
3.1.4 Moving Average	33
3.1.5 Konsep Numerical Integration.....	34
3.1.6 Konsep Pengambilan Data TXT Dari ESP-32.....	37
3.2 <i>State of The Art</i>	38
3.3 Tahapan Penelitian.....	40
3.3.1 Identifikasi Masalah.....	41
3.3.2 Studi Literatur	41
3.3.3 Analisa Kebutuhan Sistem.....	43
3.3.4 Perancangan Sistem	44
3.3.5 Perancangan & Realisasi <i>Hardware</i>	44
3.3.6 Perancangan & Realisasi <i>Software</i>	45
3.3.7 Uji Keseluruhan Sistem	45
3.3.8 Evaluasi & Diskusi	45
3.3.9 Penyusunan Laporan Penelitian.....	46
3.4 Perencanaan dan Desain	46
3.4.1 Desain Mekanisme.....	46
3.5 Perencanaan <i>Hardware</i>	49
3.5.1 <i>Interface Website</i>	50
3.6 Sistem Validasi	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	51

4.1	Hasil Pengujian <i>Hardware</i>	51
4.1.1	Uji Parsial Sensor Lidar Garmin V3	51
4.1.2	Uji Parsial Sensor Lidar Garmin V3HP	53
4.1.3	Uji Parsial Sensor RP Lidar A1	56
4.1.4	Pengujian <i>Emergency Button</i>	59
4.1.5	Pengujian Dynamixel AX-12	60
4.2	Validasi Perhitungan	62
4.2.1	Perhitungan x,y,z	62
4.2.2	Perhitungan <i>Trapezoidal</i>	65
4.3	Tampilan pada <i>website</i>	66
4.4	Pengujian Lidar Garmin V3	67
4.4.1	Lidar Garmin V3 13.3 kg	68
4.4.2	Lidar Garmin V3 30.8 kg	71
4.4.3	Lidar Garmin V3 42.6 kg	74
4.4.4	Performansi Lidar V3	75
4.5	Pengujian Lidar Garmin V3HP	76
4.5.1	Lidar Garmin v3hp 13.3 kg	77
4.5.2	Lidar Garmin v3hp 30.8 kg	77
4.5.3	Lidar Garmin v3hp 42.6 kg	78
4.5.4	Performansi Lidar V3HP	78
4.6	Pengujian RP-Lidar A1	79
4.6.1	RP-Lidar A1 13.3 kg	79
4.6.2	RP-Lidar A1 30.8 kg	80
4.6.3	RP-Lidar A1 42.6 kg	81
4.6.4	Performansi RP-Lidar A1	81
4.7	Performansi Kinerja Semua Lidar	83
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran	86
DAFTAR PUSTAKA		89
LAMPIRAN.....		93
	Lampiran 1 Program Esp-32	93
	Lampiran 2 Biodata Mahasiswa	101

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Esp-32	12
Tabel 2. 2 Spesifikasi dynamixel ax-12a.....	14
Tabel 2. 3 Lidar Garmin V3	15
Tabel 2. 4 Lidar Garmin V3HP	17
Tabel 2. 5 RP Lidar A1	18
Tabel 4. 1 Data uji parsial lidar v3	53
Tabel 4. 2 Data uji parsial v3hp	55
Tabel 4. 4 Pengujian parsial Dynamixel AX-12	61
Tabel 4. 5 Pengujian lidar v3 13.3 kg	71
Tabel 4. 6 Pengujian Lidar v3 pada 30.8 kg.....	73
Tabel 4. 7 Pengujian Lidar v3 pada 42.6 kg.....	75
Tabel 4. 8 Performansi lidar v3	75
Tabel 4. 9 Pengujian lidar v3hp 13.3 kg	77
Tabel 4. 10 Pengujian lidar v3hp 30.8 kg	77
Tabel 4. 11 Pengujian lidar v3hp pada massa 42.6 kg	78
Tabel 4. 12 Performansi lidar v3hp.....	78
Tabel 4. 13 Pengujian rp-lidar a1 13.3 kg	80
Tabel 4. 14 Pengujian rp-lidar a1 30.8 kg	80
Tabel 4. 15 Pengujian rp-lidar a1 42.6 kg	81
Tabel 4. 16 Performansi rp-lidar a1.....	81
Tabel 4. 17 Hasil performansi semua lidar.....	83

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Silo.....	7
Gambar 2. 2 Metode trapesium	8
Gambar 2. 3 Metode trapesium ganda.....	8
Gambar 2. 4 Point clouds	10
Gambar 2. 5 Esp-32.....	12
Gambar 2. 6 Dynamixel AX-12	13
Gambar 2. 7 Lidar V3	15
Gambar 2. 8 Lidar V3HP	16
Gambar 2. 9 Rp-Lidar A1	17
Gambar 2. 10 Power supply	19
Gambar 2. 11 XL4005.....	19
Gambar 2. 12 Buzzer.....	20
Gambar 2. 13 Laptop asus X415DAP	21
Gambar 2. 14 Push button	21
Gambar 2. 15 Eagel.....	23
Gambar 2. 16 Arduino IDE	24
Gambar 2. 17 Vs code	26
Gambar 2. 18 Node js.....	27
Gambar 3. 1 Konsep sistem.....	29
Gambar 3. 2 Alur kerja sistem.....	30
Gambar 3. 3 Diameter wadah ukur	31
Gambar 3. 4 Tinggi wadah ukur.....	31
Gambar 3. 5 Massa jenis gabah.....	32
Gambar 3. 6 Pembacaan lidar pada koordinat kartesian	34
Gambar 3. 7 Proyeksi 2D dari poin (x,y)	35
Gambar 3. 8 Proyeksi 2D dari pembacaan lidar.....	35
Gambar 3. 9 Proyeksi 2D (x,y)	36
Gambar 3. 10 Tahapan penelitian.....	40
Gambar 3. 11 Desain mekanisme 1	47
Gambar 3. 12 Desain mekanisme 2.....	47
Gambar 3. 13 Penerapan Mekanisme Pada Silo	48
Gambar 3. 14 Perencanaan <i>Hardware</i>	49

Gambar 3. 15 Konfigurasi <i>hardware</i>	49
Gambar 3. 16 Interface website	50
Gambar 4. 1 Uji parsial lidar v3	52
Gambar 4. 2 wiring lidar v3.....	52
Gambar 4. 3 wiring lidar garmin v3hp	54
Gambar 4. 4 Uji parsial v3hp.....	54
Gambar 4. 5 Koneksi rp-lidar a1	56
Gambar 4. 6 Serial monitor Uji parsial rp-lidar a1	57
Gambar 4. 7 Tombol di tekan	59
Gambar 4. 8 Tombol tidak di tekan	60
Gambar 4. 9 Pengujian Parsial Dynamixel AX-12.....	60
Gambar 4. 10 Serial monitor uji coba.....	62
Gambar 4. 11 Tampilan login website.....	66
Gambar 4. 12 Tampilan 3d visual website	67
Gambar 4. 13 Penimbangan gabah 13.3 kg	68
Gambar 4. 14 Keadaan asli kondisi cekung gabah pada silo.....	69
Gambar 4. 15 Tampilan website Kondisi cekung gabah pada silo.....	70
Gambar 4. 16 Penambahan massa gabah 17.5 kg.....	71
Gambar 4. 17 Keadaan asli kondisi sangat cekung gabah pada silo.....	72
Gambar 4. 18 Tampilan website kondisi sangat cekung gabah pada silo.....	73
Gambar 4. 19 Penambahan berat gabah 11.8 kg.....	74

DAFTAR NOTASI

r_0	=	Titik awal interval perhitungan
$\theta_{x_{max}}$	=	Maksimal theta servo roll
$\theta_{y_{max}}$	=	Maksimalt heta servo pitch
ds	=	Proyeksi diagonal sisi dari bagun datar (x,y)
$z_{dinamis}$	=	Nilai z pada ruang kosong diatas permukaan material
$z_{material}$	=	Nilai z material
x	=	Sumbu kartesian x dari servo roll
y	=	Sumbu kartesian y dari servo pitch
z_0	=	Ketinggian silo
\bar{z}	=	Volume satu segmen <i>Trapezoidal</i>
Δx	=	Pergeseran jarak pada sudut servo roll
Δy	=	Pergeseran jarak pada sudut servo pitch
Σv	=	Volume total setelah keseluruhan segmen di jumlahkan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akurasi pengukuran volume pada silo menggunakan lidar dipengaruhi oleh deteksi awal dari sensor LiDAR terhadap bentuk permukaan objek yang di-*scanning* dan keterbatasan sudut pergerakan (Zindhu Maulana Ahmad Putra dkk., 2024). Berdasarkan alasan ini penulis ingin mengembangkan penelitian terkait deteksi volume pada silo dengan lidar menggunakan sensor lidar yang berbeda. Lidar yang di gunakan merupakan lidar garmin v3, lidar garmin v3hp, dan rp-lidar. Untuk aktuator, Penulis menggunakan dynamixel ax-12 dengan harapan pembacaan sensor lidar yang di dapat semakin baik karena pada penerapannya servo ini sering di gunakan dengan alasan kemudahan akses dan juga memiliki perpindahan sudut yang lebih akurat di bandingkan servo dengan pin pwm biasa (Ali & Shah, 2024).

Dalam industri modern, pengukuran volume material dalam silo menjadi salah satu aspek penting untuk memastikan efisiensi operasional dan akurasi dalam proses produksi. Metode pengukuran volume pada silo tidak hanya bertujuan untuk memantau ketersediaan bahan baku, tetapi juga untuk mengoptimalkan proses distribusi material ke unit-unit lain. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan menghitung debit material berdasarkan waktu pengisian dan volume material yang tersimpan, seperti yang diterapkan pada silo viskose berbasis kontrol elektro-pneumatik. Pendekatan ini menunjukkan bahwa perubahan volume material dalam silo utama secara langsung memengaruhi debit material yang dihasilkan, sehingga memberikan gambaran penting tentang hubungan antara parameter proses dan performa sistem penyimpanan. Implementasi metode ini dapat menjadi landasan bagi pengembangan sistem monitoring otomatis yang lebih akurat dan efisien di masa depan.

Pengukuran volume pada silo penting untuk efisiensi operasional dan pengelolaan material. Metode *Trapezoidal* digunakan karena mampu menangani permukaan tidak beraturan dengan akurasi tinggi. Dengan membagi area perhitungan menjadi grid kecil, metode ini mengintegrasikan data elevasi untuk

menghasilkan estimasi volume yang efisien, menjadikannya solusi tepat dalam memastikan pengelolaan material yang optimal.(Fathurrahman dkk., 2023)

Perusahaan pengguna silo perlu secara berkala memantau volume bahan yang ada di dalam silo untuk dapat mengetahui kebutuhan dan stok bahan yang tersedia. Sebelumnya, proses untuk mengetahui volume bahan di dalam silo dilakukan secara manual melalui operator yaitu dengan cara menggunakan sepotong logam yang dikaitkan dengan tali yang sudah diberikan label angka dalam satuan meter kemudian diturunkan secara perlahan dari atas silo guna mengetahui tingkat ketinggian bahan yang ada di dalam silo. Operator akan berhenti untuk menurunkan tali saat logam telah menyentuh permukaan bahan. Sehingga volume bahan dapat dihitung dengan cara mengurangi volume silo dengan volume bagian yang tidak terisi bahan yang dapat diketahui dari panjang tali yang diturunkan ke dalam silo(Clar dkk., 2022). Namun, cara ini tidak efektif dan banyak terjadi human *error* karena jika dilihat dari tingkat ketelitiannya yang masih kurang akurat dan juga berpotensi menyebabkan masalah keracunan karena logam yang menyentuh bahan. Sebagaimana diketahui pengukuran volume bahan di dalam silo merupakan elemen penting, karena jika terjadi kesalahan dalam pengukuran volume dapat berakibat fatal dalam manajemen pasokan dan logistik perusahaan.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan adanya latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini yaitu :

1. Bagaimana tingkat akurasi sensor LiDAR (Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-LiDAR A1) dalam memperkirakan volume dan berat material pada silo berbentuk tabung menggunakan metode *trapezoidal numerical integration*?
2. Seberapa efektif penerapan metode *trapezoidal numerical integration* dalam memperkirakan volume atau berat silo dengan permukaan yang tidak seragam?
3. Apakah terdapat perbedaan signifikan dalam stabilitas dan konsistensi pengukuran volume atau berat di antara ketiga sensor LiDAR yang digunakan dalam penelitian ini?

1.3 Batasan Masalah

Agar analisis dan pembahasan pada Tugas Akhir ini dapat lebih terarah dan fokus, maka diberikan batasan masalah diantaranya adalah :

1. Penelitian ini hanya memanfaatkan tiga tipe sensor LiDAR, yaitu Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-LiDAR A1, serta tidak mempertimbangkan jenis sensor lainnya.
2. Pengukuran volume dilakukan pada satu jenis silo dengan kapasitas 1500 liter dengan diameter 125 cm dan tinggi 125 cm berbentuk tabung, tanpa mempertimbangkan variasi ukuran dan bentuk silo lainnya.
3. Pendekatan perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini terbatas pada metode *trapezoidal numerical integration*, tanpa melakukan perbandingan dengan metode numerik lainnya yang lebih kompleks.
4. Pengujian dilakukan di lingkungan yang terkendali dengan kondisi tertentu, tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti perubahan suhu dan kelembaban yang dapat mempengaruhi kinerja sensor.
5. Material yang di hitung di batasi pada 1 macam bahan, yakni gabah kering dengan massa jenis $11,21 \text{ kg} / \text{m}^3$.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka penelitian ini memiliki beberapa poin tujuan diantaranya adalah :

1. Menganalisis dan membandingkan kinerja sensor LiDAR Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-LiDAR A1 dalam estimasi volume silo dengan mempertimbangkan akurasi dan konsistensi hasil pengukuran.
2. Mengevaluasi efektivitas metode *trapezoidal numerical integration* dalam menghitung volume silo berbentuk tabung yang memiliki permukaan tidak rata untuk menentukan sejauh mana metode ini dapat memberikan hasil yang akurat dan efisien.
3. Menilai perbedaan dalam stabilitas dan konsistensi pengukuran volume atau berat di antara ketiga sensor LiDAR

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian pada sub-bab 1.4, sehingga dapat di simpulkan bahwa penelitian ini memiliki manfaat penelitian sebagai berikut :

1. Mengetahui apakah 3 sensor yang di uji aplikatif dengan sistem yang di buat dalam tugas akhir ini.
2. Menganalisa kecocokan metode *trapezoidal* terhadap sistem yang di bangun dalam tugas akhir ini.
3. Mengembangkan penelitian terhadap sistem monitoring material pada silo industri.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan pustaka yang akan membahas penelitian terdahulu serta kajian pustaka yang mencakup berbagai hal yang akan digunakan dalam penelitian ini, seperti objek penelitian, metode yang diterapkan, perangkat keras (*hardware*), dan perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini, yang diambil dari berbagai sumber referensi, seperti jurnal ilmiah, buku, dan prosiding.

2.1 Kajian Penelitian terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya yang relevan meliputi karya(Laura dkk., 2021), yang mengembangkan prototipe untuk memantau dan mengendalikan pakan ternak dalam silo menggunakan sensor ultrasonik. Penelitian ini membantu peternak memantau ketersediaan pakan tanpa membuka silo, tetapi memiliki keterbatasan pada akurasi sensor, dengan perbedaan hasil pengukuran hingga 100–130 gram.

Penelitian yang dilakukan oleh (Wibowo, 2019) berjudul "Sistem Rekonstruksi Objek 3D dengan Metode LiDAR Menggunakan Mikrokontroller Arduino Mega" mengembangkan alat pemindai 3D berbasis LiDAR. Penelitian ini menggunakan LiDAR untuk menggantikan kamera dalam kondisi gelap dan merekonstruksi objek berbentuk silinder dalam citra 3D. Sistem ini memanfaatkan Arduino Mega sebagai pengolah data dan dua motor stepper bipolar untuk menggerakkan LiDAR secara vertikal dan memutar objek secara 360 derajat. Hasil pemindaian data berupa koordinat x, y, dan z diproses menggunakan Python untuk menghasilkan citra 3D objek. Meskipun berhasil mencitrakan objek berbentuk silinder, alat ini menunjukkan keterbatasan dalam merekonstruksi objek dengan bentuk kompleks seperti botol, serta mencatat *Error* sebesar 2 cm pada rentang jarak tertentu.

Penelitian oleh (Mutiarasari dkk., 2023) berjudul "Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data LiDAR" mengembangkan model 3D berbasis data point cloud dari teknologi LiDAR. Akuisisi data dilakukan menggunakan airborne LiDAR di area kampus Sekolah Vokasi UGM. Data point cloud diklasifikasikan secara otomatis dan manual menggunakan perangkat lunak Microstation v8i TerraSolid v16,

menghasilkan klasifikasi lima objek, yaitu ground, low vegetation, medium vegetation, high vegetation, dan buildings. Model 3D yang dihasilkan berupa bangunan dengan tingkat detil Level of Detail 2 (LoD2), mencakup bentuk blok bangunan dan struktur atap. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi klasifikasi otomatis dan manual dapat meningkatkan akurasi model, dengan RMSE vertikal sebesar 7,9 cm, yang masuk dalam kategori ketelitian vertikal kelas 1 berdasarkan Peraturan Kepala BIG No. 15 Tahun 2014. Hasil penelitian ini menjadi dasar penting untuk aplikasi pemodelan 3D yang efisien dan akurat.

Penelitian oleh (Claes, 2020) dengan judul "*Automated Dimension Calculations using a Constructed LiDAR 3D Scanner*" mengeksplorasi penggunaan LiDAR dalam platform rotasi untuk pemindaian 3D ruang tertutup. Penelitian ini mengembangkan platform yang mampu memproses point cloud menggunakan *Point Cloud Library* (PCL) untuk menghasilkan estimasi dimensi otomatis. Algoritma yang digunakan termasuk Random Sample Consensus (RANSAC) untuk segmentasi bidang dan histogram filtering untuk pra-pemrosesan data. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan estimasi dimensi otomatis dengan tingkat resolusi tinggi, meskipun terdapat *Error* pengukuran yang sebagian besar disebabkan oleh rotasi sensor dan keterbatasan platform fisik. Penelitian ini menyoroti potensi LiDAR sebagai alat untuk rekonstruksi volumetrik 3D dalam aplikasi seperti robotika dan pemetaan ruang tertutup, dengan tantangan utama berupa noise pada data akibat rotasi dan keterbatasan resolusi perangkat keras.

2.1.1 Silo

Silo adalah struktur penyimpanan yang dirancang untuk menyimpan bahan granular seperti biji-bijian, semen, batubara, pelet plastik, dan material curah lainnya. Silo biasanya digunakan dalam berbagai industri, termasuk pertanian, konstruksi, dan manufaktur, untuk mendukung efisiensi penyimpanan dan distribusi material. Secara umum, silo memiliki bentuk dasar silinder dengan pilihan dasar datar atau dasar berbentuk kerucut (hopper), tergantung pada kebutuhan operasional. Material pembuat silo meliputi baja, beton, atau kombinasi dari keduanya, yang dirancang untuk menahan berbagai beban seperti beban mati (berat silo itu sendiri), beban hidup (berat material yang disimpan), beban angin,

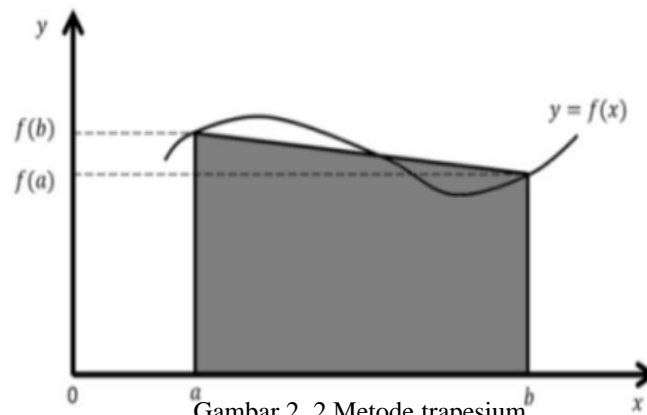
serta beban selama proses pengisian dan pengosongan material. Desain silo memerlukan analisis struktural yang cermat untuk memastikan ketahanan terhadap tekanan internal material dan kekuatan terhadap gaya eksternal.

Dalam konteks penelitian ini, silo dengan kapasitas 580 m³ dirancang untuk menyimpan pelet plastik. Analisis struktural dilakukan untuk menghitung tegangan lingkaran, aksial, dan ekuivalen yang terjadi pada dinding silo selama operasi. Penelitian ini menekankan pentingnya perancangan silo yang memenuhi standar teknis untuk memastikan keamanan dan efisiensi sistem penyimpanan. Selain itu, silo memainkan peran penting dalam mengoptimalkan logistik material dengan mengurangi waktu dan biaya yang diperlukan untuk pengangkutan bahan curah. Oleh karena itu, pemahaman tentang desain dan analisis silo menjadi aspek fundamental dalam pengembangan infrastruktur industri yang modern dan andal.(Patel dkk., 2019)

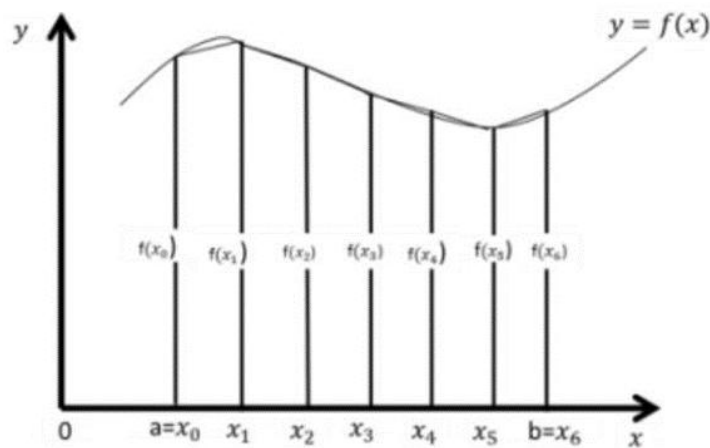


Gambar 2. 1 Silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

2.1.2 Trapezoidal



Gambar 2. 2 Metode trapesium
(Amrullah, 2019)



Gambar 2. 3 Metode trapesium ganda
(Amrullah, 2019)

Metode trapesium, atau *Trapezoidal*, adalah teknik integrasi numerik yang mengandalkan penjumlahan segmen-segmen dan bidang yang berbentuk trapesium (Tebo dkk., 2020). Metode ini diterapkan pada area atau luas yang memiliki bentuk tidak teratur. Segmen-segmen berbentuk trapesium ini akan mempengaruhi hasil perhitungan volume bahan baku di dalam silo.

