

Rancang Bangun Alat Elektrostimulator Portable

Dzul kifli Dalung Simamora^{1*}, Imam Tri Harsoyo², Pramesti Kusumanigntyas³

¹⁻³ Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Semarang, Indonesia

*Korespondensi penulis: dzul kiflisimamora@gmail.com¹

Abstract. An electrostimulator is a medical device designed to deliver controlled electrical stimulation to nerves and muscles, supporting rehabilitation and therapy for patients with neuromuscular disorders. This study focuses on designing and developing a portable electrostimulator that offers three distinct waveform modes: continuous wave, discontinuous wave, and dense-disperse wave, providing versatility for different therapeutic needs. The device is powered and controlled by an Arduino Mega 2560 microcontroller, coupled with a Nextion touchscreen LCD interface that allows users to adjust waveform type, frequency, and stimulation intensity with ease. Waveforms are generated through an NE555 IC circuit, with amplitude adjusted via a potentiometer and subsequently amplified using a step-up transformer to achieve therapeutic voltage levels. Functionality and performance tests were conducted using an oscilloscope, and the device was benchmarked against a commercial KWD-808 electrostimulator. Results demonstrate that the developed electrostimulator reliably produces the intended waveforms, achieving peak voltages up to 32V and frequencies ranging from 33.3 Hz to 66.6 Hz, confirming its effectiveness and feasibility for non-clinical nerve and muscle therapy applications.

Keywords: Arduino; Electrostimulator; Frequency; Nextion; Wave.

Abstrak Elektrostimulator adalah perangkat medis yang dirancang untuk memberikan stimulasi listrik terkontrol ke saraf dan otot, mendukung rehabilitasi dan terapi bagi pasien dengan gangguan neuromuskular. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengembangan elektrostimulator portabel yang menawarkan tiga mode bentuk gelombang yang berbeda: gelombang kontinu, gelombang diskontinu, dan gelombang dispersi padat, yang memberikan fleksibilitas untuk berbagai kebutuhan terapi. Perangkat ini ditenagai dan dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Mega 2560, yang dipadukan dengan antarmuka LCD layar sentuh Nextion yang memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan jenis bentuk gelombang, frekuensi, dan intensitas stimulasi dengan mudah. Bentuk gelombang dihasilkan melalui sirkuit IC NE555, dengan amplitudo yang disesuaikan melalui potensiometer dan kemudian diperkuat menggunakan transformator step-up untuk mencapai tingkat tegangan terapeutik. Uji fungsionalitas dan kinerja dilakukan menggunakan osiloskop, dan perangkat tersebut dibandingkan dengan elektrostimulator KWD-808 komersial. Hasilnya menunjukkan bahwa elektrostimulator yang dikembangkan secara andal menghasilkan bentuk gelombang yang diinginkan, mencapai tegangan puncak hingga 32V dan frekuensi berkisar antara 33,3 Hz hingga 66,6 Hz, yang mengonfirmasi efektivitas dan kelayakannya untuk aplikasi terapi saraf dan otot non-klinis.

Kata kunci: Arduino; Elektrostimulator; Frekuensi; Gelombang; Nextion.

1. LATAR BELAKANG

Elektroterapi telah menjadi salah satu metode yang umum digunakan dalam bidang medis dan fisioterapi untuk mempercepat pemulihan, mengurangi nyeri, serta memperkuat otot dan sistem saraf (Vance dkk., 2022). Salah satu alat utama dalam prosedur ini adalah elektrostimulator, yang bekerja dengan memberikan rangsangan listrik menggunakan parameter tertentu seperti bentuk gelombang, frekuensi, dan tegangan melalui elektroda yang ditempelkan pada tubuh (Sulaiman dkk., 2021). Sebagian besar perangkat elektrostimulator konvensional berukuran besar dan memerlukan sumber listrik permanen, serta pengoperasian oleh tenaga medis profesional (Maheu et al., 2022). Hal ini menjadi hambatan bagi pasien yang ingin melakukan terapi secara mandiri, terutama mereka yang tinggal di daerah dengan akses layanan kesehatan terbatas atau memiliki keterbatasan mobilitas.

