

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai dasar dalam merancang dan membangun sistem 3D scanner berbasis Arduino nano, diperlukan pemahaman terhadap berbagai konsep dan teknologi terkait, seperti sistem kendali motor stepper, sensor pengukuran jarak, serta prinsip kerja pemindaian tiga dimensi. Selain itu, studi literatur terhadap penelitian terdahulu memberikan kontribusi penting dalam memperkuat landasan teoritis dan metodologis. Oleh karena itu, untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif, beberapa penelitian relevan yang berkaitan dengan perancangan 3D scanner, penggunaan Arduino, dan pengendalian motor stepper dirangkum dalam Tabel dibawah.

Tabel 2- 1 Tinjauan Pustaka

Judul Referensi	Penulis	Tahun	Metode / Alat yang Digunakan	Hasil Utama / Temuan
Complete End-To-End Low Cost Solution To a 3D Scanning System with Integrated Turntable	Saed Khawald eh, Tajwar Abrar Aleef, Usama Pervaiz, Vu Hoang Minh, Yeman Brhane Hagos	2017	Kamera murah, meja putar otomatis, perangkat lunak pemrosesan mesh	Sistem 3D scanning otomatis dengan meja putar terintegrasi, memungkinkan pemindaian objek 360° secara efisien dan biaya rendah.
BodyDigitizer: An Open Source Photogrammetry -based 3D Body Scanner	Travis Gesslein, Daniel Scherer, Jens Grubert	2017	Hingga 96 kamera Raspberry Pi, pencahayaan LED, perangkat lunak open-source	Sistem pemindaian tubuh manusia berbasis fotogrametri dengan kualitas tinggi, cocok untuk aplikasi realitas virtual dan medis.

A low-cost, arduino-like dev-kit for single-element ultrasound imaging	Luc Jonveaux	2016	Kit pengembangan mirip Arduino untuk pencitraan ultrasound	Pengembangan kit open-source berbiaya rendah untuk pencitraan ultrasound, memungkinkan eksperimen di rumah tanpa peralatan khusus.
Embedded Line Scan Image Sensors: The Low Cost Alternative for High Speed Imaging	Stef Van Wolputte, Wim Abbeloos, Stijn Helsen, Abdellatif Bey-Temsamani, Toon Goedemé	2016	Sensor gambar garis (1D) murah, optik LED/LASER, platform tertanam untuk pemrosesan gambar	Sistem pemindaian garis berkecepatan tinggi dengan biaya rendah, memberikan kualitas gambar sebanding dengan sistem industri mahal.

2.2 Dasar Teori

Berdasarkan hasil kajian terhadap berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem 3D scanner berbasis Arduino memerlukan pemahaman mendalam terhadap sejumlah teori dan prinsip dasar. Oleh karena itu, pada subbab berikut ini akan diuraikan teori-teori yang mendasari perancangan alat.

2.2.1 3D Scanner

2.2.1.1 Definisi Umum 3D Scanner

3D *scanner* adalah perangkat yang digunakan untuk menangkap bentuk fisik suatu objek atau lingkungan dan mengubahnya menjadi representasi digital tiga dimensi. Perangkat ini bekerja dengan mengumpulkan data spasial yang disebut point cloud, yaitu sekumpulan koordinat titik-titik di permukaan objek yang menggambarkan struktur geometris objek tersebut dalam ruang tiga dimensi [1].

Teknologi 3D *scanning* dapat menggunakan berbagai metode penginderaan seperti *Time-of-Flight* (ToF), triangulasi optik, dan *structured light*. Dalam sistem berbasis ToF, pengukuran dilakukan dengan menghitung waktu yang dibutuhkan cahaya atau sinyal laser untuk memantul kembali dari permukaan objek, sementara triangulasi optik menggunakan sudut pantulan cahaya untuk menghitung kedalaman objek. *Structured light*, di sisi lain, memproyeksikan pola cahaya pada objek dan menganalisis deformasi pola tersebut untuk membentuk profil 3D [2].

Aplikasi 3D *scanner* sangat luas dan mencakup bidang seperti rekayasa balik (*reverse engineering*), pengendalian kualitas dalam manufaktur, rekonstruksi objek bersejarah, dan digitalisasi aset budaya. Selain itu, dengan kemajuan teknologi dalam industri 4.0, 3D *scanner* telah menjadi komponen penting dalam otomatisasi proses produksi, desain produk yang dipersonalisasi, serta pemeliharaan prediktif berbasis model digital [3] Desain umum 3D scanner dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 3D Scanner

2.2.1.2 Prinsip Kerja 3D Scanner

3D scanner bekerja berdasarkan prinsip akuisisi data spasial dari permukaan suatu objek, yang kemudian dikonversikan menjadi representasi digital tiga dimensi. Proses ini umumnya terdiri dari tiga tahapan utama: pengukuran jarak, perekaman posisi titik dalam ruang, dan rekonstruksi model 3D [4].

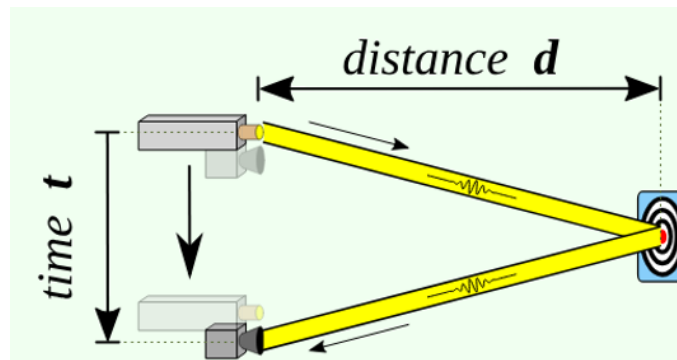
Sebagian besar teknologi 3D scanner mengandalkan fenomena pantulan cahaya atau pengukuran waktu tempuh cahaya (Time of Flight) untuk menghitung jarak antara pemindai dan permukaan objek. Dalam sistem berbasis ToF, prinsip dasarnya dinyatakan dalam persamaan:

$$d = \frac{c \times t}{2}$$

di mana d adalah jarak ke permukaan objek, c adalah kecepatan cahaya, dan t adalah waktu tempuh sinyal cahaya dari pemindai ke objek dan kembali lagi.

Beberapa teknologi lain seperti triangulasi optik menggunakan dua sudut pandang (biasanya kamera dan pemancar cahaya) untuk menentukan kedalaman suatu titik berdasarkan prinsip geometri segitiga [5]. Sementara itu, structured light scanning memproyeksikan pola cahaya ke objek dan mendeteksi distorsi pola untuk mengukur kontur permukaan objek secara presisi seperti pada gambar 2.2.

Pemrosesan data dari hasil pengukuran ini menghasilkan point cloud, yaitu kumpulan titik-titik dalam koordinat 3D yang merepresentasikan permukaan objek. Selanjutnya, point cloud ini dapat diproses menjadi model mesh atau permukaan yang lebih halus menggunakan berbagai algoritma interpolasi dan rekonstruksi geometris.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja 3D Scanner

2.2.1.3 Jenis-Jenis Teknologi 3D Scanner

Teknologi 3D scanner telah berkembang dalam berbagai bentuk berdasarkan metode akuisisi data, sumber cahaya yang digunakan, serta aplikasi spesifiknya. Menurut penelitian oleh dalam A Review of Body Measurement Using 3D Scanning [3], jenis-jenis 3D scanner dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama, yaitu berdasarkan teknik pengukuran dan metode sensorik. Secara umum, klasifikasi teknologi 3D scanner meliputi:

a. Laser-Based 3D Scanner

Laser-based 3D scanner menggunakan sumber cahaya laser untuk memproyeksikan titik atau garis pada permukaan objek, lalu merekam pantulannya untuk menghitung jarak. Teknologi ini sering digunakan untuk

mendapatkan akurasi tinggi dalam pemindai objek dengan permukaan yang kompleks, terutama dalam aplikasi industri dan rekayasa balik (*reverse engineering*).

b. *Structured Light 3D Scanner*

Structured light 3D scanner memproyeksikan pola cahaya yang telah diketahui (seperti garis atau grid) ke objek dan mengamati distorsi pola tersebut melalui kamera. Berdasarkan deformasi pola, permukaan objek dapat direkonstruksi dalam format 3D. Teknologi ini terkenal karena kecepatan akuisisi yang tinggi dan presisi yang baik, sehingga banyak digunakan dalam bidang biometrik, animasi digital, serta pemindaian tubuh manusia.

c. *Photogrammetry and Image-Based Scanning*

Photogrammetry adalah teknik yang menggunakan banyak gambar 2D dari sudut pandang berbeda untuk merekonstruksi model 3D melalui algoritma *Structure-from-Motion* (SfM). Meskipun akurasi dapat dipengaruhi oleh kualitas gambar dan pencahayaan, metode ini memiliki keunggulan dalam biaya rendah dan fleksibilitas tinggi. *Photogrammetry* banyak diterapkan dalam dokumentasi budaya, pemetaan geospasial, dan survei arsitektural.

d. *Contact 3D Scanner (Tactile Scanner)*

Berbeda dengan metode berbasis cahaya, *contact 3D scanner* menggunakan probe mekanik yang menyentuh permukaan objek untuk mengukur koordinat titik secara presisi. Metode ini terutama digunakan dalam metrologi industri, di mana akurasi geometrik sangat penting. Namun, metode ini relatif lambat dan tidak cocok untuk objek yang rapuh atau lunak, mengingat proses pengukuran yang memerlukan kontak fisik langsung.

e. *Time of Flight (ToF) Camera-Based Scanner*

Time of Flight (ToF) camera-based scanner menggunakan kamera ToF untuk mengukur waktu perjalanan sinyal cahaya dari sumber ke objek dan kembali ke sensor. Teknologi ini dapat menghasilkan data kedalaman secara *real-time*, yang menjadikannya ideal untuk aplikasi seperti interaksi manusia-komputer, navigasi robotik, dan *augmented reality* (AR).

2.2.2 Arduino

2.2.2.1 Pengertian Arduino

Arduino merupakan sebuah platform elektronik *open-source* berbasis perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang dirancang untuk memudahkan pengembangan sistem elektronik interaktif. Menurut Kushner pada Tahun 2011 dalam disertasinya yang menjadi cikal bakal Arduino, platform ini dikembangkan dengan tujuan menyediakan sarana sederhana, fleksibel, dan terjangkau untuk merancang sistem fisik berbasis mikrokontroler. Arduino terdiri dari papan sirkuit cetak (PCB) yang dapat diprogram untuk membaca input, seperti cahaya pada sensor, jari pada tombol, atau pesan Twitter, dan mengubahnya menjadi output, seperti mengaktifkan motor, menyalakan lampu LED, atau mengirimkan sinyal ke perangkat lain [6].