Pada metode ini grafik fungsi $y = f(x)$ didekati dengan garis lurus yang membentuk titik $(a, f(a))$ dan $(b, f(b))$. Dengan demikian luas daerah dibatasi oleh kurva $y = f(x)$. Garis $x = a$ dan garis $x = b$ dihampiri oleh trapesium yang dibatasi oleh garis lurus yang menghubungkan titik $(a, f(a))$ dan $(b, f(b))$, garis $x = a$ dan garis $x = b$. Berikut merupakan rumus untuk mencari luas trapesium segmen tunggal dengan pendekatan integral yang ditunjukkan pada persamaan 2.1. Pada

metode trapesium segmen tunggal, kurva $y = f(x)$ digantikan dengan sebuah garis lurus antara $(a, f(a))$ dan $(b, f(b))$ yang kemudian membentuk trapesium. Namun, pendekatan ini sering kali memberikan estimasi dengan *Error* yang cukup besar, terutama jika kurva $y = f(x)$ memiliki banyak variasi atau

perubahan yang signifikan dalam interval $[a, b]$. Oleh karena itu, untuk mengurangi besarnya *Error* yang terjadi, dapat digunakan beberapa garis lurus untuk mendekati kurva lengkung secara sepotong-sepotong sehingga terbentuk beberapa daerah trapesium. Cara ini juga disebut sebagai metode trapesium segmen ganda. Untuk meningkatkan akurasi dan mengurangi nilai *Error*, interval $[a, b]$ dibagi menjadi n subinterval yang lebih kecil. Ini dilakukan dengan mengambil titik-titik pembagian $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$. Sehingga, didapatkan rumus untuk menghitung luas trapesium segmen ganda dengan pendekatan integral sesuai dengan persamaan 2.2.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{2}(f(a) + f(b))(b - a) \quad (2.1)$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2}(f(x_0) + f(x_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)) \quad (2.2)$$

$a=x_0$ = titik awal

$b=x_n$ = titik akhir

h = lebar segmen (panjang setiap subinterval)

n = jumlah segmen

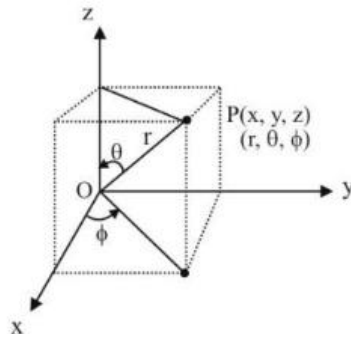
$f(x_i)$ = nilai fungsi pada titik x_i

Algoritma dari metode trapesium yaitu:

1. Mendefinisikan fungsi $f(x)$ yang akan diintegrasikan.
2. Menentukan titik awal (a) dan titik akhir (b) integrasi.
3. Pembagian interval $[a,b]$ menjadi (n) subinterval yang sama panjang, di mana setiap subinterval memiliki panjang $h = \frac{b-a}{n}$

2.1.3 Point-clouds

Point-cloud adalah kumpulan titik dalam ruang tiga dimensi yang mencakup informasi panjang, lebar, dan tinggi. Titik-titik ini direpresentasikan menggunakan koordinat kartesius X , Y , dan Z . Dalam penelitian ini, koordinat X , Y , dan Z dihitung melalui transformasi dari koordinat bola (r , θ , ϕ). Proses tersebut mengubah posisi titik P dalam koordinat bola menjadi titik P dalam koordinat kartesius (x , y , z). (Zindhu Maulana Ahmad Putra dkk., 2024)



Gambar 2. 4 Point clouds

Zindhu Maulana Ahmad Putra dkk., 2024

Koordinat x , y , dan z sangat diperlukan untuk membangun visualisasi 3D. Ketiga nilai ini mengacu pada sistem koordinat tiga dimensi yang menentukan posisi setiap titik secara presisi di ruang 3D. Koordinat x menunjukkan posisi horizontal suatu titik, y menggambarkan posisi vertikal, dan z merepresentasikan kedalaman titik tersebut. Dengan memanfaatkan ketiga koordinat ini, setiap titik dalam point-cloud dapat diletakkan secara presisi, sehingga memungkinkan pembentukan model 3D yang sesuai dengan bentuk objek asli. Transformasi dan pemetaan koordinat yang akurat sangat penting untuk memastikan bahwa visualisasi 3D yang dihasilkan dapat mencerminkan bentuk, dimensi, dan posisi objek dengan tepat.

2.1.4 Moving Average

Dalam pengolahan data, terutama data yang dihasilkan oleh sensor seperti LiDAR, sering kali kita menghadapi fluktuasi atau noise yang dapat mengganggu akurasi perhitungan. Untuk mengatasi hal ini, teknik moving average sering digunakan. Teknik ini membantu menghaluskan data dengan menghitung rata-rata dari sejumlah titik data dalam jangka waktu tertentu atau interval tertentu, sehingga

variasi yang tidak relevan dapat diminimalkan dan tren yang lebih jelas dapat terlihat.

Moving Average (MA) adalah metode statistik yang digunakan untuk menghaluskan fluktuasi dalam data dengan cara menghitung rata-rata dari sekumpulan data dalam jangka waktu tertentu atau sejumlah titik data yang bergerak sepanjang data (Düker dkk., 2025). Teknik ini sangat berguna untuk mengidentifikasi pola atau tren dalam data yang memiliki banyak noise (gangguan atau variasi acak), sehingga memungkinkan analisis yang lebih jelas.

Metode *moving average* sering digunakan dalam analisis data time series (deret waktu) untuk memperlihatkan tren jangka panjang atau pergerakan yang lebih stabil, dengan meratakan fluktuasi yang terjadi dalam data.

Simple Moving Average (SMA): *Simple Moving Average (SMA)* adalah jenis paling dasar dari *moving average*, di mana nilai rata-rata dihitung dari sejumlah data dalam jangka waktu tertentu. Setiap titik data dalam jendela waktu diberi bobot yang sama. Sebagai contoh, untuk menghitung SMA dari 5 titik data, kita menjumlahkan 5 nilai tersebut dan membaginya dengan 5. Rumus untuk menghitung SMA adalah sebagai berikut:

$$SMA_{(t)} = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t x_i \quad 2.6$$

Di mana:

x_i : nilai data pada titik waktu i

k : jumlah titik data dalam jendela *moving average*

t : jumlah titik data dalam jendela *moving average*

2.1.5 Perangkat Keras Yang di Gunakan

Prototipe tugas akhir ini memerlukan perangkat keras, termasuk sensor dan aktuator, untuk mengontrol sistem. Sensor berfungsi untuk mengukur dan mendeteksi objek, sementara aktuator merespons berdasarkan data sensor. Selain itu, perangkat keras lain digunakan sebagai pusat pengendali sistem. Berikut beberapa perangkat keras yang digunakan

2.1.6 ESP-32

Pada tugas akhir ini, ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler utama yang berfungsi sebagai otak sistem, yang bertanggung jawab untuk mengelola pengoperasian sensor, pengendalian aktuator, hingga pengiriman data. Pemilihan ESP32 didasarkan pada kemampuannya dalam pemrosesan yang tinggi, konektivitas Wi-Fi, serta dukungannya terhadap berbagai antarmuka perangkat keras. Selain itu, ESP32 menawarkan efisiensi daya yang baik dan fleksibilitas tinggi dalam integrasi dengan perangkat keras dan perangkat lunak lainnya, sehingga sangat ideal untuk memastikan sistem beroperasi secara optimal dan dapat menjalankan tugas-tugas kompleks dengan efisien. ESP32 memiliki pin ADC 12-bit yang memungkinkan pembacaan nilai dari 0 hingga 4095



Gambar 2. 5 Esp-32
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Tabel 2. 1 Esp-32

Parameter	Nilai
<i>Operating Voltage</i>	3.3V
<i>Flash Memory</i>	4 MB
<i>Digital I/O Pins</i>	25
<i>Analog Input Pins</i>	6
<i>Analog Output Pins</i>	2
UART	3
SPI	2
I2C	3
SRAM	520KB

2.1.7 Dynamixel AX-12

Dalam tugas akhir ini, AX-12 digunakan sebagai aktuator untuk menggerakkan mekanisme yang diperlukan dalam sistem. AX-12 merupakan servo motor yang dirancang untuk memberikan kontrol presisi tinggi dengan kemampuan untuk memutar hingga 300° dan dilengkapi dengan pengaturan torsi yang dapat disesuaikan. Servo motor ini dipilih karena kemampuannya dalam memberikan gerakan yang presisi dan kontrol yang akurat, sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan gerakan berulang dengan tingkat ketelitian tinggi.



Gambar 2. 6 *Dynamixel AX-12*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada gambar 2.6 Motor servo Dynamixel AX-12A adalah aktuator modular yang terdiri atas gear reducer, motor DC (Direct Current), dan kontroler dengan kemampuan komunikasi. Motor ini menggunakan protokol komunikasi data serial UART dengan instruksi data berupa nilai hexadesimal. (Anisah dkk., 2024)

Pemilihan AX-12 sebagai aktuator didasarkan pada keunggulannya dalam hal pengendalian posisi dan torsi yang cukup kuat untuk menggerakkan beban. AX-12 memiliki antarmuka yang dapat dikendalikan melalui sinyal PWM, sehingga memungkinkan pengaturan gerakan secara halus dan efisien. Selain itu, AX-12 dilengkapi dengan feedback sistem yang memberikan data tentang posisi dan torsi motor, yang sangat berguna dalam mengendalikan gerakan secara akurat.

Tabel 2. 2 Spesifikasi *dynamixel* ax-12a

Parameter	Nilai
Tegangan Operasional	9–12 V DC
Arus Operasional	120 mA (beban tidak bergerak) hingga 1.2 A (beban maksimum)
Torsi Maksimum	1.5 Nm (di 12V)
Kecepatan Maksimum	0.229 detik per 60° (di 12V)
Rentang Sudut	300°
Kontrol Posisi	PWM (Pulse Width Modulation) dengan kontrol posisi digital
Antarmuka Komunikasi	Seri (TTL) dengan protokol khusus Dynamixel
Umpan Balik Posisi	Sistem umpan balik (feedback) untuk posisi, torsi, dan suhu
Ukuran	32.4 mm x 39.4 mm x 53.5 mm (diameter x panjang)
Berat	55 g
Bahan	Plastik dan logam (bodi metalik dengan gear plastik untuk pengurangan gesekan)
Suhu Operasional	-5°C hingga 70°C
Kapasitas Beban	Dapat menahan beban yang cukup berat dengan kontrol torsi yang tepat

Tabel 2.2 merupakan spesifikasi *dynamixel* ax-12a yang di gunakan dalam tugas akhir ini.

2.1.8 Garmin LIDAR-Lite V3

LiDAR adalah salah satu sensor persepsi yang diharapkan ada dalam rangkaian sensor kendaraan otomatis di masa depan dan dalam beberapa kasus digambarkan sebagai teknologi paling penting untuk tingkat otomatisasi yang lebih tinggi.(Robinson dkk., 2024)

Pada tugas akhir ini, Garmin V3 digunakan sebagai sensor LiDAR untuk mengukur jarak dengan tingkat presisi yang tinggi. Sensor ini dipilih karena memiliki rentang pengukuran yang cukup luas, yaitu dari 0.2 hingga 10 meter, dengan akurasi pengukuran mencapai ± 2 cm dan resolusi 1 cm. Dengan kecepatan pemindaian 1 Hz, Garmin V3 dapat memberikan data yang stabil dan akurat, yang sangat penting untuk keperluan pemantauan dan pemetaan dalam sistem ini. Konektivitas serial dan I2C yang dimiliki oleh sensor ini memungkinkan integrasi yang mudah dengan mikrokontroler dan perangkat lain dalam sistem. Dengan konsumsi daya yang rendah (150 mA) dan ukuran yang kompak (65.5 x 42 x 30 mm), Garmin V3 menjadi pilihan yang ideal untuk digunakan dalam berbagai aplikasi robotik dan sistem penginderaan jarak secara real-time, terutama yang membutuhkan pengukuran jarak 2D.



Gambar 2. 7 Lidar V3
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 2.7 merupakan bentuk fisik dari lidar garmin v3, dan selanjutnya merupakan tabel spesifikasi lidar garmin v3.

Tabel 2. 3 Lidar Garmin V3

Parameter	Nilai
Rentang Pengukuran	0.2–10 meter
Resolusi	1 cm
Akurasi Pengukuran	± 2 cm
Kecepatan Pemindaian	1 Hz
Koneksi	Serial, I2C
Tegangan Operasional	5V
Konsumsi Daya	150 mA
Berat	50 g

Parameter	Nilai
Dimensi	65.5 x 42 x 30 mm
Fungsi	Penginderaan jarak 2D

Tabel 2.3 di atas merupakan spesifikasi lidar garmin v3 yang di gunakan dalam tugas akhir ini.

2.1.9 Garmin LIDAR-Lite V3HP

Gambar 2.8 di atas merupakan lidar Garmin V3HP, yakni sensor lidar yang dirancang untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran jarak presisi tinggi dengan jangkauan hingga 40 meter. Sensor ini menawarkan akurasi ± 2.5 cm dan resolusi 1 cm, memungkinkan pengambilan data yang stabil dan akurat.



Gambar 2. 8 Lidar V3HP
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Sensor lidar V3HP pada gambar 2.8 dengan kecepatan pemindaian lebih dari 1 kHz, V3HP mampu memberikan pembaruan data yang cepat, ideal untuk aplikasi pemetaan dan pemantauan jarak (Robinson dkk., 2024). Sensor ini menggunakan koneksi I2C atau PWM dan beroperasi pada tegangan 4.75–5V DC dengan konsumsi daya rendah, yaitu 65 mA saat idle dan 85 mA saat pengukuran. Dengan ukuran kompak (65.5 x 42 x 30 mm) dan berat ringan (50 g), V3HP cocok untuk integrasi dalam berbagai sistem robotik dan penginderaan jarak. LiDAR ini digunakan untuk menghasilkan data *point cloud* yang akurat, tetapi resolusi spasialnya lebih rendah dibandingkan kamera. Namun, dengan menggabungkan data dari LiDAR dan kamera, akurasi deteksi objek dan estimasi jarak dapat ditingkatkan (Rajesh & Manivannan, 2024).

Tabel 2. 4 Lidar Garmin V3HP

Parameter	Nilai
Rentang Pengukuran	0.2–30 meter
Resolusi	1 cm
Akurasi Pengukuran	± 1 cm
Kecepatan Pemindaian	1 Hz
Koneksi	Serial, I2C
Tegangan Operasional	5V
Konsumsi Daya	150 mA
Berat	80 g
Dimensi	72 x 42 x 35 mm
Fungsi	Penginderaan jarak 2D

2.1.10 RP LIDAR A1



Gambar 2. 9 Rp-Lidar A1
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 2.9 adalah Rp-lidar A1 yang merupakan sensor lidar 2D dengan pemindaian *omnidirectional* 360 derajat yang dirancang untuk aplikasi seperti robot pembersih vakum dan robot rumah tangga. Sensor ini menggunakan prinsip pengukuran triangulasi laser dan perangkat keras akuisisi serta pemrosesan visi berkecepatan tinggi yang dikembangkan oleh Slamtec. Dengan kemampuan pemindaian hingga 12 meter dan frekuensi sampel 8.000 kali per detik, RPLIDAR A1 mampu menghasilkan data peta lingkungan secara cepat dan akurat. Resolusi sudut $\leq 1^\circ$ dan kecepatan pemindaian hingga 5.5 Hz (dapat dikonfigurasi hingga 10 Hz) memungkinkan pemetaan yang detail dan responsif. Sensor ini beroperasi pada tegangan 5V DC dengan konsumsi daya rendah 0.5W, menjadikannya efisien untuk

integrasi dalam berbagai sistem robotik. Dimensinya yang kompak (96.8 x 70.3 x 55 mm) dan berat 100 g memudahkan integrasi dalam desain perangkat keras yang terbatas ruang. Keunggulan utama dari RPLIDAR adalah akurasi tinggi, resolusi yang baik, dan waktu akuisisi data yang relatif cepat. Titik referensi yang stasioner dan karakteristik dapat digunakan untuk menentukan posisi akurat platform bergerak dalam sistem koordinat lokal.(Grzechca dkk., 2020). Di bawah ini merupakan tabel 2.5 yang berisi spesifikasi rp-lidar a1 yang di gunakan dalam tugas akhir ini

Tabel 2. 5 RP Lidar A1

Parameter	Nilai
Rentang Pengukuran	0.15–12 meter
Resolusi Sudut	$\leq 1^\circ$
Kecepatan Pemindaian	5.5 Hz (hingga 10 Hz)
Parameter	Nilai
Frekuensi Sampel	8.000 sampel per detik
Koneksi	UART Serial (level tegangan 3.3V)
Tegangan Operasional	5V DC
Konsumsi Daya	0.5W
Dimensi	96.8 x 70.3 x 55 mm
Berat	100 g

2.1.11 Power Supply

Power supply yang ditampilkan pada Gambar 2.10 berfungsi sebagai sumber utama untuk mengoperasikan sensor dan aktuator dalam sistem ini. *Power supply* ini dipilih karena seluruh komponen yang digunakan pada tugas akhir ini membutuhkan tegangan DC untuk beroperasi. Hal ini disebabkan sensor dan aktuator umumnya dirancang untuk bekerja optimal dengan tegangan DC sesuai spesifikasi teknisnya. Sebaliknya, jika menggunakan listrik dari PLN secara

langsung, tegangan yang dihasilkan biasanya berupa AC, yang tidak sesuai dengan kebutuhan operasional komponen-komponen tersebut.



Gambar 2. 10 *Power supply*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

2.1.12 Regulator XL4005

Regulator XL4005, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, berperan sebagai regulator tegangan dalam sistem ini dengan fungsi utama mengonversi tegangan *input* yang relatif lebih tinggi menjadi tegangan *output* DC yang sesuai dengan kebutuhan operasional komponen. Modul ini dipilih karena memiliki keunggulan dalam hal efisiensi pengaturan daya, di mana XL4005 mampu mengatur tegangan dengan tingkat presisi yang tinggi serta mendukung arus hingga 5A, sehingga sangat andal untuk diaplikasikan pada rangkaian dengan beban daya menengah hingga tinggi.



Gambar 2. 11 XL4005
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Keunggulan lainnya, XL4005 dirancang untuk bekerja pada rentang tegangan input yang cukup luas, sehingga modul ini tidak hanya fleksibel tetapi juga adaptif terhadap berbagai kondisi suplai daya yang mungkin berubah-ubah. Dengan kemampuan tersebut, modul ini dapat dimanfaatkan dalam beragam aplikasi elektronika, termasuk sistem berbasis mikrokontroler dan perangkat dengan kebutuhan daya stabil. Tegangan output yang stabil merupakan faktor krusial

karena secara langsung memengaruhi kinerja sensor dan aktuator yang digunakan. Apabila tegangan yang disuplai tidak sesuai atau berfluktuasi, maka sensor berpotensi memberikan data yang tidak akurat, sementara aktuator dapat mengalami penurunan performa atau bahkan kerusakan. Oleh karena itu, keberadaan XL4005 dalam sistem ini memastikan bahwa seluruh komponen elektronik dapat berfungsi secara optimal sesuai spesifikasi teknisnya, sekaligus menjaga keandalan dan konsistensi suplai daya pada sistem secara keseluruhan.

2.1.13 Buzzer 12v

Dalam tugas akhir ini, buzzer yang terlihat pada Gambar 2.12 merupakan lampu indikator yang berfungsi untuk menunjukkan bahwa sistem sedang beroperasi. Keberadaan lampu ini memudahkan operator dalam memantau status sistem melalui sinyal yang diberikan oleh lampu tersebut. Pada implementasi ini, lampu indikator hijau akan menyala selama sistem aktif dan tetap menyala hingga proses pengiriman data selesai. Setelah proses pengiriman data selesai, lampu indikator akan pada.

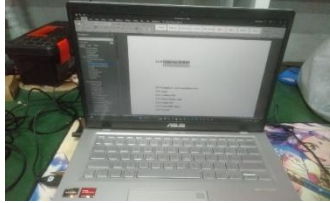


Gambar 2. 12 Buzzer
(Dokumentasi pribadi, 2025)

2.1.14 Laptop Asus X415DAP

Laptop Asus X415DAP ini dipilih karena spesifikasinya yang mumpuni, seperti prosesor AMD yang efisien, RAM yang memadai, serta kapasitas penyimpanan yang besar, sehingga mampu menjalankan perangkat lunak dan tugas-tugas berat yang dibutuhkan dalam sistem. Selain itu, ukurannya yang ringkas dan portabilitasnya memberikan kemudahan bagi operator dalam mengakses dan mengontrol sistem dari berbagai lokasi. Laptop ini juga berperan sebagai

penghubung antara sistem utama dan perangkat pendukung lainnya, menjadikannya komponen penting dalam keseluruhan proses operasional.



Gambar 2. 13 Laptop asus X415DAP
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Laptop Asus X415DAP, yang ditampilkan pada Gambar 2.13, digunakan dalam tugas akhir ini sebagai perangkat utama untuk mendukung pemrosesan data dan pengelolaan sistem.

2.1.15 *Push Button*

Push button pada sistem ini memiliki peran penting sebagai pemicu untuk mengaktifkan seluruh rangkaian alat.



Gambar 2. 14 *Push button*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Terlihat pada Gambar 2.14, fungsi tombol ini adalah saat tombol ditekan maka sistem akan mulai beroperasi dengan mengaktifkan sensor LiDAR dan aktuator Dynamixel untuk membaca serta mendeteksi objek di sekitarnya.

2.2 Perangkat Lunak Yang di Gunakan

Pada tugas akhir ini, berbagai perangkat lunak dimanfaatkan untuk mendukung setiap tahapan dalam proses penyelesaian penelitian, mulai dari tahap perancangan hingga implementasi sistem. Perangkat lunak yang digunakan tidak hanya berfungsi sebagai sarana penulisan kode program, tetapi juga berperan dalam

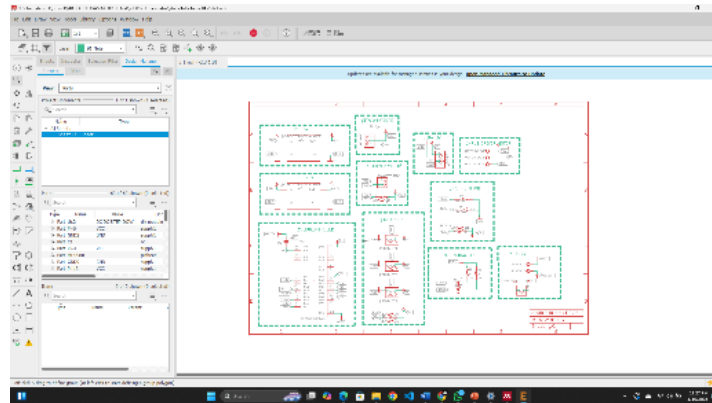
pembuatan rancangan prototipe, perancangan desain elektrik, serta proses analisis data yang diperoleh dari pengujian sistem.

Pemilihan perangkat lunak dilakukan secara selektif dengan mempertimbangkan kesesuaian fitur yang tersedia terhadap kebutuhan penelitian, kemudahan integrasi dengan perangkat keras, serta tingkat keandalan dalam menghasilkan keluaran yang akurat. Dengan adanya dukungan perangkat lunak ini, proses pengembangan sistem dapat berlangsung lebih sistematis, terstruktur, dan efisien, sehingga meminimalkan potensi kesalahan sekaligus mempercepat proses iterasi desain. Secara lebih rinci, perangkat lunak yang digunakan dalam tugas akhir ini meliputi aplikasi untuk pemrograman mikrokontroler, perangkat lunak simulasi untuk memvisualisasikan rancangan, serta *software* desain elektrik yang berguna dalam penyusunan skema rangkaian secara detail. Berikut ini dipaparkan beberapa perangkat lunak utama yang digunakan dalam mendukung pelaksanaan tugas akhir ini.

2.2.1 Eagle

Eagle digunakan dalam tugas akhir ini sebagai perangkat lunak utama untuk mendesain *Printed Circuit Board* (PCB) yang berfungsi sebagai inti dari sistem elektrik pada alat yang dikembangkan. Dengan memanfaatkan fitur-fitur unggulan seperti pembuatan skematik, autorouter, *Design Rule Check* (DRC), serta kemampuan simulasi, Eagle memungkinkan proses perancangan PCB dilakukan secara sistematis dan presisi. Melalui pembuatan skematik, hubungan antar komponen dapat digambarkan dengan jelas sehingga mempermudah proses integrasi rangkaian. Fitur autorouter membantu dalam penyusunan jalur koneksi secara otomatis, sehingga mempercepat proses desain sekaligus mengurangi potensi kesalahan manual. Sementara itu, DRC berfungsi sebagai mekanisme pengecekan aturan desain yang memastikan setiap rancangan telah sesuai dengan standar teknis yang berlaku, baik dari segi jarak antar jalur, ukuran pad, maupun aturan manufaktur lainnya. Selain itu, kemampuan simulasi pada Eagle memungkinkan peneliti untuk melakukan verifikasi awal terhadap rangkaian yang dirancang sebelum masuk ke tahap pencetakan fisik. Dengan demikian, penggunaan Eagle dalam penelitian ini tidak hanya menghasilkan desain PCB yang

efisien dan andal, tetapi juga meminimalkan risiko kesalahan sejak dini serta menjamin bahwa rancangan akhir sesuai dengan spesifikasi teknis yang dibutuhkan sistem.