Oleh karena itu, dibutuhkan pengembangan alat terapi listrik yang praktis, efisien, dan portabel (Zhang dkk., 2025). Solusi yang ditawarkan adalah elektrostimulator portabel yang memungkinkan pengguna melakukan terapi kapan saja dan di mana saja tanpa tergantung fasilitas kesehatan. Alat ini dirancang agar ringan, mudah dioperasikan tanpa bantuan tenaga medis, namun tetap memberikan performa stimulasi yang sesuai standar medis (H. Wang dkk., t.t.).

Alat ini menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai otak sistem, yang berfungsi mengatur sinyal listrik berbentuk pulsa. Arduino dipilih karena memiliki banyak pin input/output, kemampuan pemrosesan cepat, serta fleksibel dalam pengaturan berbagai parameter sinyal seperti bentuk gelombang, frekuensi, dan intensitas (Arianto & Susanto, 2024).

Untuk meningkatkan kenyamanan penggunaan, alat dilengkapi layar sentuh Nextion sebagai antarmuka. Pengguna dapat memilih mode gelombang serta mengatur parameter lainnya secara langsung melalui layar tersebut, tanpa perlu pengaturan manual yang kompleks (Barelli dkk., 2023). Sebagai sumber daya, digunakan baterai lithium isi ulang yang ringan dan memiliki kapasitas cukup besar, memungkinkan penggunaan portabel yang tahan lama tanpa ketergantungan pada listrik PLN (H. P. Wang dkk., 2017).

Dengan rancangan ini, diharapkan alat dapat menjadi solusi terapi listrik yang praktis, efisien, dan dapat digunakan oleh berbagai kalangan, baik pasien mandiri maupun tenaga medis dengan mobilitas tinggi.

2. KAJIAN TEORITIS

Elektrostimulator merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik ke jaringan otot dan saraf guna memberikan efek terapeutik. Arus listrik yang dialirkan dikendalikan berdasarkan parameter seperti bentuk gelombang, tegangan, serta frekuensi (Alshallash dkk., 2022). Penggunaan elektrostimulator telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi medis, mulai dari rehabilitasi otot, akupunktur elektrik, hingga pengurangan rasa nyeri (Marunaka dkk., 2021).

Jenis-jenis gelombang yang umum diaplikasikan dalam terapi elektrostimulasi antara lain continuous wave, discontinuous wave, dan dense-disperse wave (Uveges & Ring, 2023). Continuous wave menghasilkan stimulasi konstan tanpa jeda, sedangkan discontinuous wave memberikan stimulasi secara berkala untuk mencegah adaptasi saraf. Sementara itu, dense-disperse wave merupakan gabungan dari gelombang padat (dense) dan renggang (disperse) yang disusun secara bergantian, dengan tujuan memberikan sensasi yang lebih nyaman dan

menghindari kejenuhan stimulasi (Dyah Astuti & Destiani, 2022).

Frekuensi rangsangan juga berperan penting dalam efek terapi yang ditimbulkan. Frekuensi rendah biasanya digunakan untuk menstimulasi dan menguatkan otot (tonifikasi) (Sterne et al., 2019). sementara frekuensi tinggi digunakan untuk menghambat aktivitas saraf (sedasi) guna mengurangi nyeri. Di sisi lain (Moezy dkk., 2024), Di sisi lain, intensitas tegangan harus disesuaikan dengan karakteristik impedansi tubuh setiap individu agar stimulasi tetap efektif dan aman.

