

Penerapan Kendali Fuzzy dalam Pengembangan Stimulasi Listrik untuk Mempercepat Penyembuhan Luka

Rahmawati¹, Achmad Arifin², Duti Sriwati Aziz³, Gunawan⁴, Raisah Hayati⁵, Siti Amra¹

¹ Program Sudi Teknologi Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Lhokseumawe, Aceh 24375, Indonesia

² Departemen Teknik Biomedik, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia

³ Department of Anatomy Pathology, Faculty of Medicine, Hang Tuah University, Surabaya, Jawa Timur 60155, Indonesia

⁴ Program Sudi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Lhokseumawe, Aceh 24375, Indonesia

⁵ Program Sudi Teknologi Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Lhokseumawe, Aceh 24375, Indonesia

[Diserahkan: 22 Maret 2025, Direvisi: 18 Juni 2025, Diterima: 11 November 2025]

Penulis Korespondensi: Rahmawati (email: rahmawati.gunawan@gmail.com)

INTISARI — Penyembuhan luka kronis masih menjadi tantangan medis karena keterbatasan terapi konvensional dalam mempercepat regenerasi jaringan. Stimulasi listrik (*electrical stimulation*, ES) dapat menjadi solusi efektif, tetapi ES *open-loop* belum mampu menyesuaikan durasi terapi secara adaptif. Penelitian ini mengembangkan ES *closed-loop* berbasis kendali *fuzzy* yang mampu menyesuaikan durasi stimulasi secara dinamis berdasarkan perkembangan luka. Metode yang digunakan mencakup ES berbasis mikrokontroler Atmega32, integrasi kendali *fuzzy*, serta pengujian praklinis pada marmut. Sistem ES memiliki parameter frekuensi 20 Hz, lebar pulsa 250 μ s, dan tegangan keluaran 50 V. Kendali *fuzzy* dirancang untuk menyesuaikan durasi stimulasi antara 15–45 menit berdasarkan selisih luas luka aktual dan target. Kendali *fuzzy* dapat menyesuaikan durasi stimulasi dengan tingkat kesalahan estimasi sebesar 0,3%. Pengujian praklinis dilakukan dengan membandingkan efektivitas terapi ES *closed-loop*, *open-loop*, dan tanpa ES. Pengurangan luas luka dalam tujuh hari pada kelompok *closed-loop* mencapai 64–67%, lebih tinggi dibandingkan *open-loop* (44–50%) dan tanpa terapi (47%). Terapi *closed-loop* menghasilkan kepadatan jaringan tertinggi (75–100%) dibandingkan dengan *open-loop* (50%) dan tanpa terapi (25–50%). Terapi *closed-loop* dengan kendali *fuzzy* terbukti mempercepat regenerasi jaringan hingga 1,5–2 kali lebih cepat dibandingkan metode *open-loop* dan tanpa terapi. Perhitungan pemeringkatan efektivitas terapi *closed-loop* menghasilkan skor tertinggi (0,90 dan 1,00), yang menunjukkan penyembuhan lebih optimal dibandingkan *open-loop* (0,61) dan tanpa terapi (0,51). Dengan demikian, ES *closed-loop* berbasis kendali *fuzzy* lebih efektif dalam mempercepat penyembuhan luka dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini berpotensi meningkatkan efektivitas terapi luka dengan lebih adaptif dan presisi serta membuka peluang penerapan lebih luas dalam bidang medis.

KATA KUNCI — Stimulasi Listrik, Logika *Fuzzy*, Penyembuhan Luka, Mikrokontroler.

I. PENDAHULUAN

Penyembuhan luka adalah proses biologis kompleks yang melibatkan proses pembekuan darah (hemostasis), peradangan (inflamasi), pembentukan jaringan baru (proliferasi), dan pematangan atau penguatan jaringan (maturasi). Luka kronis, seperti ulkus diabetik, luka tekan, dan gangguan pembuluh darah, merupakan tantangan kesehatan global yang serius karena memengaruhi jutaan orang, menurunkan kualitas hidup, meningkatkan angka morbiditas, serta menambah beban biaya perawatan kesehatan [1]. Metode perawatan standar, seperti pembersihan, pemberian antibiotik, dan pembedahan, sering kali kurang efektif pada luka yang sulit sembuh secara normal, sehingga mendorong pengembangan terapi inovatif untuk mempercepat proses penyembuhan.

Stimulasi listrik (*electrical stimulation*, ES) berkembang sebagai terapi alternatif yang menjanjikan untuk mempercepat penyembuhan luka melalui pemanfaatan prinsip bioelektrik tubuh. Penerapan arus searah (dc) terbukti efektif menurunkan sitokin proinflamasi, mempercepat regenerasi jaringan, meningkatkan perfusi, mendukung migrasi sel, merangsang vaskularisasi, serta mendorong proliferasi fibroblas [2]. ES memiliki efek antibakteri yang membantu mencegah infeksi dan mempercepat penyembuhan luka kronis dengan mempersingkat fase inflamasi, merangsang fibroplasia, meningkatkan deposisi kolagen, dan mendukung reepitelisasi

yang teratur [2]–[4]. Namun, penerapan ES saat ini sebagian besar masih menggunakan sistem *open-loop*, yang terbatas dalam menyesuaikan durasi dan intensitas stimulasi terhadap kondisi luka yang dinamis. Sistem ini tidak memperhitungkan faktor penting seperti perubahan luas luka, kelelahan jaringan, maupun infeksi, sehingga efektivitas terapi menjadi kurang optimal.

ES terbukti efektif, tetapi penerapannya masih menghadapi tantangan klinis akibat variasi metode, durasi, dan parameter yang belum melalui standardisasi. Terapi ini berpotensi mempercepat penyembuhan luka kronis. Selain itu, ES juga dapat menurunkan biaya pengobatan hingga 15–16% dibandingkan perawatan standar. Beberapa negara seperti Australia, Selandia Baru, dan Amerika Serikat telah mengadopsi ES sebagai terapi tambahan [2], [5]. Di lain sisi, penelitian lebih lanjut tetap diperlukan untuk menetapkan protokol yang optimal dan memastikan penerapannya secara luas dalam praktik klinis.

Kesenjangan penelitian saat ini terletak pada kurangnya sistem ES yang mampu menyesuaikan durasi dan intensitas stimulasi secara otomatis berdasarkan perkembangan luka. Untuk menjawab kebutuhan tersebut, diperlukan sistem *closed-loop* yang dapat mengoptimalkan terapi melalui umpan balik *real-time*. Efektivitas sistem yang dikembangkan harus

didukung oleh pemilihan metode kendali yang tepat, selaras dengan karakteristik biologis proses penyembuhan luka.

Berbagai metode kendali seperti *proportional-integral-derivative* (PID) dan kendali *on-off* telah banyak diterapkan pada sistem otomatis, tetapi memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada sistem biologis seperti penyembuhan luka. Kendali PID hanya bekerja optimal pada sistem yang dapat dimodelkan secara matematis dengan presisi dan memiliki parameter yang stabil serta linier. Sebaliknya, proses penyembuhan luka bersifat kompleks, dinamis, dan tidak linier karena dipengaruhi oleh berbagai faktor biologis, seperti respons individu, aktivitas sel, infeksi, dan kelelahan jaringan yang sulit diprediksi secara eksak [6]. Di sisi lain, kendali *on-off* yang bersifat diskrit tidak mampu memberikan respons yang halus dan proporsional terhadap perubahan kondisi luka. Pendekatan ini cenderung menghasilkan durasi terapi yang statis dan tidak mengikuti kebutuhan biologis yang dinamis.

Kendali *fuzzy* dipilih karena memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian, ketidaklinieran, dan dinamika biologis yang kompleks tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Pendekatan *fuzzy* memungkinkan pengambilan keputusan berbasis aturan linguistik yang fleksibel, seperti "jika pengurangan luka rendah, maka berikan durasi panjang", yang sulit direpresentasikan secara akurat dalam model PID atau kendali *on-off*. Logika *fuzzy* juga mampu menyesuaikan respons secara *real-time* dengan transisi yang halus sesuai dengan perkembangan aktual luka.

Sistem inferensi *fuzzy* telah dimanfaatkan untuk memprediksi tingkat hidrasi luka melalui analisis *biomarker* berupa suhu tubuh dan saturasi oksigen yang terdeteksi oleh biosensor [7]. Pendekatan serupa juga diterapkan pada pengendalian kecepatan terhadap perubahan torsi eksternal menggunakan kendali *fuzzy* dengan parameter adaptif [8], yang menunjukkan keselarasan dengan kemampuan logika *fuzzy* dalam menangani ketidakpastian biologis. Logika *fuzzy* memiliki sifat dinamis yang memungkinkan sistem menyesuaikan respons berdasarkan parameter yang terus berubah [9]. Sifat adaptif *fuzzy* memungkinkan pengambilan keputusan *real-time* sesuai variasi kondisi luka. Dengan integrasi pengukuran serta umpan balik, sistem ini berpotensi meningkatkan efektivitas penyembuhan.

