



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Sebelumnya Penelitian mengenai pengaruh *partial shading* terhadap kinerja panel surya telah banyak dilakukan karena kondisi bayangan sebagian merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan performa sistem fotovoltaik. Salah satu penelitian dilakukan oleh (Putri et al., 2024) yang menganalisis pengaruh *partial shading* pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* di PT Bluebird Group menggunakan perangkat lunak PVsyst serta data aktual sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Performance Ratio* (PR) sistem mengalami penurunan dari 82% pada kondisi tanpa *partial shading* menjadi 75% ketika panel mengalami *partial shading*. Selain itu, terjadi penurunan *power output* sebesar 13% pada bulan September, 19% pada Oktober, 22% pada November, dan 12% pada Desember dibandingkan kondisi normal. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa penggunaan *bypass diode* mampu mempertahankan aliran arus dengan melewati kelompok sel yang tertutup bayangan sehingga kehilangan daya pada sistem dapat dikurangi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *partial shading* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem PLTS sehingga perlu dilakukan simulasi kondisi bayangan sebagai bagian dari proses pembelajaran maupun evaluasi kinerja panel surya.

Penelitian lain dilakukan oleh (Afroni dan Wirateruna., 2025) yang membandingkan performa tiga metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), yaitu *Perturb and Observe* (PNO), *Global Maximum Power Point Detection* (GMPPD), dan *Four Section* (4S) pada kondisi *partial shading*. Penelitian dilakukan menggunakan dua modul fotovoltaik polikristalin yang disusun seri dan diuji pada beberapa variasi tingkat bayangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode 4S menghasilkan energi listrik sebesar 4203,08 Wh, sedangkan metode GMPPD menghasilkan 3551,69 Wh, dan metode PNO menghasilkan 3091,60 Wh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode 4S memiliki kemampuan pelacakan titik daya maksimum yang lebih cepat dan lebih akurat dibandingkan metode lainnya pada kondisi *partial shading*. Penelitian ini juga menggunakan model

matematis keluaran sel fotovoltaik berdasarkan rangkaian ekuivalen satu dioda yang dinyatakan pada persamaan 2.1.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

dimana:

- I = Arus keluaran panel surya (A),
- I_{ph} = Arus fotolistrik (Photocurrent) (A)
- V = Tegangan keluaran panel surya (V)
- R_s = Hambatan seri (Series Resistance) (Ω)
- R_{sh} = Hambatan paralel (Shunt Resistance) (Ω)
- n = Faktor idealitas dioda (-)
- V_t = Tegangan termal (Thermal Voltage) (V)
- e = Bilangan eksponensial Euler (≈ 2,71828)

Berdasarkan Persamaan (2.1) tersebut menunjukkan bahwa arus keluaran panel surya dipengaruhi oleh arus fotolistrik (*photocurrent*), arus saturasi dioda, hambatan seri, dan hambatan shunt. Pada kondisi *partial shading*, karakteristik kurva I-V dan P-V mengalami perubahan sehingga muncul beberapa titik daya maksimum (*multiple maximum power points*) yang menyebabkan proses pencarian titik daya maksimum menjadi lebih kompleks.

Selain menggunakan pendekatan analisis karakteristik listrik, penelitian mengenai *partial shading* juga dilakukan oleh (Setiawan et al., 2024) melalui pengembangan sistem deteksi *partial shading* menggunakan metode Digital Image Processing berbasis citra visual dan termal. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi keberadaan *hot spot* pada modul fotovoltaik secara cepat sehingga kerugian daya akibat *partial shading* dapat diketahui lebih awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan mampu mendeteksi *hot spot* dengan tingkat keberhasilan 94,74%, sedangkan proses identifikasi modul fotovoltaik memperoleh tingkat akurasi 100%. Validasi terhadap hasil deteksi menggunakan pengukuran kurva I-V menghasilkan tingkat kesesuaian sebesar 91,26%, sehingga metode tersebut dinilai layak diterapkan sebagai sistem



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

pendukung pemantauan kondisi panel surya secara *real-time*. Selain penelitian mengenai partial *shading*, beberapa penelitian juga telah membahas penggunaan sistem kendali berbasis mikrokontroler dan *Human Machine Interface* (HMI) pada aplikasi panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ESP32 mampu mendukung proses *monitoring* dan pengendalian sistem PLTS secara *real-time* dengan tingkat keandalan yang baik. Selain itu, integrasi HMI pada sistem kendali memungkinkan pengguna melakukan pengaturan parameter dan pemantauan kondisi sistem secara lebih mudah dan interaktif. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada sistem *monitoring* panel surya, solar tracker, maupun analisis pengaruh *shading* terhadap performa panel surya. Penelitian yang mengintegrasikan simulasi partial *shading*, pengaturan arah panel surya, dan pengaturan sudut kemiringan panel dalam satu sistem kontrol sebagai media praktikum pembelajaran PLTS masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem kontrol *smart shading system* berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan motor *stepper*, aktuator linear HARL1834, sensor MPU6050, dan HMI *Nextion* untuk mensimulasikan berbagai kondisi operasional PLTS secara interaktif. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu menjadi media praktikum yang lebih efektif dalam membantu mahasiswa memahami pengaruh *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel terhadap kinerja sistem PLTS secara lebih kontekstual dan mendekati kondisi nyata di lapangan (Lee et al., 2021; Rahman & Kurniawan, 2023).

2.2. Konsep Dasar Energi Surya

Energi surya merupakan energi yang berasal dari radiasi elektromagnetik matahari akibat reaksi fusi nuklir hidrogen menjadi helium di inti matahari. Energi ini dipancarkan dalam bentuk spektrum radiasi yang mencakup *ultraviolet*, cahaya tampak, dan inframerah. Ketika radiasi tersebut mencapai permukaan bumi, sebagian diserap atmosfer, sebagian dipantulkan, dan sebagian diterima sebagai radiasi global.

Dalam sistem fotovoltaik, parameter utama yang digunakan untuk menyatakan besarnya energi radiasi matahari adalah *irradiance* (G), yang memiliki satuan *watt* per meter persegi (W/m^2). *Irradiance* menyatakan daya radiasi yang diterima oleh satuan luas permukaan pada waktu tertentu.

Secara matematis, daya radiasi total yang diterima oleh panel surya dapat dinyatakan dengan persamaan 2.2 berikut :

$$\text{Prad} = G \times A \quad (2.2)$$

Dimana :

Prad = Daya radiasi yang diterima panel (Watt)

G = Irradiance (W/m^2)

A = Luas permukaan panel (m^2)

Spektrum radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi sebagian besar berada pada rentang panjang gelombang 300–2500 nm.

2.3. Fotovoltaik (*Photovoltaic Cell*)

Sel fotovoltaik merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Proses konversi ini terjadi ketika foton dari radiasi matahari mengenai material semikonduktor dan menghasilkan pasangan *elektron hole* yang dipisahkan oleh medan listrik internal pada sambungan p–n sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). Implementasi dan analisis performa sistem fotovoltaik telah banyak diteliti di lingkungan akademik, termasuk pada instalasi PLTS laboratorium di Politeknik Negeri Jakarta yang menunjukkan bahwa parameter radiasi dan suhu sangat mempengaruhi keluaran daya panel surya. Hidayat et al. (2024).

Dalam Sel surya umumnya terbuat dari material semikonduktor seperti silikon yang memiliki struktur kristalin. Ketika foton dengan energi lebih besar dari *band gap* material mengenai permukaan sel, elektron akan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, sementara *hole* tertinggal di pita valensi, membentuk medan listrik internal pada *junction* p–n yang mendorong terpisahnya muatan tersebut sehingga menghasilkan tegangan listrik. Secara matematis, daya listrik yang dihasilkan sel fotovoltaik dapat dinyatakan sebagai:

2.4. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi utama melalui proses konversi energi fotovoltaik. Sistem ini bekerja berdasarkan prinsip efek fotolistrik, yaitu proses perubahan energi cahaya menjadi energi listrik ketika foton mengenai material semikonduktor pada sel surya.

Secara geografis, Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena berada di wilayah khatulistiwa dengan intensitas radiasi matahari yang relatif stabil sepanjang tahun. Potensi energi surya nasional diperkirakan mencapai 207 GW, sehingga pengembangan PLTS sangat prospektif sebagai solusi transisi energi dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Muchlishah et al. (2024)

Konfigurasi sistem PLTS secara umum terdiri atas:

1. Modul panel surya
2. *Solar charge controller*
3. Baterai (pada sistem *Off-Grid*)
4. *Inverter* (jika dibutuhkan keluaran AC)
5. Beban

Berdasarkan konfigurasi sistemnya, PLTS dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu :

1. PLTS *On-Grid*

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung secara langsung dengan jaringan listrik PLN tanpa menggunakan baterai sebagai media penyimpanan energi. Energi listrik yang dihasilkan panel surya berupa arus searah (Direct Current/DC) dikonversi menjadi arus bolak-balik (Alternating Current/AC) menggunakan grid-tie inverter sehingga dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan beban



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

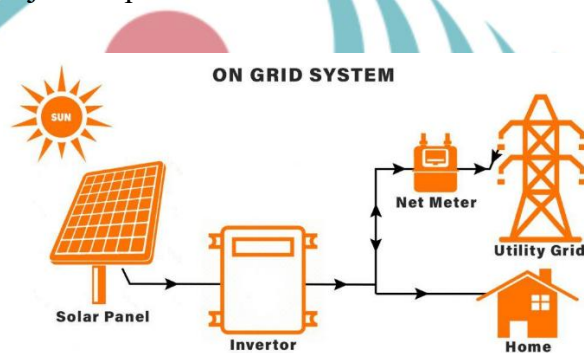
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

maupun disalurkan ke jaringan listrik. Pada saat daya yang dihasilkan panel surya lebih besar dibandingkan kebutuhan beban, kelebihan energi akan diekspor ke jaringan PLN melalui net meter. Sebaliknya, apabila daya yang dihasilkan panel surya tidak mencukupi, maka kebutuhan energi listrik akan dipenuhi oleh jaringan PLN secara otomatis. Sistem ini banyak diterapkan pada sektor rumah tangga, perkantoran, maupun industri karena memiliki efisiensi yang tinggi, biaya investasi yang relatif lebih rendah, serta tidak memerlukan sistem penyimpanan energi berupa baterai. Konfigurasi dasar sistem PLTS On-Grid beserta hubungan antar komponennya ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 PLTS on grid

(Sumber: www.solareze.com)

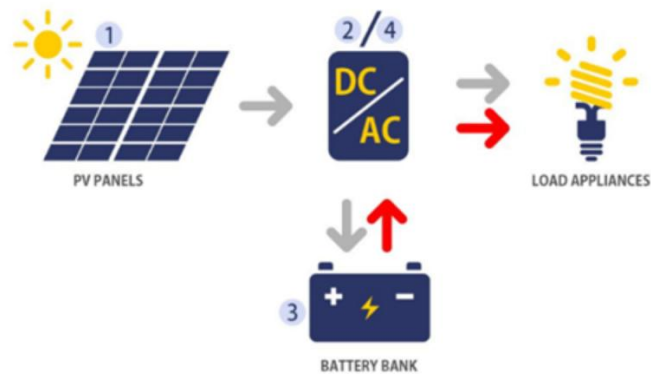
2. PLTS Off-Grid

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara mandiri (*stand-alone system*) tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Pada sistem ini, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya disimpan terlebih dahulu ke dalam baterai melalui Solar Charge Controller (SCC) sebelum digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban. Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi sehingga pasokan listrik tetap tersedia ketika intensitas penyinaran matahari rendah atau pada malam hari. Oleh karena itu, sistem PLTS *Off-Grid* banyak diterapkan pada daerah terpencil, pulau-pulau kecil, maupun lokasi yang belum memiliki akses terhadap jaringan distribusi listrik. Ilustrasi konfigurasi sistem PLTS *Off-Grid* ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SISTEM PLTS OFF GRID



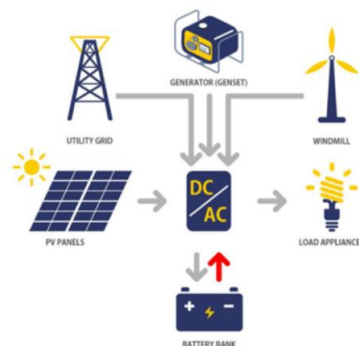
Gambar 2. 2 PLTS off grid

(Sumber: www.solareze.com)

3. PLTS Hybrid

Sistem yang menggabungkan PLTS dengan sumber energi lain seperti genset atau jaringan PLN. Pada penelitian *smart shading system* yang dikembangkan, sistem yang digunakan adalah tipe *off-grid* untuk memudahkan pengujian performa dan monitoring parameter. Cara kerja sistem PLTS *Hybrid* secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.3.

SISTEM PLTS HYBRID



Gambar 2. 3 PLTS Hybrid

(Sumber: www.solareze.com)

2.4.1. Definisi dan Jenis *Shading*

Shading atau bayangan parsial pada panel surya dapat menyebabkan penurunan daya secara signifikan karena konfigurasi seri pada sel dalam modul menyebabkan arus sistem mengikuti nilai arus terendah. Penelitian optimasi susunan array panel menunjukkan bahwa jarak dan konfigurasi pemasangan sangat berpengaruh dalam meminimalkan *mutual shading* antar panel sehingga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan Nadhiroh et al. (2024)

Secara prinsip, panel surya bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Ketika permukaan panel menerima radiasi matahari secara merata, setiap sel surya akan menghasilkan arus listrik yang relatif seragam. Namun, apabila terjadi *shading*, distribusi cahaya menjadi tidak merata sehingga sebagian sel menghasilkan arus lebih kecil dibandingkan sel lainnya.

dalam penelitian yang dipublikasikan pada *Vocational Education National Seminar* (VENS), Intensitas cahaya secara langsung memengaruhi nilai arus dan tegangan keluaran panel surya tipe *polycrystalline*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa semakin besar area permukaan yang tertutup bayangan, maka semakin besar pula penurunan arus dan tegangan yang dihasilkan. Triani et al (2023).

Secara umum dapat diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yaitu :

1. Statis, yaitu kondisi dimana bayangan tetap yang berasal dari bangunan atau struktur permanen.
2. Dinamis, yaitu kondisi saat bayangan yang berubah posisi akibat pergerakan matahari, awan, atau objek bergerak.
3. Parsial, yaitu kondisi saat sebagian kecil permukaan modul yang tertutup bayangan.
4. Total, yaitu kondisi ketika seluruh permukaan modul tertutup bayangan.

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), kondisi menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan performa sistem secara signifikan.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.4.2. Pengaruh Terhadap Performa Panel Surya

Fenomena *shading* yang terjadi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya dapat berdampak pada panel surya. Berikut adalah pengaruh fenomena shading terhadap performa panel surya :

1. Terjadi penurunan arus, tegangan dan daya keluaran.
2. Penurunan efisiensi system

Ketika terjadi penurunan arus, tegangan dan daya keluaran, intensitas cahaya yang diterima sel akan mengalami penurunan sehingga arus (I) yang dihasilkan ikut menurun. Penurunan arus ini kemudian berdampak langsung pada penurunan daya (P). Secara teoritis, daya keluaran panel surya dapat dirumuskan pada persamaan 2.3 sebagai berikut :

$$P = V \times I \quad (2.3)$$

Dimana :

P = Daya (Watt),

V = Tegangan (Volt),

I = arus (Ampere).

Ketika terjadi penurunan arus, tegangan dan daya keluaran, intensitas cahaya yang diterima sel menurun sehingga arus (I) yang dihasilkan ikut menurun. Penurunan arus ini kemudian berdampak langsung pada penurunan daya (P).

2.5. Smart Shading System

Smart shading system merupakan sistem yang dirancang untuk menghasilkan variasi kondisi pengujian panel surya secara otomatis dan terkontrol. Sistem ini memungkinkan pengguna mengatur tingkat *shading* sesuai kebutuhan praktikum tanpa melakukan pengaturan secara manual. Dengan adanya sistem otomatis, setiap skenario pengujian dapat dilakukan secara berulang dengan kondisi yang relatif sama sehingga hasil pengamatan menjadi lebih konsisten dan mudah dianalisis.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Penerapan *smart shading system* pada bidang pendidikan memberikan kemudahan dalam proses pembelajaran karakteristik panel surya. Melalui sistem ini, pengguna dapat melakukan simulasi berbagai kondisi operasional yang umumnya terjadi pada instalasi PLTS di lapangan. Selain meningkatkan efisiensi pelaksanaan praktikum, penggunaan sistem otomatis juga membantu mahasiswa memahami hubungan antara kondisi pengujian dan perubahan parameter keluaran panel surya secara lebih sistematis (Alensyah et al., 2024)

Pada penelitian ini, *smart shading system* dikembangkan menggunakan ESP32-S3 sebagai pengendali utama yang terintegrasi dengan motor stepper, aktuator linear HARL1834, sensor MPU6050, dan HMI Nextion. Sistem mampu mengatur tingkat *shading*, arah panel surya, serta sudut kemiringan panel melalui antarmuka HMI sehingga pengguna dapat melakukan pengujian dengan lebih mudah dan interaktif. Dengan kemampuan tersebut, sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi media praktikum yang mendukung pembelajaran PLTS secara lebih efektif dan mendekati kondisi nyata di lapangan.

2.6. Mikrokontroler ESP32-S3



Gambar 2. 4 Mikrokontroler ESP32-S3

(Sumber: www.theengineeringprojects.com)

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *system-on-chip* (SoC) yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang untuk aplikasi otomasi serta *Internet of Things* (IoT). Berdasarkan datasheet resmi, ESP32 dilengkapi *prosesor dual-core Xtensa LX6* dengan frekuensi hingga 240 MHz, modul Wi-Fi dan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Bluetooth terintegrasi, serta berbagai periferal seperti ADC, PWM, SPI, I2C, dan UART, yang memungkinkan perangkat ini melakukan akuisisi data dan pengendalian aktuator secara real-time. ESP32 mendukung pembacaan variabel proses melalui antarmuka ADC, sehingga parameter seperti suhu dan pH dapat diakuisisi secara akurat. adapun *pin out* mikrokontroler ESP32-S3 dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Selain itu, kemampuan menghasilkan sinyal keluaran melalui PWM dan GPIO memungkinkan ESP32 mengendalikan berbagai perangkat eksekusi, termasuk *Solid State Relay* (SSR) untuk pengaturan pemanas, motor agitator, pompa *transfer*, dan pompa peristaltik. Kombinasi kapabilitas pembacaan sensor dan pengendalian aktuator tersebut menjadikan ESP32 banyak diterapkan pada sistem kontrol proses bertahap, dimana beberapa perangkat perlu dioperasikan secara terkoordinasi. Dengan dukungan arsitektur pemrosesan yang responsif, ESP32 mampu mempertahankan parameter proses pada kondisi yang stabil melalui pengaturan pemanasan, pencampuran, dan aliran fluida sesuai kebutuhan operasi, Berikut spesifikasi ESP32-S3 yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Teknis ESP32-S3

SPESIFIKASI ESP32-S3	
Prosesor	<i>Dual core</i> 32-bit Xtensa LX7 (hingga 240 MHz).
Memori	512 KB SRAM <i>internal</i> , 384 KB ROM, mendukung RAM <i>eksternal</i> (PSRAM) hingga 8MB.
Penyimpanan	Mendukung <i>Flash eksternal</i> (biasanya 8MB atau 16MB).
Konektivitas	Wi-Fi 2.4 GHz (802.11 b/g/n) dan <i>Bluetooth</i> 5.0 (LE) dengan dukungan <i>long range</i> . Wi-Fi 2.4 GHz (802.11 b/g/n) dan <i>Bluetooth</i> 5.0 (LE) dengan dukungan <i>long range</i> .

GPIO & Periferal	45+ pin GPIO yang dapat diprogram, mendukung antarmuka kaya: UART, I2C, I2S, SPI, PWM, ADC, dan USB Serial/JTAG.
------------------	--

2.7. Motor Stepper NEMA23 (57BYG250)

Motor *stepper* NEMA23 (57BYG250) merupakan motor *stepper* tipe hybrid yang bekerja dengan mengubah pulsa listrik menjadi gerakan sudut tertentu secara bertahap (*step-by-step*). Motor ini memiliki sudut langkah sebesar $1,8^\circ$ per langkah atau setara dengan 200 langkah dalam satu putaran penuh. Keunggulan motor *stepper* terletak pada kemampuannya menghasilkan posisi dan pergerakan yang presisi tanpa memerlukan sistem umpan balik tambahan sehingga banyak digunakan pada aplikasi otomasi, CNC, dan sistem kendali posisi.



Gambar 2. 5 Motor Stepper NEMA23
(Sumber: www.infineon.com)

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan motor *stepper* NEMA23 (57BYG250) yang digunakan pada penelitian ini sebagai aktuator penggerak sistem *smart shading*. Motor *stepper* ini memiliki sudut langkah sebesar $1,8^\circ$ per langkah sehingga mampu menghasilkan pergerakan posisi yang presisi. Pada penelitian ini, motor digunakan untuk menggerakkan mekanisme *shading* dan mengatur arah panel surya sesuai *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*.

2.8. Driver Motor Stepper TB6600

TB6600 merupakan *driver* motor *stepper* yang digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* berdasarkan sinyal kendali dari mikrokontroler.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Driver ini berfungsi mengatur arah putaran dan jumlah langkah motor melalui sinyal PUL (*Pulse*), DIR (*Direction*), dan EN (*Enable*). Selain itu, TB6600 mampu menyediakan arus yang lebih besar sehingga motor *stepper* dapat bekerja dengan stabil dan presisi (Toshiba, 2021).



Gambar 2. 6 Driver TB6600

(Sumber: www.infineon.com)

Pada Gambar 2.6 ditunjukkan *driver* motor *stepper* TB6600 yang digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* NEMA23 pada sistem *smart shading*. *Driver* ini menerima sinyal kendali dari ESP32-S3 berupa PUL (*Pulse*), DIR (*Direction*), dan EN (*Enable*) untuk mengatur arah putaran serta jumlah langkah motor. Dengan adanya *driver* TB6600, motor *stepper* dapat bekerja dengan lebih stabil dan presisi sesuai *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*.