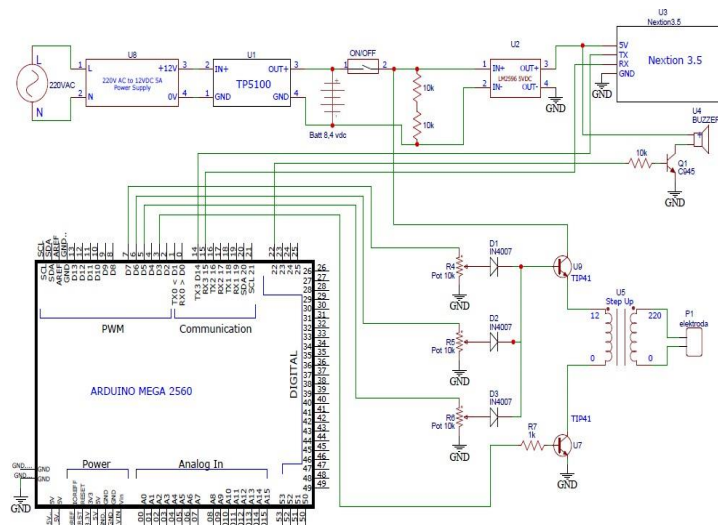
Studi juga menunjukkan bahwa penggunaan frekuensi tinggi pada titik-titik akupuntur memiliki efektivitas yang tinggi dalam mengurangi nyeri, baik akut maupun kronis. Teknik ini menjadi alternatif non-invasif yang semakin populer di kalangan fisioterapis dan praktisi rehabilitasi modern (Yamada dkk., 2025).

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, diracang alat elektrostimulator portable menggunakan Arduino mega 2560 sebagai microprosesor, dengan 3 pasang aplikator yang dapat mengeluarkan sinyal continuous, Discontinuous dan Dense-disperse. Yang dilengkapi dengan pengaturan waktu, frekuensi dan tegangan pulsa low, medium dan high. Proses perancangan meliputi perancangan hardware dan perancangan software.

Perancangan Hardware

Dalam membuat suatu alat dibutuhkan rancangan hardware berupa wiring diagram dan desain alat yang sesuai. Adapun wiring diagram tersebut terdiri dari, rangkaian LCD NEXTION, rangkaian LM2596, Rangkaian IC NE555I dan rangkaian Modul TP5100. Yang ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Wiring Alat.

Sistem ini dirancang untuk bekerja dengan sumber daya utama dari listrik AC 220V yang kemudian diubah menjadi tegangan DC 12V menggunakan modul power supply. Tegangan 12V ini kemudian didistribusikan ke beberapa komponen lainnya. Salah satunya adalah modul TP5100 yang berfungsi sebagai pengisi daya baterai Li-ion hingga 8,4V DC, dan digunakan untuk memberi suplai cadangan jika sumber utama mati.

Terdapat juga modul buck converter LM2596 yang menurunkan tegangan menjadi 5V DC, digunakan untuk memberi daya ke layar sentuh Nextion 3.5 inci yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna. Arduino Mega terhubung langsung ke layar ini melalui jalur komunikasi TX dan RX. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan buzzer sebagai indikator bunyi, dan beberapa potensiometer serta transistor penguat (TIP41 dan C945), yang kemungkinan digunakan untuk mengatur sinyal ke aktuator atau sensor seperti elektroda.

Terdapat pula dioda (IN4007) sebagai pelindung arus balik dan step-up converter yang mungkin digunakan untuk menaikkan tegangan dari output tertentu. Sistem ini secara keseluruhan didesain untuk keperluan kontrol dan monitoring, kemungkinan besar terkait aplikasi medis atau sistem kelistrikan dengan umpan balik ke pengguna melalui layar dan buzzer. Kombinasi dari pengatur daya, kendali digital, serta elemen analog menunjukkan bahwa ini adalah sistem tertanam dengan kebutuhan daya stabil dan kontrol presisi.

Dan ada pula Rangkaian astable adalah jenis rangkaian elektronik yang mampu menghasilkan sinyal pulsa atau gelombang listrik secara terus-menerus tanpa memerlukan pemicu eksternal. Rangkaian ini tidak memiliki kondisi stabil dan terus berosilasi antara logika tinggi dan logika rendah, sehingga sering digunakan sebagai osilator gelombang persegi (square wave generator).

