

Rancang Bangun Alat Bedah *Electric Cautery* Berbasis Arduino

DESIGN OF ELECTRIC CAUTERY SURGICAL INSTRUMENT BASED ON ARDUINO

M. Rifqi Muwaffaq¹, Muslihun², Muhammad Ulin Nuha ABA³.

^{1) 2) 3)} Teknik Elektromedik Polbitrada, Jl Sambiroto Raya No. 64, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Indonesia, 50276

Alamat Korespondensi: mrifqimuwaffaq@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi elektromedis mendorong terciptanya alat bedah yang lebih aman dan efisien, salah satunya *electric cautery*. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe *Electric Cautery* berbasis mikrokontroler Arduino Uno yang dilengkapi dengan *Liquid Crystal Display* (LCD) untuk menampilkan parameter arus (0–6 A) dan frekuensi (0–50 Hz) secara real-time. Metode penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D), mulai dari tahap perancangan, pembuatan *prototipe*, hingga pengujian fungsi dan uji jaringan sederhana pada jaringan ayam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat memiliki tingkat akurasi tinggi, dengan *error* relatif maksimal 3,9% pada arus dan 1,6% pada frekuensi, masih dalam batas toleransi standar IEC 60601-2-2. Uji jaringan sederhana memperlihatkan bahwa alat mampu memotong jaringan dengan baik sekaligus melakukan koagulasi sehingga area luka tetap tertutup rapi. Temuan ini menunjukkan bahwa *Electric Cautery* berbasis Arduino dengan fitur monitoring *real-time* dapat menjadi alternatif inovatif dan lebih aman dibandingkan perangkat konvensional, meskipun masih diperlukan uji klinis lanjutan dengan standar medis yang lebih ketat.

Kata Kunci: *Electric Cautery*, Arduino Uno, *Liquid Crystyal Display* (LCD), Arus, Frekuensi

Abstract

The development of electromedical technology encourages the creation of safer and more efficient surgical tools, one of which is electric cautery. This study aims to design and build an Electric Cautery prototype based on an Arduino Uno microcontroller equipped with a Liquid Crystal Display (LCD) to display current (0–6 A) and frequency (0–50 Hz) parameters in real-time. The research method uses a Research and Development (R&D) approach, starting from the design stage, prototyping, to functional testing and simple network testing on chicken tissue. The test results show that the tool has a high level of accuracy, with a maximum relative error of 3.9% in current and 1.6% in frequency, still within the tolerance limits of the IEC 60601-2-2 standard. Simple network tests show that the tool is able to cut tissue well while coagulating so that the wound area remains neatly closed. These findings indicate that Arduino-based Electric Cautery with real-time monitoring features can be an innovative and safer alternative compared to conventional devices, although further clinical trials with stricter medical standards are still needed.

Keywords: *Electric Cautery*, Arduino Uno, *Liquid Crystal Display* (LCD), current, frequency

Pendahuluan

Perkembangan teknologi kedokteran telah mendorong terciptanya berbagai inovasi alat medis yang berfungsi untuk meningkatkan efektivitas prosedur pembedahan(1). Salah satu instrumen yang banyak digunakan adalah *Electric Cautery*, yaitu perangkat bedah yang bekerja dengan prinsip konversi energi listrik menjadi energi panas untuk memotong jaringan atau menghentikan perdarahan. Panas yang dihasilkan dapat menyebabkan koagulasi protein jaringan sehingga perdarahan

berkurang dan risiko infeksi lebih rendah. Keunggulan inilah yang membuat *Electric Cautery* sering dipilih dibandingkan instrumen konvensional seperti pisau bedah(2)(3).

Meskipun efektif, sebagian besar perangkat *Electric Cautery* yang beredar masih memiliki keterbatasan, terutama dalam hal sistem monitoring. Alat umumnya tidak dilengkapi dengan fitur yang dapat menampilkan besaran arus dan frekuensi secara *real-time*. Padahal, parameter tersebut penting untuk memastikan penggunaan

daya sesuai standar serta meminimalkan risiko kerusakan jaringan akibat pemakaian arus atau frekuensi yang tidak tepat. Kurangnya sistem pemantauan menjadi salah satu faktor yang dapat menurunkan tingkat keselamatan pasien dan efektivitas prosedur.

Sejalan dengan kebutuhan tersebut, penelitian ini merancang dan membangun *Electric Cautery* berbasis mikrokontroler Arduino yang dilengkapi dengan *Liquid Crystal Display* (LCD). Penambahan fitur LCD bertujuan untuk menampilkan parameter arus dan frekuensi secara *real-time* sehingga operator dapat melakukan pemantauan dan pengaturan dengan lebih akurat. Inovasi ini diharapkan mampu meningkatkan keselamatan pasien, mengurangi risiko kesalahan penggunaan, serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan instrumen bedah yang lebih modern dan efisien.