Gambar 2. 15 *Eagel*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

EAGLE (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) yang di tampilkan pada gambar 2.15 adalah perangkat lunak desain elektronik (EDA) milik Autodesk Inc. yang digunakan untuk merancang skematik, PCB, dan mendukung integrasi dengan Fusion 360 untuk desain prototipe yang menyatukan aspek elektronik dan mekanik. (Louis & Crosby, 2023)

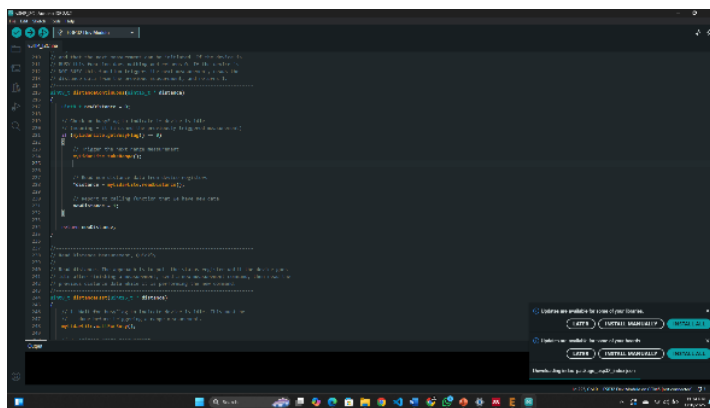
2.2.2 Arduino IDE

Pada tugas akhir ini, Arduino IDE digunakan untuk menulis dan mengunggah program yang mengontrol komponen sistem, seperti sensor LiDAR, dan Servo Dynamixel. Dengan Arduino IDE, penulis dapat dengan mudah mengembangkan program untuk membaca data dari sensor, mengolah data, dan mengontrol aktuator sesuai dengan mekanisme yang telah dirancang.

Dukungan pustaka yang lengkap serta kemudahan integrasi dengan berbagai modul membuat Arduino IDE menjadi pilihan utama dalam pengembangan sistem ini. Lingkungan pengembangan yang sederhana namun powerful memberikan fleksibilitas bagi penulis dalam menuliskan, mengunggah, serta menguji kode secara langsung ke mikrokontroler. Selain itu, fitur serial monitor yang tersedia pada Arduino IDE dimanfaatkan untuk memantau data yang dihasilkan oleh sistem,

sehingga memudahkan dalam proses debugging, analisis performa, serta evaluasi hasil pembacaan sensor maupun pengendalian aktuator.

Penggunaan Arduino IDE dalam penelitian ini juga didukung oleh ketersediaan dokumentasi resmi dan komunitas pengguna yang sangat luas, sehingga memudahkan penulis dalam menemukan referensi maupun solusi ketika menghadapi kendala teknis. Dengan adanya dukungan tersebut, proses pengembangan dapat berlangsung lebih efisien dan terarah. Secara keseluruhan, pemanfaatan Arduino IDE memungkinkan penulis untuk mengembangkan sebuah sistem yang fungsional, stabil, dan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan pada perancangan alat ini.



Gambar 2. 16 Arduino IDE
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Arduino IDE pada gambar 2.16 adalah perangkat lunak open-source yang digunakan untuk menulis program, disebut sketch, pada board Arduino IDE ini mendukung bahasa pemrograman C dan C++ serta menyediakan banyak pustaka bawaan untuk mempermudah pengembangan. Dengan antarmuka sederhana, Arduino IDE memungkinkan pengguna untuk mengompilasi dan mengunggah kode melalui USB ke board Arduino, menjadikannya alat yang ideal untuk belajar dan riset dalam pengembangan perangkat keras berbasis sensor.(Ismailov & Jo‘rayev, 2022)

Dalam Arduino IDE, kode program ditulis dalam file dengan ekstensi .ino yang terdiri dari dua fungsi utama, yaitu setup() untuk inisialisasi, dan loop() untuk menjalankan program secara berulang. Setelah kode selesai ditulis, pengguna dapat mengunggahnya ke papan mikrokontroler melalui kabel USB. *Software* ini juga

menyediakan fitur serial monitor, yang memungkinkan pengguna memantau data yang dikirim atau diterima oleh mikrokontroler secara real-time.

2.2.3 *Visual Studio Code*

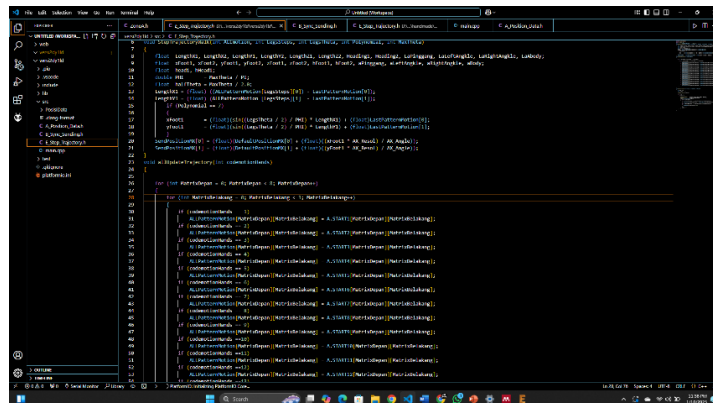
Dalam tugas akhir ini, *Visual Studio Code* (*VS Code*) digunakan sebagai lingkungan pengembangan utama untuk menulis kode program yang mengontrol komponen sistem, seperti aktuator Dynamixel AX-12 dan berbagai sensor LiDAR. Pemilihan *VS Code* didasarkan pada fleksibilitas dan kelengkapan fitur yang ditawarkannya, sehingga memudahkan proses pengembangan perangkat lunak yang kompleks namun tetap terstruktur. Melalui PlatformIO, konfigurasi proyek untuk mikrokontroler ESP32 maupun perangkat lain dapat dilakukan dengan lebih praktis, mulai dari pengaturan board, pengelolaan pustaka, hingga proses kompilasi dan pengunggahan kode ke perangkat target.

PlatformIO juga mendukung pengelolaan pustaka secara otomatis, sehingga kebutuhan integrasi berbagai modul tambahan dapat terpenuhi tanpa harus melakukan konfigurasi manual yang rumit. Fitur ini sangat membantu dalam mempercepat *workflow* pengembangan karena meminimalkan potensi kesalahan akibat ketidakcocokan pustaka. Selain itu, keberadaan terminal bawaan di dalam *VS Code* memungkinkan pemantauan output serial secara langsung, sehingga proses debugging, pengujian, serta verifikasi komunikasi data antara sensor, aktuator, dan mikrokontroler dapat dilakukan dengan lancar.

Tidak hanya itu, *VS Code* juga memiliki dukungan bawaan untuk kontrol versi seperti Git, yang sangat berguna dalam melacak setiap perubahan kode selama proses pengembangan berlangsung. Dengan adanya fitur ini, penulis dapat memelihara histori pengembangan perangkat lunak, mempermudah kolaborasi, serta memastikan kode yang digunakan selalu dalam kondisi terkini dan terdokumentasi dengan baik. Dukungan berbagai ekstensi tambahan seperti auto-completion, code linting, dan integrasi dokumentasi juga semakin meningkatkan produktivitas serta mengurangi risiko error dalam pemrograman.

Secara keseluruhan, fleksibilitas dan kemampuan yang ditawarkan *VS Code* menjadikannya pilihan yang sangat tepat untuk penelitian ini. Lingkungan pengembangan ini memungkinkan penulis untuk bekerja secara efisien, menjaga

sinkronisasi yang baik antara perangkat lunak dan perangkat keras, serta memastikan sistem yang dikembangkan dapat berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan. Dengan kombinasi antara *VS Code*, PlatformIO, dan perangkat keras yang digunakan, proses perancangan hingga implementasi sistem pada tugas akhir ini dapat dilakukan secara optimal dan terarah.



Gambar 2. 17 *Vs code*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 2.17 di atas memperlihatkan tampilan *Visual Studio Code (VS Code)* yang digunakan dalam tugas akhir ini. *VS Code* berperan sebagai perangkat lunak utama dalam penulisan dan pengelolaan kode program, yang kemudian diunggah ke mikrokontroler untuk mengendalikan sensor dan aktuator. Penggunaan *VS Code* didukung dengan ekstensi PlatformIO, yang mempermudah konfigurasi proyek, manajemen pustaka, serta pengunggahan kode secara langsung ke perangkat keras.

2.2.4 Node Js

Node.js adalah lingkungan runtime JavaScript yang bersifat *open-source* dan *cross-platform*. Platform ini dirancang untuk menjalankan kode JavaScript di luar browser, memanfaatkan mesin JavaScript V8 yang digunakan oleh Google Chrome. Dengan fitur yang mendukung model pemrograman *event-driven* dan I/O *non-blocking*, Node.js sangat cocok untuk mengembangkan aplikasi jaringan yang skalabel, seperti server web, server permainan, dan aplikasi real-time lainnya. Karakteristik tersebut menjadikannya salah satu pilihan populer untuk membangun

aplikasi modern yang membutuhkan performa tinggi dan efisiensi dalam pengolahan data secara asinkron.(Putra dkk., 2023)



Gambar 2. 18 Node js
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Dalam tugas akhir ini, Node.js digunakan sebagai server backend untuk menangani komunikasi data antara sistem yang melibatkan Dynamixel AX-12, LiDAR Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP LiDAR A1. Node.js memungkinkan pengambilan data sensor secara real-time dan pengolahannya untuk dikirimkan ke aplikasi frontend. Dengan bantuan pustaka seperti Express.js, server dapat dirancang untuk menangani permintaan HTTP, sementara integrasi WebSocket memungkinkan komunikasi dua arah untuk kebutuhan real-time, seperti pemantauan data LiDAR atau kontrol aktuator.

Selain itu, Node.js mempermudah integrasi dengan basis data untuk menyimpan hasil pengukuran atau status perangkat. Arsitektur asinkronnya juga memastikan efisiensi dalam pengelolaan sumber daya, bahkan saat menangani banyak klien sekaligus. Dengan kemampuan skalabilitas dan fleksibilitasnya, Node.js berperan penting dalam tugas akhir ini untuk membangun sistem yang responsif, andal, dan mudah diintegrasikan dengan komponen perangkat keras dan perangkat lunak lainnya.

BAB 3

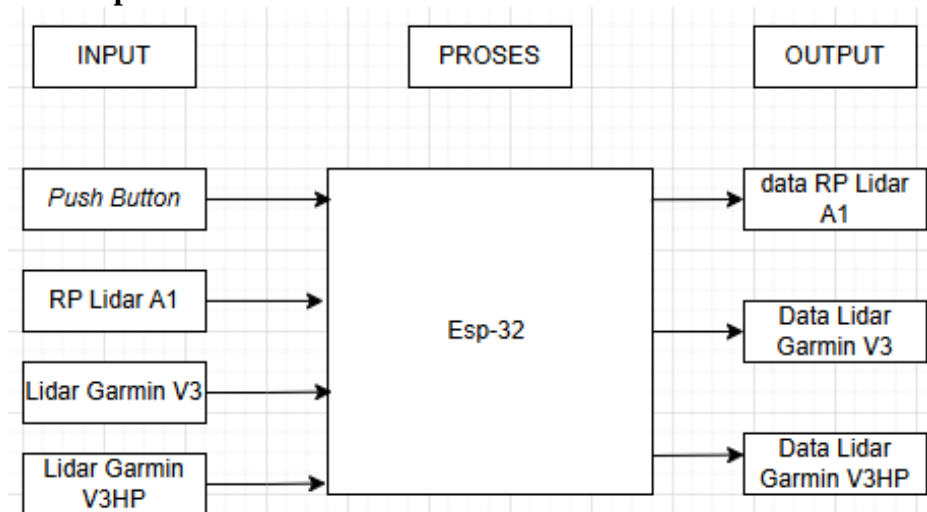
METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan alur penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir. Alur penelitian mencakup konsep utama penelitian, alur kerja sistem yang diterapkan, tahapan-tahapan penelitian, serta proses perencanaan dan perancangan desain *hardware* dan *software* yang mendukung sistem. Penjelasan ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai langkah-langkah yang ditempuh dalam pengembangan sistem hingga mencapai hasil yang diharapkan..

3.1 Konsep Penelitian

Dalam penyusunan tugas akhir ini, terdapat beberapa tahapan utama yang dilakukan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sistem yang akan dirancang dan dibangun. Setiap tahapan dirancang secara sistematis untuk memastikan bahwa pengembangan sistem berjalan dengan terstruktur dan mencapai tujuan yang diinginkan. Penjelasan detail mengenai tahapan-tahapan tersebut dapat ditemukan pada sub bab berikut.

3.1.1 Konsep Sistem



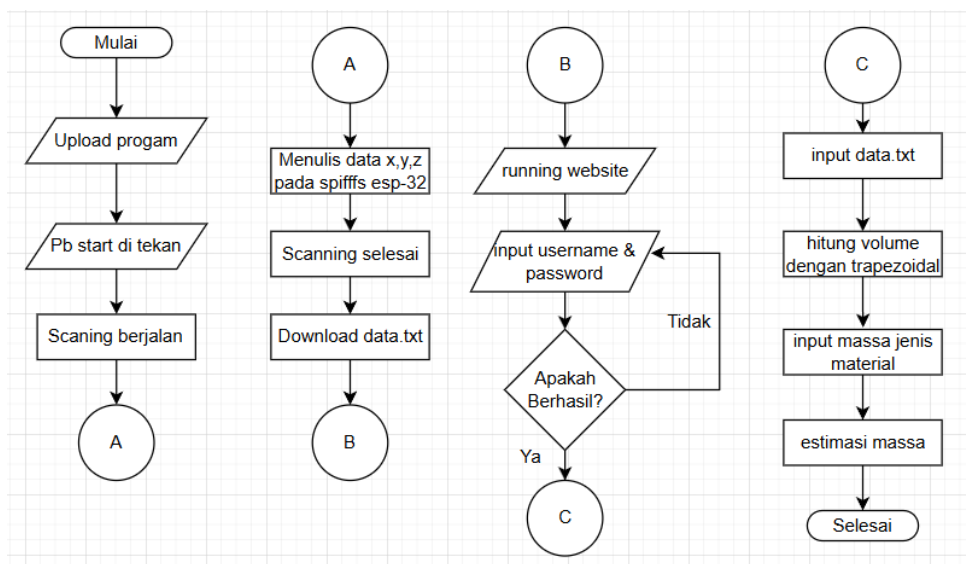
Gambar 3. 1 Konsep sistem
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Konsep sistem pada gambar 3.1 ini dirancang untuk mengintegrasikan berbagai komponen input, proses, dan output guna mendukung fungsi utama pengukuran dan kontrol berbasis teknologi. Pada sisi input, sistem menerima data

dari push button dan tiga sensor LiDAR, yaitu RP LiDAR A1, Garmin V3, dan Garmin V3HP, untuk mendeteksi jarak serta pengukuran volumetrik. Data yang diperoleh dari sensor ini kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 yang bertugas sebagai pengolah data utama.

Pada sisi output, hasil proses diterjemahkan menjadi tindakan melalui aktuator Dynamixel 1 dan Dynamixel 2, yang berperan dalam penggerakan mekanik sesuai perintah sistem. Selain itu, lampu indikator digunakan untuk memberikan umpan balik visual kepada pengguna mengenai status sistem. Dengan integrasi ini, sistem mampu menjalankan operasi secara otomatis dan real-time, menjadikannya solusi yang efisien untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran dan kontrol presisi tinggi.

3.1.2 Alur Kerja Sistem



Gambar 3. 2 Alur kerja sistem
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Alur kerja sistem pada gambar 3.2 menjelaskan tahapan proses sistem dari awal hingga akhir dalam melaksanakan fungsinya. Pada tugas akhir ini, alur kerja sistem dirangkum dalam flowchart berikut.

Konsep sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan berbagai komponen input, proses, dan output guna mendukung fungsi utama pengukuran dan kontrol berbasis teknologi. Pada sisi input, sistem menerima data dari push button dan tiga sensor LiDAR, yaitu RP LiDAR A1, Garmin V3, dan Garmin V3HP, untuk

mendeteksi jarak serta pengukuran volumetrik. Data yang diperoleh dari sensor ini kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 yang bertugas sebagai pengolah data utama. Pada sisi output, hasil proses diterjemahkan menjadi tindakan melalui aktuator Dynamixel 1 dan Dynamixel 2, yang berperan dalam pergerakan mekanik sesuai perintah sistem. Dengan integrasi ini, sistem mampu menjalankan operasi secara otomatis dan real-time, menjadikannya solusi yang efisien untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran dan kontrol presisi tinggi.

3.1.3 Menghitung Massa Jenis Gabah

Dalam menentukan massa jenis gabah di perlukan validasi wadah objek guna mengetahui kapasitas volume wadah dan juga berat gabah dalam gram yang masukkan pada wadah.



Gambar 3. 3 Diameter wadah ukur
(Dokumentasi pribadi, 2025)



Gambar 3. 4 Tinggi wadah ukur
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 3.3 dan 3.4 menunjukkan bahwa wadah yang di gunakan memiliki tinggi 21 cm dan diameter 25,5 cm dan berbentuk tabung dengan demikian volume wadah dapat diketahui dengan rumus perhitungan volume tabung yakni :

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad 3.1$$

Dimana :

r = Jari-jari tabung

h = Tinggi tabung

Maka volume wadah yang di gunakan adalah :

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot (12,75)^2 \cdot 21 \text{ cm} \\ &= 10,7 \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad 3.2$$



Gambar 3. 5 Massa jenis gabah
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Dari gambar 3.5 menunjukkan bahwa gabah memiliki berat 1.2 kg. Dari perhitungan volume tabung wadah dan berat gabah maka massa jenis dapat di hitung menggunakan rumus berikut:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad 3.3$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1200g}{10,7 \text{ cm}^2} \\ &= 112,15 \text{ g / cm}^3 \end{aligned} \quad 3.4$$

$$= 11,21 \text{ kg} / \text{m}^3$$

3.1.4 Moving Average

Moving Average adalah metode penyaringan sinyal yang bekerja dengan mengambil rata-rata dari N data terakhir untuk mengurangi efek fluktuasi tiba-tiba. Jika x_n adalah nilai data pada waktu ke-n, maka rata-rata gerak dengan jendela ukuran N di berikan oleh

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n x_i \quad 3.8$$

Di mana :

- \bar{x}_n : nilai rata-rata yang diperoleh
- x_i : data sensor ke i
- N : jumlah data dalam jendela perhitungan.

Penggunaan Moving Average dalam sistem ini bertujuan untuk:

1. Mengurangi efek noise dari sensor LiDAR.
2. Meningkatkan akurasi estimasi volume dalam silo.
3. Menyediakan data yang lebih stabil untuk analisis lebih lanjut.

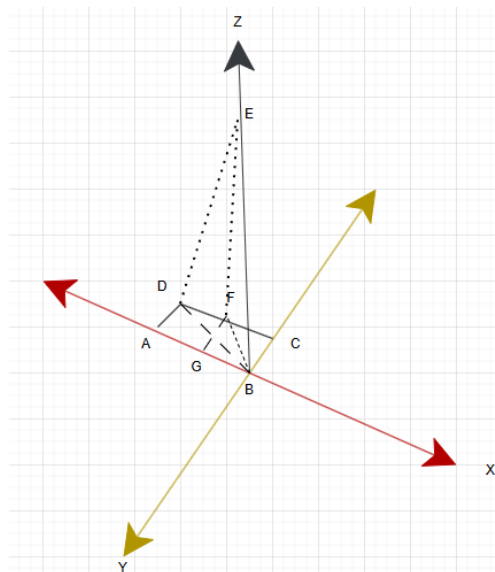
Data yang diperoleh dari sensor LiDAR akan disaring menggunakan metode Moving Average sebelum disimpan ke dalam SPIFFS dalam format CSV. Prosedur pengolahan data sebelum penyimpanan adalah sebagai berikut:

1. Membaca nilai sensor LiDAR dan mendapatkan jarak pengukuran.
2. Menghitung Moving Average dengan menggunakan nilai dari beberapa pengukuran sebelumnya.
3. Menyimpan data yang telah dihaluskan ke dalam SPIFFS untuk mengurangi pengaruh noise saat data digunakan kembali.

Pengukuran jarak yang diperoleh dari sensor LiDAR dimanfaatkan sebagai data utama dalam proses perhitungan volume material yang tersimpan di dalam silo dengan menggunakan metode *trapezoidal numerical integration*. Metode ini bekerja dengan cara memanfaatkan data titik jarak hasil pemindaian untuk kemudian dihitung luas penampang dan diintegrasikan guna memperoleh nilai volume. Akan tetapi, data yang diperoleh dari sensor tidak selalu bersifat stabil. Dalam kondisi tertentu, hasil pengukuran dapat mengalami fluktuasi yang cukup

tinggi akibat adanya faktor gangguan lingkungan, noise pada sensor, maupun ketidakrataan permukaan material. Apabila data yang digunakan terlalu berfluktuasi, maka estimasi volume yang dihasilkan berpotensi menjadi tidak akurat dan menyimpang dari kondisi sebenarnya. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan proses penyaringan data sebelum dilakukan perhitungan volume. Pada penelitian ini digunakan metode *Moving Average*, yaitu suatu teknik penyaringan sederhana namun efektif untuk meredam variasi data jangka pendek tanpa menghilangkan tren utama dari hasil pengukuran. Dengan menerapkan metode ini, data hasil pembacaan sensor menjadi lebih halus dan stabil, sehingga perhitungan volume menggunakan integrasi numerik trapesium dapat memberikan hasil yang lebih konsisten, akurat, dan sesuai dengan kondisi aktual di dalam silo.

3.1.5 Konsep Numerical Integration



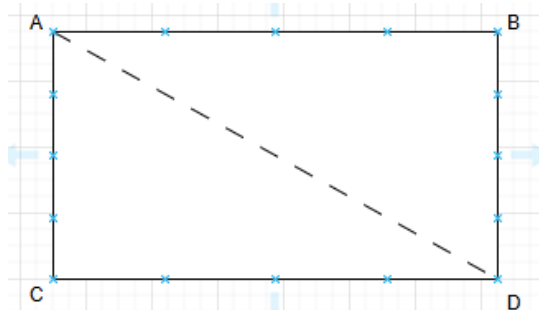
Gambar 3. 6 Pembacaan lidar pada koordinat kartesian

(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 3.6 merupakan konsep awal pengambilan data pada tugas akhir ini. Di mana titik E merupakan titik penempatan lidar dan titik D serta F merupakan jarak pembacaan lidar setelah di lakukannya gerakan oleh dynamixel AX-12 secara pitch dan roll.