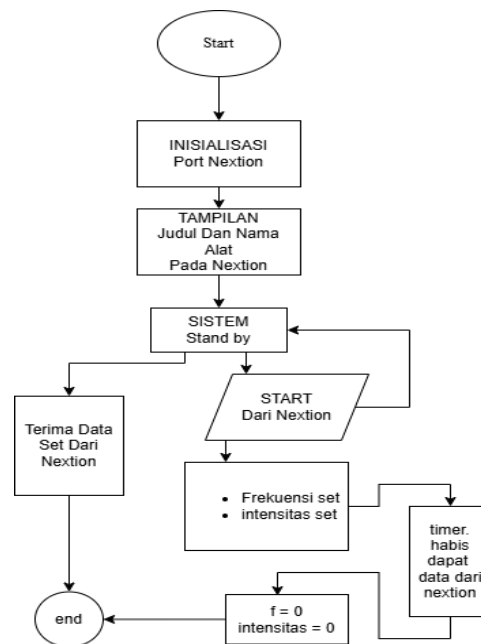
Dalam alat elektrostimulator portabel, rangkaian astable berfungsi sebagai pembentuk gelombang listrik yang digunakan untuk menstimulasi jaringan otot atau saraf melalui elektroda. Gelombang ini menjadi dasar kerja sistem, di mana frekuensi dan lebar pulsa dari sinyal dapat diatur sesuai kebutuhan terapi.

Implementasi umum dari rangkaian astable dilakukan menggunakan IC NE555, yaitu komponen multiguna yang mudah diaplikasikan untuk menghasilkan pulsa berulang. Nilai dari dua buah resistor dan satu buah kapasitor pada rangkaian ini menentukan karakteristik sinyal yang dihasilkan, seperti periode, frekuensi, dan duty cycle. Pulsa hasil keluaran dari IC NE555 ini kemudian dapat diproses lebih lanjut oleh mikrokontroler (seperti Arduino Mega 2560) untuk disesuaikan menjadi berbagai bentuk gelombang, seperti kontinu, diskontinu, dan dense-disperse.

Dengan demikian, rangkaian astable memiliki peran penting dalam sistem kerja alat, yaitu sebagai pengatur pola gelombang listrik yang menjadi stimulus utama pada proses elektrostimulasi.

Flowchart Dan Perancangan Software

Dalam membuat alat dibutuhkan rancangan software berupa aplikasi Diagram Alir Alat. Flowchart program alat dapat ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Rancangan Software Alat.

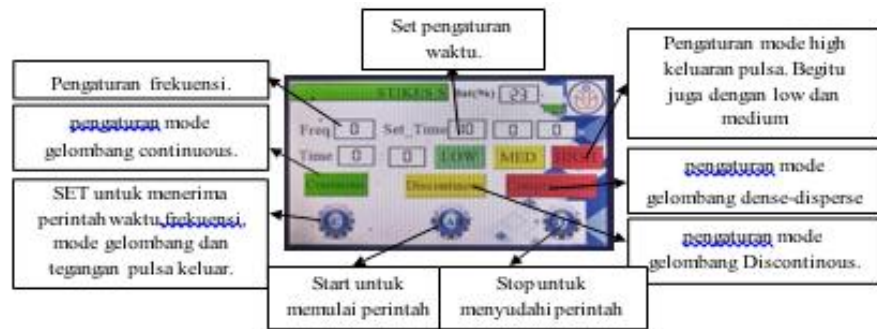
Flowchart di atas menjelaskan dari perancangan software Alat Elektrostimulator yang dimulai dengan inialisasi port nextion untuk tampilan alat. System standby untuk menerima perintah frekuensi, intensitas dan timer dari nextion, lalu setelah menerima perintah dari set data nextion dan disalurkan ke probe.

Hasil Alat dan tampilan alat Gambar 3 dibawah ini merupakan hasil rancang bangun alat elektrostimulator portable, yang dibuat. Alat menggunakan 3 pasang aplikator dengan mode input touchscreen LCD Nextio.



Gambar 3. Hasil alat.

Gambar 4. dibawah ini merupakan tampilan menu pada LCD alat. Terdapat mode pemilihan waktu, frekuensi, tegangan pulsa keluar dan mode gelombang.

