

Efisiensi Energi Distilasi Uap Minyak Serai Wangi Berbasis IoT dan Fuzzy Logic

Raihan Putri¹⁾, Ezwarsyah²⁾, Maryana³⁾, Trisna⁴⁾

^{1,2)}Dosen Program Studi Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro Universitas Malikussaleh

³⁾Dosen Program Studi Teknik Informatika Universitas Malikussaleh

⁴⁾Dosen Program Studi Teknik Industri Universitas Malikussaleh

raihan@unimal.ac.id; Ezwarsyah@unimal.ac.id;

maryana@unimal.ac.id; trisna@unimal.ac.id

Abstrak

Proses distilasi uap minyak serai wangi secara konvensional sering mengalami pemborosan energi dan fluktuasi suhu yang berpotensi menurunkan kualitas produk. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kendali otomatis dan pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengoptimalkan efisiensi energi serta menjaga kualitas produk minyak serai wangi. Sistem mengintegrasikan algoritma Fuzzy Logic dua variabel input independen, yaitu temperatur boiler (T_b) untuk mengendalikan heater dan temperatur kondensor (T_k) untuk mengendalikan pompa pendingin, serta platform IoT untuk pemantauan real-time. Pengujian dilakukan selama 120 menit menggunakan 2 kg serai segar dengan membandingkan kinerja sistem berkendali dan tanpa kendali pada kondisi awal yang setara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Fuzzy Logic mampu menjaga kestabilan operasional pada temperatur boiler 114°C dan tekanan 78 kPa. Sistem berkendali berhasil menekan konsumsi energi dari 1,82 kWh menjadi 1,50 kWh, atau menghemat energi sebesar 17,6% (0,32 kWh). Selain itu, penghematan energi tidak mengorbankan kualitas produk, ditunjukkan oleh peningkatan rendemen minyak (0,63% vs 0,54%) dan kadar sitral (35% vs 25%) dibandingkan sistem tanpa kendali. Validasi sensor temperatur dan tekanan menunjukkan deviasi rata-rata masing-masing sebesar $4,04^{\circ}\text{C}$ (5,6%) dan 1,28 kPa (2,9%). Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi Fuzzy Logic dan IoT efektif meningkatkan efisiensi energi sekaligus mempertahankan mutu hasil distilasi uap serai wangi.

Kata Kunci: Distilasi Uap, Serai Wangi, Fuzzy Logic, Internet of Things, Efisiensi Energi, Kadar Sitral.

I. PENDAHULUAN

Serai wangi merupakan bahan tanaman aromatik yang minyak atsirinya dapat diperoleh melalui proses distilasi. Distilasi memanfaatkan perpindahan komponen volatil bersama uap, kemudian campuran uap didinginkan di kondensor dan dipisahkan menjadi fase minyak dan air [1],[2]. Pada proses ini, temperatur, tekanan, dan suplai energi merupakan parameter operasi yang perlu dipantau agar kondisi pemanasan dan kondensasi dapat dievaluasi secara konsisten [3].

Pengendalian dan pemantauan proses distilasi yang dilakukan secara manual memiliki keterbatasan dalam kontinuitas pencatatan dan konsistensi pengoperasian [4],[5]. Pemanfaatan mikrokontroler dan IoT dapat membantu memperoleh data proses secara real-time serta mendukung pengoperasian aktuator secara otomatis [8]-[13]. Namun, fungsi IoT pada penelitian ini dibatasi sebagai sistem monitoring; keputusan kendali heater dan pompa ditentukan oleh aturan fuzzy yang dijalankan pada mikrokontroler.

Penelitian sebelumnya telah menerapkan fuzzy logic untuk pengendalian temperatur pada proses distilasi dan menunjukkan penerapan aturan fuzzy pada sistem termal [14]. Penelitian mengenai ekstraksi minyak atsiri juga menunjukkan bahwa kondisi proses, metode ekstraksi, dan pengaturan

energi dapat memengaruhi karakteristik proses dan hasil minyak [15]-[17].

Berdasarkan literatur yang digunakan dalam naskah ini, masih terdapat ruang untuk menggabungkan kendali fuzzy dua-variabel independen dengan monitoring IoT pada proses distilasi uap serai wangi. Kontribusi penelitian ini dibatasi pada implementasi sistem tersebut dan pengamatan awal terhadap konsumsi energi, temperatur, tekanan, serta volume minyak yang dihasilkan. Klaim keunggulan terhadap metode kendali lain tidak dibuat karena penelitian ini belum mencakup replikasi maupun perbandingan dengan baseline kendali ON/OFF konvensional yang terpisah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

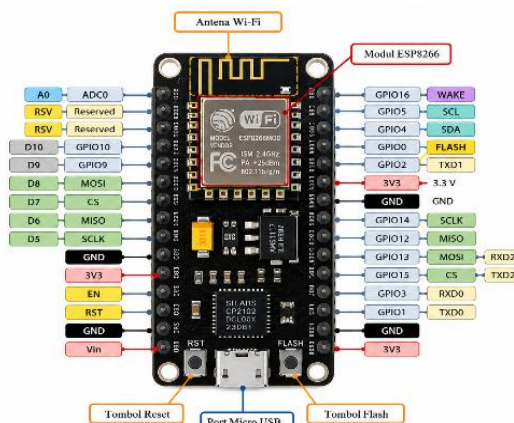
2.1 Distilasi Uap Minyak Serai

Distilasi uap merupakan metode pemisahan minyak atsiri dari bahan tanaman dengan memanfaatkan uap air sebagai media pembawa senyawa volatil. Uap dialirkan melalui bahan tanaman sehingga komponen minyak atsiri ikut terbawa, kemudian campuran uap dikondensasikan dan dipisahkan berdasarkan sifat fisiknya [15]-[17]. Dalam konteks penelitian ini, konsumsi energi digunakan sebagai besaran evaluasi utama. Energi listrik dihitung dari pembacaan energi kumulatif alat ukur selama waktu pengujian, sedangkan

pengurangan konsumsi energi dihitung dengan persamaan: $\text{Pengurangan energi (\%)} = [(E_{\text{tanpa kendali}} - E_{\text{kendali}}) / E_{\text{tanpa kendali}}] \times 100\%$. Nilai tersebut merupakan pengurangan konsumsi energi pada percobaan yang dilakukan, bukan efisiensi termodinamika keseluruhan proses.

