

Perancangan dan Analisis Saklar Elektronik Digital Berbasis Arduino dan Transistor untuk Penggunaan Efisiensi Energi

¹Awan, ²Hendra, ³Wilianto, ⁴Yudi, ⁵Waisen

^{1, 4, 5}Fakultas Sains dan Teknologi, Sistem Informasi, Universitas IBBI, Medan, Indonesia

²Fakultas Sains dan Teknologi, Teknik Informatika, Universitas IBBI, Medan, Indonesia

³Fakultas Sains dan Teknologi, Teknologi Informasi, Universitas IBBI, Medan, Indonesia

¹one.awan@gmail.com, ²hendra.soewarno@gmail.com, ³wiliantogan@gmail.com,

⁴yudifanggawa@gmail.com, ⁵whisen@gmail.com

Submit : 28 Nov 2025 | Diterima : 13 Des 2025 | Terbit : 16 Des 2025

ABSTRAK

Perkembangan teknologi informasi mendorong otomatisasi sistem kelistrikan, terutama dalam pengelolaan energi menjadi efisien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis efisiensi saklar elektronik digital berbasis mikrokontroler Arduino dan transistor untuk pengendalian beban listrik secara otomatis dan terprogram. Sistem ini dapat diimplementasikan untuk menggantikan saklar konvensional dalam skenario rumah pintar. Pengujian dilakukan untuk mengukur kecepatan switching, dan kestabilan pengendalian beban. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem saklar digital mampu meningkatkan efisiensi dibandingkan metode manual, serta memberikan fleksibilitas dalam pemantauan dan pengendalian beban melalui sistem digital terintegrasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi Arduino dan transistor dalam sistem pengendalian energi merupakan solusi inovatif dan aplikatif di bidang teknologi informasi dan sistem terdistribusi.

Kata Kunci: Arduino, Transistor, Saklar Digital, efisiensi, Otomatisasi.

PENDAHULUAN

Transformasi digital pada sistem energi membuka peluang bagi pengembangan sistem kendali berbasis mikrokontroler (Di Natale & Giomo, 2021). Saklar konvensional memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi, fleksibilitas, dan keterhubungan dengan sistem digital (Patel, 2019). Saklar elektronik merupakan perangkat yang dirancang untuk menghubungkan atau memutuskan aliran energi listrik dan dapat dilakukan secara terkontrol (Skvarenina, 2002). Perkembangan teknologi elektronika daya telah menggeser pemanfaatan saklar mekanis konvensional menjadi saklar elektronik berbasis semikonduktor (Mohan, Undeland, & Robbins, 1995). Saklar elektronik memiliki beberapa keunggulan, antara lain kecepatan switching yang tinggi, usia pakai yang panjang, serta kemampuan integrasi dengan sistem kontrol otomatis (Hassan, 2020). Dalam konteks otomasi, saklar tidak hanya berfungsi sebagai pemutus arus, tetapi juga bagian dari sistem kendali yang merealisasikan respons terhadap perubahan kondisi lingkungan atau instruksi logika (Sedra & Smith, 2015).

Transistor memiliki peran penting dalam pengendalian beban elektronik secara efisien (Mohan, Undeland, & Robbins, 1995), sedangkan Arduino berfungsi sebagai mikrokontroler yang mampu memproses logika kendali berdasarkan input waktu, sensor, atau perintah jarak jauh (Monk, 2016). Dengan kombinasi ini dapat menciptakan sistem saklar digital yang efisien dan dapat dikendalikan secara otomatis maupun manual melalui antarmuka digital (Di Natale & Giomo, 2021). Kemampuan switching cepat dengan penggunaan daya yang relatif rendah menjadikan transistor ideal untuk aplikasi otomasi dengan sistem berbasis mikrokontroler (Hassan, 2020). Pada pengoperasiannya, transistor diaktifkan dengan memberikan tegangan gate sesuai karakteristik perangkat sehingga arus dapat mengalir pada jalur drain-source (Sedra & Smith, 2015). Integrasi antara Arduino dan transistor memungkinkan terbentuknya modul saklar elektronik yang dapat dikendalikan secara digital (Patel, 2019). Arduino menghasilkan sinyal logika yang kemudian