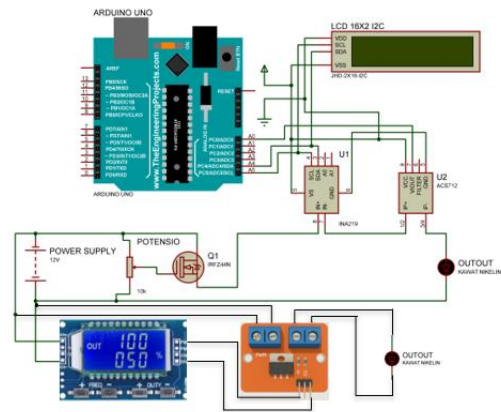
Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D), dimana penelitian ini dilakukan dengan merancang dan memodifikasi alat *Electric Cautery* dengan menambahkan komponen LCD(4). Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Bina Trada Semarang pada Maret hingga Agustus 2025. Proses penelitian diawali dengan tahap perancangan alat, yaitu memilih dan menyusun komponen utama berupa Arduino Uno adalah mikrokontroler berbasis ATmega328P yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem(5). Untuk pemantauan arus digunakan sensor INA219 yang presisi dan sensor ACS712 berbasis efek Hall(6)(7).

Secara konsep, *Electric Cautery* berbasis mikrokontroler bukan merupakan penemuan baru, karena rancangan serupa telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya yaitu Wardiyanto, 2020. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi pada aspek pengembangan sistem monitoring real-time arus dan frekuensi menggunakan kombinasi dua sensor arus (INA219 dan ACS712) yang terintegrasi dengan tampilan LCD sederhana. Selain itu, rancangan difokuskan pada efisiensi biaya dan kemudahan perakitan untuk mendukung kegiatan pembelajaran dan riset terapan di lingkungan pendidikan vokasi.

Modul Pulse Width Modulation (PWM) generator menghasilkan sinyal frekuensi tertentu(8). sementara MOSFET IRFZ44N dan IRF520 berperan sebagai saklar elektronik untuk mengatur daya(9)(10). *Power supply* menyediakan sumber tegangan, sedangkan potensiometer digunakan sebagai pengatur manual arus(11). Elemen pemanas berbahan nikelin menghasilkan

panas saat dialiri arus sehingga dapat digunakan sebagai elektroda aktif(12). Seluruh data arus dan frekuensi ditampilkan melalui LCD 16×2 dengan modul I2C yang terintegrasi dengan Arduino(13)(14). Perancangan difokuskan pada kemampuan alat untuk menampilkan arus listrik dalam rentang 0–6 A dan frekuensi 0–50 Hz secara *real-time*.



Gambar 1. Wiring Diagram Alat



Gambar 2. Desain Alat

Tahap berikutnya adalah pembuatan prototipe sesuai desain yang telah direncanakan, dengan dimensi akhir 20 × 26 × 12 cm. Prototipe dilengkapi antarmuka sederhana berupa potensiometer untuk pengaturan arus dan modul PWM generator untuk pengaturan frekuensi. Setelah perakitan selesai, dilakukan uji fungsi untuk memastikan setiap komponen bekerja sesuai rancangan. Parameter arus listrik diukur menggunakan multimeter digital VISO A830L, sedangkan frekuensi diuji menggunakan osiloskop FNIRSI. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak lima kali secara berulang untuk memperoleh data yang konsisten dan reliabel.

Meskipun demikian, penelitian ini belum mencakup perbandingan langsung dengan alat *electric cautery* komersial seperti *Valleylab* dan *Bovie*, maupun dengan prototipe sejenis dari studi

terdahulu. Hal ini menjadi salah satu keterbatasan penelitian, sehingga klaim mengenai peningkatan akurasi dan aspek keselamatan masih bersifat eksploratif. Studi lanjutan perlu dilakukan untuk mengevaluasi performa alat secara komparatif agar dapat memperkuat validitas hasil yang diperoleh.

Data hasil pengukuran kemudian dianalisis dengan cara membandingkan nilai aktual dengan nilai rancangan. Perhitungan error absolut dan error relatif digunakan untuk menilai tingkat akurasi alat, dengan batas toleransi kesalahan maksimal 10% untuk arus dan 5% untuk frekuensi berdasarkan standar IEC 60601-2-2(15).

