Automated Window Shade Control For Optimizing Indoor Light Intensity

Muhammad Faqih Ihamuddin
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
faqihilhamuddin@student.telkomuniveristy.ac.id

Intan Fatiha
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
pinkside@student.telkomuniveristy.ac.id

Refaldzah Ihtifazuddin Handoko
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
refaldz@student.telkomuniveristy.ac.id

Uke Kurniawan Usman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
ukeusaman@telkomuniversity.ac.id

Muhammad Irfan Maulana
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
muhammadirfanm@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Peningkatan kenyamanan visual dalam ruangan merupakan aspek penting dalam pengembangan bangunan cerdas, khususnya dalam pengelolaan cahaya alami. Intensitas cahaya yang tidak terkontrol dapat menimbulkan silau, meningkatkan suhu ruangan, serta menurunkan kenyamanan dan produktivitas pengguna. Namun, pengaturan tirai jendela pada umumnya masih dilakukan secara manual sehingga kurang efisien dan tidak adaptif terhadap perubahan kondisi pencahayaan secara real-time. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *Automated Window Shade Control* berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengatur intensitas cahaya alami secara otomatis. Metode yang digunakan meliputi pemanfaatan sensor cahaya BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya, sensor DHT22 untuk memantau suhu dan kelembapan, serta webcam yang terintegrasi dengan Raspberry Pi 4 untuk mendeteksi keberadaan manusia. Sistem dikendalikan oleh ESP32 yang mengatur motor stepper Nema 17 pada sudut 0°, 45°, dan 90°, serta terhubung dengan Firebase untuk pemantauan dan kontrol manual melalui aplikasi IoT. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu merespons perubahan kondisi dan perintah pengguna dengan delay 150 ms hingga 2 detik, serta tingkat keberhasilan fungsi di atas 90%. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan terbukti efektif dalam meningkatkan kenyamanan visual dan mendukung penerapan konsep *smart home*.*

Keywords: Internet of Things, light sensor, *smart home*, visual comfort, window shade

I. PENDAHULUAN

Kenyamanan visual merupakan faktor penting dalam bangunan modern karena memengaruhi produktivitas dan kenyamanan pengguna, di mana intensitas cahaya alami yang tidak terkontrol dapat menimbulkan ketidaknyamanan dan menurunkan kualitas aktivitas di dalam ruangan [1]. Selain itu, pengelolaan pencahayaan alami juga berperan dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan [2]. Namun, pengaturan tirai jendela masih banyak dilakukan secara manual sehingga kurang efisien dan tidak adaptif terhadap perubahan intensitas cahaya secara *real-time*[3].

Seiring perkembangan teknologi, berbagai sistem otomasi berbasis sensor telah dikembangkan untuk mengatur pencahayaan alami di dalam ruangan, memanfaatkan sensor cahaya sederhana seperti Light Dependent Resistor (LDR) serta sistem berbasis Real Time Clock (RTC) untuk mengatur waktu buka dan tutup tirai secara otomatis [3], [4]. Selain itu, teknologi *smart glass* juga dikembangkan untuk menyesuaikan tingkat transparansi kaca berdasarkan kondisi cahaya lingkungan [5]. Namun, solusi-solusi tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal akurasi pengukuran [3], fleksibilitas pengaturan, serta biaya implementasi yang relatif tinggi[4].

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem tirai otomatis yang mampu mengontrol intensitas cahaya dalam ruangan secara efektif dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan secara *real-time*. Kompleksitas permasalahan mencakup pemilihan sensor yang tepat, perancangan sistem mekanik penggerak tirai, serta pengembangan algoritma kontrol yang responsif dan andal [6].

Saat ini, solusi yang tersedia meliputi penggunaan s*mart glas*s yang mampu menyesuaikan transparansi secara otomatis [5], serta sistem tirai otomatis berbasis motor DC dan relay [3]. Namun, solusi tersebut masih memiliki keterbatasan berupa biaya implementasi yang tinggi, konsumsi daya yang besar, dan fleksibilitas pengaturan yang terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem tirai otomatis berbasis sensor cahaya yang lebih efisien, fleksibel, dan mudah diterapkan pada berbagai kondisi bangunan.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem tirai otomatis berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan sensor cahaya digital BH1750 dan mikrokontroler ESP32. Sistem yang dikembangkan bertujuan untuk meningkatkan kenyamanan visual pengguna, memberikan fleksibilitas kontrol manual dan otomatis, serta mendukung integrasi dengan sistem smart home secara lebih efisien dan akurat dibandingkan pendekatan sebelumnya [6].

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori ini membahas konsep dan komponen yang mendasari pengembangan sistem tirai otomatis berbasis Internet of Things (IoT), meliputi teknologi IoT, sensor,

mikrokontroler, aktuator, serta platform penyimpanan data daring yang digunakan dalam sistem.

A. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan perangkat fisik dengan jaringan internet sehingga memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem secara otomatis [7],[8]. Dalam penerapan *smart home*, IoT berperan memungkinkan sistem merespon perubahan kondisi lingkungan secara *real-time* tanpa interaksi manual [9].

B. Smart Home

Smart home adalah sistem yang mengintegrasikan perangkat elektronik rumah tangga agar dapat dikendalikan secara otomatis maupun jarak jauh melalui jaringan internet [9]. Sistem ini bertujuan meningkatkan kenyamanan, efisiensi energi, dan keamanan dengan memanfaatkan sensor serta antarmuka berbasis aplikasi atau web [9], [10]. Dalam penelitian ini, smart home berperan sebagai kerangka penerapan sistem pengendalian tirai otomatis berbasis IoT.