2.2 NodeMCU ESP8266

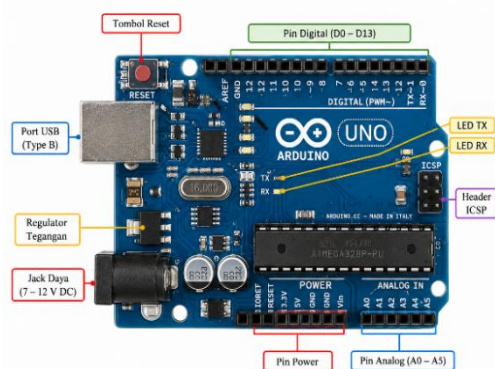
NodeMCU ESP8266 merupakan platform mikrokontroler dengan konektivitas Wi-Fi terintegrasi yang mendukung penerapan sistem berbasis Internet of Things (IoT). Perangkat ini dilengkapi pin GPIO, ADC, komunikasi serial, SPI, dan I2C yang memungkinkan integrasi dengan berbagai sensor dan perangkat elektronik. Kemampuan tersebut menjadikan NodeMCU ESP8266 dapat digunakan untuk pemrosesan serta komunikasi data pada sistem monitoring dan kendali [18],[19].



Gambar 1. NodeMCU ESP8266

2.3 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang digunakan untuk memproses data dan mengendalikan perangkat elektronik sesuai program yang diberikan. Arduino Uno memiliki 14 pin digital, 6 pin analog, serta mendukung komunikasi serial dan pemrograman melalui USB. Dukungan perangkat keras dan Arduino IDE memungkinkan papan ini diintegrasikan dengan berbagai sensor dan aktuator pada sistem monitoring dan kendali [20],[21].



Gambar 2. Arduino Uno ATmega328P

2.4 Sensor

Sensor merupakan perangkat yang digunakan untuk mendeteksi besaran fisik dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kendali [22]. Pada sistem distilasi ini, parameter proses diukur menggunakan sensor suhu termokopel Tipe-K dan sensor tekanan MPX5500DP sebagai masukan untuk proses monitoring dan pengendalian.

2.4.1 Sensor Suhu

Termokopel Type-K merupakan sensor temperatur yang menghasilkan sinyal tegangan sebagai respons terhadap perbedaan temperatur pada pasangan material penyusunnya. Sensor ini banyak digunakan untuk pengukuran temperatur karena memiliki rentang pengukuran yang luas dan dapat diintegrasikan dengan sistem akuisisi data [23]. Dalam penelitian ini, thermocouple Type-K digunakan bersama modul MAX6675 untuk memperoleh data temperatur boiler dan kondensor selama proses distilasi yang selanjutnya diproses oleh mikrokontroler [24].



Gambar 3. Sensor Suhu

2.4.2 Sensor Tekanan

MPX5500DP merupakan sensor tekanan diferensial dengan keluaran analog yang dapat diproses oleh mikrokontroler [25],[26]. Pada penelitian ini sensor digunakan untuk memantau tekanan sebagai parameter kondisi operasi boiler dan tidak digunakan sebagai input pada loop kendali fuzzy. Konfigurasi port sensor dan referensi tekanan tidak didokumentasikan secara lengkap pada catatan eksperimen yang tersedia, sehingga angka tekanan pada hasil penelitian diperlakukan sebagai pembacaan sensor yang harus ditafsirkan sesuai konfigurasi instrumentasi aktual, bukan langsung sebagai tekanan absolut.



Gambar 4. Sensor Tekanan

2.5 Software Blynk

Blynk merupakan platform *Internet of Things* (IoT) yang digunakan untuk menghubungkan

perangkat mikrokontroler dengan aplikasi berbasis internet. Platform ini memungkinkan data dari perangkat seperti NodeMCU ESP8266 dikirim dan ditampilkan melalui antarmuka pada perangkat seluler secara real-time. Blynk menyediakan fitur monitoring dan kontrol yang dapat digunakan untuk mendukung pemantauan serta pengendalian perangkat dari jarak jauh [27],[28].



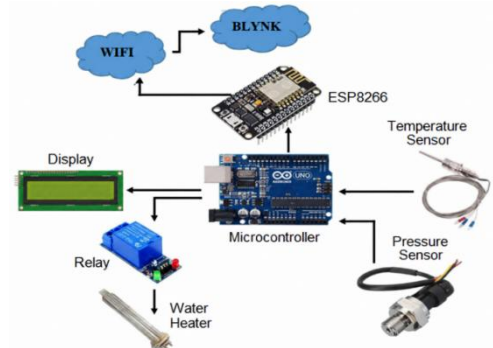
Gambar 5. Tampilan Software Blynk

2.6 Fuzzy Logic

Fuzzy logic digunakan untuk merepresentasikan kondisi variabel proses melalui derajat keanggotaan antara 0 dan 1, kemudian menerapkan aturan IF–THEN untuk menentukan aksi aktuator [29]. Pada penelitian ini keluaran aktuator bersifat diskrit, yaitu ON, Standby, atau OFF. Karena itu, implementasi yang dijelaskan dalam naskah menggunakan pemilihan kategori dengan derajat keanggotaan maksimum (max-membership). Dengan definisi tersebut, istilah “fuzzy Sugeno” yang sebelumnya muncul pada bagian hasil dan gambar tidak digunakan lagi, karena metode yang dijelaskan tidak menggunakan keluaran konsekuen berbentuk fungsi linear/konstanta seperti formulasi Sugeno.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Arsitektur Sistem



Gambar 6. Desain Elektronik Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas sistem monitoring, sistem kendali, dan platform IoT. Arduino Uno digunakan sebagai unit pemrosesan kendali, sedangkan ESP8266 digunakan untuk komunikasi Wi-Fi dan pengiriman data ke Blynk. Temperatur diukur menggunakan thermocouple Type-K dengan modul MAX6675 dan tekanan menggunakan MPX5500DP. Heater/water heater memiliki rating 600 W pada 220 V AC, sedangkan

volume air boiler 5 liter dan massa bahan 2 kg untuk masing-masing kondisi. Data daya pada Tabel 8 berasal dari pengukuran listrik selama pengujian dan harus dibaca sebagai daya listrik terukur pada titik pengukuran, bukan sebagai rating heater. Daya nominal pompa dan rating relay tidak tercatat dalam data eksperimen yang tersedia dan karena itu tidak direkonstruksi dalam artikel ini.