Selain pengujian fungsional, dilakukan juga kalibrasi sensor untuk memastikan bahwa nilai arus dan frekuensi yang ditampilkan sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Kalibrasi sensor merupakan proses penyesuaian agar hasil pembacaan sensor sesuai dengan nilai acuan dari alat ukur standar. Tujuannya adalah untuk menjamin sensor bekerja dengan tingkat ketelitian yang baik, sehingga data yang ditampilkan akurat dan dapat dipercaya. Dalam penelitian ini, kalibrasi dilakukan pada sensor arus dan sensor frekuensi dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur yang lebih presisi. Pengujian dilakukan pada beberapa titik nilai yang berbeda untuk melihat kesesuaian hasil pengukuran(16).

Selisih antara hasil pembacaan sensor dan nilai acuan dihitung sebagai error absolut, sedangkan error relatif menunjukkan besar kesalahan dalam bentuk persentase. Semakin kecil nilai error, maka semakin tinggi tingkat akurasi sensor.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor bekerja stabil dan memberikan hasil pengukuran yang konsisten, sehingga sistem dapat menampilkan data arus dan frekuensi dengan akurasi yang baik. Dengan demikian, prototipe yang dihasilkan tidak hanya berfungsi dengan baik secara teknis, tetapi juga memenuhi tingkat akurasi yang dibutuhkan untuk mendukung keselamatan dan efektivitas prosedur pembedahan(17).

Melalui metode ini, *prototipe* yang dihasilkan diharapkan tidak hanya berfungsi dengan baik, tetapi juga memenuhi kriteria akurasi yang memadai untuk mendukung keselamatan dan efektivitas prosedur pembedahan.

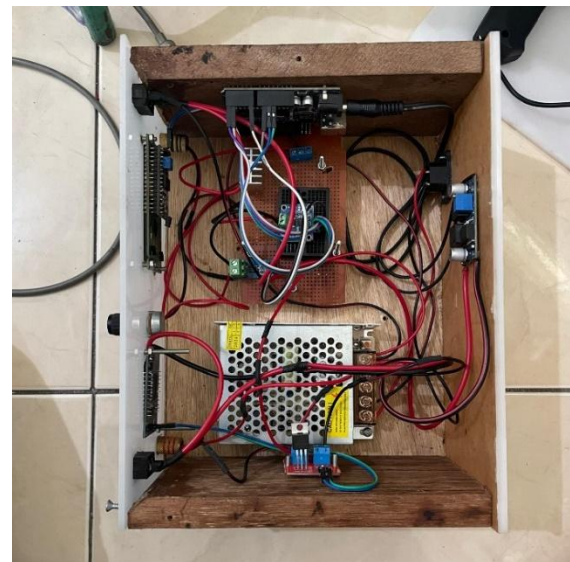
Hasil

Prototipe *Electric Cautery* yang dirancang memiliki dimensi $20 \times 26 \times 12$ cm dengan material body berbahan kayu dan akrilik. Alat ini dilengkapi LCD 16×2 sebagai tampilan monitoring

arus dan frekuensi, potensiometer sebagai pengatur arus, serta PWM generator untuk mengatur frekuensi. Pada bagian output digunakan elemen pemanas berbahan nikelin yang difungsikan sebagai elektroda aktif. Dari sisi kelistrikan, alat ini mampu bekerja dengan tegangan input 220 V dan menghasilkan keluaran arus dalam rentang 0–6 A serta frekuensi 0–50 Hz.



Gambar 3. Prototipe Alat



Gambar 4. Bagian Dalam Alat

Uji fungsi dilakukan untuk memastikan kinerja setiap komponen sesuai rancangan. Pengujian titik tegangan pada step down, MOSFET IRFZ44N, MOSFET IRF520, PWM generator, sensor INA219, sensor ACS712, serta LCD menunjukkan hasil yang sesuai dengan nilai rancangan, dengan deviasi yang sangat kecil (sekitar 4,96 V dari rancangan 5 V). Hal ini membuktikan bahwa rangkaian mampu bekerja stabil dan mendukung kinerja keseluruhan alat.

