

3D Scanner Pemantau Ketersediaan Kalsium Karbonat Pada Silo

Boedi Herijono¹, Zindhu Maulana Ahmad Putra², Dania Kiki Sandiya³, Ryan Yudha Adhitya⁴, Mat Syai'in⁵, Rachmad Tri Soelistijono⁶, Ii Munadhif⁷, Samudra Rozzak Arrachman⁸, Achmad Nawawi⁹
e-mail: boedihj@ppns.ac.id, zindhu@ppns.ac.id, dania.kiki@student.ppns.ac.id,
ryanyudhaadhitya@ppns.ac.id, matt.syaiin@ppns.ac.id, rachmad_tri@ppns.ac.id, iimunadhif@ppns.ac.id,
samudrarozzak@gmail.com, achmadnawawi11@gmail.com

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9} Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 23 Juli 2024
Direvisi 2 September 2024
Diterbitkan 30 September 2024

Kata kunci:

Sensor LIDAR
Silo
Metode Trapezoidal
Rekonstruksi 3D

Keywords:

LIDAR Sensor
Silo
Trapezoidal Method
3D Reconstruction

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan stok kalsium karbonat di dalam silo menggunakan teknologi LiDAR dan metode *Trapezoidal Numerical Integration* untuk mengukur volume bahan. Sensor LiDAR digunakan untuk memindai jarak dan menghasilkan data *point clouds* yang diproses oleh mikrokontroler ESP32. Data yang diperoleh dikirim ke laptop untuk visualisasi 3D dan perhitungan estimasi volume serta massa bahan. Sistem ini dirancang dengan komponen *input*, proses, dan *output* yang terintegrasi, termasuk tombol *start*, sensor LiDAR, dan tombol *emergency*. Pengujian dilakukan dengan tiga kondisi permukaan kalsium karbonat dengan permukaan rata, menggunung, dan cekung, untuk menguji akurasi sistem. Hasil pengujian menunjukkan akurasi yang bervariasi, dengan kesalahan rata-rata 2,53% pada permukaan rata, 6,6% pada permukaan menggunung, dan 5,2% pada permukaan cekung. Perbedaan bentuk permukaan mempengaruhi akurasi pengukuran, dimana permukaan cekung menghasilkan volume yang lebih rendah dan permukaan menggunung menghasilkan volume yang lebih tinggi dari volume sebenarnya. Hasil ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan efektif untuk estimasi volume dan massa, meskipun dipengaruhi oleh variasi bentuk permukaan.

ABSTRACT

This study develops a calcium carbonate stock monitoring system in a silo using LiDAR technology and the Trapezoidal Numerical Integration method to measure the volume of materials. The LiDAR sensor is used to scan the distance and produce point cloud data that is processed by the ESP32 microcontroller. The data obtained is sent to a laptop for 3D visualization and calculation of volume and mass estimation of materials. This system is designed with integrated input, process, and output components, including a start button, LiDAR sensor, and emergency button. Tests were carried out with three calcium carbonate surface conditions with flat, mountainous, and concave surfaces, to test the accuracy of the system. The test results showed varying accuracy, with an average error of 2.53% on the flat surface, 6.6% on the mountainous surface, and 5.2% on the concave surface. Differences in surface shape affect the measurement accuracy, where the concave surface produces a lower volume and the mountainous surface produces a higher volume than the actual volume. These results indicate that the method used is effective for estimating volume and mass, although affected by variations in surface shape.



Penulis Korespondensi:

Zindhu Maulana Ahmad Putra,
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi D3 Teknik Kelistrikan Kapal,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia, 60111
Email: zindhu@ppns.ac.id
Nomor HP/WA aktif: 083857105060