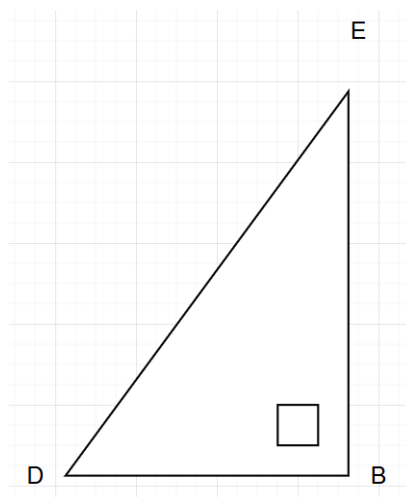
Titik D akan menghasilkan bangun datar persegi panjang ABCD berdasarkan nilai (x,y). Setelah itu sisi diagonal DB di hitung dengan rumus

$$d = \sqrt{p^2 + l^2} \quad 3.9$$



Gambar 3. 7 Proyeksi 2D dari poin (x,y)
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Setelah diagonal DB di ketahui maka terbentuklah suatu segitiga DBE dengan siku-siku di sisi B



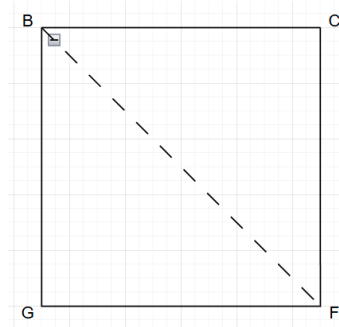
Gambar 3. 8 Proyeksi 2D dari pembacaan lidar
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Setelah sisi BD dan DE di ketahui selanjutnya menghitung sisi BE di mana sisi BE berperan sebagai nilai z1. Untuk itu di gunakanlah rumus teorema pythagoras

$$BE = \sqrt{DE^2 - DB^2} \quad 3.10$$

Untuk mengetahui nilai z_2 caranya hampir sama seperti sebelumnya, di mana poin (x,y) yang di tunjukkan oleh sisi F akan membentuk suatu persegi BCFG. Di mana persegi ini juga akan di hitung sisi diagonal BF dengan rumus panjang diagonal persegi yakni:

$$BF = \sqrt{s^2} \quad 3.11$$



Gambar 3. 9 Proyeksi 2D (x,y)
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Setelah di ketahui panjang EF dari pembacaan lidar dan panjang BF dari perhitungan diagonal persegi, maka akan di gunakanlah rumus teorema pythagoras untuk menghitung sisi BE sebagai z_2 dari pembacaan lidar pada titik F untuk segitiga siku-siku BEF.

$$BE = \sqrt{EF^2 - BF^2} \quad 3.12$$

Pemilihan rumus diagonal sisi di dasarkan pada nilai (x,y) . Jika nilai (x,y) sama, maka akan di gunakan rumus diagonal persegi dan jika nilai (x,y) berbeda, maka akan di gunakan rumus diagonal persegi panjang.

Setelah nilai z_1 dan z_2 diperoleh dari hasil pengukuran, maka akan terbentuk suatu bangun prisma dengan alas berbentuk trapesium yang dibatasi oleh titik-titik D, F, z_1 , dan z_2 . Pada bangun prisma ini, nilai h berfungsi sebagai tinggi dan ditentukan berdasarkan seberapa jauh segmen pemindaian dibuat. Dalam konteks tugas akhir ini, nilai h dipengaruhi oleh perpindahan sumbu Y yang berperan sebagai parameter jarak antarsegmen. Dengan demikian, nilai h dapat dianggap sebagai jarak antar penampang yang digunakan dalam proses integrasi numerik untuk menghitung volume. Setelah bangun prisma pertama terbentuk dan

volumenya dihitung, proses serupa akan dilakukan secara berulang-ulang pada segmen berikutnya hingga seluruh area tabung silo terliput oleh pemindaian sensor. Setiap hasil perhitungan volume dari segmen yang terbentuk kemudian dijumlahkan secara keseluruhan. Melalui proses penjumlahan ini, akan diperoleh estimasi volume total gabah yang tersimpan di dalam silo. Dengan pendekatan ini, metode integrasi numerik trapesium dapat diaplikasikan secara sistematis untuk menghasilkan nilai volume yang mendekati kondisi sebenarnya di lapangan.

3.1.6 Konsep Pengambilan Data TXT Dari ESP-32

Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai unit pengolah utama yang bertanggung jawab dalam mengontrol sensor LiDAR, aktuator Dynamixel AX-12, serta mengolah data pengukuran volumetrik pada silo. Data yang dihasilkan oleh sistem perlu disimpan dalam format Comma-Separated Values (CSV) agar dapat diakses dan dianalisis lebih lanjut.

Salah satu metode penyimpanan data yang diterapkan adalah SPIFFS (SPI *Flash File System*). SPIFFS memungkinkan ESP32 untuk menyimpan data secara internal tanpa perlu menggunakan SD Card. Selain itu, data yang telah tersimpan dapat diakses melalui jaringan Wi-Fi, sehingga pengguna dapat mengunduhnya secara langsung dalam format CSV.

SPIFFS adalah sistem file berbasis memori flash internal ESP32 yang dapat digunakan untuk menyimpan data secara non-volatile. Keunggulan utama dari SPIFFS adalah:

1. Tidak memerlukan SD Card, sehingga sistem lebih sederhana dan hemat daya.
2. Mendukung penyimpanan file kecil seperti .csv untuk keperluan logging data.
3. Dapat diakses melalui server web, memungkinkan pengunduhan data secara jarak jauh.
4. Kompatibel dengan pengolahan data sensor secara real-time, seperti data yang dihasilkan dari LiDAR dan perhitungan integrasi numerik *Trapezoidal* dalam estimasi volume silo.

Pada sistem ini, ESP32 akan membaca data dari LiDAR, menggerakkan aktuator Dynamixel AX-12, lalu menyimpan hasil pengukuran ke dalam file data.csv yang tersimpan di SPIFFS. ESP32 membaca data dari LiDAR dan Dynamixel AX-12, lalu menyimpannya dalam format CSV. Struktur data yang tersimpan meliputi:

1. Waktu pengambilan data (timestamp dalam milidetik)
2. Sudut rotasi Dynamixel AX-12
3. Jarak hasil pengukuran dari LiDAR (dalam cm)
4. Estimasi volume berdasarkan metode *trapezoidal numerical integration*

Agar file CSV yang tersimpan di SPIFFS dapat diakses dengan mudah, ESP32 diubah menjadi server web. Dengan demikian, file data.txt dapat diunduh melalui browser.

Prosedur Pengambilan Data CSV

1. ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi menggunakan kredensial yang telah diset pada kode program.
2. Pengguna mencari alamat IP ESP32 yang ditampilkan di Serial Monitor (misalnya 192.168.1.100).
3. Pengguna membuka browser web dan memasukkan alamat: <http://192.168.1.100/download>
4. File akan diunduh, yang kemudian dapat dibuka.

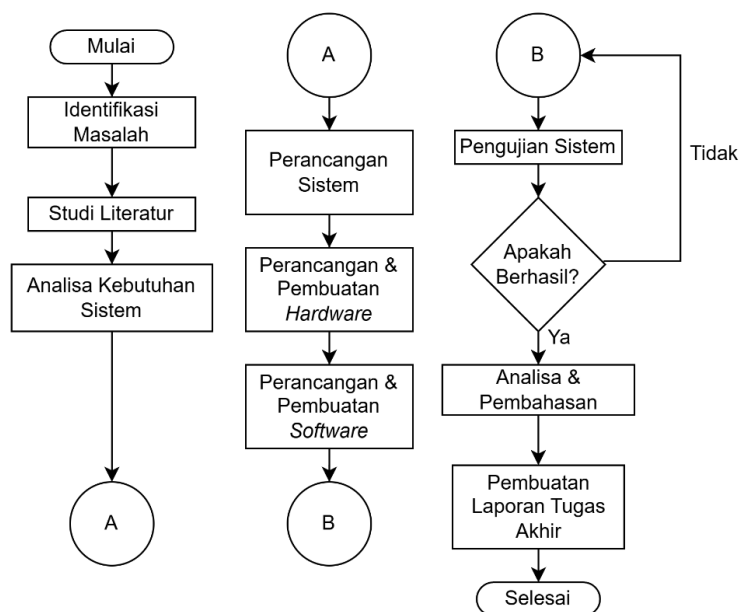
3.2 State of The Art

Isi	Judul /Tahun
Penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe 3D scanner untuk silo. Karena masih dalam tahap prototipe, diperlukan perancangan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Salah satu perbedaan dalam penelitian ini adalah penggantian motor stepper dengan motor servo, serta perubahan mekanisme pemindaian untuk mempermudah pengambilan data di dalam silo. Jika pada penelitian sebelumnya mekanisme yang digunakan adalah kombinasi	3D Scanner Pemantau Ketersediaan Kalsium Karbonat Pada Silo (Zindhu Maulana Ahmad Putra dkk., 2024)

Isi	Judul /Tahun
pitch (berputar di sumbu x) dan yaw(berputar di sumbu z), maka dalam penelitian ini diterapkan mekanisme rotasi pitch(berputar di sumbu x) dan roll (berputar di sumbu y). Ini akan menjadi titik utama dalam analisa performa lidar jika mekanismenya di ubah dan di lakukan penggantian aktuator.	
Jurnal ini membahas pemanfaatan teknologi UAV (Unmanned Aerial Vehicle) LiDAR untuk pengukuran topografi skala besar dengan akurasi tinggi, yang dapat diaplikasikan dalam pengukuran volume silo. Saran pengembangan dari alat ini adalah Membangun aplikasi berbasis web atau mobile yang memungkinkan pengguna untuk melakukan perhitungan volume silo secara otomatis berdasarkan data LiDAR yang diambil. Aplikasi ini bisa menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk grafik atau laporan yang mudah dipahami, serta memberikan rekomendasi terkait pengelolaan material. Pengolahan data LiDAR untuk area yang lebih luas seperti silo industri yang besar dapat menjadi tantangan dari sisi komputasi. Mengembangkan algoritma pemrosesan yang lebih efisien untuk menangani data point cloud dalam skala besar akan sangat membantu dalam mempercepat pengolahan dan analisis data, serta mengurangi kebutuhan sumber daya komputasi. Dengan ini algoritma <i>trapezoidal</i> yang di kombinasi dengan <i>moving average</i> dengan harapan dapat mengurangi faktor lonjakan data dalam tiap-tiap <i>section scanning</i>	Pemanfaatan Teknologi UAV Lidar Untuk Percepatan Penyediaan Data Topografi Skala Besar Pada Tahap Readiness Criteria Jalan Tol Trans Sumatera (Hermawan dkk., 2021)
Penelitian ini menunjukkan bahwa metode LiDAR lebih akurat dibandingkan dengan fotogrametri UAV dalam hal pengukuran volume. Hasil ini dapat menjadi acuan untuk	Analisis Perbandingan Volume Stockpile

Isi	Judul /Tahun
menggunakan LiDAR dalam aplikasi pengukuran silo, terutama untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi dalam penghitungan volume tumpukan material. Namun perlu dilakukan kajian mengenai sensor lidar mana yang paling cocok dalam penerapannya. Maka dilakukan analisa terhadap performa lidar berupa pemilihan lidar yang paling cocok untuk pengaplikasian terhadap 3d volumetric.	Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar. (Aji & Djurdjani, 2022)

3.3 Tahapan Penelitian



Gambar 3. 10 Tahapan penelitian
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar di atas merupakan flowchart alur penelitian pada tugas akhir ini, berikut merupakan rinciannya:

1. Tahap pertama adalah mengidentifikasi masalah untuk memastikan topik yang dipilih relevan dan membutuhkan solusi nyata.
2. Tahap kedua adalah studi literatur yang mengacu pada penelitian sebelumnya terkait urgensi topik, perangkat keras, dan perangkat lunak yang akan digunakan.
3. Tahap ketiga adalah menganalisis kebutuhan sistem, termasuk alat dan bahan yang diperlukan

4. Setelah menentukan alat dan bahan, langkah berikutnya adalah merancang sistem yang akan dibuat.
5. Setelah merancang sistem, langkah berikutnya adalah merancang dan membuat *hardware*, mencakup desain serta penyusunan komponen mekanik dan elektrik.
6. Tahap berikutnya adalah merancang dan membuat *software*, termasuk program ESP32 untuk pemrosesan data sensor dan program untuk tampilan *website*.
7. Tahap selanjutnya adalah uji coba sistem. Jika uji coba berhasil, proses dilanjutkan ke analisis dan pembahasan. Namun, jika hasilnya tidak sesuai, uji coba akan diulang.
8. Tahap berikutnya adalah analisis dan pembahasan. Setelah tahap ini selesai, proses dilanjutkan dengan pembuatan laporan tugas akhir.
9. Setelah semua tahap selesai dilaksanakan, alur penelitian pada tugas akhir ini dapat dinyatakan selesai.

3.3.1 Identifikasi Masalah

Dalam industri modern, pengukuran volume bahan dalam silo krusial untuk kelancaran operasional dan manajemen material. Namun, metode manual masih banyak digunakan meski memiliki keterbatasan, seperti membutuhkan banyak tenaga kerja, berisiko bagi keselamatan, dan kurang akurat. Selain itu, permukaan bahan yang tidak rata, seperti berbentuk gunung, makin menyulitkan pengukuran.

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, teknologi LiDAR hadir dengan potensi besar untuk memberikan pengukuran yang lebih akurat dan aman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa kinerja tiga jenis sensor LiDAR, yaitu Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-LiDAR A1, dalam mendukung pengukuran volumetrik 3D bahan di dalam silo. Dengan memanfaatkan metode *trapezoidal numerical integration*, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem pengukuran yang lebih presisi dan efisien di sektor industri..

3.3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami berbagai pendekatan dan teknologi yang relevan dengan pengukuran volumetrik bahan di dalam silo. Penelitian

sebelumnya menunjukkan berbagai metode untuk menangani tantangan dalam pengukuran volume silo. Misalnya, penggunaan sensor ultrasonik dalam memantau ketersediaan bahan pakan di silo (Laura dkk., 2021) yang berjudul "PEMANTAUAN DAN PENGENDALIAN SILO PADA PETERNAKAN UNGGAS" menunjukkan bahwa teknologi ini mampu mengurangi kebutuhan pengawasan manual. Namun, akurasi pengukuran yang terbatas menjadikannya kurang ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi.

Studi lain oleh (Wibowo, 2019) yang berjudul "Sistem Rekonstruksi Objek 3D dengan Metode LiDAR Menggunakan Mikrokontroler Arduino Mega" mengembangkan sistem rekonstruksi objek 3D berbasis LiDAR untuk pengukuran dimensi. Meskipun pendekatan ini berhasil dalam mencitrakan objek berbentuk sederhana, penelitian tersebut mencatat kesulitan dalam menangani objek dengan bentuk kompleks dan menghasilkan *Error* yang signifikan pada rentang tertentu.

Penelitian terbaru oleh (Mutiarasari dkk., 2023) yang berjudul "Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data Lidar Multi-Object 3D Model from Lidar Data" memperkenalkan model 3D multi-objek berbasis data LiDAR, yang menghasilkan klasifikasi objek dengan akurasi tinggi menggunakan metode pengolahan data point cloud. Meskipun akurat, pendekatan ini lebih diarahkan pada klasifikasi objek daripada estimasi volume.

Kajian lain oleh (Claes, 2020) yang berjudul "*Automated Dimension Calculations using a Constructed LiDAR 3D Scanner*" menggunakan LiDAR untuk pemindaian 3D ruang tertutup, menunjukkan potensi teknologi ini dalam menghasilkan estimasi dimensi secara otomatis. Namun, tantangan berupa noise data dan keterbatasan platform fisik masih menjadi kendala utama.

Penelitian menunjukkan LiDAR unggul dalam pengukuran jarak dan rekonstruksi 3D. Namun, penerapannya untuk mengukur volume bahan dalam silo dengan permukaan tak rata masih perlu dianalisis lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode *trapezoidal numerical integration* untuk meningkatkan presisi data LiDAR serta di lakukannya analisa performa lidar yang paling cocok dalam penerapan volumetrik 3D. Dalam penelitian ini dilakukan

menggunakan tiga sensor yakni, Garmin V3, Garmin V3HP, dan RP-LiDAR A1 dalam pengukuran volume silo.

3.3.3 Analisa Kebutuhan Sistem

Analisa kebutuhan sistem merupakan tahapan untuk mengetahui dan menganalisis semua kebutuhan komponen yang digunakan untuk pembuatan prototipe tugas akhir ini. Komponen-komponen tersebut diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. Kebutuhan *Hardware*

Berikut merupakan kebutuhan *hardware* yang di perlukan dalam tugas akhir ini:

a. ESP-32

ESP32 adalah mikrokontroler yang berfungsi sebagai pengendali utama untuk mengatur seluruh proses dalam sistem

b. Lidar garmin V3

Lidar Garmin V3 adalah sensor pemindai laser jarak jauh yang menawarkan akurasi tinggi untuk pengukuran jarak. Dengan desain ringkas dan kecepatan pemindaian cepat, sensor ini cocok untuk aplikasi navigasi, pemetaan, dan deteksi objek.

c. Lidar garmin V3HP

Lidar Garmin V3HP adalah sensor jarak laser berkinerja tinggi dengan akurasi dan jangkauan yang lebih baik dibandingkan versi standar. Dirancang untuk aplikasi navigasi, pemetaan, dan deteksi objek, sensor ini menawarkan pemindaian cepat dan andal, ideal untuk lingkungan dengan kebutuhan presisi tinggi.

d. RP Lidar A1

RP-Lidar A1 adalah sensor pemindai laser 2D yang dirancang untuk aplikasi seperti navigasi, pemetaan, dan penghindaran rintangan. Dengan kemampuan pemindaian 360 derajat, sensor ini menawarkan kecepatan tinggi dan akurasi memadai, menjadikannya pilihan andal untuk robotika dan proyek IoT.

e. *Push button*

Push button di gunakan agar alat yang di rancang lebih terkontrol dalam proses *scanning*

f. Lampu indikator

Lampu indikator berfungsi menunjukkan status aktif atau tidaknya sistem.

g. Dynamixel AX-12

Dynamixel AX-12 di gunakan sebagai aktuator dalam proses *scanning*

h. *Power Supply*

Power supply berfungsi sebagai sumber tegangan untuk mendukung pengoperasian berbagai sensor dan aktuator dalam sistem.

i. XL4005

Regulator XL4005 sebagai konverter tegangan dc bagi pasokan daya bagi sensor dan kontroler

2. Kebutuhan *Software*

Berikut adalah kebutuhan *software* yang digunakan dalam tugas akhir:

- a. Arduino IDE digunakan untuk menulis dan mengunggah program ke ESP32.
- b. *Visual Studio Code* digunakan untuk membuat dan menguji program *website* untuk visualisasi 3D dan pengolahan data point clouds hingga menghasilkan estimasi volume.
- c. Fusion 360 digunakan untuk merancang desain 3D prototipe.
- d. Eagle digunakan untuk merancang skematik dan layout PCB.
- e. Node.js digunakan sebagai platform open-source untuk menjalankan dan mengeksekusi kode JavaScript di sisi server.

3.3.4 Perancangan Sistem

Setelah memahami dan mempelajari kebutuhan sistem, langkah berikutnya adalah melakukan perancangan sistem untuk menghasilkan alat yang sesuai dengan tujuan awal. Proses perancangan ini mencakup identifikasi spesifikasi teknis yang diperlukan agar sistem berjalan dengan baik. Tahap ini sangat krusial karena akan menentukan dasar dan kerangka kerja keseluruhan sistem yang akan dibangun. Dengan perancangan yang matang, diharapkan alat yang dihasilkan dapat berfungsi optimal dan memenuhi semua kebutuhan yang telah ditetapkan.

3.3.5 Perancangan & Realisasi *Hardware*

Setelah mengetahui alat dan bahan yang dibutuhkan serta melakukan perancangan sistem, langkah selanjutnya adalah perancangan *hardware*, yang

mencakup desain rancangan *hardware* dan mekanik. Desain mekanik dilakukan menggunakan *software* Fusion 360 untuk merinci struktur fisik dan komponen mekanik sistem sesuai dengan ukuran yang diinginkan. Proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa komponen-komponen dapat dirakit dengan presisi dan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan dalam perancangan sistem.

3.3.6 Perancangan & Realisasi Software

Perangkat lunak dirancang untuk mengolah data sensor LiDAR & Dynamixel AX-12 dalam visualisasi 3D point-clouds yang ditampilkan di *website*. Antarmuka ini juga menyajikan estimasi volume objek secara langsung dan fitur unduhan data dalam format .csv, memudahkan pengguna untuk analisis lebih lanjut menggunakan perangkat lunak lain.

3.3.7 Uji Keseluruhan Sistem

Setelah sistem selesai dibuat, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian guna memastikan seluruh komponen, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, bekerja sesuai spesifikasi yang telah dirancang. Pengujian meliputi evaluasi menyeluruh terhadap setiap fungsi dan kinerja sistem untuk menjamin kestabilan serta memenuhi performa yang diharapkan. Tahap ini sangat penting karena menentukan keberhasilan alat dalam penerapan dan penggunaannya di dunia nyata.

3.3.8 Evaluasi & Diskusi

Tahap evaluasi dan diskusi bertujuan untuk menilai kinerja sistem serta memastikan bahwa alat berfungsi sesuai dengan yang direncanakan. Proses evaluasi mencakup semua komponen, baik dari sisi perangkat lunak maupun perangkat keras. Apabila ditemukan kekeliruan, perbaikan segera dilakukan. Hasil evaluasi ini kemudian digunakan dalam diskusi untuk mengukur sejauh mana sistem yang dirancang dan diuji telah memenuhi tujuan penelitian. Diskusi ini juga menjadi panduan utama dalam upaya penyempurnaan sistem yang telah dikembangkan.

3.3.9 Penyusunan Laporan Penelitian

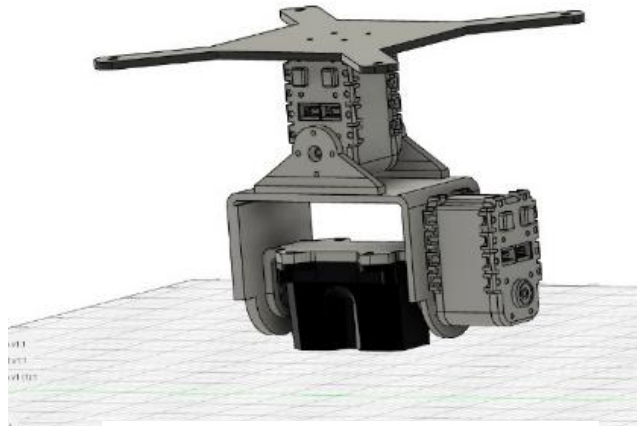
Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah menyusun laporan tugas akhir yang mendokumentasikan seluruh tahapan, mulai dari perancangan hingga hasil akhir. Laporan mencakup detail desain perangkat keras dan lunak, metodologi pengujian, hasil, analisis, serta saran untuk pengembangan di masa depan. Dokumen ini menjadi bukti resmi atas proses penelitian sekaligus panduan bagi penelitian selanjutnya.

3.4 Perencanaan dan Desain

Pada tugas akhir ini terdapat pembuatan *hardware* atau prototipe alat dan *software* untuk visualisasi data. Berikut ini merupakan perencanaan *hardware* dan *software* yang telah dirancang penulis untuk tugas akhir ini.

