Rancang Bangun Alat Terapi Dismenore Berbasis Sensor *Electromyography* dan Kontrol Logika *Fuzzy* dengan Antarmuka Aplikasi *Mobile*

Valencia Rachel Azzahra[*1], Septriandi Wirayoga[2], Agustono Heriadi[3]

[1,2,3]Teknik Elektronika Kampus Kediri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]valenciarachela@gmail.com, [2]yoga.septriandi@polinema.ac.id

Nomor Handphone : 0889089010182

Abstrak

Dismenore (nyeri haid) memerlukan penanganan adaptif yang mampu menyesuaikan intensitas terapi secara *real-time*. Aktivitas otot perut sebagai refleks *viscero-motor reflex* (VMR) akibat kontraksi rahim dapat dijadikan indikator nyeri yang objektif dan non-invasif melalui sensor *Electromyography* (EMG). Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji alat terapi dismenore adaptif berbasis sensor EMG dan kontrol logika *fuzzy* Mamdani yang terintegrasi dengan aplikasi *mobile* berbasis *Bluetooth Low Energy* (BLE). Sinyal EMG dideteksi Arduino Nano, lalu diproses ESP32 menggunakan algoritma *fuzzy* Mamdani untuk mengendalikan daya elemen pemanas (*heating pad*) pada rentang suhu 40°C–50°C. Sistem menggunakan sensor NTC 10K B3950 sebagai umpan balik dan pemutus daya otomatis berbasis suhu dan waktu demi keamanan. Pemantauan dan riwayat sesi tersimpan melalui aplikasi *Flutter* yang terintegrasi *Firebase Realtime Database*. Hasil pengujian menunjukkan akurasi sensor NTC 99,54% (galat 0,46%). Pengujian pada 5 responden menunjukkan penurunan amplitudo EMG yang konsisten setelah terapi >15 menit (berkisar 13,7%–76,0%, rata-rata 50,8%), diiringi perbaikan status nyeri dan skor kepuasan pengguna 4,00–5,00 dari skala 5. Alat ini terbukti akurat, adaptif, aman, dan efektif meredakan nyeri dismenore.

Kata kunci: dismenore, elektromiografi (EMG), *viscero-motor reflex*, logika *fuzzy* mamdani, *heating pad*, ESP32.

Abstract

Dysmenorrhea requires an adaptive management approach that adjusts therapy intensity in real time. Abdominal muscle activity, arising as a viscero-motor reflex (VMR) from uterine contractions, serves as an objective, non-invasive pain indicator via an Electromyography (EMG) sensor. This study designs and evaluates an adaptive dysmenorrhea therapy device using an EMG sensor and Mamdani fuzzy logic control integrated with a Bluetooth Low Energy (BLE)-based mobile application. EMG signals are detected by Arduino Nano, then processed by ESP32 using Mamdani fuzzy logic to regulate heating pad power within 40°C–50°C. The system uses an NTC 10K B3950 sensor for feedback and an automatic safety shutoff based on temperature and duration. Real-time monitoring and session history are provided via a Flutter application integrated with Firebase Realtime Database. Testing showed NTC sensor accuracy of 99.54% (0.46% error). Testing on 5 respondents showed a consistent reduction in EMG amplitude after >15 minutes of therapy (ranging 13.7%–76.0%, average 50.8%), accompanied by improved pain status and user satisfaction scores of 4.00–5.00 out of 5. The device is proven accurate, adaptive, safe, and effective in relieving dysmenorrhea pain.

Keywords: *dysmenorrhea, electromyography (EMG), viscero-motor reflex, mamdani fuzzy logic, heating pad, ESP32.*

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Dismenore atau nyeri haid merupakan permasalahan kesehatan reproduksi yang paling umum dialami perempuan, dengan prevalensi 50–90% pada usia reproduktif dan tingkat nyeri yang dapat menurunkan produktivitas serta kualitas hidup, bahkan menyebabkan ketidakhadiran di sekolah maupun tempat kerja [1], [2]. Penanganan yang tersedia saat ini masih didominasi pendekatan farmakologis dan non-farmakologis konvensional seperti obat pereda nyeri dan kompres hangat [3]. Terapi panas terbukti membantu relaksasi otot dan aliran darah, namun diterapkan secara statis (suhu dan durasi tetap) tanpa menyesuaikan kondisi fisiologis pengguna, sementara konsumsi obat pereda nyeri jangka panjang

berisiko menimbulkan efek samping seperti peningkatan risiko stroke [4], sehingga diperlukan alternatif terapi non-farmakologis yang lebih adaptif dan aman.