1. PENDAHULUAN

Saat ini, pencemaran lingkungan yang berasal dari air limbah telah mencapai tahap yang mengkhawatirkan. Limbah cair ini umumnya dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia yang terbagi menjadi dua jenis, yakni limbah cair domestik dan limbah cair industri. Limbah cair domestik berasal dari kegiatan sehari-hari seperti aktivitas di dapur, kamar mandi, dan pencucian pakaian. Sementara itu, limbah cair industri dihasilkan dari proses produksi di sektor industri atau pabrik [1]. Permasalahan air limbah yang disebabkan oleh limbah industri juga terjadi pada PT. Pama Persada Nusantara. PT. Pama Persada Nusantara merupakan sebuah perusahaan yang bergerak di sektor pertambangan batu bara. Kegiatan pertambangan ini menyebabkan masalah lingkungan, yaitu terbentuknya air limbah yang berasal dari air asam tambang, hasil dari oksidasi batuan sulfida tertentu di lapisan batu bara. Hal ini menjadikan air bersifat asam dan biasanya mengandung logam berat seperti besi, mangan, serta zat padat tersuspensi dengan konsentrasi tinggi, yang dapat meracuni air dan berpotensi membahayakan kehidupan akuatik [2]. Hasil dari air asam tambang ini berdampak pada lokasi pertambangan dan dikhawatirkan juga pada lingkungan sekitar area pertambangan yaitu pada sumber air yang mengalir pada pemukiman warga yang dapat membahayakan warga sekitar serta makhluk hidup lainnya seperti hewan dan tumbuhan.

Mengenai hal ini, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia telah memberlakukan Peraturan No. 7 Tahun 2014 tentang Pelaksanaan Reklamasi dan Pascatambang pada Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara, yang mengharuskan setiap perusahaan pertambangan untuk mengelola air limbah hasil pertambangan. Oleh karena itu, PT. Pama Persada Nusantara telah menggunakan alat otomatis berbentuk silo untuk menyimpan kalsium karbonat, yang berfungsi sebagai penetralisir air asam tambang. Silo merupakan sebuah tempat penyimpanan bahan produksi untuk mendukung proses produksi. Industri besar seringkali mengandalkan silo sebagai solusi utama untuk menyimpan bahan-bahan produksi dalam skala besar, baik bahan mentah maupun bahan setengah jadi. Silo adalah struktur penyimpanan khusus yang dirancang untuk menampung berbagai jenis bahan, seperti dalam sektor pertanian, silo digunakan untuk menyimpan biji-bijian hasil panen seperti jagung, padi, gandum, serta pakan ternak dalam jumlah besar. Selain itu, silo juga digunakan di industri konstruksi untuk menyimpan bahan-bahan seperti semen, kapur, batu bara dan lain-lain. Selain untuk menyimpan bahan produksi, penggunaan silo juga untuk melindungi dan mencegah kerusakan bahan produksi sehingga akan lebih awet [3].

Alat otomatis yang digunakan oleh PT. Pama Persada Nusantara untuk menetralsir air hasil pertambangan ini disebut sebagai Auto Liming Unit (ALU). Alat ini dipasang di area tambang untuk menetralsirkan air hasil pertambangan sebelum air mengalir ke luar area tambang. Namun, pada alat ini masih terdapat keterbatasan yakni belum adanya sistem untuk memantau ketersediaan kalsium karbonat di dalam silo. Sehingga operator tidak dapat mengetahui jumlah di dalamnya. Perlu diketahui bahwa penting bagi perusahaan untuk memantau secara berkala bahan yang ada di dalam silo agar dapat mengetahui persediaan dan kebutuhan bahan secara berkala.

Dari permasalahan tersebut, terdapat beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian untuk dapat memantau bahan di dalam silo, diantaranya yaitu penelitian [4]. Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe yang memudahkan pemantauan dan pengendalian pakan ternak di dalam silo. Prototipe ini mampu menyajikan data mengenai jumlah pakan berdasarkan pembacaan sensor ultrasonik, kemudian hasilnya ditampilkan pada LCD,



sehingga peternak tidak perlu lagi melakukan pengecekan manual pada silo. Penelitian lain [5] yang bertujuan untuk mengukur volume biji-bijian yang disimpan dalam silo dengan memanfaatkan sensor LiDAR dan motor sebagai penggerakannya. Pengembangan dalam penelitian ini meliputi mekanisme LiDAR 2D yang dimodifikasi agar mampu menghasilkan peta 3D, dengan penambahan servo untuk menggerakkan sensor LiDAR. Penelitian lainnya [6] telah menghasilkan sistem LiDAR 3D yang hemat biaya guna memperoleh point-clouds untuk estimasi volume bahan mentah di dalam silo.