Secara teknis, Arduino menggunakan mikrokontroler dari keluarga Atmel AVR, seperti ATmega328P pada Arduino Uno, atau ARM Cortex-M series pada varian yang lebih canggih seperti Arduino Due. Board Arduino dilengkapi dengan sejumlah pin input/output digital dan analog, antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, dan I2C, serta port USB yang digunakan untuk pemrograman dan komunikasi data. Pemrograman Arduino dilakukan menggunakan Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), dengan bahasa pemrograman berbasis *Wiring*, turunan dari bahasa C/C++ yang disederhanakan untuk mempermudah proses pengembangan.

Arduino dapat diprogram melalui software yang sudah disediakan oleh Arduino, yaitu Arduino Ide. Software ini memiliki berbagai fitur yang dapat digunakan. Beberapa fitur dapat dilihat di tabel 2-2 dan gambar 2.3 hingga gambar 2.5.

Tabel 2- 2 Fitur utama Arduino Ide

Fitur	Deskripsi
Verify / Upload	Untuk melakukan kompilasi dan mengunggah kode program ke board Arduino.
Select Board & Port	Menampilkan board Arduino yang terdeteksi secara otomatis beserta nomor port-nya.
Sketchbook	Menyimpan semua sketch (program) lokal pada komputer dan dapat disinkronisasi dengan Arduino Cloud atau diakses dari lingkungan online.

Fitur	Deskripsi
Boards Manager	Menyediakan berbagai paket board dari Arduino dan pihak ketiga. Contohnya, untuk menggunakan board MKR WiFi 1010, diperlukan instalasi paket "Arduino SAMD Boards".
Library Manager	Menyediakan ribuan pustaka Arduino yang dibuat oleh Arduino maupun komunitasnya.
Debugger	Untuk menguji dan men-debug program secara real time.
Search	Fitur pencarian untuk menemukan kata kunci dalam kode program.
Open Serial Monitor	Membuka alat Serial Monitor sebagai tab baru di konsol, digunakan untuk komunikasi serial antara Arduino dan komputer.



Gambar 2.3 Interface Arduino Ide



Gambar 2.4 Boards Manager

Dengan menggunakan Boards Manager, berbagai paket board dapat dijelajahi dan diinstal sesuai kebutuhan. Paket board merupakan kumpulan konfigurasi dan instruksi yang diperlukan agar kode program dapat dikompilasi dan dijalankan pada jenis board tertentu yang didukung oleh paket tersebut.

Beberapa jenis paket board yang tersedia di Arduino IDE, seperti avr, samd, megaavr, dan lainnya, dapat diunduh dan digunakan sesuai dengan tipe mikrokontroler yang akan diprogram.

Program pada Arduino disebut sebagai sketch dan terdiri dari dua fungsi utama:

1. `void setup()`: Fungsi ini akan dijalankan satu kali saat program pertama kali dimulai. Biasanya digunakan untuk inisialisasi variabel, pengaturan pin I/O, dan komunikasi serial.
2. `void loop()`: Fungsi ini akan dijalankan secara berulang-ulang selama board menyala. Di sinilah logika utama dari program ditempatkan.



Gambar 2.5 Library Manager

Melalui penggunaan Library Manager, ribuan library dapat dijelajahi dan diinstal secara langsung dari Arduino IDE. Library merupakan ekstensi dari Arduino API yang disediakan untuk menyederhanakan proses pemrograman dalam mengendalikan berbagai perangkat keras.

Dengan library, pengendalian perangkat seperti motor servo, sensor tertentu, hingga modul Wi-Fi, dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien karena fungsi-fungsi dasar telah disediakan dalam bentuk modul siap pakai.

Keunggulan utama Arduino terletak pada pendekatan *open-source*-nya yang memungkinkan komunitas global untuk mengembangkan, memperluas, dan mendistribusikan beragam pustaka (*library*) serta modul tambahan (*shields*), mempercepat proses prototipe sistem tertanam. Dalam berbagai penelitian, Arduino telah terbukti menjadi platform efektif dalam bidang pendidikan teknik, penelitian akademik, hingga aplikasi industri ringan [7] Berbagai proyek yang berkaitan dengan *Internet of Things* (IoT), otomasi rumah, sistem kendali industri, serta prototipe robotik banyak menggunakan Arduino sebagai basis utamanya.

Lebih jauh lagi, Arduino mampu berinteraksi dengan berbagai jenis sensor dan aktuator, sehingga menjadikannya sebagai tulang punggung untuk pengembangan sistem cerdas. Kemampuannya untuk mengintegrasikan sensor ToF, *motor stepper*, dan berbagai perangkat lainnya membuat Arduino menjadi pilihan ideal dalam pembuatan prototipe seperti proyek 3D scanner berbasis sensor *Time-of-Flight*.

Dengan mempertimbangkan fleksibilitas, keterjangkauan, kemudahan penggunaan, serta dukungan komunitas yang luas, Arduino telah menjadi komponen fundamental dalam dunia *embedded system modern*, memberikan kontribusi signifikan dalam mempercepat inovasi teknologi di berbagai sektor.

2.2.2.2 Arduino Nano

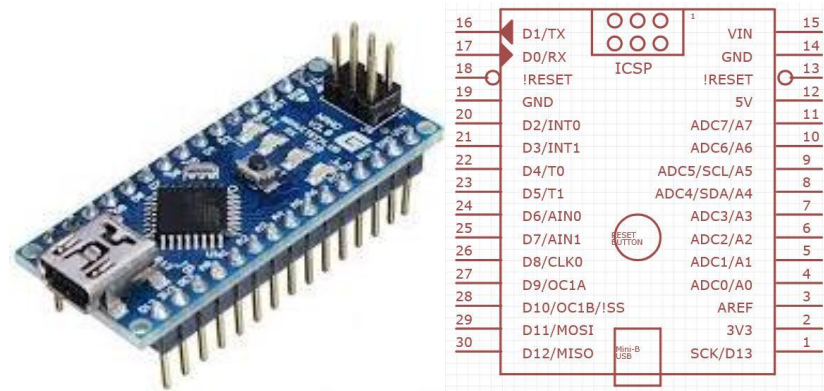
Arduino Nano adalah salah satu papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang dirancang dengan ukuran kecil dan efisiensi tinggi. Papan ini banyak digunakan dalam sistem embedded dan aplikasi pengendalian otomatis karena dimensinya yang kompak, konsumsi daya rendah, serta kemudahan integrasi dengan berbagai sensor dan aktuator.

Arduino Nano memiliki spesifikasi inti yang mirip dengan Arduino Uno, namun dikemas dalam ukuran yang jauh lebih kecil (18×45 mm), tanpa konektor power jack. Beberapa fitur utamanya mencakup seperti pada tabel 2-3:

Tabel 2- 3 Spesifikasi Arduino Nano [8]

Kategori	Spesifikasi
Prosesor	ATmega328P, 8-bit AVR, hingga 16 MHz
Memori	32 KB Flash (2 KB digunakan oleh bootloader), 2 KB SRAM, 1 KB EEPROM
Konektivitas	Tidak memiliki konektivitas Wi-Fi atau Bluetooth bawaan
GPIO	22 pin I/O digital (termasuk 6 input analog)
ADC	10-bit ADC, 8 saluran
DAC	Tidak tersedia (hanya PWM untuk simulasi DAC)
PWM	Hingga 6 saluran PWM
I2C, SPI, UART	Tersedia
Tegangan Input	7 – 12V (melalui pin Vin atau konektor USB)
Tegangan Kerja	5V
Konsumsi Daya	Sekitar 19 mA (tanpa beban eksternal)
Ukuran Modul	18 x 45 mm
Jumlah Pin	30 pin (termasuk GND dan VCC)
WiFi Range	Tidak tersedia
Bluetooth Range	Tidak tersedia
Lingkungan Kerja	Suhu: -40°C hingga +85°C
Sistem Operasi	Tidak menggunakan OS, berjalan dengan firmware dari Arduino bootloader
Platform Pengembangan	Arduino IDE, PlatformIO

Menurut Joshua Noble [9], Arduino Nano merupakan solusi mikrokontroler yang ideal untuk sistem IoT skala kecil dan perangkat bergerak karena ukurannya yang ringan, fleksibilitas tinggi dalam pengolahan data, serta komunitas pengembang yang luas. Arduino Nano memungkinkan pemrograman langsung melalui port USB dengan antarmuka CH340 atau FT232. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan bentuk fisik Arduino Nano yang digunakan.



Gambar 2.6 Bentuk Fisik dan Simbol Wiring Arduino Nano

Dalam proyek 3D scanner berbasis sensor ToF dan motor stepper, Arduino Nano berperan sebagai pusat pemrosesan dan pengendalian sistem. Fungsi utamanya antara lain:

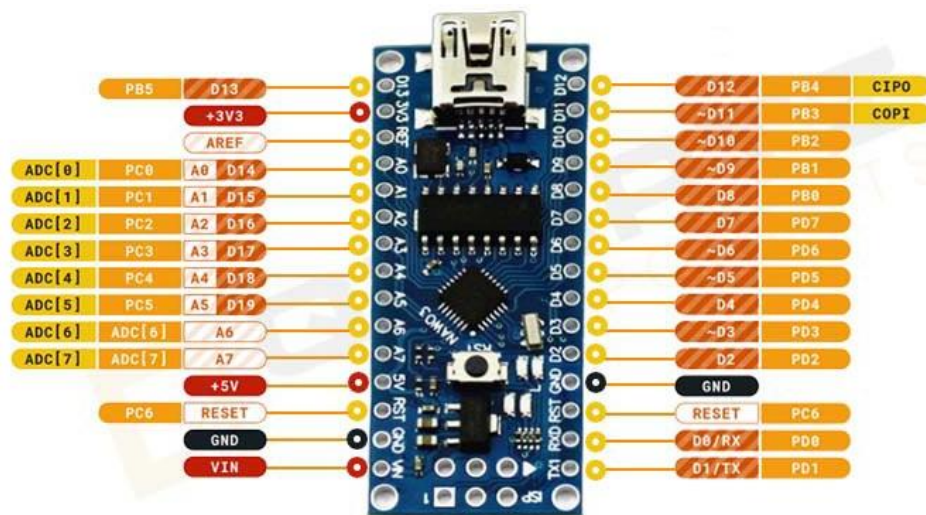
1. Mengatur rotasi stepper motor untuk akuisisi data spasial.
2. Mengakses data jarak dari sensor ToF melalui komunikasi I²C.
3. Mengelola koordinasi antar-komponen (motor, sensor, sistem penyimpanan).
4. Mengirimkan hasil data ke komputer untuk proses rekonstruksi 3D.