Nyeri dismenore erat kaitannya dengan kejang otot perut bagian bawah sebagai respons refleks tubuh (*viscero-motor reflex*/VMR) terhadap kontraksi rahim. Aktivitas elektromiografi (EMG) otot abdomen terbukti secara signifikan mendahului episode nyeri kram pada wanita dismenore dan menurun seiring berkurangnya nyeri [5], diperkuat temuan elastografi yang menunjukkan peningkatan kekakuan otot saat menstruasi [6], sehingga sensor EMG permukaan dapat dijadikan indikator objektif dan non-invasif tingkat nyeri, menggantikan penilaian subjektif [7]. Meski demikian, penelitian alat bantu terapi panas berbasis sensor masih menyisakan celah: sabuk pemanas Rokhana dkk. untuk nyeri punggung belum menyesuaikan intensitas panas dengan indikator nyeri pengguna secara otomatis [8], sedangkan kursi biofeedback BIORSE dari Hardito dkk. hanya memantau kontraksi otot dan stres tanpa kendali otomatis intensitas pemanasan berbasis logika cerdas [9]. Kedua penelitian tersebut belum mengintegrasikan sinyal EMG sebagai umpan balik langsung bagi algoritma kendali adaptif intensitas terapi panas secara *real-time*.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini merancang alat terapi dismenore yang mengintegrasikan sensor EMG dengan kontrol logika *fuzzy* Mamdani untuk menentukan intensitas pemanasan (40–50°C) secara otomatis dan proporsional, dipilih karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan variabilitas sinyal EMG antarindividu melalui aturan *if-then* bertahap tanpa ambang batas tegas, sebagaimana terbukti efektif pada kendali suhu adaptif [10], maupun penilaian berbasis variabel linguistik pada domain lain [11], [12]. Sistem diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor EMG (dibaca melalui Arduino Nano), sensor suhu NTC untuk keamanan, serta aplikasi *mobile* berbasis *Bluetooth Low Energy* (BLE) sebagai antarmuka pemantauan *real-time*. Parameter fisiologis dan batas suhu terapi divalidasi bersama mitra ahli (dokter kandungan) di UPTD Puskesmas Campurejo, Kota Kediri, sehingga alat ini diharapkan menjadi solusi non-farmakologis yang adaptif, aman, dan efektif dalam meredakan nyeri haid.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) atau riset dan pengembangan, yaitu metode penelitian yang berorientasi pada pengembangan dan perluasan pengetahuan yang telah ada menjadi sebuah produk baru. Penelitian ini merancang dan membuat alat terapi dismenore berbasis logika *fuzzy* dengan *heating pad* yang dapat menyesuaikan intensitas pemanasan secara otomatis berdasarkan tingkat kejang otot pengguna, sehingga menghasilkan terapi hangat yang efektif, aman, dan nyaman.

2.2. Variabel dan Parameter Uji

Penelitian ini melibatkan tiga jenis variabel sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.1, yaitu variabel bebas, terikat, dan kontrol, guna memastikan pengujian sistem dilakukan secara terstruktur dan terukur.

Tabel 2. 1 Jenis Variabel Penelitian

Variabel	Keterangan
Bebas	Tegangan sinyal electromyography (EMG) yang merepresentasikan aktivitas otot abdomen terkait nyeri menstruasi
Terikat	Suhu heating pad dan nilai keluaran PWM sebagai respons otomatis sistem, serta tingkat nyeri responden yang diukur menggunakan skala Numeric Rating Scale (NRS) sebelum dan sesudah terapi
Kontrol	Durasi sesi terapi (20, 40, atau 60 menit), batas suhu maksimal keamanan (>50°C memicu pemutusan PWM otomatis), posisi elektroda EMG dan sensor NTC, spesifikasi komponen elektronik, serta koneksi Bluetooth antara perangkat keras dan aplikasi mobile

Parameter uji yang menjadi acuan klasifikasi tingkat nyeri, target suhu terapi, dan keluaran sistem ditunjukkan pada Tabel 2.2, Ambang batas EMG dan target suhu ditentukan berdasarkan studi literatur

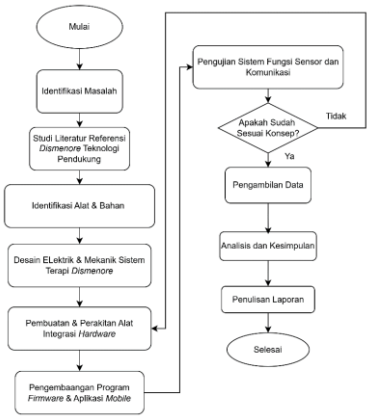
serta divalidasi bersama mitra ahli (dokter kandungan) di UPTD Puskesmas Campurejo, Kota Kediri, sehingga parameter yang digunakan merepresentasikan kondisi klinis yang relevan.