Dalam penelitian ini, akan dibuat suatu sistem yang berfokus pada pengembangan sistem pemindai 3D yang mengintegrasikan tiga komponen utama, yaitu sensor LiDAR, servo, dan motor stepper. Menggunakan kontroler ESP32, sistem ini memungkinkan pengambilan data secara *wireless* yang lebih efisien dan *real-time*. Sistem ini juga dilengkapi dengan tampilan berbasis website yang menyajikan visualisasi 3D, perkiraan volume, dan estimasi berat dari kalsium karbonat yang dipindai.

2. METODE PENELITIAN

2.1 LiDAR (*Light Detection and Ranging*)

LiDAR (*Light Detection and Ranging*) adalah teknologi penginderaan jarak jauh yang mengukur cahaya yang dipantulkan untuk menentukan jarak suatu objek [7]. Ketika diaktifkan, sensor LiDAR memancarkan gelombang laser inframerah, yang akan dipantulkan kembali saat mengenai objek. Pantulan ini kemudian digunakan untuk menghitung jarak ke objek tersebut.

Sensor LiDAR banyak digunakan dalam aktivitas pengukuran, pemetaan, atau pengamatan yang menggunakan teknik penginderaan jauh dengan cahaya laser untuk mengukur jarak objek dengan tingkat akurasi dan kerapatan tinggi. Sensor ini terdiri dari perangkat optik dan elektronik khusus yang dilengkapi dengan algoritma adaptif, sehingga cocok untuk pengukuran jarak di area luar maupun dalam ruangan. LiDAR memanfaatkan teknologi *Time of Flight* (ToF), yaitu metode yang mengukur jarak berdasarkan sinyal yang dikirimkan dan diterima kembali oleh sensor. Dengan demikian, prinsip utama pada LiDAR adalah waktu tempuh sinyal yang menentukan jarak objek yang diamati [8]. Sehingga, prinsip yang digunakan pada LiDAR yaitu waktu tempuh menentukan jarak objek yang diobservasi [9].

$$ToF = nT + \frac{\phi}{2\pi}T \quad (1)$$

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung ToF berdasarkan perbedaan fase (ϕ) antara gelombang yang dipancarkan dan gelombang pantul dari objek, dengan n sebagai jumlah gelombang penuh dan T adalah waktu tempuh cahaya untuk satu panjang gelombang. Setelah nilai ToF diperoleh, jarak (*distance*) dapat dihitung.

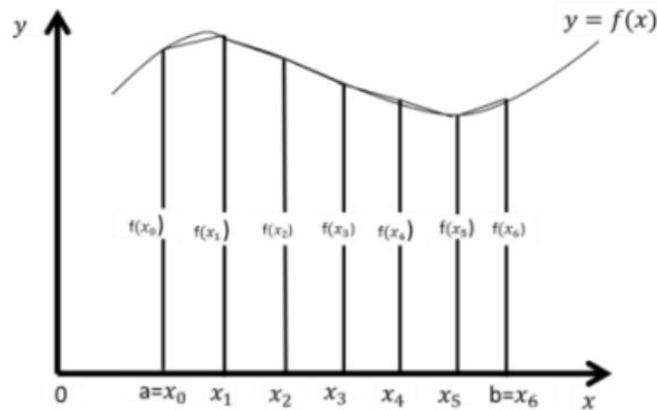
$$D = \frac{C \times ToF}{2} \quad (2)$$

Persamaan (2) digunakan untuk menghitung jarak berdasarkan nilai ToF yang telah diperoleh sebelumnya, dengan C sebagai nilai kecepatan cahaya di udara.

2.2 *Trapezoidal Numerical Integration*

Metode trapesium atau trapezoidal, adalah teknik integrasi numerik yang didasarkan pada penjumlahan segmen-segmen dan bidang berbentuk trapesium. Metode ini diterapkan pada daerah atau area dengan bentuk yang tidak teratur [10]. Bidang-bidang yang membentuk trapesium ini akan mempengaruhi hasil perhitungan volume kalsium karbonat di dalam silo. Terdapat dua metode trapezoidal yaitu metode segmen tunggal dan segmen ganda. Pada penelitian ini, metode yang digunakan yaitu metode segmen ganda.