2.9. Aktuator Linear HARL1834

Aktuator linear merupakan perangkat elektromekanik yang berfungsi mengubah gerakan putar motor menjadi gerakan lurus (*linear motion*). Perangkat ini banyak digunakan pada sistem otomasi yang membutuhkan perpindahan posisi secara terkontrol. Pergerakan aktuator diperoleh melalui mekanisme ulir yang mengubah putaran motor menjadi gerakan maju dan mundur (*extend* dan *retract*)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

(Progressive Automations, 2023). Bentuk fisik aktuator linear yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Aktuator Linear HRL

Sumber : (<https://sl.bing.net/ioppyUUY8a>)

Aktuator linear HARL1834 digunakan untuk mengatur sudut kemiringan panel surya pada *smart shading system*. Perubahan panjang aktuator menghasilkan perubahan posisi panel sehingga sudut kemiringan dapat disesuaikan dengan *setpoint* yang dipilih melalui HMI *Nextion*.

2.10. Driver Motor BTS7960

BTS7960 merupakan modul *driver* motor DC yang digunakan untuk mengendalikan arah dan kecepatan motor menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*). *Driver* ini memiliki kemampuan menangani arus yang relatif besar sehingga sesuai digunakan pada aplikasi aktuator dan motor DC berdaya menengah hingga tinggi (Infineon Technologies, 2022).

Pada sistem *smart shading*, BTS7960 berfungsi sebagai penghubung antara ESP32-S3 dan aktuator linear HARL1834. *Driver* menerima sinyal kendali dari

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

mikrokontroler untuk mengatur pergerakan maju dan mundur aktuator sehingga sudut kemiringan panel dapat berubah sesuai perintah pengguna.



Gambar 2. 8 IC Driver BTS7960

Sumber : (<https://sl.bing.net/iihHYdOBRLw>)

Pada Gambar 2.8 ditunjukkan *driver* motor BTS7960 yang digunakan untuk mengendalikan aktuator linear pada sistem *smart shading*. *Driver* ini menerima sinyal kendali dari ESP32-S3 dan mengatur arah gerak aktuator sesuai kebutuhan sistem.

2.11. Sensor MPU6050

MPU-6050 merupakan *sensor Inertial Measurement Unit (IMU)* yang mengintegrasikan *accelerometer* 3 sumbu dan *gyroscope* 3 sumbu dalam satu *chip*. *Accelerometer* bekerja berdasarkan prinsip perubahan kapasitansi akibat percepatan mekanik pada struktur mikro (MEMS) *Micro Electro Mechanical System*. Ketika sensor mengalami kemiringan atau percepatan, struktur internal akan berubah posisi sehingga menghasilkan sinyal listrik yang merepresentasikan percepatan tersebut.

Gyroscope bekerja dengan mendeteksi perubahan sudut rotasi menggunakan prinsip getaran mikrostruktur internal. Sensor ini mengukur kecepatan sudut dalam satuan derajat per detik ($^{\circ}/s$), sehingga dapat digunakan untuk mengetahui orientasi dan perubahan arah gerak suatu sistem. Sensor MPU-6050 sendiri mempunyai fungsi sebagai berikut :

1. Mendeteksi sudut kemiringan panel surya.
2. Mengukur perubahan orientasi akibat pergerakan mekanik.
3. Memberikan data umpan balik pada sistem kontrol.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4. Mampu meningkatkan akurasi sistem monitoring posisi *shading*.

MPU-6050 bekerja dengan cara *accelerometer* akan mengukur percepatan linear pada tiga sumbu (X,Y,Z) berupa perubahan kecepatan relatif terhadap gravitasi, dan *gyroscope* akan mengukur kecepatan rotasi (derajat per detik) pada ketiga sumbu yang sama, setelahnya data dari kedua sensor akan dibaca melalui I2C oleh mikrokontroler yang dimana nilai tersebut dapat diproses untuk menghitung orientasi perangkat atau untuk kontrol stabilisasi dalam sistem kendali. Berikut merupakan spesifikasi teknis untuk sensor MPU-6050. Rincian spesifikasi teknis sensor MPU-6050 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Sensor MPU-6050

SPESIFIKASI SENSOR MPU-6050	
Jenis Sensor	3-axis accelerometer + 3-axis gyroscope (6 DOF)
Chipset	InvenSense MPU-6050
Tegangan Operasi	3.3 V – 5 V (modul dilengkapi regulator)
Komunikasi	I ² C (SDA, SCL)
Range Gyroscope	±250, ±500, ±1000, ±2000 °/s
Range Accelerometer	±2, ±4, ±8, ±16 g
ADC Resolution	16-bit per sumbu
Data Output	Digital (Melalui I2C)
Pin Interface	VCC, GND, SDA, SCL, INT (interupsi)
Dimensi Modul	Sekitar 20 × 15 mm (tergantung modul)
Fitur Tambahan	Dibuat dengan <i>Digital Motion Processor</i> (DMP) pada beberapa varian

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 2. 9 Sensor MPU6050

Sumber : (<https://github.com/ElectronicCats/mpu6050>)

Pada Gambar 2.9 ditunjukkan modul sensor MPU6050 yang digunakan untuk mengukur sudut kemiringan panel surya. Sensor ini menggabungkan *accelerometer* dan *gyroscope* sehingga mampu memberikan informasi orientasi secara *real time*.

2.12. Human Machine Interface (HMI) Nextion



Gambar 2. 10 Human Machine Interface

Sumber : (<https://sl.bing.net/cOblBumGyaG>)

Human Machine Interface (HMI) adalah sebuah perangkat antarmuka yang memungkinkan interaksi antara manusia dan sistem kendali secara visual maupun operasional. Pada penelitian ini digunakan *HMI Nextion 7 inch* berbasis TFT LCD dan memiliki prosesor internal serta komunikasi serial UART dengan mikrokontroler. Ilustrasi *HMI Nextion* beserta tampilan perangkat yang digunakan pada penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 2.10.

Pada sistem PLTS eksperimental seperti yang dikembangkan di Politeknik Negeri Jakarta, proses pengambilan data dilakukan secara berkala untuk



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menganalisis pengaruh variasi sudut dan jarak terhadap efisiensi (Muchlishah et al, 2023). Pada penelitian tersebut, pencatatan data masih bersifat pengujian eksperimental. Berbeda dengan pendekatan tersebut, pada sistem *smart shading*, HMI digunakan untuk:

1. Menampilkan parameter *real time*:
 - a. Intensitas cahaya (Lux)
 - b. Suhu permukaan panel (°C)
 - c. Tegangan dan arus DC
 - d. Daya keluaran (W)
 - e. Energi (Wh)
2. Menampilkan status aktuator:
 - a. Sudut kemiringan panel
 - b. Status aktuator hidrolik
3. Memberikan kontrol manual terhadap:
 - a. Pengaturan sudut panel
 - b. Aktivasi aktuator
 - c. Reset sistem

Penggunaan HMI meningkatkan kemudahan *monitoring*, meminimalkan kesalahan pembacaan manual, serta memungkinkan analisis performa secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan seperti laptop. Berikut spesifikasi teknis dari *Human Machine Interface* (HMI) yang dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Spesifikasi teknis HMI

SPESIFIKASI HUMAN MACHINE INTERFACE	
Tipe	<i>Nextion 7" Intelligent Series NX8048P070 7 Inch 65K Color Touchscreen - Resitive Touch</i>
Tegangan operasi	5V (4.75-6.5v limit)
Arus Operasi	430mA (on 5v with 100% brighnest)
Port Tambahan	8 Digital extended GPIO
Frekuensi	45~65Hz
Resolusi	800480 pixel

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.13. Sistem Kontrol *Smart Shading* Berbasis ESP32

Sistem kontrol *smart shading system* yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan sistem kontrol *loop* tertutup (*closed-loop control system*) berbasis mikrokontroler ESP32-S3. Dalam paradigma kontrol *loop* tertutup, keluaran sistem diukur secara kontinu dan dibandingkan dengan nilai *setpoint* yang diinginkan, kemudian selisihnya (*error*) digunakan sebagai masukan bagi algoritma kontrol untuk menghasilkan sinyal koreksi yang sesuai (Ogata, 2017).

Arsitektur sistem kontrol ini terdiri atas tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah lapisan persepsi, di mana sensor MPU6050 mengukur posisi aktual *angle* dan sensor tegangan/arus mengukur performa keluaran panel surya secara *real time*. Lapisan kedua adalah lapisan pemrosesan, di mana ESP32-S3 menerima data dari sensor, menjalankan algoritma kontrol, dan menghasilkan sinyal kendali untuk aktuator. Lapisan ketiga adalah lapisan aktuasi, di mana *driver* menerima sinyal kendali dan mengalirkan arus yang sesuai ke motor *stepper* NEMA23 dan aktuator linear HARL1834 ke posisi yang diinginkan.

Interaksi pengguna dengan sistem dilakukan melalui HMI *Nextion* yang memungkinkan pengaturan skenario *shading*, pemantauan data *real time*, serta penyimpanan dan penampilan data eksperimen. Keseluruhan integrasi subsistem ini menjadikan *smart shading system* sebagai platform pembelajaran PLTS yang komprehensif, interaktif, dan mampu merepresentasikan kondisi operasional nyata secara terkontrol dan terukur.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III

PERENCANAAN DAN REALISASI ALAT

3.1. Rancangan Alat

Penelitian dimulai dengan tahap perancangan *smart shading system* yang digunakan sebagai media praktikum pembelajaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Tahap perancangan dilakukan untuk menghasilkan sistem yang mampu mengatur tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel secara otomatis melalui *Human Machine Interface* (HMI). Sistem dirancang agar pengguna dapat melakukan berbagai skenario praktikum secara lebih mudah, terukur, dan berulang sehingga mendukung proses pembelajaran yang lebih interaktif.

Pengendali utama yang digunakan pada sistem adalah ESP32-S3 yang terintegrasi dengan HMI *Nextion*, motor *stepper* NEMA23, aktuator linear HARL1834, *driver* TB6600, *driver* BTS7960, dan sensor MPU6050. HMI digunakan sebagai media interaksi pengguna untuk menentukan parameter yang diinginkan, sedangkan ESP32-S3 berfungsi mengolah perintah dan mengendalikan aktuator yang digunakan pada sistem. Integrasi seluruh komponen tersebut memungkinkan proses pengaturan posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel dilakukan secara otomatis sesuai *setpoint* yang diberikan.

Parameter yang dapat diatur pada sistem meliputi tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel. Pengaturan tingkat *shading* dilakukan menggunakan motor *stepper* yang menggerakkan mekanisme peneduh panel surya. Pengaturan arah panel dilakukan menggunakan motor *stepper* kedua yang berfungsi mengubah orientasi panel surya, sedangkan pengaturan sudut kemiringan dilakukan menggunakan aktuator linear. Untuk mengetahui posisi kemiringan panel secara aktual, sistem dilengkapi dengan sensor MPU6050 yang berfungsi membaca sudut panel secara *real time*.

Selain perancangan sistem kontrol, dilakukan pula perancangan mekanik untuk memastikan seluruh komponen dapat terpasang dan bekerja dengan baik. Perancangan mekanik meliputi penentuan dimensi rangka, posisi pemasangan panel surya, mekanisme *shading*, kedudukan motor *stepper*, aktuator linear, serta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

penempatan komponen elektronik. Seluruh perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan kemudahan pengoperasian, keamanan sistem, dan kemudahan perawatan sehingga alat dapat digunakan secara optimal sebagai media praktikum pembelajaran PLTS.

3.1.1. Deskripsi Alat

Smart shading system untuk Praktikum Pembelajaran PLTS merupakan pengembangan dari alat trainer panel surya yang digunakan sebagai media pembelajaran bagi mahasiswa di laboratorium listrik. Alat ini dirancang untuk membantu mahasiswa memahami pengaruh kondisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel terhadap performa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) melalui kegiatan praktikum yang lebih interaktif dan terstruktur.

Pengembangan yang dilakukan pada alat ini difokuskan pada penerapan sistem kontrol berbasis mikrokontroler yang terintegrasi dengan *Human Machine Interface* (HMI). Sistem *smart shading* dirancang untuk mengatur tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel secara otomatis sesuai dengan parameter yang dipilih oleh pengguna melalui HMI. Pengaturan tersebut dilakukan menggunakan motor *stepper* sebagai penggerak mekanisme *shading* dan arah panel, serta aktuator linear untuk mengatur sudut kemiringan panel surya.

Seluruh proses pengendalian dilakukan oleh ESP32-S3 sebagai pusat kendali sistem. Perintah yang diberikan melalui HMI akan diproses oleh mikrokontroler untuk mengendalikan aktuator sesuai *setpoint* yang dipilih. Dengan adanya sistem ini, pengguna dapat melakukan berbagai skenario praktikum secara lebih mudah, terukur, dan berulang sehingga proses pembelajaran mengenai karakteristik panel surya dan pengaruh kondisi operasi terhadap kinerjanya dapat dilakukan secara lebih efektif.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.1.2. Cara Kerja Alat

Smart shading system diawali dengan proses inisialisasi seluruh perangkat yang terdiri dari ESP32-S3, HMI *Nextion*, *driver* motor, aktuator linear, dan sensor MPU6050. Setelah proses inisialisasi selesai, pengguna mengarahkan panel surya ke posisi awal yang telah ditentukan, yaitu menghadap ke arah utara sebagai titik referensi sistem.

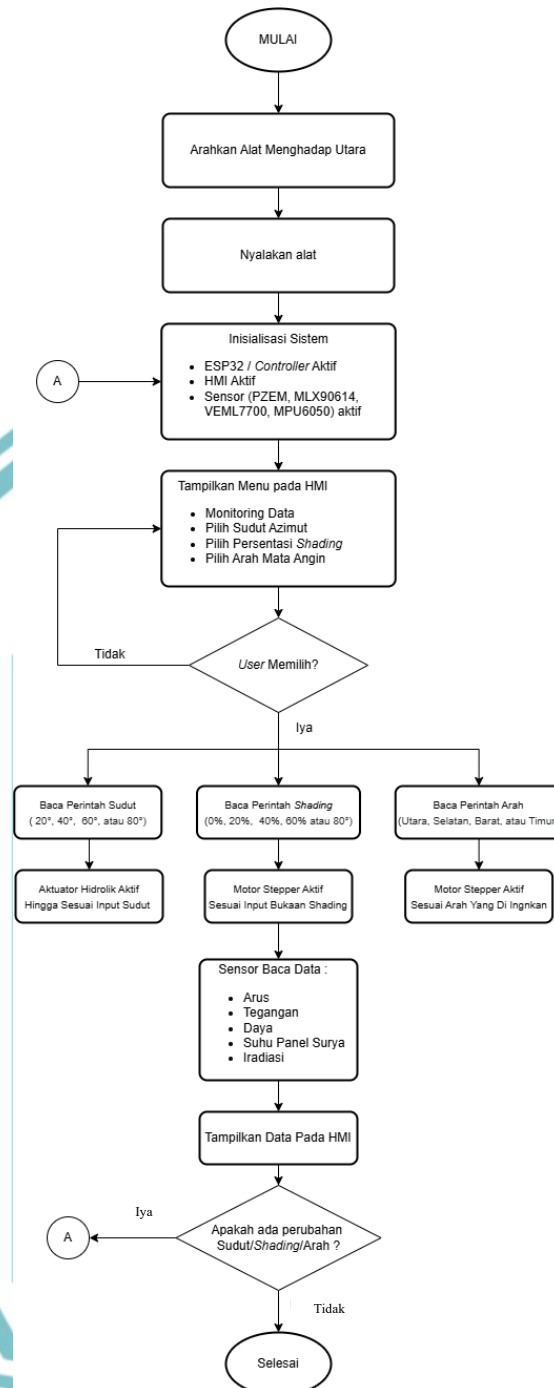
Pengguna kemudian melakukan pengaturan parameter melalui HMI *Nextion* yang meliputi arah panel surya, sudut kemiringan panel, dan tingkat *shading*. Data yang dipilih pada HMI akan dikirimkan ke ESP32-S3 untuk diproses sebagai perintah pengendalian aktuator. Pengaturan arah panel dilakukan menggunakan motor *stepper* NEMA23 yang menggerakkan mekanisme rotasi panel sesuai arah yang dipilih.

Setelah arah panel ditentukan, pengguna dapat memilih sudut kemiringan panel surya sesuai kebutuhan praktikum. ESP32-S3 akan mengendalikan aktuator linear HARL1834 melalui *driver* BTS7960 hingga panel mencapai sudut yang diinginkan. Posisi sudut panel kemudian dipantau menggunakan sensor MPU6050 untuk memastikan pergerakan sesuai dengan *setpoint* yang diberikan.

Selanjutnya, pengguna dapat menentukan tingkat *shading* yang akan diterapkan pada panel surya. Mekanisme *shading* digerakkan oleh motor *stepper* NEMA23 melalui *driver* TB6600 sehingga tingkat penutupan permukaan panel dapat diatur sesuai persentase yang dipilih. Setelah seluruh parameter berhasil diterapkan, sistem berada pada kondisi siap digunakan untuk kegiatan praktikum dan dapat menerima perubahan parameter baru sesuai kebutuhan pengguna. Untuk cara pengoperasian alat bisa dilihat pada Gambar 3.1

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



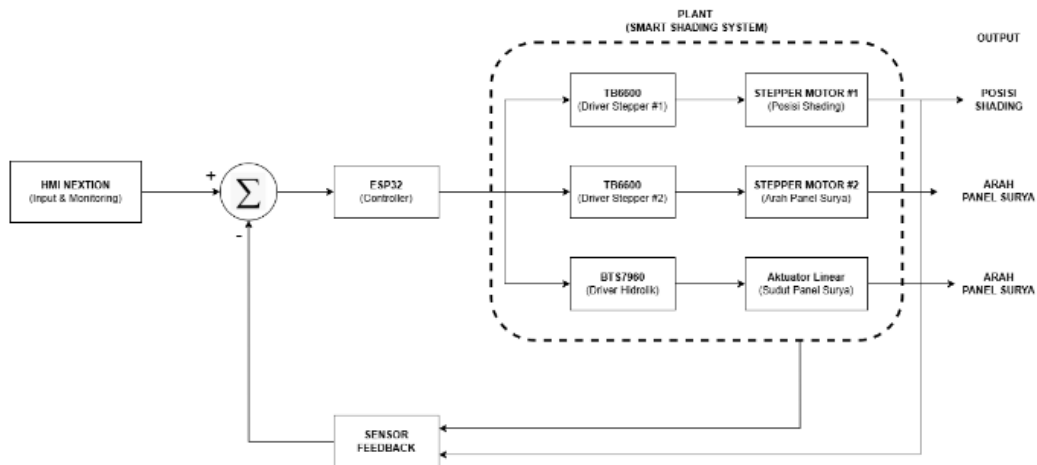
Gambar 3. 1 Flowchart Pengoperasian Alat

3.1.3. Blok Diagram Sistem Loop Tertutup

Pada Gambar 3.2 ditunjukkan diagram blok sistem loop tertutup pada *smart shading system* yang digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS. Sistem dikendalikan oleh ESP32-S3 sebagai pusat pengolahan data yang menerima masukan dari HMI *Nextion* serta sensor umpan balik. HMI *Nextion* berfungsi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Loop Tertutup

Setelah menerima perintah dari HMI, ESP32-S3 memproses data tersebut dan mengirimkan sinyal kendali ke aktuator yang sesuai. Pengaturan posisi *shading* dilakukan menggunakan motor *stepper* NEMA23 yang dikendalikan oleh *driver* TB6600 pertama. Pengaturan arah panel surya dilakukan menggunakan motor *stepper* NEMA23 kedua yang dikendalikan oleh *driver* TB6600 kedua. Sementara itu, pengaturan sudut kemiringan panel surya dilakukan menggunakan aktuator linear yang dikendalikan melalui *driver* BTS7960.

Sistem menerapkan metode *loop* tertutup dengan memanfaatkan sensor umpan balik untuk memantau kondisi aktual panel surya. Data hasil pembacaan sensor dikirim kembali ke ESP32-S3 sehingga posisi panel yang dicapai dapat dibandingkan dengan *setpoint* yang diberikan pengguna. Dengan adanya mekanisme umpan balik tersebut, sistem mampu melakukan pengendalian yang lebih akurat dan menjaga kesesuaian antara perintah yang diberikan dengan kondisi aktual di lapangan.

Keluaran dari sistem berupa posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel yang dapat diatur sesuai kebutuhan praktikum. Integrasi antara HMI *Nextion*, ESP32-S3, motor *stepper*, aktuator linear, dan sensor umpan balik memungkinkan *smart shading system* bekerja secara terkoordinasi dalam

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

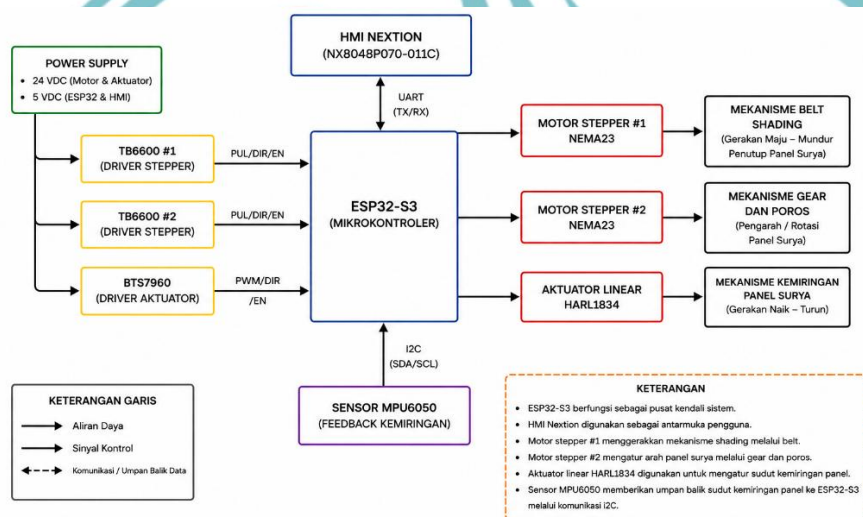
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

mensimulasikan berbagai kondisi pengoperasian panel surya secara otomatis, terkontrol, dan berulang.

3.1.4. Blok Diagram Perangkat Keras

Pada Gambar 3.5 ditunjukkan blok diagram perangkat keras *smart shading system* yang menjelaskan hubungan antara komponen *input*, proses, dan *Output* yang saling terintegrasi. Sistem ini dirancang untuk mengendalikan tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel surya melalui satu pusat kendali sehingga seluruh komponen dapat bekerja secara terkoordinasi.