3.2 Perancangan Sistem Monitoring

Sistem monitoring mengukur temperatur dan tekanan selama proses distilasi. Temperatur menggunakan thermocouple Type-K dengan modul MAX6675, sedangkan tekanan menggunakan MPX5500DP. Data ditampilkan pada LCD dan dikirim melalui ESP8266 ke Blynk. Tekanan hanya berfungsi sebagai parameter monitoring untuk melihat kestabilan operasi dan tidak menjadi input pada loop kendali fuzzy.

3.3 Perancangan Sistem Kendali

Sistem kendali menggunakan dua variabel input independen, yaitu temperatur boiler (Tb) untuk menentukan aksi heater dan temperatur kondensor (Tk) untuk menentukan aksi pompa. Masing-masing variabel direpresentasikan dalam tiga kategori linguistik. Namun, rentang numerik membership yang tercantum pada dokumentasi awal belum dapat diverifikasi terhadap source code kendali yang tidak tersedia pada berkas penelitian. Oleh karena itu, rentang tersebut tidak digunakan sebagai dasar untuk mengklaim setpoint proses 100–114 °C. Hubungan antara threshold kendali dan temperatur proses akhir diperlakukan sebagai keterbatasan dokumentasi dan memerlukan verifikasi melalui source code atau log status relay pada penelitian lanjutan.

Tabel 1. Fungsi Keanggotaan (Membership Function) Variabel Fuzzy

Variabel	Himpunan	Rentang switching (°C)	Bentuk	Aktuator
Tb (boiler)	Dingin	≤30	Trapesium kiri	Kompot ON
	Sedang/ Standby	35–42	Trapesium	Kompot Standby
	Panas	42–44	Trapesium	Kompot OFF
Tk (kondensor)	Dingin	0–20	Trapesium kiri	Pompa OFF
	Sedang/ Standby	25–30	Trapesium	Pompa Standby
	Panas	30–35	Trapesium kanan	Pompa ON

Berdasarkan derajat keanggotaan hasil fuzzifikasi, sistem menerapkan basis aturan IF–THEN yang terpisah untuk heater dan pompa. Temperatur boiler digunakan pada rule base heater, sedangkan temperatur kondensor digunakan pada rule base pompa. Pemisahan ini penting karena kedua aktuator memiliki fungsi proses yang berbeda.

Tabel 2. Basis Aturan (Rule Base) Kendali Kompor

IF Tb	THEN Kompor
Dingin	Hidup
Sedang	Standby
Panas	Mati

Tabel 3. Basis Aturan (Rule Base) Kendali Pompa

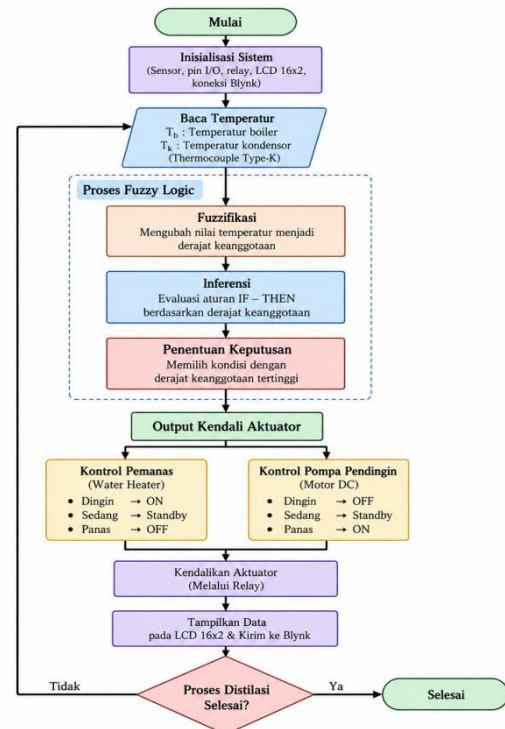
IF Tk	THEN Pompa
Dingin	Mati
Sedang	Standby
Panas	Hidup

Defuzzifikasi dilakukan dengan metode max-membership, yaitu kategori output dengan derajat keanggotaan tertinggi dipilih sebagai aksi aktuator. Pendekatan ini sesuai dengan keluaran diskrit relay yang digunakan pada sistem. Karena status relay tidak direkam secara terpisah pada pengujian, duty cycle dan frekuensi switching tidak dapat dihitung kembali dari data yang tersedia.

Tabel 4. Contoh Proses Fuzzifikasi dan Defuzzifikasi pada $T_b = 38^\circ\text{C}$

Tahap	Kategori	Rentang ($^\circ\text{C}$)	Derajat Keanggotaan (μ)
1. Fuzzifikasi	Dingin	≤ 30	0,0
1. Fuzzifikasi	Sedang/Standby	35–42	0,8
1. Fuzzifikasi	Panas	42–44	0,0
2. Seleksi (max-membership)	-	-	$\mu_{\text{maks}} = 0,8$ (Sedang)
3. Output Aksi	-	-	-

Proses pembacaan sensor dan pengendalian dilakukan secara berulang hingga proses distilasi selesai. Pada setiap siklus, Arduino Uno membaca temperatur boiler (T_b) dan temperatur kondensor (T_k) dari termokopel Type-K melalui modul MAX6675. Nilai temperatur tersebut kemudian diubah menjadi derajat keanggotaan pada himpunan dingin, sedang/standby, dan panas melalui proses fuzzifikasi. Selanjutnya, aturan IF–THEN diterapkan secara independen untuk masing-masing aktuator: T_b menentukan status heater, sedangkan T_k menentukan status pompa pendingin. Karena keluaran sistem berupa status diskrit, kategori dengan derajat keanggotaan maksimum dipilih sebagai keluaran melalui metode max-membership, sehingga aksi yang dihasilkan berupa ON, standby, atau OFF. Keputusan tersebut diteruskan ke relay untuk mengatur heater dan pompa, sementara data temperatur dan status aktuator ditampilkan pada LCD serta dikirim ke platform Blynk melalui ESP8266 untuk pemantauan secara real-time. Alur kerja sistem kendali berbasis fuzzy logic tersebut ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai numerik membership pada penelitian ini perlu diverifikasi kembali terhadap source code sebelum digunakan untuk merekonstruksi perilaku kendali secara kuantitatif.