Gambar 1: Metode Trapezoidal 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 $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$ [11]. Sehingga, didapatkan rumus untuk menghitung luas trapesium segmen ganda dengan pendekatan integral sesuai dengan persamaan 3.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} (f(x_0) + f(x_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)) \quad (3)$$

Dimana:

a = x_0 = titik awal

b = x_n = titik akhir

h = lebar segmen (panjang setiap subinterval)

n = jumlah segmen

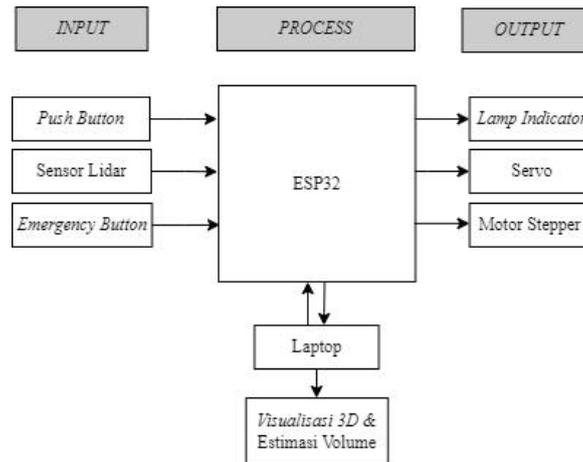
$f(x_i)$ = nilai fungsi pada titik x_i

Pendekatan menggunakan metode trapesium segmen ganda ini memungkinkan estimasi volume yang lebih akurat dibandingkan metode trapesium segmen tunggal, terutama ketika permukaan objek yang dipindai memiliki variasi signifikan atau bentuk yang tidak beraturan. Dengan menerapkan metode trapesium segmen ganda, penelitian ini bertujuan memberikan estimasi volume yang lebih presisi dengan tingkat kesalahan yang rendah.

2.3 Perancangan Sistem

Perancangan dalam suatu penelitian merupakan aspek yang sangat penting. Dengan adanya perancangan, penelitian dapat diimplementasikan secara lebih terarah dan terstruktur. Dalam pembuatan alat, penulis perlu menyusun perancangan sistem untuk mengetahui *input* yang digunakan, proses yang dilakukan, hingga menghasilkan *output* yang sesuai dengan tujuan. Pada penelitian ini, fokus utama adalah pada pembuatan sistem pemantau stok kalsium karbonat di dalam silo. Proses perancangan dimulai dengan menentukan jenis sensor dan motor yang akan digunakan untuk mengumpulkan data, diikuti dengan pengaturan mekanisme pergerakan untuk memastikan cakupan penuh dari objek yang dipindai.





Gambar 2: Perancangan Sistem

Berdasarkan gambar 2, sistem pemantau stok kalsium karbonat di dalam silo dirancang menggunakan beberapa komponen utama yang terbagi menjadi tiga bagian yaitu *input*, *process*, dan *output*. Pada bagian *input*, terdapat beberapa perangkat yang bertugas menerima data awal, yaitu *push button* untuk memulai atau menghentikan proses pemindaian, sensor LiDAR sebagai sensor utama untuk mengukur jarak dan volume bahan di dalam silo, serta *emergency button* sebagai tombol darurat untuk menghentikan sistem secara langsung jika diperlukan. Bagian proses didukung oleh ESP32, sebuah mikrokontroler yang bertugas mengolah data dari *input* yang diterima. ESP32 mengumpulkan data dari sensor, memprosesnya, dan mengontrol perangkat *output*, kemudian mengirimkan data hasil pengukuran ke laptop untuk pemrosesan lebih lanjut. Pada bagian *output*, sistem menghasilkan beberapa keluaran, yaitu *lamp indicator* yang menyala untuk menunjukkan status sistem yaitu saat proses pemindaian sedang berlangsung dan akan mati yang menandakan proses pemindaian selesai, selanjutnya terdapat servo dan motor stepper yang menggerakkan sensor LiDAR agar dapat memindai secara menyeluruh selama proses pemindaian. Data dari ESP32 dikirim ke laptop, dimana visualisasi 3D serta estimasi volume dari bahan di dalam silo dilakukan menggunakan metode *trapezoidal numerical inetgration* yang sudah diterapkan pada kode program. Hasil visualisasi dan perhitungan volume dapat dilihat secara *real-time* pada layar laptop, sehingga pengguna dapat memantau stok kalsium karbonat dengan lebih mudah. Perancangan ini memastikan bahwa semua langkah dari *input*, pemrosesan, hingga *output* berlangsung secara terarah dan sistematis, memungkinkan pemantauan stok secara efisien dan akurat. Untuk dapat mengaplikasikan sistem ini, penulis membuat prototipe yang ditunjukkan pada Gambar 3.