Untuk mendapatkan hasil pengujian yang maksimal, pengujian alat sebaiknya dilakukan dengan mengaktifkan mode arus atau frekuensi sesuai parameter yang akan diuji. Hal ini bertujuan

agar tegangan dan daya listrik dapat terfokus pada satu mode kerja, sehingga keluaran menjadi lebih stabil dan akurat. Jika alat dihidupkan tanpa pemilihan mode yang sesuai, distribusi tegangan dapat menyebar ke seluruh rangkaian dan mengakibatkan nilai arus atau frekuensi yang terukur menjadi tidak konsisten

Uji performa elektroda dilakukan pada jaringan ayam mati sebagai simulasi jaringan biologis untuk menilai kemampuan pemanasan dan pemotongan jaringan. Namun, pengujian ini memiliki keterbatasan karena tidak dapat merepresentasikan sepenuhnya kondisi jaringan hidup yang memiliki aliran darah, impedansi biologis, dan respons termal dinamis. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan uji kestabilan termal dan kinerja alat dalam durasi operasi yang lebih panjang (misalnya selama 1 jam penggunaan terus-menerus), guna menilai ketahanan komponen dan stabilitas suhu elektroda pada penggunaan klinis sebenarnya.

Berikut pengukuran arus dan frekuensi pada alat *Electric Cautery*

a. Pengukuran Mode Arus

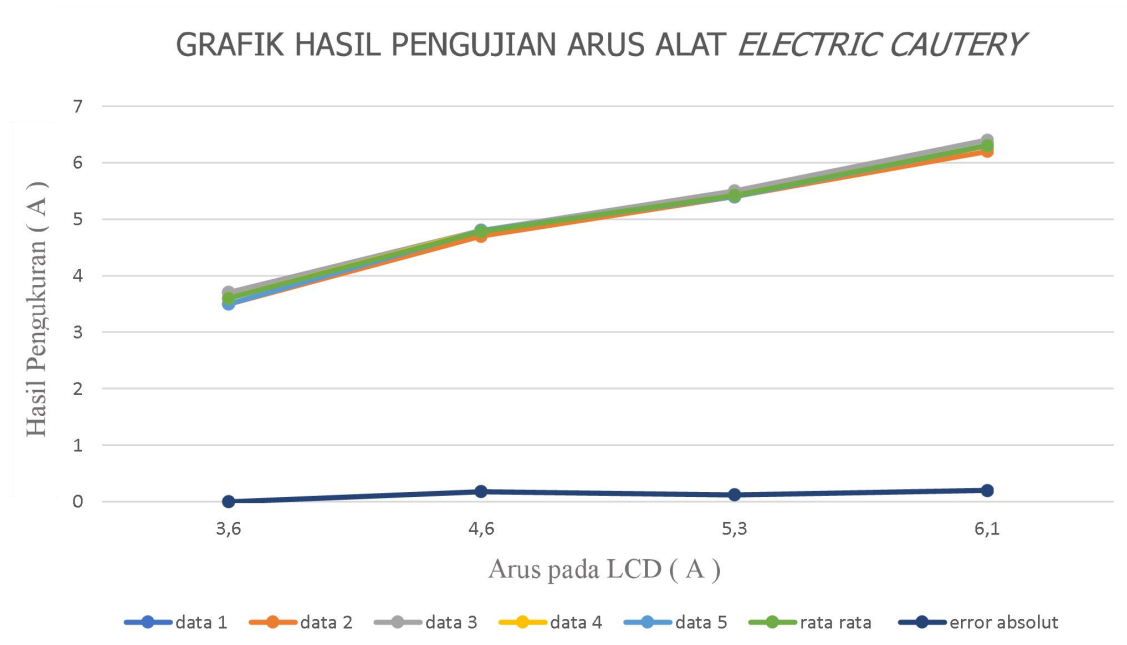
Berdasarkan data pada Tabel 1 pengukuran parameter telah dilakukan sebanyak lima kali (5x) pada setiap titik pengukuran. Diperoleh nilai yang masih berada pada nilai toleransi nilai *error*. Nilai *error* terdiri menjadi dua yaitu *error* absolut dan relatif. *Error* absolut merupakan selisih antara nilai hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya dalam satuan besaran. Dan *error* relatif adalah perbandingan antara kesalahan absolut dengan nilai sebenarnya, yang biasanya dinyatakan dalam bentuk rasio atau persen

Tabel 1. Hasil Pengukuran Mode Arus

No	Arus pada LCD (A)	Hasil Pengukuran (A)					Arus Rata – rata (A)	Arus <i>Error</i> Absolut (A)	Arus <i>Error</i> Relatif (%)
		1	2	3	4	5			
1	3,6	3,7	3,5	3,7	3,6	3,5	3,6	0	0
2	4,6	4,8	4,7	4,8	4,8	4,8	4,78	0,18	3,9
3	5,3	5,4	5,4	5,5	5,4	5,4	5,42	0,12	2,2
4	6,1	6,3	6,2	6,4	6,3	6,3	6,3	0,2	3,2

Pada pengujian parameter arus, hasil pengukuran menunjukkan bahwa prototipe mampu menghasilkan nilai arus sesuai pengaturan. Misalnya, pada setting 3,6 A didapatkan hasil rata-rata 3,6 A dengan error

0%. Pada setting 4,6 A diperoleh rata-rata 4,78 A dengan error relatif 3,9%, sedangkan pada setting 5,3 A dan 6,1 A *error* relatif yang tercatat masing-masing adalah 2,2% dan 3,2%. Seluruh nilai error berada dalam batas toleransi 10% sesuai standar IEC 60601-2-2.