Tabel 2. 2 Parameter Uji Penelitian

Parameter Uji	Keterangan
Sinyal EMG	Tidak Nyeri (≤1,77 mV), Nyeri Ringan (1,77–21,74 mV), Nyeri Sedang (14,93–43,48 mV), Sangat Nyeri (≥30,30 mV)
Skala Nyeri NRS	Tidak Nyeri (0), Nyeri Ringan (1–3), Nyeri Sedang (4–6), Nyeri Berat (7–10)
Suhu Heating Pad	Target 40°C (Nyeri Ringan), 45°C (Nyeri Sedang), 50°C (Sangat Nyeri), cut-off >50°C
Output PWM	Ringan (0–140), Hangat (110–230), Panas (210–255)
Durasi Terapi	Pilihan pengguna: 20, 40, atau 60 menit

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis agar pelaksanaan penelitian terarah dan data yang diperoleh sesuai dengan rumusan serta tujuan penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.

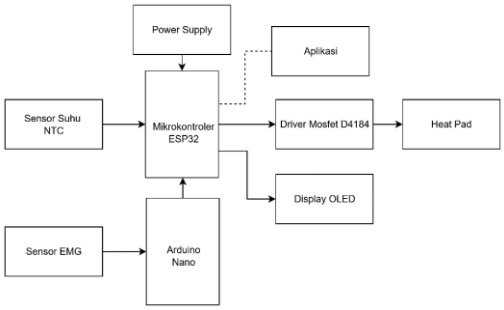


Gambar 2. 1 Flowchart Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur terkait dismenore beserta teknologi pendukungnya, dilanjutkan dengan identifikasi alat dan bahan serta perancangan desain elektrik dan mekanik sistem. Tahap berikutnya adalah pembuatan dan perakitan perangkat keras, pengembangan program firmware dan aplikasi mobile, kemudian pengujian fungsi sensor dan komunikasi sistem. Apabila hasil pengujian belum sesuai konsep, dilakukan perbaikan hingga sistem berjalan sesuai rancangan. Setelah sistem dinyatakan sesuai, penelitian dilanjutkan dengan pengambilan data pada responden, analisis hasil, penarikan kesimpulan, dan penulisan laporan.

2.3. Diagram Blok Sistem

Gambar 2.2 menunjukkan diagram blok sistem terapi dismenore yang dikembangkan pada penelitian ini.

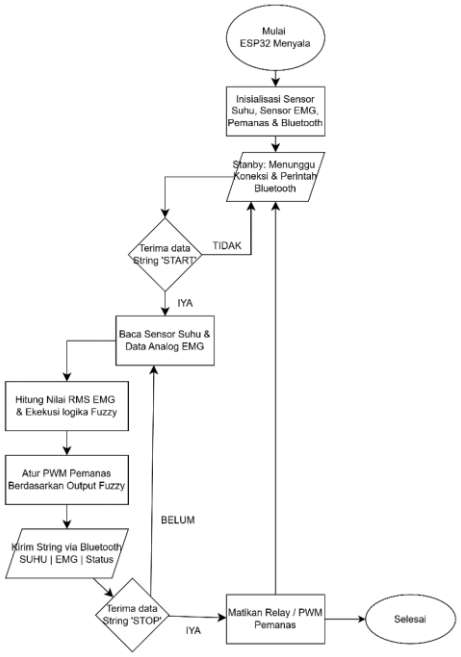


Gambar 2. 2 Diagram Blok Sistem

Sistem terdiri atas satu mikrokontroler utama (ESP32) yang mengolah data sinyal *Electromyography* (EMG) dari Arduino Nano menggunakan logika *fuzzy* untuk menentukan intensitas pemanasan, sekaligus memantau suhu aktual dari sensor NTC sebagai parameter keamanan. Power supply dengan regulator tegangan menjadi sumber daya utama sistem. Keluaran logika fuzzy digunakan untuk mengatur driver MOSFET D4184 yang mengendalikan daya menuju heat pad sebagai aktuator pemanas, sementara layar OLED menampilkan kondisi sistem secara langsung dan aplikasi mobile terhubung ke ESP32 untuk memantau kondisi terapi secara real-time.

2.4. Flowchart Sistem

Alur kerja sistem secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 2. 3 Flowchart Sistem

Proses dimulai saat ESP32 dinyalakan dan melakukan inisialisasi seluruh komponen (sensor suhu, sensor EMG, elemen pemanas, dan modul Bluetooth), kemudian sistem berada pada kondisi standby menunggu perintah "START" dari aplikasi mobile. Setelah sesi dimulai, sistem membaca data suhu dan sinyal EMG secara berkelanjutan, menghitung nilai RMS sinyal EMG, lalu mengeksekusi logika fuzzy untuk menentukan nilai PWM pemanas sesuai tingkat nyeri yang terdeteksi. Data suhu, EMG, dan status nyeri dikirim ke aplikasi mobile melalui Bluetooth agar dapat dipantau secara real-time. Siklus pembacaan, pemrosesan fuzzy, pengaturan PWM, dan pengiriman data berulang selama sesi berlangsung, hingga aplikasi mengirim perintah "STOP", yang menghentikan aliran daya ke elemen pemanas dan mengembalikan sistem ke kondisi standby.