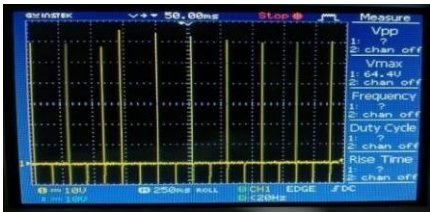


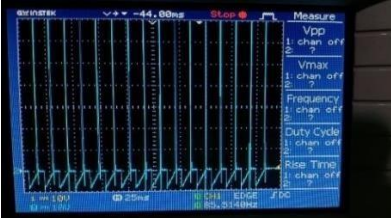
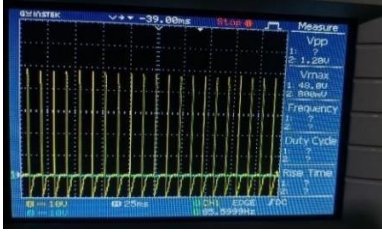
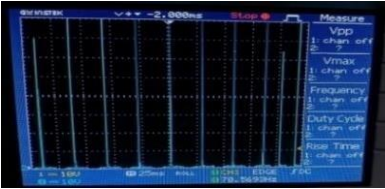
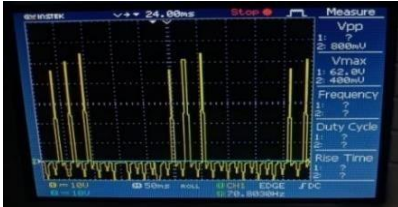
Gambar 4. Tampilan menu pada alat.

Uji Fungsi

Pada proses awal uji fungsi dari alat Elektrostimulator portable. dinyalakan lalu diatur ditampilkan LCD nextion dengan pilihan, 3 mode gelombang , frekuensi, timer dan intensitas tegangan pulsa yang terdiri dari mode low, medium dan high. Setelah itu osiloskop akan menampilkan gelombang sinyal saat probe dihubungkan ke osiloskop melalui kabel electrode dan pengujian akan dilakukan pengukuran pada 3 mode. Tabel 1. dibawah merupakan hasil uji fungsi rancang bangun alat elektrostimulator portable dengan pembandingan Elektrostimulator KWD-808 pengukuran gelombang menggunakan osiloskop. Dengan mode Continuous, Discontinuous dan Dense-Disperse.

Tabel 1. Uji Fungsi alat.

No	Alat yang Dirancang	Alat yang Dibandingkan
1	Jenis gelombang: Continuous Gambar:  Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>continuous wave</i> dari alat hasil pengukuran <i>continuous wave</i> elektrostimulator rancang bangun menggunakan dari alat elektrostimulator rancang bangun <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V dan skala waktu menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 25ms. Mendapatkan hasil Vmax: 3,2 divisi <i>vertikal</i> dan 10V dan skala waktu 25ms. Mendapatkan hasil Periode (T): 0,6 divisi <i>horizontal</i>.	Jenis gelombang: Continuous Gambar:  Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>continuous wave</i> dari alat hasil pengukuran <i>continuous wave</i> elektrostimulator rancang bangun menggunakan dari alat elektrostimulator rancang bangun <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V dan skala waktu menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 25ms. Mendapatkan hasil Vmax: 3,2 divisi <i>vertikal</i> dan 10V dan skala waktu 25ms. Mendapatkan hasil Periode (T): 0,6 divisi <i>horizontal</i>.