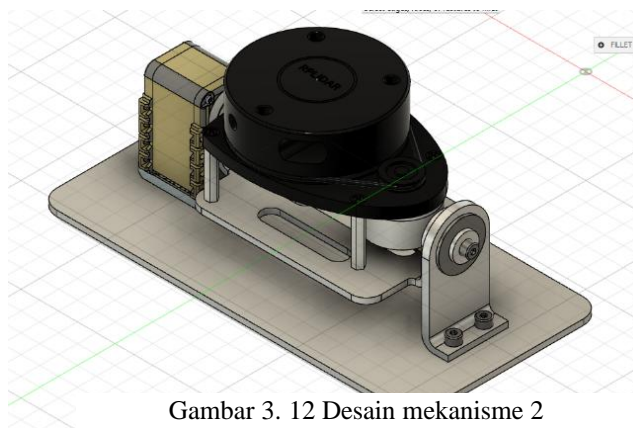
3.4.1 Desain Mekanisme

Perencanaan mekanik sistem pada tugas akhir ini dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak Fusion 360 sebagai alat utama untuk merancang dan memvisualisasikan struktur fisik serta komponen mekanik secara menyeluruh. Fusion 360 dipilih karena memiliki kemampuan lengkap dalam mendukung proses desain berbasis komputer, mulai dari pembuatan model tiga dimensi (3D) dengan tingkat presisi tinggi hingga analisis performa struktur. Melalui perangkat lunak ini, berbagai komponen seperti rangka utama,udukan sensor, hingga mekanisme penggerak aktuator dapat dimodelkan secara detail sehingga memudahkan proses integrasi antarbagian. Selain itu, Fusion 360 juga dilengkapi fitur simulasi yang sangat berguna untuk mengevaluasi kekuatan struktur, daya tahan material, serta kompatibilitas antar komponen sebelum rancangan diproduksi dalam bentuk fisik. Dengan adanya simulasi ini, potensi kesalahan pada tahap manufaktur dapat diminimalisasi, sehingga waktu dan biaya produksi menjadi lebih efisien. Perencanaan mekanik yang berbasis Fusion 360 memungkinkan sistem yang dikembangkan memiliki desain yang optimal, kokoh, dan sesuai dengan kebutuhan fungsional dari perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan demikian, hasil rancangan mekanik tidak hanya mendukung kinerja sistem secara keseluruhan, tetapi juga memberikan jaminan bahwa perangkat dapat beroperasi secara andal dalam aplikasi yang dituju.



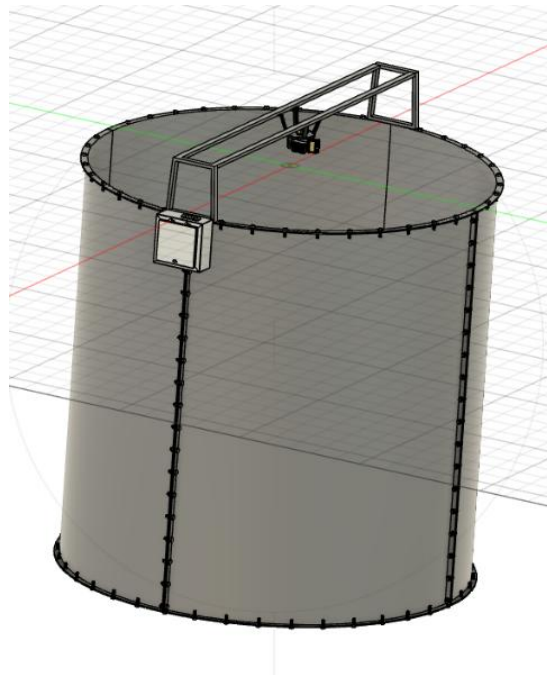
Gambar 3. 11 Desain mekanisme 1
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 3.11 ditunjukkan mekanisme yang digunakan untuk sensor Lidar Garmin V3 dan Garmin V3HP. Pada rancangan tersebut terlihat adanya dua buah aktuator servo Dynamixel AX-12A yang berfungsi sebagai penggerak utama dalam mekanisme pemindaian. Kedua servo ini bekerja dengan membentuk gerakan pada dua sumbu, yaitu sumbu roll dan sumbu pitch. Sumbu roll digunakan untuk menghasilkan pergerakan horizontal sehingga sensor dapat melakukan pemindaian secara menyeluruh pada arah mendatar, sedangkan sumbu pitch berfungsi untuk menggerakkan sensor pada arah vertikal guna memperoleh sudut pandang yang lebih luas. Kombinasi gerakan dari kedua sumbu tersebut memungkinkan sensor Lidar melakukan pemindaian dua dimensi yang kemudian diproyeksikan menjadi data tiga dimensi. Dengan adanya mekanisme ini, akurasi serta cakupan hasil pemindaian dapat ditingkatkan, sehingga data yang dihasilkan lebih representatif untuk proses perhitungan volume gabah di dalam silo.



Gambar 3. 12 Desain mekanisme 2
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 3.12 ditunjukkan desain mekanisme yang digunakan untuk sensor RP-Lidar A1. Perbedaan utama dari rancangan ini dibandingkan dengan mekanisme pada Lidar Garmin V3 dan V3HP terletak pada jumlah aktuator servo yang digunakan. Pada desain RP-Lidar A1, mekanisme pitch pada sumbu Y tidak lagi diperlukan, sehingga jumlah servo yang digunakan menjadi lebih sedikit. Hal ini disebabkan oleh kemampuan bawaan sensor RP-Lidar A1 yang sudah dapat mengirimkan data sudut (angle) sekaligus data jarak (distance) secara langsung. Dengan demikian, sistem pemindaian dapat disederhanakan karena sensor tidak membutuhkan tambahan pergerakan pada sumbu vertikal untuk memperoleh informasi sudut. Desain mekanisme ini tidak hanya membuat struktur lebih ringkas dan ringan, tetapi juga meningkatkan efisiensi kinerja sistem, karena pemrosesan data sudut dan jarak sepenuhnya ditangani oleh sensor secara internal. Dengan cara ini, potensi sumber kesalahan mekanik dapat dikurangi, sehingga hasil pemindaian diharapkan lebih stabil dan andal.



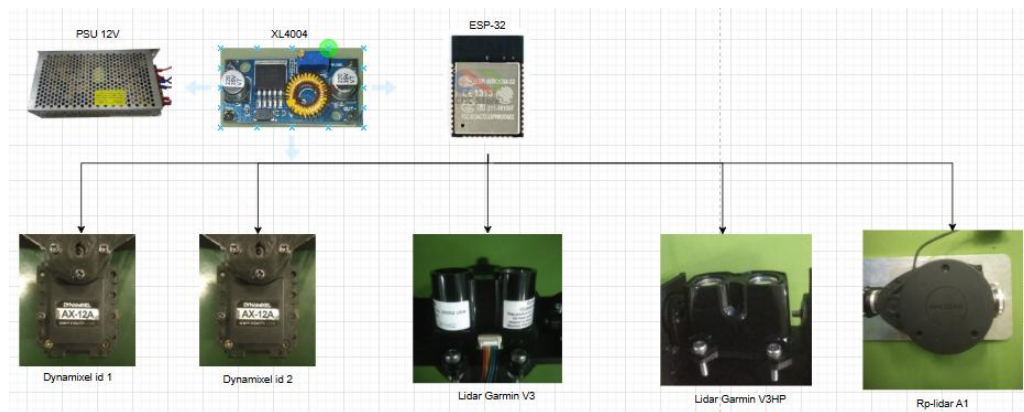
Gambar 3. 13 Penerapan Mekanisme Pada Silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 3.13 ditampilkan ilustrasi penerapan mekanisme yang telah dirancang ketika diaplikasikan pada silo. Gambar ini memberikan gambaran nyata mengenai bagaimana sistem pemindaian ditempatkan dan bekerja dalam kondisi

sesungguhnya. Mekanisme yang terdiri dari sensor Lidar dan aktuator ditempatkan pada posisi strategis sehingga mampu melakukan pemindaian secara menyeluruh terhadap volume gabah di dalam silo.

Desain ini dirancang sedemikian rupa untuk memastikan bahwa setiap sudut area dalam silo dapat terjangkau, baik pada bagian dinding maupun area tengah. Dengan penerapan ini, sistem mampu merekonstruksi bentuk tiga dimensi isi silo secara lebih akurat. Selain itu, mekanisme ini juga memperlihatkan integrasi antara aspek mekanik dan elektronik, di mana hasil rancangan mekanik yang sebelumnya ditunjukkan pada gambar-gambar terdahulu dapat berfungsi secara optimal ketika diimplementasikan pada kondisi nyata. Gambaran penerapan ini sekaligus menjadi validasi awal bahwa rancangan mekanisme dapat digunakan sesuai dengan tujuan utama penelitian, yakni menghitung estimasi volume gabah di dalam silo dengan tingkat keakuratan yang lebih baik.

3.5 Perencanaan *Hardware*

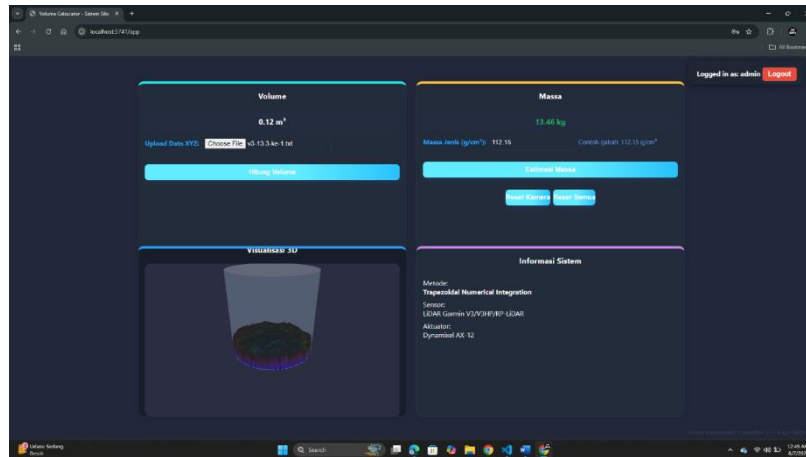


Gambar 3. 15 Konfigurasi *hardware*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 3.15 menunjukkan perencanaan sistem elektrik dalam tugas akhir ini. Arus listrik DC kemudian dialirkan ke regulator DC, yang berfungsi sebagai sumber daya bagi ESP32. Karena penelitian ini berfokus pada perbandingan kinerja sensor terhadap rekonstruksi 3D, ESP32 digunakan untuk mengontrol sensor LiDAR melalui komunikasi I2C dan mengendalikan servomotor Dynamixel AX-12 melalui komunikasi serial. Dalam penerapannya, sistem mekanik dirancang agar

dapat menerapkan sistem plug and play, yang memungkinkan penggantian sensor dengan mudah selama proses berjalan.

3.5.1 Interface Website



Gambar 3. 16 Interface website
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 3.16 merupakan tampilan *website* pada tugas akhir ini, dimana setelah pengguna *upload* data txt yang telah di download dan memasukkan informasi massa jenis zat, maka akan di tampilkan visualisasi kondisi objek pada silo di sertai informasi massa jenis zat

3.6 Sistem Validasi

Dalam penelitian ini hal yang perlu di validasi antara lain

1. Validasi sudut Dynamixel AX-12 dengan busur untuk membandingkan hasil perintah dan pengukuran manual.
2. Validasi jarak Lidar dengan mistar untuk membandingkan hasil pengukuran sensor dan pengukuran nyata.
3. alidasi dilakukan dengan membandingkan hasil penimbangan massa gabah menggunakan timbangan fisik dengan hasil pengukuran volume oleh Lidar di dalam silo untuk mengetahui tingkat kesesuaiannya.
4. Validasi massa jenis atau densitas gabah yag di lakukan dengan menghitung kapasitas volume alat ukur berupa gelas ukur dan mengukur berat gabah dengan timbangan kemudian membagi massa gabah yang di peroleh dengan kapasias maksimal volume media ukur seperti yang sudah di jelaskan pada sub bab 3.1.3.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil serta analisis dari serangkaian pengujian yang dilakukan dalam rangka penyusunan tugas akhir. Pengujian dibagi ke dalam tiga kategori utama, yaitu pengujian perangkat keras, pengujian perangkat lunak, dan pengujian sistem secara keseluruhan. Pengujian ini dilakukan guna memastikan bahwa seluruh bagian dari sistem yang telah dirancang mampu beroperasi dengan baik dan sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan sebelumnya.

4.1 Hasil Pengujian *Hardware*

Hasil dari perbandingan tersebut akan digunakan untuk menghitung persentase kesalahan dengan menggunakan Persamaan 4.1.

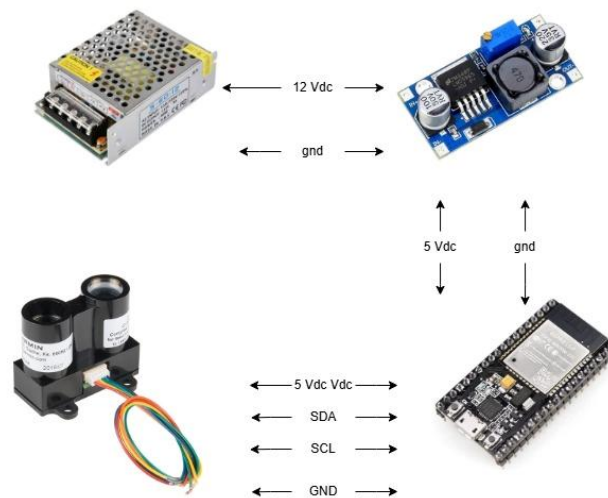
$$0/0 Error = \left| \frac{Data\ aktual - Data\ sensor}{Data\ aktual} \right| \times 100 \quad 4.1$$

Dalam tahap pengujian, penulis melakukan serangkaian uji coba pada berbagai kondisi guna memastikan bahwa sensor dan aktuator dapat berfungsi secara optimal. Data yang diperoleh dari pengujian tersebut akan dianalisis untuk mengetahui sejauh mana perbedaan antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur standar. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah komponen yang digunakan telah sesuai dengan kebutuhan sistem atau masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut. Selain itu, hasil analisis juga menjadi dasar dalam menentukan langkah kalibrasi yang diperlukan agar akurasi dan konsistensi sensor meningkat. Seluruh proses ini dilakukan untuk menjamin bahwa komponen yang digunakan memenuhi spesifikasi teknis dan dapat diandalkan dalam aplikasi nyata.

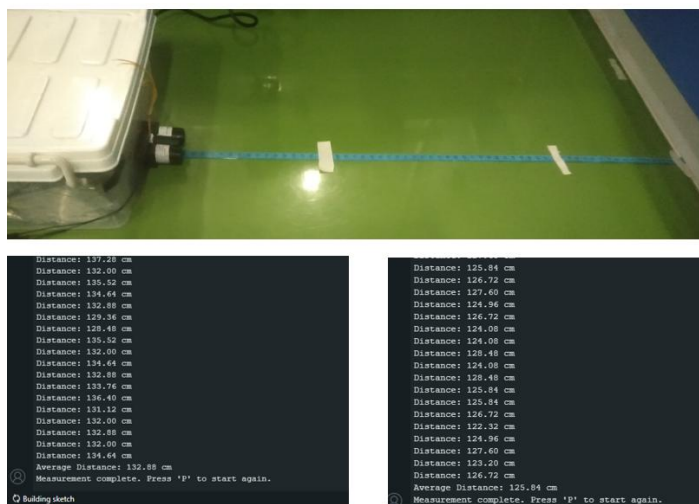
4.1.1 Uji Parsial Sensor Lidar Garmin V3

Pengujian LIDAR Garmin V3 dilakukan dengan cara yang sama, yaitu mengambil 50 data pengukuran jarak pada rentang 60 cm hingga 140 cm. Setelah data terkumpul, dilakukan perhitungan rata-rata untuk memperoleh hasil yang lebih stabil. Hasil pengukuran sensor kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan mistar sebagai referensi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa LIDAR Garmin V3 memiliki *Error* rata-rata sebesar 5.26%, sedikit lebih besar dibandingkan dengan V3HP. *Error* terkecil terpantau pada pengukuran jarak 135 cm (0.49%) dan *Error* terbesar terjadi pada jarak 60 cm (14.40%). Berdasarkan datasheet Garmin V3, sensor ini memiliki *Error* toleransi pengukuran untuk rentang <2,5 meter sekitar ± 2.5 cm. Meskipun ada *Error* yang cukup besar pada pengukuran di jarak pendek, LIDAR Garmin V3 tetap memberikan hasil yang dapat diterima, terutama pada rentang jarak lebih panjang.



Gambar 4. 2 wiring lidar v3
(Dokumentasi pribadi, 2025)



Gambar 4. 1 Uji parsial lidar v3
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Tabel 4. 1 Data uji parsial lidar v3

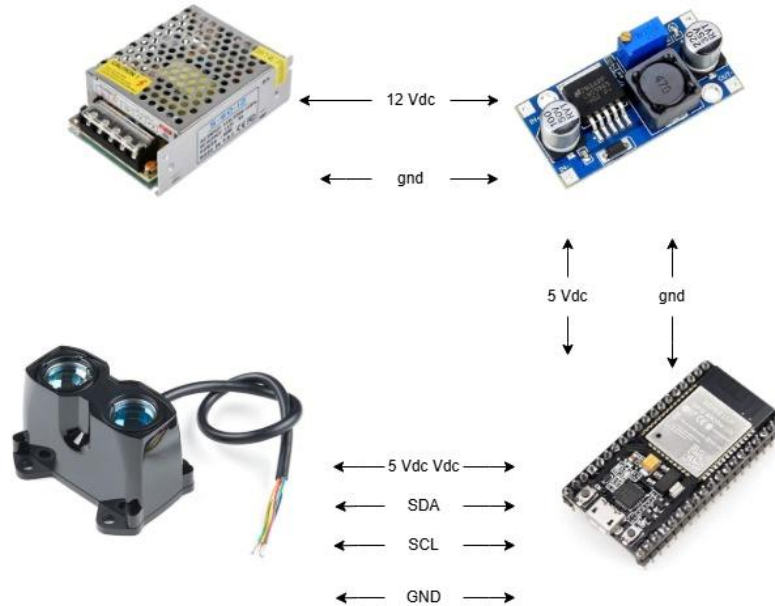
No.	Data Aktual(Cm)	Data Sensor(Cm)	Error(%)
1	140	136.4	2.57
2	135	132.88	1.57
3	130	129.36	0.49
4	125	125.84	0.67
5	120	121.44	1.2
6	115	117.04	1.77
7	110	111.76	1.6
8	105	107.36	2.25
9	100	103.84	3.84
10	95	99.44	4.67
11	90	96.8	7.56
12	85	91.52	7.67
13	80	88	10
14	75	83.6	11.47
15	70	76.56	9.37
16	65	70.4	8.31
17	60	68.64	14.4
Rata - Rata Error (%)			5.26

4.1.2 Uji Parsial Sensor Lidar Garmin V3HP

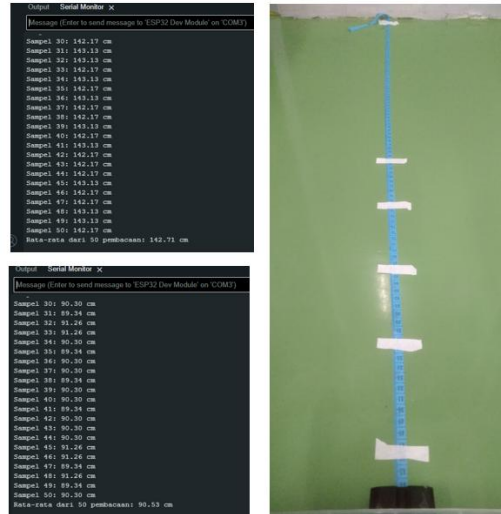
Pada pengujian LIDAR Garmin V3HP, dilakukan pengambilan 50 data pengukuran jarak pada rentang dari 60 cm hingga 140 cm. Setiap data pengukuran dihitung rata-ratanya untuk meminimalkan fluktuasi dan memperoleh hasil yang lebih stabil. Data yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan alat ukur fisik mistar sebagai referensi untuk mengukur akurasi pengukuran sensor.

Berdasarkan data yang diperoleh, sensor Garmin V3HP menunjukkan *Error* rata-rata sebesar 3.14%, dengan *Error* terkecil pada jarak 125 cm (0.81%) dan *Error* terbesar pada jarak 60 cm (9.93%). Berdasarkan datasheet Garmin V3HP, nilai *Error* pengukuran jarak untuk rentang <2 meter diharapkan ± 5 cm, yang berarti *Error* yang tercatat pada pengujian ini masih dalam batas toleransi yang diharapkan. Secara keseluruhan, sensor Garmin V3HP memberikan hasil

pengukuran yang cukup akurat pada rentang jarak yang lebih jauh, meskipun ada variasi *Error* yang lebih besar pada pengukuran di jarak lebih dekat.



Gambar 4. 3 wiring lidar garmin v3hp
(Dokumentasi pribadi, 2025)



Gambar 4. 4 Uji parsial v3hp
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 4.4 menunjukkan tahapan proses uji parsial yang dilakukan pada sensor LiDAR V3HP. Pada pengujian ini, sensor dioperasikan dalam kondisi terbatas untuk mengevaluasi kinerja dasar, termasuk akurasi pembacaan jarak serta kestabilan data yang dihasilkan. Uji parsial ini penting dilakukan sebelum sistem diterapkan secara penuh pada silo, sehingga dapat dipastikan bahwa sensor

berfungsi dengan baik, memberikan data yang konsisten, serta mampu mendukung perhitungan volume menggunakan metode integrasi numerik trapezoidal

Tabel 4. 2 Data uji parsial v3hp

No.	Data Aktual(Cm)	Data Sensor(Cm)	Error(%)
1	140	143.17	2.26
2	135	138.39	2.51
3	130	133.45	2.65
4	125	126.01	0.81
5	120	123.88	3.23
6	115	117.83	2.46
7	110	112.24	2.04
8	105	109.80	4.57
9	100	103.40	3.40
10	95	99.81	5.06
11	90	90.53	0.59
12	85	86.99	2.34
13	80	80.88	1.10
14	75	75.85	1.13
15	70	67.32	3.83
16	65	61.42	5.51
17	60	54.04	9.93
Rata - Rata Error (%)			3.14

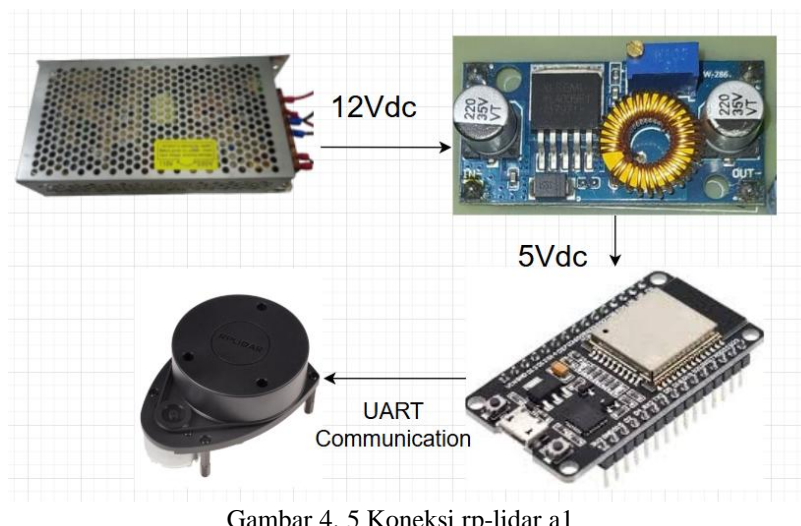
Tabel 4.2 menampilkan hasil pengujian parsial sensor LiDAR V3HP dengan membandingkan jarak aktual yang diperoleh melalui pengukuran manual menggunakan mistar dengan jarak hasil pembacaan sensor. Pengujian dilakukan pada 17 titik dengan interval 5 cm pada rentang 60 cm hingga 140 cm. Tujuan dari uji ini adalah untuk mengetahui tingkat akurasi dan kestabilan pembacaan sensor sebelum digunakan dalam sistem pengukuran volume pada silo.

Berdasarkan data yang diperoleh, secara umum terlihat bahwa hasil pembacaan sensor berada cukup dekat dengan nilai aktual, walaupun terdapat perbedaan tertentu yang direpresentasikan dalam bentuk nilai error. Pada jarak yang lebih tinggi, seperti 140 cm hingga 120 cm, nilai error relatif kecil dan konsisten dengan kisaran sekitar 2–3%. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang tersebut sensor mampu memberikan pembacaan yang stabil dan mendekati kondisi sebenarnya.