Studi pada sistem terapi luka seperti *negative pressure wound therapy* (NPWT) menunjukkan bahwa pengendali logika *fuzzy* mampu menjaga tekanan lebih stabil, meningkatkan efektivitas penyembuhan, dan mengurangi risiko cedera dibandingkan logika Boolean konvensional [6]. Berdasarkan temuan tersebut, penerapan kendali *fuzzy* dalam sistem ES *closed-loop* pada penelitian ini dipandang sebagai pilihan yang paling relevan karena sesuai dengan karakteristik sistem penyembuhan luka yang dinamis, individual, dan kompleks.

Telah terjadi banyak kemajuan dalam penelitian ES, tetapi masih terdapat kesenjangan dalam literatur terkait penerapan praktis sistem *closed-loop* pada perawatan luka. Studi yang mengintegrasikan kendali logika *fuzzy* dengan ES dalam konteks klinis masih terbatas, sehingga diperlukan bukti empiris yang lebih kuat untuk mendukung efektivitas dan penerapan pendekatan ini. Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem ES *closed-loop* berbasis kendali logika *fuzzy* yang mampu menyesuaikan durasi stimulasi secara adaptif berdasarkan pengurangan luas luka. Dibandingkan dengan sistem *open-loop* atau kendali konvensional yang menggunakan durasi tetap tanpa

mempertimbangkan kondisi luka, sistem ini lebih responsif karena mengolah umpan balik biologis secara *real-time*. Dengan demikian, terapi dapat disesuaikan secara lebih akurat, sehingga mengurangi risiko *overstimulation* maupun *understimulation*.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi logika *fuzzy* dengan sistem ES *closed-loop* berbasis pengukuran luas luka *real-time*, yang hingga saat ini belum pernah dilaporkan dalam literatur. Sistem ini tidak hanya mengatur stimulasi secara adaptif, tetapi juga menyesuaikan durasi terapi sesuai dinamika biologis luka, sekaligus memvalidasi efektivitasnya melalui uji praklinis yang menunjukkan percepatan penyembuhan hingga dua kali lipat. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini melampaui pendekatan *fuzzy* konvensional karena menggabungkan aspek kendali adaptif, validasi biologis, dan implikasi klinis.

Sistematika artikel ini terdiri atas empat bagian utama. Pendahuluan menjelaskan latar belakang, tujuan, kebaruan, serta justifikasi pemilihan kendali *fuzzy*. Bagian Metodologi memaparkan perancangan sistem *closed-loop* berbasis *fuzzy*, mencakup proses fuzifikasi, aturan *fuzzy*, mesin inferensi, defuzifikasi, mekanisme umpan balik pengukuran luas luka, dan prosedur uji praklinis. Bagian Hasil dan Pembahasan menyajikan kinerja sistem, termasuk analisis kinerja dan perbandingan dengan sistem *open-loop* maupun tanpa terapi. Terakhir, bagian Kesimpulan merangkum temuan utama serta potensi pengembangan sistem untuk perawatan luka kronis.

Sistem yang diusulkan diharapkan mampu meningkatkan efektivitas terapi ES dan mempercepat penyembuhan luka secara signifikan. Penelitian ini berkontribusi dengan menghadirkan solusi terapi yang lebih adaptif dan presisi untuk penanganan luka kronis, sehingga waktu penyembuhan dapat dipersingkat dan risiko kesalahan terapi diminimalkan. Temuan ini juga membuka peluang baru dalam perawatan luka kronis yang lebih efektif, sekaligus berpotensi meningkatkan hasil pengobatan dan kualitas hidup pasien.

II. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini dirancang untuk mengembangkan dan menguji sistem ES *closed-loop* berbasis kendali logika *fuzzy* melalui integrasi stimulator listrik, mekanisme kendali *fuzzy*, dan pengukuran luas luka. Pendekatan *fuzzy* digunakan karena mampu merepresentasikan konsep intuitif ke dalam ukuran kuantitatif, sehingga dapat dimanfaatkan secara informatif [10]. Untuk memvalidasi kinerja sistem sekaligus membandingkannya dengan metode konvensional, dilakukan pengujian praklinis pada hewan coba marmut.

Pengujian praklinis dilakukan untuk membandingkan efektivitas terapi ES menggunakan metode *open-loop*, *closed-loop*, serta tanpa terapi ES. Hewan coba diberi luka jenis *full thickness stadium 3* sesuai dengan syarat kelaikan etik. Seluruh prosedur perlukaan, terapi, dan pengujian patologi anatomi, yang meliputi uji kepadatan jaringan dan pertumbuhan pembuluh darah hewan coba, dilakukan di RS Angkatan Laut (RSAL) dr. Ramelan Surabaya, di bawah pengawasan langsung dokter spesialis patologi anatomi RSAL dr. Ramelan.

Analisis data untuk mengevaluasi efektivitas sistem ES *closed-loop* dalam mempercepat penyembuhan luka dilakukan dengan mempertimbangkan parameter utama, yaitu pengurangan luas luka, kepadatan jaringan ikat dan pembuluh darah, serta durasi stimulasi. Pengurangan luas luka dihitung dari selisih antara ukuran luka awal dan akhir terapi, sedangkan

kepadatan jaringan dan pertumbuhan pembuluh darah dinilai melalui analisis mikrovaskular. Durasi stimulasi diatur secara dinamis oleh kendali *fuzzy* berdasarkan perkembangan luka harian. Evaluasi dilakukan melalui analisis statistik antarkelompok serta penilaian kinerja sistem *fuzzy* berdasarkan akurasi, kemampuan adaptif, dan efektivitasnya dalam mencegah *overstimulation* maupun *understimulation*. Pengolahan data eksperimen menggunakan analisis statistik Microsoft Excel mencakup hubungan frekuensi dengan tegangan konverter, durasi stimulasi keluaran *fuzzy*, luas luka target kendali *fuzzy*, serta durasi stimulasi dan pengurangan luas luka pada tiap kelompok terapi.

A. DESAIN SISTEM STIMULASI LISTRIK LOOP TERTUTUP

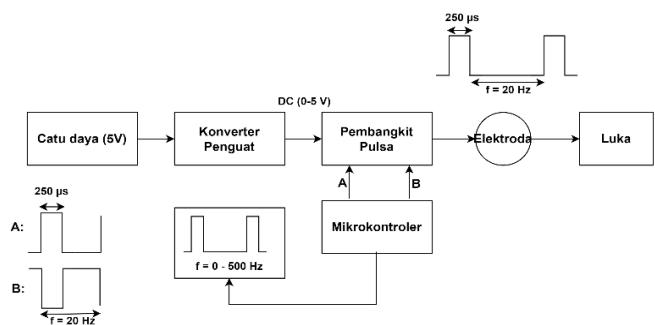
Stimulator listrik dalam penelitian ini dirancang untuk menghasilkan sinyal pulsa dengan parameter yang dapat disesuaikan, yaitu amplitudo 0–50 V, frekuensi 20 Hz, dan lebar pulsa 250 μ s, yang dikendalikan oleh mikrokontroler Atmega32. Arus listrik dibatasi maksimal 60 μ A untuk menjaga keamanan dan kenyamanan selama terapi [11].

Terapi arus mikro ini terbukti efektif dalam merusak membran sel bakteri, mengurangi infeksi, mempercepat pengendalian nyeri, dan mendorong penyembuhan luka [12]–[14]. Pemilihan parameter didasarkan pada aspek efektivitas dan keamanan, dengan frekuensi 20 Hz yang mampu merangsang regenerasi jaringan tanpa menimbulkan kontraksi otot, lebar pulsa 250 μ s yang sesuai dengan rentang fisiologis sekaligus mengurangi nyeri, serta tegangan maksimum 50 V yang dipilih untuk menghindari risiko kontraksi. Kombinasi parameter ini diharapkan dapat mengoptimalkan proses penyembuhan luka secara efektif dan aman.

ES dapat diterapkan pada luka kronis maupun luka akut melalui berbagai metode, dengan salah satu yang paling umum adalah penggunaan elektroda yang ditempatkan di sekitar luka [15]. Elektroda berfungsi sebagai antarmuka antara sistem ES dengan jaringan kulit, yang memungkinkan aliran arus listrik merangsang proses penyembuhan. Mekanisme penghantaran arus listrik pada elektroda dipengaruhi oleh sifat dasar aliran yang melaluiinya. Pada rangkaian listrik, arus dihantarkan oleh elektron, sedangkan pada jaringan kulit, arus dihantarkan oleh ion. Stimulator listrik penyembuhan luka tersusun dari modul rangkaian konverter penguat (*boost converter*) dan pembangkit pulsa, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Fungsi yang diinginkan pada ES adalah menaikkan tegangan keluaran pembangkit, sehingga konverter yang dipilih adalah jenis penaik tegangan atau konverter penguat [16], [17]. Konverter penguat merupakan konverter dc-dc yang berfungsi untuk meningkatkan masukan tegangan. Pada rangkaian ES ini, konverter penguat menggunakan komponen induktor (L) dan kapasitor (C). Dalam operasinya, konverter penguat bekerja dengan mengisi induktor dan kapasitor secara bergantian untuk meningkatkan tegangan secara bertahap [18], [19].