Gambar 5. Grafik Pengukuran mode Arus

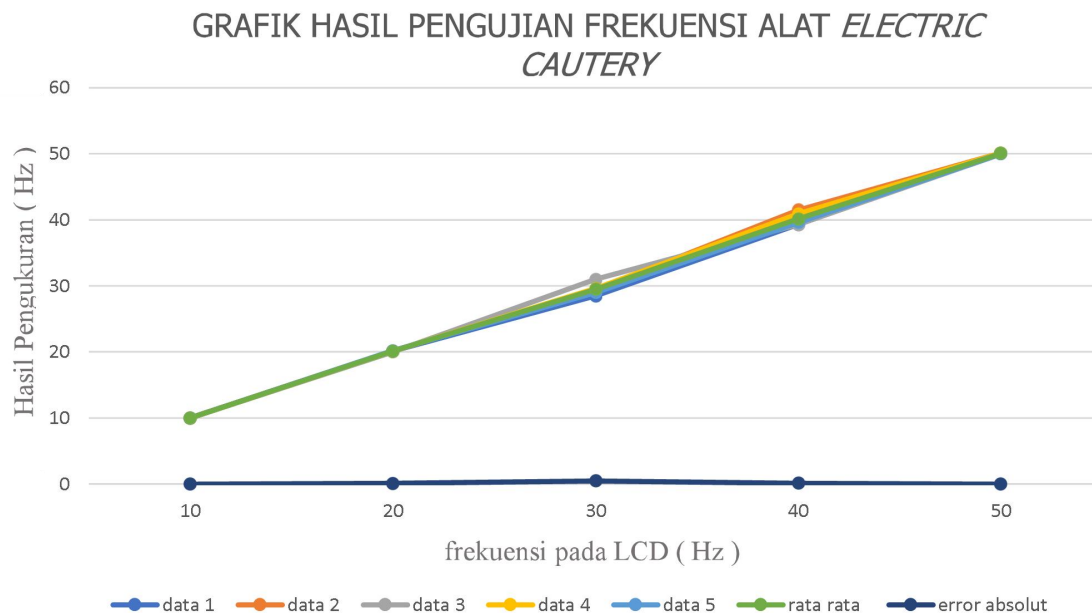
b. Pengukuran Mode Frekuensi

Tabel 2. Hasil Pengukuran Mode Frekuensi

No	Frekuensi pada LCD (Hz)	Hasil pengukuran (Hz)					Rata – rata (Hz)	<i>Error</i> Absolut (Hz)	<i>Error</i> Relatif (%)
		1	2	3	4	5			
1	10	10	10	10	10	10	10	0	0
2	20	20,1	20,1	20	20,1	20,2	20,1	0,1	0,5
3	30	28,5	29,4	31	29,6	29	29,5	0,5	1,6
4	40	39,3	41,5	39,3	40,9	39,6	40,12	0,12	0,3
5	50	50,1	50,1	50	50,1	50	50,06	0,06	0,12

Pengujian frekuensi juga menunjukkan hasil yang baik. Pada setting 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, dan 50 Hz, hasil rata-rata pengukuran berturut-turut adalah 10 Hz, 20,1 Hz, 29,5 Hz, 40,12 Hz, dan 50,06

Hz, dengan error relatif maksimum hanya 1,6%. Nilai ini jauh di bawah batas toleransi 5% sehingga membuktikan bahwa sistem pengaturan frekuensi pada alat bekerja stabil dan akurat.