Namun demikian, pada jarak yang lebih rendah, khususnya mulai dari 70 cm ke bawah, tingkat deviasi yang ditunjukkan oleh sensor mulai meningkat. Nilai error terbesar tercatat pada jarak 60 cm dengan persentase 9,93%, sedangkan error terkecil terdapat pada jarak 90 cm dengan persentase 0,59%. Perbedaan ini menunjukkan adanya kecenderungan sensor mengalami ketidakstabilan dalam mendeteksi objek pada jarak yang lebih pendek, yang kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan sudut pancaran sinar laser, kondisi pantulan permukaan, atau noise pada pembacaan sensor.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menghasilkan rata-rata error sebesar 3,14%. Nilai ini masih dapat diterima untuk kebutuhan estimasi jarak pada sistem, namun tetap memerlukan langkah pengolahan data lanjutan. Oleh karena itu, penerapan metode penyaringan seperti Moving Average akan sangat membantu dalam mengurangi fluktuasi dan meningkatkan kestabilan data sebelum digunakan dalam perhitungan volume dengan metode integrasi numerik trapesium. Dengan demikian, hasil uji parsial ini memberikan gambaran awal bahwa sensor LiDAR V3HP cukup layak digunakan, meskipun perlu disertai strategi optimasi dalam pengolahan data.

4.1.3 Uji Parsial Sensor RP Lidar A1



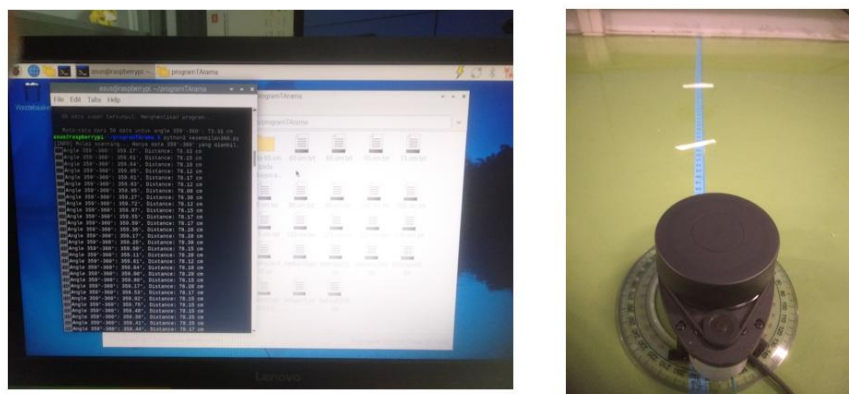
Gambar 4. 5 Koneksi rp-lidar a1
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 4.5 menunjukkan rancangan koneksi antara sensor RP-LiDAR A1 dengan mikrokontroler ESP32 yang digunakan sebagai unit pemroses data. Pada rancangan ini, ESP32 berperan sebagai pengendali utama yang menerima data hasil

pemindaian dari LiDAR berupa informasi sudut (angle) dan jarak (distance). Koneksi dilakukan melalui jalur komunikasi serial dengan memanfaatkan pin RX dan TX pada ESP32 yang dihubungkan langsung ke port data LiDAR A1.

Agar komunikasi dapat berjalan dengan baik, diperlukan pengaturan baudrate yang sesuai dengan spesifikasi LiDAR, sehingga data yang dikirimkan oleh sensor dapat diterjemahkan dengan benar oleh ESP32. Setelah koneksi berhasil dilakukan, ESP32 mampu membaca data frame yang dikirimkan oleh LiDAR secara kontinu. Data ini kemudian diolah untuk memisahkan informasi sudut dan jarak, sehingga diperoleh representasi spasial dari objek atau bidang yang dipindai.

Dengan adanya koneksi ini, sistem mampu menampilkan informasi sudut dan jarak secara real-time melalui Serial Monitor maupun perangkat tambahan lain seperti komputer atau modul komunikasi nirkabel. Tahapan ini menjadi bagian penting dalam proses validasi sensor, karena memastikan bahwa LiDAR A1 dapat digunakan secara langsung untuk mengukur dan memetakan lingkungan silo tanpa memerlukan aktuator tambahan untuk gerakan sumbu Y. Hal ini memberikan efisiensi dalam mekanisme desain sekaligus meningkatkan kepraktisan dalam implementasi di lapangan.



Gambar 4. 6 Serial monitor Uji parsial rp-lidar a1
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 4.6 menunjukkan proses uji coba parsial terhadap sensor RP-LiDAR A1. Pada tahap ini, pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sensor

mampu membaca data jarak (distance) dan sudut (angle) secara akurat ketika dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32. Uji parsial ini dilakukan dalam kondisi terkontrol, yaitu dengan meletakkan objek pada jarak tertentu dari sensor agar dapat diamati konsistensi hasil pengukuran.

Tabel 4. 3 Uji parsial rp-lidar

No.	Data Aktual(Cm)	Data Sensor(Cm)	Error(%)
1	140	143.46	2.47
2	135	138.45	2.56
3	130	133.27	2.52
4	125	128.5	2.8
5	120	123.78	3.15
6	115	118.44	2.99
7	110	113.35	3.05
8	105	108.18	3.03
9	100	103.16	3.16
10	95	98.35	3.53
11	90	93.47	3.86
12	85	88.22	3.79
13	80	83.39	4.24
14	75	78.15	4.2
15	70	73.25	4.64
16	65	67.67	4.11
17	60	63.21	5.35
Rata - Rata Error (%)			3.50

Data hasil pemindaian yang diperoleh dari RP-LiDAR A1 ditransmisikan melalui jalur komunikasi serial dan ditampilkan secara langsung pada Serial Monitor. Dari proses ini, dapat dipastikan bahwa sensor berfungsi dengan baik dalam mendeteksi objek serta menghasilkan keluaran data berupa sudut dan jarak sesuai format data frame yang ditetapkan. Uji parsial ini memberikan gambaran awal performa sensor RP-LiDAR A1 sebelum diterapkan pada sistem silo,

sekaligus menjadi dasar evaluasi keandalan pembacaan dan potensi error pada pengukuran sebenarnya.

4.1.4 Pengujian *Emergency Button*

Pengujian tombol darurat dilakukan untuk memastikan komponen ini berfungsi sebagai sistem pengaman dengan memutus aliran listrik dalam situasi darurat. Tombol darurat dirancang untuk menghentikan sistem operasi secara instan, mencegah kerusakan perangkat keras atau melindungi pengguna dari potensi bahaya. Pengujian ini fokus pada pengukuran resistansi tombol darurat dalam dua kondisi: saat tidak ditekan dan saat ditekan .

Dalam pengujian, tombol darurat dihubungkan ke rangkaian listrik dengan sumber daya DC dari catu daya 12V. Resistansi diukur menggunakan multimeter untuk memancarkan perilaku tombol pada kedua kondisi. Hasil pengujian menunjukkan sebagai berikut:



Gambar 4. 7 Tombol di tekan
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.8 ditunjukkan hasil pengujian sistem ketika *Emergency Button* ditekan. Pada kondisi ini, rangkaian pengaman bekerja sebagaimana mestinya dan menghasilkan nilai resistansi sebesar 5,3 ohm. Nilai resistansi tersebut mengindikasikan bahwa tombol darurat mampu memutus serta mengalihkan arus listrik sesuai dengan fungsinya, sehingga sistem dapat segera berhenti beroperasi ketika terjadi keadaan darurat. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa komponen *Emergency Button* benar-benar responsif, handal,

dan sesuai standar keselamatan yang dibutuhkan dalam implementasi sistem secara keseluruhan.



Gambar 4. 8 Tombol tidak di tekan
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.9 ditunjukkan hasil pengujian ketika Emergency Button berada dalam kondisi tidak ditekan. Pada keadaan ini, sistem masih berada dalam kondisi normal atau siap beroperasi sehingga jalur rangkaian listrik tetap terhubung dengan baik. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai resistansi yang terbaca sebesar 0 ohm, yang menandakan bahwa arus listrik dapat mengalir tanpa hambatan. Hasil pengujian ini sekaligus mengonfirmasi bahwa tombol darurat berfungsi sesuai dengan prinsip kerja yang diharapkan, yakni hanya akan memutus aliran listrik apabila tombol ditekan.

4.1.5 Pengujian Dynamixel AX-12

Kalibrasi nilai sudut pada Dynamixel AX-12A perlu dilakukan dalam tugas akhir Anda karena servo ini memiliki sistem umpan balik canggih yang memungkinkan pemantauan dan pengaturan posisi dengan akurat dalam rentang



Gambar 4. 9 Pengujian Parsial Dynamixel AX-12

(Dokumentasi pribadi, 2025)

sudut 0° hingga 300° , sehingga kalibrasi memastikan pergerakan motor benar-benar sesuai dengan nilai sudut yang diinginkan.

Pada Gambar 4.10 ditunjukkan proses pengujian parsial yang dilakukan terhadap aktuator Dynamixel AX-12A. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data awal mengenai respon aktuator terhadap perintah sudut yang diberikan, sekaligus mengevaluasi tingkat akurasi pergerakannya. Dari proses uji parsial tersebut, diperoleh hasil pengukuran yang kemudian disajikan secara sistematis dalam bentuk tabel, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.4 di bawah ini. Tabel tersebut berisi rangkuman hasil uji parsial yang menjadi dasar analisis performa aktuator sebelum diaplikasikan lebih lanjut dalam sistem keseluruhan.

Tabel 4. 4 Pengujian parsial Dynamixel AX-12

NO	Data aktual ($^{\circ}$)	Data Feedback ($^{\circ}$)	Error(%)
1	10	9.38	6.20
2	20	19.92	0.40
3	30	29.3	2.33
4	40	39.84	0.40
5	50	49.5	1.00
6	60	59.77	0.38
7	70	69.73	0.39
8	80	79.1	1.13
9	90	89.06	1.04
10	100	99.32	0.68
	Rata-rata Error (%)		1.47

Pada tabel 4.4, pengujian parsial dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan posisi pada servo Dynamixel AX-12. Dalam pengujian ini, servo diarahkan ke sepuluh posisi sudut yang telah ditentukan mulai dari 10° hingga 100° dengan interval 10° . Setiap sudut kemudian dibandingkan dengan data pembacaan (feedback) posisi aktual dari servo untuk menghitung nilai *Error* secara persentase.

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel [nomor/tabel], terlihat bahwa data feedback memiliki tingkat akurasi yang cukup baik. Sebagai contoh, pada sudut target 10° , servo memberikan feedback sebesar 9.38° , yang menghasilkan *Error* sebesar 6.20%. Namun, untuk sebagian besar titik pengujian

lainnya, nilai *Error* berada di bawah 2%, dengan nilai *Error* terendah sebesar 0.38% pada sudut 60°. Nilai *Error* tertinggi hanya terjadi pada sudut 10°, yang kemungkinan disebabkan oleh ketidakteelitian pada saat posisi awal atau resolusi sudut yang lebih sensitif pada nilai rendah.

Secara keseluruhan, rata-rata *Error* dari sepuluh pengujian adalah sebesar 1.47%, yang menunjukkan bahwa sistem pembacaan posisi pada servo Dynamixel AX-12 cukup andal untuk aplikasi yang memerlukan ketelitian sedang hingga tinggi. Hasil ini mengindikasikan bahwa servo mampu memberikan umpan balik posisi yang akurat dan dapat digunakan dalam sistem kontrol tertutup (closed-loop) yang membutuhkan informasi posisi secara real-time.

4.2 Validasi Perhitungan

Dalam proses pengukuran volume material di dalam silo, terutama untuk material yang permukaannya tidak rata seperti gabah, dibutuhkan pendekatan tiga dimensi. Tujuannya adalah mendapatkan nilai koordinat spasial (x,y,z) dari permukaan material. Dengan data ini, kita bisa menerapkan metode numerik seperti *Trapezoidal* untuk menghitung volume material. Untuk mendapatkan data tersebut, digunakan lidar yang digerakkan dengan servo di sumbu pitch dan roll untuk memindai seluruh permukaan. Berikut merupakan cara yang di gunakan untuk mendapatkan data spasial (x,y,z) :

4.2.1 Perhitungan x,y,z

Gambar 4. 10 Serial monitor uji coba

(Dokumentasi pribadi, 2025)

$$\theta_{x_{max}} = \arctan\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad 4.1$$

Dengan di ketahui nilai r_0 sebesar 120.20 cm pada gambar 4.11, maka untuk $\theta_{x_{max}}$ dapat di ketahui menggunakan persamaan 4.1 di atas dengan ketentuan jari-jari silo yang sudah di tetapkan yakni sebesar 60 cm. Berikut merupakan substitusi nilai uji coba yang sesuai dengan data serial monitor percobaan

$$\theta_{x_{max}} = \arctan\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad 4.1$$

$$\theta_{x_{max}} = \arctan\left(\frac{62.5}{120.20}\right) \quad 4.1.1$$

$$\theta_{x_{max}} = \arctan(0.519) \quad 4.1.2$$

$$\theta_{x_{max}} = 27.42^\circ \quad 4.1.3$$

Pada perhitungan $\theta_{x_{max}}$ terhitung 27.42° , sedangkan pada serial monitor tertampil 27.47° lalu nilai ini di bulatkan ke angka 27° . Selanjutnya jika sudah di ketahui nilai $\theta_{x_{max}}$ maka di lanjutkan dengan menghitung nilai x dengan persamaan 4.2 di bawah ini

$$x = Z_0 \times \theta_x \quad 4.2$$

Berikut merupakan substitusi nilai uji coba dalam mengetahui nilai x pada servo roll di posisi sudut tertentu. Dalam perhitungan ini agar sesuai dengan data serial monitor maka akan di hitung nilai x di posisi roll 26° dan nilai z_0 adalah ketinggian silo.

$$x = Z_0 \times \tan \theta_x \quad 4.2$$

$$x = 125 \times \tan 26^\circ \quad 4.2.1$$

$$x = 125 \times 0.487732 \quad 4.2.2$$

$$x = 125 \times 0.487732 \quad 4.2.3$$

$$x = 60.97 \text{ cm} \quad 4.2.4$$

Saat nilai x sudah di ketahui maka langkah selanjutnya adalah menghitung jari-jari efektif y dengan persamaan 4.3 di bawah

$$y_{max} = \sqrt{r^2 - x^2} \quad 4.3$$

$$y_{max} = \sqrt{62.5^2 - 60.97^2} \quad 4.3.1$$

$$y_{\max} = \sqrt{189.26} \quad 4.3.2$$

$$y_{\max} = 13.75 \text{ cm} \quad 4.3.3$$

Setelah nilai jari jari efektif y di posisi roll 26° di ketahui maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai theta untuk servo pitch dengan persamaan 4.4

$$\theta_{y_{\max}(\theta_x)} = \text{atan} \left(\frac{y_{\max}(\theta_x)}{z_0} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad 4.4$$

$$\theta_{y_{\max}(26^\circ)} = \text{atan} \left(\frac{13.75 \text{ cm}}{125 \text{ cm}} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad 4.4.1$$

$$\theta_{y_{\max}(26^\circ)} = \text{atan} (0.11) \times \frac{180}{\pi} \quad 4.4.2$$

$$\theta_{y_{\max}(26^\circ)} = (0.11) \times 57.3 \quad 4.4.3$$

$$\theta_{y_{\max}(26^\circ)} = 6.29^\circ \quad 4.4.4$$

Dengan perhitungan ini di ketahui nilai $\theta_{y_{\max}}$ adalah 6.29° , dan ini sudah mendekati dengan hasil serial monitor yakni 6.28° , sedikit perbedaan nilai ini di karenakan pembulatan nilai angka di belakang koma antara perhitungan dan implementasi. Kemudian dengan ini perhitungan selanjutnya adalah menghitung nilai y di posisi servo pitch 6.28° dengan persamaan 4.5

$$y = Z_0 \times \tan \theta_y \quad 4.5$$

$$y = 125 \text{ cm} \times \tan 6.28^\circ \quad 4.5.1$$

$$y = 125 \text{ cm} \times \tan 6.28^\circ \quad 4.5.2$$

$$y = 125 \text{ cm} \times 0.11 \quad 4.5.3$$

$$y = 13.5 \text{ cm} \quad 4.5.4$$

Dengan ini nilai max theta $x(\theta_{x_{\max}})$ dapat di ketahui berdasarkan r_0 (pembacaan lidar saat posisi servo *roll* dan *pitch center* di 0°) dan nilai x dapat di ketahui berdasarkan parameter tinggi silo (z_0) dan nilai sudut servo roll. Untuk max theta y ($\theta_{y_{\max}}$) di berbagai posisi θ_x juga dapat di ketahui berdasarkan jari-jari efektif y (y_{\max}) dan parameter tinggi silo (z_0), serta nilai y dapat di ketahui berdasarkan parameter tinggi silo (z_0) dan theta y (θ_y). Dengan di ketahui nilai x dan y maka nilai z juga dapat di hitung dengan cara menghitung diagonal sisi (ds) dari persamaan 3.9 pada bab 3.1.5 tentang *konsep numerical integration* yang kembali di tulis di sini sebagai persamaan 4.6.

$$ds = \sqrt{x^2 + y^2} \quad 4.6$$

$$ds=\sqrt{60.97^2 + 13.5^2} \quad 4.6.1$$

$$ds=\sqrt{3716.99 \text{ cm} + 182.25 \text{ cm}} \quad 4.6.2$$

$$ds=\sqrt{3899.24 \text{ cm}} \quad 4.6.3$$

$$ds=62.44 \text{ cm} \quad 4.6.4$$

Dengan di ketahui nilai diagonal sisi maka nilai z_{dinamis} dapat di hitung dengan persamaan 4.7 dengan pengurangan nilai kuadrat pembacaan lidar di kurangi diagonal sisi (ds)

$$z_{\text{dinamis}}=\sqrt{\text{lidar}^2 - ds^2} \quad 4.7$$

$$z_{\text{dinamis}}=\sqrt{117^2 - 62.44^2} \quad 4.7.1$$

$$z_{\text{dinamis}}=\sqrt{1389 \text{ cm} - 3898.24} \quad 4.7.2$$

$$z_{\text{dinamis}}=\sqrt{9789.76} \quad 4.7.3$$

$$z_{\text{dinamis}}=98.94 \text{ cm} \quad 4.7.4$$

Dengan adanya nilai z_{dinamis} maka nilai z_{material} dapat di hitung dengan mengurangi nilai tinggi silo dengan z_{dinamis} , maka dapat di ketahui nilai z_{material} di posisi roll 26° dan pitch 6.29°

$$z_{\text{material}}= z_0 - z_{\text{dinamis}} \quad 4.8$$

$$z_{\text{material}}= 125 \text{ cm} - 98.94 \quad 4.8.1$$

$$z_{\text{material}}= 26.06 \quad 4.8.2$$

Selain z_{material} , grid tiap segmen juga harus di ketahui agar perhitungan *Trapezoidal* dapat di lakukan. Untuk mengetahui nilai grid ($\Delta x = \Delta y$) maka di gunakan persamaan 4.9

$$\Delta x = \Delta y = z_0 \times \tan 1^\circ \quad 4.9$$

$$\Delta x = \Delta y = 125 \times \tan 1^\circ \quad 4.9.1$$

$$\Delta x = \Delta y = 125 \times 0.0175 \quad 4.9.2$$

$$\Delta x = \Delta y = 2.18 \text{ cm} \quad 4.9.3$$

4.2.2 Perhitungan *Trapezoidal*

Dengan di jelaskannya secara rinci cara perolehan nilai x,y, dan z_{material} maka barulah kumpulan data *array* di proses pada *website* yang berbasis *localhost*

yang nantinya akan di hitung volume serta massa dari material gabah dan akan di jelaskan lebih rinci pada bab 4.4 sampai bab 4.6 mengenai pengujian alat.

Pada bab 4.2.2 ini akan berfokus pada cara *Trapezoidal* itu di jalankan terhadap kumpulan data array koordianat x,y,z. Seperti yang sudah di tampilkan pada serial monitor sebagai sampel perhitungan. Berikut merupakan persamaan yang di gunakan dalam menghitung satu segmen volume dari empat z_material

$$\bar{z} = ((z1 + z2 + z3 + z4) / 4) \times \Delta x \quad 4.10$$

$$\bar{z} = ((26.01+25.74+26.70+26.53) / 4) \times \Delta x \quad 4.10.1$$

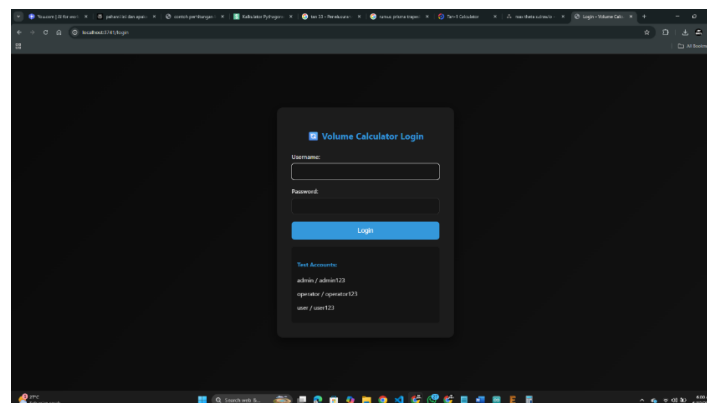
$$\bar{z} = 26.245 \text{ cm} \times 2.1875 \text{ cm} \quad 4.10.2$$

$$\bar{z} = 57.395 \text{ cm}^3 \quad 4.10.3$$

Dengan di ketahui nilai volume 1 segmen maka untuk nilai selanjutnya juga di terapkan hal yang sama, di mana nanti saat semua nilai tiap segmen (\bar{z}) telah di ketahui, maka semua akan di jumlahkan dan di satukan menjadi nilai volume keseluruhan dengan perhitungan penjumlahan seperti pada persamaan 4.11 di bawah ini.

$$\Sigma v = \bar{z}_1 + \bar{z}_2 + \dots + \bar{z}_n \quad 4.11$$

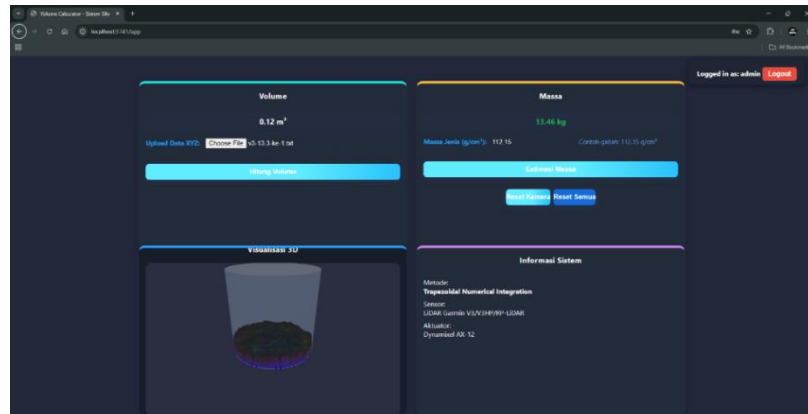
4.3 Tampilan pada *website*



Gambar 4. 11 Tampilan login *website*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 4.12 menampilkan halaman login pada sistem yang telah dirancang. Pada tahap ini, pengguna diwajibkan untuk memasukkan username dan password sebagai bentuk autentikasi sebelum dapat mengakses serta menggunakan seluruh

fitur yang tersedia pada website. Mekanisme ini bertujuan untuk menjaga keamanan data serta memastikan bahwa hanya pengguna yang memiliki hak akses sah yang dapat melakukan proses pengoperasian sistem. Dengan adanya sistem login ini, pengelolaan dan penggunaan website menjadi lebih terkontrol sekaligus memberikan perlindungan terhadap data hasil pengukuran maupun konfigurasi yang tersimpan.



Gambar 4. 12 Tampilan 3d visual *website*
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Gambar 4.13 merupakan tampilan menu utama website yang telah dirancang. Pada halaman ini, pengguna dapat melihat berbagai pilihan menu dan fitur yang disediakan untuk mendukung proses pengoperasian sistem. Menu utama berfungsi sebagai pusat navigasi, sehingga memudahkan pengguna dalam memilih layanan atau aksi yang ingin dilakukan, mulai dari mengakses data hasil pengukuran hingga melakukan proses visualisasi.