Gambar 3. 3 Blok Diagram Perangkat Keras

Komponen *Input* pada sistem terdiri dari HMI *Nextion* NX8048P070-011C dan sensor MPU6050. HMI *Nextion* digunakan sebagai antarmuka antara pengguna dan sistem untuk memberikan perintah berupa pengaturan tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel. Sementara itu, sensor MPU6050 berfungsi sebagai sensor umpan balik (*feedback*) yang membaca sudut kemiringan panel surya dan mengirimkan data tersebut ke mikrokontroler melalui komunikasi I2C.

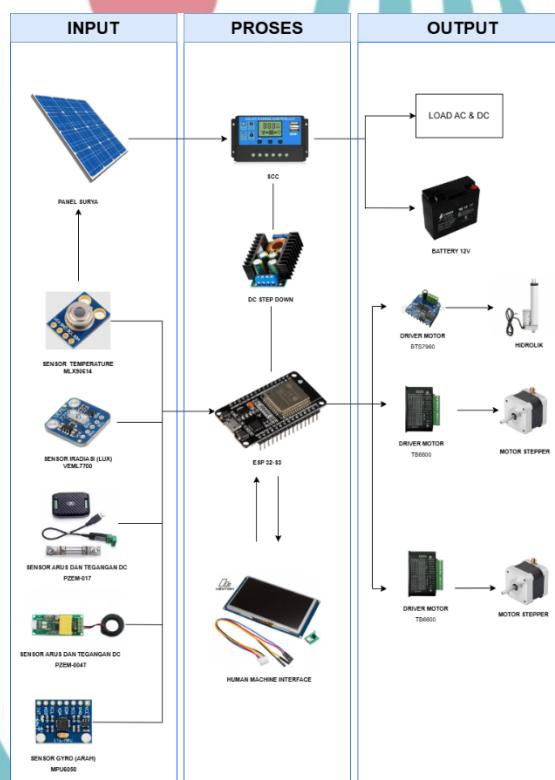
Komponen proses pada sistem menggunakan ESP32-S3 sebagai pusat kendali yang bertugas menerima data dari HMI dan sensor MPU6050, kemudian mengolah data tersebut menjadi sinyal kendali untuk menggerakkan aktuator. Dalam proses pengendalian, ESP32-S3 berkomunikasi dengan dua *driver* TB6600 yang digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* NEMA23 serta *driver* BTS7960 yang digunakan untuk mengendalikan aktuator linear HARL1834.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Komponen *output* terdiri dari mekanisme *belt shading*, mekanisme *gear* dan poros pengarah panel surya, serta mekanisme pengaturan sudut kemiringan panel surya. Motor *stepper* pertama digunakan untuk menggerakkan mekanisme *shading* melalui sistem transmisi belt sehingga tingkat penutupan panel dapat diatur sesuai kebutuhan. Motor *stepper* kedua digunakan untuk mengatur arah panel surya melalui mekanisme *gear* dan poros, sedangkan aktuator linear digunakan untuk mengatur sudut kemiringan panel surya. Dengan integrasi seluruh komponen tersebut, sistem mampu melakukan pengendalian posisi panel surya secara otomatis sesuai parameter yang diberikan oleh pengguna melalui HMI.

3.1.5. Blok Diagram Input Output



Gambar 3. 4 Blok Diagram Input output

Pada Gambar 3.4 ditunjukkan diagram *input*, proses, dan *output* pada *smart shading system*. Bagian *input* terdiri dari panel surya, sensor temperatur MLX90614, sensor intensitas cahaya, sensor PZEM-017, sensor PZEM-004T, sensor MPU6050, dan *Human Machine Interface* (HMI). Sensor-sensor tersebut digunakan untuk memperoleh informasi kondisi panel surya dan parameter kelistrikan, sedangkan HMI berfungsi sebagai media interaksi pengguna untuk

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memberikan perintah dan melakukan pengaturan sistem. Seluruh data masukan kemudian diterima dan diproses oleh ESP32-S3 sebagai pusat kendali sistem. Selain itu, sistem menggunakan modul DC Step Down untuk menyesuaikan tegangan suplai yang dibutuhkan oleh perangkat kontrol agar dapat bekerja dengan stabil.

Bagian *output* terdiri dari *Solar Charge Controller* (SCC), baterai 12 V, *driver* BTS7960, *driver* TB6600, aktuator linear, dan motor *stepper*. SCC berfungsi mengatur proses pengisian baterai dan penyaluran energi menuju beban AC maupun DC. *Driver* BTS7960 digunakan untuk mengendalikan aktuator linear yang berfungsi mengatur sudut kemiringan panel surya, sedangkan *driver* TB6600 digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* yang berfungsi menggerakkan mekanisme *shading* dan mengatur arah panel surya. Dengan integrasi seluruh komponen tersebut, *smart shading system* mampu melakukan pengaturan posisi panel surya secara otomatis serta mendukung kegiatan praktikum dan pengamatan karakteristik panel surya secara lebih efektif dan terkontrol.

3.1.6. Spesifikasi Alat

Pemilihan komponen dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan sistem kontrol yang dikembangkan. Adapun spesifikasi setiap komponen yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Alat

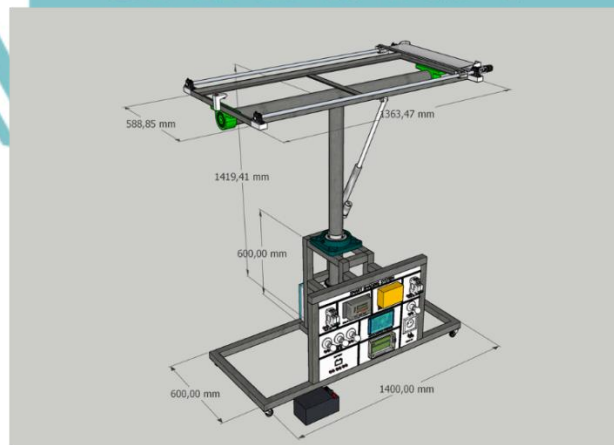
No	Material	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	ESP32-S3-WROOM-1 Dual Core 240 MHz
2	HMI (<i>Human Machine Interface</i>)	Nextion Intelligent NX8048P070-011C, 7 Inch Touchscreen
3	Motor <i>Stepper</i>	NEMA23 (57BYG250), 1.8°/step, 24 VDC
4	<i>Driver</i> Motor <i>Stepper</i>	TB6600, 9–42 VDC, Maksimum 4 A
5	Kabel NYAF	SUPREME ROL 100 METER 0,75mm
6	Aktuator Linear	HARL1834, 12 – 36 VDC
7	<i>Driver</i> Aktuator Linear	BTS7960, 5–27 VDC, Maksimum 43 A
8	Banana Jack	Connector Jack Banana Plug 4 mm
9	Sensor Daya DC	PZEM-017 DC Watt Meter 0.2-90kW, Current 100A, Voltage 0.05-300V
10	Sensor Daya AC	PZEM-004T V3.0, 80–260 VAC, 100 A



Tabel 3. 2 Spesifikasi Alat

11	Sensor Gyro	MPU6050 3-Axis Accelerometer dan Gyroscope
12	Sensor Intensitas Cahaya	BH1750 Digital Light Sensor
13	Sensor Temperatur	MLX90614 Infrared Temperature Sensor
14	Solar Charge Controller	PWM Solar Charge Controller 12/24 VDC
15	Baterai	VRLA Battery 12 V
16	Inverter	HEARTS Pure Sine Wave Inverter 300 W
17	Switching Power Supply	24 VDC
18	Step Down Converter	DC-DC Buck Converter 24 V ke 5 V
19	Step Up Converter	DC-DC Boost Converter 12 V ke 24 V, 15 A
20	PSU DC	HAITAIK HTS-100F-24 PSU 24V 4.2A
21	Terminal Blok	TBD 10 2 Tingkat 2 Susun 600V 10A 10P 10 Pole
22	Mekanisme Shading	Belt T10 Lebar 10 mm dan Pulley T10
23	Mekanisme Arah Panel	Gear Brother Module 1
24	Akrilik	Warna Putih Susu, 60x60 cm
25	Lampu DC	Sinyoki LED Lamp 12 VDC
26	Lampu AC	Hannoch LED Lamp 220 VAC
27	Fitting Lampu	Broco E27 Lamp Holder
28	Stop Kontak	Broco 220 VAC
29	MCB DC	Tomzn DC Circuit Breaker 6 A
30	MCB AC	Schneider Electric Circuit Breaker 4 A
31	Block Shading	Block 8 mm Ulir
32	Besi Ulir	Besi Ulir Ø 8 mm, Panjang 1200 mm

3.1.7. Desain Alat



Gambar 3. 5 Desain Alat (Tampak Samping)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

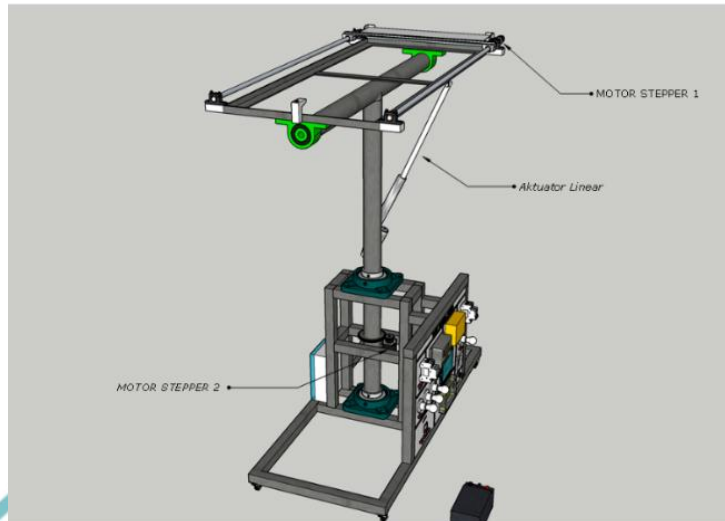
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 3.5 menunjukkan desain mekanik *smart shading system* yang digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS. Sistem dirancang menggunakan rangka utama berbahan besi hollow yang berfungsi sebagai penopang seluruh komponen mekanik dan elektronik. Pada bagian atas terdapat dudukan panel surya yang dilengkapi mekanisme *shading*, pengarah panel surya, dan pengatur sudut kemiringan panel. Mekanisme *shading* menggunakan sistem transmisi *belt* yang digerakkan oleh motor *stepper* NEMA23 untuk mengatur tingkat penutupan permukaan panel surya. Sementara itu, pengaturan arah panel surya dilakukan menggunakan motor *stepper* NEMA23 yang terhubung dengan mekanisme *gear* dan poros sehingga panel dapat berputar sesuai arah yang diinginkan.

Pada bagian tengah sistem terdapat poros utama yang berfungsi sebagai penyangga panel surya sekaligus titik rotasi arah panel. Selain itu, aktuator linear HARL1834 dipasang pada rangka dan dudukan panel untuk mengatur sudut kemiringan panel surya. Bagian bawah sistem digunakan sebagai tempat pemasangan panel kontrol yang berisi ESP32-S3, *driver* motor, sensor, HMI *Nextion*, sistem proteksi, dan komponen pendukung lainnya. Berdasarkan desain yang dibuat, dimensi keseluruhan alat memiliki panjang sekitar 1400 mm, lebar 600 mm, dan tinggi sekitar 1419 mm sehingga cukup representatif digunakan sebagai media praktikum di laboratorium pembelajaran PLTS. Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai konstruksi alat, detail desain mekanik dan penempatan komponen utama sistem ditampilkan pada Gambar 3.6 sampai dengan Gambar 3.10.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



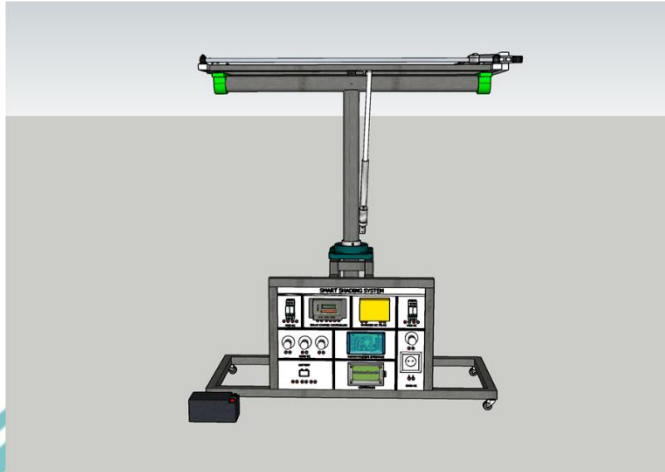
Gambar 3. 6 Penempatan Komponen Kontrol



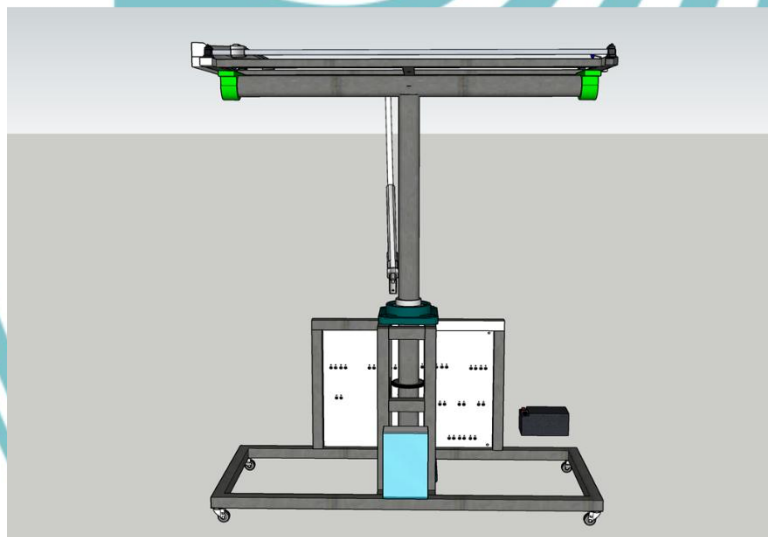
Gambar 3. 7 Tampak Atas Desain

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



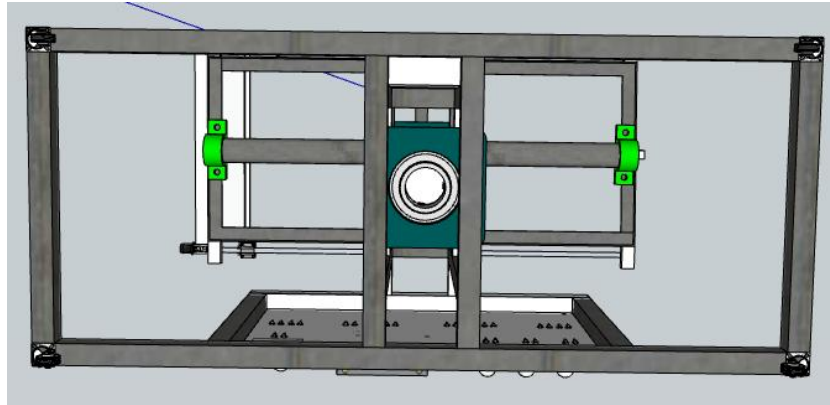
Gambar 3. 8 Tampak Depan Desain



Gambar 3. 9 Tampak Belakang Desain

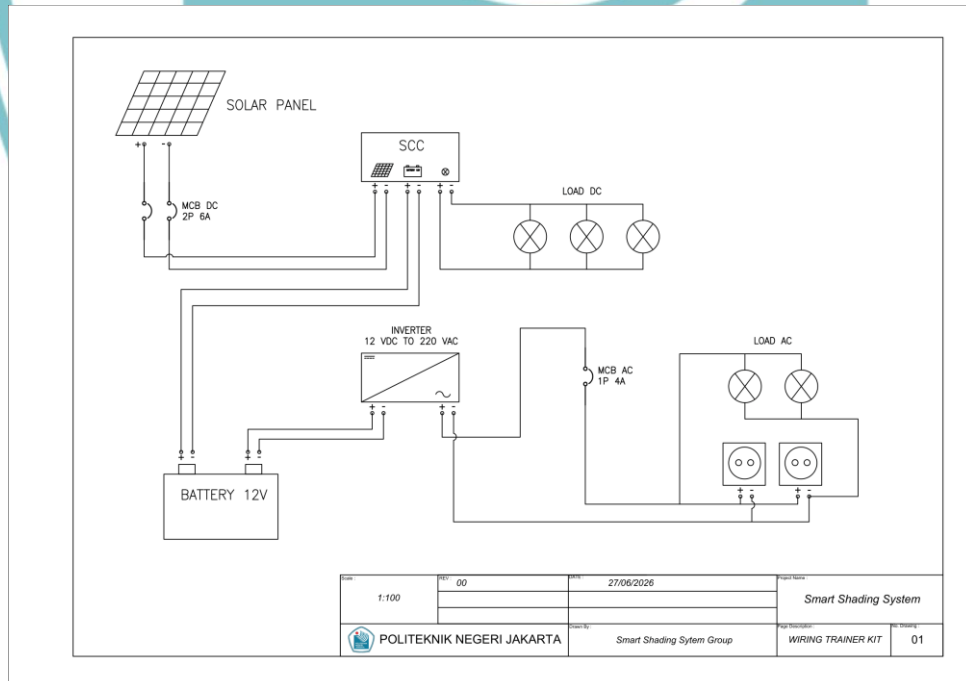
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 10 Tampak Bawah Desain

3.1.8. Rangkaian Daya (Pada *Trainer Kit*)



Gambar 3. 11 Rangkaian Daya

Gambar 3.11 menunjukkan rangkaian daya pada *trainer kit smart shading system* yang berfungsi sebagai sistem distribusi energi listrik dari panel surya

hingga ke beban DC dan AC. Sumber energi berasal dari panel surya yang menghasilkan tegangan DC, kemudian dialirkan melalui MCB DC 2P 6 A sebagai sistem proteksi sebelum masuk ke *Solar Charge Controller* (SCC). SCC berfungsi mengatur proses pengisian baterai, melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge*, serta mendistribusikan daya ke beban DC.

Energi listrik yang tersimpan pada baterai 12 VDC selanjutnya digunakan sebagai sumber catu daya utama sistem. Tegangan DC dari baterai dimanfaatkan secara langsung untuk menyuplai beban DC melalui keluaran SCC, sedangkan untuk memenuhi kebutuhan beban AC, tegangan 12 VDC dikonversi menjadi 220 VAC menggunakan inverter. Keluaran inverter kemudian disalurkan melalui MCB AC 1P 4 A sebagai pengaman sebelum diteruskan menuju *stop* kontak dan beban AC yang terdapat pada *trainer kit*.

Perancangan rangkaian daya ini bertujuan agar seluruh komponen memperoleh suplai tegangan yang sesuai dengan kebutuhan masing-masing serta memberikan sistem proteksi terhadap gangguan arus lebih dan hubung singkat. Dengan konfigurasi tersebut, *Trainer Kit smart shading system* mampu menyediakan sumber daya listrik yang stabil sehingga dapat digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS sekaligus sebagai catu daya bagi sistem kontrol yang dikembangkan.

3.1.9. Rangkaian Kontrol

Rangkaian kontrol merupakan bagian yang berfungsi mengatur seluruh proses kerja pada *smart shading system*. Sistem kontrol dibangun menggunakan ESP32-S3 sebagai mikrokontroler utama yang terhubung dengan HMI *Nextion*, *driver* motor *stepper* TB6600, *driver* aktuator BTS7960, serta beberapa sensor pendukung. Melalui rangkaian ini, perintah yang diberikan pengguna dapat diterjemahkan menjadi gerakan aktuator sesuai parameter yang dipilih. Konfigurasi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

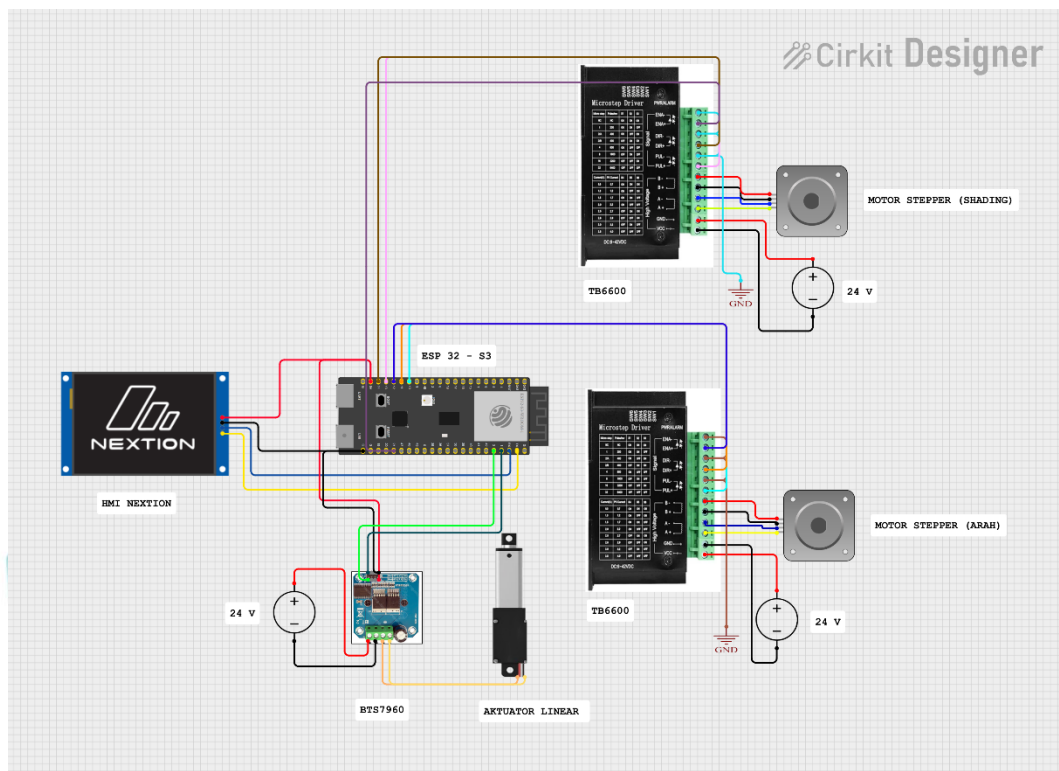
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

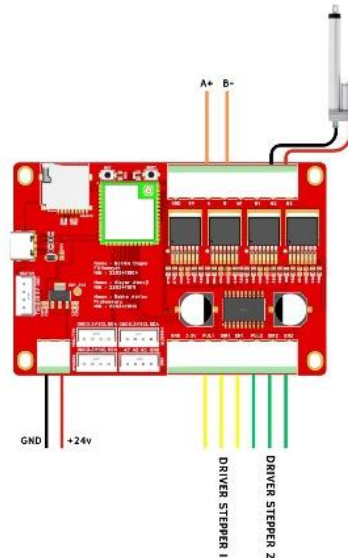


Gambar 3. 12 Rangkaian Kontrol Smart Shading System

Pada Gambar 3.12 ditunjukkan hubungan antara ESP32-S3 dengan HMI *Nextion* melalui komunikasi UART. Perintah yang diberikan melalui HMI akan diproses oleh ESP32-S3 untuk mengendalikan dua motor *stepper* NEMA23 melalui *driver* TB6600 dan satu aktuator linear HARL1834 melalui *driver* BTS7960. Motor *stepper* pertama digunakan untuk menggerakkan mekanisme *shading*, sedangkan motor *stepper* kedua digunakan untuk mengatur arah panel surya. Aktuator linear digunakan untuk mengatur sudut kemiringan panel surya sesuai *setpoint* yang diberikan pengguna.