C. Sensor pada Smart Home

Sensor merupakan komponen utama dalam sistem smart home yang berfungsi mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik untuk diproses oleh sistem kendali [11]. Pemanfaatan sensor memungkinkan sistem beradaptasi secara otomatis terhadap perubahan kondisi lingkungan untuk meningkatkan efisiensi dan kenyamanan [11], [12].

i. Sensor Cahaya

Sensor cahaya berfungsi mengubah intensitas cahaya menjadi sinyal listrik [11]. Pada sistem *smart home*, sensor ini digunakan untuk mengatur pencahayaan, lampu, dan tirai otomatis. Contoh sensor cahaya yang umum digunakan adalah LDR, BH1750 [13], TSL2561, dan VEML7700.

ii. Sensor Suhu

Sensor suhu digunakan untuk mendeteksi suhu atau energi panas dan mengubahnya menjadi sinyal listrik [11]. Dalam smart home, sensor suhu dimanfaatkan untuk pemantauan suhu ruangan, suhu air, serta sebagai parameter pendukung sistem otomatis.

iii. Sensor Gerak

Sensor gerak berfungsi mendeteksi aktivitas fisik pada jarak tertentu [11]. Jenis sensor gerak meliputi PIR berbasis panas tubuh, sensor ultrasonik berbasis gelombang suara, dan sensor microwave berbasis gelombang elektromagnetik.

iv. Sensor Gas

Sensor gas digunakan untuk mendeteksi keberadaan dan konsentrasi gas tertentu di lingkungan [11]. Pada sistem smart home, sensor gas umumnya dikombinasikan dengan buzzer sebagai peringatan kebocoran gas.

v. Sensor Raindrop

Sensor raindrop atau sensor hujan merupakan perangkat switching yang mendeteksi keberadaan air hujan [12]. Dalam smart home, sensor ini digunakan pada jemuran otomatis untuk menggerakkan aktuator saat hujan terdeteksi.

D. Mikrokontroller

Mikrokontroler adalah sistem komputasi terintegrasi yang digunakan sebagai pusat kendali pada sistem otomasi dan IoT [14]. Perangkat seperti ESP32 mendukung komunikasi nirkabel sehingga sesuai untuk aplikasi IoT, sementara mikrokontroler lain seperti Arduino digunakan untuk aplikasi dengan kompleksitas lebih sederhana [14], [15]. Pemilihan mikrokontroler disesuaikan dengan kebutuhan pemrosesan dan konektivitas sistem.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan desain sistem dan eksperimental untuk membangun rancangan tirai otomatis berbasis Internet of Things (IoT). Proses penelitian dibagi menjadi beberapa tahap utama: analisis kebutuhan, perancangan sistem (*hardware* dan *software*), implementasi, dan pengujian sistem.

A. Desain Sistem

Gambar 1 menampilkan desain sistem tirai otomatis yang dipasang pada rel tirai bilah horizontal dan dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Sistem menggunakan motor stepper NEMA 17 sebagai aktuator penggerak tirai, dengan rangkaian kontrol yang ditempatkan pada kotak pelindung di bagian atas tirai. Bukaan tirai diatur dalam tiga posisi, yaitu tertutup (0°), terbuka sebagian (45°), dan terbuka penuh (90°), sesuai dengan tingkat pencahayaan. Sistem juga mendukung kontrol manual jarak jauh melalui koneksi Wi-Fi berbasis IoT.



GAMBAR 1
Desain Tirai jendela.

Gambar 2 menampilkan bagian dalam kotak kendali yang terdiri dari ESP32, sensor cahaya BH1750, sensor suhu dan kelembapan DHT22, webcam, serta mekanisme pulley. ESP32 memproses data sensor dan mengendalikan aktuator berdasarkan kondisi lingkungan, sedangkan webcam digunakan sebagai parameter tambahan untuk mendeteksi keberadaan manusia agar sistem bekerja lebih efisien

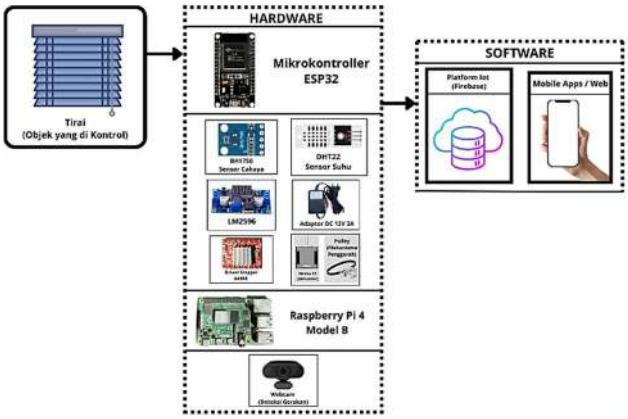


GAMBAR 2
Desain susunan komponen sistem IoT tirai otomatis.

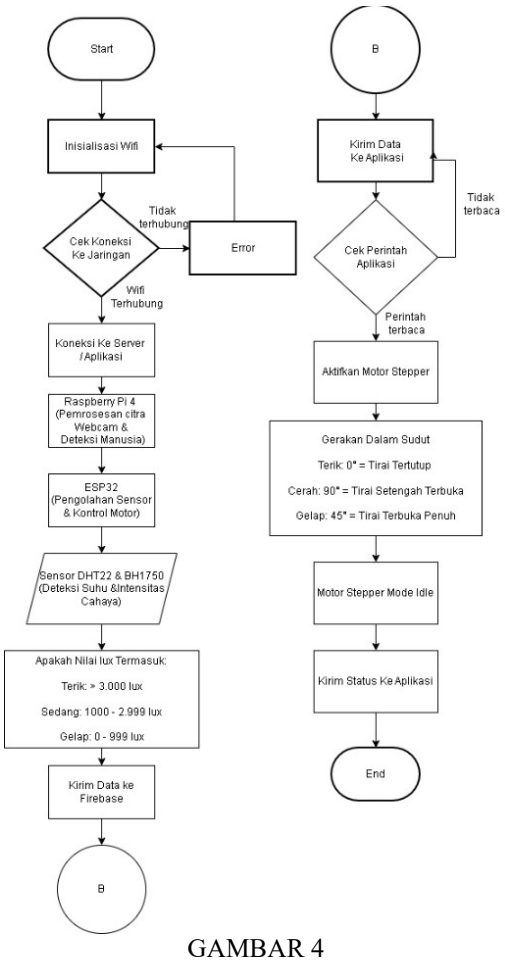
B. Perancangan Arsitektur Sistem

Sistem dirancang dengan arsitektur terintegrasi yang menggabungkan unit pengolah citra, unit kendali utama, dan platform cloud. Raspberry Pi 4 digunakan untuk menjalankan algoritma YOLOv5 dalam mendeteksi keberadaan manusia, sedangkan ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali sensor dan aktuator. Sensor BH1750 dan DHT22 digunakan untuk

memantau intensitas cahaya serta kondisi lingkungan, sementara motor stepper Nema 17 berperan sebagai aktuator tirai. Seluruh data dan perintah dikomunikasikan melalui Firebase Realtime Database secara real-time. Gambar 3 dan 4 menyajikan diagram blok dan flowchart sistem.