Arduino Nano memiliki banyak pin out yang memiliki fungsi yang berbeda beda. Pin out tersebut diantaranya dapat dilihat pada gambar 2.7 dan tabel 2-4 sebagai berikut.

Tabel 2- 4 PinOut Arduino Nano

No. Pin	Nama Pin	Tipe	Fungsi Utama
1	D0 (RX)	Digital / Serial	Receive data (komunikasi serial UART)
2	D1 (TX)	Digital / Serial	Transmit data (komunikasi serial UART)
3	D2	Digital I/O	I/O digital, interrupt eksternal (INT0)
4	D3 (PWM)	Digital I/O	I/O digital, PWM, interrupt eksternal (INT1)
5	D4	Digital I/O	I/O digital
6	D5 (PWM)	Digital I/O	I/O digital, PWM
7	D6 (PWM)	Digital I/O	I/O digital, PWM
8	D7	Digital I/O	I/O digital
9	D8	Digital I/O	I/O digital

No. Pin	Nama Pin	Type	Fungsi Utama
10	D9 (PWM)	Digital I/O	I/O digital, PWM
11	D10 (PWM/SS)	Digital I/O	I/O digital, PWM, SPI SS (Slave Select)
12	D11 (PWM/MOSI)	Digital I/O	I/O digital, PWM, SPI MOSI
13	D12 (MISO)	Digital I/O	I/O digital, SPI MISO
14	D13 (SCK)	Digital I/O	I/O digital, SPI SCK, LED BUILTIN
15–20	A0–A5	Analog Input	Input analog, juga bisa sebagai I/O digital
21	A6	Analog Input	Input analog saja (tidak bisa digital)
22	A7	Analog Input	Input analog saja (tidak bisa digital)
23	RESET	Input	Reset mikrokontroler
24	GND	Power	Ground (negatif)
25	VIN	Power	Input tegangan (7–12V) ke regulator onboard
26	5V	Power	Output 5V dari regulator
27	3.3V	Power	Output 3.3V dari regulator onboard
28	REF	Input	Referensi tegangan ADC (biasanya 5V atau 3.3V)
29–30	GND	Power	Ground tambahan



Gambar 2. 7 PinOut Arduino Nano

Arduino Nano mampu menangani operasi real-time sederhana seperti pembacaan sensor dan kontrol motor, asalkan beban pemrosesan tidak melebihi kapasitas memori dan clock yang tersedia. Dalam sistem dengan intensitas pengukuran tinggi, pemrograman efisien dan pengelolaan interrupt sangat penting untuk menjaga performa [10].

2.2.2.3 Fungsi Arduino Dalam Project 3D Scanner

Dalam proyek 3D scanner berbasis sensor *Time-of-Flight* (ToF) yang dikembangkan, Arduino berperan sebagai unit kendali utama (main control unit) yang mengoordinasikan seluruh proses akuisisi data, pengolahan sinyal, dan pengendalian aktuator. Arduino digunakan untuk mengatur interaksi antara sensor ToF, *motor stepper*, serta perangkat output lainnya seperti LCD dan modul penyimpanan data (*SD card module*). Secara lebih spesifik, fungsi-fungsi Arduino dalam proyek ini meliputi:

a. Akuisisi Data dari *Sensor ToF*

Arduino bertugas membaca data jarak (*distance data*) secara *real-time* dari sensor ToF. Melalui komunikasi protokol I²C, Arduino menerima data pengukuran jarak dari permukaan objek yang dipindai. Data ini selanjutnya diproses dan disimpan sebagai bagian dari peta koordinat tiga dimensi.

b. Pengendalian Gerak *Motor Stepper*

Motor stepper digunakan untuk menggerakkan sensor atau objek secara terkontrol sepanjang sumbu tertentu. Arduino menghasilkan pulsa kendali (*pulse signals*) untuk mengatur rotasi *motor stepper*, baik dalam hal arah, kecepatan, maupun jumlah langkah (*steps*). Dengan demikian, proses pemindaian dapat dilakukan secara sistematis dan presisi, memungkinkan pembentukan model 3D dari hasil pengukuran jarak pada berbagai titik.

c. Sinkronisasi Pengambilan Data dan Pergerakan

Arduino mengimplementasikan logika pemrograman untuk mensinkronkan gerakan *motor stepper* dengan pembacaan data sensor. Setelah motor bergerak sejauh satu langkah tertentu, Arduino memerintahkan pembacaan sensor ToF dan merekam nilai jaraknya, lalu menggerakkan motor ke posisi berikutnya secara otomatis.

d. Penyimpanan Data Hasil Pemindaian

Data hasil pembacaan sensor ToF yang telah disinkronkan dengan posisi motor stepper disimpan dalam bentuk file digital menggunakan *SD card module*. Arduino mengelola proses penulisan file pada kartu memori sehingga hasil pemindaian dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut atau rekonstruksi model 3D.

e. Antarmuka dengan Pengguna

Arduino mengatur tampilan informasi kepada pengguna melalui LCD, seperti status pemindaian, nilai jarak yang dibaca, serta parameter sistem lainnya. Hal ini meningkatkan keterlibatan pengguna dalam memantau dan mengendalikan proses pemindaian.

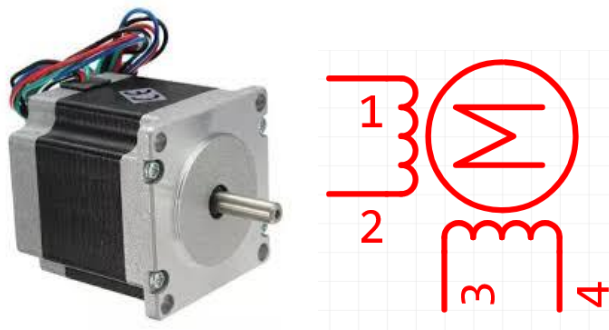
f. Pengaturan Energi dan Proteksi Sistem

Arduino dapat diintegrasikan dengan sensor arus, proteksi *overvoltage*, serta kontrol konsumsi daya untuk memastikan seluruh sistem berjalan secara stabil dan aman sepanjang durasi pemindaian. Dengan menjalankan seluruh fungsi tersebut secara simultan dan terkoordinasi, Arduino menjadi elemen sentral dalam mengoptimalkan kinerja dan akurasi sistem 3D scanner. Selain itu, fleksibilitas Arduino dalam pemrograman dan kemudahan integrasi dengan berbagai komponen tambahan menjadikannya platform ideal dalam pengembangan sistem pemindaian tiga dimensi berbasis *low-cost* dan *high-efficiency*.

2.2.3 Motor Stepper

2.2.3.1 Definisi Motor Stepper

Motor stepper adalah jenis motor listrik yang mengubah sinyal pulsa digital menjadi gerakan mekanis diskret yang presisi. Motor stepper dapat dilihat pada gambar 2.8. Setiap pulsa listrik yang diterima oleh *motor stepper* akan menggerakkan poros motor sejauh sudut tertentu yang telah ditentukan, yang disebut sebagai *step angle*. Dengan karakteristik ini, motor *stepper* mampu melakukan kontrol posisi, kecepatan, dan percepatan dengan tingkat akurasi yang tinggi tanpa memerlukan sistem umpan balik eksternal, berbeda dengan motor servo konvensional [11].



Gambar 2.8 Bentuk Fisik dan Simbol Wiring Stepper Motor

Secara struktural, *motor stepper* terdiri dari stator dengan lilitan elektromagnetik dan rotor yang biasanya berbentuk magnet permanen atau berbahan feromagnetik. Saat pulsa listrik dikirimkan ke lilitan stator dalam urutan tertentu, medan magnet yang dihasilkan akan menarik rotor ke posisi yang spesifik. Dengan mengubah urutan pulsa, rotor dapat bergerak maju atau mundur dengan langkah kecil yang terkontrol. Fenomena ini memungkinkan *motor stepper* untuk digunakan secara efektif dalam aplikasi yang membutuhkan rotasi bertahap dan presisi tinggi, seperti dalam sistem otomasi industri, printer 3D, robotika, dan perangkat pemindaian tiga dimensi [12]. Terdapat beberapa tipe motor stepper yang umum digunakan, antara lain:

- a. *Permanent Magnet Stepper*: menggunakan rotor magnet permanen untuk menghasilkan gaya magnetik.
- b. *Variable Reluctance Stepper*: menggunakan rotor berbahan feromagnetik tanpa magnetisasi tetap, bergerak berdasarkan prinsip reluktansi minimum.
- c. *Hybrid Stepper*: menggabungkan prinsip kerja permanent magnet dan variable reluctance untuk meningkatkan akurasi dan torsi.

Salah satu keunggulan utama *motor stepper* adalah kemampuannya untuk mempertahankan posisi tetap bahkan saat berhenti, tanpa memerlukan energi tambahan, sehingga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dalam pengendaliannya, *motor stepper* sering dioperasikan melalui *driver* motor yang mampu menghasilkan sinyal pulsa dengan pengaturan *microstepping* untuk mencapai resolusi gerakan yang lebih tinggi.

Dalam konteks proyek 3D scanner berbasis Arduino, motor stepper memainkan peran vital dalam menggerakkan sensor dan objek secara presisi

sepanjang jalur pemindaian, memungkinkan akuisisi data spasial yang terstruktur dan akurat untuk keperluan rekonstruksi model tiga dimensi.

2.2.3.2 Prinsip Kerja Motor Stepper

Motor stepper bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, di mana energi listrik diubah menjadi gerakan mekanis diskrit. Setiap sinyal pulsa yang dikirimkan ke motor menghasilkan satu langkah gerak pada rotor, dengan besaran langkah tertentu yang disebut *step angle*. Dengan mengatur jumlah pulsa dan urutan penyalanya, *motor stepper* dapat mengontrol posisi dan arah rotasi rotor secara sangat presisi [12].