Gambar 6. Grafik Hasil Pengukuran Frekuensi



Gambar 7. Pengukuran Mode Frekuensi

c. Pengujian Jaringan Ayam (Simulasi Non Klinis)

Pengujian sederhana dilakukan menggunakan jaringan daging ayam untuk mensimulasikan kondisi jaringan biologis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat *Electric Cautery* yang dirancang mampu memotong jaringan dengan baik, ditandai dengan sayatan yang halus dan terkontrol tanpa menimbulkan kerusakan jaringan di sekitar area pemotongan. Selain itu, proses pemotongan diikuti dengan

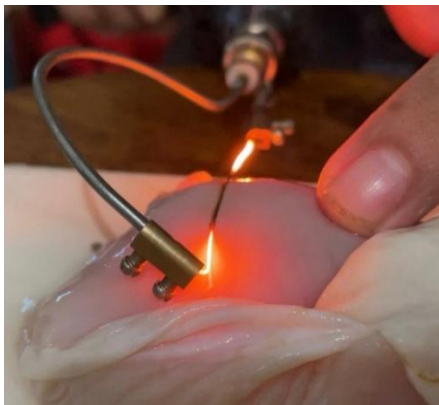
penutupan jaringan melalui koagulasi yang cukup efektif, sehingga tidak ditemukan perdarahan berlebih pada area uji. Hal ini membuktikan bahwa panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas berbahan nikelin mampu bekerja optimal sesuai dengan tujuan utama *Electric Cautery*, yaitu memotong sekaligus mengkoagulasi jaringan.



Gambar 8. Pengujian Jaringan Ayam Mode Arus



Gambar. 9 Hasil Sayatan Mode Arus



Gambar 10. Pengujian Jaringan Ayam Mode Frekuensi



Gambar 11. Hasil Sayatan Mode Frekuensi

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa prototipe *Electric Cautery* tidak hanya menunjukkan kinerja yang baik dari sisi teknis melalui pengukuran arus dan frekuensi, tetapi juga memiliki efektivitas nyata pada jaringan biologis sederhana. Hasil uji ini memberikan gambaran bahwa perangkat berpotensi digunakan pada prosedur pembedahan, meskipun masih diperlukan uji lebih lanjut dengan standar klinis yang lebih ketat untuk memastikan keamanan

dan efektivitas pada aplikasi medis yang sesungguhnya.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe *Electric Cautery* berbasis Arduino dengan LCD berhasil bekerja sesuai rancangan dan mampu menampilkan parameter arus serta frekuensi secara real-time. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa integrasi mikrokontroler dengan sistem monitoring sederhana dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan keselamatan dalam penggunaan perangkat bedah.

Pada pengujian arus listrik, nilai rata-rata hasil pengukuran berada dalam rentang toleransi error maksimal 10% sebagaimana ditetapkan dalam standar IEC 60601-2-2. Misalnya, pada setting 3,6 A alat mampu menghasilkan rata-rata 3,6 A tanpa error, sedangkan pada setting 6,1 A error relatif yang tercatat hanya 3,2%. Meskipun penelitian ini belum menyertakan analisis statistik lanjutan seperti simpangan baku (*Standard Deviation*) atau interval kepercayaan (*confidence interval*), hasil pengujian sudah cukup mewakili karakteristik kinerja alat pada tahap pengembangan (*Research and Development*). Adapun sedikit perbedaan nilai error antar pengukuran kemungkinan disebabkan oleh faktor noise listrik dan variasi impedansi beban selama proses pengujian, yang dapat memengaruhi pembacaan sensor arus. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol berbasis potensiometer dan sensor arus (INA219 dan ACS712) bekerja cukup akurat. Hasil ini mendukung temuan Wardiyanto (2020) yang juga berhasil mengembangkan *Electric Cautery* berbasis Arduino dengan pengaturan arus yang stabil untuk tindakan medis sederhana.

Pengujian frekuensi menunjukkan hasil yang bahkan lebih presisi, dengan error relatif tertinggi hanya 1,6% pada setting 30 Hz, jauh di bawah batas toleransi 5%. Stabilitas frekuensi sangat penting karena berhubungan langsung dengan mode operasi, baik cutting maupun coagulating. Frekuensi rendah biasanya digunakan untuk koagulasi, sedangkan frekuensi tinggi digunakan untuk pemotongan jaringan. Oleh karena itu, keberhasilan prototipe dalam menjaga akurasi frekuensi menegaskan bahwa perangkat ini dapat mendukung berbagai kebutuhan bedah dengan aman.

Keunggulan utama dari penelitian ini adalah adanya fitur tampilan real-time melalui LCD. Pada perangkat *Electric Cautery* konvensional, operator tidak memiliki akses langsung terhadap informasi besaran arus dan

frekuensi, sehingga pengaturan daya hanya dilakukan berdasarkan pengalaman atau perkiraan. Kondisi ini dapat menimbulkan risiko apabila daya yang digunakan tidak sesuai, seperti terjadinya kerusakan jaringan yang lebih luas, peningkatan risiko luka bakar, atau proses penyembuhan yang lebih lambat. Dengan adanya sistem monitoring, operator dapat mengontrol parameter secara presisi, yang pada akhirnya meningkatkan keselamatan pasien.