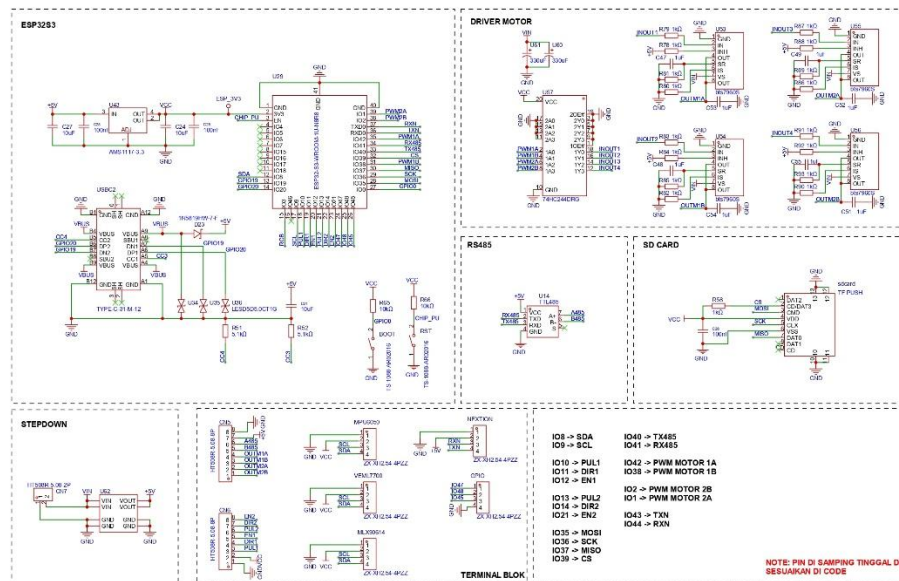
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3. 13 PCB Driver Motor dan Aktuator

Gambar 3.13 menunjukkan PCB *driver* motor dan aktuator yang digunakan pada *smart shading system*. PCB ini dirancang sebagai media distribusi daya dan sinyal kontrol dari ESP32-S3 menuju *driver* motor *stepper* dan aktuator linear. Pada PCB terdapat terminal masukan catu daya 24 VDC, terminal keluaran menuju aktuator, serta konektor sinyal kontrol yang terhubung dengan mikrokontroler. Penggunaan PCB ini membuat proses pengkabelan menjadi lebih rapi, mudah dalam perawatan, dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.



Gambar 3. 14 Skematik PCB Kontrol Smart Shading System

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 3.14 menunjukkan skematik rangkaian elektronik yang digunakan pada PCB kontrol *smart shading system*. Skematik ini memperlihatkan hubungan antara ESP32-S3, modul RS485, slot SD Card, sensor MPU6050, sensor BH1750, sensor MLX90614, HMI *Nextion*, serta konektor menuju *driver* motor dan aktuator. Selain itu, ditunjukkan pula konfigurasi pin yang digunakan untuk komunikasi UART, I2C, dan sinyal kontrol motor. Skematik ini menjadi dasar dalam proses perancangan PCB sehingga seluruh komponen dapat terhubung dan bekerja sesuai fungsi yang direncanakan.

3.2. Realisasi Alat

3.2.1. Realisasi Mekanik *Smart Shading System*

Setelah proses perancangan selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah realisasi mekanik *smart shading system*. Realisasi ini dilakukan berdasarkan desain yang telah dibuat sebelumnya dengan memperhatikan fungsi setiap mekanisme yang digunakan untuk mengatur posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel surya. Hasil realisasi keseluruhan alat ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 15 Realisasi Smart Shading System

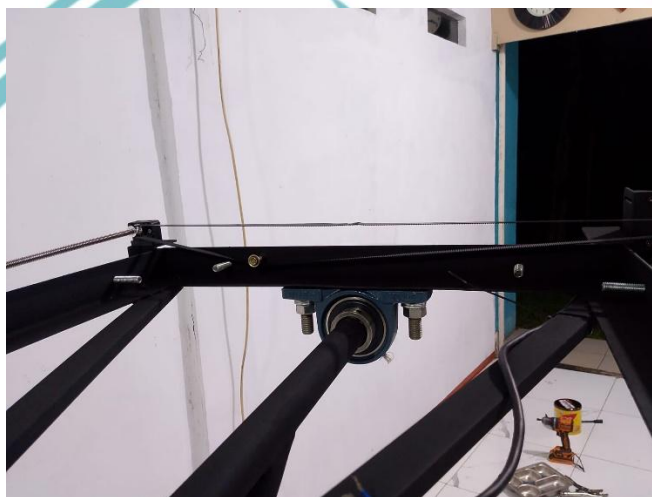
Gambar 3.15 menunjukkan hasil realisasi *smart shading system* yang telah selesai dirakit. Sistem terdiri dari rangka utama berbahan besi hollow, panel kontrol, mekanisme *shading*, mekanisme pengarah panel surya, dan mekanisme pengatur sudut kemiringan panel. Seluruh komponen tersebut terintegrasi dalam

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

satu sistem sehingga dapat digunakan sebagai media pembelajaran dan pengujian pada praktikum PLTS.

Untuk mendukung proses pengaturan tingkat *shading*, digunakan mekanisme transmisi *belt* yang dihubungkan dengan motor *stepper* NEMA23. Mekanisme ini berfungsi meneruskan putaran motor menjadi gerakan linier pada *shading* sehingga tingkat penutupan panel surya dapat diatur sesuai kebutuhan. Realisasi mekanisme *belt* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Mekanisme Belt Shading

Penggunaan *belt* dipilih karena mampu menghasilkan pergerakan yang halus, stabil, dan memiliki tingkat presisi yang baik dalam mengatur posisi *shading* sesuai *setpoint* yang diberikan melalui sistem kontrol.

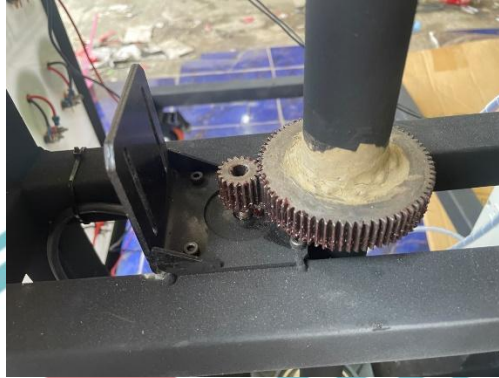
Selain mekanisme *shading*, sistem juga dilengkapi dengan mekanisme pengarah panel surya yang berfungsi mengubah arah hadap panel. Mekanisme ini menggunakan kombinasi *gear* yang dihubungkan dengan motor *stepper* sehingga pergerakan panel dapat dilakukan secara terkontrol. Sementara itu, pengaturan sudut kemiringan panel dilakukan menggunakan aktuator linear HARL1834 yang dipasang pada rangka utama alat. Dengan kombinasi ketiga mekanisme tersebut, *smart shading system* mampu melakukan pengaturan *shading*, arah panel, dan sudut kemiringan secara otomatis sesuai parameter yang dipilih pengguna.

Selanjutnya, mekanisme pengarah panel surya ditunjukkan pada Gambar 3.17. Mekanisme ini menggunakan sistem transmisi *gear* yang digerakkan oleh motor *stepper* NEMA23 untuk mengatur arah hadap panel surya. Penggunaan *gear*

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dipilih karena mampu menghasilkan pergerakan yang presisi sehingga posisi panel dapat disesuaikan dengan arah yang diinginkan.



Gambar 3. 17 Mekanisme Gear

Adapun mekanisme pengaturan sudut kemiringan panel surya ditunjukkan pada Gambar 3.18. Sistem ini menggunakan aktuator linear HARL1834 yang berfungsi mengubah sudut kemiringan panel berdasarkan perintah yang diberikan oleh sistem kontrol. Pergerakan aktuator memungkinkan panel surya bergerak naik dan turun sehingga sudut kemiringan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengujian maupun praktikum.



Gambar 3. 18 Aktuator linear (hidrolik)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.2.2. Realisasi Trainer Kit Smart Shading System

Selain realisasi mekanik, dilakukan pula realisasi *trainer kit* yang berfungsi sebagai pusat distribusi daya dan pengendalian sistem. *trainer kit* dirancang untuk menempatkan komponen kelistrikan dan elektronik secara terstruktur sehingga memudahkan proses pengoperasian, . Hasil realisasi *trainer kit* ditunjukkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 19 Trainer Kit

Trainer kit ini terdiri dari MCB DC, *Solar Charge Controller* (SCC), inverter DC ke AC, terminal beban DC, terminal beban AC, baterai 12 V, serta ruang pemasangan sistem kontrol dan HMI. Seluruh komponen disusun dalam satu papan akrilik untuk mempermudah distribusi daya dan pengoperasian alat.

Melalui *trainer kit* tersebut, energi yang dihasilkan panel surya dapat disalurkan ke baterai, beban DC, maupun beban AC sesuai kebutuhan. Selain itu, *trainer kit* juga menjadi tempat integrasi sistem *monitoring* dan pengendalian sehingga seluruh proses operasional *smart shading system* dapat dilakukan secara lebih aman dan terorganisir.

3.2.3. Realisasi Sistem Kontrol

Setelah proses perancangan selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah realisasi sistem kontrol yang digunakan untuk mengendalikan seluruh mekanisme pada *smart shading system*. Sistem kontrol direalisasikan menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan HMI

Hak Cipta :

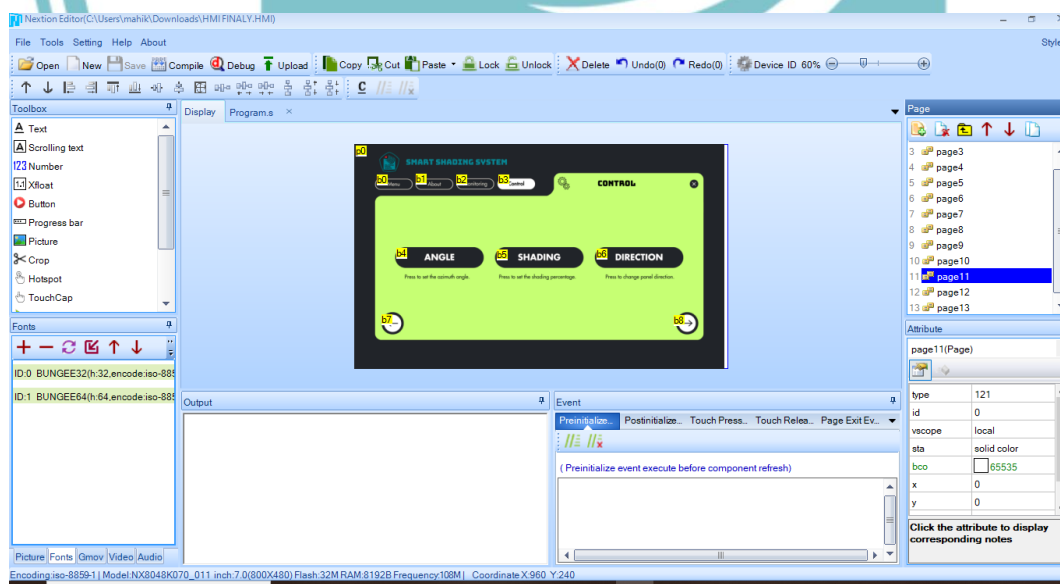
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Nextion, driver motor *stepper* TB6600, driver aktuator BTS7960, serta sensor pendukung yang digunakan pada sistem.

Pada tahap realisasi, seluruh komponen kontrol dipasang pada panel kontrol dan dihubungkan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat sebelumnya. ESP32-S3 berfungsi untuk menerima perintah dari HMI *Nextion*, mengolah data dari sensor, serta menghasilkan sinyal kontrol yang digunakan untuk menggerakkan motor *stepper* dan aktuator linear. Komunikasi antara perangkat dilakukan melalui antarmuka UART, I2C, dan RS485 sehingga seluruh komponen dapat bekerja secara terintegrasi.

Sistem kontrol yang telah direalisasikan mampu mengendalikan mekanisme *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel sesuai parameter yang dipilih pengguna melalui HMI. Selain itu, sistem juga mampu menerima data dari sensor untuk mendukung proses *monitoring* selama kegiatan praktikum dan pengujian berlangsung.

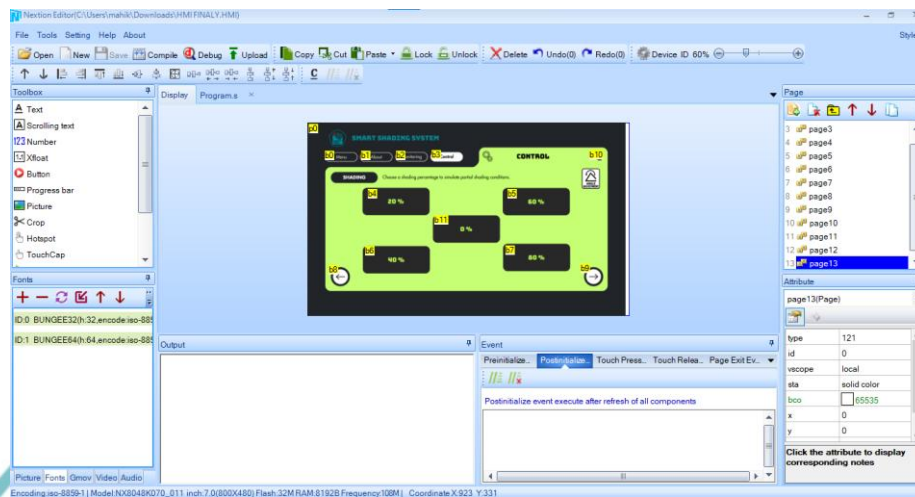
3.2.4. Realisasi Antarmuka HMI *Nextion*



Gambar 3. 20 Tampilan page control

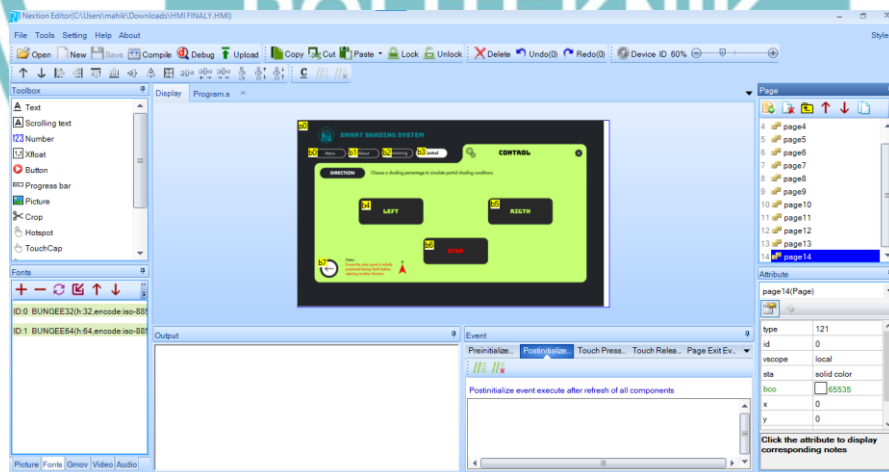
HMI *Nextion* digunakan sebagai antarmuka antara pengguna dan *smart shading system*. Antarmuka ini dirancang menggunakan perangkat lunak *Nextion Editor* dan berfungsi untuk memudahkan pengguna dalam mengoperasikan sistem. Tampilan HMI ditunjukkan pada Gambar 3.20 yang berisi menu navigasi menuju

halaman pengaturan *shading*, pengaturan arah panel surya, pengaturan sudut kemiringan panel, serta halaman *monitoring* sistem.



Gambar 3. 21 Tampilan page shading

Pada Gambar 3.21 Merupakan halaman pengaturan *shading* digunakan untuk mengatur tingkat penutupan *shading* pada panel surya. Pengguna dapat memilih persentase *shading* yang telah ditentukan melalui tombol yang tersedia pada HMI. Setelah tombol ditekan, perintah akan dikirimkan ke ESP32-S3 untuk menggerakkan motor *stepper* sesuai posisi yang dipilih.



Gambar 3. 22 Tampilan page arah

Lalu, Pada Gambar 3.22 adalah tampilan halaman pengaturan arah panel digunakan untuk mengendalikan pergerakan panel surya ke arah yang diinginkan. Perintah yang diberikan melalui HMI akan diterima oleh ESP32-S3 dan diteruskan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

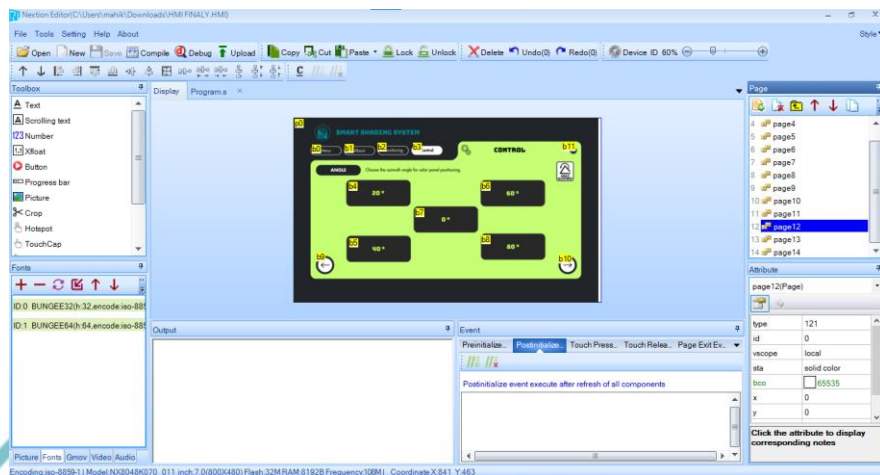
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

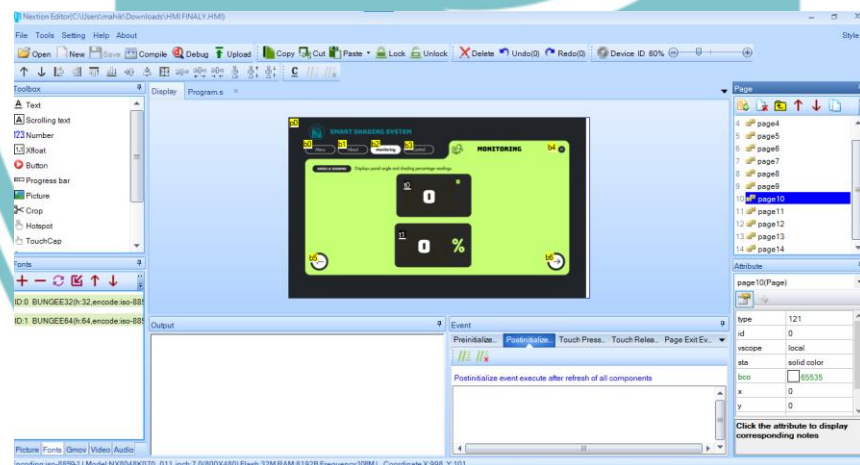
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ke motor *stepper* pengarah panel sehingga posisi panel dapat diubah sesuai kebutuhan pengujian.



Gambar 3. 23 Tampilan page angle

Selanjutnya, Pada Gambar 3.23 desain tampilan halaman pengaturan sudut kemiringan digunakan untuk menentukan sudut panel surya yang diinginkan. Nilai sudut yang dipilih pengguna akan diproses oleh ESP32-S3 untuk mengendalikan aktuator linear sehingga panel dapat bergerak menuju sudut yang telah ditentukan.



Gambar 3. 24 Tampilan page monitoring angle & shading

Berikutnya, Gambar 3.24 menunjukkan halaman *monitoring* digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan sensor secara *real-time*. Informasi yang ditampilkan meliputi sudut azimuth dan persentase *shading* yang diperoleh dari sensor MPU6050 yang terpasang pada system.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.2.5. Realisasi Program ESP32-S3

Realisasi program ESP32-S3 dilakukan menggunakan perangkat lunak Arduino IDE sebagai pusat kendali *smart shading system*. Program yang dibuat berfungsi untuk menerima perintah dari HMI *Nextion*, mengolah data yang diterima, serta mengendalikan motor *stepper* dan aktuator linear sesuai parameter yang dipilih pengguna.



Gambar 3. 25 Inisialisasi Pin ESP32-S3

Gambar 3.25 menunjukkan konfigurasi pin yang digunakan pada ESP32-S3. Pin GPIO10, GPIO11, dan GPIO12 digunakan untuk mengendalikan *driver* TB6600 pada mekanisme *shading*, sedangkan GPIO13, GPIO14, dan GPIO21 digunakan untuk mengendalikan *driver* TB6600 pada mekanisme pengarah panel surya. Selain itu, GPIO1 dan GPIO2 digunakan untuk mengendalikan *driver* BTS7960 yang terhubung dengan aktuator linear HARL1834.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  void setup()
2  {
3      prefs.begin("smartshade", false);
4
5      pinMode(RPWM, OUTPUT);
6      pinMode(LPWM, OUTPUT);
7
8      pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
9      pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
10     pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
11
12     nextion.begin(
13         9600,
14         SERIAL_8N1,
15         44,
16         43);
17 }

```

Gambar 3. 26 Inisialisasi Sistem pada Fungsi Setup()

Selanjutnya, Gambar 3.26 menunjukkan proses inisialisasi sistem pada fungsi *setup()*. Pada tahap ini dilakukan konfigurasi pin *Input* dan *Output* serta inisialisasi komunikasi serial antara ESP32-S3 dan HMI *Nextion* menggunakan *baud rate* 9600 bps. Konfigurasi tersebut bertujuan agar seluruh perangkat dapat berkomunikasi dan bekerja sesuai fungsi yang dirancang.