Mikrokontroler Atmega32 memiliki spesifikasi yang memadai untuk mengatur sinyal pulsa dan mengelola kendali *fuzzy* secara presisi. Mikrokontroler 8-bit ini dilengkapi dengan memori yang cukup, kecepatan *clock* hingga 16 MHz, serta fitur *timer* dan komunikasi serial yang mendukung pengaturan stimulasi listrik secara *real-time*. Selain itu, Atmega32 mudah diprogram, hemat daya, kompatibel dengan rangkaian yang dikembangkan, serta didukung oleh referensi teknis yang luas, sehingga sangat efektif untuk sistem portabel dan aplikasi



Gambar 1. Diagram rangkaian stimulasi listrik.

stimulasi listrik berbasis *closed-loop*. Dalam sistem ini, mikrokontroler berperan sebagai penghasil sinyal kendali digital berupa sinyal pulsa dasar (*trigger*) dengan frekuensi dan *duty cycle* yang dapat diatur. Sinyal pulsa tersebut masih berupa sinyal logika tegangan rendah yang tidak cukup untuk langsung menstimulasi jaringan luka, sehingga diproses lebih lanjut oleh pembangkit pulsa. Secara sistematis, mikrokontroler berfungsi sebagai penghasil sinyal pulsa kendali, sedangkan pembangkit pulsa bertugas menghasilkan sinyal pulsa daya dengan amplitudo yang sesuai untuk stimulasi.

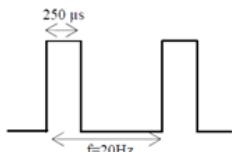
Pembangkit pulsa bekerja dengan dua masukan utama, yaitu tegangan dari konverter penguat sebagai sumber energi, dan sinyal pulsa dari mikrokontroler yang mengatur waktu serta frekuensi pulsa. Pembangkit pulsa terdiri atas penguat frekuensi radio (*radio frequency*, RF) linear dan filter pelewat tinggi (*high-pass filter*, HPF). Pembangkit pulsa memperkuat sinyal dari mikrokontroler melalui penguat RF linear dan HPF, sehingga dihasilkan pulsa berdurasi sangat pendek dengan frekuensi rendah yang tersaring [20].

Mikrokontroler berperan menghasilkan sinyal kendali sebagai pemicu kerja pembangkit pulsa, sedangkan pembangkit pulsa berfungsi memperkuat dan membentuk sinyal stimulasi listrik yang diaplikasikan ke luka. Kedua komponen tersebut memiliki fungsi berbeda, tetapi saling terintegrasi dalam satu sistem yang utuh. Hasil pemrosesan ini menghasilkan gelombang pulsa dengan amplitudo lebih tinggi, yaitu 0–50 V, yang disalurkan ke elektroda untuk menstimulasi proses penyembuhan luka. Bentuk keluaran pulsa dari sistem ES ditunjukkan pada Gambar 2.

Sistem ES dilengkapi antarmuka enam saklar tekan untuk memudahkan interaksi pengguna. Masing-masing saklar memiliki fungsi spesifik, yaitu menaikkan dan menurunkan *channel*, menaikkan dan menurunkan amplitudo, serta tombol *enter* dan *reset*. Kehadiran antarmuka ini memungkinkan pengguna mengatur parameter ES secara lebih fleksibel dan presisi. Dengan integrasi berbagai komponen ini, sistem ES yang dikembangkan mampu memberikan stimulasi listrik yang lebih adaptif dan presisi, sehingga meningkatkan efektivitas terapi dalam mempercepat penyembuhan luka.

B. PENGUJIAN PRAKLINIS

Pengujian praklinis dilakukan pada marmut jantan (*Cavia porcellus*) berusia 5–6 bulan dengan berat 400–500 g. Prosedur percobaan dilakukan dalam beberapa tahap. Pertama, dibuat model luka pada area dorsal marmut, kemudian luka dibersihkan dengan larutan *saline* dan ditutup dengan perban steril untuk mencegah infeksi. Kedua, pemberian terapi dibagi ke dalam tiga kelompok perlakuan.



Gambar 2. Bentuk sinyal stimulator listrik.

Berdasarkan perlakuan terapi yang diterima, hewan coba dibagi menjadi empat kelompok, yaitu kelompok kontrol tanpa terapi ES, kelompok *open-loop* dengan stimulasi tetap (30 menit *on*, 60 menit *off*, selama 12 jam/hari), serta dua kelompok *closed-loop* yang menerima terapi ES dengan durasi stimulasi adaptif menggunakan kendali *fuzzy* berdasarkan pengurangan luas luka harian.

Perbedaan luas luka awal pada hewan coba 1–4 terjadi karena pembuatan luka dilakukan secara manual sesuai standar prosedur. Variasi ini sulit dihindari karena adanya perbedaan karakteristik anatomi dan ketebalan kulit masing-masing marmut. Untuk mengatasinya, analisis dilakukan berdasarkan persentase pengurangan luas luka terhadap ukuran awal, sehingga progres penyembuhan dapat dibandingkan secara objektif. Persentase ini juga digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kendali *fuzzy* agar perbedaan ukuran awal tidak memengaruhi keputusan pengendalian durasi stimulasi.

Analisis penyembuhan luka meliputi pengukuran luas luka dan penilaian kualitas jaringan melalui kepadatan jaringan ikat serta pertumbuhan pembuluh darah baru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selain pengurangan luas luka, perubahan signifikan pada struktur jaringan dan tingkat angiogenesis juga menjadi indikator penting efektivitas terapi. Hal ini disebabkan oleh peran faktor biologis, seperti aktivitas fibroblas dan vaskularisasi, yang sangat berpengaruh dalam mempercepat regenerasi jaringan [21]. Dalam proses penyembuhan luka, pembentukan serta perkembangan pembuluh darah memegang peranan krusial. Proses ini berlangsung pada fase proliferasi, yang dimulai sejak hari ke-4 hingga hari ke-21 setelah luka terbentuk [22].

C. SISTEM KENDALI FUZZY

Sistem kendali *fuzzy* dalam penelitian ini bertujuan mengatur durasi stimulasi listrik secara adaptif berdasarkan perkembangan luka. Kendali *fuzzy* dipilih karena mampu mengelola ketidakpastian dan dinamika biologis tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Perancangan meliputi identifikasi variabel masukan dan keluaran dengan menentukan fungsi keanggotaan, penyusunan aturan, serta pemilihan metode inferensi dan defuzifikasi yang sesuai. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan kendali yang fleksibel, presisi, dan responsif terhadap perubahan kondisi luka selama terapi.

Dalam sistem pengaturan stimulasi listrik untuk penyembuhan luka, parameter stimulus yang diatur mencakup durasi dan amplitudo, sedangkan lebar pulsa dan frekuensi tetap konstan. Mekanisme pembaruan durasi stimulasi dijelaskan pada (1).

$$T[n] = T[n - 1] + \Delta T[n]. \quad (1)$$

Durasi stimulasi listrik pada siklus ke-*n* ($T[n]$) dihitung berdasarkan durasi pada siklus sebelumnya ($T[n-1]$) serta perubahan yang dihasilkan oleh sistem kendali *fuzzy* ($\Delta T[n]$). Dengan demikian, $T[n]$ merepresentasikan durasi stimulasi terkini yang diperbarui secara adaptif sesuai dengan perkembangan kondisi luka. Pada setiap siklus, kendali *fuzzy*

menentukan nilai $\Delta T[n]$ agar durasi stimulasi dapat mencapai target pengurangan luas luka secara optimal. Keakuratan sistem kemudian dievaluasi dengan membandingkan hasil perhitungan dan keluaran *fuzzy*, untuk menilai efektivitas penyesuaian terapi.

Parameter keanggotaan *fuzzy* dinyatakan dalam segitiga dan trapesium pada (2) dan (3). Fungsi keanggotaan dituliskan sebagai berikut.

$$\text{Segitiga}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Trapesium}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-b}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3)$$

Fungsi keanggotaan *fuzzy* berbentuk segitiga didefinisikan oleh tiga parameter a , b , dan c , dengan a adalah batas bawah, b merupakan titik puncak dengan derajat keanggotaan maksimum, dan c adalah batas atas. Sementara itu, fungsi trapesium menggunakan empat parameter, yaitu a sebagai batas bawah, b dan c sebagai rentang dengan derajat keanggotaan penuh ($\mu(x)=1$), serta d sebagai batas atas. Variabel x merepresentasikan nilai masukan yang dipetakan ke dalam derajat keanggotaan $\mu(x)$ pada interval $[0,1]$.

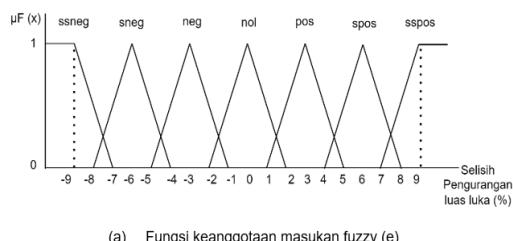
Sistem kendali ini menggunakan dua variabel masukan, yaitu *error*[*n*-1] (*e*) dan *delta error*[*n*] (*de*). Variabel *error*[*n*-1] didefinisikan sebagai selisih antara pengurangan luas luka yang ditargetkan dengan pengurangan aktual pada siklus ke-(*n*-1). Sementara itu, *delta error*[*n*] merepresentasikan perubahan nilai *error*, yang dihitung dari selisih antara *error*[*n*] dan *error*[*n*-1]. Fungsi keanggotaan masukan *fuzzy* selisih pengurangan luas luka (*e*) ditunjukkan pada Gambar 3(a) dan *delta error* (*de*) ditunjukkan pada Gambar 3(b). Nilai parameter keanggotaan *fuzzy* ditentukan berdasarkan hasil percobaan klinis stimulasi listrik *open-loop*. Fungsi keanggotaan keluaran *fuzzy* adalah , yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Fuzifikasi mengubah nilai masukan numerik menjadi derajat keanggotaan *fuzzy* yang diproses oleh sistem. Masukan ini kemudian dievaluasi melalui 21 aturan *fuzzy* (misalnya, jika *e* = ‘neg’ dan *de* = ‘B’, maka *durasi* = ‘pdk’), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel I.