Secara umum, *motor stepper* memiliki beberapa lilitan (kumparan) yang ditempatkan pada stator, dan rotor berbentuk magnet permanen atau bahan feromagnetik. Ketika arus listrik dialirkan ke kumparan stator, terbentuk medan magnet yang akan menarik atau menolak rotor ke posisi tertentu. Prinsip ini memungkinkan motor bergerak dalam langkah-langkah terpisah (*discrete steps*) alih-alih berputar secara berkelanjutan seperti motor biasa. Pada siklus kerja motor stepper:

a. Aktivasi Elektromagnetik Bertahap

Pulsa listrik dikirim ke kumparan stator secara bergantian mengikuti urutan logika tertentu (*sequential energizing*). Medan magnet yang dihasilkan oleh stator akan menarik rotor untuk sejajar dengan medan tersebut.

b. Rotasi dalam Langkah Tetap

Setiap kali pulsa dikirim ke kumparan berikutnya, rotor berpindah ke posisi baru dengan sudut rotasi tertentu, misalnya $1,8^\circ$, $0,9^\circ$, atau sudut lain tergantung jenis dan konfigurasi motor. Dengan banyaknya jumlah langkah per putaran penuh (misalnya 200 langkah untuk $1,8^\circ$ per langkah), motor dapat memutar dengan sangat presisi.

c. Pengaturan Arah Putaran

Arah rotasi rotor (searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam) dikendalikan dengan membalik urutan pulsa yang dikirim ke kumparan stator.

d. Mode Operasi *Stepper*

Terdapat beberapa mode pengoperasian *motor stepper* yang mempengaruhi karakteristik gerakannya, seperti:

- 1). *Full Step Mode*: satu langkah penuh setiap pulsa.
- 2). *Half Step Mode*: setengah langkah untuk setiap pulsa, meningkatkan resolusi.
- 3). *Microstepping Mode*: mengatur arus lilitan dengan presisi untuk menghasilkan pergerakan yang lebih halus dan akurat.

e. *Holding Torque*

Saat tidak ada pulsa yang dikirim tetapi arus masih mengalir pada stator, *motor stepper* mampu mempertahankan posisi rotor dengan gaya tertentu (*holding torque*). Ini memungkinkan motor tetap mempertahankan posisi mekanis tanpa sistem kontrol umpan balik tambahan. Dalam proyek 3D scanner berbasis Arduino dan sensor ToF, prinsip kerja ini dimanfaatkan untuk mengatur pergerakan presisi sensor sepanjang jalur pemindaian. Arduino mengirimkan sinyal pulsa terprogram ke driver motor stepper untuk mengatur jumlah langkah, kecepatan, dan arah gerak, sehingga setiap titik pengukuran dapat diperoleh secara sistematis dan berurutan. Motor stepper menjadi komponen ideal untuk sistem pemindaian 3D karena:

- 1). Memiliki kontrol posisi terbuka tanpa perlu sensor posisi tambahan.
- 2). Mampu menggerakkan beban dengan kecepatan dan akurasi tinggi.
- 3). Mudah dikendalikan melalui mikrokontroler seperti Arduino.

2.2.3.3 Motor Stepper Nema 17

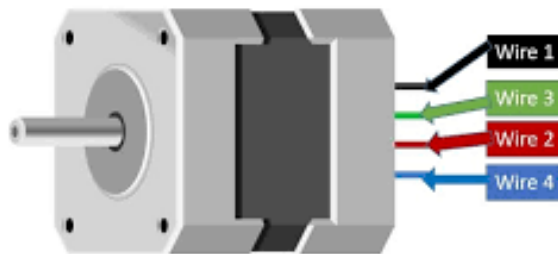
Motor stepper Nema 17 model 17HS4401 adalah jenis motor listrik sinkron yang beroperasi berdasarkan prinsip pembangkitan gerakan rotasi melalui langkah-langkah diskrit (step) yang terkontrol. Motor ini termasuk dalam kategori bipolar stepper motor, yang artinya memiliki dua kumparan penggerak dengan arah arus yang dapat dibalik untuk menghasilkan empat kuadran gerak rotasi. Spesifikasi dan Pinout motor stepper 17HS4401 dapat dilihat pada tabel 2-5, tabel 2-6 dan gambar 2.9.

Tabel 2- 5 Spesifikasi motor stepper 17HS4401 [13]

Kategori	Spesifikasi
Model	17HS4401
Tipe Motor	Stepper Motor Bipolar
Ukuran (NEMA)	NEMA 17 (42 x 42 mm)
Panjang Bodinya	40 mm
Sudut Langkah	1.8° per step (200 langkah per putaran)
Torsi Tahan (Holding Torque)	$\pm 40 \text{ N}\cdot\text{cm}$ (0.4 Nm)
Arus Maksimum per Fase	1.7 A
Tegangan	$\pm 2.8 \text{ V}$
Resistansi Fase	$\pm 1.65 \text{ Ohm}$
Induktansi Fase	$\pm 3.2 \text{ mH}$
Jumlah Fase	2 Fase
Jenis Kabel	4 kabel (untuk driver bipolar, seperti TMC2208/DRV8825)
Berat	$\pm 280 \text{ gram}$
Sumbu (shaft)	Diameter 5 mm, panjang $\pm 24 \text{ mm}$ (tipe D-shaft)

Tabel 2- 6 Motor stepper 17HS4401

Wire (Kabel)	Warna Kabel	Koil / Fase	Label Umum	Pasangan
Wire 1	Hitam (Black)	Koil A	A	Wire 3 (Hijau)
Wire 3	Hijau (Green)	Koil A	C	Wire 1 (Hitam)
Wire 2	Merah (Red)	Koil B	B	Wire 4 (Biru)
Wire 4	Biru (Blue)	Koil B	D	Wire 2 (Merah)



Gambar 2. 9 PinOut Motor stepper 17HS4401

Motor stepper merupakan jenis motor listrik yang bergerak berdasarkan urutan pulsa-pulsa listrik untuk menghasilkan pergerakan bertahap (step). Setiap langkah yang dilakukan motor ini membutuhkan sinyal listrik yang teratur dan bergantian pada masing-masing kumparannya. Karena itu, motor stepper tidak dapat dihubungkan langsung ke mikrokontroler seperti Arduino, mengingat keterbatasan arus dan kemampuan mikrokontroler dalam mengatur urutan sinyal ke kumparan motor. Untuk itu, diperlukan komponen perantara berupa driver motor stepper TMC2208 seperti pada gambar 2.10 . Spesifikasi dan pinout motor driver TMC2208 dapat dilihat pada tabel 2-7 dan tabel 2-8.

Beberapa alasan perlunya digunakan driver motor stepper TMC2208 diantaranya adalah:

1. Mengatur distribusi sinyal ke kumparan motor secara otomatis sesuai urutan langkah yang benar,
2. Memberikan arus yang cukup besar sesuai kebutuhan motor (biasanya lebih dari 1 A),
3. Menyediakan fitur tambahan seperti pengaturan kecepatan, arah, dan mikrostepping (pembagian langkah untuk pergerakan lebih halus),
4. Melindungi motor dan sistem dari kerusakan akibat kelebihan arus atau suhu.

Tabel 2- 7 Spesifikasi Driver Motor Stepper TMC2208 [14]

Parameter	Spesifikasi
Tipe Driver	TMC2208 SilentStepStick
Tegangan Input	4.75V – 36V DC
Arus Maksimum	Hingga 1.4 A RMS (sekitar 2.0 A peak)
Interface	UART, Step/Dir
Mikrostepping	Hingga 1/256 langkah
Mode Operasi	StealthChop (senyap), SpreadCycle (responsif)
Proteksi	Overtemperature, overcurrent, undervoltage
Kompatibilitas	RAMPS 1.4, Arduino, dan berbagai board CNC
Pendingin	Disarankan heatsink untuk arus di atas 1A
Fitur Tambahan	Sensorless homing (dengan firmware/konfigurasi khusus)

Tabel 2- 8 Pinout Driver Motor Stepper TMC2208 [14]

Pin	Fungsi
EN	Enable – Aktif rendah (LOW). Mengaktifkan atau menonaktifkan output driver.
MS1	Microstep setting 1 – Pengaturan mode mikrostepping.
MS2	Microstep setting 2 – Pengaturan mode mikrostepping.
PDN	Serial interface (UART) atau mode konvensional.
UART	Komunikasi UART untuk konfigurasi lanjutan.
CLK	Clock input eksternal (jarang digunakan, biasanya diabaikan).
STEP	Input sinyal langkah (STEP) dari mikrokontroler.
DIR	Arah putaran motor – HIGH/CW dan LOW/CCW.
GND (2x)	Ground – Sambungan ke ground sistem.
VIO	Tegangan logika (biasanya 3.3V atau 5V tergantung mikrokontroler).
M1A	Output ke kumparan motor – A+.
M1B	Output ke kumparan motor – A-.
M2A	Output ke kumparan motor – B+.
M2B	Output ke kumparan motor – B-.
VM	Tegangan input untuk motor (biasanya 12V atau 24V tergantung motor).



Gambar 2.10 Bentuk Fisik dan Simbol Wiring Driver Motor Stepper TMC2208

Dengan adanya driver, mikrokontroler hanya perlu mengirimkan sinyal digital sederhana (seperti step dan direction), sementara driver akan mengatur semua proses penggerakan motor secara efisien dan aman. Tanpa driver, motor tidak akan dapat bekerja dengan baik, bahkan berisiko merusak perangkat.

2.2.4 Sensor Time Of Flight (ToF)

2.2.4.1 Definisi Sensor ToF

Sensor *Time-of-Flight* (ToF) adalah jenis sensor yang digunakan untuk mengukur jarak berdasarkan waktu tempuh gelombang elektromagnetik, seperti cahaya, dari sensor menuju objek dan kembali lagi ke sensor [15]. Sensor ToF dapat dilihat pada gambar 2.11. Prinsip dasar sensor ToF berfokus pada pengukuran waktu tempuh (*time-of-flight*) dari cahaya yang dipancarkan dan dipantulkan oleh objek.



Gambar 2.11 Bentuk Fisik Sensor Jarak VL53L0X Distance Laser Sonar

Sensor ToF bekerja dengan memancarkan pulsa cahaya inframerah atau laser dari sumber cahaya yang terintegrasi pada modul sensor. Cahaya tersebut mengenai permukaan objek, kemudian dipantulkan kembali dan diterima oleh detektor sensor. Berdasarkan waktu yang dibutuhkan oleh cahaya tersebut untuk kembali, jarak antara sensor dan objek dapat dihitung dengan tingkat akurasi tinggi. Rentang pengukuran sensor ini sangat bervariasi, mulai dari beberapa sentimeter hingga puluhan meter, tergantung spesifikasi perangkatnya. Secara umum, keunggulan sensor ToF meliputi:

- a. Akurasi Tinggi: Kemampuan pengukuran dengan ketelitian hingga milimeter, cocok untuk sistem pengukuran presisi tinggi.
- b. Kecepatan Pengukuran Cepat: Kemampuan real-time scanning yang efisien, menjadikannya ideal untuk aplikasi dinamis.
- c. Kemampuan Pemindaian 3D: Dengan sistem mekanik atau motor penggerak, sensor ToF dapat menghasilkan data spasial yang digunakan untuk membentuk model tiga dimensi dari objek.