GAMBAR 3
Diagram blok sistem.



GAMBAR 4
Flowchart sistem.

C.Mikrokontroller ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang memiliki kemampuan pemrosesan data, komunikasi nirkabel Wi-Fi, serta konsumsi daya yang relatif rendah. Dalam sistem ini, ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang memproses data sensor dan mengatur pergerakan aktuator berdasarkan logika pengendalian yang telah ditentukan. Gambar 5 menampilkan Mikrokontroler ESP32 dan Tabel 1 menyajikan spesifikasi utama dari Mikrokontroler ESP32 [15].



GAMBAR 5
Mikrokontroller ESP32.

TABEL 1
Spesifikasi Mikrokontroller ESP32

Parameter	Nilai
Nomor Pin	30
Nama Pin	SD_CMD / GPIO11
Jenis Pin	I/O
Fungsi Utama	SD Card Command (SD_CMD)
Fungsi Alternatif	GPIO11
Power Domain	VDD_SDIO
Default Saat Reset	Pull-up aktif

D. Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4 merupakan single-board computer yang mendukung aplikasi dengan kebutuhan pemrosesan tinggi, seperti sistem IoT dan computer vision, melalui kemampuan komputasi serta antarmuka input/output yang fleksibel [16]. Pada sistem ini, Raspberry Pi 4 berfungsi sebagai unit pemrosesan kamera untuk mendeteksi keberadaan manusia di dalam ruangan sebagai parameter pendukung pengambilan keputusan pengoperasian tirai secara efisien, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 2 spesifikasi Raspberry Pi 4.



GAMBAR 6
Raspberry Pi 4.

TABEL 2
Spesifikasi Raspberry Pi 4

Parameter	Nilai
Model	Raspberry Pi 4 Model B
Prosesor	Quad-core 1.5 GHz
RAM	8 GB
Penyimpanan	MicroSD
Konektivitas	Wi-Fi, Bluetooth, Gigabit Ethernet
Port Utama	2× USB 3.0, 2× USB 2.0, 2× Micro HDMI
GPIO	Header 40 pin

Daya	USB-C 5V/3A

E. Webcam

Webcam digunakan sebagai perangkat pendeteksi keberadaan manusia dalam sistem pengendalian tirai otomatis berbasis Internet of Things (IoT). Kamera menangkap citra secara *real-time* dan hasilnya dianalisis untuk menentukan keberadaan manusia di dalam ruangan. Informasi ini digunakan sebagai parameter tambahan agar sistem hanya beroperasi saat ruangan digunakan, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan umur perangkat. Sistem ditunjukkan pada Gambar 7 dan Tabel 3 spesifikasi Webcam .



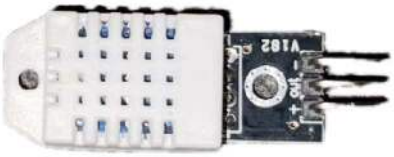
GAMBAR 7
Webcam

TABEL 3
Spesifikasi Webcam

Parameter	Spesifikasi
Model	Nemesis 2K Auto focus
Sensor	1/2.9" CMOS Image Sensor
Resolusi Rekaman	1080p/720p/480p/240p (30 fps)
Format Video	MJPEG, YUV
Effective Pixels	2.0 Megapixels
Jarak Fokus	0.3 m – 5 m
Sudut Pandang	65°
Minimum Illumination	≤5 lux
Mikrofon	Built-in stereo microphone
Input Daya	DC 5V 200 mA (Max)
Material	ABS
Temperatur Operasi	0°C – 45°C
Panjang Kabel USB	1.8 m
Ukuran	41 × 23.3 mm

F. Sensor DHT22

Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu ruangan pada rentang -40 °C hingga 80 °C serta kelembapan 0-100 %. Pada sistem ini, data suhu dan kelembapan berperan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan kondisi lingkungan selama proses pengujian sistem [17]. Gambar 8 dan Tabel 4 spesifikasi sensor DHT22.



GAMBAR 8
Sensor DHT22.

TABEL 4
Spesifikasi DHT22

Parameter	Spesifikasi
Model	DHT22 / AM2302
Catu daya	3,3 – 6 V DC
Output	Sinyal digital melalui single - bus
Elemen sensor	Kapasitor polimer
Rentang operasi	Kelembapan 0 – 100 %RH; Suhu −40 hingga 80 °C
Akurasi	Kelembapan ±2 %RH (maks. ±5 %RH); Suhu ±0,5 °C
Resolusi / sensitivitas	Kelembapan 0,1 %RH; Suhu 0,1 °C
Repeatabilitas	Kelembapan ±1 %RH; Suhu ±0,2 °C
Histeresis kelembapan	±0,3 %RH
Periode pengukuran	Rata-rata 2 detik

G. BH1750

BH1750 merupakan sensor cahaya digital yang mampu mengukur intensitas cahaya dalam rentang 1-65.535 lux dengan keluaran data digital berbasis I2C [18]. Pada sistem ini, nilai lux digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan posisi tirai secara otomatis. Gambar 9 dan Tabel 5 spesifikasi sensor BH1750.



GAMBAR 9
Sensor BH1750

TABEL 5
Spesifikasi Sensor BH1750

Fitur	Komponen
Model	BH1750 / BH1750FVI
Tegangan Kerja	2.4 – 3.6 V DC (umumnya 3.3 V)
Output	Digital (I²C bus)
Rentang & resolusi lebar	Rentang pengukuran 1–65.535 lux dengan resolusi tinggi
Konversi iluminansi digital	Mengubah intensitas cahaya menjadi data digital
Resolusi	1 lux (High Resolution Mode)
Waktu Sampling	±120 ms
Antarmuka Komunikasi	I²C (SDA, SCL)
Alamat I²C	0x23 atau 0x5C
Fitur Tambahan	ADC internal, 50/60 Hz noise rejection
Ketergantungan sumber cahaya	Rendah terhadap jenis sumber cahaya (lampu pijar,

	fluoresen, halogen, LED putih, cahaya matahari)

H. Nema 17 Motor Stepper

Motor stepper NEMA 17 digunakan sebagai aktuator penggerak tirai karena mampu menghasilkan pergerakan sudut yang presisi dan berulang [19]. Pada sistem ini, motor dioperasikan pada sudut 0°, 45°, dan 90° untuk mengatur tingkat bukaan tirai sesuai dengan kondisi intensitas cahaya yang terdeteksi sensor. Gambar 10 dan Tabel 6 spesifikasi Nema 17 motor stepper.