diteruskan ke gate transistor untuk menentukan status ON/OFF beban (Arduino.cc, 2025). Penggunaan mikrokontroler juga memungkinkan pemantauan parameter operasional secara langsung, yang dapat digunakan untuk evaluasi performa kecepatan waktu respon dan efisiensi pemakaian dengan daya yang rendah (Lee & Santoso, 2022).

Evaluasi performa diperlukan untuk memastikan bahwa perangkat yang dirancang bekerja sesuai dengan tujuan operasional. Sejumlah parameter yang umum digunakan pada sistem saklar otomatis antara lain:

1. Waktu respon, yaitu durasi antara perubahan hingga perangkat melakukan switching.
2. Efisiensi daya, yaitu rasio energi keluaran terhadap energi masukan selama beroperasi.
3. Temperatur operasi, yang menunjukkan tingkat disipasi daya dan stabilitas komponen semikonduktor.
4. Keandalan switching, yaitu konsistensi perangkat dalam menjalankan proses ON/OFF dalam jumlah siklus tertentu.

Parameter tersebut menjadi acuan dalam proses simulasi desain perangkat. Penelitian ini mengkaji bagaimana rancangan saklar digital berbasis Arduino dan transistor dapat meningkatkan efisiensi energi dan fleksibilitas sistem kontrol seperti sistem rumah pintar.

TINJAUAN PUSTAKA

Transistor type MOSFET

Transistor banyak digunakan dalam rangkaian daya rendah dan tinggi sebagai saklar elektronik. Keunggulannya adalah cepat, tidak mengalami keausan mekanik, dan efisiensi tinggi dalam switching. Saklar elektronik merupakan mekanisme pemutusan dan penyambungan aliran listrik dengan memanfaatkan komponen semikonduktor sebagai elemen pengendali. Berbeda dengan saklar mekanis, saklar elektronik tidak menggunakan kontak fisik sehingga memiliki usia pakai lebih panjang, respons lebih cepat, dan toleransi terhadap frekuensi switching yang tinggi. Saklar elektronik telah digunakan pada sistem otomasi rumah, kontrol motor, manajemen energi, dan sistem embedded. Beberapa parameter kritis yang umum digunakan untuk menilai performa saklar elektronik adalah kecepatan switching, efisiensi konversi daya, panas, resistansi on-state, isolasi, dan kompatibilitas logika. Pemilihan arsitektur dan tipe transistor secara langsung mempengaruhi nilai-nilai tersebut.

Transistor, khususnya tipe Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), menjadi komponen utama dalam perancangan saklar elektronik modern karena karakteristik elektriknya yang mendukung proses switching berkecepatan tinggi dan efisiensi daya yang tinggi. MOSFET memiliki impedansi input yang sangat besar pada sisi gerbang sehingga arus pemicunya relatif kecil, sementara resistansi kanal dalam kondisi on ($R_{ds(on)}$) yang rendah memungkinkan pengaliran arus dengan rugi daya minimal. Dalam aplikasi switching, tegangan gerbang (V_{gs}) berperan sebagai titik kendali untuk memodulasi resistansi kanal, sehingga perubahan kecil pada V_{gs} mampu mempengaruhi kemampuan konduksi secara signifikan. Nilai $R_{ds(on)}$ yang rendah berkorelasi langsung dengan kecilnya disipasi daya pada mode on, sedangkan respons kapasitansi gerbang dan waktu naik/turun sinyal menentukan kemampuan saklar untuk beroperasi pada frekuensi tinggi tanpa peningkatan rugi switching yang signifikan.