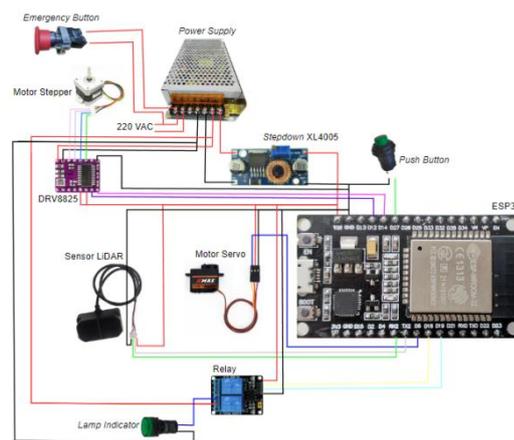




Gambar 3: Prototipe Sistem

Prototipe sistem ini dibuat menggunakan sebuah tangki yang berfungsi sebagai silo, dengan tinggi 38 cm dan diameter 28 cm. Di sisi tangki terdapat box panel yang digunakan untuk menyimpan semua komponen elektronik dalam penelitian ini. Box panel ini dirancang untuk melindungi komponen dari kerusakan fisik sekaligus memastikan pemasangan yang rapi. Di bagian atas tangki, sensor dan aktuator ditempatkan pada braket yang dilengkapi dengan din rail, yang berfungsi untuk memudahkan pemasangan dan penataan komponen-komponen tersebut. Penempatan ini memungkinkan sensor dan aktuator bekerja secara optimal dalam mendeteksi dan mengontrol kondisi di dalam tangki seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada prototipe yang telah dibuat, bahan yang akan dipindai nantinya dimasukkan ke dalam tangki dengan bentuk yang tidak beraturan. Untuk mempermudah proses pengeluaran bahan setelah pemindaian, bagian bawah tangki dirancang agar dapat dibuka dan ditutup. Dengan desain ini, bahan dapat dikeluarkan tanpa perlu melepas sensor dan aktuator yang terpasang di bagian atas tangki. Hal ini membuat proses pengeluaran bahan menjadi lebih efisien dan cepat saat pengujian dilakukan. Selain pembuatan prototipe sistem, penulis juga melakukan perancangan elektrik.



Gambar 4: Perancangan Elektrik Pada Sistem

Gambar 4 merupakan rancangan elektrik dari sistem penelitian ini. Pada gambar tersebut, terdapat tiga *input* utama yang terhubung ke sistem. Pertama, *push button* yang digunakan untuk mengaktifkan sistem. Kedua,