Dalam proyek 3D scanner berbasis Arduino, sensor ToF berfungsi sebagai alat utama untuk mengukur jarak antara sensor dan objek pada berbagai titik posisi. Data hasil pengukuran ini kemudian digunakan untuk membentuk model 3D dari objek yang dipindai, yang dikendalikan secara terkoordinasi dengan *motor stepper*.

Selain untuk pemindaian 3D, sensor ToF juga banyak digunakan dalam bidang lain seperti robotika, otomasi industri, sistem keamanan, dan kendaraan otonom.

2.2.4.2 Prinsip Kerja ToF

Prinsip kerja sensor *Time-of-Flight* (ToF) didasarkan pada pengukuran waktu yang dibutuhkan cahaya untuk melakukan perjalanan dari sensor ke objek dan kembali ke sensor [16]. Dengan menggunakan rumus dasar:

$$D = \frac{c \times t}{2}$$

Di mana:

- D = jarak antara sensor dan objek,
- c = adalah kecepatan cahaya di udara (sekitar 299.792.458 m/s),
- t = adalah waktu perjalanan bolak-balik cahaya.

Rangkaian proses kerja sensor ToF secara umum adalah sebagai berikut:

- a. Pancaran Pulsa Cahaya

Sensor memancarkan pulsa cahaya, biasanya dalam spektrum inframerah (IR), melalui LED atau laser yang terintegrasi di dalamnya.

- b. Interaksi dengan Objek

Pulsa cahaya mengenai objek dan dipantulkan kembali. Arah dan intensitas pantulan dipengaruhi oleh bentuk dan bahan permukaan objek.

c. Penerimaan Pulsa Kembali

Pantulan cahaya ditangkap oleh elemen detektor dalam sensor, seperti *photodiode* atau *photodetector*.

d. Pengukuran *Time-of-Flight*

Sensor menghitung waktu tempuh pulsa cahaya sejak dipancarkan hingga diterima kembali. Pengukuran dilakukan dengan presisi tinggi dalam skala nanodetik.

e. Perhitungan Jarak

Berdasarkan waktu yang diperoleh dan konstanta kecepatan cahaya, jarak dihitung secara langsung.

f. Pemrosesan dan Pembaruan Data

Sensor melakukan pembaruan data secara cepat dan terus menerus. Dengan menggabungkan data jarak dari berbagai titik, sistem dapat membentuk peta kedalaman (*depth map*) atau model 3D dari objek.

Dalam proyek 3D scanner berbasis Arduino, prinsip ini dimanfaatkan untuk mengukur secara akurat setiap titik pada permukaan objek yang dipindai. Arduino mengatur posisi sensor melalui *motor stepper*, sehingga memungkinkan proses pemindaian dilakukan secara sistematis dan menghasilkan representasi tiga dimensi dari objek dengan detail spasial yang presisi.

2.2.4.3 Sensor Jarak VL53L0X Distance Laser Sonar

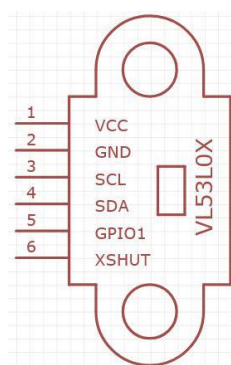
Sensor VL53L0X adalah sensor pengukur jarak berbasis teknologi ToF (Time of Flight) yang dikembangkan oleh STMicroelectronics. Sensor ini mengukur jarak dengan mengirimkan pulsa cahaya laser inframerah dan menghitung waktu yang dibutuhkan cahaya tersebut untuk kembali setelah dipantulkan oleh objek. Mekanisme ini memungkinkan pengukuran jarak yang akurat, cepat, dan tidak tergantung pada pantulan intensitas cahaya, berbeda dengan sensor jarak inframerah konvensional. Spesifikasi teknis, dan Pinout sensor dapat dilihat di gambar 2.12, tabel 2-9 dan tabel 2-10.

Tabel 2- 9 Pinout Sensor VL53L0X [17]

Pin	Nama	Fungsi
1	VCC	Tegangan input untuk sensor (biasanya 3.3V – 5V tergantung modul).
2	GND	Ground (negatif daya), dihubungkan ke GND pada mikrokontroler.
3	SCL	Serial Clock Line - jalur clock untuk komunikasi I2C.
4	SDA	Serial Data Line - jalur data untuk komunikasi I2C.
5	GPIO1	General Purpose Input/Output - dapat digunakan untuk interrupt atau fungsi tambahan (opsional).
6	XSHUT	Pin shutdown - jika di-LOW akan mematikan sensor, jika di-HIGH sensor aktif (bisa digunakan untuk mengatur multiple sensor di satu bus I2C).

Tabel 2- 10 Spesifikasi Teknis VL53L0X [17]

Fitur	Detail
Paket Optik	LGA12
Ukuran	4.4 x 1.4 x 1mm
Tegangan Operasi	2.6 to 3.5 V
Suhu Operasi	-20 to 70°C
Pemancar <i>Infrared</i>	940nm
I2C	Up to 400 kHz (fast mode) serial bus
	Address: 0x52
Field of View	25°
Waktu Pemrosesan Jarak	30ms per pengukuran (dapat dikonfigurasi)



Gambar 2.12 Pinout Sensor VL53L0X

VL53L0X memanfaatkan teknologi SPAD (Single Photon Avalanche Diode) untuk mendeteksi waktu kedatangan foton dengan presisi tinggi. Hal ini

memungkinkan sensor bekerja baik pada pencahayaan rendah maupun tinggi, serta memberikan toleransi terhadap variasi permukaan objek.

Menurut Palossi et al. [18], sensor VL53L0X menawarkan efisiensi energi dan performa stabil, sehingga cocok digunakan dalam sistem tertanam dan perangkat portabel seperti drone, robotika, serta pemindaian 3D berbasis Arduino. Sensor ini memiliki kemampuan untuk bekerja dalam mode *continuous ranging*, yang memungkinkan pembacaan jarak dilakukan secara real-time dalam aplikasi pemetaan dan rekonstruksi spasial.

Dalam konteks pemindaian 3D, VL53L0X berfungsi sebagai komponen pengukur jarak utama. Data jarak (r) yang diperoleh dikombinasikan dengan sudut rotasi (θ) dan elevasi (z) untuk membentuk posisi spasial partikel dalam sistem koordinat kartesian (x, y, z). Akurasi tinggi dan footprint kecil menjadikan sensor ini ideal untuk membangun point cloud yang padat dan presisi dalam sistem 3D scanning skala kecil.

Sensor VL53L0X memiliki *Field of View* sebesar 25° . *Field of View* sendiri merupakan sudut jangkauan area yang dapat dideteksi oleh sensor saat proses pemindaian berlangsung. Dalam pembahasan sensor Time of Flight seperti VL53L0X, *Field of View* menggambarkan seberapa lebar cahaya inframerah yang dipancarkan dan sejauh mana sensor dapat menerima pantulan cahaya dari objek di sekitarnya.

2.2.5 Buck Converter

2.2.5.1 Definisi Buck Converter

Buck Converter adalah salah satu jenis konverter daya DC-DC (direct current to direct current) yang berfungsi untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah secara efisien. Prinsip dasar buck converter adalah mengalihkan (switching) energi dari sumber tegangan tinggi dan menyimpannya sementara pada elemen induktif, lalu melepaskannya ke beban dengan tegangan yang terkontrol.

Konverter ini bekerja berdasarkan prinsip kerja chopper yang menggunakan komponen switching seperti transistor (MOSFET), dioda, induktor, dan kapasitor.

Tegangan outputnya dikontrol dengan rasio siklus kerja (duty cycle) dari sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang diberikan pada komponen switching.

Menurut S. N. Soheli et al. buck converter dapat mencapai efisiensi konversi daya yang sangat tinggi (hingga 95%) dengan desain dan komponen yang tepat, sehingga sangat cocok digunakan dalam sistem embedded, mikrokontroler, robotika, dan sistem tenaga portabel.

2.5.5.2 Cara Kerja Buck Converter

Buck converter bekerja dalam dua mode utama dalam satu siklus switching yaitu Mode ON (Switch tertutup) dan Mode OFF (Switch terbuka). Saat transistor switching aktif (ON), arus mengalir dari sumber melalui induktor ke beban. Induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet dan menyebabkan arus meningkat secara linier. Tegangan output mendekati tegangan input. Ketika transistor OFF, arus dari induktor tetap mengalir ke beban melalui dioda bebas (freewheeling diode). Medan magnet pada induktor menyusut dan melepaskan energi ke beban, menjaga kontinuitas arus dan menurunkan tegangan output. Tegangan output rata-rata (V_{out}) diberikan oleh rumus:

$$V_{out} = D \times V_{in}$$

di mana D adalah duty cycle (rasio waktu ON terhadap total periode switching) dan V_{in} adalah tegangan input. Dengan mengatur nilai duty cycle, sistem dapat menghasilkan tegangan output yang diinginkan.

2.5.5.3 Buck Converter LM2596

Buck Converter LM2596 adalah modul regulator tegangan step-down (penurun tegangan) yang dirancang untuk mengubah tegangan input DC yang lebih tinggi menjadi tegangan output DC yang lebih rendah secara efisien. LM2596 dapat dilihat pada gambar 2.13 Modul ini menggunakan chip LM2596, sebuah regulator switching (bukan linear), yang dikenal karena efisiensi tinggi dan kestabilannya. Spesifikasi dan pinout buck converter LM2596 dapat dilihat pada tabel 2-11 dan 2-12.

Beberapa kelebihan dari buck converter LM2596 adalah :

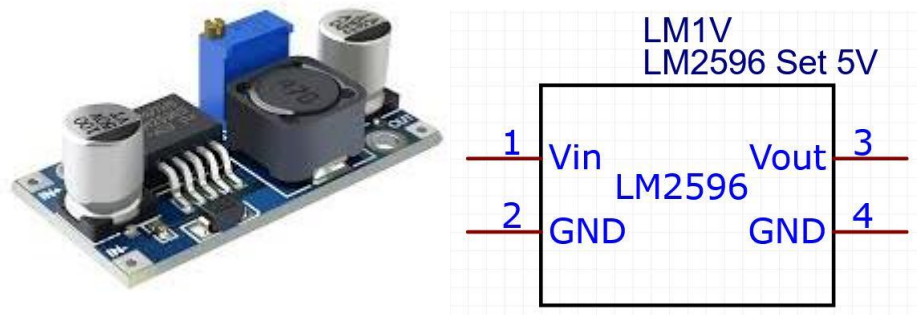
1. Efisiensi tinggi dibandingkan dengan regulator linear (tidak banyak membuang energi dalam bentuk panas).
2. Tegangan output dapat disesuaikan, fleksibel untuk berbagai kebutuhan.
3. Ukuran kecil dan mudah diintegrasikan ke dalam proyek mikrokontroler.