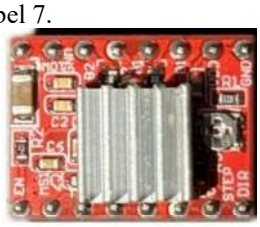
GAMBAR 10
Nema 17 motor stepper.

TABEL 6
Spesifikasi Nema 17 motor stepper

Parameter	Nilai
Jenis Motor	Stepper Motor (Bipolar / Unipolar, tergantung tipe)
Sudut Langkah (Step Angle)	1.8° per step (200 steps/revolution)
Tegangan Kerja	3 – 12 V DC (tergantung spesifikasi lilitan)
Arus Per Fase	Hingga 2 A
Torsi Tahan (Holding Torque)	40 – 60 N·cm (umum ±45 N·cm)
Jumlah Fase	2 fase
Jumlah Kabel	4 kabel (bipolar) / 6 kabel / 8 kabel
Resistansi Fase	±1.5 – 2.8 Ω
Induktansi Fase	±2 – 4 mH
Berat	±210 – 360 gram
Diameter Poros	5 mm
Dimensi	42 × 42 mm (standar NEMA 17
Aplikasi Umum	CNC, 3D Printer, aktuator linear, sistem otomasi

I. Driver Stepper A988

Driver stepper A4988 merupakan modul pengendali motor stepper bipolar yang menerima sinyal STEP dan DIR dari mikrokontroler, mendukung microstepping hingga 1/16 step, serta dilengkapi pengaturan arus berbasis PWM untuk menjaga kestabilan operasi [20]. Modul yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Gambar 11, dengan spesifikasi disajikan pada Tabel 7.



GAMBAR 11
Driver Stepper A4988

TABEL 7
Spesifikasi Driver Stepper A4988

Parameter	Spesifikasi
Model	A4988 Stepper Motor Driver
Jenis Driver	Driver motor stepper
Tipe Motor	Stepper Motor Bipolar
Tegangan Logika (VDD)	3.3 – 5.5 V
Tegangan Motor (VMOT)	8 – 35 V
Arus Maksimum per Fase	Hingga 2 A (dengan pendingin memadai)
Arus Kerja Umum	±1 A – 1.5 A (tanpa heatsink besar)
Mode Microstepping	Full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 step
Kontrol Step	STEP dan DIR
Proteksi	Overcurrent, Overtemperature, Short Circuit
Regulasi Arus	Adjustable current limiting (via potentiometer)
Frekuensi Step Maks	Hingga ±500 kHz
Interface	Digital (STEP, DIR, ENABLE)
Pin Kontrol	STEP, DIR, ENABLE, MS1, MS2, MS3
Pendinginan	Heatsink direkomendasikan
Aplikasi Umum	3D printer, CNC, robotika, otomasi

J. Tirai Horizontal

Tirai horizontal mengatur intensitas cahaya alami melalui pengaturan sudut bilah 0°, 45°, dan 90° yang digerakkan motor stepper dengan mekanisme pulley, sehingga mendukung optimalisasi pencahayaan pada sistem otomatisasi bangunan[21]. Komponen ini ditunjukkan pada Gambar 12, dengan spesifikasi disajikan pada Tabel 8.



GAMBAR 12
Tirai Horizontal

TABEL 8
Spesifikasi tirai horizontal

Parameter	Nilai

Jenis Tirai	Horizontal Blind
Horizontal Blind	PVC / Plastik
Lebar Bilah	±25 mm
Jumlah Bilah	22 Bilah
Sistem Penggerak	Manual (tali & batang pemutar)
Arah Gerak	Naik–turun dan rotasi sudut bilah
Sudut Bukaan Bilah	±0° – 180°
Fungsi Utama	Mengatur intensitas cahaya dan privasi

K. Pulley

Pulley merupakan komponen mekanis yang berfungsi mentransmisikan putaran motor stepper ke tirai horizontal. Komponen ini mengubah rotasi motor menjadi gerakan buka-tutup atau pengaturan sudut bilah tirai secara presisi, sehingga intensitas cahaya ruangan dapat diatur secara otomatis [22]. Gambar 13 dan Tabel 9 menunjukkan spesifikasi pulley yang digunakan.



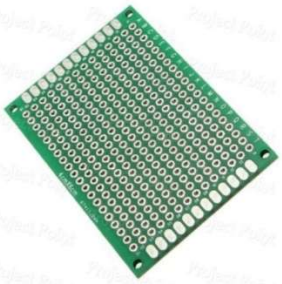
GAMBAR 13
Pulley.

TABEL 9
Spesifikasi Pulley

Parameter	Nilai
Model	Timing Pulley dengan Timing Belt
Tipe Pulley	GT2 / T2.5 (umum pada sistem presisi)
Material Pulley	Aluminium
Material Belt	Karet dengan inti fiberglass
Jumlah Pulley	2 buah (driver & driven)
Diameter Pulley	±20 – 30 mm
Jumlah Gigi Pulley	16 – 20 teeth (GT2)
Lebar Belt	6 mm
Diameter Poros	5 mm (NEMA 17)
Tipe Transmisi	Mekanik, belt-driven
Backlash	Sangat kecil (hampir nol)
Efisiensi Mekanik	Tinggi (>95%)
Fungsi Utama	Transmisi gerak rotasi dan reduksi getaran
Aplikasi Umum	3D printer, CNC mini, linear actuator, sistem otomatis

L. Dot Matrix Double Side

PCB double side digunakan sebagai media pemasangan dan interkoneksi komponen elektronik pada sistem ini, dengan jalur tembaga pada dua sisi untuk mendukung desain rangkaian yang padat, rapi, dan andal. Penggunaan PCB ini meningkatkan kestabilan sinyal digital serta distribusi arus aktuator, sehingga sesuai untuk sistem kendali otomatis berbasis Internet of Things (IoT) [23]. PCB yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 14, dengan spesifikasi disajikan pada Tabel 10.