4.4 Pengujian Lidar Garmin V3

Pada pengujian ini di lakukan pengujian pada volume tertentu dengan skema pengujian sebagai berikut :

1. Silo di isi gabah dengan berat tertentu
2. Di lakukan pengujian dengan berat material 3 kondisi massa yakni 13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg
3. Di lakukan proses *scanning* sebanyak 5 kali tiap kondisi massa yang berbeda dengan ketentuan material gabah di bentuk cekung, sangat cekung, menggunung,hampir rata, dan setengah bagian.

4.4.1 Lidar Garmin

V3 13.3 kg



Gambar 4. 13 Penimbangan gabah 13.3 kg
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, massa gabah yang digunakan dalam pengujian adalah sebesar 13,3 kg. Gabah tersebut kemudian dimasukkan ke dalam silo sebagai media uji yang merepresentasikan kondisi nyata dari proses penyimpanan. Setelah proses pemasukan gabah selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah mengoperasikan sistem pengukuran volumetrik dengan mengaktifkan dua aktuator Dynamixel AX-12A yang berfungsi mengatur pergerakan mekanis pada sumbu roll dan pitch. Mekanisme ini memungkinkan sensor untuk menjangkau area pemindaian sesuai sudut yang diinginkan, sehingga data yang diperoleh lebih menyeluruh.

Selanjutnya, sensor LiDAR Garmin V3 digunakan untuk memperoleh data jarak secara presisi dari permukaan gabah di dalam silo. Data ini kemudian direkam secara berurutan mengikuti prosedur pengujian yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.4. Proses pengambilan data dilakukan dengan hati-hati untuk meminimalisir adanya gangguan eksternal, seperti getaran atau perubahan posisi sensor, yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Hasil dari pengujian ini nantinya akan dianalisis lebih lanjut guna mengevaluasi akurasi metode integrasi numerik trapezoidal dalam memperkirakan volume gabah, serta dibandingkan dengan hasil

pengukuran massa menggunakan timbangan fisik. Dengan demikian, uji coba ini tidak hanya berfungsi sebagai verifikasi sistem, tetapi juga sebagai langkah penting dalam menilai keandalan kombinasi antara aktuator dan sensor dalam konteks aplikasi nyata pada silo penyimpanan gabah.

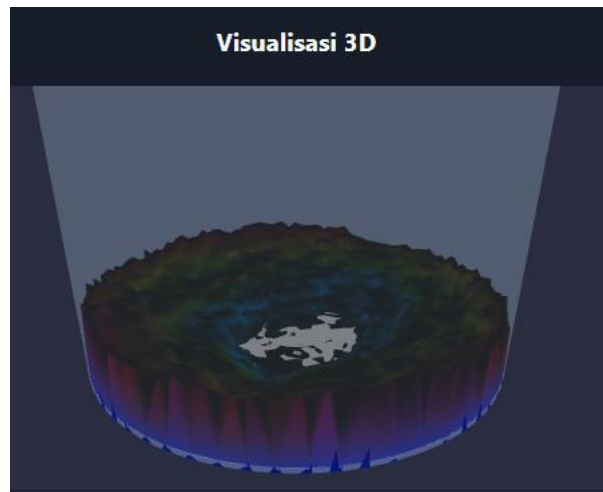


Gambar 4. 14 Keadaan asli kondisi cekung gabah pada silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.15 ditunjukkan kondisi asli gabah di dalam silo, yaitu ketika permukaan gabah tampak cekung akibat pengaruh distribusi butiran gabah yang tidak merata. Kondisi cekungan ini menjadi salah satu tantangan dalam proses pengukuran, karena bentuk permukaan yang tidak rata dapat memengaruhi hasil estimasi volume. Setelah proses scanning dilakukan secara menyeluruh, mikrokontroler ESP32 berhasil memperoleh data mentah berupa file berekstensi .txt yang berisi hasil pengukuran jarak dari sensor. Data ini kemudian diproses dan disimpan sebagai rekaman digital yang siap digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Selanjutnya, file data hasil scanning tersebut diunggah ke dalam sistem berbasis website sehingga memudahkan pengguna untuk memvisualisasikan dan mengevaluasi hasil pengukuran secara real-time maupun setelah pengujian selesai. Proses unggah ini juga memastikan bahwa data tidak hanya tersimpan pada perangkat lokal, melainkan dapat diakses secara terpusat untuk tujuan dokumentasi,

validasi, dan perbandingan antar percobaan. Dengan demikian, tahapan ini tidak hanya menggambarkan proses kerja sensor dalam membaca kondisi permukaan gabah, tetapi juga mengilustrasikan alur integrasi antara perangkat keras (ESP32 dan sensor), perangkat lunak (format data .txt), hingga antarmuka pengguna berbasis web untuk mendukung keandalan sistem pengukuran volumetrik.



Gambar 4. 15 Tampilan *website* Kondisi cekung gabah pada silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.16 ditunjukkan tampilan *website* yang menandakan bahwa sistem telah berhasil membentuk visualisasi 3D dari data hasil scanning yang dihasilkan oleh ESP32 dalam format .txt. Visualisasi ini merupakan tahap penting karena data numerik jarak yang diperoleh sensor diolah menjadi bentuk tiga dimensi yang dapat diamati secara langsung oleh pengguna. Dengan adanya tampilan 3D, kondisi permukaan gabah di dalam silo dapat divisualisasikan secara lebih realistis, sehingga memudahkan dalam proses analisis dan interpretasi hasil pengukuran.

Selain itu, tampilan ini juga membuktikan keberhasilan integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak, di mana data yang awalnya berupa teks mentah dapat diproyeksikan menjadi model volumetrik yang representatif. Keberhasilan ini menjadi dasar penting dalam membangun sistem pengukuran yang tidak hanya mampu menghimpun data, tetapi juga menyajikannya secara informatif dan interaktif melalui antarmuka berbasis *website*. Dengan demikian, pengguna

dapat memantau hasil pengukuran secara lebih mudah, baik untuk kebutuhan analisis cepat di lapangan maupun dokumentasi jangka panjang dalam penelitian.

Tabel 4. 5 Pengujian lidar v3 13.3 kg

Pengujian Lidar v3 pada 13.3 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	11.22	13.3	15.64
2	Sangat Cekung	11.22	13.3	15.64
3	Menggunung	15.7	13.3	18.05
4	Hampir Rata	12.34	13.3	7.22
5	Setengah Bagian	11.22	13.3	15.64
Rata-rata Error (%)				14.44

Pada tabel 4.4 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan lidar garmin v3 pada berat asli 13.3 kg memiliki *Error scanning* terkecil 7,22% dan terbesar di angka 15,64% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 14.44%.

4.4.2 Lidar Garmin V3 30.8 kg



Gambar 4. 16 Penambahan massa gabah 17.5 kg
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.17, massa gabah terukur 17.5 kg, gabah tersebut kemudian di tambahkan ke dalam silo sebagai media uji, sehingga total gabah yang di scanning yang awalnya hanya 13.3

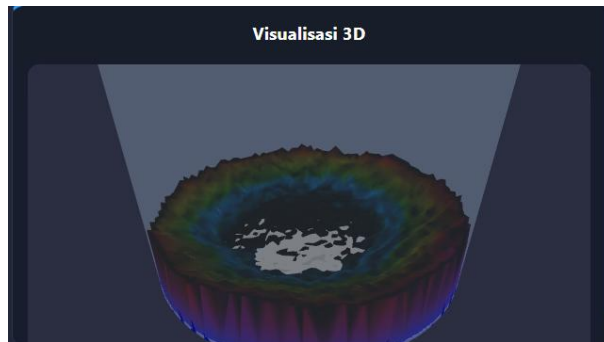
kg menjadi 30.8 kg. Kemudian setelah proses memasukkan gabah selesai, sistem dioperasikan dengan mengaktifkan dua aktuator dynamixel ax-12a yang berfungsi mengatur pergerakan mekanis, serta sensor lidar garmin v3 yang digunakan untuk memperoleh data jarak secara presisi. Proses pengambilan data ini dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian yang telah dijelaskan secara rinci pada sub-bab 4.4.



Gambar 4. 17 Keadaan asli kondisi sangat cekung gabah pada silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.18 diperlihatkan kondisi asli gabah di dalam silo ketika permukaannya berada dalam keadaan sangat cekung. Kondisi ini menggambarkan distribusi gabah yang tidak merata akibat perbedaan ketinggian pada bagian tengah dan tepi silo. Setelah proses scanning dilakukan, sistem yang dikendalikan oleh ESP32 menghasilkan data dalam format .txt yang berisi informasi jarak dari hasil pengukuran sensor. Data ini kemudian diproses lebih lanjut dengan cara diunggah ke website agar dapat divisualisasikan dalam bentuk model tiga dimensi.

Proses unggah data ini menjadi bagian penting karena menunjukkan bagaimana data mentah dari hasil pengukuran dapat diintegrasikan dengan sistem visualisasi berbasis web. Dengan demikian, kondisi permukaan gabah yang cekung dapat divisualisasikan secara jelas dalam bentuk model 3D, sehingga memudahkan analisis bentuk dan volume gabah di dalam silo. Visualisasi tersebut juga memberikan gambaran nyata mengenai hubungan antara kondisi fisik yang teramati langsung dengan hasil pengolahan data digital yang diperoleh dari sensor.



Gambar 4. 18 Tampilan website kondisi sangat cekung gabah pada silo
(Dokumentasi pribadi, 2025)

Pada Gambar 4.19 ditampilkan tampilan website yang menandakan bahwa sistem telah berhasil membentuk visualisasi tiga dimensi dari data hasil scanning yang dikirim oleh ESP32. Visualisasi 3D ini merepresentasikan kondisi permukaan gabah di dalam silo, yang dalam kasus ini memiliki bentuk sangat cekung. Keberhasilan tampilan ini menunjukkan integrasi yang efektif antara perangkat keras, yakni sensor dan mikrokontroler ESP32, dengan perangkat lunak berbasis web untuk menampilkan data secara interaktif.

Dengan adanya model 3D pada website, pengguna dapat memantau distribusi gabah secara visual, mengevaluasi kerapatan dan ketidakraturan permukaan, serta menilai akurasi hasil pemindaian secara lebih intuitif dibandingkan melihat data mentah dalam bentuk .txt. Tampilan ini juga mempermudah proses analisis volume gabah dengan metode trapezoidal numerical integration, karena data spasial yang diperoleh dapat langsung divisualisasikan dan diperiksa konsistensinya. Selain itu, sistem berbasis web memungkinkan akses data secara real-time maupun jarak jauh, sehingga mendukung kegiatan monitoring dan evaluasi tanpa harus berada langsung di lokasi silo. Dengan demikian, Gambar 4.18 tidak hanya menunjukkan keberhasilan teknis sistem dalam memproses data, tetapi juga memberikan kemudahan bagi pengguna dalam memanfaatkan informasi secara praktis dan interaktif.

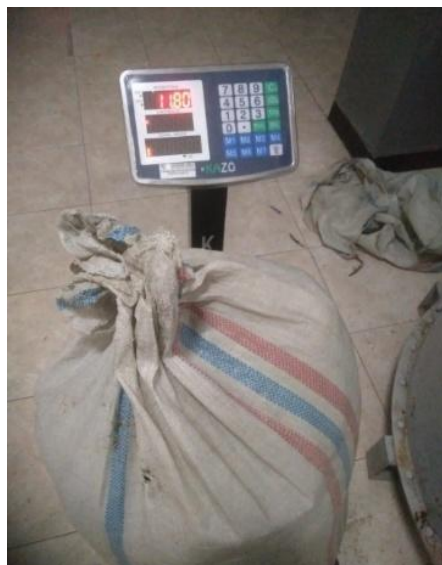
Tabel 4. 6 Pengujian Lidar v3 pada 30,8 kg

Pengujian Lidar v3 pada 30,8 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	24.67	30.8	19.90
2	Sangat Cekung	23.55	30.8	23.54

Pengujian Lidar v3 pada 30,8 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
3	Menggunung	30.28	30.8	1.69
4	Hampir Rata	24.67	30.8	19.90
5	Setengah Bagian	29.16	30.8	5.32
Rata-rata Error (%)				14.07

Tabel 4.5 menyajikan hasil pengujian terkait nilai error massa yang diperoleh selama rangkaian percobaan berlangsung. Dari tabel tersebut dapat diamati bahwa penggunaan sensor Lidar Garmin V3 pada kondisi massa asli sebesar 30,8 kg menghasilkan variasi nilai error yang cukup signifikan. Nilai error terkecil yang tercatat berada pada angka 1,69%, sedangkan nilai error terbesar mencapai 23,54%. Dengan lima kali pengulangan pengujian, diperoleh rata-rata error sebesar 14,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sensor mampu memberikan pembacaan yang cukup dekat dengan nilai sebenarnya pada kondisi tertentu, masih terdapat fluktuasi yang cukup besar pada hasil pengukuran. Hal ini menandakan adanya faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan pembacaan sensor, baik dari kondisi permukaan gabah, sudut pemindaian, maupun keterbatasan resolusi sensor itu sendiri.

4.4.3 Lidar Garmin V3 42.6 kg



Gambar 4. 19 Penambahan berat gabah 11.8 kg

(Dokumentasi pribadi, 2025)

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.20, massa gabah terukur 11.8 kg. Gabah tersebut kemudian di tambahkan ke dalam silo sebagai media uji, sehingga total gabah yang di scanning yang awalnya hanya 30.8 kg menjadi 42.6 kg. Kemudian setelah proses memasukkan gabah selesai, sistem dioperasikan dengan mengaktifkan dua aktuator dynamixel ax-12a yang berfungsi mengatur pergerakan mekanis, serta sensor lidar garmin v3 yang digunakan untuk memperoleh data jarak secara presisi. Proses pengambilan data ini dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.4

Tabel 4. 7 Pengujian Lidar v3 pada 42.6 kg

Pengujian Lidar V3 pada 42.6 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	33.65	42.6	21.01
2	Sangat Cekung	31.4	42.6	26.29
3	Menggunung	39.25	42.6	7.86
4	Hampir Rata	34.77	42.6	18.38
5	Setengah Bagian	37.01	42.6	13.12
Rata-rata Error (%)				17.33

Pada tabel 4.6 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan lidar garmin v3 pada berat asli 42.6 kg memiliki *Error scanning* terkecil 7.86 % dan terbesar di angka 26.29% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 17.33%.

4.4.4 Performansi Lidar V3

Berikut merupakan performansi kinerja lidar v3hp pada tiga variasi massa (13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg) dan 5 variasi kondisi (cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 8 Performansi lidar v3

Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase Error (%)
13.3 kg	Cekung	15.64
	Sangat Cekung	15.64
	Menggunung	18.05
	Hampir Rata	7.22
	Setengah Bagian	15.64
30.8 kg	Cekung	19.9
	Sangat Cekung	23.54
	Menggunung	1.69

Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase <i>Error</i> (%)
30.8 kg	Hampir Rata	19.9
	Setengah Bagian	5.32
42.6 kg	Cekung	21.01
	Sangat Cekung	26.29
	Menggunung	7.86
	Hampir Rata	18.38
	Setengah Bagian	13.12
Rata-rata <i>Error</i> (%)		15.28

Pada tabel 4.7 di informasikan bahwa pada saat massa gabah 13.3 kg pengujian terbaik berada pada kondisi hampir rata dengan persentase *Error* 7.22%, pada massa 30.8 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi menggunung dengan persentase *Error* 1.69%, dan pada massa 42.6 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi menggunung dengan persentase *Error* 7.86% dengan rata-rata *Error* pengujian di tiga kondisi massa berbeda dan lima kondisi material gabah dalam silo yang berbeda sebesar 15.28%.

Error pengujian di pengaruhi oleh nilai pembacaan lidar saat servo roll dan pitch netral di 0° yang berfungsi sebagai acuan maksimal pergerakan servo roll serta posisi servo roll yang menjadi acuan maksimal servo pitch, di mana ini akan mempengaruhi cakupan pemacaan lidar, yang mana bisa saja lidar membaca dinding silo atau lidar tidak membaca sebagian material silo.

4.5 Pengujian Lidar Garmin V3HP

Pada pengujian ini di lakukan pengujian pada volume tertentu dengan skema pengujian sebagai berikut :

1. Silo di isi gabah dengan berat tertentu
2. Di lakukan pengujian dengan berat material 3 kondisi massa yakni 13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg
3. Di lakukan proses scanning sebanyak 5 kali tiap kondisi massa yang berbeda dengan ketentuan material gabah di bentuk cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian

4.5.1 Lidar Garmin v3hp 13.3 kg

Berikut merupakan hasil pengujian lidar v3hp saat massa gabah 13.3 kg pada 5 kondisi material(cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 9 Pengujian lidar v3hp 13.3 kg

Pengujian Lidar v3hp pada 13.3 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	13.46	13.3	1.20
2	Sangat Cekung	13.46	13.3	1.20
3	Menggunung	17.94	13.3	34.89
4	Hampir Rata	14.58	13.3	9.62
5	Setengah Bagian	13.46	13.3	1.20
Rata-rata Error (%)				9.62

Pada tabel 4.8 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan lidar garmin v3hp pada berat asli 13.3 kg memiliki *Error scanning* terkecil 1.20% dan terbesar di angka 34,89% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 9.26%.

4.5.2 Lidar Garmin v3hp 30.8 kg

Berikut merupakan hasil pengujian lidar v3hp saat massa gabah 30.3 kg pada 5 kondisi material(cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 10 Pengujian lidar v3hp 30.8 kg

Pengujian Lidar v3hp pada 30,8 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	26.92	30.8	12.60
2	Sangat Cekung	30.28	30.8	1.69
3	Menggunung	39.25	30.8	27.44
4	Hampir Rata	32.52	30.8	5.58
5	Setengah Bagian	38.13	30.8	23.80
Rata-rata Error (%)				14.22

Pada tabel 4.9 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan lidar garmin v3hp pada berat asli 30.8 kg memiliki *Error scanning* terkecil 1.69% dan terbesar di angka 27.44% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 14.22%.

4.5.3 Lidar Garmin v3hp 42.6 kg

Berikut merupakan hasil pengujian lidar v3hp saat massa gabah 42.6 kg pada 5 kondisi material(cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 11 Pengujian lidar v3hp pada massa 42.6 kg

Pengujian Lidar v3hp pada 42.6 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	37.01	42.6	13.12
2	Sangat Cekung	34.77	42.6	18.38
3	Menggunung	42.62	42.6	0.05
4	Hampir Rata	38.13	42.6	10.49
5	Setengah Bagian	41.5	42.6	2.58
Rata-rata Error (%)				8.92

Pada tabel 4.10 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan lidar garmin v3hp pada berat asli 42.6 kg memiliki *Error scanning* terkecil 0.05% dan terbesar di angka 18.38% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 8.92%.

4.5.4 Performansi Lidar V3HP

Berikut merupakan performansi kinerja lidar v3hp pada tiga variasi massa (13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg) dan 5 variasi kondisi (cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 12 Performansi lidar v3hp

Performansi Lidar v3hp		
Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase Error (%)
13.3 kg	Cekung	1.2
	Sangat Cekung	1.2
	Menggunung	34.89
	Hampir Rata	9.62
	Setengah Bagian	1.2
30.8 kg	Cekung	12.6
	Sangat Cekung	1.69
	Menggunung	27.44
	Hampir Rata	5.58
	Setengah Bagian	23.8
42.6 kg	Cekung	13.12

Performansi Lidar v3hp		
Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase <i>Error</i> (%)
42.6 kg	Sangat Cekung	18.38
	Menggunung	0.05
	Hampir Rata	10.49
	Setengah Bagian	2.58
Rata-rata <i>Error</i> (%)		10.92

Pada tabel 4.11 di informasikan bahwa pada saat massa gabah 13.3 kg pengujian terbaik berada pada kondisi cekung, sangat cekung dan setengah bagian dengan persentase *Error* 1.22%, pada massa 30.8 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi sangat cekung dengan persentase *Error* 1.69%, dan pada massa 42.6 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi menggunung dengan persentase *Error* 0.05% dengan rata-rata *Error* pengujian di tiga kondisi massa berbeda dan lima kondisi material gabah dalam silo yang berbeda sebesar 10.92%.

Error pengujian di pengaruhi oleh nilai pembacaan lidar saat servo roll dan pitch netral di 0° yang berfungsi sebagai acuan maksimal pergerakan servo roll serta posisi servo roll yang menjadi acuan maksimal servo pitch, di mana ini akan mempengaruhi cakupan pemacaan lidar, yang mana bisa saja lidar membaca dinding silo atau lidar tidak membaca sebagian material silo.

4.6 Pengujian RP-Lidar A1

Pada pengujian ini di lakukan pengujian pada volume tertentu dengan skema :

1. Silo di isi gabah dengan berat tertentu
2. Di lakukan pengujian dengan berat material 3 kondisi massa yakni 13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg
3. Pengujian dilakukan dengan tiga kondisi yakni, 13,3 kg, 30,8 kg, dan 42.6 kg

4.6.1 RP-Lidar A1 13.3 kg

Berikut ini disajikan hasil pengujian sensor RP-LiDAR A1 ketika digunakan untuk mengukur gabah dengan massa 13,3 kg pada lima kondisi permukaan material yang berbeda, yaitu cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam mendeteksi variasi bentuk permukaan gabah di dalam silo, sekaligus menilai

konsistensi dan akurasi data jarak serta sudut yang dihasilkan oleh sensor. Setiap kondisi permukaan mewakili variasi nyata yang dapat terjadi dalam penyimpanan gabah, sehingga hasil pengujian ini memberikan gambaran bagaimana sensor RP-LiDAR A1 berperforma dalam situasi yang berbeda-beda.

Data yang diperoleh dari pengujian ini nantinya akan diolah menggunakan metode trapezoidal numerical integration untuk menghitung estimasi volume gabah, sekaligus dianalisis untuk menentukan tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran sensor dengan kondisi fisik aktual di dalam silo.

Tabel 4. 13 Pengujian rp-lidar a1 13.3 kg

Pengujian Lidar v3 pada 13.3 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	14.58	13.3	9.62
2	Sangat Cekung	14.58	13.3	9.62
3	Menggunung	20.19	13.3	51.80
4	Hampir Rata	16.82	13.3	26.47
5	Setengah Bagian	14.58	13.3	9.62
Rata-rata Error (%)				21.43

Pada tabel 4.12 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan rp-lidar a1 pada berat asli 13.3 kg memiliki *Error scanning* terkecil 9.62% dan terbesar di angka 51,80% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 21.43%.

4.6.2 RP-Lidar A1 30.8 kg

Berikut merupakan hasil pengujian rp-lidar a1 saat massa gabah 30.8 kg pada 5 kondisi material(cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 14 Pengujian rp-lidar a1 30.8 kg

Pengujian Lidar v3 pada 30,8 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	21.31	30.8	30.81
2	Sangat Cekung	21.31	30.8	30.81
3	Menggunung	26.92	30.8	12.60
4	Hampir Rata	22.43	30.8	27.18
5	Setengah Bagian	25.79	30.8	16.27
Rata-rata Error (%)				23.53

Pada tabel 4.13 merupakan hasil pengujian terkait *Error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan rp-lidar a1 pada berat asli 30.8 kg memiliki *Error scanning* terkecil 12.60% dan terbesar di angka 30.81% dengan rata-rata *Error* dari 5 percobaan sebesar 23.53%.