Meskipun hasil uji laboratorium menunjukkan performa yang baik, terdapat beberapa keterbatasan pada penelitian ini. Pertama, uji yang dilakukan hanya sebatas aspek teknis dan belum menyentuh ranah klinis. Uji coba pada jaringan hewan atau manusia diperlukan untuk menilai efektivitas alat dalam kondisi nyata. Kedua, sistem kontrol yang digunakan masih sederhana dan bergantung pada potensiometer manual. Ke depan, pengembangan berbasis digital control atau integrasi dengan sistem Internet of Things (IoT) dapat dilakukan untuk meningkatkan fleksibilitas dan memungkinkan dokumentasi hasil pengukuran secara otomatis.

Meskipun demikian, prototipe *Electric Cautery* berbasis mikrokontroler ini belum memenuhi seluruh standar yang disyaratkan untuk alat medis siap pakai. Prototipe masih berada pada tahap *proof of concept* untuk membuktikan prinsip kerja dan akurasi sistem monitoring arus serta frekuensi. Aspek penting seperti keamanan listrik, material sesuai standar medis, serta sertifikasi uji klinis masih perlu dikembangkan lebih lanjut.

Untuk dapat diaplikasikan di lingkungan medis, alat perlu melalui tahapan uji praklinis dan uji klinis resmi, serta dilakukan penyempurnaan desain fisik dan sistem proteksi listrik sesuai standar IEC 60601. Selain itu, pengembangan sistem kontrol digital dan integrasi data juga menjadi arah pengembangan ke depan agar alat lebih aman, efisien, dan modern.

Dari sisi material, prototipe menggunakan body kayu dan akrilik yang relatif mudah didapat dan terjangkau. Namun, untuk penerapan medis, material perlu diganti dengan bahan yang sesuai standar medis, seperti stainless steel atau polimer khusus yang tahan terhadap sterilisasi. Penggunaan material standar medis sangat penting agar alat aman digunakan di ruang operasi dan memenuhi regulasi kesehatan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang teknologi elektromedis, khususnya pada pengembangan instrumen bedah berbasis

mikrokontroler. Inovasi berupa tampilan real-time arus dan frekuensi tidak hanya meningkatkan aspek keselamatan, tetapi juga membuka peluang untuk integrasi sistem monitoring yang lebih canggih di masa depan. Dengan demikian, prototipe ini berpotensi menjadi alternatif inovatif bagi perangkat *Electric Cautery* konvensional, meskipun masih membutuhkan tahap validasi klinis lebih lanjut.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun prototipe *Electric Cautery* berbasis Arduino Uno yang dilengkapi dengan tampilan real-time arus dan frekuensi menggunakan LCD 16×2 dengan modul I2C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu bekerja pada rentang arus 0–6 A dengan error relatif maksimal 3,9% dan frekuensi 0–50 Hz dengan error relatif maksimal 1,6%. Seluruh hasil pengukuran masih berada dalam batas toleransi standar IEC 60601-2-2, sehingga dapat disimpulkan bahwa alat ini memiliki akurasi yang baik, stabil, dan aman digunakan. Uji Jaringan sederhana menggunakan daging ayam juga membuktikan bahwa *Electric Cautery* yang dirancang mampu memotong jaringan dengan baik sekaligus melakukan koagulasi sehingga jaringan tetap tertutup rapi. Dengan demikian, prototipe ini berpotensi menjadi alternatif inovatif bagi perangkat *Electric Cautery* konvensional.

Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, body alat sebaiknya diganti dari kayu dan akrilik menjadi material standar medis seperti stainless steel atau polimer khusus yang tahan sterilisasi. Uji klinis juga perlu dilakukan pada jaringan hewan hidup atau uji praklinis agar keamanan dan efektivitasnya lebih terjamin. Selain itu, sistem kontrol arus dan frekuensi sebaiknya ditingkatkan dari potensiometer manual menjadi kontrol digital atau terhubung dengan IoT untuk memudahkan monitoring. Dari sisi keamanan, penting ditambahkan proteksi arus lebih dan isolasi listrik sesuai standar ruang operasi. Desain alat juga perlu dibuat lebih kecil, ringan, dan ergonomis agar nyaman digunakan oleh tenaga medis.