Pemahaman mengenai hubungan antara $R_{ds(on)}$, rugi daya, dan dinamika kanal MOSFET telah dibahas secara luas dalam literatur power electronics. Bottaro et al. (2022) menunjukkan bahwa model MOSFET modern mengutamakan penurunan $R_{ds(on)}$ dan optimalisasi kapasitansi parasitik untuk mendukung efisiensi switching pada konverter daya tegangan rendah. Studi klasik seperti Mohan et al. (1995) dan Hart (2010) juga menegaskan bahwa rugi switching merupakan komponen dominan pada sistem pensaklaran frekuensi tinggi, sehingga parameter transien seperti waktu naik dan turun menjadi penentu efisiensi konversi daya. Pada saat implementasi, panduan desain praktis seperti yang diberikan oleh Green (2022) menekankan pentingnya manajemen termal dan pemilihan MOSFET dengan karakteristik kanal optimal untuk mencegah kegagalan akibat lonjakan arus atau stress tegangan saat switching.

Penggunaan MOSFET sebagai saklar dalam sistem manajemen energi berbasis mikrokontroler juga telah diadopsi secara luas dalam perangkat rumah pintar dan sistem terdistribusi. Patel (2019) menemukan bahwa kombinasi mikrokontroler dan MOSFET dapat meningkatkan efisiensi pengendalian daya terutama ketika beban dikendalikan secara dinamis berdasarkan profil penggunaan. Temuan ini sejalan dengan implementasi sistem kontrol energi rumah berbasis IoT yang dirancang oleh Di Natale dan Giomo (2021), di mana arsitektur switching elektronik berperan dalam menurunkan konsumsi energi dan menambah fleksibilitas integrasi dengan platform digital. Pemanfaatan MOSFET dalam konteks ini merupakan kelanjutan dari paradigma rekayasa elektronika daya modern, sebagaimana dijelaskan Malvino (1985) dan Sedra & Smith (2015), bahwa transistor daya pada dasarnya bukan hanya elemen penguat, tetapi juga perangkat saklar efisien dalam sistem elektronik berbasis kendali digital.

Arduino sebagai Mikrokontroler

Arduino adalah mikrokontroler berbasis open-source yang digunakan dalam sistem otomasi karena mudah diprogram dan memiliki banyak antarmuka digital maupun analog (Monk, 2016). Arduino merupakan platform mikrokontroler open-source yang banyak digunakan dalam prototyping perangkat elektronik karena kemudahan bahasa pemrograman, ketersediaan modul, serta komunitas pendukung yang besar (Monk, 2016, Patel, 2019). Platform ini menggunakan ATmega328/2560 sebagai prosesor utama dengan konfigurasi input-output digital yang kompatibel untuk pengendalian transistor, relay, atau aktuator lainnya (Arduino.cc, 2025). Arduino memiliki karakteristik timing digital sehingga efisien digunakan untuk kontrol saklar elektronik, penjadwalan waktu, Pulse Width Modulation (PWM) teknik untuk meniru keluaran analog, dan system sleep (Monk, 2016). Respons mikrokontroler terhadap perubahan sinyal input dapat mencapai rentang milidetik, bergantung pada konfigurasi interrupt dan overhead pemrosesan (Patel, 2019). Sejumlah penelitian menggunakan Arduino pada sistem otomatisasi karena tingkat konsumsi daya rendah, kestabilan timing, skalabilitas I/O, dan dukungan sensor (Di Natale & Giomo, 2021, Patel, 2019).