No	Alat yang Dirancang	Alat Pembanding
2	Jenis gelombang: Discontinuous Gambar: 	Jenis gelombang: Discontinuous Gambar: 
	Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>discontinuous wave</i> dari alat elektrostimulator rancang bangun menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V/divisi dan skala waktu 25ms/divisi. Mendapatkan hasil Vmax: 3,2 divisi <i>vertikal</i> dan Periode (T): 0,6 divisi <i>horizontal</i> .	Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>discontinuous wave</i> dari alat elektrostimulator KWD-808 menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V dan skala waktu 25ms. Mendapatkan hasil Vmax: 4,8 divisi <i>vertikal</i> dan Periode (T): 0,5 divisi <i>horizontal</i>
3	Jenis gelombang: Dense-Disperse Gambar: 	Jenis gelombang: Dense-Disperse Gambar: 
	Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>densedisperse</i> dari alat elektrostimulator rancang bangun menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V dan skala waktu 25ms. Mendapatkan hasil Vmax: 3,2 divisi <i>vertikal</i> . Periode (T) rapat 0,6 divisi dan periode (T) renggang 1,2 divisi <i>horizontal</i> .	Keterangan: hasil pengukuran gelombang <i>densedisperse</i> dari alat elektrostimulator KWD-808 menggunakan <i>osiloskop</i> dengan skala tegangan 10V dan skala waktu 50ms karena saat sinyal rapat periodenya cepat dan lama juga waktu perpindahannya ke gelombang renggang tidak konsisten. Dari pengukuran mendapatkan hasil Vmax: 4,4 divisi <i>vertikal</i> . Periode (T) rapat: 0,5 divisi dan periode (T) renggang: 3 divisi <i>horizontal</i> .

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Alat elektrostimulator portabel yang dirancang berhasil menghasilkan gelombang listrik dengan tegangan antara 5 hingga 20 volt dan frekuensi antara 50 hingga 150 Hz. Pengaturan intensitas (low, medium, high) memengaruhi frekuensi output secara linier, sesuai dengan karakteristik rangkaian *astable* menggunakan IC NE555.

Pengujian menunjukkan bahwa semua komponen bekerja sesuai fungsinya, dengan tampilan pengaturan intensitas muncul pada layar LCD. Hasil ini menunjukkan bahwa alat telah berfungsi sesuai rancangan dan dapat digunakan untuk stimulasi otot ringan. Ketidaksesuaian kecil antara frekuensi teoritis dan aktual disebabkan oleh toleransi komponen,

namun tidak memengaruhi efektivitas kerja alat secara signifikan.

Pada Table 2. Dibawah ini merupakan Hasil pengukuran gelombang Continuous wave, Discontinuous Wave dan Dense-Disperse pada Rancang bangun alat elektrostimulator portable dan pembanding KWD-808.

Table 2. Hasil pengukuran.

No	Jenis Gelombang	Alat yang dirancang		Alat pembanding	
		Vmax	F	Vmax	F
1	Continuous	32V	- 66,6Hz	64V	40Hz
2	Discontinuos	32V	- 66,6Hz	48V	80Hz
3	Dense- Disperse	32V	- 66,6Hz	48V	80Hz

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa alat elektrostimulator portabel hasil rancang bangun mampu menghasilkan tiga mode sinyal terapi otot, yaitu continuous wave, discontinuous wave, dan dense-disperse, dengan karakteristik gelombang yang mendekati alat pembanding KWD-808. Pengujian pada titik-titik distribusi daya menunjukkan bahwa seluruh komponen menerima tegangan sesuai spesifikasi datasheet, dengan persentase kesalahan pengukuran yang sangat kecil dan masih dalam batas toleransi. Selain itu, pengujian arus bocor menunjukkan nilai yang jauh di bawah ambang batas standar keamanan medis, sehingga alat dapat dinyatakan aman untuk digunakan dalam konteks non-klinis atau sebagai sarana edukasi dan eksperimen rekayasa biomedik. Meski demikian, terdapat keterbatasan pada presisi nilai amplitudo dan frekuensi sinyal, yang kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan komponen seperti modul step-up dan pengaturan PWM dari Arduino. Alat ini juga belum dilengkapi sistem proteksi lanjut atau verifikasi melalui pengujian klinis secara menyeluruh. Oleh karena itu, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat mengembangkan fitur pengaturan amplitudo dan frekuensi yang lebih presisi, serta mengintegrasikan sistem proteksi arus dan tegangan lebih lanjut. Penelitian lanjutan juga sebaiknya melibatkan pengujian terhadap populasi pengguna dalam skala terbatas guna memperoleh data empiris yang lebih representatif terhadap efektivitas dan keamanan alat dalam penggunaan sehari-hari.