Daftar Pustaka

1. Kelompok I (Putri, Livia, Masti, Hermin, Iceu C. Sekolah Ilmu Kesehatan (STIKes) Kharisma Persada, Tangerang Selatan. 2017. p. 22 halaman MAKALAH Alat Bedah. Available from:

- <https://www.scribd.com/document/388207182/MAKALAH-alat-bedah>
2. Electrocautery, Ini Kegunaan dan Prosedurnya [Internet]. Available from: <https://hellosehat.com/penyakit-kulit/kulit-lainnya/electrocautery/>
 3. Monita, S.Farm., M.Sc. A. PPUPD Ahli Madya pada Inspektorat Daerah Provinsi Sumatera Barat. 2020. p. 23 halaman Mengenal Klasifikasi, Jenis dan Regulasi Terkait Pengadaan Alat Kesehatan dalam Rangka Melakukan Pengawasan dan Mencegah Adanya Fraud/Kecurangan di Masa Pandemi COVID-19. Available from: https://inspektorat.sumbarprov.go.id/image/s/2020/09/file/MENGENAL_KLASIFIKASI%2C_JENIS_DAN_REGULASI_TERKAIT_PENGADAAN_ALAT_KESEHATAN.pdf
 4. Sugiyono. Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D). bandung: alfabeta; 2019. 773 p.
 5. Bayu, E.P.; Gurum, A.P.; Suciwati, S.W.; Supriyanto A. Heating Rate Control in Electric Furnace with SSR and K-Type Thermocouple Using Arduino Uno Atmega 328P. J Energy, Mater Instrum Technol [Internet]. 2024;4(1). Available from: https://jemit.fmipa.unila.ac.id/index.php/jurnal/article/view/117?utm_source=chatgpt.com
 6. Digital N. NN Digital. 2019. Belajar Modul INA219: Sensor Arus, Tegangan & Daya dengan Arduino.
 7. Indonesia A. ArduinoIndonesia.id. 2025. Apa Itu Current Sensor ACS712. Available from: <https://www.arduinoindonesia.id/2025/05/apa-itu-current-sensor-ac712-cara-menggunakan-dan-membacanya.html>.
 8. Malvino AP. Electronic Principles. 7 th Editi. New York: McGraw-Hill; 2007.
 9. NextPCB Documentation. NextPCB Technical Datasheet. 2020 [cited 2025 Nov 10]. IRFZ44N: MOSFET for High Current Applications. Available from: <https://www.nextpcb.com/blog/irfz44n>
 10. ElProCus. IRF520 MOSFET: Pin Configuration, Specification and Application. ElProCus Eng Journa [Internet]. 2025; Available from: <https://www.elprocus.com/irf520-mosfet>
 11. Webstudi.site [Internet]. 2019. Power Supply - Pengertian, Fungsi, Contoh Rangkaian, PC Power Supply. Available from: <https://www.webstudi.site/2019/02/Power-Supply.html>
 12. Santoso ESP. Pemilihan Bahan Pemegang Kawat Nikelin untuk Sistem Pemanas. J Teknol dan Rekayasa Mater [Internet]. 2018; Available from: <https://www.neliti.com/id/publications/272887/pemilihan-bahan-pemegang-kawat-nikelin-untuk-sistem-pemanas>
 13. Nyebarilmu.com [Internet]. 2017. Cara Mengakses Modul Display LCD 16x2. Available from: <https://www.nyebarilmu.com/cara-mengakses-modul-display-lcd-16x2/>
 14. Semiconductors N. I2C-bus Specification and User Manual [Internet]. 2021. p. 62 halaman. Available from: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
 15. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60601-2-2: Medical Electrical Equipment – Part 2-2: Particular Requirements for the Basic Safety and Essential Performance of High Frequency Surgical Equipment and High Frequency Surgical Accessories. Int Electrotech Comm [Internet]. 2017;186. Available from: <https://webstore.iec.ch/en/publication/28118>
 16. Mun, Abdul Haris Kuspranoto. Design and Implementation of a Microbacteria Incubator with Fuzzy-PID Control System. emitor [Internet]. 2025 Jul. 22 [cited 2025 Dec. 2];25(2):192-8. Available from: <https://journals2.ums.ac.id/emitor/article/view/11576>
 17. Haris Kuspranoto A, Zulkhairi, Mardhiyyah R. IOT-BASED ONLINE CONTROL SYSTEM FOR OXYGEN CYLINDER MANIFOLD WITH REAL-TIME MONITORING AND ALARM INTEGRATION. JTEMP [Internet]. 2025 Jun. 14 [cited 2025 Dec. 2];6(1):17-25. Available from: <https://journal.polbitrada.ac.id/index.php/Jtemp/article/view/118>