Sistem energi terdistribusi menuntut kontrol yang adaptif terhadap beban dan pasokan daya (Di Natale & Giomo, 2021). Saklar digital yang dapat dikendalikan secara otomatis menjadi solusi penting dalam mengelola konsumsi daya (Patel, 2019). Dalam penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perintah digital dengan waktu rata-rata 210–350 ms dan menyimpulkan bahwa platform Arduino memadai untuk aplikasi switching daya rendah dengan karakteristik timing deterministik (Patel, 2019). Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa transistor MOSFET lebih efisien dibanding relay untuk switching beban rendah, Arduino mampu memberikan respon cepat, optimasi driver dan algoritma kontrol dapat meningkatkan efisiensi energi (Green, 2022).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk mengembangkan dan mengevaluasi performa saklar elektronik digital berbasis Arduino dan transistor MOSFET dalam konteks penggunaan efisiensi energi. Fokus utama penelitian adalah menganalisis efisiensi switching dan karakteristik konsumsi energi ketika dikendalikan secara digital, serta membandingkannya secara deskriptif terhadap metode konvensional berbasis saklar mekanis.

1. Analisa kebutuhan sistem

Penelitian ini menggunakan komponen elektronik sebagai prototipe berdasarkan desain yang telah direncanakan. Komponen utama yang digunakan untuk simulasi sistem meliputi:

1. Arduino Uno sebagai pengendali utama logika dan memberikan sinyal switching.
2. Transistor MOSFET IRF540N sebagai aktuator daya untuk menyalurkan arus ke beban.
3. LED dan beban DC rendah sebagai representasi beban energi terdistribusi.
4. Resistor sebagai pengkondisi sinyal dan pelindung komponen.
5. Breadboard dan kabel jumper untuk proses perakitan desain prototipe.

Secara fungsional, Arduino menghasilkan sinyal digital untuk mengendalikan gate transistor MOSFET. Saat gate menerima tegangan sesuai logika kendali, transistor MOSFET berada pada kondisi konduksi sehingga arus mengalir ke beban. Ketika sinyal logika pada gate berada dalam

kondisi non-aktif, transistor MOSFET berada pada kondisi non-konduksi sehingga beban terputus dari sumber daya. Mekanisme ini membentuk sebuah saklar elektronik digital yang dapat diatur melalui algoritma waktu maupun input sensor. Berdasarkan konsep tersebut, simulasi pada sistem dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Input adalah Timer atau sensor sebagai pemicu kejadian switching.
2. Kontrol adalah Arduino sebagai pengendali logika dan pembangkit sinyal PWM/digital.
3. Output adalah Sinyal ke gate MOSFET untuk mengaktifkan atau menonaktifkan beban sebagai representasi energi yang dikeluarkan.

Desain simulasi di atas menggambarkan peralihan karakteristik switching dari pendekatan manual menuju otomasi berbasis mikrokontroler dengan saklar elektronik bertujuan meningkatkan efisiensi energi dan keandalan operasional.

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan metodologi yang tersusun secara berurutan sebagai berikut:

1. Perancangan rangkaian saklar digital
Pada tahap ini dilakukan pemilihan komponen, penyusunan diagram rangkaian, dan pemasangan prototipe pada breadboard. Perancangan mempertimbangkan impedansi, batas tegangan, dan disipasi daya pada MOSFET agar sistem stabil pada kondisi switching berulang.
2. Pemrograman Arduino untuk mengatur logika switching
Arduino diprogram untuk menghasilkan sinyal kendali dengan interval tertentu dan/atau berdasarkan input sensor. Logika kendali dibangun untuk mensimulasikan skenario penggunaan transistor MOSFET untuk mematikan atau menghidupkan led
3. Pengujian efisiensi switching dan konsumsi daya
Pengamatan dilakukan untuk mengukur efek switching terhadap konsumsi daya, stabilitas tegangan, serta karakteristik termal MOSFET. Pengujian dilaksanakan dalam kondisi variabel beban dan durasi aktivasi berbeda.
4. Analisis data efisiensi terhadap metode konvensional
Data hasil pengujian dianalisis untuk menentukan besaran rugi daya, efisiensi switching, dan konsumsi energi kumulatif. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan karakteristik pendekatan konvensional, terutama dari sisi keandalan dan konsumsi energi.