**Gambar 7. Diagram Alir Sistem Kendali Berbasis Fuzzy Logic untuk Proses Distilasi**

3.4 Kondisi Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan menggunakan 2 kg serai segar selama 120 menit pada dua kondisi, yaitu dengan kendali dan tanpa kendali. Kondisi awal dibuat setara berdasarkan massa bahan, volume air boiler, dan suhu ruang. Pada kondisi tanpa kendali, heater dinyatakan menyala terus-menerus tanpa relay cut-off. Pengukuran energi dibandingkan pada durasi yang sama. Penelitian ini tidak memiliki kelompok baseline ON/OFF konvensional yang terpisah dan tidak memiliki replikasi eksperimen.

Keterbatasan metodologis utama adalah setiap kondisi hanya diuji satu kali ($n=1$), sehingga tidak tersedia estimasi variabilitas antarulangan, interval kepercayaan, atau uji signifikansi. Selain itu, status relay per waktu, rating daya pompa, rating relay, konfigurasi referensi tekanan, dan source code fuzzy tidak tersedia pada dokumentasi eksperimen yang digunakan untuk penyusunan artikel. Karena itu, artikel ini membatasi interpretasi pada hasil pengukuran aktual yang tercatat dan tidak melakukan rekonstruksi data yang tidak tersedia.

3.5 Implementasi Platform IoT

Platform IoT yang digunakan pada sistem ini adalah Blynk yang terintegrasi dengan ESP8266 melalui jaringan Wi-Fi. Data hasil pengukuran temperatur dan tekanan selama proses distilasi dikirimkan ke platform Blynk untuk mendukung pemantauan secara real-time. Implementasi ini memungkinkan kondisi proses distilasi dipantau secara jarak jauh melalui perangkat yang terhubung ke internet.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Implementasi

Sistem kontrol dan monitoring telah diimplementasikan pada proses distilasi uap serai dengan mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, aktuator, dan komunikasi IoT. Thermocouple Type-K dan MPX5500DP digunakan untuk mengukur temperatur dan tekanan, sedangkan mikrokontroler memproses data dan mengendalikan sistem. Relay mengatur pengoperasian kompor dan motor pompa, sementara ESP8266 mengirimkan data monitoring ke platform Blynk melalui Wi-Fi secara real-time. Seluruh komponen ditempatkan pada control panel box sehingga proses monitoring dan pengendalian dapat dilakukan secara terintegrasi.

4.2 Pengujian Sistem

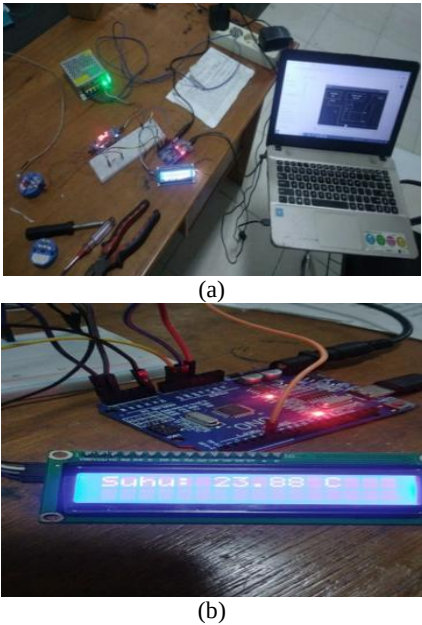
Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja monitoring, respons kendali, dan efisiensi energi pada proses distilasi. Evaluasi mencakup pengujian temperatur dan tekanan, validasi akurasi sensor secara kuantitatif, kinerja sistem kendali, perbandingan konsumsi energi, serta dampaknya terhadap rendemen dan kualitas produk.

4.2.1 Pengujian dan Validasi Sensor temperatur

Pengujian sensor temperatur dilakukan dengan membandingkan pembacaan thermocouple Type-K dengan termometer sebagai acuan pada lima titik uji (30-100 °C). Hasil validasi kuantitatif ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil validasi kuantitatif				
Titik Uji	Termometer (°C)	Thermocouple (°C)	Selisih (°C)	% Deviasi
1	30,0	28,5	1,5	5,0%
2	50,0	47,8	2,2	4,4%
3	70,0	66,5	3,5	5,0%
4	90,0	85,0	5,0	5,6%
5	100,0	92,0	8,0	8,0%
Rata-rata (MAE)	—	—	4,04	5,6%

Berdasarkan Tabel 5, MAE temperatur sebesar 4,04 °C dan deviasi rata-rata sebesar 5,6% terhadap termometer acuan. Deviasi meningkat pada titik suhu yang lebih tinggi dan mencapai 8,0 °C pada titik 100 °C. Perbedaan tersebut menunjukkan perlunya kalibrasi atau koreksi sensor sebelum digunakan sebagai dasar pengendalian presisi. Karena titik ukur thermocouple dan termometer acuan tidak didokumentasikan sebagai posisi yang identik, selisih pembacaan juga tidak dapat seluruhnya diatribusikan pada kesalahan sensor.



Gambar 8. Pengujian Sensor Temperatur (a) Proses Pengujian (b) Hasil Pembacaan Pengujian

Tabel 6. Spesifikasi Perangkat Keras dan Kondisi Awal Pengujian

Parameter	Nilai
Daya kompor / water heater	600 W
Tegangan kerja heater	220 V AC
Volume air dalam boiler	5 liter
Massa serai (kedua kondisi)	2 kg
Suhu ruang saat pengujian	28 °C
Kondisi “tanpa kendali”	Heater menyala terus-menerus (full power, tanpa relay cut-off)

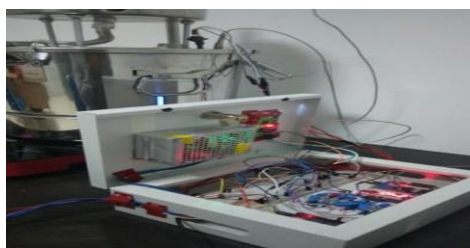
4.2.2 Pengujian dan Validasi Sensor Tekanan

Pengujian dan validasi sensor tekanan MPX5500DP dilakukan terhadap manometer digital acuan pada lima titik uji (20-100 kPa), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Validasi Sensor Tekanan terhadap Manometer Digital Acuan

Titik Uji	Manometer Digital (kPa)	Sensor MPX5500D P (kPa)	Selisih (kPa)	% Deviasi
1	20,0	21,2	1,2	6,0%
2	40,0	41,5	1,5	3,8%
3	60,0	61,0	1,0	1,7%
4	78,0	79,3	1,3	1,7%
5	100,0	98,6	1,4	1,4%
Rata-rata (MAE)	-	-	1,28	2,9%

Berdasarkan Tabel 7, MAE sensor tekanan sebesar 1,28 kPa dan deviasi rata-rata 2,9%. Pada titik uji 78 kPa, selisih sensor terhadap manometer adalah 1,3 kPa atau sekitar 1,7%. Nilai 78 kPa pada pengujian proses merupakan pembacaan sensor pada konfigurasi instrumentasi penelitian. Karena konfigurasi referensi port MPX5500DP tidak terdokumentasi lengkap, nilai tersebut tidak dinyatakan sebagai tekanan absolut atau gauge tanpa verifikasi tambahan.