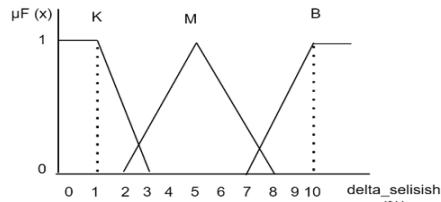
Setelah fuzifikasi, tahap berikutnya adalah inferensi, yaitu sistem menerapkan aturan *fuzzy* untuk menentukan respons yang sesuai terhadap kondisi luka. Inferensi menghasilkan keluaran *fuzzy*, yaitu $\Delta T[n]$ dalam bentuk himpunan linguistik. Setelah proses inferensi dan aturan *fuzzy*, dilakukan perhitungan nilai keluaran yang disebut dengan defuzifikasi. Keluaran defuzifikasi yang digunakan adalah metode *weighted average* (4).

$$\text{final output} = \frac{\sum_{i=1}^7 \mu_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^7 \mu_i} \quad (4)$$

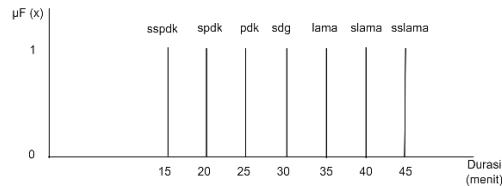
Persamaan (4) menunjukkan bahwa μ_i merepresentasikan fungsi keanggotaan masukan (*input membership function*), yang berperan dalam menentukan tingkat keanggotaan suatu nilai terhadap himpunan *fuzzy* yang relevan. Sementara itu, z_i mengacu pada nilai keluaran yang diperoleh sebagai hasil dari



(a) Fungsi keanggotaan masukan fuzzy (e)



(b) Fungsi keanggotaan masukan fuzzy (de)

Gambar 3. Fungsi keanggotaan masukan fuzzy.**Gambar 4.** Fungsi keanggotaan keluaran fuzzy.

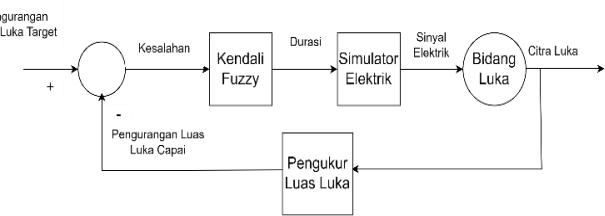
TABEL I
ATURAN FUZZY

$e \setminus de$	K	M	B
ssneg	sspdk	sspdk	sspdk
sneg	spdk	spdk	spdk
neg	spdk	pdk	pdk
nol	sdg	sdg	sdg
pos	lama	lama	slama
spos	slama	slama	slama
sspos	sslama	sslama	sslama

proses inferensi *fuzzy*. Nilai ini menjadi representasi keluaran sistem setelah melewati tahapan fuzifikasi, penerapan aturan, dan proses defuzifikasi. Nilai keluaran sistem ini kemudian digunakan untuk menyesuaikan durasi stimulasi listrik secara adaptif.

Kendali *fuzzy* pada sistem *closed-loop* menyesuaikan durasi stimulasi listrik agar tetap berada dalam rentang optimal, sehingga mempercepat penyembuhan luka tanpa memperlambat regenerasi sel atau menimbulkan kelelahan jaringan akibat *overstimulation*. Diagram blok sistem kendali *fuzzy* yang digunakan untuk mengatur stimulasi listrik dalam proses penyembuhan luka ditunjukkan pada Gambar 5.

Efektivitas penyesuaian durasi stimulasi listrik dievaluasi melalui mekanisme umpan balik pada luasan luka menggunakan metode pengukuran berbasis citra digital dengan deteksi warna, sehingga progres penyembuhan dapat dipantau secara objektif. Luas luka dihitung dalam satuan piksel dan dianalisis dengan membandingkan nilai pada hari pengamatan terhadap hari sebelumnya untuk memperoleh persentase pengurangan. Data citra diperoleh dari gambar luka yang diambil secara berkala menggunakan kamera, kemudian digunakan sebagai masukan bagi sistem kendali *fuzzy* untuk menyesuaikan durasi stimulasi secara adaptif.

**Gambar 5.** Kendali fuzzy stimulator listrik.

Persentase pengurangan luas luka dikonversi menjadi nilai *error* dan dibandingkan dengan target pengurangan. Berdasarkan *error* ini, sistem menyesuaikan durasi stimulasi: durasi diperpanjang jika *error* besar dan dikurangi jika pengurangan luka mendekati atau melebihi target. Penyesuaian dilakukan secara periodik agar durasi terapi selalu sesuai dengan kondisi biologis terkini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem stimulasi listrik *closed-loop* berbasis logika *fuzzy* dan menguji efektivitasnya dalam mempercepat penyembuhan luka pada hewan coba marmut. Sistem ini mampu menyesuaikan durasi ES secara otomatis berdasarkan perkembangan luka, sehingga meningkatkan efisiensi terapi dan mempercepat regenerasi jaringan. Pendekatan ini berpotensi menjadi solusi yang lebih adaptif dan optimal dibandingkan metode konvensional.

A. KINERJA RANGKAIAN STIMULATOR LISTRIK

Teknologi berbasis bioelektrik memiliki peran penting dalam deteksi dini dan penanganan ulkus kaki diabetik, salah satunya melalui terapi inovatif berupa stimulasi listrik yang terbukti mampu mempercepat regenerasi jaringan dan meningkatkan sirkulasi darah pada area luka [23]. Agar terapi efektif, sistem stimulasi listrik harus menghasilkan sinyal sesuai dengan parameter yang dirancang. Oleh karena itu, dilakukan pengujian kinerja untuk memverifikasi kesesuaian frekuensi, amplitudo, dan lebar pulsa, sehingga stimulasi yang diberikan aman, tepat guna, dan mendukung proses penyembuhan luka secara optimal.

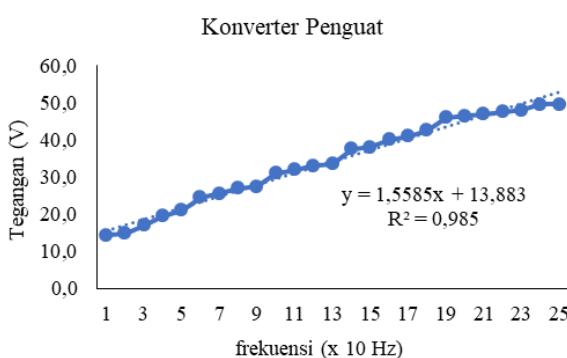
1) SINYAL PULSA KELUARAN MIKROKONTROLER

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa frekuensi sinyal pulsa yang dihasilkan oleh mikrokontroler adalah 20 Hz, dengan tingkat kesalahan 2,5%. Nilai ini masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi terapi luka [24]. Selain itu, lebar pulsa yang dirancang sebesar 250 μs memiliki rata-rata kesalahan 20,8% dan lebar pulsa meningkat hingga 314 μs saat terhubung ke jaringan. Meskipun terjadi peningkatan, nilai ini masih tergolong aman dalam penerapan untuk penyembuhan luka karena lebar pulsa yang tidak menimbulkan rasa sakit memiliki rentang yang luas, hingga mencapai 500 μs [24]. Dengan demikian, rangkaian ES yang dikembangkan tetap dapat digunakan secara efektif dalam terapi stimulasi listrik untuk penyembuhan luka.

2) KONVERTER PENGUAT

Pengujian konverter penguat dilakukan untuk mengukur tegangan keluaran pada berbagai frekuensi masukan guna mengevaluasi kinerjanya (Gambar 6). Konverter penguat menerima masukan berupa sinyal pulsa dan menghasilkan keluaran dalam bentuk tegangan DC.

Tegangan keluaran maksimum yang dihasilkan oleh konverter penguat mencapai 50 V, yang sesuai dengan



Gambar 6. Hubungan frekuensi dan tegangan konverter penguat.

spesifikasi desain yang telah dirancang. Hal ini menunjukkan bahwa konverter penguat berfungsi dengan baik dalam menyediakan tegangan yang stabil untuk mendukung sistem stimulasi listrik.

Hasil pengujian dimodelkan dalam (5), yang menunjukkan bahwa tegangan keluaran meningkat secara linier seiring peningkatan frekuensi masukan.

$$Y = 13,83 + 1,56 X. \quad (5)$$

Tegangan keluaran dinyatakan dengan Y dan masukan frekuensi dinyatakan dengan X . Konstanta 13,87 menunjukkan tegangan keluaran saat frekuensi nol, sedangkan koefisien 1,56 menggambarkan laju kenaikan tegangan keluaran terhadap masukan frekuensi, sehingga hubungan keduanya bersifat linier dan positif.