Tahapan di atas bertujuan memberikan gambaran sistematis mengenai perilaku saklar elektronik digital dan dampaknya terhadap penggunaan energi pada skala kecil.

Parameter Pengujian

Evaluasi sistem dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter untuk menilai kualitas kinerja dan efisiensi sistem, yaitu:

1. Rugi daya (power loss)
Rugi daya dihitung berdasarkan disipasi panas pada MOSFET selama proses switching. Nilai ini penting untuk menentukan apakah switching digital mampu mengurangi energi yang terbuang dibanding metode mekanis.
2. Waktu respons switching
Waktu respons diukur untuk mengetahui tingkat kecepatan sistem dalam bertransisi dari kondisi non-konduksi ke konduksi. Parameter ini perlu dianalisis karena memengaruhi efisiensi dan performa beban.
3. Stabilitas tegangan saat beban aktif
Stabilitas tegangan diamati untuk memastikan tidak terjadi penurunan tegangan signifikan pada saat beban dinyalakan, sehingga kinerja beban dan komponen daya tetap terjaga.
4. Konsumsi energi total dalam 24 jam
Konsumsi energi kumulatif dihitung untuk mengidentifikasi efisiensi operasional sistem dalam interval panjang. Hasil tersebut dapat digunakan untuk menilai potensi aplikasi saklar digital pada sistem energi terdistribusi.

Analisis pada masing-masing parameter bertujuan menilai apakah penggunaan kontrol digital dan MOSFET mampu menghasilkan peningkatan efisiensi energi dibanding pendekatan konvensional, sekaligus mengetahui batas operasional sistem berdasarkan spesifikasi teknis komponen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian prototipe saklar elektronik digital berbasis Arduino dan transistor MOSFET, serta pembandingnya dengan saklar mekanis konvensional yang menggunakan relay. Pengujian dilakukan melalui serangkaian simulasi untuk menilai konsumsi daya, kecepatan switching, efisiensi energi, dan fleksibilitas integrasi sistem kendali. Seluruh hasil dianalisis berdasarkan parameter pengujian yang telah dirumuskan dalam metodologi penelitian.

Perbandingan Konsumsi Daya

Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam konsumsi daya idle antara saklar mekanis dan saklar elektronik digital. Pada saklar berbasis relay, konsumsi daya idle tercatat sekitar 0.7 watt, yang disebabkan oleh kebutuhan daya internal koil elektromagnetik untuk mempertahankan status operasional (Malvino, 1985; Mohan et al., 1995). Sebaliknya, saklar digital berbasis transistor MOSFET hanya membutuhkan konsumsi daya idle sekitar 0.1 watt, karena MOSFET tidak memerlukan energi forced untuk mempertahankan keadaan switching (Green, 2022; Bottaro et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa, secara struktural, sistem berbasis transistor lebih efisien terutama pada aplikasi dengan durasi stand-by yang tinggi (Skvarenina, 2002; Hart, 2010). Peningkatan efisiensi daya idle tersebut bersifat relevan dalam konteks penggunaan energi terdistribusi, di mana banyak node beroperasi secara paralel dengan siklus aktif yang pendek dan waktu idle yang panjang (G. Di Natale & Giomo, 2021). Pada sistem seperti sensor jaringan, modul lampu otomatis, atau kontrol energi skala kecil, pengurangan konsumsi daya idle secara akumulatif dapat berkontribusi terhadap penghematan energi yang signifikan (M. R. Patel, 2019; Mohan et al., 1995).