GAMBAR 14
PCB Dot Matrix Double Side.

TABEL 10
Spesifikasi PCB Dot Matrix Double Side

Parameter	Nilai
Jenis PCB	PCB Lubang (Perfboard / Dot Matrix)
Tipe Lapisan	Double Layer (Double Side)
Material Substrat	FR-4 (Fiberglass)
Material Konduktor	Tembaga (Copper)
Ketebalan PCB	±1.6 mm
Diameter Lubang	±1.0 mm
Jarak Antar Lubang (Pitch)	2.54 mm
Warna PCB	Hijau
Jumlah Pad	Grid dot matrix penuh (tanpa jalur)
Tipe Lubang	Through Hole Plated
Fungsi Utama	Prototyping dan perakitan rangkaian manual
Aplikasi Umum	IoT prototype, rangkaian kontrol, edukasi, lab elektronik

M. LM2596 Module StepDown Converter DC to DC

LM2596 merupakan regulator step-down (buck converter) yang digunakan untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan DC dengan efisiensi tinggi serta

dilengkapi fitur current limiting dan thermal shutdown [24]. Modul yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Gambar 15, dengan spesifikasi disajikan pada Tabel 11..



GAMBAR 15
LM2596 Stepdown Converter DC to DC.

TABEL 11
Spesifikasi LM2596 Stepdown Converter DC to DC

Fitur	Keterangan
Nama Modul	LM2596 Stepdown Converter
Jenis Konverter	DC to DC Buck (Step-Down)
Versi tegangan keluaran	Tersedia versi keluaran 3,3 V, 5 V, dan 12 V
Rentang tegangan input	Hingga 40 V
Arus keluaran maksimum	1.25 – 35 V DC
Arus Output Maksimum	Hingga 3 A
Frekuensi switching	Osilator internal dengan frekuensi tetap 150 kHz
Fitur shutdown	Mendukung fungsi shutdown berbasis logika TTL
Mode siaga daya rendah	Arus diam (Iq) tipikal 80 µA
Efisiensi	Efisiensi tinggi
Induktor	Menggunakan induktor standar yang mudah diperoleh
Proteksi	Dilengkapi proteksi suhu berlebih (thermal shutdown) dan pembatas arus (current limit)

N. Adaptor DC 12 V 3 A

Adaptor DC digunakan sebagai sumber catu daya utama sistem dengan menyediakan tegangan 12 V DC, sedangkan adaptor USB Type-C menyuplai tegangan 5 V DC untuk Raspberry Pi 4. Kestabilan tegangan dijaga menggunakan modul step-down converter agar seluruh komponen beroperasi secara andal [25], [26]. Adaptor yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 16, dengan spesifikasi disajikan pada Tabel 12.



GAMBAR 16
Adaptor DC 12V 3A.

TABEL 12
Spesifikasi Adaptor DC 12V 3 A

Parameter	Nilai
Jenis Adaptor	Adaptor AC–DC
Tegangan Input	220 VAC, 50/60 Hz
Tegangan Output	12V DC
Arus Output Maksimum	3A
Daya Maksimum	36 W
Tipe Konektor Output	DC Barrel Jack
Polaritas	Positif di tengah (+)
Metode Regulasi	Switching Power Supply
Proteksi	Potensiometer (trimpot)
Proteksi	Overcurrent dan short-circuit protection
Fungsi Utama	Sumber catu daya utama sistem

O. Spesifikasi dan Regulasi

Perancangan sistem mengacu pada regulasi dan standar nasional yang berlaku untuk menjamin kenyamanan pengguna. Standar yang digunakan adalah SNI 6197:2020 yang menetapkan tingkat pencahayaan rata-rata ruang kerja sebesar 350 lux [27]. Dengan mengacu standar tersebut, sistem diharapkan mampu mengatur pencahayaan alami secara optimal dan mendukung kenyamanan visual di dalam ruangan.

P. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan pada sisi embedded dan aplikasi mobile. Logika sistem otomatis menentukan posisi tirai berdasarkan intensitas cahaya, yaitu menutup saat kondisi terang, membuka sebagian pada kondisi sedang, dan membuka penuh pada kondisi gelap. Aplikasi mobile berbasis Flutter menyediakan fitur kontrol manual, monitoring sensor, serta informasi prakiraan cuaca melalui OpenWeather API.

Q. Realtime Database

Data sensor diproses terlebih dahulu oleh mikrokontroler sebelum dikirim ke Firebase sebagai media penyimpanan cloud dengan kemampuan sinkronisasi real-time [28]. Data lingkungan yang terdeteksi dikirim melalui koneksi Wi-Fi dan diperbarui secara langsung pada aplikasi melalui Firebase Realtime Database tanpa memerlukan proses refresh. Integrasi ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara cepat serta mendukung pengambilan keputusan otomatis pada sistem tirai.

R. Pengujian sistem

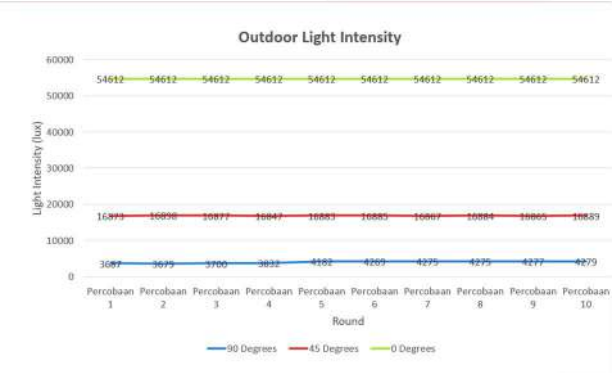
Pengujian dan evaluasi dilakukan untuk memastikan sistem berfungsi sesuai dengan perancangan. Pengujian hardware meliputi pengujian akurasi sensor cahaya, presisi pergerakan aktuator, konsumsi daya sistem, respon sistem, dan logika sistem. Pengujian software dilakukan metode Black Box Testing untuk memastikan seluruh fungsi aplikasi berjalan dengan baik, serta *user acceptance test* untuk menilai fungsi aplikasi dari pengguna. Selain itu, kualitas layanan jaringan dianalisis melalui pengukuran parameter Quality of Service (QoS) menggunakan Wireshark berdasarkan standar TIPHON [29].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