2.5. Kontrol Logika Fuzzy

Pengendalian intensitas pemanasan pada sistem ini menggunakan logika *fuzzy* Mamdani dengan empat tahap, yaitu fuzzifikasi, pembentukan basis aturan, inferensi, dan defuzzifikasi. Sistem menggunakan satu variabel masukan berupa amplitudo sinyal EMG dan satu variabel keluaran berupa nilai PWM pemanas.

Tabel 2. 3 Variabel dan Parameter Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Variabel	Himpunan Fuzzy	Fungsi Keanggotaan	Parameter
EMG (input)	Tidak Nyeri	Trapesium	[0; 0; 1,77; 10]
EMG (input)	Nyeri Ringan	Segitiga	[1,77; 14,93; 21,74]

EMG (input)	Nyeri Sedang	Segitiga	[14,93; 26; 43,48]
EMG (input)	Sangat Nyeri	Trapesium	[30,30; 43,48; 60; 60]
PWM Heater (output)	Ringan	Trapesium	[0; 0; 80; 140]
PWM Heater (output)	Hangat	Segitiga	[110; 170; 230]
PWM Heater (output)	Panas	Trapesium	[210; 240; 255; 255]

Basis aturan (*fuzzy rule base*) disusun dalam bentuk pernyataan IF-THEN yang menghubungkan setiap kategori EMG dengan keluaran PWM Heater yang sesuai, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Rule Base Fuzzy

Rule	IF (EMG)	THEN (PWM Heater)
R1	Tidak Nyeri	Ringan
R2	Nyeri Ringan	Ringan
R3	Nyeri Sedang	Hangat
R4	Sangat Nyeri	Panas

Pada tahap inferensi, derajat keanggotaan (*firing strength*) setiap aturan dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$\alpha_i = \mu_{ai}(x) \tag{1}$$

dengan α_i merupakan derajat keanggotaan aturan ke-i, dan $\mu_{ai}(x)$ merupakan nilai keanggotaan input x terhadap himpunan fuzzy A_i pada aturan tersebut. Apabila lebih dari satu aturan aktif secara bersamaan, hasil evaluasi seluruh aturan digabungkan menggunakan operator agregasi maksimum sebagaimana Persamaan (2):

$$\mu^{g}{}_{a}{}^{b}(z) = max(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n) \tag{2}$$

Tahap akhir adalah defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*, yang menghitung nilai PWM akhir sebagai titik pusat massa area hasil agregasi pada rentang keluaran z = 0 hingga 255, sebagaimana Persamaan (3):

$$PWM = \Sigma\,(z \times \mu(z)) \,/\, \Sigma\,\mu(z) \tag{3}$$

Nilai PWM hasil defuzzifikasi inilah yang digunakan sebagai sinyal kendali untuk mengatur intensitas daya pada heat pad melalui driver MOSFET D4184, sehingga intensitas panas menyesuaikan secara proporsional terhadap tingkat nyeri yang terdeteksi dari sinyal EMG.

2.6. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan melalui studi literatur serta pengujian alat, yang mencakup validasi pembacaan sensor EMG dan suhu NTC, pengujian komunikasi data ke aplikasi mobile melalui BLE, dan pengujian langsung terhadap responden sebelum dan sesudah terapi. Analisis data dilakukan secara deskriptif untuk mengevaluasi akurasi sistem dan kesesuaian intensitas terapi terhadap tingkat nyeri, dilengkapi uji statistik Wilcoxon Signed-Rank Test terhadap selisih nilai EMG sebelum dan sesudah terapi.