Tabel 1. Hasil Pengujian Perbandingan Kinerja

Parameter	MOSFET	Relay	Peningkatan
Efisiensi daya	99.6%	72%	+27.6%
Konsumsi energi /24h	2.4 Wh	16.8 Wh	-85.7%
Waktu respons	<1 ms	12 ms	12x lebih cepat
Drop tegangan	0.2 V	0.5 V	-60%

Kecepatan Switching

Pengujian waktu respons switching menunjukkan bahwa saklar mekanis berbasis relay memiliki waktu transisi rata-rata 10–15 milidetik, tergantung pada kondisi tegangan dan beban (Zhou et al., 2021). Waktu respons ini dipengaruhi oleh sifat mekanis relay yang membutuhkan proses perpindahan fisik kontak, serta menghasilkan noise listrik (bouncing) yang dapat memengaruhi performa (Ali & Kumar, 2019). Sebaliknya, saklar berbasis transistor MOSFET mampu melakukan switching dalam rentang waktu kurang dari 1 milidetik. Transisi ini terjadi hampir secara instan karena transistor MOSFET bekerja dalam domain elektronik tanpa komponen mekanis yang bergerak (Hassan, 2020). Selain itu, transistor MOSFET memiliki karakteristik yang lebih stabil pada switching berulang, dengan degradasi performa jangka panjang yang jauh lebih rendah (Lee & Santoso, 2022). Keunggulan ini memberikan nilai tambah pada sistem kontrol beban cepat, misalnya sistem PWM, kontrol motor, penjadwalan energi berbasis sensor, dan interkoneksi node energi pada sistem terdistribusi (Mohan, Undeland, & Robbins, 1995).

Tabel 2. Hasil Pengujian Perbandingan waktu respon

Aspek Pengujian	Relay Mekanis	MOSFET (Transistor Elektronik)
Waktu respons switching	10–15 ms, dipengaruhi kondisi tegangan dan beban	< 1 ms, hampir instan
Mekanisme kerja switching	Perpindahan fisik kontak	Switching elektronik tanpa bagian bergerak

Aspek Pengujian	Relay Mekanis	MOSFET (Transistor Elektronik)
Noise / bouncing	sehingga menimbulkan delay Tinggi karena adanya kontak mekanis	Tidak ada bouncing
Stabilitas switching berulang	Rentan degradasi akibat keausan mekanis	Sangat stabil dalam jangka panjang
Kesesuaian untuk sistem cepat (PWM, motor, sensor)	Kurang sesuai karena delay dan bouncing	Sangat sesuai karena switching cepat dan stabil
Aplikasi yang direkomendasikan	Beban yang tidak membutuhkan switching cepat	Sistem PWM, kontrol motor, penjadwalan sensor, sistem energi terdistribusi

Efisiensi Energi Sistem

Analisis konsumsi energi kumulatif dalam simulasi 24 jam menunjukkan bahwa penggunaan saklar elektronik digital dengan teknik kendali otomatis mampu meningkatkan efisiensi energi pada beban dengan siklus ON/OFF berkala.

Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh empat faktor utama:

1. Pengurangan rugi daya idle pada MOSFET.
2. Kecepatan switching yang lebih tinggi, sehingga kehilangan energi akibat transisi lebih kecil.
3. Stabilitas tegangan beban yang lebih baik, mengurangi resistansi termal dan rugi-rugi pada komponen.
4. Kemampuan pengendalian waktu yang lebih presisi oleh Arduino, sehingga pola aktivasi beban dapat disesuaikan dengan profil energi optimal.

Efisiensi energi ini semakin relevan ketika saklar digital diproyeksikan untuk sistem energi terdistribusi, seperti jaringan tenaga surya skala rumah tangga, sistem lampu otomatis terdistribusi, smart grid berskala mikro serta kontrol beban IoT skala kecil, efisiensi energi tidak hanya memberikan keuntungan teknis tetapi juga keuntungan ekonomis, terutama ketika diimplementasikan pada sistem dengan beban diverifikasi dan waktu operasi panjang.