Tabel 2-11 Spesifikasi Buck Converter LM2596 [19]

Parameter	Nilai / Keterangan
Chip Regulator	LM2596
Tegangan Input	4V – 40V DC
Tegangan Output	1.25V – 37V DC (dapat diatur dengan potensiometer biru)
Arus Output Maksimum	2A stabil, hingga 3A (dengan pendingin tambahan)
Efisiensi Konversi	75% – 92% (tergantung tegangan dan arus input/output)
Frekuensi Switching	150 kHz
Proteksi	Overheat dan overcurrent (tergantung versi modul)
Ukuran Modul	Sekitar 45mm x 20mm x 14mm (bisa bervariasi)
Fitur Tambahan	Potensiometer untuk pengaturan tegangan, LED indikator output

Tabel 2-12 Pinout Buck Converter LM2596 [19]

Nama Pin	Warna Label	Fungsi
V-IN	Merah	Tegangan input (4V – 40V DC)
V-OUT	Hijau	Tegangan output (hasil pengaturan tegangan turun/buck)
Ground	Hitam	Ground atau koneksi negatif umum
Feedback	Biru	Umpan balik untuk pengaturan tegangan output melalui pembagi tegangan
ON/OFF	Ungu	Kontrol untuk mengaktifkan/nonaktifkan regulator (logika TTL)



Gambar 2.13 Bentuk Fisik dan Simbol Wiring Buck Converter LM2596

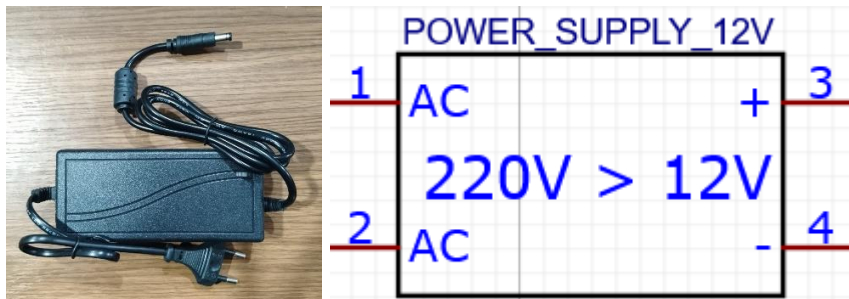


Gambar 2.14 Pinout LM2596

2.2.6 Power Supply

Power supply merupakan bagian penting dalam sistem elektronik yang berfungsi sebagai sumber energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan seluruh komponen dalam suatu rangkaian. Dalam sistem berbasis mikrokontroler seperti Arduino, fungsi power supply sangat vital karena kestabilan dan kecukupan daya listrik akan memengaruhi keandalan serta performa sistem secara keseluruhan. Power supply yang tidak stabil dapat menyebabkan kegagalan sistem, gangguan komunikasi antar-komponen, atau bahkan kerusakan perangkat keras. Oleh karena itu, pemilihan dan perancangan sistem catu daya harus mempertimbangkan

karakteristik tegangan dan arus dari setiap modul yang digunakan. Bentuk fisik dari power supply dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Power Supply dan simbol wiring

Secara umum, power supply dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu linear power supply dan switching power supply (SMPS). Linear power supply bekerja dengan cara menurunkan tegangan menggunakan transformator dan menstabilkan tegangan dengan regulator linear. Meskipun memiliki kelebihan berupa noise yang rendah, jenis ini kurang efisien karena banyak energi listrik yang hilang sebagai panas. Sebaliknya, switching power supply menggunakan prinsip switching frekuensi tinggi untuk mengatur tegangan output dengan efisiensi yang jauh lebih tinggi. Efisiensi inilah yang menjadikan SMPS, termasuk di dalamnya buck converter, lebih umum digunakan dalam sistem tertanam (embedded system), mikrokontroler, dan perangkat elektronik portabel.

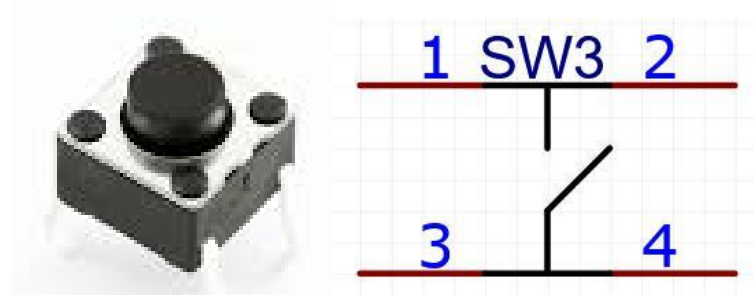
Dalam proyek 3D scanner berbasis Arduino Nano, power supply dirancang untuk mendukung kebutuhan daya dari beberapa komponen, antara lain mikrokontroler, sensor jarak, dan motor stepper. Arduino Nano membutuhkan tegangan 5V dengan arus sekitar 50 mA, sementara sensor VL53L0X dapat beroperasi pada tegangan antara 3.3V hingga 5V dengan konsumsi arus yang relatif kecil sekitar 20 mA. Motor stepper 17HS4401 merupakan komponen dengan kebutuhan daya terbesar dalam sistem ini, biasanya membutuhkan tegangan 12V dan arus hingga 1.5A per fasa tergantung pada konfigurasi driver motor. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan adaptor DC 12V 2A sebagai sumber utama daya eksternal yang kemudian dikondisikan menggunakan modul buck

converter agar tegangan yang masuk ke setiap komponen sesuai spesifikasi yang diperlukan.

Perencanaan sistem power supply juga harus mempertimbangkan margin keamanan dan stabilitas tegangan agar sistem dapat beroperasi tanpa gangguan. Penggunaan komponen seperti kapasitor filter, diode pelindung, dan regulator tegangan tambahan bisa membantu meningkatkan kestabilan sistem.

2.2.7 Push Button

Push button adalah salah satu komponen input paling dasar namun penting dalam sistem elektronik digital. Komponen ini bekerja sebagai saklar mekanis yang menghubungkan atau memutuskan arus listrik saat ditekan. Dalam konteks sistem berbasis mikrokontroler seperti Arduino, push button sering digunakan untuk memberikan sinyal input manual dari pengguna ke sistem, seperti memulai proses, mengatur mode kerja, atau mengaktifkan fungsi tertentu. Meski secara prinsip kerja sangat sederhana, penggunaan push button yang tepat dapat meningkatkan interaktivitas dan kontrol terhadap sistem secara keseluruhan. Gambar push button dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Push Button

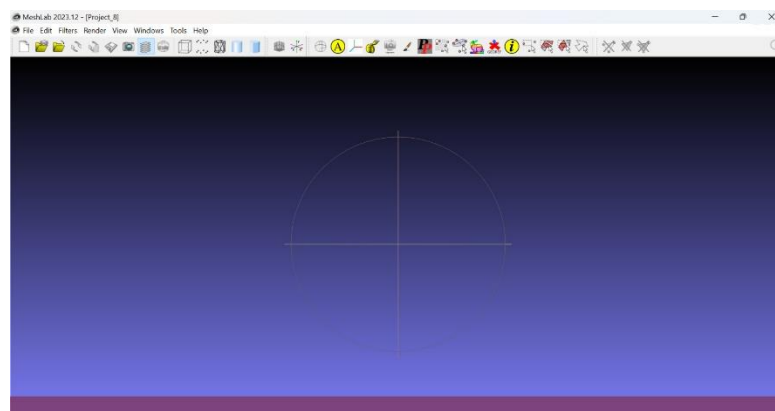
Push button terdiri dari dua terminal atau lebih yang akan terhubung secara elektrik saat tombol ditekan, dan terputus saat dilepas. Dalam rangkaian digital, push button biasanya dihubungkan dengan resistor pull-up atau pull-down untuk menjaga kestabilan logika sinyal pada saat tombol tidak ditekan, sehingga mencegah kondisi floating yang dapat menyebabkan pembacaan sinyal yang tidak stabil oleh mikrokontroler. Ketika push button ditekan, kondisi logika berubah dari

HIGH menjadi LOW (atau sebaliknya tergantung konfigurasi), yang kemudian dideteksi oleh pin input digital pada mikrokontroler.

Dalam proyek 3D scanner berbasis Arduino, push button digunakan untuk memberikan input manual kepada sistem, misalnya untuk memulai proses pemindaian atau mengatur ulang posisi awal motor. Karena sistem ini beroperasi dalam lingkungan real-time, penggunaan push button memungkinkan operator untuk mengontrol perangkat tanpa harus melakukan intervensi melalui komputer atau perangkat lunak tambahan. Dengan demikian, keberadaan push button tidak hanya berfungsi sebagai alat kontrol dasar, tetapi juga menjadi antarmuka penting antara manusia dan mesin.

2.2.8 Software Meshlab

MeshLab adalah perangkat lunak open-source yang dirancang khusus untuk pemrosesan dan pengolahan model 3D berbasis *point cloud* maupun *polygon mesh*. Aplikasi ini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti pemindaian 3D, rekonstruksi permukaan, reverse engineering, serta digitalisasi artefak arkeologi dan budaya. MeshLab dikembangkan oleh Visual Computing Lab—ISTI-CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche)—dan mendukung berbagai format file 3D standar industri seperti .PLY, .STL, .OBJ, dan .XYZ. Fungsionalitasnya yang luas dan fleksibel menjadikan MeshLab sebagai alat yang ideal dalam proses pasca-pemindaian objek tiga dimensi yang diperoleh dari sensor atau sistem seperti 3D scanner berbasis Arduino. Tampilan software meshlab dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Tampilan Software Meshlab

Dalam konteks proyek 3D scanning, MeshLab berperan penting dalam tahap pemrosesan lanjutan, khususnya untuk mengolah data *point cloud* yang dihasilkan oleh sistem. Setelah data posisi partikel (x, y, z) dikumpulkan dan diekspor dari sistem mikrokontroler, MeshLab memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan point cloud tersebut secara interaktif, melakukan penyelarasan (*alignment*), membersihkan data (*filtering*), dan mengubah point cloud menjadi model permukaan melalui proses *surface reconstruction* atau *triangulation*. Dengan demikian, MeshLab berfungsi sebagai jembatan antara data mentah hasil pemindaian dengan model digital 3D yang siap untuk analisis, visualisasi, atau dicetak menggunakan teknologi 3D printing.