3) PEMBANGKIT PULSA

Pengujian akhir stimulator dilakukan pada keluaran pembangkit pulsa, baik dengan metode tanpa beban maupun dengan beban, untuk mengevaluasi pengaruh jaringan terhadap parameter sinyal stimulasi. Parameter yang diuji meliputi amplitudo tegangan, arus, bentuk sinyal, frekuensi, dan lebar pulsa, sehingga dapat memastikan bahwa sistem berfungsi sesuai spesifikasi desain. Hasil pengujian menunjukkan bahwa amplitudo tegangan keluaran generator pulsa bervariasi antara 15,4 V hingga 50,8 V, tergantung pada masukan frekuensi. Variasi ini menunjukkan bahwa pembangkit pulsa mampu menyesuaikan keluaran tegangan sesuai dengan kebutuhan stimulasi listrik.

Tegangan keluaran konverter penguat dan pembangkit pulsa telah memenuhi spesifikasi desain, dengan kemampuan menyesuaikan amplitudo sesuai kebutuhan terapi. Selanjutnya, dilakukan pengukuran arus pada amplitudo 25 V dengan berbagai nilai resistansi, termasuk simulasi kondisi saat elektroda terpasang pada jaringan kulit. Tujuan pengukuran ini adalah untuk menentukan arus maksimum yang dihasilkan oleh rangkaian stimulasi listrik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada resistansi 1 Ω , arus maksimum yang dihasilkan adalah 52 μ A dengan lebar pulsa 323 μ s. Sementara itu, pada jaringan kulit dengan resistansi sekitar 400 $k\Omega$, arus yang terukur adalah 0,58 μ A. Resistor 1 Ω dipilih sebagai nilai referensi untuk pengukuran karena memberikan hambatan minimal, sehingga memungkinkan penentuan arus maksimum rangkaian secara langsung tanpa dipengaruhi resistansi eksternal. Selain itu, muatan listrik maksimum yang dihasilkan pada resistansi ini mencapai 168 μ C, yang masih berada dalam kisaran aman untuk terapi stimulasi listrik. Menurut standar terapi listrik, muatan yang diberikan per pulsa harus berada

dalam skala microcoulomb (μ C) untuk memastikan keamanan dan efektivitas terapi [25].

4) DURASI STIMULASI

Durasi stimulasi yang dihasilkan sistem memiliki kesalahan maksimum 2,5% akibat pembulatan perhitungan mikrokontroler, tetapi tetap dalam batas aman dan tidak memengaruhi efektivitas terapi. Secara keseluruhan, rangkaian stimulator listrik menunjukkan kinerja yang baik dan telah memenuhi spesifikasi desain awal. Sistem ini mampu menghasilkan sinyal stimulasi listrik dengan parameter yang akurat serta dapat disesuaikan secara dinamis berdasarkan umpan balik dari perkembangan luka, sehingga memastikan efektivitas dan keamanan dalam penerapannya.

B. EFEKTIVITAS KENDALI FUZZY DALAM MENYESUAIKAN DURASI STIMULASI

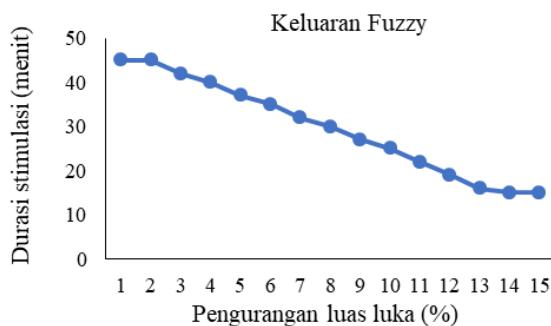
Pengendali logika *fuzzy* dibuat melalui lima tahap utama, yaitu pemilihan masukan kendali, penentuan fungsi keanggotaan *fuzzy*, perancangan aturan *fuzzy*, pemilihan metode inferensi *fuzzy*, dan proses defuzifikasi. Kendali *fuzzy* menyesuaikan durasi stimulasi listrik secara adaptif berdasarkan selisih (*error*) antara pengurangan luas luka aktual dan target. Sistem menggunakan ukuran luka sebagai umpan balik untuk menentukan nilai *error*, yang kemudian dijadikan sebagai masukan *fuzzy* dalam mengatur durasi stimulasi. Jika pengurangan luka lebih kecil dari target, durasi diperpanjang; sebaliknya, jika melebihi target, durasi dikurangi untuk mencegah kelelahan jaringan. Stimulus listrik yang dihasilkan diaplikasikan ke luka guna merangsang regenerasi jaringan secara optimal tanpa efek samping. Pendekatan ini efektif karena kendali *fuzzy* mampu menangani dinamika sistem biologis yang kompleks dan tidak linier.

Defuzzifikasi dengan metode *weighted average* menunjukkan bahwa pada kondisi $e = +4,5$ dan $de = 3$, durasi stimulasi meningkat menjadi 41,2 menit untuk mencegah *understimulation*, sedangkan pada kondisi $e = -4,5$ dan $de = 3$ durasi berkurang menjadi 23,8 menit untuk mencegah *overstimulation*. Hasil ini menegaskan bahwa kendali *fuzzy* secara adaptif menyesuaikan durasi stimulasi berdasarkan capaian pengurangan luas luka, sehingga lebih efektif dibandingkan sistem *open-loop* dengan durasi tetap.

Penerapan logika *fuzzy* terbukti efektif menyesuaikan durasi terapi stimulasi listrik secara adaptif berdasarkan perkembangan luka. Dengan memproses selisih antara target dan capaian, sistem dapat menentukan durasi optimal serta menangani ketidakpastian [26]. Hasil pada Gambar 7 menunjukkan bahwa makin besar pengurangan luas luka, makin singkat durasi stimulasi yang diberikan.

Sistem *fuzzy* menyesuaikan durasi stimulasi listrik antara 15–45 menit berdasarkan pengurangan luas luka. Durasi diperpanjang saat capaian di bawah target, dipertahankan 30 menit saat sesuai target, dan dikurangi jika melebihi target untuk mencegah *overstimulation*.

Kendali *fuzzy* mampu menyesuaikan durasi stimulasi listrik secara *real-time* dengan akurasi tinggi (kesalahan 0,3%), sehingga meningkatkan efisiensi dan efektivitas terapi penyembuhan luka. Akurasi ini menegaskan bahwa kendali *fuzzy* merupakan solusi adaptif dan presisi untuk penyembuhan luka. Parameter kendali ditentukan berdasarkan uji praklinis sistem *open-loop* yang mengikuti model pengurangan luas luka eksponensial dengan tunda (*delay*) dan dirancang berdasarkan pengetahuan kualitatif tentang proses penyembuhan yang dirumuskan dalam bentuk aturan *fuzzy* dan fungsi keanggotaan.



Gambar 7. Durasi stimulasi listrik keluaran fuzzy.

C. EFEKTIVITAS KENDALI FUZZY PADA TERAPI STIMULASI LISTRIK UNTUK PENYEMBUHAN LUCA

Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menentukan kecepatan penyembuhan dan durasi stimulasi optimal, dengan nilai normalisasi sebesar $\theta = 0,09/\text{hari}$ dan waktu tunda 3 hari sebagai dasar target pengurangan luas luka harian dalam sistem ES *closed-loop* (6) digunakan untuk menggambarkan dinamika penyembuhan luka seiring waktu [27]. Rancangan ini ditunjukkan dalam Gambar 8 untuk periode 12 hari.

$$S(t) = \begin{cases} S_{DEX}, & 0 \leq t \leq T_{DEX} \\ S_{DEX} \cdot e^{-\theta_{DEX}(t-T_{DEX})}, & t > T_{DEX} \end{cases} \quad (6)$$

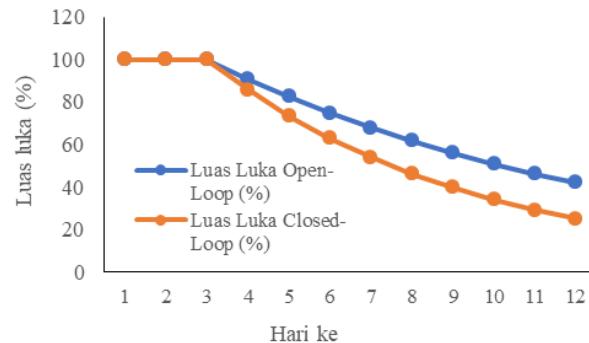
Persamaan (6) menunjukkan bahwa $S(t)$ adalah estimasi luas luka (%) pada waktu t , sedangkan S_{DEX} adalah luas luka awal (%). Parameter θ_{DEX} menunjukkan kecepatan penyembuhan (% per hari) dan T_{DEX} merepresentasikan waktu tunda penyembuhan (hari).

Sistem *closed-loop* dirancang untuk mempercepat penyembuhan luka hingga 1,5 kali lebih cepat dibandingkan sistem *open-loop* dengan tetap mempertimbangkan risiko kelelahan jaringan. Pada tiga hari pertama pada rancangan target penyembuhan, kedua sistem terapi menunjukkan pola penyembuhan yang serupa karena masih berada dalam fase awal proses regenerasi jaringan. Pada hari ke-12, sistem *closed-loop* menunjukkan penurunan luas luka hingga mendekati 25%, sedangkan sistem *open-loop* berada di sekitar 42%. Angka percepatan 1,5 kali dipilih secara rasional dengan mengacu pada literatur dan studi sebelumnya, yang melaporkan bahwa terapi stimulasi listrik dapat meningkatkan kecepatan penyembuhan luka antara 1,3 hingga 2 kali lipat, tergantung pada jenis luka dan parameter stimulasi yang digunakan [27]–[29].