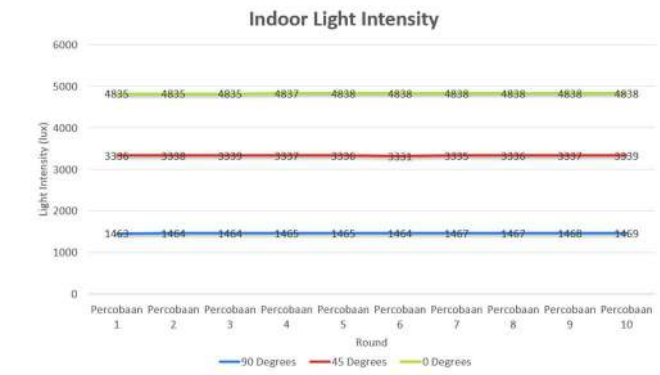
Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem rekomendasi buku berbasis Retrieval-Augmented Generation secara ringkas dan sistematis, disertai uraian dan tabel untuk memudahkan analisis kinerja serta interpretasi hasil.

A. Hasil pengujian kemampuan sensor

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor BH1750 memiliki pembacaan yang stabil dan konsisten pada berbagai kondisi pencahayaan. Berdasarkan Gambar 17, pada lingkungan luar ruangan, sensor mencatat nilai rata-rata 54.612,50 lux saat kondisi terang dan menurun signifikan pada kondisi gelap. Sementara itu berdasarkan Gambar 18, pada pengujian dalam ruangan, intensitas cahaya yang terukur lebih rendah akibat adanya redaman dari kaca jendela, yang memengaruhi jumlah cahaya yang masuk ke dalam ruangan.



GAMBAR 17
Hasil uji sensor BH1750 luar ruangan.



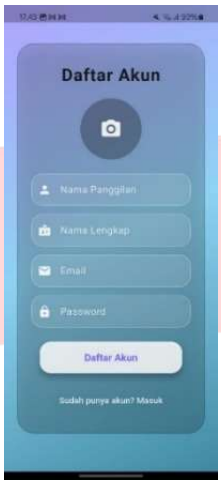
GAMBAR 18
Hasil uji sensor BH1750 dalam ruangan.

B. Hasil Tampilan Aplikasi

Bagian ini menjelaskan tentang tampilan dari aplikasi yang dirancang sebagai sarana kontrol dan *monitoring* kondisi ruangan.

i. *Login* dan *Register Page*

Register dan *Login Page* berfungsi sebagai fitur autentikasi pengguna yang terintegrasi dengan Firebase Authentication untuk pembuatan akun dan verifikasi kredensial sebelum mengakses fitur utama aplikasi. Tampilan halaman ditunjukkan pada Gambar 19 dan Gambar 20..



GAMBAR 19
Tampilan halaman Register Page pada aplikasi.



GAMBAR 20
Tampilan Login Page pada aplikasi.

ii. *Home Page* dan *Wheater Page*

Home Page berfungsi sebagai pusat pemantauan dan pengendalian sistem tirai otomatis berbasis IoT dengan menampilkan data lingkungan dan hasil deteksi manusia secara real-time melalui kamera YOLOv5, sedangkan *Weather Page* menyajikan informasi dan prakiraan cuaca dari OpenWeather API sebagai parameter pendukung pengambilan keputusan sistem. Tampilan halaman ditunjukkan pada Gambar 21 dan Gambar 22.



GAMBAR 21
Tampilan *Home Page* pada aplikasi.



GAMBAR 22
Tampilan *Weather Page* pada aplikasi.

iii. Manual *Control Page*

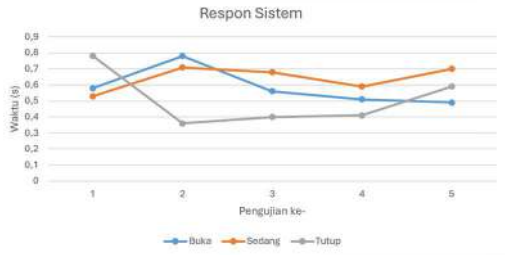
Manual *Control Page* berfungsi sebagai antarmuka kendali manual sistem tirai otomatis berbasis IoT yang memungkinkan pengguna mengatur posisi tirai melalui tiga pilihan bukaan, dengan perintah dikirimkan ke ESP32 melalui Firebase Realtime Database. Tampilan halaman Manual Control ditunjukkan pada Gambar 23.



GAMBAR 23
Tampilan Manual
Control Page pada aplikasi.

C. Hasil pengujian logika dan respon sistem

Sistem berhasil menjalankan logika kontrol baik pada mode otomatis maupun manual sesuai dengan ambang batas yang telah ditentukan. Tirai dapat bergerak ke posisi menutup, setengah terbuka, dan terbuka penuh berdasarkan kondisi cahaya lingkungan. Rata-rata waktu respon sistem berada pada rentang 0,5 hingga 0,6 detik, sehingga telah memenuhi spesifikasi performa yang ditetapkan. Hasil pengujian respon sistem dapat dilihat pada Gambar 24.



GAMBAR 24
Hasil pengujian respon sistem.

D. Hasil pengujian kemampuan aktuator

Pengujian aktuator menunjukkan adanya perbedaan antara sudut target dan sudut aktual yang dihasilkan. Deviasi sudut ini terutama disebabkan oleh faktor mekanis seperti kekenduran sabuk, gesekan pada mekanisme tirai, serta kurang optimalnya proses kalibrasi. Meskipun demikian, aktuator tetap mampu menggerakkan tirai sesuai dengan perintah sistem. Hasil pengujian dapat dilihat melalui tabel 13.