2.7. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Alat dan Bahan Penelitian

No.	Alat/Bahan	Keterangan
1	ESP32 DevKit V4	Mikrokontroler utama dan komunikasi Bluetooth
2	Arduino Nano	Mikrokontroler pembaca sinyal sensor EMG
3	Sensor Electromyography (EMG)	Pendeteksi aktivitas kontraksi otot abdomen

4	Sensor NTC Thermistor 10 kΩ	Pemantau suhu heat pad (feedback control)
5	OLED 0.96 inch SSD1306	Penampil suhu, EMG, status nyeri, dan PWM
6	Driver MOSFET D4184	Pengendali daya heat pad menggunakan sinyal PWM
7	Heat Pad 12 V	Elemen pemanas terapi
8	Power Supply 12 V 5–10 A	Sumber energi listrik sistem
9	Resistor 1 kΩ dan 10 kΩ	Rangkaian pembagi tegangan sensor NTC dan pull-down MOSFET
10	Multimeter digital	Pengukuran tegangan, arus, dan resistansi
11	Laptop dan Smartphone Android	Media pemrograman, pengujian, serta monitoring aplikasi mobile

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

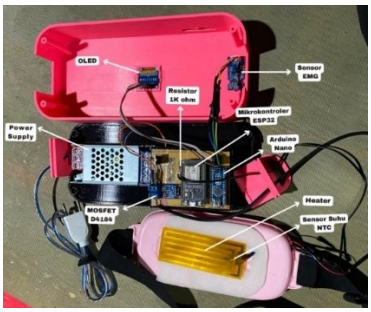
Bagian ini menguraikan hasil perancangan sistem, hasil pengujian dan kalibrasi sensor, hasil pengujian logika fuzzy Mamdani, hasil pengujian sistem terhadap responden, serta analisis kinerja dan perbandingan sistem dengan penelitian terdahulu.

3.1. Hasil Perancangan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Hasil rancang bangun perangkat keras alat terapi dismenore ditunjukkan pada Gambar 6.



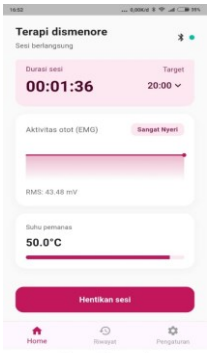
Gambar 3. 1 Hasil Perancangan Luar



Gambar 3. 2 Hasil Perancangan Tampak Isi Keseluruhan

Perangkat keras hasil rancang bangun terdiri atas kotak kendali yang melindungi mikrokontroler ESP32, Arduino Nano, MOSFET D4184, power supply, modul EMG, dan layar OLED, terhubung melalui kabel ke sabuk pemanas elastis yang dikenakan melingkari perut. Pemisahan ini menjaga komponen elektronik tetap aman dari panas dan keringat, sementara sabuk pemanas bekerja langsung memberikan terapi ke tubuh pengguna. Aplikasi mobile berhasil dikembangkan dengan tiga halaman utama: Beranda menampilkan durasi sesi, grafik EMG real-time, status nyeri, suhu, dan nilai PWM beserta tombol Mulai/Hentikan Sesi; Riwayat Terapi menampilkan catatan sesi sebelumnya lengkap dengan grafik EMG dan suhu terhadap waktu; serta Pengaturan yang menampilkan status koneksi Bluetooth perangkat. Seluruh rangkaian implementasi berjalan sesuai rancangan dan siap digunakan pada tahap pengujian dan kalibrasi.

Hasil perancangan perangkat lunak berupa aplikasi *mobile* yang terhubung ke ESP32 melalui *Bluetooth Low Energy* (BLE), dengan tampilan halaman utama ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 3. 3 Hasil Perangkat Lunak (Software)

Halaman utama menampilkan durasi sesi yang berjalan beserta target durasi, grafik aktivitas otot (EMG) secara real-time beserta status klasifikasi nyeri dan nilai RMS EMG dalam satuan mV, serta suhu pemanas aktual beserta indikator progres. Selain halaman utama, aplikasi juga memiliki halaman Riwayat Terapi untuk menampilkan catatan sesi sebelumnya, serta halaman Pengaturan untuk memantau status koneksi Bluetooth. Seluruh komponen perangkat keras dan lunak berhasil terintegrasi dan siap digunakan pada tahap pengujian.

3.2. Pengujian dan Kalibrasi Sensor

Pengujian awal sensor EMG terhadap enam responden pada berbagai tingkat nyeri menghasilkan nilai referensi yang digunakan untuk kalibrasi fungsi keanggotaan fuzzy, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Pengujian Sebelum dan Sesudah Kalibrasi Sensor Electromyography

Tingkat Nyeri	NRS	Sebelum (mV)	Sesudah (mV)
Tidak Nyeri	0	1,20	0,02
Nyeri Ringan	1–3	14,93	12,50
Nyeri Sedang	4–6	21,74	29,41
Sangat Nyeri	7–10	44,71	43,48

Nilai sesudah kalibrasi (0,02; 12,50; 29,41; dan 43,48 mV) digunakan sebagai parameter fungsi keanggotaan variabel masukan EMG pada sistem fuzzy (Tabel 3), sehingga setiap nilai EMG yang terbaca dapat dipetakan ke kategori tingkat nyeri secara lebih representatif.