(a)

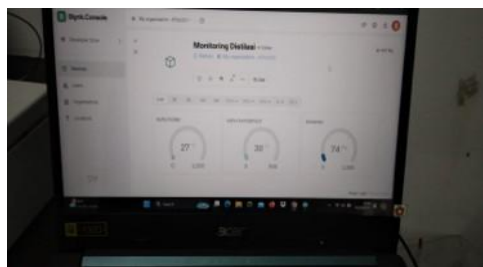


(b)

Gambar 9. Pengujian Sensor Tekanan (a) Proses Pengujian (b) Hasil Pembacaan Pengujian

4.2.3 Pengujian Blynk IoT

Proses pengujian dan tampilan monitoring pada blynk IoT dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengirim dan menampilkan data monitoring melalui jaringan internet. ESP8266 digunakan sebagai penghubung antara sistem monitoring dan platform blynk melalui komunikasi Wi-Fi, sehingga data temperatur dan tekanan dapat dipantau secara real-time. Pengujian ini menunjukkan bahwa data hasil pengukuran sensor dapat diterima dan ditampilkan pada platform Blynk selama proses berlangsung. Adapun Gambar 10 menunjukkan proses pengujian dan tampilan monitoring pada blynk IoT



Gambar 10. Proses Pengujian dan Tampilan Monitoring pada Blynk

4.3 Analisis Kinerja Sistem

Analisis kinerja sistem dilakukan berdasarkan data hasil pengujian selama proses distilasi yang meliputi temperatur, tekanan, daya, dan konsumsi energi.

4.3.1 Analisis Temperatur dan Tekanan

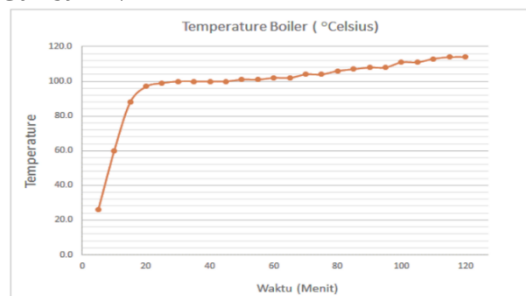
Berdasarkan Tabel 8, temperatur boiler meningkat hingga 100 °C pada menit ke-30 dan selanjutnya meningkat bertahap hingga 114 °C pada akhir pengujian, sedangkan tekanan terukur berada sekitar 78 kPa sejak menit ke-15. Pola temperatur ini menunjukkan respons termal sistem selama pengujian. Nilai threshold membership pada Tabel 1 tidak boleh ditafsirkan sebagai setpoint akhir proses karena dokumentasi source

code dan log switching relay tidak tersedia. Dengan demikian, pembahasan kendali dibatasi pada respons temperatur dan tekanan yang benar-benar tercatat, bukan pada klaim performa tracking terhadap setpoint tertentu.

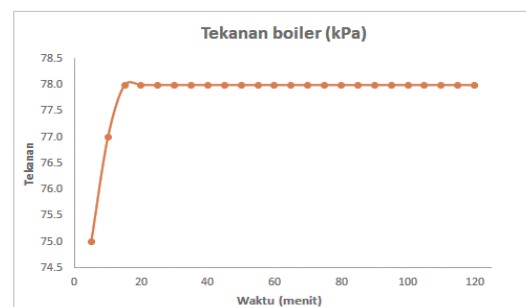
Tabel 8. Hasil Pengujian Kinerja Sistem Distilasi

Waktu (Min)	Suhu (°C)	Tekanan (kPa)	Daya (W)	Energi (kWh)	Arus (A)
5	26.0	75.0	859.1	0.01	4.33
10	60.0	77.0	859.1	0.10	4.32
15	88.0	78.0	849.2	0.16	4.26
20	97.0	78.0	844.0	0.23	4.24
25	99.0	78.0	844.1	0.30	4.17
30	100.0	78.0	832.6	0.39	4.17
35	100.0	78.0	829.4	0.44	4.17
40	100.0	78.0	833.3	0.52	4.17
45	100.0	78.0	830.2	0.58	4.17
50	101.0	78.0	831.3	0.65	4.17
55	101.0	78.0	830.8	0.74	4.16
60	102.0	78.0	856.5	0.77	4.16
65	102.0	78.0	845.6	0.87	4.20
70	104.0	78.0	843.9	0.95	4.22
75	104.0	78.0	846.8	1.00	4.19
80	106.0	78.0	869.3	1.05	4.19
85	107.0	78.0	846.1	1.08	4.32
90	108.0	78.0	850.1	1.14	4.20
95	108.0	78.0	854.3	1.22	4.20
100	111.0	78.0	849.9	1.29	4.20
105	111.0	78.0	850.0	1.35	4.30
110	113.0	78.0	850.1	1.38	4.32
115	114.0	78.0	850.0	1.44	4.32
120	114.0	78.0	849.0	1.50	4.32

Grafik temperatur dan tekanan terhadap waktu digunakan untuk melihat karakteristik pemanasan dan kestabilan kondisi operasi sistem, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



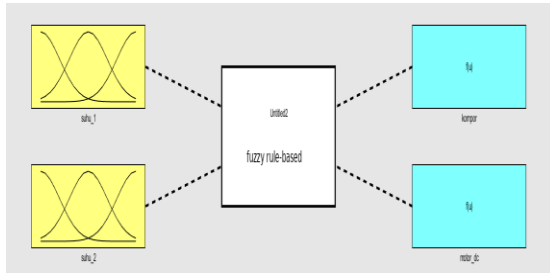
Gambar 11. Grafik Temperatur Boiler Selama Distilasi