TABEL 13
Hasil pengujian kemampuan aktuator

Kemiringan Sudut			
Percobaan ke	Buka	Sedang	Tutup
1	55	107	0
2	55	105	0
3	55	105	0
4	45	109	15
5	54	105	20
6	54	108	13
7	78	124	0
8	78	118	0
Rata-Rata kemiringan	59,25	110,125	6

E. Hasil pengujian konsumsi daya sistem

Berdasarkan hasil perhitungan, total konsumsi daya menggunakan Persamaan (1), sistem mencapai 40,35 W, dengan penggunaan terbesar berasal dari motor stepper Nema 17 dan Raspberry Pi 4, sementara komponen sensor memiliki konsumsi daya yang relatif kecil. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum 80 W, sehingga sistem dinilai efisien dan aman untuk dioperasikan secara kontinu. [30].

$$P = V \times I \quad (1)$$

Dengan keterangan:

P = Daya listrik (W)
V = Tegangan kerja sistem hasil pengukuran (V)
I = Arus sistem hasil pengujuran (A)

TABEL 14
Hasil perhitungan konsumsi daya

No	Sensor	Nilai Tegangan (V)	Nilai Arus (A)	Nilai Daya (P)
1.	ESP32	3,302	0,137	0,4523
2.	DHT22	3,302	0,136	0,449
3.	BH1750	3,303	0,138	0,4558
No	**Komponen**	**Nilai Tegangan (V)**	**Nilai Arus (A)**	**Nilai Daya (P)**
4.	Motor Stepper Nema 17	12	2	24
5.	Raspberry Pi 4	5	3	15
6.	Driver A4988	-	-	-
7.	Step-down DC–DC	-	-	-
No	**Komponen Catu Daya**	**Nilai Tegangan (V)**	**Nilai Arus (A)**	**Nilai Daya (P)**
1.	Adaptor DC	12	3	36
2.	Adaptor USB Type C	9	3	27

F. Hasil pengujian *Quality of Service (QoS)*

Hasil pengujian Quality of Service (QoS) menunjukkan kinerja jaringan yang sangat baik. Parameter jitter, delay, throughput, dan packet loss dihitung menggunakan Persamaan (2) - (5). Nilai delay dan jitter pada Tabel 15 dan Tabel 16 berada pada kategori sangat baik, sedangkan packet loss tercatat sebesar 0% sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 25, yang menandakan tidak adanya kehilangan paket

selama proses transmisi. Meskipun *throughput* relatif rendah sebesar 32 Kbps, kondisi tersebut tidak memengaruhi kinerja sistem karena data yang dikirim berupa data sensor berukuran kecil [29]. Berikut beberapa persamaan untuk menghitung nilai parameter pada QoS :

$$Jitter = \frac{total\ variasi\ delay}{total\ paket\ diterima - 1} \quad (2)$$

$$Delay = \frac{total\ delay}{jumlah\ paket\ diterima - 1} \quad (3)$$

$$Throughput = \frac{Jumlah\ data\ terkirim\ (kb)}{waktu\ pengiriman\ data\ (s)} \quad (4)$$

$$Packet\ loss = \frac{(data\ terikirim - data\ diterima) \times 100\%}{data\ diterima} \quad (5)$$



Measurement	Captured	Displayed	Marked
Packets	946	946 (100.0%)	—
Time span, s	71.362	71.362	—
Average pps	13.3	13.3	—
Average packet size, B	305	305	—
Bytes	288622	288622 (100.0%)	0
Average bytes/s	4044	4044	—
Average bits/s	32 k	32 k	—

GAMBAR 25
Troughput dan *Packet Loss* pada pengujian.

TABEL 15
Hasil perhitungan Delay

Delay	
Total Delay	71,362366
Rata-Rata Delay	0,07551573
Rata-Rata Delay (ms)	75,5157312

TABEL 16
Hasil perhitungan jitter

Jitter	
Total Jitter	71,1716
Rata-Rata Jitter	0,07531
Rata-Rata Jitter (ms)	75,3139

G. Hasil pengujian fungsionalitas sistem

Pengujian fungsionalitas aplikasi dilakukan menggunakan metode Black Box Testing serta user acceptance test melalui Google Form. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 17, fitur utama seperti registrasi, login, kontrol tirai, dan monitoring sensor berfungsi dengan baik. Selain itu, hasil respon pengguna pada Tabel 18 menunjukkan nilai rata-rata di atas 80%, sehingga aplikasi dinilai sesuai dan mudah digunakan.

TABEL 17
Hasil uji fungsionalitas.

Hal	*Result*
Registrasi *user*	*TRUE*
Login Berhasil	*TRUE*
Login Gagal	*TRUE*
Verifikasi isi *homepage*	*TRUE*
Verifikasi isi *Weather page*	*TRUE*
Mode kontrol tirai	*TRUE*
Verifikasi fitur on/off	*TRUE*
Mode kontrol manual	*TRUE*
Verifikasi edit *profile*	*TRUE*
Verifikasi *dark/light mode*	*TRUE*
Verifikasi *logout button*	*TRUE*

TABEL 18
Hasil pengujian fungsionalitas aplikasi sistem

Fitur	Nilai
Jumlah Responden	19
Fungsi Registrasi	1= 0% 2= 0% 3= 0% 4= 10,5% 5= 89,5%
Fungsi Login	1= 0% 2= 0% 3= 0% 4= 10,5% 5= 89,5%
Homepage	100%
Weather Page	100%
Control Page	100%
Profile Page	94,7%
Logout	100%

H. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem *Automated Window Shade Control for Optimizing Indoor Light Intensity* berhasil direalisasikan dengan mengintegrasikan ESP32, sensor BH1750, sensor DHT22, motor stepper, serta aplikasi IoT berbasis Firebase Realtime Database. Pengujian menunjukkan sensor BH1750 mampu membaca intensitas cahaya secara stabil dan mengirimkan data secara real-time ke aplikasi sebagai dasar pengambilan keputusan sistem. Motor stepper dapat menggerakkan tirai sesuai setpoint pada mode otomatis maupun manual dengan waktu respons rata-rata 504–642 ms, yang masih berada dalam batas toleransi sistem. Dari sisi komunikasi, sistem menunjukkan keberhasilan pengiriman data sebesar 100% dengan nilai delay dan jitter sekitar 75 ms, serta throughput 32 kbps yang memadai untuk kebutuhan sistem. Secara keseluruhan, sistem terbukti mampu mengoptimalkan intensitas cahaya ruangan dan mendukung penerapan smart home berbasis IoT secara andal.

REFERENSI

[1] P. Jendela Otomatis, M. Albet, P. Wira Ginta, and A. Sudarsono, "PEMBUATAN JENDELA OTOMATIS MENGGUNAKAN SENSOR CAHAYA," 2014.

[2] S. Johan and Ari Mulianta Ginting, "DETERMINASI KONSUMSI LISTRIK DI INDONESIA," *Media Ekon.*, vol. 30, no. 1, pp. 106–117, Sep. 2022, doi: 10.25105/me.v30i1.10662.