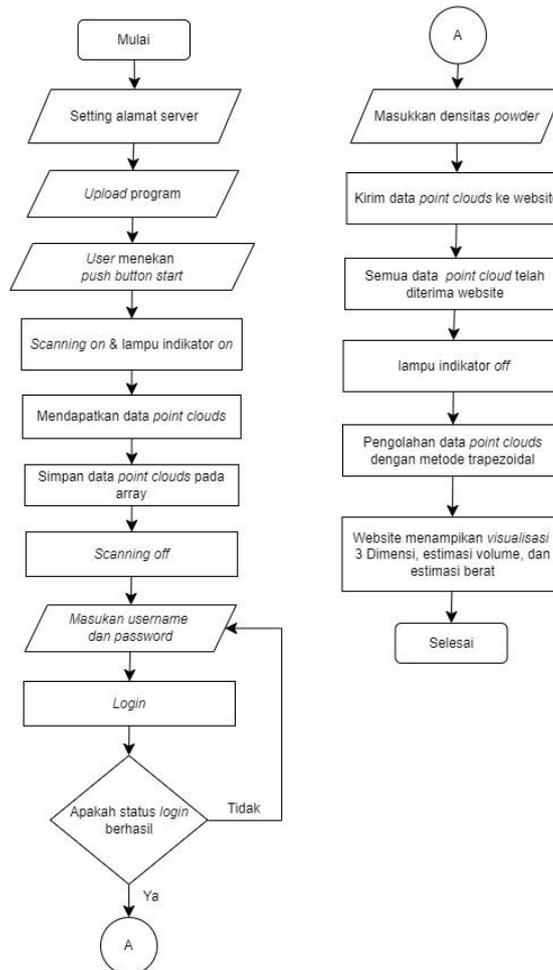


sensor LiDAR yang berfungsi mendeteksi jarak antara sensor dan permukaan objek. Ketiga, *emergency button* yang disediakan untuk situasi darurat. Selain *input*, sistem juga memiliki tiga *output* utama. Motor stepper digunakan untuk memutar sensor LiDAR pada rotasi yaw, sedangkan servo menggerakkan sensor LiDAR pada rotasi pitch. *Output* lainnya adalah lampu indikator yang berfungsi memberikan informasi visual kepada operator guna menunjukkan apakah proses pemindaian dan pengiriman data sedang berjalan atau tidak. Selain komponen utama sebagai *input* dan *output*, terdapat beberapa komponen lain yang berperan penting dalam sistem ini, antara lain *power supply* 12V yang memberikan *input* tegangan pada berbagai komponen, *stepdown* XL4005 yang menurunkan tegangan dari 12V ke 5V untuk komponen yang membutuhkan tegangan 5V, relay sebagai saklar untuk mengaktifkan atau mematikan lampu indikator, dan driver motor stepper DRV8825 untuk mengatur putaran motor stepper. Untuk mengatur langkah-langkah perputaran motor stepper, diperlukan sebuah driver, dimana tegangan referensi (V_{ref}) dapat disesuaikan dengan memutar potensio yang ada pada driver tersebut. Penyesuaian V_{ref} penting dilakukan untuk membatasi arus yang masuk ke motor stepper agar sesuai dengan kebutuhan dan mencegah kerusakan pada motor. Dalam penelitian ini, motor stepper yang digunakan adalah tipe Nema 14PM-M204-10V. Berdasarkan *datasheet*, arus terukur per fase dari motor stepper ini adalah 0,18A, sehingga tegangan referensi yang diperoleh adalah:

$$V_{ref} = \frac{current}{2} \tag{4}$$

$$V_{ref} = \frac{0,18}{2}$$

$$V_{ref} = 0,09V$$



Gambar 5: Flowchart Alur Kerja Sistem



Gambar 5 merupakan flowchart alur kerja dari sistem penelitian ini. Proses dimulai dengan pengaturan alamat server menggunakan alamat IP komputer yang di-*input* ke kode program dan di-*upload* ke mikrokontroler ESP32. Setelah itu, oprator dapat menekan tombol *start* untuk memulai pemindaian, dan data *point clouds* disimpan dalam memori ESP32. Pengguna kemudian *login* ke situs website dengan memasukkan *username* dan *password*. Jika *login* berhasil, densitas kalsium karbonat dimasukkan dan data *point clouds* dikirim ke situs website. Setelah data diterima, lampu indikator mati, dan data diolah untuk memperkirakan volume kalsium karbonat, yang kemudian ditampilkan bersama visualisasi 3D dan estimasi volume serta massa pada situs website.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan pengambilan data dari pemindaian kalsium karbonat di dalam silo dengan berat yang sama yaitu 1000 gram, namun dengan kondisi permukaan yang berbeda yaitu permukaan berbentuk rata, menggunung dan cekung. Sebelum memulai pemindaian, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menimbang kalsium karbonat tersebut. Hal ini dilakukan untuk memastikan massa kalsium karbonat yang akan dipindai diketahui dengan tepat. Proses penimbangan menggunakan timbangan digital yang memberikan hasil yang akurat dan konsisten. Langkah ini sangat krusial karena massa yang tepat diperlukan untuk memvalidasi hasil pemindaian. Hasil penimbangan akan digunakan untuk membandingkan massa terukur dengan hasil pemindaian, sehingga perbedaan atau kesalahan dapat terdeteksi dan dianalisis.