Gambar 12. Grafik Tekanan Boiler Selama Distilasi

Penerapan kendali menggunakan dua input independen, yaitu temperatur boiler dan temperatur kondensor. Temperatur boiler digunakan untuk menentukan kondisi heater, sedangkan temperatur

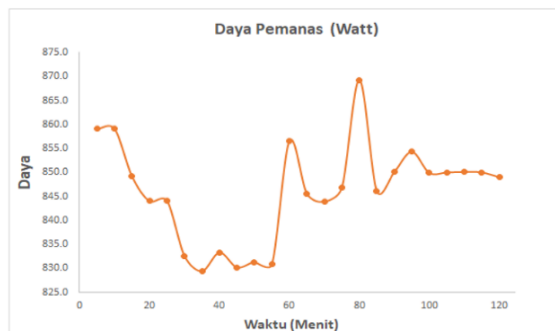
kondensor digunakan untuk menentukan kondisi pompa. Berdasarkan metode yang dijelaskan pada bagian 3.3, keputusan aktuator ditentukan melalui aturan fuzzy dan pemilihan max-membership. Istilah “fuzzy Sugeno” dihapus untuk menghindari ketidaksesuaian antara metode yang dilaporkan dan implementasi keluaran diskrit.



Gambar 13. Diagram Kendali Fuzzy Berbasis Aturan pada Sistem Distilasi

4.3.2 Analisis Konsumsi Daya

Daya listrik terukur selama proses berada pada kisaran 829,4–869,3 W dengan rata-rata sekitar 846,03 W. Angka ini berbeda dari rating heater 600 W pada Tabel 6. Oleh karena itu, 600 W diperlakukan sebagai rating komponen, sedangkan 829,4–869,3 W diperlakukan sebagai pembacaan daya pada titik ukur listrik yang digunakan saat eksperimen. Karena titik pengukuran tidak didokumentasikan secara rinci, data tersebut tidak digunakan untuk menyimpulkan daya heater secara individual. Perbedaan ini juga menjadi bagian dari keterbatasan instrumentasi yang perlu diperjelas pada penelitian berikutnya.



Gambar 13. Grafik Profil Daya Selama Proses Distilasi

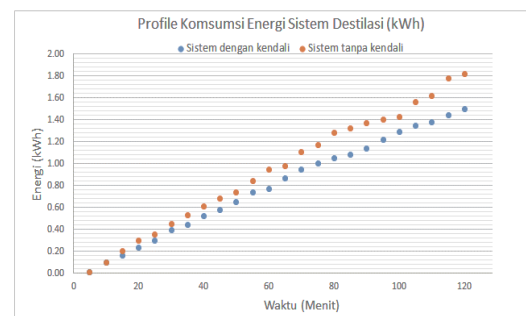
4.3.3 Analisis Efisiensi Energi

Pada akhir pengujian 120 menit, konsumsi energi tercatat 1,50 kWh pada sistem berkendali dan 1,82 kWh pada sistem tanpa kendali. Selisih konsumsi energi sebesar 0,32 kWh, sehingga pengurangan relatif dihitung sebagai $[(1,82-1,50)/1,82] \times 100\% = 17,6\%$. Nilai 17,6% merupakan pengurangan konsumsi energi pada satu percobaan per kondisi, bukan ukuran efisiensi termodinamika dan bukan estimasi yang telah diuji secara statistik. Karena tidak ada replikasi dan tidak ada baseline ON/OFF konvensional yang terpisah, hasil ini diperlakukan sebagai temuan awal.

Tabel 9. Perbandingan Konsumsi Energi dengan Sistem dan Tanpa Kendali

Waktu (Menit)	Konsumsi Energi (kWh)	
	Sistem dengan Kendali	Sistem tanpa Kendali
5	0.01	0.01
10	0.10	0.10
15	0.16	0.20
20	0.23	0.30
25	0.30	0.35
30	0.39	0.45
35	0.44	0.53
40	0.52	0.61
45	0.58	0.68
50	0.65	0.74
55	0.74	0.84
60	0.77	0.95
65	0.87	0.98
70	0.95	1.11
75	1.00	1.17
80	1.05	1.28
85	1.08	1.32
90	1.14	1.37
95	1.22	1.40
100	1.29	1.43
105	1.35	1.56
110	1.38	1.62
115	1.44	1.78
120	1.50	1.82

Berdasarkan Tabel 9, sistem dengan kendali menunjukkan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan sistem tanpa kendali, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 14. Grafik Perbandingan Konsumsi Energi

4.3.4 Analisis Kinerja Kendali

Evaluasi kinerja difokuskan pada data temperatur, tekanan, dan energi kumulatif yang tersedia. Duty cycle relay tidak dihitung karena log status ON/OFF tidak direkam secara terpisah. Selain itu, hubungan antara energi kumulatif dan waktu tidak digunakan sebagai bukti independen kinerja fuzzy, karena energi kumulatif merupakan hasil integrasi daya terhadap waktu. Penelitian lanjutan perlu merekam status relay dan melakukan pengujian berulang agar metrik switching, variabilitas, dan signifikansi perbedaan dapat dianalisis.

4.3.5 Rendemen dan Kualitas Produk

Hasil pengukuran volume minyak dan berat jenis ditunjukkan pada Tabel 10. Dengan massa bahan awal 2.000 g, volume minyak 12,5 mL dan berat jenis 0,89 g/mL menghasilkan massa minyak

sekitar 11,125 g dan rendemen berbasis massa sekitar 0,56%. Pada kondisi tanpa kendali, volume 10,8 mL menghasilkan massa minyak sekitar 9,612 g dan rendemen sekitar 0,48%. Perhitungan ini menggunakan persamaan: $\text{massa minyak} = \text{volume} \times \text{berat jenis}$; $\text{rendemen massa (\%)} = \frac{\text{massa minyak}}{\text{massa bahan awal}} \times 100\%$. Angka kadar sitral 35% dan 25% tidak digunakan dalam analisis hasil karena metode analisis kimianya tidak terdokumentasi pada penelitian ini. Dengan $n=1$ per kondisi, perbedaan volume dan rendemen tersebut hanya merupakan hasil pengamatan awal dan tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan hubungan sebab-akibat.