```

1  while(nextion.available())
2      uint8_t data = nextion.read();
3      switch(data)

```

Gambar 3. 27 Program Penerimaan Perintah HMI

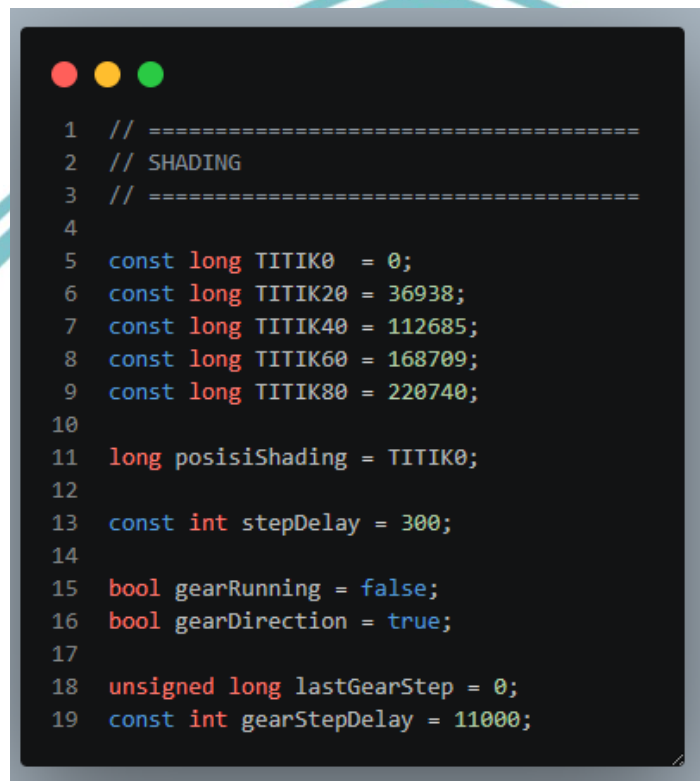
Adapun proses pembacaan data dari HMI ditunjukkan pada Gambar 3.27. Setiap tombol pada HMI mengirimkan kode perintah tertentu yang akan dibaca oleh ESP32-S3. Berdasarkan kode yang diterima, sistem akan menjalankan fungsi pengendalian *shading*, arah panel surya, maupun sudut kemiringan panel. Dengan program yang telah dibuat, seluruh mekanisme pada *smart shading system* dapat dikendalikan secara otomatis melalui antarmuka HMI *Nextion*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.2.6. Realisasi Pengendalian *Shading*

Pengendalian *shading* pada *smart shading system* dilakukan menggunakan motor *stepper* NEMA23 yang terhubung dengan *driver* TB6600 dan mekanisme *belt* T10. Sistem ini dirancang untuk mengatur tingkat penutupan cahaya pada permukaan panel surya melalui beberapa posisi *shading* yang telah ditentukan.



```

1  // =====
2  // SHADING
3  // =====
4
5  const long TITIK0 = 0;
6  const long TITIK20 = 36938;
7  const long TITIK40 = 112685;
8  const long TITIK60 = 168709;
9  const long TITIK80 = 220740;
10
11 long posisiShading = TITIK0;
12
13 const int stepDelay = 300;
14
15 bool gearRunning = false;
16 bool gearDirection = true;
17
18 unsigned long lastGearStep = 0;
19 const int gearStepDelay = 11000;

```

Gambar 3. 28 Konfigurasi Posisi *Shading*

Gambar 3.28 menunjukkan konfigurasi posisi *shading* yang digunakan pada sistem. Posisi *shading* terdiri dari lima tingkat yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Setiap tingkat *shading* direpresentasikan dalam bentuk jumlah langkah motor *stepper* yang telah diperoleh melalui proses kalibrasi sehingga posisi peneduh dapat bergerak sesuai persentase yang dipilih pengguna.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1 void moveToPosition(long targetPos)
2 {
3     long selisih =
4         targetPos - posisiShading;
5
6     if (selisih == 0)
7     {
8         Serial.println("SUDAH DI POSISI SHADING");
9         return;
10    }
11
12    bool arahMaju = (selisih > 0);
13
14    digitalWrite(DIR_PIN, !arahMaju);
15
16    long jumlahStep = abs(selisih);
17
18    for (long i = 0; i < jumlahStep; i++)
19    {
20        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
21        delayMicroseconds(stepDelay);
22
23        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
24        delayMicroseconds(stepDelay);
25
26        if (arahMaju)
27            posisiShading++;
28        else
29            posisiShading--;
30
31        if (i % 100 == 0)
32        {
33            updatePersenShading();
34        }
35    }
36
37    posisiShading = targetPos;
38
39    prefs.putLong("shading", posisiShading);
40
41    updatePersenShading();
42
43    Serial.print("SAVE SHADING = ");
44    Serial.println(posisiShading);
45 }

```

Gambar 3. 29 Program Pengendalian Shading

Gambar 3.29 menunjukkan fungsi *moveToPosition()* yang digunakan untuk mengendalikan pergerakan motor *stepper*. Fungsi ini menghitung selisih antara posisi saat ini dengan posisi target, kemudian menghasilkan sinyal STEP dan DIR menuju *driver* TB6600 hingga motor mencapai posisi yang ditentukan. Selama proses pergerakan berlangsung, nilai persentase *shading* juga diperbarui pada HMI *Nextion* melalui fungsi *updatePersenShading()*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  case 0x40:
2      moveToPosition(TITIK0);
3      break;
4
5      case 0x36:
6          moveToPosition(TITIK20);
7          break;
8
9      case 0x37:
10         moveToPosition(TITIK40);
11         break;
12
13         case 0x38:
14             moveToPosition(TITIK60);
15             break;
16
17             case 0x39:
18                 moveToPosition(TITIK80);
19                 break;
20             // =====
21             // GEAR TENGAH
22             // =====
23             case 0x41:
24                 gearKiri();
25                 break;
26
27                 case 0x42:
28                     gearKanan();
29                     break;
30
31                     case 0x44:
32                         gearStop();
33                         break;
34                     }
35                 }
36             }

```

Gambar 3. 30 Program Penerimaan Perintah Shading dari HMI

Selanjutnya, Gambar 3.30 menunjukkan bagian program yang berfungsi menerima perintah dari HMI *Nextion*. Setiap tombol *shading* pada HMI mengirimkan kode tertentu yang akan diterjemahkan menjadi posisi target *shading*. Setelah kode diterima oleh ESP32-S3, sistem akan menjalankan fungsi *moveToPosition()* sehingga mekanisme *shading* bergerak menuju posisi yang dipilih pengguna.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan hasil realisasi yang dilakukan, sistem pengendalian *shading* mampu mengatur posisi peneduh secara otomatis pada tingkat *shading* 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80% sesuai perintah yang diberikan melalui HMI *Nextion*.

3.2.7. Realisasi Pengendalian Arah

Pengendalian arah panel surya dilakukan menggunakan motor *stepper* yang dikendalikan oleh ESP32-S3. Perintah pergerakan diberikan melalui HMI *Nextion* dan selanjutnya diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan arah pergerakan panel sesuai perintah yang diterima.

```

1 void gearKiri()
2 {
3     Serial.println("GEAR KIRI");
4     gearRunning = true;
5     gearDirection = false;
6 }
7
8 void gearKanan()
9 {
10    Serial.println("GEAR KANAN");
11    gearRunning = true;
12    gearDirection = true;
13 }
14
15 void gearStop()
16 {
17    Serial.println("GEAR STOP");
18    gearRunning = false;
19 }
20
21 void runGear()
22 {
23    if(!gearRunning) return;
24
25    if(micros() - lastGearStep >= gearStepDelay)
26    {
27        lastGearStep = micros();
28
29        digitalWrite(GEAR_DIR_PIN, gearDirection);
30
31        digitalWrite(GEAR_STEP_PIN, HIGH);
32        delayMicroseconds(5);
33        digitalWrite(GEAR_STEP_PIN, LOW);
34    }
35 }

```

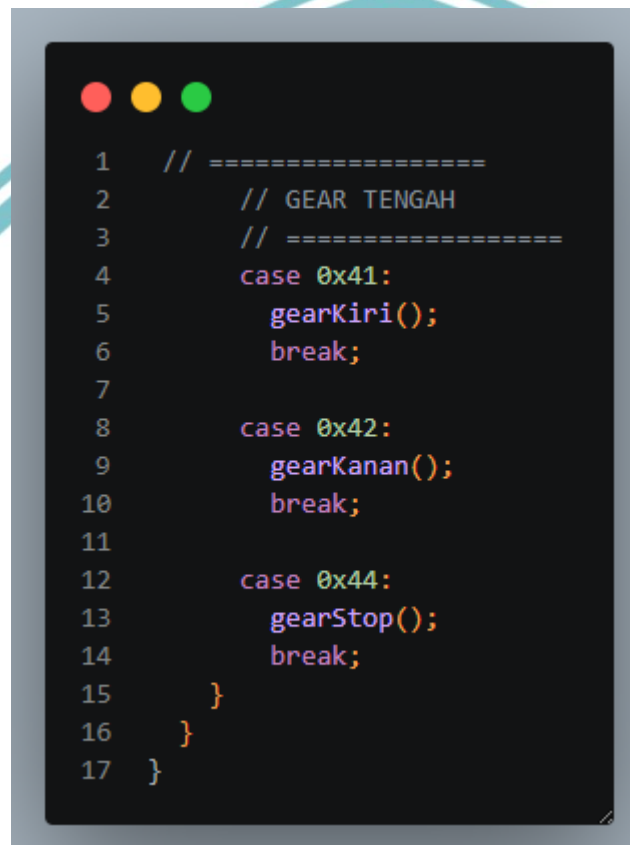
Gambar 3. 31 Program Pengendalian arah

Gambar 3.31 menunjukkan program pengendalian arah panel surya yang terdiri dari fungsi *GearKiri()*, *GearKanan()*, *GearStop()*, *runGear()* Fungsi tersebut digunakan untuk menentukan arah putaran motor serta menghasilkan pulsa kontrol yang diperlukan agar motor dapat bergerak sesuai perintah yang diberikan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Selanjutnya, Gambar 3.32 menunjukkan proses penerimaan data dari HMI *Nextion*. Setiap tombol pada HMI mengirimkan kode perintah tertentu yang dibaca oleh ESP32-S3. Setelah kode diterima, sistem akan menjalankan fungsi yang sesuai untuk menggerakkan panel ke arah kanan, ke arah kiri, atau menghentikan pergerakan panel.



```

1  // =====
2      // GEAR TENGAH
3      // =====
4  case 0x41:
5      gearKiri();
6      break;
7
8  case 0x42:
9      gearKanan();
10     break;
11
12    case 0x44:
13        gearStop();
14        break;
15    }
16 }
17 }
  
```

Gambar 3. 32 Program Penerimaan Perintah arah dari HMI

Berdasarkan hasil realisasi yang dilakukan, sistem pengendalian arah panel surya mampu merespons setiap perintah yang diberikan melalui HMI dengan baik. Pergerakan panel dapat dilakukan secara terkontrol sehingga arah panel dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengujian pada *smart shading system*.

3.2.8. Realisasi Pengendalian Sudut Kemiringan Panel

Pengendalian sudut kemiringan panel surya dilakukan menggunakan aktuator linear yang dikendalikan oleh ESP32-S3. Sistem ini digunakan untuk mengatur posisi kemiringan panel pada beberapa variasi sudut yang telah ditentukan sehingga dapat digunakan dalam berbagai kondisi pengujian pada *smart shading system*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  void hydraulicNaik()
2  {
3      analogWrite(RPWM, 0);
4      analogWrite(LPWM, 255);
5  }
6
7  void hydraulicTurun()
8  {
9      analogWrite(RPWM, 255);
10     analogWrite(LPWM, 0);
11 }
12
13 void hydraulicStop()
14 {
15     analogWrite(RPWM, 0);
16     analogWrite(LPWM, 0);
17 }
18
19 int posisiKeSudut(int posisi)
20 {
21     switch(posisi)
22     {
23         case 0: return 0;
24         case 1: return 20;
25         case 2: return 40;
26         case 3: return 60;
27         case 4: return 80;
28     }
29     return 0;
30 }
31
32 unsigned long waktuPosisi(int posisi)
33 {
34     switch(posisi)
35     {
36         case 0: return 0;
37         case 1: return 14000;
38         case 2: return 23380;
39         case 3: return 28750;
40         case 4: return 31450;
41     }
42     return 0;
43 }
44

```

Gambar 3.33 Program Konversi Posisi ke Sudut

Gambar 3.33 menunjukkan program yang digunakan untuk mengonversi posisi aktuator menjadi nilai sudut kemiringan panel. Pada sistem ini tersedia lima variasi sudut, yaitu 0°, 20°, 40°, 60°, dan 80°. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam proses pengendalian aktuator serta penampilan informasi sudut pada HMI *Nextion*.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1 void pindahKePosisi(int target)
2 {
3   if(target == posisiSudut)
4   {
5     Serial.println("SUDAH DI POSISI SUDUT");
6     return;
7   }
8
9   int sudutAwal = posisiKeSudut(posisiSudut);
10  int sudutTarget = posisiKeSudut(target);
11
12  unsigned long waktuAwal =
13    waktuPosisi(posisiSudut);
14
15  unsigned long waktuTargetMs =
16    waktuPosisi(target);
17
18  unsigned long durasi =
19    abs((long)waktuTargetMs -
20      (long)waktuAwal);
21
22  if(target > posisiSudut)
23    hydraulicNaik();
24  else
25    hydraulicTurun();
26
27  int langkah =
28    abs(sudutTarget - sudutAwal);
29
30  if(langkah == 0)
31  {
32    hydraulicStop();
33    return;
34  }
35
36  float interval =
37    (float)durasi / langkah;
38
39  if(sudutTarget > sudutAwal)
40  {
41    for(int s=sudutAwal; s<=sudutTarget; s++)
42    {
43      sendCommand(
44        "page10.t0.txt=\"\" +
45        String(s) +
46        \"\"");
47      delay(interval);
48    }
49  }
50  else
51  {
52    for(int s=sudutAwal; s>=sudutTarget; s--)
53    {
54      sendCommand(
55        "page10.t0.txt=\"\" +
56        String(s) +
57        \"\"");
58      delay(interval);
59    }
60  }
61  }
62
63  hydraulicStop();
64
65  posisiSudut = target;
66
67  prefs.putInt("sudut", posisiSudut);
68
69  Serial.print("SAVE SUDUT = ");
70  Serial.println(posisiSudut);
71
72 }
73
74

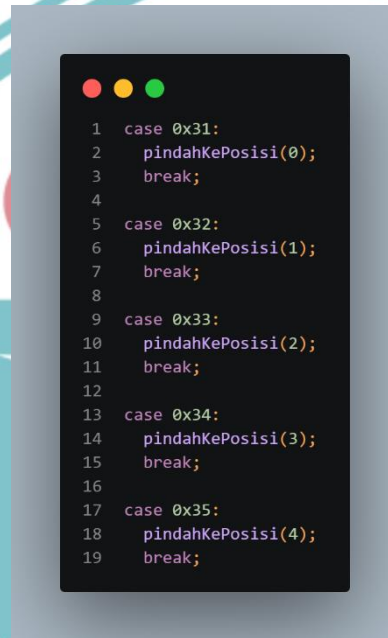
```

Gambar 3. 34 Program Pengendalian Sudut Kemiringan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Selanjutnya, Gambar 3.34 menunjukkan fungsi pindahKePosisi() yang digunakan untuk mengendalikan pergerakan aktuator linear menuju sudut yang dipilih pengguna. Program menghitung posisi awal dan posisi target, kemudian menentukan arah pergerakan aktuator hingga mencapai sudut yang diinginkan. Selama proses berlangsung, nilai sudut juga diperbarui dan ditampilkan pada HMI secara real-time.



Gambar 3.35 Program Penerimaan Perintah Sudut dari HMI

Adapun proses penerimaan perintah dari HMI ditunjukkan pada Gambar 3.35. Setiap tombol pada HMI mengirimkan kode tertentu yang akan dibaca oleh ESP32-S3. Setelah kode diterima, sistem akan menjalankan fungsi pengendalian sesuai sudut yang dipilih pengguna.

Berdasarkan hasil realisasi yang dilakukan, sistem pengendalian sudut kemiringan panel mampu bekerja dengan baik dan merespons setiap perintah yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Perubahan sudut dapat dilakukan secara otomatis sesuai nilai yang telah ditentukan pada program.

3.2.9. Realisasi Integrasi Sistem

Setelah seluruh komponen mekanik, elektronik, dan sistem kontrol berhasil direalisasikan, tahap selanjutnya adalah integrasi sistem *Smart Shading* secara keseluruhan. Integrasi dilakukan dengan menghubungkan HMI *Nextion*, ESP32-S3,

driver motor TB6600, *driver* BTS7960, motor *stepper*, dan aktuator linear menjadi satu sistem yang dapat bekerja secara terkoordinasi.

Pada sistem yang telah direalisasikan, HMI *Nextion* berfungsi sebagai antarmuka pengguna untuk memberikan perintah pengaturan *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel. Perintah yang diberikan melalui HMI kemudian dikirim ke ESP32-S3 melalui komunikasi serial UART untuk diproses sesuai fungsi yang telah diprogram.

Selanjutnya, ESP32-S3 mengendalikan *driver* TB6600 untuk menggerakkan motor *stepper* pada mekanisme *shading* dan pengarah panel surya. Selain itu, ESP32-S3 juga mengendalikan *driver* BTS7960 yang digunakan untuk menggerakkan aktuator linear pada mekanisme pengaturan sudut kemiringan panel. Dengan konfigurasi tersebut, seluruh aktuator dapat bekerja sesuai perintah yang diberikan pengguna melalui HMI.

Hasil integrasi menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat berkomunikasi dan bekerja dengan baik sesuai fungsi masing-masing. Sistem mampu melakukan pengaturan tingkat *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel secara otomatis melalui satu antarmuka yang terintegrasi. Dengan demikian, *smart shading system* yang telah direalisasikan dapat digunakan sebagai media pembelajaran dan pengujian pada praktikum Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Realisasi keseluruhan *smart shading system* setelah proses integrasi seluruh komponen dapat dilihat pada Gambar 3.36.



Gambar 3. 36 Integrasi Smart Shading System Secara Keseluruhan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Kontrol *Smart Shading System*

4.1.1. Deskripsi Pengujian

Pengujian sistem kontrol *smart shading system* dilakukan untuk memverifikasi bahwa sistem yang telah dirancang mampu bekerja sesuai dengan fungsi pengendalian yang direncanakan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen perangkat keras dan perangkat lunak dapat beroperasi secara terintegrasi sehingga sistem mampu mengendalikan mekanisme *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel sesuai dengan perintah yang diberikan oleh pengguna.

Sistem kontrol yang dikembangkan terdiri atas ESP32-S3 sebagai pengendali utama, HMI *Nextion* sebagai antarmuka pengguna (*Human Machine Interface*), motor stepper NEMA23 sebagai aktuator penggerak mekanisme *shading* dan pengarah panel surya, aktuator linear HARL1834 sebagai penggerak sudut kemiringan panel surya, serta sensor MPU6050 sebagai sensor umpan balik (*feedback*) untuk mendeteksi posisi sudut kemiringan panel. Seluruh komponen tersebut saling terintegrasi sehingga membentuk suatu sistem kontrol yang mampu menerima masukan dari pengguna, memproses perintah melalui mikrokontroler, dan menghasilkan keluaran berupa pergerakan aktuator sesuai dengan kondisi yang diinginkan.

Pengujian dilaksanakan pada hari Minggu, 21 Juni 2026, pukul 08.00 WIB, bertempat di Jalan H. Ahmad II No. 10, Depok, Jawa Barat. Waktu pengujian dipilih pada pagi hari dengan kondisi cuaca cerah sehingga panel surya memperoleh intensitas penyinaran matahari yang relatif stabil. Kondisi tersebut dipilih untuk meminimalkan pengaruh perubahan cuaca selama proses pengujian, sehingga sistem dapat dievaluasi pada kondisi yang mendekati penggunaan sebenarnya sebagai media praktikum pembelajaran PLTS.

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem mampu bekerja secara terintegrasi serta dapat menjalankan setiap perintah yang

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

diberikan melalui HMI *Nextion*. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mengendalikan posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel sesuai dengan *setpoint* yang diberikan oleh pengguna. Hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol *smart shading system* pada setiap skenario pengujian yang dilakukan.

4.1.2. Prosedur Pengujian

Pengujian sistem kontrol *smart shading system* dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Menempatkan *smart shading system* pada lokasi pengujian yang memperoleh paparan sinar matahari secara langsung sehingga panel surya dapat beroperasi pada kondisi yang mendekati penggunaan sebenarnya.
2. Memastikan seluruh komponen mekanik, elektrik, dan sistem kontrol telah terpasang dengan baik sesuai dengan rancangan yang telah dibuat.
3. Menyalakan MCB DC dan MCB AC untuk memberikan catu daya pada sistem.
4. Menghidupkan ESP32-S3 sebagai pengendali utama serta HMI *Nextion* sebagai antarmuka pengguna (*Human Machine Interface*).
5. Memastikan komunikasi serial antara ESP32-S3 dan HMI *Nextion* berjalan dengan baik sehingga setiap perintah yang diberikan dapat diterima dan diproses oleh sistem.
6. Memastikan seluruh aktuator berada pada posisi awal (*home position*), yaitu panel surya menghadap utara, sudut kemiringan 0° , dan posisi *shading* berada pada kondisi awal sebelum pengujian dilakukan.
7. Memberikan perintah pengendalian posisi *shading* melalui HMI *Nextion* sesuai dengan skenario pengujian yang telah ditentukan.
8. Memberikan perintah pengendalian arah panel surya melalui HMI *Nextion* untuk mengubah orientasi panel sesuai dengan skenario pengujian.
9. Memberikan perintah pengendalian sudut kemiringan panel surya melalui HMI *Nextion* untuk mengaktifkan aktuator linear HARL1834 hingga mencapai sudut yang diinginkan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

10. Mengamati respons sistem terhadap setiap perintah yang diberikan, meliputi pergerakan motor *stepper shading*, motor stepper pengarah panel, aktuator linear, serta perubahan sudut yang dibaca oleh sensor MPU6050
11. Memastikan setiap aktuator mampu mencapai posisi *setpoint* yang telah ditentukan dan sistem tidak mengalami kesalahan komunikasi maupun kesalahan pengendalian selama proses pengujian berlangsung.
12. Mencatat seluruh hasil pengujian, mendokumentasikan kondisi sistem, serta melakukan evaluasi terhadap kinerja sistem kontrol berdasarkan data yang diperoleh.

4.1.3. Data Hasil Pengujian

Berikut merupakan hasil pengujian terhadap fungsi-fungsi utama pada sistem kontrol *smart shading system*. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap fungsi yang diimplementasikan pada ESP32-S3 dapat bekerja sesuai dengan rancangan, mulai dari komunikasi dengan HMI Nextion, pengendalian aktuator, hingga penyimpanan posisi terakhir sistem. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian

	Parameter Pengujian	Coding	Hasil	Foto Hasil Aktual
1	Komunikasi HMI <i>Nextion</i> dengan ESP32-S3	*Gambar 4.1	Berhasil	*Gambar 4.2
2	Pengendalian posisi <i>shading</i>	*Gambar 4.3	Berhasil	*Gambar 4.4
3	Pengendalian arah panel surya	*Gambar 4.5	Berhasil	*Gambar 4.6
4	Pengendalian sudut kemiringan panel	*Gambar 4.7	Berhasil	*Gambar 4.8
5	Penyimpanan posisi terakhir sistem	*Gambar 4.9	Berhasil	*Gambar 4.10

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

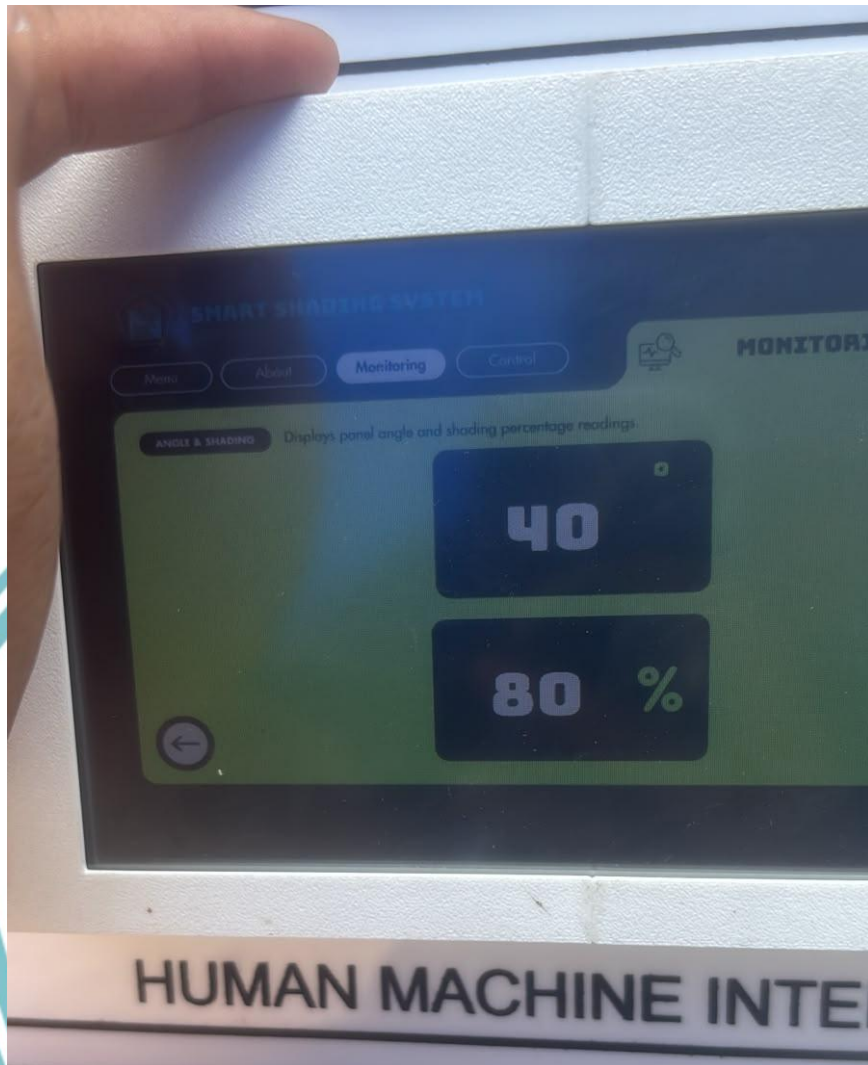
1 void loop()
2 {
3   runGear();
4
5   while(nextion.available())
6   {
7     uint8_t data = nextion.read();
8
9     if(data == 0xFF)
10      continue;
11
12     Serial.print("RX = 0x");
13     Serial.println(data, HEX);
14
15     switch(data)
16     {
17
18
19       // =====
20       // HYDRAULIC
21       // =====
22
23       case 0x31:
24         pindahKePosisi(0);
25         break;
26
27       case 0x32:
28         pindahKePosisi(1);
29         break;
30
31       case 0x33:
32         pindahKePosisi(2);
33         break;
34
35       case 0x34:
36         pindahKePosisi(3);
37         break;
38
39       case 0x35:
40         pindahKePosisi(4);
41         break;
42
43       // =====
44       // SHADING
45       // =====
46
47       case 0x40:
48         moveToPosition(TITIK0);
49         break;
50
51       case 0x36:
52         moveToPosition(TITIK20);
53         break;
54
55       case 0x37:
56         moveToPosition(TITIK40);
57         break;
58
59       case 0x38:
60         moveToPosition(TITIK60);
61         break;
62
63       case 0x39:
64         moveToPosition(TITIK80);
65         break;
66
67       // =====
68       // GEAR TENGAH
69       // =====
70       case 0x41:
71         gearKiri();
72         break;
73
74       case 0x42:
75         gearKanan();
76         break;
77
78       case 0x44:
79         gearStop();
80         break;
81     }
82   }