Pada terapi *open-loop*, durasi stimulasi listrik tetap 30 menit *on* – 60 menit *off*, sedangkan pada terapi *closed-loop*, durasi disesuaikan secara adaptif antara 15–45 menit tergantung perkembangan luka. Kelompok kontrol tidak menerima stimulasi. Hari ke-6 atau ke-7 dijadikan sebagai hari istirahat (*intermittent*) untuk mencegah efek samping dari stimulasi terus-menerus, seperti peningkatan suhu dan kelelahan jaringan.

Rincian perlakuan hewan coba disusun untuk membandingkan metode terapi, dengan Tabel II merangkum tindakan pada setiap hewan. Luas luka awal diukur sebagai acuan efektivitas dan hewan 1 sebagai kontrol hanya menerima perawatan standar tanpa stimulasi listrik. Setiap perlakuan dirancang agar memungkinkan evaluasi objektif terhadap kontribusi stimulasi listrik terhadap proses penyembuhan luka.

Evaluasi efektivitas terapi dilakukan dengan mengukur pengurangan luas luka pada masing-masing hewan selama



Gambar 8. Luas luka target kendali fuzzy.

TABEL II
TINDAKAN TERAPI HEWAN COBA

Hewan	Luas luka awal (mm^2)	Tindakan
1	182	Tanpa terapi
2	500	Terapi <i>open loop</i>
3	500	Terapi <i>closed loop</i>
4	375	Terapi <i>closed loop</i>

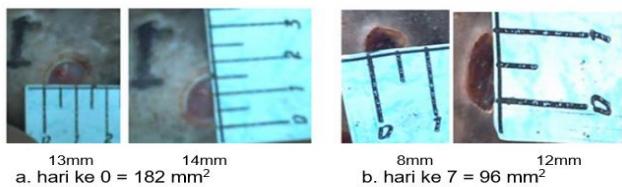
penelitian, yang membandingkan sistem *closed-loop*, *open-loop*, dan tanpa stimulasi. Hasil menunjukkan kemampuan adaptif sistem *closed-loop* dalam menyesuaikan durasi terapi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9 sampai Gambar 12 dan Tabel III.

Perbedaan durasi stimulasi pada hewan coba menunjukkan cara sistem ES menyesuaikan durasi terapi berdasarkan kendali *fuzzy*. Grafik pada Gambar 13 hingga Gambar 16 menggambarkan hubungan antara pengurangan luas luka target, capaian, dan durasi stimulasi yang diberikan selama terapi.

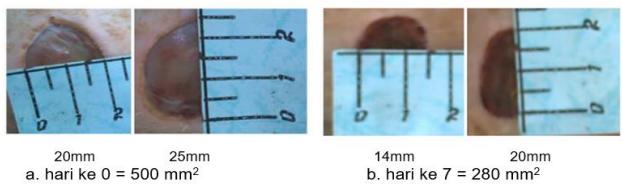
Pada hewan 1 tanpa terapi ES, pengurangan luas luka capai selalu lebih kecil daripada target (Gambar 13). Pada hewan 2 dengan terapi *open-loop* (Gambar 14), durasi stimulasi listrik diberikan konstan sekitar 30 menit per sesi. Pengurangan luas luka mulai terlihat pada hari ke-3 dan mendekati target pada hari ke-4 dan ke-5, menunjukkan efektivitas terapi. Namun, pada hari ke-7 dan ke-8, pengurangan luas luka capai kembali lebih rendah dari target. Secara keseluruhan, terapi *open-loop* menunjukkan tren pengurangan luas luka seiring waktu.

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan bahwa durasi stimulasi pada hewan 3 dan hewan 4 diatur secara adaptif oleh kendali *fuzzy* berdasarkan selisih pengurangan luas luka dengan target. Meskipun hewan 3 memiliki luka awal lebih besar, keduanya mengalami peningkatan signifikan pada hari ke-3 hingga hari ke-6, dengan puncak pada hari ke-4 yang melebihi target, sehingga durasi stimulasi dikurangi untuk menghindari *overstimulation*. Pada hari ke-5, laju penyembuhan menurun dan durasi dipertahankan rendah untuk menjaga stabilitas penyembuhan. Pada hari ke-7 dan ke-8, durasi kembali ditingkatkan untuk merespons melambatnya pengurangan luka. Pada hari ke-8, hewan 4 mencapai target, sedangkan hewan 3 sedikit di bawah target, yang dapat dipengaruhi oleh ukuran luka awal yang lebih besar. Temuan ini menunjukkan efektivitas kendali *fuzzy* dalam menyesuaikan durasi stimulasi secara dinamis sesuai fase penyembuhan.

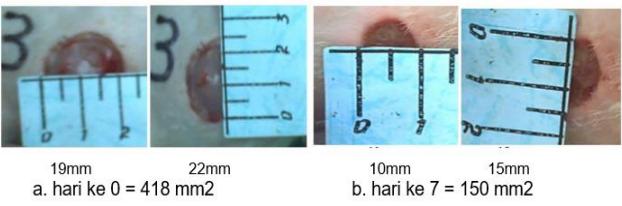
Kendali *fuzzy* berperan penting dalam menentukan durasi stimulasi listrik yang optimal secara *real-time* berdasarkan selisih antara pengurangan luas luka target dan capaian. Penyesuaian ini mencegah *overstimulation* yang berisiko terjadinya kelelahan jaringan dan *understimulation* yang



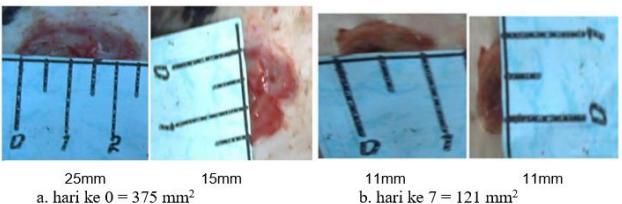
Gambar 9. Luas luka hewan 1.



Gambar 10. Luas luka hewan 2.



Gambar 11. Luas luka hewan 3.



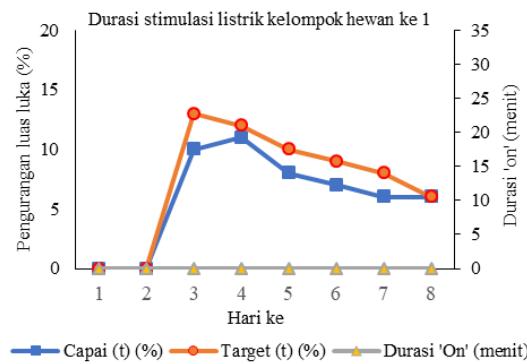
Gambar 12. Luas luka hewan 4.

TABEL III
PENGURANGAN LUAS LUKA HEWAN COBA

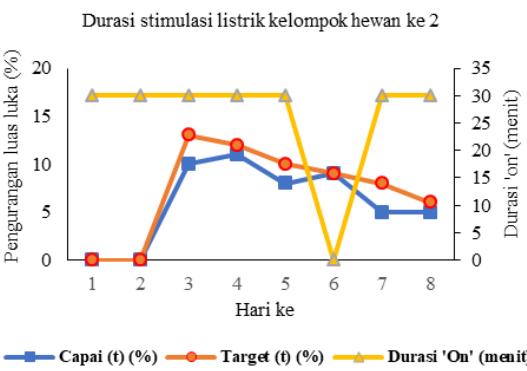
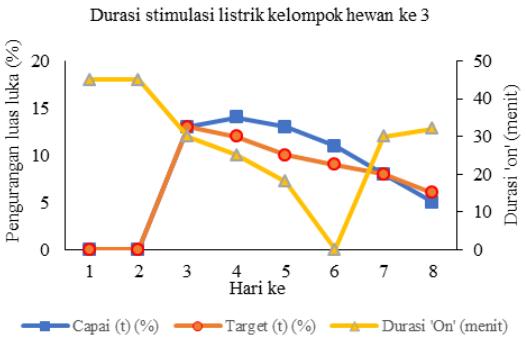
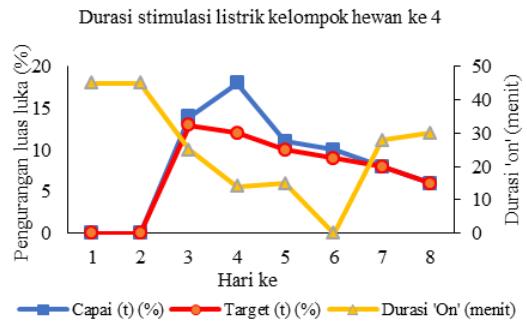
Hewan	Luas luka awal (mm ²)	Luas luka hari ke-7 (mm ²)	Pengurangan luas luka (%)
1 (Tanpa terapi)	182	96	47
2 (Terapi <i>open loop</i>)	500	280	44
3 (Terapi <i>closed loop</i>)	418	150	64
4 (Terapi <i>closed loop</i>)	375	121	67

memperlambat penyembuhan. Sistem *closed-loop* memastikan terapi diberikan dalam jumlah tepat dan disesuaikan dengan kondisi masing-masing hewan coba. Perbedaan waktu penyembuhan juga dipengaruhi oleh faktor biologis, seperti ukuran luka awal, respons jaringan, dan kondisi fisiologis individu.