Tabel 10. Rendemen dan Kualitas Minyak Atsiri

Kondisi	Massa Serai Awal (kg)	Volume Minyak (mL)	Rendemen massa (% w/w)	Berat Jenis (g/mL)	Kadar Sitral (%)
Dengan kendali	2,0	12,5	0,56%	0,89	N/A
Tanpa kendali	2,0	10,8	0,48%	0,89	N/A

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan penelitian dibatasi pada hasil implementasi dan satu kali pengujian per kondisi. Sistem berhasil diimplementasikan untuk monitoring temperatur dan tekanan melalui IoT serta pengendalian heater dan pompa menggunakan aturan fuzzy dengan keluaran diskrit.

1. Sistem berbasis Arduino Uno dan ESP8266 dapat memantau temperatur dan tekanan secara real-time melalui Blynk. Kendali menggunakan dua input independen, yaitu temperatur boiler untuk heater dan temperatur kondensor untuk pompa, dengan keputusan aktuator berbasis max-membership.
2. Pada pengujian berkendali, temperatur boiler mencapai 114 °C dan tekanan terukur berada sekitar 78 kPa. Validasi sensor menunjukkan MAE temperatur 4,04 °C dengan deviasi rata-rata 5,6% dan MAE tekanan 1,28 kPa dengan deviasi rata-rata 2,9%.
3. Konsumsi energi selama 120 menit tercatat 1,50 kWh pada sistem berkendali dan 1,82 kWh pada sistem tanpa kendali. Selisih 0,32 kWh setara dengan pengurangan konsumsi energi 17,6% pada pengujian yang dilakukan. Nilai tersebut tidak dinyatakan sebagai efisiensi termodinamika dan belum dapat digeneralisasi karena $n=1$.
4. Rendemen berbasis massa yang dihitung dari volume minyak dan berat jenis adalah sekitar 0,56% pada sistem berkendali dan 0,48% pada sistem tanpa kendali. Data kadar sitral tidak digunakan dalam kesimpulan karena metode analisisnya tidak tersedia. Tidak adanya replikasi, *baseline ON/OFF konvensional*, *log duty cycle*, dokumentasi

lengkap konfigurasi tekanan, serta source code fuzzy membatasi reproduksibilitas dan kekuatan inferensi penelitian ini. Hasil penelitian karena itu diposisikan sebagai studi awal yang memerlukan validasi eksperimen lanjutan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian lanjutan perlu melakukan sedikitnya tiga replikasi per kondisi dengan kondisi awal yang dikontrol, serta melakukan analisis statistik yang sesuai untuk konsumsi energi dan parameter hasil.
2. Status relay ON/OFF perlu direkam bersama timestamp agar duty cycle, frekuensi switching, dan hubungan antara keputusan fuzzy dengan konsumsi energi dapat dianalisis secara kuantitatif.
3. Konfigurasi MPX5500DP, referensi tekanan, titik pengukuran daya, rating pompa dan relay, serta source code fuzzy perlu didokumentasikan lengkap agar sistem dapat direproduksi dan nilai membership dapat diverifikasi.
4. Pengujian berikutnya perlu menambahkan baseline kendali ON/OFF konvensional dan, bila relevan, metode kendali lain pada objek yang sama sehingga kontribusi algoritma fuzzy dapat dibandingkan secara eksperimental.
5. Jika kadar sitral tetap akan dilaporkan, penelitian lanjutan perlu menggunakan metode analisis kimia yang terdokumentasi, seperti GC-FID atau GC-MS sesuai tujuan analisis, serta melaporkan kondisi instrumen dan prosedur kuantifikasinya.

DAFTAR PUSTAKA

[1]. L. Umi, S. Ariviani, E. Purwanto, and D. Praseptiangga, 2025, *Chemical Composition And Citral Content of Essential Oil of Lemongrass (Cymbopogon Citratus (dc.) Stapf) Leaf Waste Prepared With Various Production Methods*, j. Agric. Food res., vol. 19, no. December 2024, p. 101570, doi: 10.1016/j.jafr.2024.101570.

[2]. C. A. Machado, F. O. Oliveira, and M. Ant, 2022, *Steam Distillation For Essential Oil Extraction : an Evaluation of Technological Advances Based On An Analysis Of Patent Documents*.

[3]. D. N. Do, D. P. Nguyen, V. Phung, X. Le, T. M. Le, and V. M. Do, 2021, *Fractionating of Lemongrass (Cymbopogon Citratus) Essential Oil by Vacuum Fractional Distillation*, pp. 1–11.

[4]. P. Suttiarporn, T. Seangwattana, and T. Sri-surat, 2024, *Current Research In Green And*