Tabel 3. Uji Hasil Perhitungan Simulasi Kinerja Saklar Digital

Parameter Uji	Nilai Pengukuran/Simulasi	Hasil Hitung	Keterangan
Rugi daya saklar MOSFET	$I = 0.5A, R_{DS(on)} = 0.04\Omega$	0.01 W	Rugi daya sangat kecil
Rugi daya saklar Relay	$V = 5V, I = 0.14A$	0.7 W	Konsumsi idle tinggi
Efisiensi MOSFET	$(P_{in} = 2.5W), (P_{loss} = 0.01W)$	99.6%	Efisiensi sangat tinggi
Efisiensi Relay	$(P_{in} = 2.5W), (P_{loss} = 0.7W)$	72%	Efisiensi rendah
Waktu respons MOSFET	< 1 ms	< 1 ms	Sangat cepat
Waktu respons Relay	10–15 ms	12 ms (rerata)	Relatif Lambat
Stabilitas tegangan MOSFET	(12V → 11.8V)	0.2V drop	Stabil
Stabilitas tegangan Relay	(12V → 11.5V)	0.5V drop	Drop lebih besar
Energi konsumsi MOSFET	(0.1W . 24h)	2.4 Wh	Rendah
Energi konsumsi Relay	(0.7W . 24h)	16.8 Wh	Tinggi

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis kinerja saklar elektronik digital berbasis Arduino dan transistor MOSFET untuk aplikasi efisiensi energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang disimulasikan memiliki kinerja yang lebih efisien dibandingkan saklar konvensional berbasis relay, baik dari aspek konsumsi daya, kecepatan switching, maupun waktu respon transistor MOSFET. Secara spesifik, hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan transistor MOSFET mampu menurunkan konsumsi daya idle secara signifikan, dari sekitar 0,7 watt pada sistem relay menjadi hanya sekitar 0,1 watt. Penurunan rugi daya idle ini memberikan keuntungan terutama pada skenario operasional dengan waktu stand-by tinggi atau dalam lingkungan yang melibatkan banyak node energi terdistribusi. Selain itu, kecepatan switching

yang lebih tinggi pada transistor MOSFET, yang berada pada orde kurang dari 1 milidetik, memberikan keunggulan performa dibanding relay yang memiliki waktu respons 10–15 milidetik. Karakteristik ini penting dalam sistem dengan siklus switching berkala atau beban dinamis.

Efisiensi energi kumulatif pada sistem berbasis Arduino dan MOSFET tercatat meningkat dalam simulasi pengoperasian 24 jam dengan pola ON/OFF terjadwal. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa penggunaan saklar elektronik digital tidak hanya efektif secara teknis tetapi juga memberikan dampak ekonomis, terutama pada aplikasi skala kecil hingga menengah. Lebih jauh, integrasi mikrokontroler Arduino memungkinkan penerapan strategi pengendalian cerdas, seperti penjadwalan berbasis waktu, dan kontrol jarak jauh berbasis jaringan. Hal ini menegaskan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai saklar elektronik, tetapi juga sebagai modul kendali yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan kebutuhan operasional.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa saklar elektronik digital berbasis Arduino dan transistor MOSFET merupakan solusi yang efisien, fleksibel, dan adaptif untuk pengelolaan energi terdistribusi. Teknologi ini memiliki potensi penerapan yang luas pada sistem rumah pintar, bangunan cerdas, dan sistem energi skala mikro, terutama pada skenario yang menuntut efisiensi energi, keandalan switching, dan kemampuan integrasi dengan sistem digital lainnya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan evaluasi lanjutan terhadap kinerja sistem pada beban yang lebih beragam, penggunaan MOSFET dengan rating daya lebih tinggi, serta analisis biaya implementasi dalam skala komersial. Selain itu, pengembangan algoritma kontrol berbasis pembelajaran mesin berpotensi meningkatkan performa adaptif sistem dalam menghadapi perubahan profil beban dan produksi energi pada lingkungan terdistribusi.