Salah satu keunggulan utama MeshLab adalah kemampuannya dalam memproses dataset besar tanpa memerlukan spesifikasi perangkat keras tinggi. Selain itu, software ini menyediakan berbagai alat untuk perbaikan kualitas model, seperti penghilangan noise, *smoothing*, *decimation*, serta *remeshing*, yang sangat membantu untuk menghasilkan representasi objek yang lebih akurat dan efisien.

2.2.9 Printed Circuit Board

Printed Circuit Board (PCB) adalah papan sirkuit cetak yang digunakan untuk menyusun dan menghubungkan komponen-komponen elektronik melalui jalur konduktif berbahan tembaga. PCB memungkinkan perancangan sirkuit yang lebih ringkas, rapi, dan andal dibandingkan dengan metode perakitan kabel manual (*breadboard* atau *wire wrapping*).

PCB berfungsi sebagai kerangka fisik dan sistem koneksi elektronik yang presisi, memungkinkan integrasi sirkuit kompleks ke dalam ruang terbatas dan meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan mekanis dan elektromagnetik.

PCB umumnya dibuat dari bahan isolator seperti FR4 (*fiberglass epoxy resin*), dengan lapisan tembaga tipis di atasnya yang kemudian dilapisi kembali dengan lapisan pelindung seperti solder mask dan silkscreen.



Gambar 2. 18 Bentuk Fisik PCB

Berdasarkan jumlah lapisan konduktif dan kompleksitas desain, PCB diklasifikasikan menjadi:

1. Single Layer PCB: Hanya memiliki satu sisi dengan lapisan tembaga. Cocok untuk rangkaian sederhana.
2. Double Layer PCB: Memiliki dua lapisan tembaga di sisi atas dan bawah. Dapat digunakan untuk sirkuit dengan jalur sinyal lebih padat.
3. Multilayer PCB: Terdiri dari tiga atau lebih lapisan tembaga yang disusun secara bertumpuk. Digunakan dalam perangkat kompleks seperti komputer, router, dan alat komunikasi.

2.2.10 Media Tampilan (LCD I2C)

LCD I2C adalah modul tampilan berbasis Liquid Crystal Display (LCD) yang menggunakan antarmuka I2C (Inter-Integrated Circuit) untuk komunikasi dengan mikrokontroler. Dengan hanya membutuhkan dua pin data, yaitu SDA (data) dan SCL (clock), modul ini memudahkan koneksi dan menghemat pin input/output pada mikrokontroler seperti Arduino. LCD I2C biasanya digunakan untuk menampilkan teks, angka, atau informasi sederhana dalam berbagai proyek elektronik dan otomasi karena efisien, mudah diprogram, dan mendukung berbagai ukuran layar seperti 16x2 atau 20x4 karakter.

Tabel 2- 13 Spesifikasi LCD 16x2 [20]

Item	Dimensi	Satuan
Jumlah Karakter	16 karakter x 2 Baris	-
Dimensi Modul	74,2 x 25,2 x 6,3	mm
Area Tampilan	61,0 x 15,1	mm
Area Aktif	56,2 x 11,5	mm
Ukuran Titik	0,55 x 0,65	mm
Jarak Titik	0,60 x 0,70	mm
Ukuran Karakter	2,95 x 5,55	mm
Jarak Karakter	3,55 x 5,95	mm
Daya	1/16, 1/5 Bias	-
Arah Tampilan	6 o'clock	-
Tipe Pencahayaan Latar	LED	-
IC	ST7032i	-
Antarmuka	I2C	-

LCD 16x2 digunakan sebagai media interaksi pengguna (*user interface*) yang menampilkan status sistem seperti:

- Status sensor (aktif/tidak)
- Proses scanning (berjalan/selesai)
- Posisi motor atau sudut rotasi
- Konfirmasi penyimpanan data

LCD ini menggunakan antarmuka I2C untuk meminimalkan jumlah pin yang digunakan di board Arduino. Modul ini sangat berguna untuk *debugging* dan memberikan umpan balik cepat ke pengguna tanpa perlu terhubung ke komputer. Gambar LCD I2C dan Pinout dapat dilihat pada gambar 2.19 dan tabel 2-14.

Tabel 2-14 Pinout LCD I2C

Pin	Nama	Fungsi
1	GND	Ground – dihubungkan ke GND pada mikrokontroler.
2	VCC	Tegangan input – dihubungkan ke 5V (beberapa modul kompatibel juga dengan 3.3V).
3	SDA	Serial Data Line – jalur data komunikasi I2C, dihubungkan ke pin SDA mikrokontroler.
4	SCL	Serial Clock Line – jalur clock komunikasi I2C, dihubungkan ke pin SCL mikrokontroler.



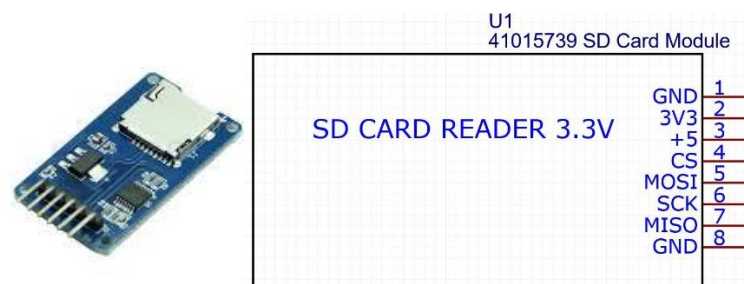
Gambar 2.19 Gambar dan Pinout LCD I2C

2.2.11 Media Penyimpanan (SD Card)

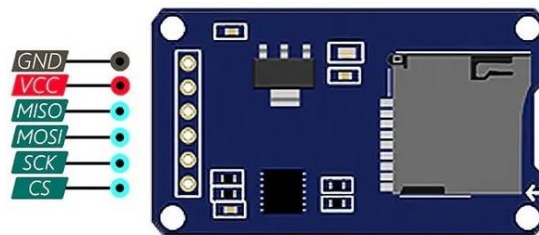
Modul SD card digunakan untuk menyimpan hasil pembacaan dari sensor ToF dalam bentuk data numerik, yang nantinya bisa diproses lebih lanjut untuk membentuk model 3D. Penyimpanan data dilakukan dalam format .txt atau .csv agar mudah diolah menggunakan perangkat lunak seperti Excel, MATLAB, atau Python. SD Card dapat dilihat pada gambar 2.20.

Tabel 2-15 Pinout Modul SD Card

No	Nama Pin	Warna Label
1	GND	Hitam
2	VCC	Merah
3	MISO	Biru Muda
4	MOSI	Hijau
5	SCK	Biru
6	CS	Hijau Tosca



Gambar 2.20 Bentuk Fisik dan Simbol Wiring Modul SD Card



Gambar 2.21 Pinout Modul SD Card

Penggunaan SD card sebagai media penyimpanan memiliki keunggulan, diantaranya:

- a. Kapasitas besar dan mudah dilepas-pasang.
- b. Kompatibel langsung dengan Arduino melalui antarmuka SPI.
- c. Data dapat disimpan secara kontinu selama proses scanning berlangsung.
- d. Cara kerja:
- e. Arduino membaca data jarak dari sensor ToF.
- f. Data dikonversi menjadi format yang sesuai.
- g. Data disimpan baris per baris ke file di SD card menggunakan perintah `SD.open()` dan `file.println()`.

2.2.12 Struktur Mekanik Utama

Struktur mekanik utama pada 3D scanner berbasis Arduino berfungsi sebagai penopang keseluruhan sistem serta sebagai pengarah gerakan dari sensor dan objek yang dipindai. Sistem ini dirancang agar presisi dan stabil, dengan bobot yang ringan namun tetap kokoh. Dalam proyek ini, struktur mekanik utama terdiri dari:

1. Rangka Utama (*Main Frame*)

Rangka utama dibuat menggunakan komponen hasil cetak 3D (3D printed parts) dengan menggunakan material filamen PLA. Material ini dipilih karena ringan, mudah dicetak, dan memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menahan beban komponen seperti sensor, motor, dan modul lain. Desain dari rangka ini dibuat menggunakan perangkat lunak CAD, lalu dicetak sesuai dimensi yang disesuaikan dengan kebutuhan *scanner*.

2. Meja Putar (*Rotating Platform*)

Meja putar digunakan untuk menopang objek yang akan dipindai. Platform ini dipasang pada poros vertikal dan digerakkan oleh *motor stepper* Nema 17 melalui sambungan *shaft coupler* dan *leadscrew*, sehingga bisa berputar 360°. Tujuan dari sistem ini adalah agar sensor dapat menangkap bentuk dari segala sudut objek.

3. Sistem Gerak Sensor (*Sensor Motion System*)

Sensor ToF dipasang pada blok linear motion bearing yang memungkinkan pergerakan naik-turun atau maju-mundur secara presisi. Sistem ini digerakkan oleh motor *stepper* melalui *leadscrew* dan *nut leadscrew*, dengan rel gerak yang dijaga stabil menggunakan batang *shaft rod* dan *bracket holder shaft*.

2.2.12.1 Komponen Mekanik Utama

Komponen mekanik utama merupakan bagian-bagian fisik yang mendukung struktur dan pergerakan dari 3D scanner. Komponen ini terdiri dari hasil cetak 3D, mekanisme penggerak, dan sistem penopang sensor, yang dirancang untuk bekerja secara terkoordinasi dalam melakukan proses pemindaian objek secara presisi. Berikut adalah komponen mekanik utama yang digunakan:

1. *Part 3D Printed (Main Frame Custom)*

Digunakan sebagai rangka utama yang menyatukan seluruh bagian alat. Dicetak menggunakan material PLA dengan desain khusus untuk mendukung posisi motor, sensor, dan komponen lain. Penggunaan cetakan 3D memudahkan modifikasi dan penyesuaian bentuk sesuai kebutuhan.

2. *Motor Stepper 17HS4401*

Digunakan untuk dua fungsi utama: menggerakkan meja putar dan mengatur pergerakan *linear* dari sensor. Motor ini memiliki kontrol gerakan presisi tinggi dan umum digunakan dalam sistem otomasi ringan.

3. *Leadscrew dan Nut Leadscrew*

Leadscrew berfungsi sebagai komponen penggerak linier. Saat motor *stepper* berputar, *leadscrew* mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan translasi melalui nut *leadscrew*, sehingga memungkinkan sensor bergerak secara vertikal atau horizontal.