[3] A. N. Ahmad and A. Dharmawan, "Purwarupa Sistem Otomasi Buka Tutup Tirai Berbasis Light Dependent Resistor," *Ijeis*, vol. 1, no. 2, pp. 21–34, Oct. 2011.

[4] A. P. Riadyani and C. K. Herbawani, "Systematic Review Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Kelelahan Mata Pekerja," *J. Kesehat. Masy.*, vol. 10, no. 2, pp. 167–171, 2022, doi: 10.14710/jkm.v10i2.32475.

[5] Arif Hidayat and Tata Sutabri, "Inovasi Kaca Pintar: Pengaturan Pencahayaan Berbasis Sensor Panas Untuk Aplikasi Smart Home," *J. Tek. Mesin, Ind. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 4, pp. 236–247, Nov. 2024, doi: 10.55606/jtmei.v3i4.4551.

[6] S. Megawati, "Pengembangan sistem teknologi internet of things yang perlu dikembangkan negara indonesia," *JIEET (Journal Inf. Eng. Educ. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 19–26, 2021.

[7] A. T. Wahyudi, E. Suparti, B. Ismail, and A. Wicaksana, "Solusi IoT untuk adaptasi New Normal," vol. 8, no. 2, pp. 99–109, 2020.

[8] T. Informasi, V. No, A. G. Prawiyogi, and A. S. Anwar, "Perkembangan Internet of Things (IoT) pada Sektor Energi : Sistematik Literatur Review," vol. 1, no. 2, pp. 187–197.

[9] F. Masykur and F. Prasetiyowati, "Aplikasi Rumah Pintar (Smart Home) Pengendali Peralatan Elektronik Rumah Tangga Berbasis Web," vol. 14, no. 1, pp. 93–100, 2016.

[10] R. Rizky, Z. Hakim, A. M. Yunita, and N. N. Wardah, "IMPLEMENTASI TEKNOLOGI IOT (INTERNET OF THINK) PADA RUMAH PINTAR BERBASIS MIKROKONTROLER ESP 8266," vol. 4, no. 2, pp. 278–281, 2020.

[11] V. Rahmadhani, W. Arum, U. Bhayangkara, J. Raya, U. Bhayangkara, and J. Raya, "LITERATURE REVIEW INTERNET OF THINK (IOT): SENSOR , KONEKTIFITAS DAN QR CODE," vol. 3, no. 2, pp. 573–582, 2022.

[12] Y. Hendrian, Y. P. Yudatama, and V. S. Pratama, "Jemuran Otomatis Menggunakan Sensor LDR , Sensor Hujan Dan Sensor Kelembaban Berbasis Arduino Uno," vol. VI, no. 1, pp. 21–30, 2020, doi: 10.31294/jtk.v4i2.

[13] T. Suryana, "Measuring Light Intensity Using theBH1750 Sensor," *Meas. Light Intensity Using BH1750 Sens.*, pp. 1–16, 2021, [Online]. Available: http://iot.ciwaruga.com

[14] Arduino, "Target areas :Arduino Uno Rev3 Datasheet," 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3

[15] E. Systems, "ESP32 Series Datasheet," 2019. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf%0A

[16] A. J. Robbani, F. Alfiaturrohmah, M. R. Nurdiansyah, A. Salsabila, and A. D. P. W, "JTIM : Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia Implementasi Smart Home pada Platform Apple Homekit dan Google Home dengan Raspberry Pi 4B," vol. 5, no. 4, pp. 377–387, 2024.

[17] L. Aosong Electronics Co., "DHT22 (AM2302) Digital Temperature and Humidity Sensor Datasheet." [Online]. Available: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132459/ETC2/DHT22.html

[18] A. Khuriati, "Sistem Pemantau Intensitas Cahaya Ambien dengan Sensor BH1750 Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano," *Berk. Fis.*, vol. 25, no. 13, pp. 105–110, 2022.

[19] Syahrul, "Motor Stepper: Teknologi, Metoda dan Rangkaian Kontrol," *Maj. Ilm. UNIKOM*, vol. 6, no. 2, pp. 187–202.

[20] A. Fatoni, "Analisa Pembuatan Mesin Cnc Router Menggunakan Driver Tb6560 Dan Driver A4988 Berbasis Microkontroller Arduino Uno Di Cv Barokah Mebel," vol. 2, no. 1, pp. 7–16, 2022.

[21] V. K. Bakti and C. Bahasa, "Rancang bangun tirai otomatis pada bangunan komersial berbasis arduino menggunakan sensor pir".

[22] H. Mahmudi, "Analisa Perhitungan Pulley dan V-Belt Pada Sistem Transmisi Mesin Pencacah".

[23] I. W. Sukadana, I. M. Pande, and D. Yuda, "Prototyping PCB Menggunakan Computer-Aided Design," vol. 2, no. 1, pp. 37–43, 2021, doi: 10.38043/tiers.v2i2.3310.

[24] T. Application, "LM2596 SIMPLE SWITCHER ® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator," no. April, 2013.

[25] M. F. Mujib, *RANCANG BANGUN SUMBER TEGANGAN 12V DC TERKENDALI OTOMATIS MENGGUNAKAN ARDUINO NANO*. Malang, 2020.

[26] D. Ernawati, "PERANCANGAN PRODUK CHARGER FAST CHARGING UNTUK USB TYPE C MENGGUNAKAN METODE QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT," vol. 01, no. 0, pp. 49–60, 2020.

[27] Badan Standardisasi Nasional, "Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan," *Standar Nas. Indones.*, pp. 1–38, 2020.

[28] M. Imbalo, Z. Hasibuan, U. Islam, and N. Sumatera,

"IMPLEMENTASI SISTEM DATABASE NoSQL SECARA REALTIME MENGGUNAKAN FIREBASE REALTIME DATABASE PADA," vol. 2, no. 1, 2022.

[29] I. Syarifatun, R. Miyarno, T. Fatwa, and A. Rizqi, "Analisis Quality of Service (QoS) Menggunakan Standar Parameter Tiphon pada Jaringan Internet Berbasis Wi-Fi Kampus 1 Unjaya," vol. 17, no. 1, pp. 1–9, 2024.

[30] S. Firth, K. Lomas, A. Wright, and R. Wall, "Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements," vol. 40, pp. 926–936, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.07.005.