Tabel 1. Hasil Pengujian dengan Permukaan Rata

No	Massa Pada Timbangan Digital (gram)	Hasil Massa Pada Website (gram)	Error (%)
1	1000	995,82	0,418
2	1000	944,34	5,566
3	1000	979,14	2,086
4	1000	986,29	1,371
5	1000	971,99	2,801
6	1000	961,50	3,85
7	1000	985,81	1,419
8	1000	972,94	2,706
9	1000	969,13	3,087
10	1000	980,57	1,943
Rata-rata Error			2,53%

Tabel 1 menunjukkan hasil dari pengujian sistem dengan pemindaian permukaan kalsium karbonat yang rata atau tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan. Data menunjukkan bahwa massa yang tercatat di website bervariasi, dengan nilai terendah 944,34 gram dan tertinggi 995,82 gram. Persentase kesalahan berkisar antara 0,418% hingga 5,566%, dengan rata-rata kesalahan sebesar 2,53%. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat beberapa perbedaan antara massa yang tercatat di website dan timbangan digital, rata-rata kesalahan masih dalam rentang yang dapat diterima.

Tabel 2. Hasil Pengujian dengan Permukaan Menggunung

No	Massa Pada Timbangan Digital (gram)	Hasil Massa Pada Website (gram)	Error (%)
1	1000	1087,83	8,783
2	1000	1041,59	4,159
3	1000	1015,37	1,537
4	1000	1034,43	3,443



5	1000	1021,56	2,156
6	1000	1103,08	10,308
7	1000	1083,06	8,306
8	1000	1121,20	12,12
9	1000	1112,61	11,261
10	1000	1037,77	3,777
Rata-rata <i>Error</i>			6,6%

Tabel 2 menunjukkan hasil dari pengujian sistem dengan pemindaian permukaan kalsium karbonat yang membentuk permukaan menggunung. Hasil pengujian menunjukkan variasi pengukuran massa pada website dengan nilai kesalahan yang berbeda-beda. Nilai kesalahan tertinggi tercatat pada pengujian ke-8 dengan kesalahan sebesar 12,12%, sementara nilai kesalahan terendah terdapat pada pengujian ke-3 dengan kesalahan sebesar 1,537%. Rata-rata kesalahan yang diperoleh dari seluruh pengujian adalah 6,6%. Hasil ini mengindikasikan bahwa perubahan bentuk permukaan serbuk berpengaruh signifikan terhadap akurasi pengukuran massa.

Tabel 3. Hasil Pengujian dengan Permukaan Cekung

No	Massa Pada Timbangan Digital (gram)	Hasil Massa Pada Website (gram)	<i>Error (%)</i>
1	1000	871,40	12,86
2	1000	876,64	12,336
3	1000	941,48	5,852
4	1000	997,25	0,275
5	1000	975,32	2,468
6	1000	919,07	8,093
7	1000	970,56	2,944
8	1000	997,73	0,227
9	1000	946,24	5,376
10	1000	985,81	1,419
Rata-rata <i>Error</i>			5,2%

Tabel 3 menunjukkan hasil dari pengujian sistem dengan pemindaian permukaan kalsium karbonat yang membentuk permukaan cekung. Hasil pengujian menunjukkan nilai kesalahan tertinggi pada pengujian pertama, yaitu sebesar 12,86%, sementara kesalahan terendah terjadi pada pengujian ke-4 dengan nilai 0,275%. Rata-rata kesalahan dari seluruh pengujian adalah 5,2%. Data yang diperoleh menunjukkan variasi yang signifikan dalam tingkat kesalahan antar pengujian, yang kemungkinan disebabkan oleh getaran dari pemindai, sehingga menyebabkan pergerakan yang tidak stabil dan menghasilkan hasil pemindaian yang berbeda.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada tiga kondisi permukaan powder yang berbeda, yaitu permukaan rata, menggunung, dan cekung, didapatkan akurasi yang bervariasi. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa ketepatan perhitungan volume dan massa sangat dipengaruhi oleh bentuk dan variasi permukaan powder. Pada kondisi permukaan cekung, beberapa bagian powder tidak terdeteksi oleh 3D scanner, yang mengakibatkan volume terukur lebih rendah dari volume sebenarnya. Sementara itu, pada permukaan menggunung, nilai error yang lebih tinggi disebabkan oleh deteksi bagian silo yang tidak terisi powder, sehingga volume yang terukur lebih besar dari volume powder yang sebenarnya. Hal ini terjadi karena batas pergerakan sudut servo yang mempengaruhi hasil pembacaan sensor LiDAR terhadap objek pada posisi awal.