- Sustainable Chemistry Enhanced Extraction Of Clove Essential Oil By Ultrasound And Microwave Assisted Hydrodistillation And Their Comparison In Antioxidant Activity*, current research in green and sustainable chemistry, vol. 8, no. March, p. 100411, doi: 10.1016/j.crgsc.2024.100411.
- [5]. V. H. Pise and B. N. Thorat, 2023, *Green Steam For Sustainable Extraction of Essential Oils Using Solar Steam Generator: A Techno-Economic Approach*, energy nexus, vol. 9, no. November 2022, p. 100175, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100175.
 - [6]. M. De Souza et al., 2024, *Some Aspects Concerning Citronella Grass Essential Oil And The Agroecological Approach To Protecting Stored Cowpea Beans E*,” vol. 9, no. February, doi: 10.1016/j.napere.2024.100084.
 - [7]. D. Sampelan, A. Pratiwi, A. Baihaqi, and S. Agustiarini, 2025, *Air Temperature-Based Spatial Modeling Of Remote Sensing Data Using Machine Learning Approaches: A Systematic Literature Review*, vol. 19, pp. 62–74, doi: 10.12962/inderaja.v19i2.8450.
 - [8]. A. Abu and A. A. A. Shabaneh, 2023, *Methodsx Design Of A Smart Hydroponics Monitoring System Using An Esp32 Microcontroller And The Internet Of Things*, methodsx, vol. 11, no. June, p. 102401, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
 - [9]. N. Esp, L. Wibowo, R. Wahyusari, T. Yuwono, and a. Shofia, 2024, *Journal Of Mechatronics , Electrical Power, Iot-Based High-Accuracy Monitoring System For On-Grid Photovoltaic Power System Using*, vol. 15, no. 2, pp. 230–241.
 - [10]. J. Of, 2022, *Iot-Based Home Automation Using Nodemcu Esp8266*, vol. 4, no. 4, pp. 391–396.
 - [11]. Yulisman, I. Ikhsan, A. Febriani, and R. Melyanti, 2021, *Application Of Internet Of Things (Iot) For Light Control Using Nodemcu Esp8266 And Smartphone*, jurnal ilmu komputer, vol. 10, no. 2, pp. 136–143.
 - [12]. M. Sarah, D. Ardiansyah, E. Misran, and I. Madinah, 2023, *Extraction Of Citronella Oil From Lemongrass (Cymbopogon Winterianus) By Sequential Ultrasonic And Microwave-Assisted Hydro-Distillation*, Alexandria Engineering journal, vol. 70, pp. 569–583, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.019.
 - [13]. L. A. Syamsul, I. Akbar, and C. Ramadhani, 2025, *Development Of An Iot-Based Smart Home Prototype Using The Blynk Application*, pp. 25–36.
 - [14]. M. N. Hamed, M. I. Hamid, M. N. Ikhlas, and M. A. Izzati, 2026, *Pengembangan Sistem Pengatur Suhu Berbasis Fuzzy Logic Pada Distilasi Etanol Tetes Tebu*, Rang Teknik Journal, vol. 9, no. 2, pp. 1–13, 2026, doi: 10.31869/rtj.v9i2.7453.
 - [15]. I. A. Putri, M. Fatimura, M. Bakrie, P. Studi, and T. Kimia, 2021, *Pembuatan Minyak Atsiri Kemangi (Ocimum Basilicum L .)*,” vol. 6, pp. 149–156.
 - [16]. A. Suyono and D. Pranowo, 2024, *Proses Ekstraksi Minyak Atsiri Pada Kunyit (Curcuma Domestica Val) Talenta Conference Series Proses Ekstraksi Minyak Atsiri Pada Kunyit (Curcuma Domestica Val .)*, Departemen Teknologi Industri Pertanian, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, doi: 10.32734/ee.v7i1.2183.
 - [17]. A. Azriyenni, A. Mulyadi, Y. Kusumawaty, Y. A., and I. Zurani, 2022, *Distilasi Dan Pengujian Karakteristik Minyak Atsiri Hasil Penyulingan Serai Wangi Di Desa Siabu, Salo, Kampar*,” jurnal pengabdian masyarakat teknik, vol. 4, no. 2, pp. 82–88, doi: 10.24853/jpmt.4.2.82-88.
 - [18]. B. Satria, 2022, *IoT Monitoring Suhu Dan Kelembaban Udara Dengan Node Mcu Esp8266*, sudo jurnal teknik informatika, vol. 1, no. 3, pp. 136–144, doi: 10.56211/sudo.v1i3.95.
 - [19]. Mariza Wijayanti, 2022, *Prototype Smart Home Dengan Nodemcu Esp8266 Berbasis IoT*, Jurnal Ilmiah Teknik, vol. 1, no. 2, pp. 101–107, doi: 10.56127/juit.v1i2.169.
 - [20]. Y. Rahmanto, A. Burlian, and S. Samsugi, 2021, *Sistem Kendali Otomatis Pada Akua-ponik Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno R3*,” Jurnal Teknologi Dan Sistem Tertanam, Vol. 2, no. 1, p. 1, doi: 10.33365/jtst.v2i1.975.
 - [21]. M. R. -Alfariski, M. Dhandi, and A. Kiswantono, 2022, *Automatic Transfer Switch (Ats) Using Arduino Uno, Iot-Based Relay And Monitoring*, Doi: <https://doi.org/10.32503/jtecs.v2i1.2238>.
 - [22]. I Gede Aris Gunadi and Dewi Oktifa Rachmawati, 2023, *Review Penggunaan Sensor Pada Aplikasi IoT*, Wahana Matematika Dan Sains: Jurnal Matematika, Sains, Dan Pembelajarannya, vol. 16, no. 3, pp. 48–60, doi: 10.23887/wms.v16i3.51037.
 - [23]. C. Prastyadi, B. Utomo, H. G. Ariswati, D. Titisari, S. Sumber, and A. S. Kumar, 2023, *Eight Channel Temperature Monitoring Using Thermocouple Sensors (Type K) Based On Internet Of Thing Using Thingspeak Platform*, Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics, vol. 5, no. 1, doi: 10.35882/jeeemi.v5i1.276.
 - [24]. Z. Salleh, 2024, *Temperature Measurement Of Ballistic Evaluation Motor Using K-Type Thermocouple*, Journal of Mechanical Engineering, vol. 13, pp. 301–313, doi: 10.24191/jmeche.v13i1.1245.
 - [25]. R. A. Nanda, A. Supriyanto, Karyadi, and F. M. Dewadi, 2023, *Penggunaan Sensor Mpx5500dp Untuk Monitoring Sistem Hvac*

- Berbasis Mikrokontroler dan IoT*, R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal, vol. 8, no. 1, doi: 10.21070/rem.v8i1.1660.
- [26]. D. Juliandri, Erliwati, F. A. Yudithia, and F. Febrian, 2024, *Development of a Portable Spirometer With Mpx5500dp Air Pressure Sensor And Atmega328 Microcontroller*, JATAED: Journal of Appropriate Technology for Agriculture, Environment, and Development, vol. 1, no. 2, pp. 41–46, 2024, doi: 10.62671/jataed.v1i2.48.
- [27]. A. Mulyana, S. Rahmawati, R. Rahman, and Z. Nur permatasari, 2022, *Alat Pengontrol Perangkat Elektronik Berbasis IoT Menggunakan Blynk Dan Google Assistant*, journal of computer science and technology (jcs-tech), vol. 2, no. 1, pp. 30–35, doi: 10.54840/jcstech.v2i1.24.
- [28]. I. Santoso, M. F. Adiwisastra, B. K. Simpony, d. Supriadi, and d. S. Purnia, 2021, *Implementasi Nodemcu Dalam Home Automation Dengan Sistem Kontrol Aplikasi Blynk*, Swabumi, vol. 9, no. 1, pp. 32–40, doi: 10.31294/swabumi.v9i1.10459.
- [29]. A. U. Yakubu, S. Xiong, Q. Jiang, J. Zhao, Z. Wu, H. Wang, X. Ye, and H. Wangsen, 2024, *Fuzzy-Based Thermal Management Control Analysis Of Vehicle Air Conditioning System*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 77, pp. 834–843, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.030.