Pengujian sensor suhu NTC B3950 10K dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap termometer digital referensi pada lima titik suhu terapi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Pengujian Sensor NTC

Sensor NTC (°C)	Termometer Referensi (°C)	Error (%)	Akurasi (%)
40,5	40,2	0,50	99,50
43,4	43,2	0,46	99,54
44,1	44,0	0,23	99,77
47,3	47,0	0,64	99,36
50,3	50,0	0,60	99,40

Hasil pengujian menunjukkan rata-rata akurasi sensor NTC sebesar 99,54% dengan rata-rata kesalahan 0,46%, sehingga sensor ini layak digunakan sebagai umpan balik (feedback) pada sistem kendali suhu closed-loop.

3.3. Pengujian Sistem Terhadap Responden

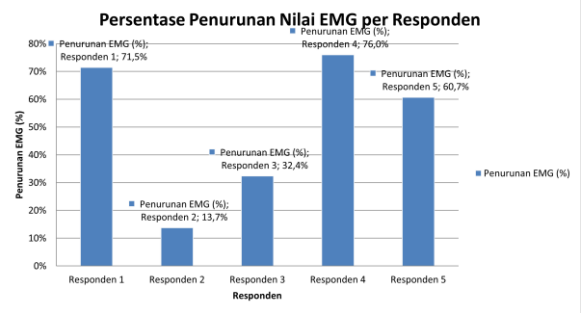
Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan terhadap lima responden yang mengalami dismenore, membandingkan kondisi awal dengan kondisi setelah pemakaian alat lebih dari 15 menit. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Pengujian Sistem Terhadap Responden

Subjek	Kondisi	Suhu (°C)	EMG (mV)	Status	Target (°C)
Responden 1	Awal	47,3	43,80	Sangat Nyeri	50,0
	>15 menit	43,0	12,50	Nyeri Ringan	40,0
Responden 2	Awal	44,1	12,08	Nyeri Ringan	40,0
	>15 menit	43,4	10,42	Nyeri Ringan	40,0
Responden 3	Awal	50,3	43,48	Sangat Nyeri	50,0
	>15 menit	47,1	29,41	Nyeri Sedang	45,0
Responden 4	Awal	44,0	12,50	Nyeri Ringan	40,0
	>15 menit	40,5	3,00	Nyeri Ringan	40,0
Responden 5	Awal	49,7	45,45	Sangat Nyeri	50,0
	>15 menit	43,2	17,86	Nyeri Ringan	40,0

Seluruh responden menunjukkan penurunan tegangan EMG setelah lebih dari 15 menit terapi, diiringi perbaikan atau tidaknya perubahan klasifikasi status nyeri secara logis mengikuti penurunan tersebut. Responden 1, 3, dan 5 yang awalnya berada pada kategori Sangat Nyeri mengalami perbaikan klasifikasi menjadi Nyeri Ringan atau Nyeri Sedang, sementara Responden 2 dan 4 yang sejak awal berada pada kategori Nyeri Ringan tetap berada pada kategori yang sama namun dengan tegangan EMG yang terus menurun. Sejalan dengan penurunan EMG, sistem secara otomatis menurunkan suhu target dan menonaktifkan PWM setelah kondisi nyeri mereda, menunjukkan perilaku kendali closed-loop yang responsif terhadap perubahan kondisi fisiologis pengguna.

Persentase efektivitas penurunan sinyal EMG untuk masing-masing responden ditunjukkan pada Gambar 3.4.

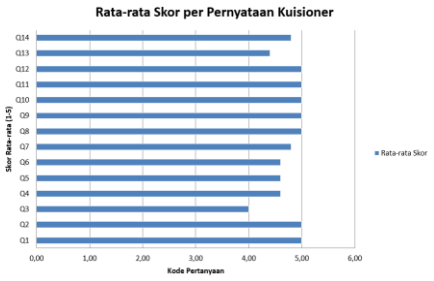


Gambar 3. 4 Grafik Presentase Penuruan Nilai EMG

Penurunan tegangan EMG bervariasi antarresponden, berkisar antara 13,7% (Responden 2) hingga 76,0% (Responden 4), dengan rata-rata penurunan sekitar 50,8%. Variasi ini wajar mengingat kondisi nyeri awal dan respons fisiologis tiap individu terhadap terapi panas berbeda-beda, namun seluruh responden tanpa kecuali menunjukkan tren penurunan, yang mengindikasikan bahwa terapi panas adaptif berbasis kendali fuzzy secara konsisten membantu meredakan ketegangan otot abdomen.