```

Gambar 4. 1Komunikasi HMI Nextion dengan ESP32-S3

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 2 Hasil Komunikasi HMI Nextion dengan ESP32-S3

NEGERI
JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  #define STEP_PIN 10
2  #define DIR_PIN 11
3  #define ENABLE_PIN 12
4
5  // =====
6  // SHADING
7  // =====
8
9  const long TITIK0 = 0;
10 const long TITIK20 = 36938;
11 const long TITIK40 = 112685;
12 const long TITIK60 = 168709;
13 const long TITIK80 = 220740;
14
15 long posisiShading = TITIK0;
16
17 const int stepDelay = 300;
18 // =====
19 // SHADING
20 // =====
21
22 void moveToPosition(long targetPos)
23 {
24     long selisih =
25         targetPos - posisiShading;
26
27     if (selisih == 0)
28     {
29         Serial.println("SUDAH DI POSISI SHADING");
30         return;
31     }
32
33     bool arahMaju = (selisih > 0);
34
35     digitalWrite(DIR_PIN, !arahMaju);
36
37     long jumlahStep = abs(selisih);
38
39     for (long i = 0; i < jumlahStep; i++)
40     {
41         digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
42         delayMicroseconds(stepDelay);
43
44         digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
45         delayMicroseconds(stepDelay);
46
47         if (arahMaju)
48             posisiShading++;
49         else
50             posisiShading--;
51
52         if(i % 100 == 0)
53         {
54             updatePersenShading();
55         }
56     }
57
58     posisiShading = targetPos;
59
60     prefs.putLong("shading", posisiShading);
61
62     updatePersenShading();
63
64     Serial.print("SAVE SHADING = ");
65     Serial.println(posisiShading);
66 }
67
68 void setup()
69 {
70     prefs.begin("smartshade", false);
71     Serial.begin(115200);
72
73     pinMode(RPWM, OUTPUT);
74     pinMode(LPWM, OUTPUT);
75
76     pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
77     pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
78     pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);

```

Gambar 4. 3 Pengendalian Posisi Shading



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4.4 Hasil Pengendalian Posisi Shading

JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  #define GEAR_STEP_PIN 13
2  #define GEAR_DIR_PIN 14
3  #define GEAR_ENABLE_PIN 21
4
5  bool gearRunning = false;
6  bool gearDirection = true;
7
8  unsigned long lastGearStep = 0;
9  const int gearStepDelay = 11000;
10 void gearKiri()
11 {
12     Serial.println("GEAR KIRI");
13     gearRunning = true;
14     gearDirection = false;
15 }
16
17 void gearKanan()
18 {
19     Serial.println("GEAR KANAN");
20     gearRunning = true;
21     gearDirection = true;
22 }
23
24 void gearStop()
25 {
26     Serial.println("GEAR STOP");
27     gearRunning = false;
28 }
29
30 void runGear()
31 {
32     if(!gearRunning) return;
33
34     if(micros() - lastGearStep >= gearStepDelay)
35     {
36         lastGearStep = micros();
37
38         digitalWrite(GEAR_DIR_PIN, gearDirection);
39
40         digitalWrite(GEAR_STEP_PIN, HIGH);
41         delayMicroseconds(5);
42         digitalWrite(GEAR_STEP_PIN, LOW);
43     }
44 }

```

Gambar 4. 5 Pengendalian Arah Panel Surya



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 6 Hasil Pengendalian Arah Panel Surya

© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1 #define BPM 2
2 #define LPM 1
3
4 // =====
5 // HYDRAULIC
6 // =====
7
8 int posisiSudut = 0;
9 // =====
10 // HYDRAULIC
11 // =====
12
13 void hydraulicNaik()
14 {
15   analogWrite(BPM, 0);
16   analogWrite(LPM, 255);
17 }
18
19 void hydraulicTurun()
20 {
21   analogWrite(BPM, 255);
22   analogWrite(LPM, 0);
23 }
24
25 void hydraulicStop()
26 {
27   analogWrite(BPM, 0);
28   analogWrite(LPM, 0);
29 }
30
31 int posisiKeSudut(int posisi)
32 {
33   switch(posisi)
34   {
35     case 0: return 0;
36     case 1: return 20;
37     case 2: return 40;
38     case 3: return 60;
39     case 4: return 80;
40   }
41   return 0;
42 }
43
44 unsigned long waktuPosisi(int posisi)
45 {
46   switch(posisi)
47   {
48     case 0: return 0;
49     case 1: return 3400;
50     case 2: return 2380;
51     case 3: return 2870;
52     case 4: return 3145;
53   }
54   return 0;
55 }
56
57 void pindahKePosisi(int target)
58 {
59   if(target == posisiSudut)
60   {
61     Serial.println("SUDAH DI POSISI SUDUT");
62     return;
63   }
64
65   int sudutAwal = posisiKeSudut(posisiSudut);
66   int sudutTarget = posisiKeSudut(target);
67
68   unsigned long waktuAwal =
69     waktuPosisi(posisiSudut);
70   unsigned long waktuTargetMs =
71     waktuPosisi(target);
72   unsigned long durasi =
73     abs(long waktuTargetMs -
74       (long) waktuAwal);
75
76   if(target > posisiSudut)
77   {
78     hydraulicNaik();
79     else
80     {
81       hydraulicTurun();
82     }
83   }
84   int langkah =
85     abs(sudutTarget - sudutAwal);
86   if(langkah == 0)
87   {
88     hydraulicStop();
89     return;
90   }
91
92   float interval =
93     (float) durasi / langkah;
94
95   if(sudutTarget > sudutAwal)
96   {
97     for(int s=sudutAwal; s<=sudutTarget; s++)
98     {
99       sendCommand(
100         "page10.t0.txt-\\" +
101         String(s) +
102         "\n");
103       delay(interval);
104     }
105   }
106   else
107   {
108     for(int s=sudutAwal; s>=sudutTarget; s--)
109     {
110       sendCommand(
111         "page10.t0.txt-\\" +
112         String(s) +
113         "\n");
114       delay(interval);
115     }
116   }
117
118   hydraulicStop();
119
120   posisiSudut = target;
121
122   prefs.putInt("sudut", posisiSudut);
123
124   Serial.print("SAVE SUDUT = ");
125   Serial.println(posisiSudut);
126 }
127
128
129

```

Gambar 4. 7 Pengendalian Sudut Kemiringan Panel

© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 8 Hasil Pengendalian Sudut Kemiringan Panel

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

1  #include <Preferences.h>
2
3  Preferences prefs;
4
5  void setup()
6  {
7      prefs.begin("smartshade", false);
8
9      posisiShading = prefs.getLong("shading", TITIK0);
10     posisiSudut   = prefs.getInt("sudut", 0);
11
12     Serial.print("LOAD SHADING = ");
13     Serial.println(posisiShading);
14
15     Serial.print("LOAD SUDUT = ");
16     Serial.println(posisiSudut);
17 }
18 posisiShading = targetPos;
19
20 prefs.putLong("shading", posisiShading);
21
22 updatePersenShading();
23
24 Serial.print("SAVE SHADING = ");
25 Serial.println(posisiShading);
26 posisiSudut = target;
27
28 prefs.putInt("sudut", posisiSudut);
29
30 Serial.print("SAVE SUDUT = ");
31 Serial.println(posisiSudut);

```

Gambar 4. 9 Penyimpanan Posisi Terakhir Sistem

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Timestamp	Intensitas Cahaya (Lux)	Temperature (°C)	Tilt (°)	Shading (%)	Direction	VAC (V)	IAC (A)	PAC	VDC (V)	IDC (A)	PDC	Device		
105	30/6/2026, 15.08.59.814	0	0	20	0	STOP	209.99	0	0	0	0	0	ESP32		
106	30/6/2026, 15.00.03.824	0	0	20	0	STOP	210	0	0	0	0	0	ESP32		
107	30/6/2026, 15.00.04.886	0	0	20	0	STOP	210	0	0	0	0	0	ESP32		
108	30/6/2026, 15.00.05.979	0	0	20	0	STOP	210	0	0	0	0	0	ESP32		
109	30/6/2026, 15.00.09.899	0	0	20	0	STOP	210.07	0	0	0	0	0	ESP32		
110	30/6/2026, 15.00.14.984	0	0	20	0	STOP	210.09	0	0	0	0	0	ESP32		
111	30/6/2026, 15.00.18.004	0	0	20	0	STOP	210.1	0	0	0	0	0	ESP32		

Gambar 4. 10 Hasil Penyimpanan Posisi Terakhir Sistem

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, seluruh fungsi utama *smart shading* system dapat berjalan sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan. Komunikasi antara HMI *Nextion* dan ESP32-S3 berhasil dilakukan tanpa ditemukan gangguan komunikasi selama proses pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi komunikasi serial yang diterapkan pada sistem telah mampu mendukung proses pertukaran data secara stabil.

Pada pengujian pengendalian posisi *shading*, ESP32-S3 berhasil menerima *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion* dan menerjemahkannya menjadi perintah penggerak motor *stepper*. Mekanisme *shading* dapat bergerak menuju posisi yang telah ditentukan tanpa ditemukan kegagalan perpindahan posisi. Hasil yang sama juga diperoleh pada pengujian pengendalian arah panel surya dan sudut kemiringan panel, dimana seluruh aktuator mampu merespon perintah yang diberikan sesuai dengan fungsi masing-masing.

Selain pengujian aktuator, dilakukan pula pengujian terhadap fitur penyimpanan posisi terakhir sistem menggunakan memori *non-volatile* pada ESP32-S3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa posisi *shading* dan sudut kemiringan yang tersimpan sebelum sistem dimatikan dapat dipanggil kembali saat sistem dinyalakan ulang. Fitur ini penting untuk menjaga kontinuitas posisi sistem tanpa perlu melakukan proses kalibrasi ulang setiap kali alat dioperasikan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 11 Smart Shading System Saat Pengujian

Gambar 4.11 menunjukkan kondisi *smart shading* system saat proses pengujian berlangsung. Sistem terdiri atas panel surya sebagai objek utama pengujian, mekanisme *shading* sebagai simulasi penutupan permukaan panel, mekanisme rotasi panel untuk pengaturan arah hadap panel surya, serta aktuator linear untuk pengaturan sudut kemiringan panel.

Selain komponen mekanik, pada sistem juga terdapat panel kontrol yang berisi ESP32-S3, *driver* TB6600, *driver* BTS7960, dan perangkat pendukung lainnya. HMI *Nextion* digunakan sebagai antarmuka antara pengguna dan sistem sehingga seluruh proses pengaturan dapat dilakukan secara langsung melalui layar sentuh. Konfigurasi tersebut memungkinkan pengguna melakukan simulasi berbagai kondisi operasi panel surya secara lebih mudah dan terstruktur.

4.1.4. Analisis Data / Evaluasi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *smart shading* system telah berhasil direalisasikan dan dapat beroperasi sesuai dengan fungsi yang direncanakan. Seluruh subsistem yang terdiri dari perangkat input, pengendali, aktuator, dan antarmuka pengguna mampu bekerja secara terintegrasi dalam satu sistem kontrol yang utuh. Keberhasilan integrasi ini merupakan aspek penting karena kinerja

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

sistem sangat bergantung pada kemampuan masing-masing komponen untuk saling berkomunikasi dan bekerja secara sinkron.

Keberhasilan komunikasi antara HMI *Nextion* dan ESP32-S3 menunjukkan bahwa metode komunikasi serial yang digunakan telah mampu mendukung proses pengiriman data secara stabil. Tidak ditemukan keterlambatan respon maupun kegagalan pembacaan data selama proses pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa antarmuka pengguna yang dirancang telah mampu menjalankan fungsinya sebagai media komunikasi antara pengguna dan sistem kontrol.

Dari sisi aktuator, motor *stepper* NEMA23 dan aktuator linear HARL1834 mampu menjalankan perintah yang diberikan dengan baik. Seluruh perintah perubahan posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel dapat dieksekusi tanpa terjadi kehilangan langkah (*lost step*) maupun kegagalan pergerakan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa spesifikasi aktuator yang digunakan telah sesuai dengan kebutuhan mekanik *Smart Shading* System.

Selain itu, keberhasilan fitur penyimpanan posisi terakhir memberikan keuntungan dalam pengoperasian sistem karena pengguna tidak perlu melakukan proses inisialisasi posisi secara berulang setelah sistem dimatikan. Fitur ini juga meningkatkan keandalan sistem dalam mendukung kegiatan praktikum yang membutuhkan pengaturan posisi secara berulang.

Secara keseluruhan, hasil pengujian pada tahap ini menunjukkan bahwa *Smart Shading* System telah memenuhi fungsi dasar yang ditetapkan pada tahap perancangan. Oleh karena itu, sistem layak untuk dilakukan pengujian lebih lanjut terhadap masing-masing fungsi pengendalian, yaitu pengendalian *shading*, pengendalian arah panel surya, dan pengendalian sudut kemiringan panel yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.2. Pengujian Pengendalian *Shading*

4.2.1. Deskripsi Pengujian

Pengujian pengendalian *shading* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengatur tingkat penutupan permukaan panel surya sesuai dengan *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Mekanisme *shading* pada penelitian

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ini digerakkan menggunakan motor *stepper* NEMA23 yang dikendalikan oleh ESP32-S3 melalui *driver* TB6600. Posisi *shading* ditentukan berdasarkan jumlah langkah motor yang telah diperoleh melalui proses kalibrasi pada tahap perancangan.

Fungsi *shading* merupakan bagian utama dari *smart shading* system karena digunakan untuk mensimulasikan kondisi partial *shading* pada panel surya. Oleh karena itu, diperlukan pengujian untuk memastikan bahwa mekanisme *shading* mampu bergerak menuju posisi yang telah ditentukan secara konsisten dan berulang. Variasi *setpoint* yang digunakan terdiri dari 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%, dimana masing-masing nilai merepresentasikan tingkat penutupan permukaan panel surya yang berbeda.

Parameter yang diamati pada pengujian ini meliputi jumlah langkah motor *stepper* yang dibutuhkan untuk mencapai posisi tujuan serta waktu respon sistem sejak perintah diberikan hingga posisi *shading* tercapai.

4.2.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pengendalian *Smart shading* adalah sebagai berikut :

1. Menyalakan sistem *Smart Shading*.
2. Memastikan posisi awal *shading* berada pada 0%.
3. Memilih *setpoint shading* melalui HMI *Nextion*.
4. Mengamati pergerakan mekanisme *shading*.
5. Mencatat jumlah langkah motor *stepper*.
6. Mengukur waktu respon sistem.
7. Mengulangi pengujian untuk seluruh variasi *setpoint*.

4.2.3. Data Hasil Pengujian

Pengujian pengendalian *shading* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengatur posisi penutup panel surya sesuai *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Pengujian dilaksanakan pada empat variasi *setpoint*, yaitu 20%, 40%, 60%, dan 80%. Pada setiap variasi *setpoint* dilakukan sepuluh kali pengujian yang terdiri atas dua kali pengujian pada lima variasi sudut

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

panel, yaitu 0° , 20° , 40° , 60° , dan 80° . Parameter yang diamati meliputi jumlah langkah motor stepper, waktu respon sistem, dan panjang penutup yang dihasilkan. Pengujian berulang dilakukan untuk mengetahui konsistensi kinerja sistem pada setiap variasi sudut panel.

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading 20%

Setpoint pengendalian shading 20%			
Angle ($^\circ$)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
0°	49,181	23.80	21
	49,181	23.62	21
20°	49,181	23.68	21
	49,181	23.65	21
40°	49,181	23.70	21
	49,181	23.65	21
60°	49,181	23.78	21
	49,181	23.63	21
80°	49,181	23.75	21
	49,181	23.76	21

Berdasarkan Tabel 4.2, pengujian pada *setpoint shading* 20% menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai posisi yang telah ditentukan pada seluruh variasi sudut panel. Jumlah langkah motor tetap sebesar 49.181 step dengan panjang penutup sebesar 21 cm pada setiap pengujian. Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan sudut panel tidak memengaruhi mekanisme pengendalian *shading* karena motor stepper hanya menggerakkan mekanisme penutup sesuai posisi yang telah dikalibrasi. Waktu respon berada pada rentang 23,62–23,80 detik. Perbedaan waktu yang relatif kecil disebabkan oleh proses pencatatan menggunakan *stopwatch* manual sehingga terdapat variasi akibat waktu reaksi operator. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik pengendalian yang stabil dan mampu menghasilkan posisi *shading* yang konsisten.