4.6.3 RP-Lidar A1 42.6 kg

Berikut merupakan hasil pengujian rp-lidar a1 saat massa gabah 42.6 kg pada 5 kondisi material(cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 15 Pengujian rp-lidar a1 42.6 kg

Pengujian Lidar RP-A1 v3 pada 42.6 kg				
No.	Kondisi Gabah	Massa Pengujian(kg)	Massa Asli(kg)	Error (%)
1	Cekung	30.28	42.6	28.92
2	Sangat Cekung	28.04	42.6	34.18
3	Menggunung	34.77	42.6	18.38
4	Hampir Rata	31.4	42.6	26.29
5	Setengah Bagian	33.65	42.6	21.01
Rata-rata Error (%)				25.76

Pada tabel 4.14 merupakan hasil pengujian terkait *error* masa yang di peroleh selama percobaan. Dalam tabel di jelaskan bahwa menggunakan rp-lidar a1 pada berat asli 42.6 kg memiliki *error scanning* terkecil 18.38% dan terbesar di angka 34.18% dengan rata-rata *error* dari 5 percobaan sebesar 25.76%.

4.6.4 Performansi RP-Lidar A1

Berikut merupakan performansi kinerja rp-lidar a1 pada tiga variasi massa (13.3 kg, 30.8 kg, dan 42.6 kg) dan 5 variasi kondisi (cekung, sangat cekung, menggunung, hampir rata, dan setengah bagian)

Tabel 4. 16 Performansi rp-lidar a1

Performansi RP-Lidar A1		
Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase Error (%)
13.3 kg	Cekung	9.62
	Sangat Cekung	9.62
	Menggunung	51.8
	Hampir Rata	26.47
	Setengah Bagian	9.62

Performansi RP-Lidar A1		
Massa Gabah (kg)	Kondisi Gabah	Persentase <i>Error</i> (%)
30.8 kg	Cekung	30.81
	Sangat Cekung	30.81
	Menggunung	12.6
	Hampir Rata	27.18
	Setengah Bagian	16.27
42.6 kg	Cekung	28.92
	Sangat Cekung	34.18
	Menggunung	18.38
	Hampir Rata	26.29
	Setengah Bagian	21.01
Rata-rata <i>Error</i> (%)		23.57

Pada tabel 4.15 di informasikan bahwa pada saat massa gabah 13.3 kg pengujian terbaik berada pada kondisi cekung, sangat cekung dan setengah bagian dengan persentase *Error* 9.62%, pada massa 30.8 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi menggunung dengan persentase *Error* 21.6%, dan pada massa 42.6 kg pengujian terbaik berada pada saat kondisi menggunung dengan persentase *Error* 18.38% dengan rata-rata *Error* pengujian di tiga kondisi massa berbeda dan lima kondisi material gabah dalam silo yang berbeda sebesar 23.57%.

Error pengujian di pengaruhi oleh nilai pembacaan lidar saat servo roll dan pitch netral di 0° yang berfungsi sebagai acuan maksimal pergerakan servo roll serta posisi servo roll yang menjadi acuan maksimal servo pitch, di mana ini akan mempengaruhi cakupan pemacaan lidar, yang mana bisa saja lidar membaca dinding silo atau lidar tidak membaca sebagian material silo. Selain itu pada lidar ini mekanisme servo pitch di gantikan langsung oleh data sudut lidar itu sendiri, namun keterbatasan pengambilan data sudut yang di sebabkan saat lidar dalam 1 kali putaran dan sistem memerlukan data derajat tertentu, lidar tidak mampu mengirimkan data jika hanya menginisialisasi data sudut dalam satuan mutlak, tetapi lidar hanya mampu mengirimkan data sudut jika yang di minta berupa rentang sudut, misal jika ingin mengambil data jarak di sudut 360° maka seringkali data tidak terkirim, namun jika kita menggunakan rentang seperti jarak 358° sampai 360° barulah lidar mampu mengirim data yang di minta, ini membuat pembacaan jarak

lidar tidak sesuai dengan logika jalan program sistem dan juga menjadikan kelemahan lidar ini dalam pengaplikasian sistem.

4.7 Performansi Kinerja Semua Lidar

Berdasarkan hasil uji coba yang di lakukan pada semua sensor maka di dapat hasil berikut

Tabel 4. 17 Hasil performansi semua lidar

Jenis Lidar	Persentase <i>Error</i> (%)
Lidar v3	15.28
Lidar v3hp	10.92
RP-Lidar A1	23.57

Tabel 4.16 merupakan hasil persentase *Error* ketiga sensor terhadap seluruh rangkaian pengujian di dasarkan pada sub-bab 4.4 sampai 4.6, dari data tabel yang di sajikan maka dapat di simpulkan bahwa lidar v3hp adalah lidar yang paling cocok dalam pengaplikasian sistem ini di karenakan memiliki rata-rata *Error* paling sedikit dari seluruh rangkaian pengujian, yakni sebesar 10.92%

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi rangkuman berupa kesimpulan serta saran yang diperoleh dari pelaksanaan tugas akhir. Dalam proses penyusunan dan pelaksanaannya, penelitian ini tidak terlepas dari berbagai hambatan, baik berupa kendala teknis maupun keterbatasan data yang tersedia. Melalui serangkaian analisis yang telah dilakukan pada tahap-tahap penelitian, diperoleh sejumlah poin penting yang dirumuskan sebagai kesimpulan. Selain itu, penulis juga menyajikan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan untuk penyempurnaan penelitian sejenis di masa mendatang, sekaligus memberikan kontribusi pengetahuan bagi pengembangan kajian lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan dalam tugas akhir yang berjudul “Analisa Performansi Kinerja Sensor Lidar Untuk Rekonstruksi Volumetrik 3d Berbasis *Trapezoidal numerical integration*”, dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya yaitu:

1. Dalam penelitian ini, akurasi didefinisikan sebagai tingkat kedekatan hasil estimasi volume dan massa menggunakan sensor LiDAR terhadap nilai sebenarnya (massa hasil penimbangan langsung), yang dihitung menggunakan persentase Error. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor Garmin V3 memiliki rata-rata Error sebesar 14,44% pada massa 13,3 kg, 14,07% pada massa 30,8 kg, dan 17,33% pada massa 42,6 kg. Sensor Garmin V3HP menunjukkan Error sebesar 9,62% pada massa 13,3 kg, 14,22% pada massa 30,8 kg, dan 8,92% pada massa 42,6 kg. Sedangkan RP-LiDAR A1 menunjukkan Error sebesar 21,43% pada massa 13,3 kg, 23,53% pada massa 30,8 kg, dan 25,76% pada massa 42,6 kg. Secara keseluruhan, rata-rata Error adalah 15,28% untuk Garmin V3, 10,92% untuk Garmin V3HP, dan 23,57% untuk RP-LiDAR A1. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa Garmin V3HP merupakan sensor dengan akurasi terbaik dalam sistem ini, karena memiliki Error rata-rata terendah dan hasil estimasi paling mendekati nilai sebenarnya.

2. Metode trapezoidal numerical integration dalam penelitian ini masih kurang efektif karena pada perhitungannya, volume setiap segmen dihitung dengan menggunakan tinggi rata-rata dari titik-titik sampel. Dalam kasus ini, rata-rata dari 4 titik ketinggian dipakai sebagai representasi satu segmen volume. Pendekatan ini menimbulkan error, terutama ketika permukaan gabah berbentuk cekung atau menggunung, sehingga hasil estimasi tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya. Hal ini tercermin dari nilai error terbaik yang hanya mencapai 10,92% pada sensor Garmin V3HP. Dengan demikian, metode ini masih menghasilkan deviasi yang cukup besar, dan untuk meningkatkan akurasi diperlukan jumlah titik sampel yang lebih banyak atau metode integrasi yang lebih teliti.
3. Stabilitas dan konsistensi pengukuran antar sensor menunjukkan perbedaan yang cukup jelas. Sensor Garmin V3 dan Garmin V3HP memberikan hasil yang relatif stabil dengan rata-rata error masing-masing 15,28% dan 10,92%, sedangkan RP-LiDAR A1 memiliki rata-rata error jauh lebih tinggi yaitu 23,57%, sehingga menunjukkan konsistensi yang lebih rendah. Perbedaan signifikan ini disebabkan oleh keterbatasan mekanisme pembacaan sudut pada RP-LiDAR A1, yang tidak selalu dapat mengirimkan data pada sudut tunggal tertentu sehingga data yang diperoleh sering tidak lengkap. Hal ini membuat hasil estimasi volume dengan RP-LiDAR A1 kurang dapat diandalkan dibandingkan dengan dua sensor Garmin.

5.2 Saran

Berdasarkan serangkaian percobaan dan analisis yang telah dilaksanakan dalam tugas akhir dengan judul “Analisa Performansi Kinerja Sensor Lidar untuk Rekonstruksi Volumetrik 3D Berbasis *Trapezoidal numerical integration*”, penulis merumuskan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan sekaligus acuan dalam penelitian sejenis di masa mendatang. Adapun rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan metode *Region of Interest Masking*, di mana metode ini bekerja dengan cara mengumpulkan nilai koordinat (x,y,z) saat posisi silo kosong tanpa material. Nantinya nilai koordinat yang di

peroleh dapat di jadikan acuan dengan permisalan jika ada titik koordinat dari metode *Region of Interest Masking* maka koordinat tersebut bukan koordinat valid material.

2. Penelitian selanjutnya di sarankan menggunakan kinematika 2d. Dan jika sudah di terapkan metode *Region of Interest Masking* maka sevo memungkinkan di gerakkan dengan permisalan jika material berada pada kondisi penuh karena cakupan koordinat sudah melalui tahap *masking* oleh motode *Region of Interest Masking*.
3. Penelitian selanjutnya perlu di kaji terkait penggunaan servo dynamixel mx-28 pada sistem di karenakan spesifikasi yang lebih presisi secara data tertulis dari *website* resminya.
4. Penelitian selanjutnya lebih di detailkan lagi untuk perhitungan *trapezoidal*, agar dalam satu segmen benar benar di hitung sebagai satu luasan prisma agar perhitungan lebih presisi, bukan hanya menghitung nilai rata rata dari empat ketinggian yang berbeda untuk tiap segmen nya.
5. Peneliti selanjutnya dapat menambahkan sistem otomatis untuk proses pengeluaran bahan yang telah di-*scanning*, supaya mempermudah pengambilan data dan akan lebih menyingkat waktu.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, A. R. S., & Djurdjani, D.-. (2022). Perbandingan Volume Stockpile Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 5(2), 70. <https://doi.org/10.22146/jgise.78295>
- Ali, M. A., & Shah, F. A. (2024). *Design and Implementation of Low-Cost Articulate Manipulator for Academic Design and Implementation of Low-Cost Articulate Manipulator for Academic Applications*. May.
- Anisah, M., Rasyad, S., Damsi, F., Andrean, S., Studi Teknik Elektro, P., Negeri Sriwijaya Palembang, P., & Studi Teknik Elektronika, P. (2024). *Perancangan Dan Pola Gerak Robot Quadruped Menggunakan Metode Invers Kinematik*. 9(1). <https://doi.org/10.31851/ampere>
- Claes, R. (2020). *Automated Dimension Calculations using a Constructed LiDAR 3D Scanner*.
- Clar, S. E., Aleluya, E. R. M., & Salaan, C. J. O. (2022). Volume Estimation of Raw Materials inside the Silo using Convex Hull Method. *2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2022*. <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109554>
- Düker, M., Matteson, D. S., Tsay, R. S., & Wilms, I. (2025). Vector <sc>AutoRegressive</sc> Moving Average Models: A Review. *WIREs Computational Statistics*, 17(1). <https://doi.org/10.1002/wics.70009>
- Fathurrahman, M., Jaya, L. M. G., Saleh, F., & Amin, F. (2023). *Studi Penentuan Volume Stockpile Penambangan Bijih Nikel Menggunakan Foto Drone*. 7(2), 64–74.
- Grzechca, D., Ziębiński, A., Paszek, K., Hanzel, K., Giel, A., Czerny, M., & Becker, A. (2020). How accurate can UWB and dead reckoning positioning systems be? Comparison to slam using the rplidar system. *Sensors (Switzerland)*, 20(13), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20133761>

- Hermawan, I., Nugroho, D., Suhendra, I., Wiranata, H., Wahyu Karim, R. T., Widya Astuti, A., Silaen, B., & Eka Wicaksono, D. (2021). PEMANFAATAN TEKNOLOGI UAV LIDAR UNTUK PERCEPATAN PENYEDIAAN DATA TOPOGRAFI SKALA BESAR PADA TAHAP READINESS CRITERIA JALAN TOL TRANS SUMATERA. Dalam *Prosiding FIT ISI* (Vol. 1).
- Ismailov, A. S., & Jo‘rayev, Z. B. (2022). Study of arduino microcontroller board. *“Science and Education” Scientific Journal*, 3(3), 172–179.
- Laura, R., Handayani, R., & Alfarisi, M. R. (2021). PEMANTAUAN DAN PENGENDALIAN SILO PADA PETERNAKAN UNGGAS (*Monitoring and Controlling Silo in Poultry Livestock*). 7(6), 2870–2873.
- Louis, L., & Crosby, P. R. (2023). *Analysis of the Design and Manufacture of a Printed Circuit Board Analysis of the Design and Manufacture of a Printed Circuit Board for a High Altitude Balloon Payload for a High Altitude Balloon Payload*.
- Mutiarasari, W. M., Chyntia, N. P. P., Kurniawan, A. A., Pangestu, A., Maghfiroh, L., Vaherera, P., & Sa’id, A. B. N. (2023). Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data Lidar Multi-Object 3D Model from Lidar Data. *Jurnal Geodesy and Geomatics*, 19(1), 41–48.
- Patel, S., Patel, V., & Student, P. G. (2019). *Design and Analysis of storage vessel (Silo)*. 4(5), 101–119.
- Putra, G. P. M., Tenriawaru, A., & Gunawan. (2023). Rancang Bangun Virtual Assistant Chatbot Menggunakan Node.Js pada Layanan Sistem Informasi Akademik. *Prosiding Seminar Nasional Pemanfaatan Sains Dan Teknologi Informasi*, 1(1), 345–352.
- Robinson, J., Venturi, A., Dudley, R., Bevilacqua, M., & Donzella, V. (2024). *Methodology to Investigate Interference using Off-The-Shelf LiDARs*. <http://wrap.warwick.ac.uk/170120>
- Syam, M. L., & Erdisna. (2022). Sistem Informasi Stok Barang Menggunakan QR-Code Berbasis Android. *Jurnal Informatika Ekonomi Bisnis*, 4. <https://doi.org/10.37034/infv4i1.108>

- Tebo, B. K., Riyanto, F., Oktavi, M., Teknik, S., Teknik, F., & Muara, U. (2020). *Mine Magazine (MineMagz) Volume 1 Nomor 1, Februari 2020* <http://ojs.umb-bungo.ac.id/>. 1, 1–5.
- Wibowo, G. S. (2019). *Sistem Rekonstruksi Objek 3D dengan Metode LiDAR Menggunakan Mikrokontroller Arduino Mega*.
- Zindhu Maulana Ahmad Putra, DANIA KIKI SANDIYA, Ryan Yudha Adhitya, Mat Syai'in, Rachmad Tri Soelistijono, Boedi Herijono, Ii Munadhif, Samudra Rozzak Arrachman, & Achmad Nawawi. (2024). Rekonstruksi 3D Berbasis LiDAR TF Mini Plus. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 11(2), 494–502. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v11i2.5208>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Esp-32

```
#include <Arduino.h>
#include <SPIFFS.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include "kontrol.h"
#include "v3.h"      // Jika menggunakan v3hp, ganti ke "v3hp.h"
#include "algoritma.h"

const char* ssid = "Lab Robotika AI";
const char* password = "labrobotm101";
WebServer server(80);

#define TRIGGER_PIN 32
#define LED_PIN 23
#define FILE_PATH "/data.txt"
#define MAX_DISTANCE_THRESHOLD 2000

bool systemRunning = false;
unsigned long scanStartTime, scanDuration;
unsigned long lastBlinkMillis = 0;
bool ledState = false;

void handleDownload() {
    File file = SPIFFS.open(FILE_PATH, FILE_READ);
    if (!file) {
        server.send(500, "text/plain", "Gagal membuka file");
        return;
    }
}
```

```

    }
    server.streamFile(file, "text/plain");
    file.close();
}

void handleRoot() {
    server.send(200, "text/html", "<h1>ESP32 LiDAR Data</h1><a
href=\"/download\">Download Data TXT</a>");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial2.begin(1000000, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
    pinMode(33, OUTPUT);
    digitalWrite(33, HIGH);

    pinMode(TRIGGER_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);

    initLidar();

    if (!SPIFFS.begin(true)) {
        Serial.println("Gagal menginisialisasi SPIFFS");
        return;
    }

    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(500);
    Serial.print("[NETWORK] IP Address: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
}

```

```

server.on("/", handleRoot);
server.on("/download", handleDownload);
server.begin();

SendPositionMX[0] = POSISI_TENGAH;
SendPositionMX[1] = POSISI_TENGAH;
Protocol1(SendPositionMX, MoveSpeedMX);
delay(1000);
}

void loop() {
    server.handleClient();

    if (digitalRead(TRIGGER_PIN) == HIGH && !systemRunning) {
        systemRunning = true;

        // Blink 3x sebagai indikasi awal sebelum proses scanning
        for (int i = 0; i < 3; i++) {
            digitalWrite(LED_PIN, HIGH); delay(200);
            digitalWrite(LED_PIN, LOW); delay(200);
        }

        delay(500);
        scanStartTime = millis();
        lastBlinkMillis = millis();
        ledState = false;
        digitalWrite(LED_PIN, LOW);

        if (SPIFFS.exists(FILE_PATH)) {
            SPIFFS.remove(FILE_PATH);

```

```

        Serial.println("[SPIFFS] File data.txt dihapus");
    }

    File dataFile = SPIFFS.open(FILE_PATH, FILE_WRITE);
    if (!dataFile) {
        Serial.println("[ERROR] Gagal membuka file untuk penulisan");
        systemRunning = false;
        return;
    }

    SendPositionMX[0] = POSISI_TENGAH;
    SendPositionMX[1] = POSISI_TENGAH;
    Protocol1(SendPositionMX, MoveSpeedMX);
    delay(1500);

    float totalR0 = 0;
    const int nR0 = 20;
    for (int i = 0; i < nR0; i++) {
        totalR0 += getDistanceToSurface();
        delay(100);
    }
    float r0 = totalR0 / nR0;
    Serial.printf("[INIT] r0 stabil (terkalibrasi): %.4f cm (rata-rata %d
sampel)\n", r0, nR0);

    float thetaXMax = hitungThetaXMax(r0);
    thetaXMax = batasSudut(thetaXMax);
    int resolusiXMax = (int)(thetaXMax / 1.0);
    Serial.printf("[GLOBAL]  $\theta_{x\max}$ : %.2f° (resXMax: %d)\n", thetaXMax,
    resolusiXMax);

```



```

float deltaX = hitungDeltaX(1.0);
float deltaY = hitungDeltaY(1.0);
    Serial.printf("[DELTA] deltaX: %.4f cm, deltaY: %.4f cm\n", deltaX,
deltaY);

dataFile.printf("# deltaX: %.4f\n", deltaX);
dataFile.printf("# deltaY: %.4f\n", deltaY);

bool reverseDirection = false;
int totalPoints = 0;

for (int resX = -resolusiXMax; resX <= resolusiXMax; resX++) {
    float angleX = resX * 1.0;
    float safeAngleX = batasSudut(angleX);
        int    servoRollPos    =    POSISI_TENGAH    +
derajatKeOffsetResolusi(safeAngleX);
    SendPositionMX[1] = servoRollPos;
    Protocol1(SendPositionMX, MoveSpeedMX);
    delay(300);

    float thetaYMax = hitungThetaYMax_Trigonometri(safeAngleX);
    thetaYMax = batasSudut(thetaYMax);
    int resolusiYMax = (int)(thetaYMax / 1.0);

    Serial.printf("[ROLL] Roll: %.2f° (servo pos: %d) | θYMax: %.2f°,
resYMax: %d\n",
        safeAngleX, servoRollPos, thetaYMax, resolusiYMax);

    int startResY, endResY, stepResY;
    if (reverseDirection) {
        startResY = resolusiYMax;

```

```

    endResY = -resolusiYMax;
    stepResY = -1;
} else {
    startResY = -resolusiYMax;
    endResY = resolusiYMax;
    stepResY = 1;
}

for (int resY = startResY; (stepResY > 0) ? resY <= endResY : resY >=
endResY; resY += stepResY) {
    // Kedipkan LED setiap 200ms selama scanning
    if (millis() - lastBlinkMillis >= 200) {
        ledState = !ledState;
        digitalWrite(LED_PIN, ledState ? HIGH : LOW);
        lastBlinkMillis = millis();
    }

    float angleY = resY * 1.0;
    float safeAngleY = batasSudut(angleY);
    int servoPitchPos = POSISI_TENGAH +
derajatKeOffsetResolusi(safeAngleY);
    SendPositionMX[0] = servoPitchPos;
    Protocol1(SendPositionMX, MoveSpeedMX);
    delay(300);

    uint16_t avgDist = getAverageDistance(5);
    float x = Z0 * tan(safeAngleX * M_PI / 180.0);
    float y = Z0 * tan(safeAngleY * M_PI / 180.0);
    float bc = sqrt(x * x + y * y);

    // Monitoring nilai ke Serial Monitor (tidak mengganggu proses)

```

```

Serial.printf("PITCH: %.2f°, LIDAR: %u cm, x: %.2f, y: %.2f, z: ",
    safeAngleY, avgDist, x, y);

    if (avgDist < MAX_DISTANCE_THRESHOLD && (x * x + y * y)
    <= (RADIUS_SILO * RADIUS_SILO)) {
        float z_material = hitungNilaiZMaterial(avgDist, x, y);
        Serial.printf("%.2f\n", z_material);

        if (isnan(z_material)) continue;
        dataFile.printf("%f,%f,%f\n", x, y, z_material);
        totalPoints++;
    } else {
        Serial.println("invalid.");
    }
}

Serial.printf("[SUMMARY] Roll %.2f° selesai\n", safeAngleX);
reverseDirection = !reverseDirection;
}

dataFile.close();
SendPositionMX[0] = POSISI_TENGAH;
SendPositionMX[1] = POSISI_TENGAH;
Protocol1(SendPositionMX, MoveSpeedMX);

scanDuration = millis() - scanStartTime;
unsigned long minutes = scanDuration / 60000;
unsigned long seconds = (scanDuration % 60000) / 1000;

Serial.println("[STATUS] Scanning selesai.");
Serial.printf("[STATUS] Total titik data: %d\n", totalPoints);

```

```
Serial.printf("[STATUS] Waktu eksekusi: %lu menit %lu detik\n", minutes,  
seconds);
```

```
digitalWrite(LED_PIN, LOW); // LED benar-benar mati setelah scanning  
selesai
```

```
systemRunning = false;  
}  
}
```

Lampiran 2 Biodata Mahasiswa

Nama : Ahmad Nanda Aulia Rahman
NRP : 0921040024
Program Studi : D4 Teknik Otomasi
Agama : Islam
Status : Belum Menikah
Alamat Asal : Desa Kramat, Kec. Duduksampeyan, Kab. Gresik
Nomor Telepon : 081336385049
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Email : ahmadnandaar@gmail.com
Tempat, Tanggal Lahir : Gresik, 1 September 2003
Nama Orang Tua/ Wali : Mashadi
Alamat Orang Tua / Wali : Desa Kramat, Kec. Duduksampeyan, Kab. Gresik
Telepon Orang Tua / Wali : 081330119730
Riwayat Pendidikan : SLTP/Sederajat



PENDIDIKAN FORMAL			
Pendidikan	Tahun	Tempat Pendidikan	Jurusan
Diploma 4	2021-2025	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Teknik Otomasi
SMA	2018-2021	MAN 1 Lamongan	IPA
SMP	2015-2018	Mts Manbaul Ulum Assaadah	-
SD	2009-2015	Mi Manbaul Ulum Assaadah	-

(Halaman ini sengaja dikosongkan)