Hasil uji praklinis menunjukkan bahwa terapi *closed-loop* menghasilkan pengurangan luas luka paling signifikan, yaitu sebesar 64–67% dalam waktu tujuh hari. Keberhasilan ini dikaitkan dengan kemampuan sistem kendali *fuzzy* untuk secara dinamis menyesuaikan durasi stimulasi sesuai perkembangan luka, sehingga memberikan respons terapi yang lebih presisi dan efektif. Sebaliknya, terapi *open-loop* yang menggunakan durasi tetap (30 menit *on* – 60 menit *off*) hanya mampu menghasilkan pengurangan luas luka sebesar 44%, bahkan lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol yang mencapai 47%. Kondisi ini dapat disebabkan oleh ukuran luka awal yang lebih kecil pada kelompok kontrol serta ketidakmampuan sistem *open-loop* dalam menyesuaikan kebutuhan terapi secara individual. Durasi yang tidak adaptif



Gambar 13. Durasi dan pengurangan luas luka tanpa terapi ES.

Gambar 14. Durasi dan pengurangan luas luka terapi *open loop*.Gambar 15. Durasi dan pengurangan luas luka terapi *closed loop* (hewan 3).Gambar 16. Durasi dan pengurangan luas luka terapi *closed loop* (hewan 4).

dapat menyebabkan stimulasi yang tidak efektif atau tidak sesuai kebutuhan biologis jaringan.

Keunggulan sistem *closed-loop* berbasis kendali *fuzzy* dalam penelitian ini diperkuat melalui perbandingan dengan berbagai studi sebelumnya. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa terapi ES pada luka kronis rata-rata hanya menghasilkan pengurangan luas luka sekitar 22% dalam waktu

empat minggu, termasuk pada pasien dengan ulkus kaki diabetik yang menggunakan sistem *home-based ES* [28], [30]. Sebaliknya, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu mencapai pengurangan luas luka sebesar 64–67% dalam tujuh hari, menunjukkan potensi percepatan penyembuhan yang jauh lebih tinggi. Keunggulan ini berasal dari kemampuan sistem *closed-loop* berbasis *fuzzy* untuk menyesuaikan durasi stimulasi secara *real-time* berdasarkan perkembangan luka aktual, berbeda dengan sistem *open-loop* yang menggunakan durasi tetap tanpa kemampuan adaptif terhadap dinamika biologis luka [31], [32]. Dengan pendekatan adaptif ini, sistem tidak hanya mempercepat pengurangan luas luka secara signifikan, tetapi juga mengurangi risiko *overstimulation* maupun *understimulation*, sehingga menghasilkan proses penyembuhan yang lebih efisien, responsif, dan terukur melalui persentase pengurangan luas luka harian.

Standar keberhasilan dalam penelitian ini meliputi tiga aspek utama, yaitu: 1) kecepatan pengurangan luas luka per hari, yakni sistem yang dikembangkan menunjukkan laju penyembuhan yang lebih cepat dibandingkan sistem *open-loop* dan tanpa terapi; 2) kemampuan adaptif sistem *closed-loop* berbasis *fuzzy* dalam menyesuaikan durasi stimulasi secara *real-time* sesuai kondisi luka terkini yang tidak dimiliki oleh sistem *open-loop*; dan 3) pengurangan risiko *overstimulation*, sehingga sistem adaptif ini mampu meminimalkan pemberian durasi terapi yang berlebihan atau kurang, yang sering terjadi pada sistem *open-loop*.

Evaluasi hasil penyembuhan luka pada masing-masing kelompok terapi tidak hanya didasarkan pada pengurangan luas luka, tetapi juga mempertimbangkan perbedaan signifikan dalam kualitas jaringan dan tingkat regenerasi sebagai indikator utama efektivitas terapi stimulasi listrik yang diterapkan. Kelompok *closed-loop* menunjukkan hasil penyembuhan luka terbaik dengan kepadatan jaringan ikat tertinggi (75–100%) dan rata-rata pertumbuhan 9,6 pembuluh darah baru. Kelompok *open-loop* memiliki kepadatan jaringan ikat 50% dan rata-rata 6,6 pembuluh darah baru, sedangkan kelompok kontrol menunjukkan kepadatan terendah (25–50%) dengan rata-rata 5,6 pembuluh darah baru. Diameter luka dan analisis fibroblas digunakan sebagai indikator utama penyembuhan, yang dipengaruhi tidak hanya oleh luas luka awal, tetapi juga oleh aktivitas fibroblas, kepadatan jaringan ikat, dan angiogenesis.

Indikator penyembuhan yang digunakan untuk perhitungan skor meliputi pengurangan luas luka, kepadatan jaringan ikat, dan pertumbuhan pembuluh darah baru, dengan bobot yang sama. Penilaian diperlukan untuk menilai efektivitas terapi secara objektif dan terstandar, sehingga hasil dari berbagai indikator antarkelompok dapat dibandingkan secara adil dan terukur. Perhitungan skor indikator ditunjukkan pada (7) dan Tabel IV.

$$Skor_i = \frac{X_i}{X_{imax}}. \quad (7)$$

Persamaan (7) menunjukkan bahwa $Skor_i$ adalah skor indikator ke- i , dihitung dari perbandingan antara nilai indikator pada kelompok yang diamati (X_i) dengan nilai maksimum indikator tersebut (X_{imax}) di seluruh kelompok. Rumus ini memberikan ukuran relatif kinerja tiap indikator.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terapi *closed-loop* secara signifikan lebih efektif dibandingkan kelompok kontrol dan *open-loop* dalam mengurangi luas luka, meningkatkan

TABEL IV
PERHITUNGAN SKOR EFEKTIVITAS TERAPI

Hewan	Skor			
	Pengurangan Luas Luka	Kepadatan Jaringan Ikat	Pembuluh Darah Baru	Total Skor
1 (Tanpa terapi)	0,70	0,25	0,58	0,51
2 (Terapi <i>open loop</i>)	0,66	0,50	0,69	0,61
3 (Terapi <i>closed loop</i>)	0,96	0,75	1,00	0,90
4 (Terapi <i>closed loop</i>)	1,00	1,00	1,00	1,00

kepadatan jaringan ikat, dan mempercepat pertumbuhan pembuluh darah baru, yang diperkuat melalui perhitungan penilaian berdasarkan berbagai indikator penyembuhan luka.

Evaluasi praklinis menunjukkan bahwa stimulasi listrik *closed-loop* berbasis *fuzzy* lebih efektif dibandingkan *open-loop* dan tanpa terapi, dengan hasil berupa percepatan penyembuhan dan peningkatan kepadatan jaringan dalam waktu yang lebih singkat. Temuan ini membuka peluang untuk pengembangan terapi luka yang lebih adaptif dan presisi, dengan potensi meningkatkan hasil pengobatan dan kualitas hidup pasien.

IV. KESIMPULAN

Sistem stimulator listrik berhasil menghasilkan sinyal pulsa dengan parameter yang dirancang, termasuk amplitudo (0–50 V), frekuensi (20 Hz), dan lebar pulsa (250 μs). Konverter penguat mampu meningkatkan masukan tegangan secara linier, dengan tegangan keluaran maksimum mencapai 50 V. Arus listrik yang dihasilkan tidak melebihi 60 μA, memastikan keamanan dan kenyamanan selama terapi.

Kendali *fuzzy* berhasil menyesuaikan durasi stimulasi secara dinamis (15–45 menit) berdasarkan perkembangan luka, menghindari *overstimulation* dan *understimulation*, sehingga meningkatkan efektivitas terapi. Selisih kesalahan antara perhitungan *fuzzy* dan keluaran aktual rata-rata 0,3%, menunjukkan akurasi yang tinggi. Sistem ini juga menyesuaikan durasi stimulasi secara dinamis untuk menghindari kelelahan jaringan, sehingga proses penyembuhan menjadi lebih cepat dan efektif.