SARAN

Integrasi modul WiFi (ESP8266/ESP32) untuk sistem Internet of Things (IoT)

Pengembangan sistem dapat ditingkatkan melalui integrasi modul WiFi seperti ESP8266 atau ESP32, sehingga perangkat mampu melakukan pemantauan dan pengendalian jarak jauh secara real-time melalui jaringan internet. Fitur ini memungkinkan implementasi dashboard berbasis web atau aplikasi mobile untuk menampilkan status sensor, memberikan perintah kontrol, serta mengakses histori data penggunaan beban. Selain itu, integrasi IoT juga membuka peluang penerapan notifikasi otomatis, logging berbasis cloud, dan interoperability dengan platform IoT komersial seperti Blynk, MQTT Broker, atau Home Assistant.

Penerapan pada sistem tenaga surya atau manajemen beban terprogram

Sistem yang dikembangkan dapat diarahkan untuk mendukung aplikasi pada pembangkit listrik tenaga surya berskala kecil dengan mekanisme switching otomatis berdasarkan tersedia atau tidaknya daya dari panel surya. Implementasi manajemen beban terprogram, seperti pengaturan prioritas beban dan pembagian waktu operasi, akan sangat relevan untuk mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik utama. Pendekatan ini juga dapat diuji dalam konteks demand-side management pada lingkungan rumah tangga atau industri kecil.

Penggunaan sensor berbasis AI untuk optimasi kontrol beban dan efisiensi konsumsi energi

Integrasi sensor dan algoritma berbasis kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memprediksi pola konsumsi energi dan memberikan keputusan kontrol beban yang bersifat adaptif. Sebagai contoh, sistem dapat mempelajari perilaku penggunaan energi harian, mendeteksi anomali, dan secara otomatis melakukan penyesuaian untuk menurunkan konsumsi daya tanpa mengurangi kenyamanan pengguna. Pendekatan ini relevan dengan konsep smart energy dan dapat menjadi basis untuk mengembangkan prototipe sistem cerdas dalam manajemen energi rumah tangga atau fasilitas publik.

REFERENSI

Di Natale, G., & Giomo, R. (2021). Design and implementation of smart home energy control system based on IoT. *IEEE Access*, 9, 14521–14530.

- Patel, M. R. (2019). Microcontroller-based electronic switching system for power management. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 7(4), 112–118.
- Bottaro, E., Rizzo, S. A., & Salerno, N. (2022). Circuit models of power MOSFETs leading the way of GaN HEMT modelling—A review. *Energies*, 15(9), 3415.
- Green, P. B. (2022). Designing with power MOSFETs: How to avoid common issues and failure modes (Application Note AN_2112_PL18_2112_024619). Infineon Technologies.
- Malvino, A. P. (1985). *Prinsip-prinsip elektronika* (J. Santoso, Trans.). Jakarta: Salemba Teknika.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (1995). *Power electronics: Converters, applications, and design* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ali, R., & Kumar, S. (2019). Performance analysis of electromechanical switching devices in power electronics. *Journal of Electrical Systems and Control*, 14(2), 115–128.
- Zhou, H., Li, X., & Chen, Y. (2021). Contact bounce characteristics and mitigation methods in high-speed relay switching. *International Journal of Power Electronics Research*, 19(3), 241–259.
- Hassan, M. (2020). High-frequency switching behavior of MOSFET-based solid-state devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 10987–10995.
- Lee, J., & Santoso, B. (2022). Reliability assessment of MOSFET switching under repetitive load cycles in distributed energy systems. *Renewable Energy Systems Journal*, 28(4), 301–319.
- Monk, S. (2016). *Programming Arduino: Getting started with sketches*. New York: McGraw-Hill Education.
- Skvarenina, T. L. (2002). *The power electronics handbook*. New York: CRC Press.
- Hart, D. W. (2010). *Power electronics*. Valparaiso, IN: Valparaiso University.
- Sedra, A., & Smith, K. (2015). *Microelectronic circuits*. New York: Oxford University Press.
- Arduino.cc. (2025). *DigitalWrite()* function reference. Retrieved from <https://www.arduino.cc>