Setelah pengujian, responden mengisi kuesioner mengenai kemudahan penggunaan, kenyamanan, efektivitas, keamanan, tampilan aplikasi, dan kepuasan terhadap alat. Hasil rata-rata skor tiap pernyataan ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Kode	Aspek	Pernyataan	Rata-rata Skor
Q1	Kemudahan Penggunaan	Petunjuk/cara penggunaan alat mudah dipahami	5,00
Q2	Kemudahan Penggunaan	Aplikasi mobile mudah dioperasikan	5,00
Q3	Kenyamanan	Sensor EMG nyaman saat dipasang di kulit	4,00
Q4	Kenyamanan	Heating pad terasa nyaman digunakan pada area perut	4,60
Q5	Kenyamanan	Berat dan bentuk alat tidak mengganggu aktivitas selama pemakaian	4,60
Q6	Efektivitas yang Dirasakan	Perubahan suhu terasa sesuai dengan tingkat nyeri yang dirasakan	4,60
Q7	Efektivitas yang Dirasakan	Alat membantu meredakan nyeri haid yang dirasakan	4,80
Q8	Efektivitas yang Dirasakan	Respons alat terhadap perubahan kondisi nyeri terasa cepat	5,00
Q9	Keamanan	Alat aman digunakan (tidak menyebabkan iritasi, panas berlebih, atau ketidaknyamanan)	5,00
Q10	Keamanan	Saya merasa aman menggunakan alat ini tanpa pengawasan tenaga medis	5,00
Q11	Tampilan Informasi	Data/status pada aplikasi mudah dipahami	5,00
Q12	Tampilan Informasi	Informasi yang ditampilkan aplikasi sesuai dengan kondisi yang dirasakan	5,00
Q13	Kepuasan Keseluruhan	Secara keseluruhan saya puas menggunakan alat ini	4,40
Q14	Kepuasan Keseluruhan	Saya akan merekomendasikan alat ini kepada orang lain	4,80



Gambar 3. 5 Hasil Kuesioner Responden

Seluruh pernyataan memperoleh rata-rata skor antara 4,00 hingga 5,00 dari skala Likert 1–5, menunjukkan tingkat penerimaan pengguna yang sangat baik. Responden menilai alat mudah digunakan, nyaman dipakai, mampu membantu meredakan nyeri haid, aman selama digunakan, serta aplikasi mobile menyajikan informasi terapi dengan jelas.

3.5 Analisis Kinerja dan Keamanan Sistem

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 5 responden, sistem menunjukkan kinerja yang konsisten pada tiga aspek utama. Dari sisi akurasi deteksi, setiap perubahan nilai EMG selalu diikuti perubahan status nyeri yang logis, dengan seluruh responden menunjukkan tren penurunan EMG sejalan dengan perbaikan status nyeri setelah >15 menit terapi. Dari sisi kendali PWM, sistem menunjukkan perilaku closed-loop yang tepat, yaitu PWM hanya aktif ketika suhu heating pad masih di bawah suhu target dan otomatis nonaktif begitu suhu mencapai atau melampaui target, tanpa terjadi overheating pada seluruh sesi pengujian. Dari sisi keamanan, tidak ditemukan suhu yang melewati ambang batas aman pada seluruh pengujian, dengan suhu tertinggi yang tercatat (50,3°C pada Responden 3) masih berada pada batas target yang telah divalidasi bersama mitra ahli.

Hasil kuesioner terhadap lima responden mengenai kemudahan penggunaan, kenyamanan, efektivitas, keamanan, tampilan aplikasi, dan kepuasan menunjukkan skor rata-rata 4,00–5,00 dari skala Likert 1–5, mengindikasikan tingkat penerimaan pengguna yang sangat baik terhadap alat yang dikembangkan.

4. KESIMPULAN

Alat terapi dismenore adaptif berbasis sensor Electromyography (EMG) dan kontrol logika fuzzy Mamdani berhasil dirancang dan diuji. Sinyal EMG yang dibaca melalui Arduino Nano diolah oleh ESP32 menggunakan empat aturan fuzzy untuk mengklasifikasikan tingkat nyeri (Tidak Nyeri, Nyeri Ringan, Nyeri Sedang, Sangat Nyeri) dan menentukan intensitas pemanasan secara proporsional pada rentang 40–50°C, dilengkapi mekanisme keamanan berbasis ambang suhu yang terbukti efektif mencegah overheating. Aplikasi mobile berbasis Flutter yang terhubung melalui Bluetooth Low Energy (BLE) dan terintegrasi dengan Firebase Realtime Database berhasil menyediakan pemantauan kondisi terapi secara real-time serta riwayat sesi. Pengujian terhadap lima responden menunjukkan penurunan tegangan EMG yang konsisten setelah lebih dari 15 menit terapi (berkisar 13,7%–76,0%, rata-rata 50,8%), diiringi perbaikan klasifikasi status nyeri dan skor kepuasan pengguna 4,00–5,00 dari skala 5, sehingga alat ini terbukti akurat, adaptif, aman, dan efektif dalam meredakan nyeri dismenore.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan. Jumlah responden yang diuji (5 responden) tergolong kecil dibandingkan studi acuan yang umumnya menggunakan sampel klinis lebih besar, sehingga generalisasi efektivitas alat secara statistik masih memerlukan penelitian lanjutan dengan jumlah responden yang lebih representatif serta protokol pengambilan data yang lebih terstandardisasi.