5. SARAN



Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan pada penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran untuk pengembangan penelitian berikutnya yaitu:

1. Peneliti berikutnya disarankan untuk memperbaiki desain 3D *scanner* agar proses pemindaian lebih akurat dan efisien, salah satunya dengan membuat *scanner* dapat bergerak saat memindai objek, bukan hanya dalam posisi tetap.
2. Peneliti selanjutnya disarankan untuk memasang *limit switch* pada motor stepper, sehingga motor dapat kembali ke posisi awal secara otomatis dan lebih mudah.
3. Peneliti selanjutnya juga dapat mempertimbangkan untuk mengganti motor stepper dengan servo, yang memungkinkan kontrol putaran berdasarkan sudut derajat, sehingga menghasilkan pembacaan yang lebih detail.
4. Peneliti berikutnya dapat menambahkan sistem otomatis untuk mengeluarkan bahan yang sudah dipindai, guna mempermudah pengambilan data dan menghemat waktu.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemdikbudristek) yang telah mendukung dan memberikan dana kepada penulis sehingga dapat merealisasikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widi, Y. et al. (2019) DESAIN INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI PT NATURA PERISA AROMA LAMPUNG.
- [2] Ernawati, R., Agung Cahyadi, T. and Ali Amri, N. (2020) 'Penerapan Metode Constructed Wetland dalam Upaya Pengelolaan Limbah Air Asam Tambang pada Penambangan Batubara, Berdasarkan Literatur Review', Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi, pp. 201–207. Available at: <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/>.
- [3] Nabila, T.I. et al. (2022) 'PENANGANAN PENERINGAN DAN PERGUDANGAN BAHAN BAKU JAGUNG UNTUK PAKAN UNGGAS', Jurnal Nutrisi Ternak Tropis dan Ilmu Pakan, pp. 27–33.
- [4] Laura, R., Handayani, R. and Alfarisi, M.R. (2021) PEMANTAUAN DAN PENGENDALIAN SILO PADA PETERNAKAN UNGGAS (Monitoring and Controlling Silo in Poultry Livestock).
- [5] Anoop, S., Abhishek, R. and Siddeswara Prasad, V. (2021) 'Volume Measurement for Silos', in Proceedings of CONECCT 2021: 7th IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Available at: <https://doi.org/10.1109/CONECCT52877.2021.9622351>.
- [6] Clar, S.E., Aleluya, E.R.M. and Salaan, C.J.O. (2022) 'Volume Estimation of Raw Materials inside the Silo using Convex Hull Method', in 2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Available at: <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109554>.
- [7] Wibowo, G.S. (2019) Sistem Rekonstruksi Objek 3D dengan Metode LiDAR Menggunakan Mikrokontroler Arduino Mega.
- [8] F. Nur Aziz and M. Zakariyah, "TF-Mini LiDAR Sensor Performance Analysis for Distance Measurement," 2022.
- [9] W. M. Mutiarasari et al., "Model 3D Multi-Objek Hasil Ekstraksi Data Lidar Multi-Object 3D Model from Lidar Data," Jurnal Geodesy and Geomatics, vol. 19, no. 1, pp. 41–48, 2023.
- [10] Riyanto, F. and Oktavi, M. (2020) ESTIMASI SUMBERDAYA BATUBARA TERUKUR MENGGUNAKAN METODE TRAPEZOID DI PT. TEBO PRIMA DESA KEMANTAN KELURAHAN SUNGAI BENGKAL KABUPATEN TEBO PROVINSI JAMBI. Available at: <http://ojs.umb-bungo.ac.id/>.



- [11] Herfina, N., Amrullah and Junaidi (2019) 'EFEKTIFITAS METODE TRAPESIUM DAN SIMPSON DALAM PENENTUAN LUAS MENGGUNAKAN PEMROGRAMAN PASCAL', *Mathematics and Educations Journal*, 1, pp. 53–63.