DAFTAR REFERENSI

- Alshallash, K. S., Sharaf, M., Abdel-Aziz, H. F., Arif, M., Hamdy, A. E., Khalifa, S. M., Hassan, M. F., Abou Ghazala, M. M., Bondok, A., Ibrahim, M. T. S., Alharbi, K., & Elkelish, A. (2022). Postharvest physiology and biochemistry of Valencia orange after coatings with chitosan nanoparticles as edible for green mold protection under room storage conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034535>
- Arianto, E., & Susanto, D. (2024). Inovasi elektrostimulator berbasis Arduino: Solusi sederhana untuk eksperimen dan aplikasi medis. *Jurnal J-Innovation*, 13(2). <https://doi.org/10.55600/jipa.v13i2.288>
- Barelli, R. G., Avelino, V. F., & Castro, M. C. F. (2023). STIMGRASP: A home-based functional electrical stimulator for grasp restoration in daily activities. *Sensors*, 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010010>
- Dyah Astuti, S., & Destiani, R. (2022). Pemanfaatan elektrostimulator AES-5 sebagai terapi komplementer untuk meningkatkan imunitas tubuh di PT. Petro Graha Medika Klinik Satelit Kalimantan Gresik. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(1). <https://doi.org/10.29303/jpmipi.v5i1.1035>
- Maheu, E., Soriot-Thomas, S., Noel, E., Ganry, H., Lespessailles, E., & Cortet, B. (2022). Wearable transcutaneous electrical nerve stimulation (actiTENS®) is effective and safe for the treatment of knee osteoarthritis pain: A randomized controlled trial versus weak opioids. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*, 14. <https://doi.org/10.1177/1759720X211066233>
- Marunaka, Y., Yagi, K., Imagawa, N., Kobayashi, H., Murayama, M., Minamibata, A., Takanashi, Y., & Nakahari, T. (2021). Possibility of venous serum Cl⁻ concentration ([Cl⁻]_s) as a marker for human metabolic status: Correlation of [Cl⁻]_s to age, fasting blood sugar (FBS), and glycated hemoglobin (HbA1c). *International Journal of Molecular Sciences*, 22(20). <https://doi.org/10.3390/ijms222011111>
- Moezy, A., Masoudi, S., Nazari, A., & Abasi, A. (2024). A controlled randomized trial with a 12-week follow-up investigating the effects of medium-frequency neuromuscular electrical stimulation on pain, VMO thickness, and functionality in patients with knee osteoarthritis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07266-8>
- Sulaiman, N. A. Z., Ibrahim, A. A., & Mohd Zaman, M. H. (2021). A programmable transcutaneous electrical nerve stimulation device based on Arduino and remote control using a smartphone. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 8(75), 320–327. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2020.762149>
- Uveges, I., & Ring, O. (2023). HunEmBERT: A fine-tuned BERT-model for classifying sentiment and emotion in political communication. *IEEE Access*, 11, 60267–60278. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3285536>
- Vance, C. G. T., Dailey, D. L., Chimenti, R. L., Van Gorp, B. J., Crofford, L. J., & Sluka, K. A. (2022). Using TENS for pain control: Update on the state of the evidence. *Medicina*, 58(10). <https://doi.org/10.3390/medicina58101332>
- Wang, H. P., Guo, A. W., Zhou, Y. X., Xia, Y., Huang, J., Xu, C. Y., Huang, Z. H., Lü, X., & Wang, Z. G. (2017). A wireless wearable surface functional electrical stimulator.

International Journal of Electronics, 104(9), 1514–1526.
<https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1312708>

- Yamada, K., Shimizu, H., Doi, N., Harada, K., Ishizuka-Inoue, M., Yamashita, R., Takamatsu, S., Hayashi-Nishiyama, S., Okamoto, Y., & Aoyama, T. (2025). Usefulness and safety of a wearable transcutaneous electrical nerve stimulation device for promoting exercise therapy in patients with chronic knee pain: A randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 106(2), 167–176.
<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2024.08.021>
- Zhang, Y., Wang, Y., Zhao, K., Yang, M., Ye, Z., & Zhang, X. (2025). Advances in wearable and implantable devices for wireless electrical stimulation therapy. *Discover Electronics*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00046-1>