5. SARAN

1. Menambah jumlah responden dan menstandardisasi protokol pengambilan data (waktu pengukuran EMG dan NRS yang konsisten) agar hasil analisis lebih representatif secara statistik.
2. Melibatkan validasi klinis lebih mendalam bersama tenaga medis profesional untuk memperkuat kesesuaian parameter sistem dengan standar penanganan dismenore.

3. Mengembangkan catu daya berbasis baterai dengan Battery Management System agar alat bersifat wearable dan dapat digunakan mandiri tanpa keterbatasan jarak dari sumber listrik.
4. Mengkaji penerapan kontrol PID sebagai pelengkap logika fuzzy untuk meminimalkan overshoot dan osilasi suhu, serta menambahkan fitur kalender siklus menstruasi pada aplikasi mobile.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] N. Mahwish, R. Dube, S. S. Kar, M. Santhosh, A. Kidwai, and J. M. Kenneth, "Prevalence and Impact of Dysmenorrhea on the Academic Performance ofStudents at Medical and Health Sciences University," *New Emir. Med. J.*, vol. 05, p. e02506882288695, Mar. 2024, doi: 10.2174/0102506882288695240221071629.

[2] P. Manhas, "The Influence of Menstrual Symptoms on Women's Work Productivity".

[3] Mastaida Tambun and Martaulina Sinaga, "Pengaruh Kompres Hangat Terhadap Dismenore saat Menstruasi pada Siswa Puteri Klas XI SMK N. 8," *SEHATMAS J. Ilm. Kesehat. Masy.*, vol. 1, no. 3, pp. 363–372, Jul. 2022, doi: 10.55123/sehatmas.v1i3.668.

[4] Y.-W. Lin, J.-Y. Wang, and M.-H. Lin, "Stroke risk associated with NSAIDs uses in women with dysmenorrhea: A population-based cohort study," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 11, p. e0259047, Nov. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0259047.

[5] F. A. Oladosu *et al.*, "Abdominal skeletal muscle activity precedes spontaneous menstrual cramping pain in primary dysmenorrhea," *Am. J. Obstet. Gynecol.*, vol. 219, no. 1, p. 91.e1-91.e7, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ajog.2018.04.050.

[6] S. Ham, S. Kim, H. Choi, Y. Lee, and H. Lee, "Greater Muscle Stiffness during Contraction at Menstruation as Measured by Shear-Wave Elastography," *Tohoku J. Exp. Med.*, vol. 250, no. 4, pp. 207–213, 2020, doi: 10.1620/tjem.250.207.

[7] M. Zheng, M. S. Crouch, and M. S. Eggleston, "Surface Electromyography as a Natural Human–Machine Interface: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 22, no. 10, pp. 9198–9214, May 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3165988.

[8] R. Rokhana, A. W. R. Gusti, A. R. Fachrezi, H. M. Rosalinda, and K. Kemalasari, "Rancang Bangun Sabuk Pemanas sebagai Solusi Perawatan di Rumah bagi Penderita Nyeri Punggung Bawah," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 6, no. 2, p. 93, Dec. 2024, doi: 10.30595/jrre.v6i2.21853.

[9] B. Hardito, G. W. F. Salma, N. P. P. Renanta, R. Ramadhan, M. A. R. Oetomo, and A. M. Disrinama, "BIORSE BIOFEEDBACK PORTABLE SEAT DILENGKAPI PEMANAS DAN DIFFUSER BERBASIS INTERNET OF THINGS GUNA MENGELOLA TINGKAT STRES DAN NYERI MENSTRUASI".

[10] M. D. Langer, W. Huang, A. Ghanem, Y. Guo, and G. K. Lewis, "Skin temperature increase mediated by wearable, long duration, low-intensity therapeutic ultrasound," presented at the PROCEEDINGS FROM THE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THERAPEUTIC ULTRASOUND, Las Vegas, Nevada, USA, 2017, p. 120002. doi: 10.1063/1.4977642.

[11] S. R. Andani, "FUZZY MAMDANI DALAM MENENTUKAN TINGKAT KEBERHASILAN DOSEN MENGAJAR," 2013.

[12] M. Simanjuntak and A. Fauzi, "Penerapan Fuzzy Mamdani Pada Penilaian Kinerja Dosen (Studi Kasus STMIK Kaputama Binjai)".