4. *Linear Motion Block Bearing*

Komponen ini memastikan pergerakan linier sensor berlangsung dengan halus dan minim gesekan. Dipasang pada batang *shaft rod* untuk menjaga kestabilan dan presisi lintasan gerak.

5. Batang *Shaft Rod* dan *Bracket Holder Shaft*

Shaft rod adalah rel tempat *linear block* bergerak. *Bracket holder* digunakan untuk menjaga posisi *shaft* tetap kaku dan lurus, agar sensor tidak goyah saat bergerak.

6. *Shaft Coupler*

Digunakan untuk menghubungkan poros *motor stepper* dengan *leadscrew*. *Shaft coupler* memungkinkan transfer putaran dari motor ke *leadscrew* secara efisien dan stabil.

7. Adaptor 12V 5A

Meskipun bukan bagian mekanik secara langsung, adaptor ini menyuplai daya ke motor dan modul lainnya, sehingga mendukung kinerja sistem mekanik secara keseluruhan.

8. Platform Pemutar (*Rotating Plate*)

Merupakan tempat objek diletakkan. Dirancang agar ringan dan rata, serta langsung terhubung ke poros putar yang digerakkan motor stepper.

2.2.12.2 Prinsip Perancangan Mekanik

Prinsip perancangan mekanik dalam proyek 3D scanner ini mengacu pada pendekatan yang mengedepankan presisi, stabilitas, modularitas, dan efisiensi ruang serta biaya. Tujuan utamanya adalah untuk menghasilkan struktur yang mampu menopang seluruh sistem secara kuat dan akurat, namun tetap mudah dirakit, ringan, dan ekonomis. Beberapa prinsip utama dalam perancangan mekanik ini meliputi:

1. Presisi Gerak

Pemilihan *motor stepper* Nema 17, *leadscrew*, dan *linear bearing* ditujukan agar sistem gerak (baik rotasi objek maupun translasi sensor) memiliki tingkat presisi tinggi. Dengan sistem ini, kesalahan gerak dapat ditekan seminimal mungkin agar hasil pemindaian akurat.

2. Stabilitas dan Kekakuan Struktur

Desain frame cetak 3D dibuat dengan mempertimbangkan kekuatan struktural agar mampu menopang beban sensor dan komponen lain tanpa mengalami deformasi saat proses *scanning*. Titik-titik sambungan antara komponen dirancang agar kaku dan tidak bergeser.

3. Modularitas dan Kustomisasi

Menggunakan komponen hasil 3D *printing* memungkinkan perancangan yang sangat modular dan dapat disesuaikan. Desain CAD bisa dengan mudah diubah untuk mengakomodasi ukuran sensor yang berbeda atau penambahan fitur lain di masa depan.

4. Penggunaan Komponen Standar

Komponen mekanik seperti *leadscrew*, *shaft rod*, *bracket holder*, dan *coupler* dipilih dari komponen yang umum di pasaran agar mudah diperoleh, diganti, dan dikembangkan lebih lanjut.

5. Efisiensi Biaya dan Material

Material PLA dipilih untuk komponen hasil 3D print karena harga yang ekonomis, ketersediaan tinggi, dan mudah diproses. Selain itu, desain part dibuat seefisien mungkin untuk mengurangi waktu dan biaya pencetakan.

6. Kemudahan Perakitan dan Pemeliharaan

Seluruh struktur dirancang agar bisa dirakit dengan alat sederhana, tanpa perlu proses permesinan kompleks. Posisi sensor dan motor juga dibuat mudah diakses untuk mempermudah kalibrasi dan pemeliharaan.

2.2.13 Particle Position

2.2.13.1 Definisi Particle Position

Particle position merujuk pada koordinat spasial suatu partikel atau titik dalam ruang tiga dimensi, umumnya dinyatakan dalam sistem koordinat kartesian (x , y , z). Penentuan posisi partikel merupakan aspek fundamental dalam berbagai aplikasi berbasis pemodelan spasial, seperti 3D *scanning*, simulasi fluida, citra medis, dan pemetaan lingkungan.

Dalam sistem 3D *scanning*, posisi partikel diperoleh dari kombinasi data pengukuran jarak dan sudut, membentuk kumpulan titik (*point cloud*) yang

merepresentasikan permukaan objek. Setiap titik dalam point cloud mencerminkan lokasi hasil pengukuran sensor terhadap permukaan objek.

Zhang et al. menyatakan bahwa “*the position of each particle or data point is crucial for the accuracy of surface reconstruction and subsequent analysis, particularly in systems relying on sparse or noisy measurements*” [18]. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi posisi partikel berperan langsung terhadap kualitas representasi geometri objek digital.

Dalam sistem berbasis sensor ToF (*Time of Flight*) seperti yang digunakan dalam proyek ini, particle position dihitung dari data jarak (r) dan sudut (θ), lalu dikonversi ke dalam koordinat tiga dimensi untuk membentuk representasi digital objek secara presisi.

2.2.13.2 Prinsip Penghitungan Particle Position

Prinsip penghitungan *particle position* dalam konteks 3D *scanning* bertujuan menentukan lokasi spasial dari setiap titik berdasarkan parameter fisik yang diperoleh dari sensor dan sistem gerak. Data utama yang digunakan adalah jarak hasil pengukuran sensor ToF dan sudut rotasi dari *motor stepper*, serta posisi vertikal dari gerakan *leadscrew* (bila digunakan).

Langkah-langkah penghitungan meliputi:

1. Akuisisi Parameter

r : Jarak dari sensor ke permukaan objek.

θ : Sudut rotasi terhadap sumbu referensi, dalam derajat atau radian.

z : Posisi vertikal sensor (atau objek) pada saat pengukuran berlangsung.

2. Transformasi Koordinat

Dengan prinsip geometri ruang, data dikonversi ke sistem koordinat kartesian menggunakan rumus:

$$x = r \cdot \cos(\theta)$$

$$y = r \cdot \sin(\theta)$$

$$z = z$$

Sehingga, setiap partikel dapat ditentukan posisi spasialnya dalam ruang tiga dimensi.

3. Pembentukan *Point Cloud*

Sekumpulan titik (x, y, z) hasil perhitungan direpresentasikan sebagai point cloud, yang secara visual membentuk kontur dan permukaan objek hasil pemindaian.

4. Interpolasi dan Rekonstruksi

Untuk menghasilkan permukaan 3D yang halus dan utuh, dilakukan interpolasi antar-titik atau algoritma *mesh generation* yang menyusun titik-titik menjadi permukaan yang terhubung secara kontinu.

Dengan pendekatan ini, sistem mampu memetakan objek fisik menjadi model digital yang presisi, yang selanjutnya dapat digunakan untuk visualisasi, analisis, atau manufaktur berbasis data 3D.

2.2.14 Kalibrasi Sensor Dan Sistem

Kalibrasi merupakan proses penting dalam sistem pengukuran, termasuk dalam sistem 3D scanner berbasis Arduino dan sensor ToF. Tujuan utamanya adalah memastikan bahwa sensor dan perangkat sistem menghasilkan data yang akurat, reliabel, dan konsisten terhadap kondisi pengukuran nyata. Dalam konteks ini, kalibrasi mencakup pengaturan ulang parameter perangkat keras atau perangkat lunak agar hasil pengukuran sensor sesuai dengan nilai sebenarnya di lapangan.

2.2.14.1 Tujuan dan Metode Kalibrasi

Tujuan utama dari kalibrasi sensor adalah untuk mengurangi atau menghilangkan kesalahan sistematis yang terjadi akibat deviasi antara hasil pengukuran sensor dan nilai sebenarnya. Proses ini penting untuk menjaga keandalan sistem dalam akuisisi data spasial tiga dimensi, khususnya pada sistem berbasis sensor *Time-of-Flight* (ToF) dan motor penggerak seperti *stepper motor*.

Kalibrasi sensor dalam sistem berbasis ToF meliputi koreksi terhadap kesalahan *offset*, *non-linearity*, serta perbedaan waktu respons sensor terhadap objek dengan jarak yang bervariasi [21]. Tanpa proses kalibrasi, sensor dapat memberikan pengukuran yang menyimpang secara konsisten dari nilai aktual. Metode kalibrasi yang umum digunakan dalam sistem ini meliputi:

- a. Kalibrasi Jarak (*Distance Calibration*): Menggunakan target dengan jarak yang diketahui untuk membandingkan hasil pengukuran sensor ToF dengan nilai sebenarnya. Selisihnya digunakan untuk menentukan koreksi sistematis.
- b. Kalibrasi Sudut (*Angular Calibration*): Dilakukan terhadap *motor stepper* dan sumbu rotasi, guna memastikan setiap langkah rotasi benar-benar mewakili derajat sudut yang diharapkan.
- c. Kalibrasi Vertikal/Z-axis: Jika digunakan sistem leadscrew, kalibrasi pada sumbu z diperlukan untuk memverifikasi konsistensi pergerakan linier terhadap rotasi motor.

Proses kalibrasi dilakukan secara manual maupun otomatis. Beberapa sistem mengintegrasikan fungsi kalibrasi berbasis perangkat lunak untuk melakukan koreksi waktu nyata berdasarkan hasil pengukuran berulang.

2.2.14.2 Pengaruh Kalibrasi Terhadap Akurasi Data

Efektivitas kalibrasi berdampak langsung terhadap akurasi data hasil pemindaian. Sensor yang tidak dikalibrasi dengan baik akan menghasilkan data point cloud yang mengalami deviasi posisi, kontur yang menyimpang, dan gangguan pada struktur permukaan objek digital.

Dalam penelitian oleh Stoyanov et al., dijelaskan bahwa bahkan pergeseran kecil akibat kesalahan sudut atau jarak dalam sistem pengukuran dapat menyebabkan deformasi signifikan pada hasil rekonstruksi permukaan 3D. Kalibrasi secara berkala sangat penting terutama untuk sistem pemindaian dengan komponen mekanik seperti *stepper motor*, yang dapat mengalami keausan atau backlash dari waktu ke waktu.

Beberapa pengaruh kalibrasi terhadap akurasi data, antara lain:

- a. Reduksi *Noise* dan *Error* Sistematis: Mengurangi kesalahan tetap yang muncul konsisten dalam setiap pengukuran.
- b. Stabilitas Temporal: Meningkatkan konsistensi hasil pengukuran dari waktu ke waktu.
- c. Kesesuaian Geometri: Menjamin bahwa data point cloud menyusun bentuk yang sesuai dengan geometri asli objek.

Dengan demikian, kalibrasi menjadi elemen kunci untuk menjaga validitas dan presisi sistem 3D *scanner* berbasis Arduino dan sensor ToF, terutama ketika digunakan untuk aplikasi teknis dan rekonstruksi presisi tinggi.