Kelompok *closed-loop* memiliki skor tertinggi (0,90–1,00), menunjukkan efektivitas penyembuhan luka yang optimal. Kelompok *open-loop* memperoleh skor menengah (0,61), lebih baik daripada kelompok kontrol, tetapi kurang optimal dibanding *closed-loop*. Sementara itu, kelompok kontrol memiliki skor terendah (0,51), menandakan efektivitas penyembuhan paling rendah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terapi *closed-loop* merupakan metode paling efektif dalam penyembuhan luka berdasarkan tiga indikator utama yang diuji.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem terapi ES berbasis *closed-loop* yang adaptif, fleksibel, dan lebih efektif dalam mendukung proses penyembuhan luka kronis, serta membuka peluang pengembangan terapi berbasis kendali *fuzzy* untuk aplikasi medis yang lebih luas.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak memiliki konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Rahmawati dan Achmad Arifin; metodologi, Rahmawati dan Gunawan; perangkat lunak, Rahmawati dan Achmad Arifin; validasi, Rahmawati, Achmad Arifin, dan Duti Sriwati Aziz; analisis formal, Rahmawati; investigasi, Duti Sriwati Aziz dan Gunawan; sumber daya, Rahmawati, Gunawan, Siti Amra, dan Raisah Hayati; kurasi data, Rahmawati, Achmad Arifin, dan Raisah Hayati; penulisan—penyusunan draf asli, Rahmawati, Siti Amra, dan Raisah Hayati; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Rahmawati; visualisasi, Rahmawati.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah meluangkan waktu dan berkontribusi dalam penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

REFERENSI

- [1] H. Setiawan, H. Mukhlis, D.A. Wahyudi, dan R. Damayanti, "Kualitas hidup ditinjau dari tingkat kecemasan pasien penderita ulkus diabetikum," *Maj. Kesehat. Indones.*, vol. 1, no. 2, hal. 33–38, Okt. 2020, doi: 10.47679/makein.20207.
- [2] S.B. Rajendran, K. Challen, K.L. Wright, dan J.G. Hardy, "Electrical stimulation to enhance wound healing," *J. Funct. Biomater.*, vol. 12, no. 2, hal. 1–17, Jun. 2021, doi: 10.3390/jfb12020040.
- [3] Y. Wang, M. Rouabha, dan Z. Zhang, "Pulsed electrical stimulation benefits wound healing by activating skin fibroblasts through the TGFβ1/ERK/NF-κB axis," *Biochim. Biophys. Acta (BBA) - Gen. Subj.*, vol. 1860, no. 7, hal. 1551–1559, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.bbagen.2016.03.023.
- [4] K. Wang dkk., "A platform to study the effects of electrical stimulation on immune cell activation during wound healing," *Adv. Biosyst.*, vol. 3, no. 10, hal. 1–8, Okt. 2019, doi: 10.1002/adbi.201900106.
- [5] M. Rodrigues, N. Kosaric, C.A. Bonham, dan G.C. Gurtner, "Wound healing: A cellular perspective," *Physiol. Rev.*, vol. 99, no. 1, hal. 665–706, Jan. 2019, doi: 10.1152/physrev.00067.2017.
- [6] J.H. Tan dkk., "Incorporating fuzzy logic into an adaptive negative pressure wound therapy device," *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 4, hal. 85–89, Okt.-Des. 2017.
- [7] H. Sattar dkk., "Smart wound hydration monitoring using biosensors and fuzzy inference system," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2019, no. 1, hal. 1–15, Des. 2019, doi: 10.1155/2019/8059629.
- [8] M.F.N. Reimansyah, A. Triwiyatno, dan B. Setiyono, "Perancangan kontrol fuzzy adaptif pada sistem kontrol kecepatan stasioner mesin bensin," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 3, no. 3, hal. 215–221, Agu. 2014.
- [9] A.N. Fajero, H. Haryanto, T. Sutojo, dan E. Mulyanto, "Logika fuzzy untuk perilaku dinamis pada sistem crafting dalam game pembelajaran aritmatika," *J. Eksplora Inform.*, vol. 9, no. 2, hal. 154–162, Mar. 2020, doi: 10.30864/eksplora.v9i2.367.
- [10] K. Chrobak, G. Chrobak, dan J.K. Kazak, "The use of common knowledge in fuzzy logic approach for vineyard site selection," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 11, hal. 1–31, Jun. 2020, doi: 10.3390/rs12111775.
- [11] Y.K. Almusawi, M.R.H. Al-Sammaraie, dan M.D. Shikara, "The effect of an electric current on human body—the effect of an electric current on human body (A review)," *Al-Esraa Univ. Coll. J. Med. Sci.*, vol. 4, no. 5, hal. 15–42, Sep. 2023, doi: 10.70080/2790-7937.1016.
- [12] M. Tirono, F.S. Hananto, dan A. Abtokhi, "Pulse voltage electrical stimulation for bacterial inactivation and wound healing in mice with diabetes," *Avicenna J. Med. Biotechnol.*, vol. 14, no. 1, hal. 95–101, Jan.-Mar. 2021, doi: 10.18502/ajmb.v14i1.8175.
- [13] H.N. Asham, D.I. Elshahed, A.S. Abdelshafy, dan A.G.F. El-Sayed, "Micro current versus transcutaneous nerve stimulation in treatment of post herpetic neuralgia," *Med. J. Cairo Univ.*, vol. 91, no. 12, hal. 1487–1492, Des. 2023, doi: 10.21608/mjcu.2024.342781.
- [14] J.F. Rizzo dkk., "Methods and perceptual thresholds for short-term electrical stimulation of human retina with microelectrode arrays," *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 44, no. 12, hal. 5355–5361, Des. 2003, doi: 10.1167/iov.02-0819.
- [15] M. Arora dkk., "Electrical stimulation for treating pressure ulcers," *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 2020, no. 1, hal. 1–99, Jan. 2020, doi: 10.1002/14651858.CD012196.pub2.
- [16] R.N. Ahmad, M. Facta, dan I. Setiawan, "Topologi dan kajian kinerja multi konverter arus searah untuk multi generator-hidro mini," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 11, no. 4, hal. 305–313, Nov. 2022, doi: 10.22146/jnteti.v11i4.4343.
- [17] D.V.S. Reddy dan S. Thangavel, "Review on power electronic boost converters," *Aust. J. Elect. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 3, hal. 127–137, Jul. 2021, doi: 10.1080/1448837X.2021.1935091.
- [18] S. Sadaf dkk., "A novel modified switched inductor boost converter with reduced switch voltage stress," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 2, hal. 1275–1289, Feb. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2970648.
- [19] M. L. Alghaythi dkk., "A high step-up interleaved dc-dc converter with voltage multiplier and coupled inductors for renewable energy systems," *IEEE Access*, vol. 8, hal. 123165–123174, Jul. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007137.
- [20] M.A. Elgenedy dkk., "High-voltage pulse generator based on sequentially charged MMC-SMs operating in a voltage-boost mode," *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 4, hal. 749–758, Apr. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5438.
- [21] N. Fitri, "Penggunaan krim ekstrak batang dan daun suruhan (Peperomia pellucida L.H.B.K) dalam proses penyembuhan luka bakar pada tikus putih (Rattus norvegicus)," *Biopendix*, vol. 1, no. 2, hal. 198–208, Mar. 2015, doi: 10.30598/biopendixvol1issue2page198-208.
- [22] Fatimatuzahroh, N.K. Firani, dan H. Kristianto, "Efektifitas ekstrak bunga cengkeh (Syzygium aromaticum) terhadap jumlah pembuluh darah kapiler pada proses penyembuhan luka insisi fase proliferasi," *Maj. Kesehat.*, vol. 2, no. 2, hal. 92–98, Apr. 2015.
- [23] A.S. Sidhu dan V. Harbuzova, "Emerging technologies for the management of diabetic foot ulceration: A review," *Front. Clin. Diabetes Healthc.*, vol. 5, hal. 1–17, Nov. 2024, doi: 10.3389/fcdhc.2024.1440209.
- [24] M. A. Hays dkk., "Towards optimizing single pulse electrical stimulation: High current intensity, short pulse width stimulation most effectively elicits evoked potentials," *Brain Stimul.*, vol. 16, no. 3, hal. 772–782, Mei/Jun. 2023, doi: 10.1016/j.brs.2023.04.023.
- [25] J. Vaidyanathan, "Electrical stimulation of neural tissues - The fundamentals," dalam *The Handbook of Neuromodulation*. Hauppauge, NY, AS: Nova Science Publishers, Inc, 2022, hal. 199–244.
- [26] E.G. Wahyuni dan A.S. Ramadhan, "Aplikasi diagnosis tingkatan pneumonia dan saran pengobatan dengan fuzzy Tsukamoto," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 8, no. 2, hal. 115–122, Mei 2019, doi: 10.22146/jnteti.v8i2.500.
- [27] S.E. Gardner, R.A. Frantz, dan F.L. Schmidt, "Effect of electrical stimulation on chronic wound healing: A meta-analysis," *Wound Repair Regen.*, vol. 7, no. 6, hal. 495–503, Nov./Des. 1999, doi: 10.1046/j.1524-475X.1999.00495.x.
- [28] G. Koel dan P.E. Houghton, "Electrostimulation: current status, strength of evidence guidelines, and meta-analysis," *Adv. Wound Care*, vol. 3, no. 2, hal. 118–126, Feb. 2014, doi: 10.1089/wound.2013.0448.
- [29] B. Girgis dan J.A. Duarte, "High voltage monophasic pulsed current (HVMPC) for stage II-IV pressure ulcer healing. A systematic review and meta-analysis," *J. Tissue Viability*, vol. 27, no. 4, hal. 274–284, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jtv.2018.08.003.
- [30] A. Zulbaran-Rojas dkk., "Home-based electrical stimulation to accelerate wound healing—A double-blinded randomized control trial," *J. Diabetes Sci. Technol.*, vol. 17, no. 1, hal. 15–24, Jan. 2023, doi: 10.1177/19322968211035128.
- [31] M. Li dkk., "Toward controlled electrical stimulation for wound healing based on a precision layered skin model," *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 3, no. 12, hal. 8901–8910, Nov. 2020, doi: 10.1021/acsabm.0c01190.
- [32] C. Han dkk., "Accelerated skin wound healing using flexible photovoltaic-bioelectrode electrical stimulation," *Micromachines*, vol. 13, no. 4, hal. 1–12, Apr. 2022, doi: 10.3390/mi13040561.