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading 40%

Setpoint pengendalian shading 40%			
Angle ($^\circ$)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
0°	104,864	71.56	59
	104,864	71.48	59



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 4 Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading 40%

Setpoint pengendalian shading 40%			
Angle (°)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
20°	104,864	71.63	59
	104,864	71.51	59
40°	104,864	71.59	59
	104,864	71.66	59
60°	104,864	71.54	59
	104,864	71.60	59
80°	104,864	71.57	59
	104,864	71.64	59

Selanjutnya, pengujian dilakukan pada setpoint shading sebesar 40% seperti yang disajikan pada Tabel 4.3. Pada kondisi ini motor stepper bergerak sebanyak 104.864 step sehingga menghasilkan panjang penutup 59 cm pada seluruh pengujian. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa perubahan sudut panel tetap tidak memberikan pengaruh terhadap posisi *shading* yang dihasilkan. Rentang waktu respon yang diperoleh berada pada 71,48–71,66 detik. Variasi waktu yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kinerja yang konsisten meskipun lintasan perpindahan mekanisme *shading* lebih panjang dibandingkan pengujian sebelumnya.

Tabel 4. 5 Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading 60%

Setpoint pengendalian shading 60%			
Angle (°)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
0°	160,474	107.40	87
	160,474	107.33	87
20°	160,474	107.48	87
	160,474	107.36	87
40°	160,474	107.44	87
	160,474	107.52	87
60°	160,474	107.38	87
	160,474	107.46	87
80°	160,474	107.41	87
	160,474	107.49	87

Pengujian kemudian dilanjutkan pada setpoint shading sebesar 60% sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.4. Jumlah langkah motor meningkat

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menjadi 160.474 step dengan panjang penutup 87 cm. Sama seperti pengujian sebelumnya, nilai tersebut tetap konstan pada seluruh variasi sudut panel sehingga menunjukkan bahwa mekanisme *shading* bekerja secara independen terhadap perubahan sudut kemiringan panel.

Sementara itu, waktu respon berada pada rentang 107,33–107,52 detik. Perbedaan waktu antar pengujian masih relatif kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem tetap memiliki tingkat konsistensi yang baik pada lintasan perpindahan yang lebih panjang.

Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading 80%

Setpoint pengendalian shading 80%			
Angle (°)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
0°	215,332	140.24	133
	215,332	140.18	133
20°	215,332	140.31	133
	215,332	140.22	133
40°	215,332	140.29	133
	215,332	140.35	133
60°	215,332	140.28	133
	215,332	140.21	133
80°	215,332	140.26	133
	215,332	140.33	133

Pengujian terakhir dilakukan pada setpoint shading sebesar 80%, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.5. Pada kondisi ini motor stepper memerlukan 215.332 step untuk menghasilkan panjang penutup 133 cm. Seluruh hasil pengujian menunjukkan nilai yang sama untuk jumlah langkah motor maupun panjang penutup pada setiap variasi sudut panel.

Adapun waktu respon sistem berada pada rentang 140,18–140,35 detik. Variasi waktu yang terjadi masih berada pada kisaran yang sangat kecil dan dipengaruhi oleh proses pengukuran menggunakan *stopwatch* manual. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem tetap mampu bekerja secara stabil meskipun mekanisme *shading* menempuh lintasan perpindahan paling panjang.



Tabel 4. 6 Rata-Rata Data Hasil Pengujian Pengendalian Shading

Setpoint (%)	Step Motor	Waktu Respon (s)	Panjang Penutup (cm)
0	0	0,00	0,0
20	49.181	23,70	21
40	104.864	71,58	59
60	160.474	107,43	87
80	215.332	140,27	133

Berdasarkan Tabel 4.6, hasil rata-rata pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian *shading* mampu mencapai seluruh *setpoint* yang diberikan melalui HMI Nextion, yaitu sebesar 20%, 40%, 60%, dan 80%. Nilai rata-rata diperoleh dari sepuluh kali pengujian pada setiap *setpoint* yang dilakukan pada lima variasi sudut panel, yaitu 0°, 20°, 40°, 60°, dan 80°. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ESP32-S3 mampu mengendalikan motor stepper NEMA23 untuk menggerakkan mekanisme *shading* sesuai posisi yang telah ditentukan melalui proses kalibrasi pada tahap perancangan sistem.

Pada penelitian ini, mekanisme *shading* memiliki panjang lintasan maksimum sekitar 138 cm. Seiring dengan meningkatnya nilai *setpoint*, panjang penutup yang dihasilkan juga mengalami peningkatan, yaitu 21 cm pada *setpoint* 20%, 59 cm pada *setpoint* 40%, 87 cm pada *setpoint* 60%, dan 133 cm pada *setpoint* 80%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme *shading* mampu menghasilkan variasi tingkat penutupan panel secara bertahap sesuai dengan nilai *setpoint* yang diberikan. Selain itu, hasil pengujian pada berbagai variasi sudut panel menunjukkan bahwa perubahan sudut tidak memengaruhi panjang penutup yang dihasilkan, sehingga mekanisme *shading* bekerja secara independen terhadap mekanisme pengaturan sudut panel.

Peningkatan *setpoint shading* juga diikuti oleh bertambahnya jumlah langkah motor stepper. Pada *setpoint* 20% motor bergerak sebanyak 49.181 step, kemudian meningkat menjadi 104.864 step pada *setpoint* 40%, 160.474 step pada *setpoint* 60%, dan 215.332 step pada *setpoint* 80%. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tingkat *shading* yang diinginkan, maka semakin besar pula jumlah pulsa yang dikirimkan oleh ESP32-S3 kepada driver TB6600 sehingga motor

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

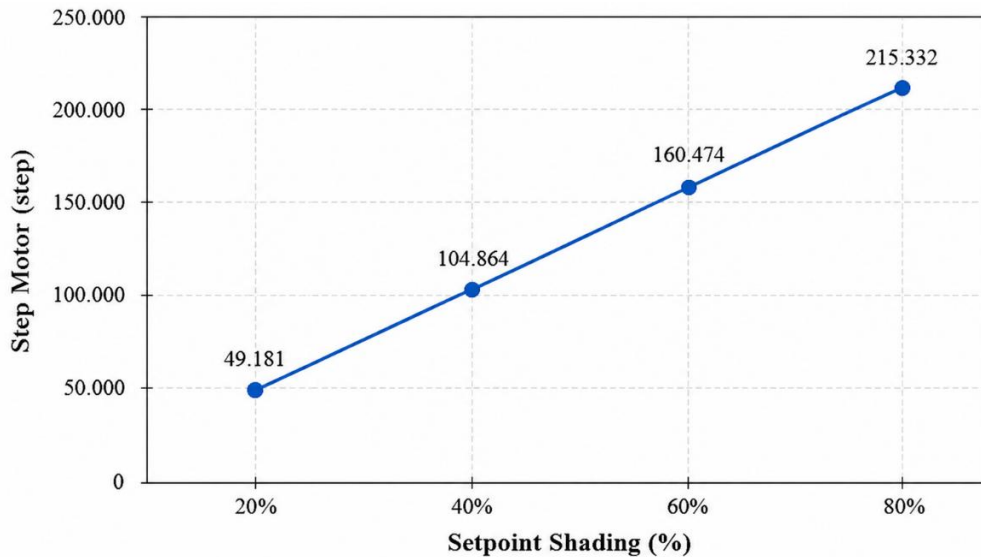
stepper harus berputar lebih jauh untuk mencapai posisi target. Peningkatan jumlah langkah motor tersebut juga sebanding dengan bertambahnya panjang lintasan mekanisme *shading*.

Selain perubahan jumlah langkah motor, waktu respon sistem juga meningkat seiring bertambahnya nilai *setpoint*. Berdasarkan hasil rata-rata pengujian diperoleh waktu respon sebesar 23,70 detik pada *setpoint* 20%, 71,58 detik pada *setpoint* 40%, 107,43 detik pada *setpoint* 60%, dan 140,27 detik pada *setpoint* 80%. Peningkatan waktu respon ini menunjukkan bahwa semakin besar perpindahan mekanisme *shading*, semakin lama waktu yang dibutuhkan motor stepper untuk mencapai posisi tujuan. Meskipun demikian, hasil pengujian berulang pada setiap variasi sudut menunjukkan bahwa perbedaan waktu respon antar pengujian relatif kecil. Variasi tersebut disebabkan oleh proses pengukuran menggunakan *stopwatch* manual sehingga dipengaruhi oleh waktu reaksi operator, bukan oleh perubahan karakteristik sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem mampu merealisasikan seluruh *setpoint shading* secara konsisten pada setiap pengulangan pengujian. Tidak ditemukan perubahan jumlah langkah motor maupun panjang penutup pada variasi sudut panel yang berbeda, sedangkan fluktuasi waktu respon masih berada pada rentang yang kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses kalibrasi posisi, pengendalian motor stepper, serta komunikasi antara HMI Nextion dan ESP32-S3 telah bekerja sesuai dengan rancangan, sehingga *smart shading system* dapat digunakan sebagai media praktikum untuk mensimulasikan kondisi *partial shading* secara terukur, konsisten, dan berulang.

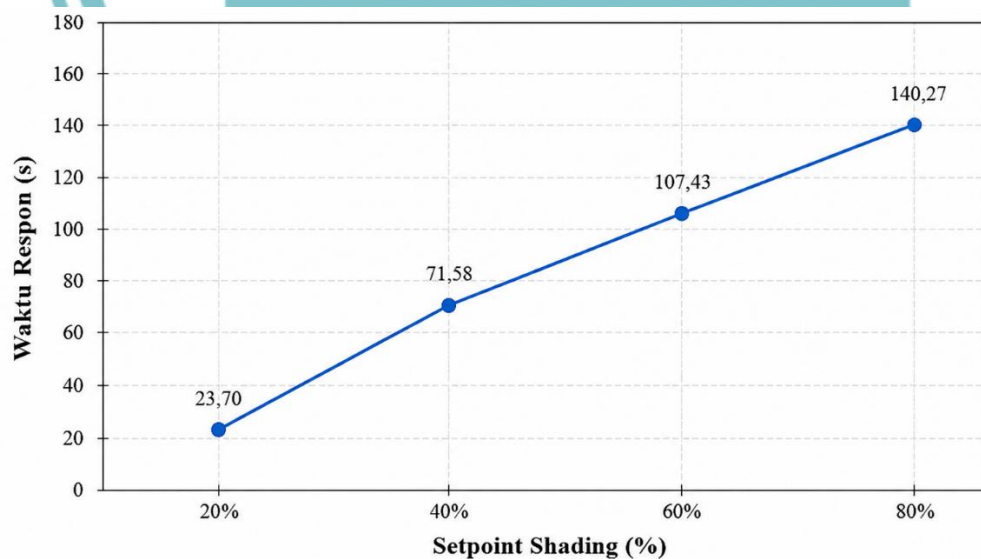
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Setpoint Shading terhadap Step Motor

Grafik pada Gambar 4.12 menunjukkan bahwa jumlah langkah motor stepper meningkat seiring dengan bertambahnya nilai *setpoint shading*. Hubungan tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar tingkat *shading* yang diinginkan, semakin jauh perpindahan mekanisme penutup panel sehingga jumlah langkah motor yang diperlukan juga semakin besar. Pola peningkatan ini menunjukkan bahwa hasil kalibrasi posisi pada mekanisme *shading* telah diterapkan dengan baik dan menghasilkan hubungan yang konsisten antara *setpoint* dan perpindahan motor.



Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Setpoint Shading terhadap Waktu Respon



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Grafik pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa waktu respon sistem mengalami peningkatan seiring bertambahnya nilai *setpoint shading*. Rata-rata waktu respon meningkat dari 23,70 detik pada *setpoint* 20% menjadi 140,27 detik pada *setpoint* 80%. Kondisi ini menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan motor stepper untuk mencapai posisi tujuan dipengaruhi oleh panjang lintasan yang harus ditempuh. Meskipun waktu respon meningkat, hasil pengujian berulang memperlihatkan bahwa variasi waktu pada setiap *setpoint* relatif kecil sehingga sistem tetap memiliki karakteristik pergerakan yang stabil dan konsisten

4.2.4 Analisis Data / Evaluasi

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, sistem pengendalian shading berhasil mencapai seluruh *setpoint* yang diberikan, yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%, dengan tingkat keberhasilan 100%. Hal ini menunjukkan bahwa ESP32-S3 mampu mengendalikan motor stepper NEMA23 sehingga mekanisme shading berpindah menuju posisi yang telah dikalibrasi tanpa terjadi *lost step* maupun kegagalan perpindahan.

Jumlah langkah motor meningkat seiring bertambahnya nilai *setpoint shading*. Pada *setpoint* 20% diperlukan 49.181 step, sedangkan pada *setpoint* 80% meningkat menjadi 215.332 step. Dengan panjang lintasan mekanisme shading sebesar 138 cm, peningkatan jumlah langkah tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan perpindahan posisi secara proporsional terhadap persentase shading yang diinginkan. Hubungan tersebut juga terlihat pada Gambar 4.2, dimana semakin besar *setpoint shading* maka semakin besar jumlah langkah motor yang diperlukan.

Berdasarkan Gambar 4.3, waktu respon sistem berada pada rentang 27,84–28,35 detik. Perbedaan waktu respon yang relatif kecil menunjukkan bahwa kecepatan motor stepper cenderung stabil pada setiap variasi *setpoint*. Kondisi ini dipengaruhi oleh penggunaan nilai *step delay* yang tetap pada program ESP32-S3 sehingga frekuensi pulsa yang dikirimkan ke *driver* TB6600 relatif konstan.

Selain itu, mekanisme belt dan roller memiliki beban yang relatif seragam sehingga motor stepper bekerja pada kondisi yang stabil selama proses pengujian.

Tidak ditemukannya kehilangan langkah maupun getaran berlebih menunjukkan bahwa torsi motor NEMA23 mencukupi untuk menggerakkan mekanisme shading.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian shading telah bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem mampu mencapai seluruh setpoint secara akurat, memiliki karakteristik respon yang stabil, dan mampu mensimulasikan berbagai tingkat *partial shading* secara konsisten sehingga layak digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS.

4.3. Pengujian Pengendalian Arah Panel surya

4.3.1. Deskripsi Pengujian

Pengujian pengendalian arah panel surya dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menggerakkan orientasi panel surya menggunakan motor *stepper* NEMA23 melalui perintah yang diberikan pada HMI Nextion. Pengaturan arah panel merupakan salah satu fungsi utama pada *smart shading system* karena memungkinkan panel surya diposisikan sesuai kebutuhan praktikum pembelajaran PLTS

Pada penelitian ini, pengendalian arah dilakukan secara manual menggunakan tiga tombol pada HMI Nextion, yaitu tombol Kanan, Kiri, dan Stop. Tombol Kanan digunakan untuk menggerakkan panel ke arah kanan, tombol Kiri digunakan untuk menggerakkan panel ke arah kiri, sedangkan tombol *Stop* digunakan untuk menghentikan pergerakan panel ketika posisi yang diinginkan telah tercapai. Posisi akhir panel mengacu pada hasil kalibrasi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu Utara, Barat, Selatan, dan Timur.

Sebagai acuan pengendalian, sistem menggunakan posisi 0° sebagai referensi internal berdasarkan hasil kalibrasi mekanisme alat. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa posisi referensi tersebut memiliki penyimpangan sekitar 7° terhadap arah Utara sebenarnya berdasarkan pengukuran menggunakan kompas. Penyimpangan tersebut disebabkan oleh keterbatasan pembacaan sensor MPU6050 yang tidak dilengkapi magnetometer serta adanya fluktuasi nilai sudut akibat karakteristik sensor dan kondisi mekanik sistem. Meskipun demikian, kondisi tersebut tidak memengaruhi proses pengendalian arah panel karena seluruh perpindahan posisi mengacu pada referensi internal yang sama.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pengujian dilakukan dengan menggerakkan panel menuju masing-masing arah hasil kalibrasi, kemudian mencatat jumlah langkah (*step*) motor stepper yang diperlukan serta waktu respon sistem. Waktu respon diukur menggunakan *stopwatch*, yaitu sejak tombol pada HMI ditekan hingga panel berhenti pada posisi tujuan.

4.3.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pengendalian arah panel surya dilakukan sebagai berikut:

1. Menyalakan *smart shading system*.
2. Memastikan posisi awal panel berada pada posisi referensi (Utara).
3. Memberikan *setpoint* arah panel melalui HMI *Nextion*.
4. Mengamati pergerakan motor *stepper* hingga panel mencapai posisi tujuan.
5. Mencatat jumlah langkah motor yang digunakan.
6. Mengukur waktu respon sistem.
7. Mengulangi pengujian untuk seluruh variasi arah panel.
8. Mendokumentasikan hasil pengujian.

4.3.3. Data Hasil Pengujian

Pengujian pengendalian arah panel surya dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menggerakkan panel menuju posisi hasil kalibrasi sesuai perintah yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Pengujian dilakukan pada empat variasi arah panel, yaitu Utara, Barat, Selatan, dan Timur. Setiap variasi arah diuji sebanyak 10 kali pengulangan, kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk memperoleh data yang lebih representatif. Parameter yang diamati meliputi jumlah langkah (*step*) motor *stepper* dan waktu respon sistem. Hasil rata-rata pengujian pengendalian arah panel surya disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Pengendalian Arah Panel Surya

Arah Panel	Step Motor	Waktu Respon (s)	Pembacaan Sensor MPU6050 (°)	Keterangan
Utara	0	0,00	7°	Posisi referensi sistem
Barat	26	28,50	Fluktuatif	Pembacaan berubah-ubah



Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Pengendalian Arah Panel Surya

Arah Panel	Step Motor	Waktu Respon (s)	Pembacaan Sensor MPU6050 (°)	Keterangan
Selatan	53	29,28	Fluktuatif	Pembacaan berubah-ubah
Timur	78	28,32	Fluktuatif	Pembacaan berubah-ubah

Hasil pengujian menunjukkan bahwa posisi referensi Utara digunakan sebagai titik awal sistem sehingga motor stepper tidak melakukan perpindahan (*0 step*) dengan waktu respon 0,00 detik. Pada kondisi tersebut sensor MPU6050 menunjukkan pembacaan sekitar 7°, meskipun posisi tersebut telah ditetapkan sebagai 0° pada proses kalibrasi sistem. Perbedaan ini menunjukkan bahwa posisi referensi pada alat tidak sepenuhnya berimpit dengan arah Utara berdasarkan acuan kompas.

Selanjutnya, ketika panel digerakkan menuju posisi Barat, Selatan, dan Timur, jumlah langkah motor bertambah menjadi 26 step, 53 step, dan 78 step, dengan waktu respon rata-rata masing-masing sebesar 28,50 detik, 29,28 detik, dan 28,32 detik. Bertambahnya jumlah langkah motor menunjukkan bahwa semakin besar perpindahan posisi panel, semakin banyak pulsa yang dikirimkan oleh ESP32-S3 kepada driver TB6600 sehingga motor stepper harus berputar lebih jauh untuk mencapai posisi yang diinginkan.

Berbeda dengan jumlah langkah motor dan waktu respon yang menunjukkan hasil konsisten, pembacaan sensor MPU6050 pada arah Barat, Selatan, dan Timur tidak menghasilkan nilai yang tetap, melainkan cenderung berfluktuasi ketika panel mengalami perubahan posisi maupun getaran kecil. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik sensor MPU6050 yang tidak dilengkapi magnetometer sebagai acuan arah Utara absolut serta adanya pengaruh getaran mekanik dan distribusi beban panel pada mekanisme bagian atas.

Oleh karena itu, pada penelitian ini sensor MPU6050 tidak digunakan sebagai acuan utama dalam menentukan posisi arah panel, melainkan sebagai indikator pembacaan sudut selama proses pengujian. Pengendalian arah panel direalisasikan menggunakan metode manual melalui tombol Kanan, Kiri, dan *Stop* pada HMI Nextion, sehingga pengguna dapat menghentikan panel pada posisi yang diinginkan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

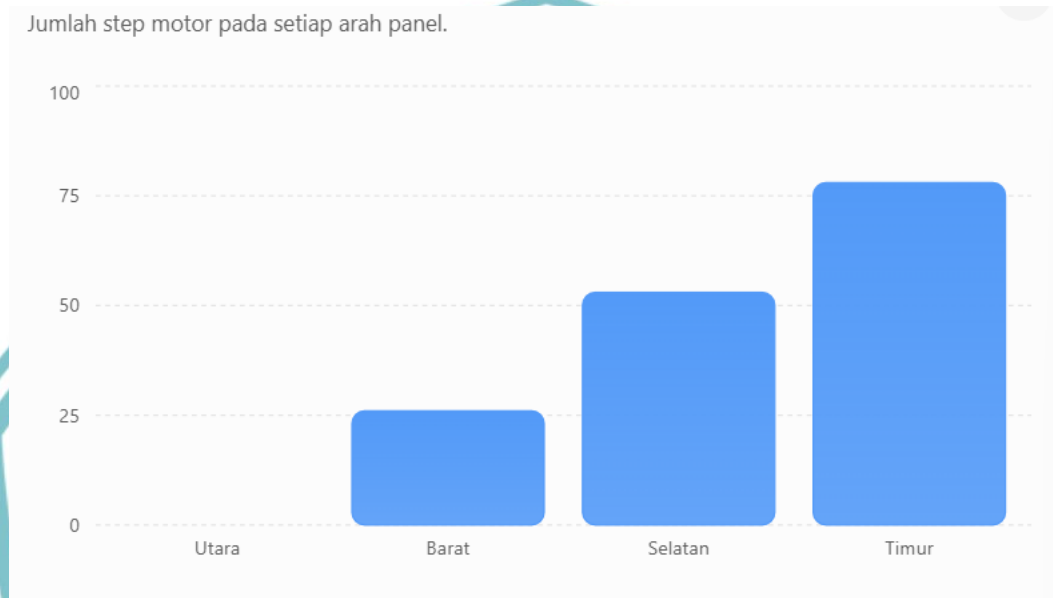
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

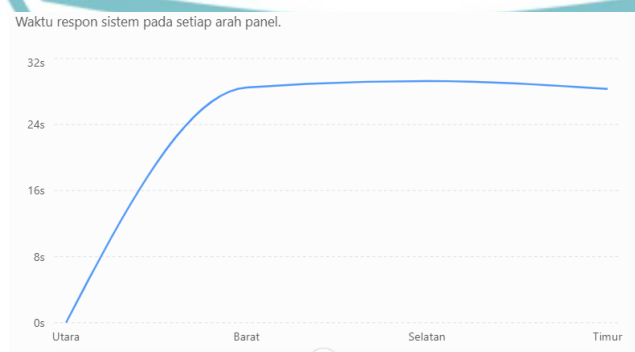
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

sesuai kebutuhan praktikum. Meskipun terdapat keterbatasan pada pembacaan sensor, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem tetap mampu menggerakkan panel dengan baik dan memberikan respon yang stabil pada setiap pengujian.



Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Arah Panel terhadap Step Motor

Grafik pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa jumlah langkah motor meningkat seiring bertambahnya perpindahan posisi panel dari titik referensi. Posisi referensi (Utara) tidak memerlukan perpindahan motor sehingga memiliki nilai 0 step, sedangkan perpindahan menuju Barat, Selatan, dan Timur masing-masing memerlukan 26 step, 53 step, dan 78 step. Hal tersebut menunjukkan bahwa ESP32-S3 mampu mengendalikan motor *stepper* secara bertahap sesuai arah putaran yang diberikan oleh pengguna melalui HMI *Nextion*.



Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Arah Panel terhadap Waktu Respon



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Grafik pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa waktu respon sistem berada pada rentang 28,32–29,28 detik untuk seluruh perpindahan arah panel. Nilai waktu respon terbesar diperoleh pada perpindahan menuju Selatan sebesar 29,28 detik, sedangkan waktu respon terkecil diperoleh pada perpindahan menuju Timur sebesar 28,32 detik. Selisih waktu respon yang relatif kecil menunjukkan bahwa motor stepper bekerja dengan kecepatan yang stabil selama proses perpindahan panel. Variasi waktu yang terjadi dipengaruhi oleh panjang lintasan perpindahan serta proses pengukuran menggunakan *stopwatch* manual.

4.3.4. Analisis Data / Evaluasi

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem mampu mengendalikan pergerakan arah panel surya melalui perintah Kanan, Kiri, dan *Stop* yang diberikan pada HMI *Nextion*. Setiap perintah berhasil diproses oleh ESP32-S3 dan diteruskan ke *driver* TB6600 sehingga motor *stepper* NEMA23 dapat menggerakkan panel sesuai arah putaran yang diinginkan pengguna. Hal ini menunjukkan bahwa komunikasi antara HMI *Nextion*, ESP32-S3, *driver* motor, dan motor *stepper* telah berjalan dengan baik.

Ditinjau dari jumlah langkah motor, perpindahan panel memerlukan 0 *step* pada posisi awal, kemudian meningkat menjadi 26 *step*, 53 *step*, dan 78 *step* untuk perpindahan panel yang lebih jauh. Peningkatan jumlah langkah tersebut menunjukkan bahwa semakin besar perpindahan posisi panel, semakin banyak pulsa yang dikirimkan oleh ESP32-S3 kepada *driver* TB6600. Dengan demikian, motor *stepper* mampu menggerakkan mekanisme *gear* secara bertahap dan menghasilkan perpindahan panel yang stabil.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa waktu respon sistem berada pada rentang 28,32–29,28 detik. Selisih waktu respon yang relatif kecil menunjukkan bahwa motor stepper bekerja dengan kecepatan yang stabil selama proses perpindahan panel. Perbedaan waktu yang terjadi dipengaruhi oleh panjang lintasan perpindahan motor serta proses pengukuran menggunakan *stopwatch* secara manual.

Selain parameter tersebut, hasil pengamatan menunjukkan bahwa pembacaan sensor MPU6050 masih mengalami fluktuasi ketika panel bergerak maupun saat

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

berada pada posisi tertentu. Pada posisi referensi sistem yang ditetapkan sebagai 0° , sensor menunjukkan pembacaan sekitar 7° terhadap arah Utara berdasarkan kompas. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh keterbatasan sensor MPU6050 yang tidak dilengkapi magnetometer sebagai acuan arah Utara absolut serta adanya pengaruh getaran mekanik dan distribusi beban panel yang belum sepenuhnya seimbang. Oleh karena itu, sensor MPU6050 pada penelitian ini digunakan sebagai indikator pembacaan sudut, sedangkan pengendalian arah panel direalisasikan secara manual menggunakan tombol Kanan, Kiri, dan *Stop* pada HMI Nextion.

Selama proses pengujian tidak ditemukan *lost step*, kegagalan putaran motor, maupun gangguan pada mekanisme gear yang menyebabkan panel tidak dapat bergerak sesuai perintah pengguna. Hal tersebut menunjukkan bahwa motor *stepper* NEMA23 dan mekanisme *gear* memiliki kemampuan yang memadai untuk menggerakkan panel surya pada *smart shading system*.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian arah panel telah berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian. Meskipun pembacaan sudut menggunakan sensor MPU6050 masih memiliki keterbatasan, sistem tetap mampu menggerakkan panel secara stabil melalui pengendalian manual. Dengan demikian, fungsi pengendalian arah pada *Smart Shading System* dapat digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS untuk mengatur orientasi panel surya sesuai kebutuhan pengujian.

4.4. Pengujian Pengendalian Sudut Kemiringan Panel Surya

4.4.1. Deskripsi Pengujian

Pengujian pengendalian sudut kemiringan panel surya dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengatur posisi kemiringan panel sesuai dengan *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Pengaturan sudut panel pada penelitian ini menggunakan aktuator linear HARL1834 yang dikendalikan oleh ESP32-S3. Untuk mengetahui posisi aktual panel, sistem memanfaatkan sensor MPU6050 sebagai umpan balik sehingga perubahan sudut dapat dipantau secara realtime.

Pengujian dilakukan pada variasi *setpoint* sudut kemiringan, yaitu 0° , 20° , 40° , dan 60° . Pemilihan variasi sudut tersebut bertujuan untuk mewakili perubahan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kemiringan panel pada kondisi rendah, sedang, dan tinggi. Parameter yang diamati pada pengujian ini meliputi sudut aktual yang dicapai sistem, nilai error antara *setpoint* dan sudut aktual, serta waktu respon yang diperlukan sistem untuk mencapai posisi tujuan.

Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi aktuator linear dan sensor MPU6050 dalam mengatur sudut kemiringan panel surya. Selain itu, pengujian ini juga dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu mencapai posisi yang diinginkan secara konsisten dan berulang.

4.4.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pengendalian sudut kemiringan panel surya dilakukan sebagai berikut:

1. Menyalakan *smart shading system*.
2. Memastikan seluruh komponen sistem beroperasi dengan baik.
3. Memberikan *setpoint* sudut kemiringan melalui HMI *Nextion*.
4. Mengamati pergerakan aktuator linear hingga panel mencapai posisi tujuan.
5. Mencatat nilai sudut aktual yang dibaca oleh sensor MPU6050.
6. Menghitung nilai error antara *setpoint* dan sudut aktual.
7. Mengukur waktu respon sistem.
8. Mengulangi pengujian untuk seluruh variasi sudut yang telah ditentukan.
9. Mendokumentasikan hasil pengujian.

4.4.3. Data Hasil Pengujian

Tabel 4. 9 Data Hasil Pengujian Pengendalian Sudut Kemiringan Panel Surya

Set Point (°)	Sudut Aktual (°)	Error (°)	Waktu Respon (s)
20	19,7	0,3	7,74
40	39,4	0,6	7,44
60	59,2	0,8	6,48

Berdasarkan Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa sistem mampu mencapai seluruh *setpoint* sudut yang diberikan dengan selisih yang relatif kecil terhadap posisi aktual. Pada *setpoint* 20° diperoleh sudut aktual sebesar 19,7° dengan error 0,3°.

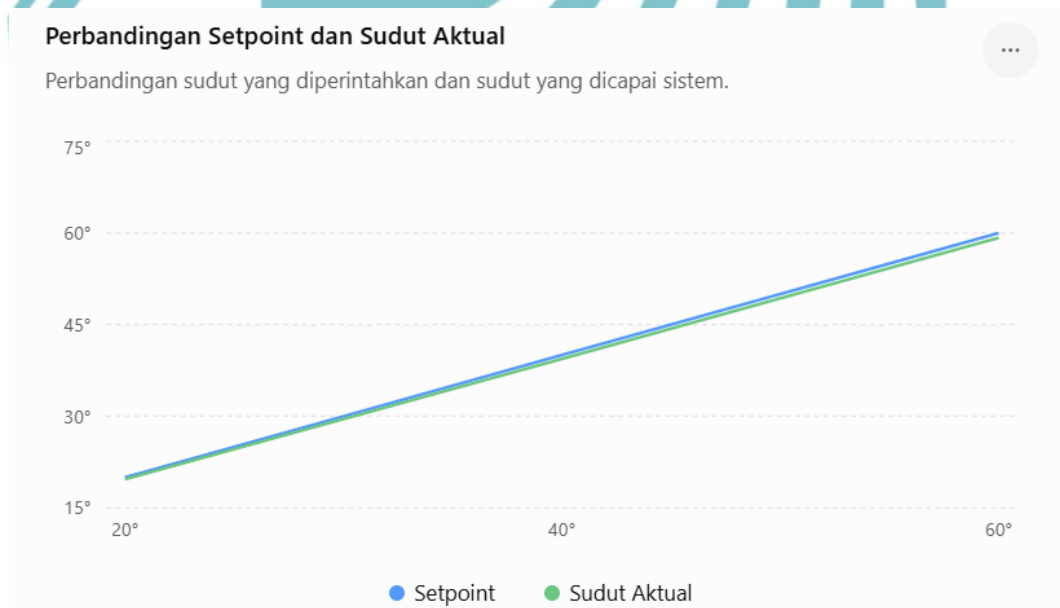
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada *setpoint* 40° diperoleh sudut aktual sebesar 39,4° dengan error 0,6°, sedangkan pada *setpoint* 60° diperoleh sudut aktual sebesar 59,2° dengan error 0,8°.

Nilai error yang diperoleh menunjukkan adanya selisih kecil antara sudut yang diperintahkan dengan sudut aktual yang dicapai sistem. Meskipun demikian, seluruh nilai error masih berada di bawah 1°, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengatur sudut kemiringan panel surya.

Jika ditinjau dari waktu respon sistem, terlihat bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai posisi tujuan berada pada rentang 6,48 detik hingga 7,74 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktuator linear mampu merespon perubahan *setpoint* dengan cukup cepat dan stabil.



Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Setpoint dan Sudut Aktual

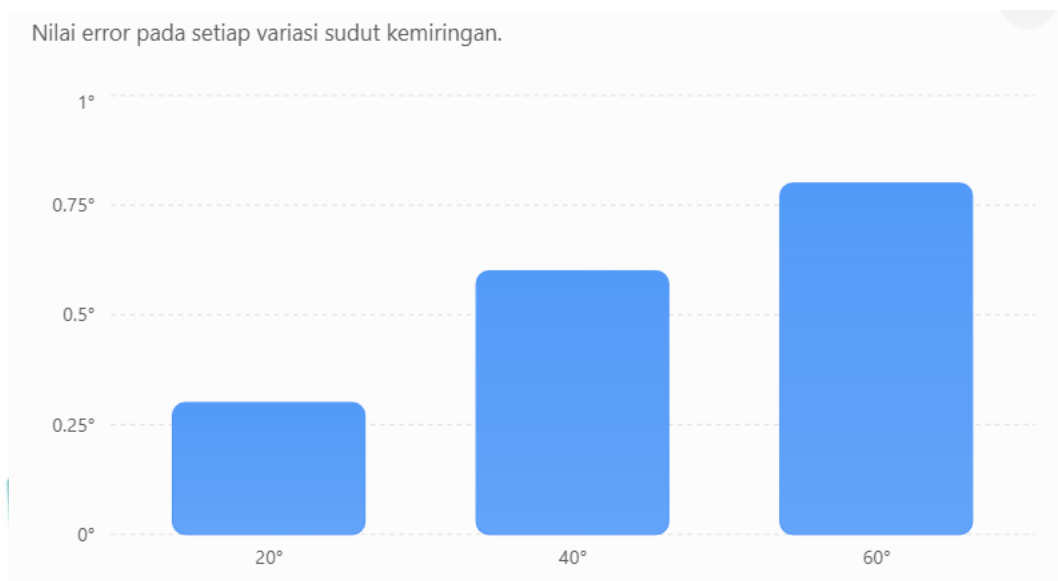
Berdasarkan Gambar 4.16 terlihat bahwa nilai sudut aktual memiliki pola yang hampir sama dengan nilai *setpoint* yang diberikan. Seluruh titik pengukuran menunjukkan kedekatan antara nilai *setpoint* dan nilai aktual, sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti perintah yang diberikan dengan baik.

Perbedaan yang muncul pada setiap pengujian relatif kecil dan tidak menunjukkan penyimpangan yang signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

aktuator linear dan sensor MPU6050 mampu bekerja secara sinkron dalam mengatur posisi kemiringan panel.



Gambar 4. 17 Grafik Error Sudut Kemiringan Panel

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa nilai error cenderung meningkat seiring bertambahnya sudut kemiringan yang diberikan. Error terkecil terjadi pada *setpoint* 20° yaitu sebesar 0,3°, sedangkan error terbesar terjadi pada *setpoint* 60° yaitu sebesar 0,8°.

Peningkatan error tersebut dapat disebabkan oleh toleransi mekanik aktuator linear, kelonggaran sambungan mekanik, serta karakteristik pembacaan sensor MPU6050. Meskipun demikian, nilai error yang diperoleh masih tergolong kecil sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem secara keseluruhan.

4.4.4. Analisis Data / Evaluasi

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem pengendalian sudut kemiringan panel surya berhasil mencapai seluruh *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Aktuator linear HARL1834 mampu menggerakkan panel menuju posisi tujuan dengan baik, sedangkan sensor MPU6050 mampu memberikan informasi posisi aktual yang digunakan sebagai indikator keberhasilan pengendalian.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Apabila ditinjau dari nilai error yang diperoleh, terlihat bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang cukup baik. Nilai error terbesar yang diperoleh hanya sebesar $0,8^\circ$ pada *setpoint* 60° . Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk kebutuhan praktikum pembelajaran PLTS. Dengan demikian, sistem dapat dikatakan mampu merepresentasikan sudut kemiringan panel sesuai dengan kondisi yang diinginkan pengguna.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan cenderung menyebabkan peningkatan nilai error. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh faktor mekanik, seperti kelonggaran sambungan aktuator, perubahan distribusi beban panel, serta karakteristik gerakan aktuator linear pada posisi tertentu. Selain itu, pembacaan sensor MPU6050 yang dipengaruhi oleh getaran mekanik juga dapat menyebabkan perbedaan kecil antara nilai *setpoint* dan nilai aktual.

Dari sisi waktu respon, sistem menunjukkan performa yang cukup baik dengan waktu perpindahan kurang dari 8 detik pada seluruh variasi pengujian. Waktu respon tersebut lebih cepat dibandingkan pengendalian *shading* maupun pengendalian arah panel surya karena mekanisme aktuator linear hanya melakukan perubahan posisi pada satu sumbu gerak.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian sudut kemiringan panel surya telah bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem mampu mencapai posisi yang diinginkan dengan tingkat akurasi yang baik, respon yang relatif cepat, serta kestabilan yang memadai untuk digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS.

4.5. Evaluasi Kinerja Sistem Kontrol *Smart Shading System*

4.5.1. Evaluasi Ketepatan Pengendalian Sistem

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada pengendalian *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel, sistem menunjukkan kemampuan yang baik dalam mencapai *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*. Seluruh perintah yang diberikan pengguna dapat diterjemahkan oleh ESP32-S3 menjadi sinyal kendali yang sesuai sehingga aktuator mampu bergerak menuju posisi yang ditentukan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada pengujian pengendalian *shading*, sistem berhasil mencapai seluruh variasi *setpoint* yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jumlah langkah motor *stepper* meningkat seiring bertambahnya nilai *shading* yang diberikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses kalibrasi posisi *shading* telah berhasil diterapkan pada sistem sehingga setiap perubahan *setpoint* dapat menghasilkan perpindahan mekanisme yang sesuai.

Pada pengujian arah panel surya, sistem juga mampu mengubah orientasi panel menuju posisi Utara, Barat, Selatan, dan Timur sesuai dengan *setpoint* yang diberikan. Seluruh perpindahan posisi dapat dilakukan tanpa ditemukan kehilangan langkah motor maupun kegagalan perpindahan arah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa motor *stepper* dan mekanisme *Gear* yang digunakan memiliki kemampuan yang memadai untuk menggerakkan panel surya secara terkontrol.

Sementara itu, pada pengujian sudut kemiringan panel, diperoleh nilai error maksimum sebesar 0,8°. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengatur posisi panel surya. Error yang muncul masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk kebutuhan praktikum pembelajaran PLTS sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap fungsi sistem secara keseluruhan.

Secara umum, seluruh fungsi pengendalian yang dikembangkan pada penelitian ini mampu bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kebutuhan sebagai media praktikum yang mampu mensimulasikan berbagai kondisi operasi panel surya secara terukur.

4.5.2. Evaluasi Waktu Respon Sistem

Waktu respon merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem kontrol. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa waktu respon pengendalian *shading* berada pada rentang 27 hingga 28 detik. Nilai tersebut relatif stabil pada seluruh variasi *setpoint* yang diberikan. Stabilitas waktu respon menunjukkan bahwa motor *stepper* bekerja dengan kecepatan yang konsisten selama proses perpindahan posisi.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Pada pengujian arah panel surya, waktu respon yang diperoleh berada pada rentang 28 hingga 29 detik. Meskipun terjadi perubahan arah panel yang berbeda-beda, sistem tetap mampu mempertahankan karakteristik respon yang relatif seragam. Hal tersebut menunjukkan bahwa metode pengendalian yang diterapkan pada ESP32-S3 mampu menghasilkan pergerakan motor yang stabil.

Berbeda dengan pengendalian *shading* dan arah panel, pengendalian sudut kemiringan panel menggunakan aktuator linear HARL1834 menghasilkan waktu respon yang lebih cepat, yaitu berada pada rentang 6 hingga 8 detik. Perbedaan tersebut disebabkan oleh karakteristik aktuator linear yang memiliki mekanisme gerak berbeda dibandingkan motor *stepper* yang digunakan pada pengendalian *shading* dan arah panel.

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem memiliki karakteristik respon yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan praktikum. Seluruh aktuator mampu merespon perintah yang diberikan tanpa mengalami keterlambatan yang berlebihan maupun kegagalan operasi.

4.5.3. Evaluasi Integrasi Sistem

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah mengintegrasikan ESP32-S3, HMI *Nextion*, motor *stepper* NEMA23, aktuator linear HARL1834, dan sensor MPU6050 ke dalam satu sistem kontrol yang terintegrasi. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, seluruh komponen berhasil bekerja secara sinkron dan mampu menjalankan fungsi masing-masing sesuai dengan perancangan.

Komunikasi antara HMI *Nextion* dan ESP32-S3 berjalan dengan baik selama proses pengujian. Setiap perintah yang diberikan melalui layar sentuh HMI dapat diterima dan diproses oleh ESP32-S3 tanpa ditemukan kesalahan komunikasi. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi komunikasi serial yang digunakan telah mampu mendukung kebutuhan sistem.

Selain itu, ESP32-S3 juga mampu mengendalikan dua motor *stepper* dan satu aktuator linear secara bergantian sesuai dengan *setpoint* yang diberikan pengguna. Sensor MPU6050 yang digunakan sebagai indikator posisi sudut panel juga mampu



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

memberikan informasi posisi aktual yang diperlukan untuk proses *monitoring* sistem.

Keberhasilan integrasi seluruh komponen tersebut menunjukkan bahwa rancangan sistem kontrol yang dikembangkan telah mampu memenuhi kebutuhan operasional *smart shading* system secara keseluruhan.

4.5.4. Pembahasan Terhadap Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, rumusan masalah pertama mengenai perancangan *smart shading* system untuk praktikum pembelajaran PLTS telah berhasil dijawab melalui realisasi sistem yang terdiri dari subsistem mekanik, subsistem kelistrikan, dan subsistem kontrol berbasis ESP32-S3.

Rumusan masalah kedua mengenai pengendalian posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel juga telah berhasil dijawab melalui hasil pengujian yang menunjukkan bahwa seluruh aktuator mampu mencapai *setpoint* yang diberikan melalui HMI *Nextion*.

Rumusan masalah ketiga mengenai integrasi motor *stepper*, aktuator linear HARL1834, sensor MPU6050, dan HMI *Nextion* telah berhasil dibuktikan melalui keberhasilan komunikasi dan koordinasi seluruh komponen dalam satu sistem kontrol yang terintegrasi.

Rumusan masalah keempat mengenai evaluasi kinerja sistem telah dijawab melalui hasil pengujian yang menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keberhasilan pengendalian yang baik, waktu respon yang stabil, dan tingkat akurasi yang memadai untuk digunakan sebagai media praktikum pembelajaran PLTS.

4.5.5. Pembahasan Terhadap Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian pertama yaitu merancang dan mengimplementasikan *smart shading* system telah berhasil dicapai melalui realisasi alat yang terdiri dari mekanisme *shading*, pengatur arah panel, pengatur sudut kemiringan panel, serta sistem kontrol berbasis ESP32-S3.

Tujuan penelitian kedua yaitu mengendalikan posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel menggunakan ESP32-S3 telah berhasil dicapai

berdasarkan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa seluruh aktuator mampu merespon *setpoint* yang diberikan.

Tujuan penelitian ketiga yaitu mengintegrasikan motor *stepper*, aktuator linear HARL1834, sensor MPU6050, dan HMI *Nextion* juga telah berhasil dicapai. Seluruh perangkat dapat bekerja secara terintegrasi dan saling mendukung dalam menjalankan fungsi sistem.

Tujuan penelitian keempat yaitu mengevaluasi kinerja sistem berhasil dicapai melalui pengujian yang menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keberhasilan pengendalian yang baik, error sudut yang rendah, serta waktu respon yang relatif stabil pada seluruh variasi pengujian.

4.5.6. Evaluasi Akhir Sistem

Berdasarkan seluruh hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, *smart shading* system berbasis ESP32-S3 berhasil direalisasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem mampu mengendalikan posisi *shading*, arah panel surya, dan sudut kemiringan panel melalui HMI *Nextion* dengan tingkat keberhasilan yang baik.

Selain itu, integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak berjalan dengan baik sehingga seluruh komponen dapat bekerja secara sinkron dalam satu sistem kontrol. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik respon yang stabil dan tingkat akurasi yang memadai untuk kebutuhan praktikum pembelajaran PLTS.

Dengan demikian, *smart shading* system yang dikembangkan pada penelitian ini dapat digunakan sebagai media pembelajaran untuk mensimulasikan berbagai kondisi operasi panel surya, khususnya kondisi perubahan *shading*, arah panel, dan sudut kemiringan panel secara terukur dan berulang.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta