Stimulator Listrik Portabel untuk Rehabilitasi Pasca Stroke yang Terintegrasi dengan Pemantauan EMG Sistem Berbasis IoT

Sandio Dwi Pranata[1], Irmalia Suryani Faradisa[2], Alfarid Hendro Yuwono[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: [1]sandiodwipranata12@gmail.com, [2]irmalia_suryani_faradisa@lecturer.itn.ac.id, [3]alfaridhendroyuwono@lecturer.itn.ac.id

Abstract. *This study develops a portable electrical stimulator for post-stroke rehabilitation with IoT-based electromyography (EMG) monitoring. EMG data and stimulation parameters are transmitted to the ThingSpeak platform for remote monitoring. Testing results indicate that the device can generate electrical stimulation at a frequency of 9–42 Hz, complying with the IEC 60601-1 standard (<50 Hz), while accurately monitoring muscle activity. EMG monitoring results show that during muscle relaxation, the EMG values range from 0 to 20 mV, increasing to 0–90 mV when stimulation is applied, and 0–60 mV when the muscle is moved. On the ThingSpeak platform, the magnitude values range from 12 to 24 during relaxation, increase to 140 during stimulation, and reach 250 when the muscle is moved. This device has the potential to support post-stroke patient rehabilitation with effective remote monitoring.*
Keywords: *Electrical stimulator, IoT, EMG, post-stroke rehabilitation, ThingSpeak*

Abstrak. *Penelitian ini mengembangkan stimulator listrik portabel berbasis IoT untuk rehabilitasi pasca stroke dengan pemantauan elektromiografi (EMG). Data EMG dan parameter stimulasi dikirim ke platform ThingSpeak untuk pemantauan jarak jauh. Pengujian menunjukkan bahwa perangkat mampu menghasilkan stimulasi listrik dengan frekuensi 9–42 Hz, sesuai standar IEC 60601-1 (<50 Hz), serta memantau aktivitas otot secara akurat. Hasil pemantauan EMG menunjukkan bahwa saat otot relaksasi, nilai EMG berada pada 0–20 mV, meningkat menjadi 0–90 mV saat diberikan stimulasi, dan 0–60 mV saat otot digerakkan. Pada platform ThingSpeak, nilai magnitude berkisar 12–24 saat relaksasi, meningkat menjadi 140 saat distimulasi, dan mencapai 250 saat otot digerakkan. Perangkat ini berpotensi mendukung rehabilitasi pasien pasca stroke dengan pemantauan jarak jauh yang efektif.*
Kata Kunci: *Stimulator listrik, IoT, EMG, Rehabilitasi Pasca Stroke, ThingSpeak*

1. Pendahuluan

Stroke merupakan salah satu penyakit kronis yang menjadi perhatian besar di bidang kesehatan, baik secara global maupun nasional. Penyakit ini menyerang pembuluh darah di otak, sehingga mengganggu aliran darah dan oksigen yang sangat penting untuk kelangsungan fungsi otak. Ketika suplai darah ke otak terganggu, area tertentu pada otak dapat mengalami kerusakan, yang sering kali berujung pada kelumpuhan pada bagian tubuh yang dikendalikan oleh area otak tersebut. Stroke tidak hanya menjadi penyebab utama kematian, tetapi juga menjadi salah satu faktor utama kecacatan di dunia. Di Indonesia, stroke menduduki peringkat pertama sebagai penyebab kematian. Kasus stroke terus meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir, mencerminkan betapa seriusnya ancaman penyakit ini terhadap kesehatan masyarakat (Widyasari dkk., 2023). Pasca stroke, banyak pasien menghadapi berbagai tantangan fisik dan fungsional. Kelemahan otot, kekakuan sendi, gangguan keseimbangan dan koordinasi, hingga kesulitan berbicara dan menelan menjadi masalah umum yang dialami oleh pasien. Oleh karena itu, rehabilitasi menjadi aspek yang sangat penting dalam pemulihan pasien stroke. Fisioterapi menjadi salah satu komponen utama dalam program rehabilitasi pasca stroke. Dengan bantuan fisioterapis, pasien dapat meningkatkan kekuatan otot, fleksibilitas sendi, keseimbangan, serta kemampuan koordinasi motorik (Khan dkk., 2023).

Salah satu teknik yang sering digunakan dalam fisioterapi pasca stroke adalah *Electrical Muscle Stimulation* (EMS) atau stimulator listrik yang cara penggunaannya dengan memberikan

impuls listrik ke bagian tubuh dengan tujuan tertentu, seperti merangsang aktivitas otot, saraf, atau jaringan lainnya. EMS terbukti efektif dalam membantu meningkatkan kekuatan otot pasien pasca stroke (Wahyu Nasrullah, 2019). Namun, penggunaan EMS konvensional sering kali menghadapi keterbatasan. Ukurannya yang besar dan ketergantungannya pada sumber listrik membuat alat ini kurang fleksibel untuk digunakan di luar fasilitas kesehatan (Ethne L. Nussbaum et al., 2017). Di sisi lain, perkembangan teknologi telah membuka peluang baru dalam meningkatkan efektivitas rehabilitasi pasca stroke. Salah satu teknologi yang semakin berkembang adalah elektromiografi (EMG), yaitu metode untuk memantau aktivitas otot menggunakan sensor yang mampu mendeteksi sinyal listrik dari otot. Pemanfaatan EMG dalam rehabilitasi menawarkan berbagai keunggulan, terutama dalam memberikan umpan balik real-time terkait aktivitas otot pasien. Dengan data yang diperoleh dari EMG, terapis dan pasien dapat lebih mudah memantau perkembangan terapi (Gracia-Ibáñez dkk., 2024).

Penelitian mengenai elektrostimulator terus berkembang dengan berbagai fokus aplikasi dan pengembangan teknologi. (Utari dkk., 2017) melakukan simulasi alat elektrostimulator akupuntur berbasis mikrokontroler Atmega16, dengan mengamati perubahan bentuk gelombang dan pengukuran tegangan elektroda, namun belum membahas kebutuhan frekuensi terapi. (Wang dkk., 2017) meneliti stimulator listrik fungsional nirkabel yang dapat dikendalikan melalui ponsel Android untuk aplikasi stimulasi listrik fungsional pada lengan. (Hodkin dkk., 2018) mengembangkan sistem FES (*Functional Electrical Stimulation*) otomatis untuk rehabilitasi gerakan tangan pada pasien pasca-stroke atau cedera tulang belakang, menggunakan mikrokontroler Arduino dan sensor jarak.

Studi oleh (Diéguez-Pérez & Leirós-Rodríguez, 2020) efektivitas NMES (*Neuromuscular Electrical Stimulation*) untuk mengatasi disfagia pasca-stroke, dengan parameter aplikasi frekuensi 60–80 Hz, lebar *impuls* 700 µs, intensitas di atas ambang motorik, dan durasi 20–30 menit. (Lee & Kim, 2022) mengevaluasi efektivitas kombinasi latihan gaya berjalan dengan FES portabel pada pasien stroke, menggunakan frekuensi 33 Hz dan lebar pulsa 200 µs. (Barelli dkk., 2022) memperkenalkan STIMGRASP, stimulator FES portabel untuk membantu pemulihan kemampuan menggenggam pada aktivitas sehari-hari. Terakhir, (Muslihun dkk., 2023) merancang elektrostimulator berbasis Arduino Mega 2560 dengan pengaturan pulsa level *low*, *medium*, dan *high*, serta nilai frekuensi yang ditentukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan protokol stimulator listrik portabel berbasis teknologi Internet of Things (IoT) untuk pasien fisioterapi pasca stroke iskemik atau hemoragik yang menyebabkan kelemahan atau kelumpuhan pada otot lengan (hemiparesis atau hemiplegia) dan memanfaatkan pemantauan elektromiogram (EMG) sebagai bagian dari pendekatan rehabilitasi untuk mengevaluasi aktivitas otot dan menentukan tingkat stimulasi yang dibutuhkan. Saraf target terapi yaitu pada bagian *nervus radialis* atau bagian saraf yang berfungsi untuk mengontrol ekstensi siku, pergelangan tangan, dan jari. Dimana parameter keberhasilan diukur melalui peningkatan sinyal EMG, *Range of Motion* (ROM), kekuatan otot, dan kemampuan fungsional. Dibandingkan dengan sistem yang diusulkan dalam penelitian ini, perbedaan utama terletak pada fleksibilitas pengaturan parameter stimulasi dimana menggunakan frekuensi stimulasi 0-50 Hz yang dibagi menjadi 6 mode tingkat level frekuensi dan kemampuan adaptasi terhadap respons pasien melalui pemantauan EMG secara jarak jauh menggunakan mikrokontroler ESP32 dan platform IoT Thingspeak.Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap efisiensi dan keunggulan dari pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini dibandingkan dengan sistem yang telah ada.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Standar Internasional Frekuensi, Tegangan, Arus Listrik, dan Impedansi Untuk Tubuh Manusia

Standar medis internasional, seperti IEC 60601-1, memberikan panduan rinci terkait desain dan penggunaan perangkat medis berbasis stimulasi listrik, termasuk batasan aman untuk frekuensi, tegangan, dan arus. Dalam konteks rehabilitasi stroke, stimulasi listrik umumnya

menggunakan frekuensi antara 20–50 Hz. Frekuensi rendah (10–20 Hz) bermanfaat untuk mencegah kelelahan otot dan merangsang otot kecil, sementara frekuensi di atas 30 Hz dapat meningkatkan kontraksi otot yang lebih kuat. Penggunaan frekuensi di atas 100 Hz sebaiknya dihindari karena dapat menyebabkan kelelahan otot dan ketidaknyamanan pasien (Fang dkk., 2023)**.** Tegangan yang digunakan dalam stimulasi listrik berkisar antara 0–100 V dengan intensitas arus 10–50 mA, untuk memastikan keamanan dan efektivitas stimulasi. Impedansi tubuh manusia sekitar 10 kΩ menjadi acuan dalam standar IEC 60601 untuk pengujian arus bocor, yang menetapkan batas maksimum 100 µA pada kondisi normal untuk perangkat tipe BF (*Body Floating*) **(Fluke Biomedical, 2014).**

2.2 Studi Literatur Tentang Analisis Kebutuhan Frekuensi

Pada dasarnya, Stimulator listrik terdiri dari komponen utama seperti generator sinyal dan amplifier yang menghasilkan arus listrik dengan frekuensi dan tegangan tertentu untuk terapi pasien. Dalam fisioterapi, stimulator listrik terbukti efektif meningkatkan kekuatan otot, koordinasi, dan fungsi motorik pada pasien pasca stroke (Bao dkk., 2020)**.** Sistem stimulator dimulai dari sinyal yang dihasilkan oleh osilator NE555, yang memungkinkan pengaturan frekuensi dan lebar pulsa. NE555 banyak digunakan dalam aplikasi seperti pewaktuan dan pembangkitan pulsa, beroperasi dalam mode *monostable* dan *astable*. Penelitian ini menghitung frekuensi untuk memastikan rangkaian stimulator berbasis NE555 dapat menghasilkan gelombang dengan rentang frekuensi 1–50 Hz (Basri dkk., 2018)**.** Frekuensi osilasi dalam mode astabil pada NE555, dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_a + R_b)\,C} \tag{1}$$

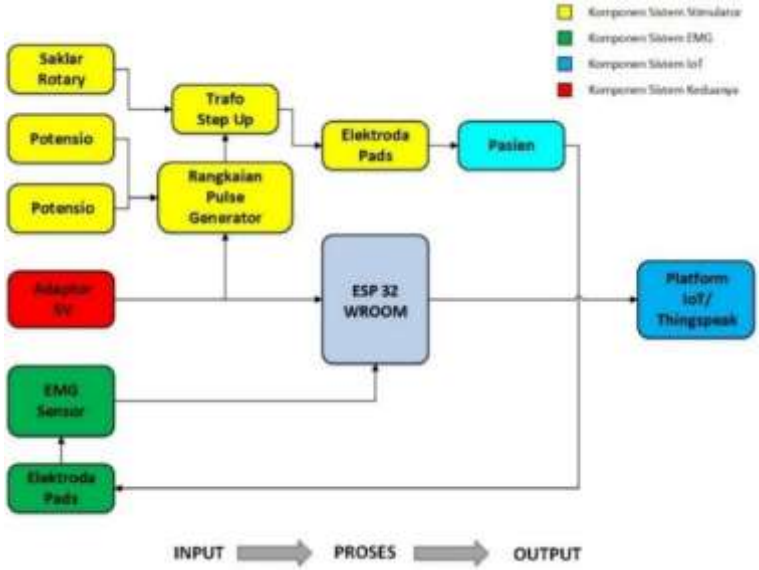
Dimana: f = frekuensi keluaran dalam *Hertz* (Hz), R_a= resistor antara pin 7 (*discharge*) dan VCC (Ω), R_b= resistor antara pin 7 (*discharge*) dan pin 6 (*threshold*) serta pin 2 (*trigger*) (Ω), C = kapasitor yang terhubung antara pin 6/2 dan *ground* (F).

3. Metode Penelitian

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai blok diagram sistem, skema rangkaian dan perancangan sistem.

3.1 Blok Diagram Sistem

Pada gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem yang bertujuan untuk menjelaskan gambaran skema alur rangkaian keseluruhan sistem.



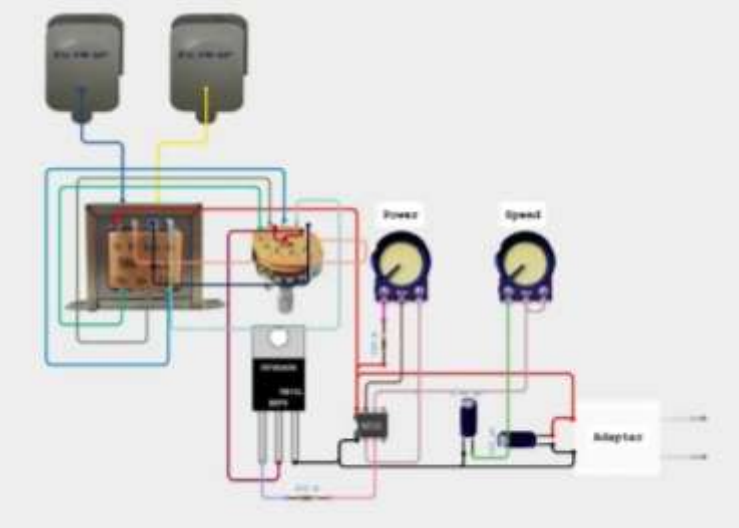
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

 ISSN: 2579-566X (Online)
ISSN: 2477-5274 (Print)

Pada blok diagram sistem ini terdapat beberapa komponen diantaranya yaitu, Adaptor 5V sebagai sumber utama untuk menyuplai energi ke seluruh rangkaian. Transformator step up untuk menaikkan tegangan dari 5V sesuai kebutuhan stimulasi elektroda. Rangkaian pulsa generator berbasis IC NE555 untuk menghasilkan sinyal pulsa guna mengendalikan intensitas stimulasi listrik, potensio digunakan untuk mengatur intensitas pulsa, sementara saklar rotari memungkinkan pemilihan mode stimulasi (blok warna kuning). Pada sistem EMG, terdiri dari sensor EMG (AD8232) untuk memonitor aktivitas otot pasien, yang kemudian dianalisis oleh ESP32 (blok warna hijau). Data EMG digunakan untuk menyesuaikan parameter stimulasi listrik berdasarkan respons otot. Mikrokontroler ESP32 bertugas memproses data dari sensor EMG dan mengontrol stimulator listrik. ESP32 juga menghubungkan perangkat ke platform IoT (ThingSpeak) untuk pemantauan data secara jarak jauh (blok warna biru).

3.2 Skematik Sistem Stimulator

Gambar 2 merupakan wiring rangkaian dari stimulator yang menggunakan beberapa komponen utama seperti transformator, MOSFET IRF9540N, saklar rotary, potensiometer, NE555, kapasitor, dan adaptor.

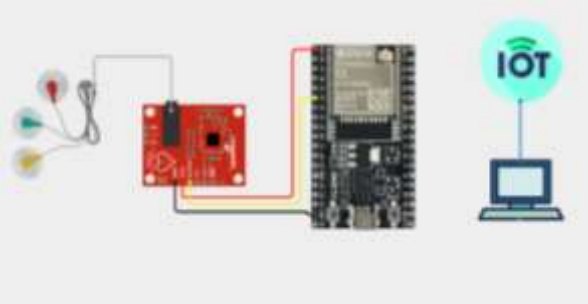


Gambar 2. Skematik Sistem Stimulator

Rangkaian ini mendapatkan daya dari adaptor yang terhubung ke kapasitor, yang berfungsi sebagai filter untuk menstabilkan tegangan. IC NE555 digunakan sebagai generator pulsa PWM untuk mengontrol MOSFET IRF9540N, yang bertindak sebagai saklar elektronik untuk mengatur daya ke elektroda berdasarkan sinyal PWM. Saklar rotari memungkinkan pemilihan mode stimulasi atau penyesuaian level tegangan keluaran. Potensiometer pertama mengatur intensitas stimulasi, sedangkan potensiometer kedua digunakan untuk mengatur frekuensi pulsa. Transformator menaikkan atau menurunkan tegangan sebelum dialirkan ke elektroda yang ditempatkan pada tubuh pengguna.

3.3 Skematik Sistem EMG

Gambar 3 menunjukkan wiring rangkaian sistem pemantauan sinyal elektromiogram (EMG) berbasis IoT menggunakan sensor EMG (AD8232), ESP32, dan koneksi ke cloud. EMG Sensor AD8232 akan menggunakan 3 pin, 1 pin 3.3v, 1 pin GND, dan 1 pin output. Pin 3.3v sensor AD8232 akan terhubung dengan pin 3.3v ESP32, pin GND akan terhubung ke pin GND ESP32, pin output untuk mengirim data pembacaan sensor dan akan terhubung ke pin GPIO35 pada ESP32.



Gambar 3. Skematik Sistem EMG

Probe elektroda terhubung ke sensor EMG AD8232 melalui *jack connector* yang sudah tersedia. *Probe* elektroda warna merah (Aktif / *Signal* + / *Input* +) yang menangkap sinyal listrik utama dari otot. *Probe* elektroda kuning (*Reference* / *Signal* - / *Input* - / *Differential Input*), elektroda diferensial, bekerja bersama dengan elektroda merah untuk menangkap beda potensial, dipasang di dekat elektroda merah pada otot yang sama untuk meningkatkan akurasi pembacaan sinyal. *Probe* elektroda hijau (*Ground / Reference / Common / Neutral*), berfungsi sebagai *ground* untuk mengurangi *noise* dan interferensi pada sinyal, dipasang di area tubuh yang tidak berkontraksi, seperti tulang atau bagian otot yang lebih netral. ESP32 mikrokontroler digunakan untuk memproses dan mengirim data ke *cloud* untuk pemantauan jarak jauh.

3.4 Metode Pengambilan Data dan Kalibrasi Sensor

Agar sistem dapat digunakan secara optimal dalam rehabilitasi, metode pengambilan data dan kalibrasi sensor dilakukan sebagai berikut:

(1) Ukuran Sampel & Kriteria Pemilihan: Uji coba dilakukan pada 3 sampel pasien dengan tingkat kelemahan otot berbeda setelah melakukan aktivitas; Rentang usia sampel adalah 20-25 tahun, tanpa komplikasi kesehatan lain yang mengganggu stimulasi listrik; Subjek dipilih berdasarkan rekomendasi peneliti sebelum diterapkan langsung pada pasien stroke.

(2) Proses Kalibrasi Sensor EMG: Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan output sensor berupa parameter grafik dari serial ploter arduino ide dengan parameter ThinkSpeak; Setiap pasien menjalani 3 kali pengukuran berulang untuk memastikan stabilitas dan akurasi sinyal.

3.5 Potensi Adopsi Klinis & Penggunaan

Untuk memastikan implementasi perangkat ini dapat diterapkan dalam dunia klinis, aspek berikut perlu dipertimbangkan:

(1) Potensi Adopsi di Pusat Rehabilitasi:
Dapat digunakan di klinik fisioterapi dengan biaya lebih rendah dibandingkan alat EMG konvensional; Memungkinkan rehabilitasi berbasis rumah dengan pemantauan jarak jauh oleh dokter/fisioterapis melalui IoT.

(2) Kegunaan & Kenyamanan bagi Pasien:
Elektroda yang digunakan berbasis permukaan, sehingga tidak invasif dan nyaman digunakan; Sistem berbasis baterai yang dapat diisi ulang, memungkinkan penggunaan tanpa harus terus terhubung ke Listrik; Antarmuka pengguna sederhana, memungkinkan pasien mengontrol perangkat dengan mudah.

3.6 Batasan dan Pengembangan di Masa Depan

Beberapa batasan sistem yang perlu diperbaiki dalam pengembangan selanjutnya:

(1) Ketepatan Pembacaan EMG: Saat ini sistem masih rentan terhadap noise eksternal, perlu peningkatan dalam algoritma pemrosesan sinyal.

(2) (2) Keterbatasan pengujian klinis: Studi masih terbatas pada uji coba sampel pasien normal, diperlukan penelitian lebih lanjut dengan sampel pasien penderita stroke.
(3) Interoperabilitas dengan perangkat medis lain: Belum ada integrasi dengan alat bantu rehabilitasi lain.

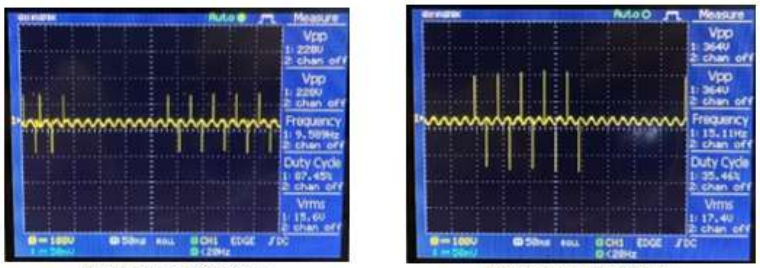
Sebagai langkah lanjutan, penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas terapi pasca stroke dan memperluas cakupan penggunaannya di fasilitas kesehatan.

4. Hasil dan Pembahasan

Pembahasan difokuskan pada analisis kinerja perangkat dalam memenuhi kebutuhan terapi, termasuk pengujian frekuensi yang sesuai, serta monitoring keadaan otot menggunakan parameter serial ploter Arduino ide dan Thinkspeak.

4.1 Hasil Pengujian Keluaran Gelombang dan Besarnya Nilai Frekuensi Stimulator Listrik

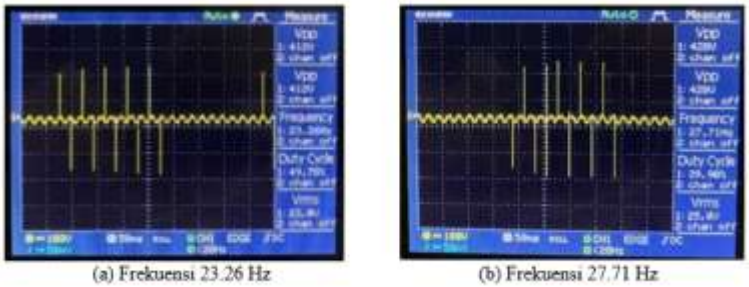
Dalam mengetahui pengukuran pada output elektrostimulator untuk melihat bentuk keluaran gelombang dan besarnya nilai frekuensi yang dihasilkan oleh pulse generator dengan menggunakan *osiloscope*. Frekuensi dari uji coba ini menggunakan frekuensi rendah kurang dari 100Hz. Besaran frekuensinya antara lain 9Hz, 15Hz, 23 Hz, 27 Hz, 31 Hz, dan 42 Hz. Sehingga memenuhi standar frekuensi IEC 60601-1 yang diadopsi.



(a) Frekuensi 9.589 Hz (b) Frekuensi 15.11 Hz

Gambar 4. Tampilan Gelombang Frekuensi 9 Hz dan 15 Hz Pada Osiloscope

Gambar 4 bagian (a) menunjukkan hasil tangkapan layar osiloskop frekuensi 9.589 Hz, frekuensi ini masuk dalam kategori frekuensi rendah, yang sering ditemukan dalam sinyal biologis. Dengan duty cycle 87.45%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi ON dibandingkan OFF dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 15.6V dan tegangan vpp nya mencapai 228V. Sedangkan gambar 8 bagian (b) untuk frekuensi 15.11 Hz, frekuensi ini juga masuk dalam kategori frekuensi rendah. Dengan duty cycle 35.46%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi OFF dibandingkan ON dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 17.4V dan tegangan vpp nya mencapai 364V.

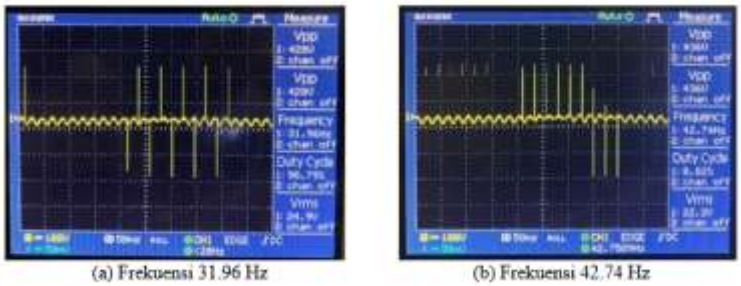


(a) Frekuensi 23.26 Hz (b) Frekuensi 27.71 Hz

Gambar 5. Tampilan Gelombang Frekuensi 23 Hz dan 27 Hz Pada Osiloscope

Gambar 5 bagian (a) menunjukkan hasil tangkapan layar osiloskop frekuensi 23.26 Hz, frekuensi ini masuk dalam kategori frekuensi rendah, yang sering ditemukan dalam sinyal biologis. Dengan duty cycle 49.78%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi OFF dibandingkan ON dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 23V dan tegangan vpp nya

mencapai 412V. Sedangkan pada gambar 5 bagian (b) untuk frekuensi 27.71 Hz, frekuensi ini juga masuk dalam kategori frekuensi rendah. Dengan duty cycle 39.90%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi OFF dibandingkan ON dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 25V dan tegangan vpp nya mencapai 428V.



(a) Frekuensi 31.96 Hz (b) Frekuensi 42.74 Hz

Gambar 6. Tampilan Gelombang Frekuensi 231 Hz dan 42 Hz Pada Osiloscope

Gambar 6 bagian (a) menunjukkan hasil tangkapan layar osiloskop frekuensi 31.96 Hz, frekuensi ini masuk dalam kategori frekuensi rendah, yang sering ditemukan dalam sinyal biologis. Dengan duty cycle 98.79%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi ON dibandingkan OFF dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 24.9V dan tegangan vpp nya mencapai 428V. Sedangkan pada gambar 6 bagian (b) untuk frekuensi 42.74 Hz, frekuensi ini juga masuk dalam kategori frekuensi rendah. Dengan duty cycle 0.82%, sinyal lebih banyak berada dalam kondisi OFF dibandingkan ON dalam satu siklus. Untuk tegangan vrms nya di 22.2V dan tegangan vpp nya mencapai 436V.

Pada hasil pengujian alat dengan variasi frekuensi 9 Hz, 15 Hz, 23 Hz, 27 Hz, 31 Hz, dan 42 Hz menggunakan *oscilloscope* didapatkan hasil seperti pad tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Berbagai Frekuensi Menggunakan Oscilloscpe

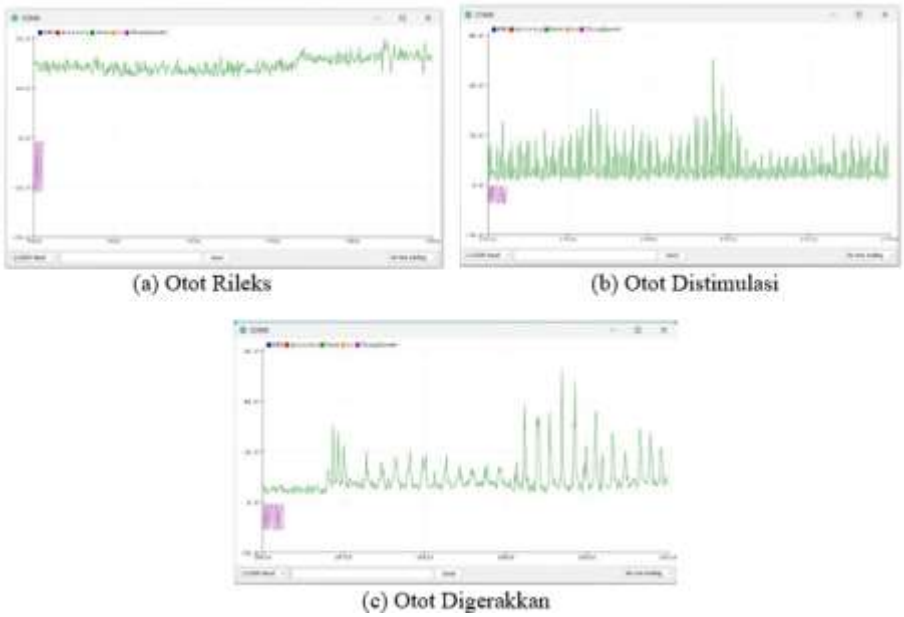
Frekuensi Asli	Frekuensi Pada Osciloscope	Perbandingan
9 Hz	9.589 Hz	6.54%
15 Hz	15.11 Hz	0.73%
23 Hz	23.26 Hz	1.13%
27 Hz	27.71 Hz	2.63%
31 Hz	31.96 Hz	3.10%
42 Hz	42.74 Hz	1.76%

Dari hasil ini, terlihat bahwa variasi terbesar terjadi pada frekuensi 9 Hz dengan perbedaan 6.54%, sedangkan variasi terkecil pada 15 Hz dengan perbedaan 0.73%.

4.2 Hasil Pengujian Monitoring EMG Serial Ploter Arduino IDE

Pada monitoring ini akan ditampilkan sebuah grafik dimana sumbu X yang merepresentasikan waktu dalam satuan detik atau siklus pembacaan data, dan sumbu Y yang menunjukkan nilai aktivitas sinyal EMG dalam mV atau unit relatif tergantung pada skala, grafik berwarna hijau menggambarkan aktivitas sinyal EMG yang terdeteksi dari otot, sementara grafik berwarna ungu menunjukkan indikasi data yang dikirim ke ThingSpeak.

 ISSN: 2579-566X (Online)
ISSN: 2477-5274 (Print)



Gambar 7. Hasil Serial Ploter Arduino IDE Monitoring Otot Ketika Rileks (a), Distimulasi Listrik (b), dan Digerakkan (c)

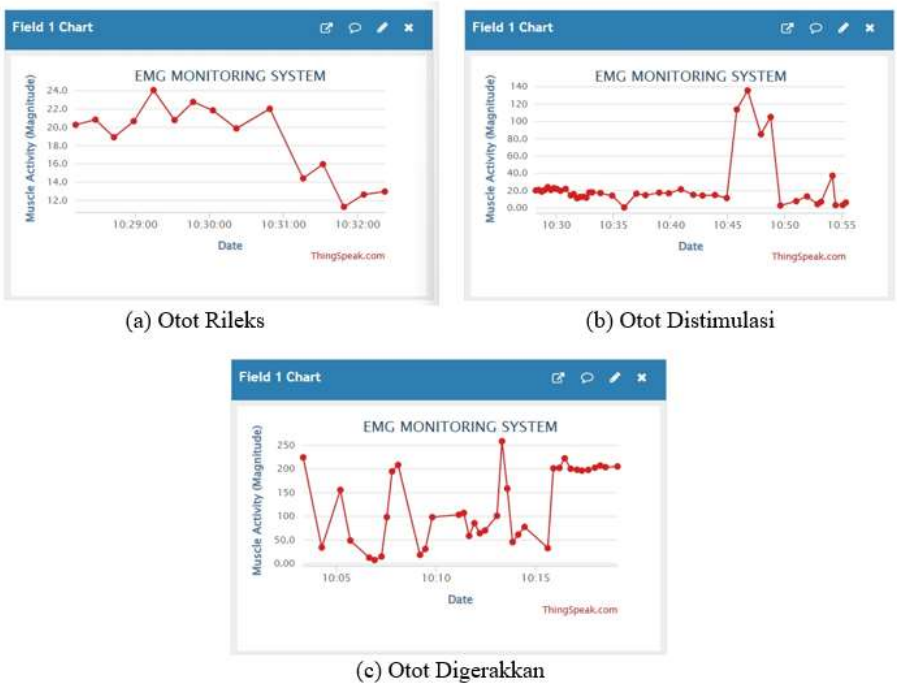
(1) Hasil Monitoring Otot Ketika Rileks
Pada gambar 5 bagian (a) pola sinyal EMG terlihat dengan gelombang kecil skala parameter di 0-20 mV yang mungkin disebabkan oleh noise atau tidak adanya aktivitas otot yang signifikan, serta menunjukkan sinyal baseline saat otot dalam kondisi rileks, di mana beberapa puncak sinyal yang lebih tinggi menandakan peningkatan aktivitas listrik otot.

(2) Hasil Monitoring Otot Ketika Distimulasi Listrik
Gambar 5 bagian (b) menunjukkan bahwa pada awal grafik amplitudo sinyal kecil, menunjukkan bahwa otot dalam keadaan relaksasi sebelum stimulasi listrik diberikan. Tidak ada kontraksi yang signifikan pada otot. Pada bagian tengah setelah stimulasi listrik diberikan skala parameter di 0-90 mV, terjadi lonjakan amplitudo yang cukup besar, menunjukkan adanya kontraksi otot yang kuat. Lonjakan ini mencerminkan respon otot terhadap impuls listrik yang merangsang otot untuk berkontraksi. Terdapat pola fluktuasi intensitas yang menunjukkan stimulus listrik periodik. Pada bagian akhir setelah beberapa waktu, sinyal kembali berkurang tetapi masih memiliki fluktuasi kecil. Ini menunjukkan bahwa kontraksi otot mulai melemah, kemungkinan karena stimulus dihentikan atau otot mengalami kelelahan.

(3) Hasil Monitoring Otot Ketika Digerakkan
Pada gambar 5 bagian (c) bagian datar pada beberapa bagian grafik, nilai EMG berada dekat 0 mV atau sangat rendah, menunjukkan bahwa otot dalam keadaan rileks tanpa kontraksi aktif. Puncak-Puncak Sinyal parameter skala di 0-60 mV, terlihat lonjakan periodik pada grafik yang menandakan kontraksi otot. Setiap puncak terjadi saat otot berkontraksi atau bergerak. Pola berulang, lonjakan EMG yang muncul secara berkala menunjukkan bahwa subjek melakukan gerakan otot secara berulang dengan jeda di antara kontraksi. Pola ini sesuai dengan aktivitas seperti mengepal dan melepaskan tangan, atau menegangkan dan merilekskan otot secara bergantian.

4.3 Hasil Pengujian Monitoring EMG Thingspeak

Pada monitoring ini ditampilkan grafik dimana sumbu X yang menunjukkan waktu pengambilan data dalam forma jam: menit: detik, dan sumbu Y yang merepresentasikan besaran aktivitas otot yang terdeteksi dalam satuan relatif, dengan titik merah menggambarkan nilai aktivitas otot pada setiap waktu tertentu.



Gambar 8. Hasil Thingspeak Monitoring Otot Ketika Rileks (a), Distimulasi Listrik (b), dan Digerakkan (c)

(1) Hasil Monitoring Otot Ketika Rileks

Gambar 8 bagian (a) menunjukkan pola perubahan sinyal EMG ketika otot rileks: Rentang waktu (10:29:00 - 10:30:00) terlihat peningkatan aktivitas otot dengan fluktuasi, di mana puncak tertinggi mencapai sekitar 22-24 *magnitude*, menunjukkan adanya kontraksi otot yang signifikan. Variasi sinyal mengindikasikan perubahan aktivitas otot, kemungkinan akibat gerakan atau perubahan intensitas kontraksi. Rentang waktu (10:30:00 - 10:31:30) aktivitas otot masih menunjukkan fluktuasi namun cenderung stabil dalam kisaran 18-22 *magnitude*, menandakan bahwa otot dalam kondisi aktif tanpa perubahan drastis. Rentang waktu setelah (10:31:30) terjadi penurunan drastis hingga mencapai nilai sekitar 12 *magnitude*, menandakan bahwa otot mulai relaksasi atau pengguna berhenti melakukan gerakan *intens*.

(2) Hasil Monitoring Otot Ketika Distimulasi Listrik

Gambar 8 bagian (b) menunjukkan pola perubahan sinyal EMG ketika otot diberi stimulus listrik: Periode Awal (10:30 - 10:44) Pada awal grafik, nilai EMG relatif rendah dan stabil, menunjukkan otot dalam kondisi relaksasi tanpa kontraksi signifikan. Variasi kecil dalam sinyal bisa disebabkan oleh aktivitas otot minor atau *noise* dari sensor. Periode Tengah (10:45 - 10:50) Terjadi lonjakan besar dalam aktivitas EMG, mencapai lebih dari 140 dalam skala magnitude. Lonjakan ini menunjukkan kontraksi otot yang kuat akibat stimulasi listrik. Beberapa puncak menunjukkan bahwa stimulasi diberikan secara periodik atau bertahap meningkat dalam intensitas. Periode Akhir (10:50 - 10:55) Setelah 10:50, aktivitas EMG tiba-tiba menurun drastis, menunjukkan bahwa stimulasi listrik dihentikan atau intensitasnya

dikurangi. Terdapat beberapa lonjakan kecil setelahnya, yang bisa disebabkan oleh aktivitas otot residual atau gerakan kecil setelah stimulasi.

(3) Hasil Monitoring Otot Ketika Digerakkan

Gambar 8 bagian (c) menunjukkan pola perubahan sinyal EMG ketika digerakkan: Periode awal (10:04 - 10:06) gerak & rileks berulang, fluktuasi tajam, menandakan kontraksi dan relaksasi otot secara cepat dimana lonjakan mencapai 250 magnitude. Periode tengah (10:06 - 10:09) relaksasi dominan, nilai EMG lebih rendah, menunjukkan otot dalam keadaan lebih rileks di rentang 50 *magnitude*. (10:09 - 10:11) gerakan berulang, aktivitas EMG meningkat, menunjukkan otot mulai aktif kembali mencapai 200 *magnitude*. (10:11 - 10:13) relaksasi & gerakan ringan, ada sedikit fluktuasi, tetapi tidak terlalu signifikan. Periode akhir (10:13 - 10:16) kontraksi kuat, Lonjakan tajam pada amplitudo EMG menunjukkan adanya aktivitas otot yang lebih kuat kembali melonjak di 250 *magnitude*, (10:16 - 10:18) stabilitas otot, aktivitas EMG lebih stabil, kemungkinan karena otot mulai beradaptasi atau mengalami kelelahan.

4.4 Analisis Pengaruh Frekuensi Terhadap Kinerja Alat atau Stimulator Listrik

Pengaruh frekuensi sangat penting terhadap kinerja alat atau stimulator listrik karena frekuensi menentukan bagaimana impuls listrik diterima oleh tubuh dan bagaimana respons fisiologis yang dihasilkan. Berikut ini adalah analisis pengaruh frekuensi terhadap kinerja alat berdasarkan hasil pengujian pada frekuensi 9 Hz, 15 Hz, 23 Hz, 27 Hz, 31 Hz, dan 42 Hz.

1) Efektivitas Stimulasi

Frekuensi 9-15 Hz lebih cocok untuk merangsang relaksasi otot dan mengurangi nyeri kronis. Frekuensi 23-31 Hz meningkatkan kontraksi otot dan stimulasi saraf, yang berguna dalam rehabilitasi neuromuskular. Frekuensi 42 Hz lebih efektif untuk mengatasi nyeri akut tetapi bisa menyebabkan kelelahan otot lebih cepat.

2) Respon Saraf dan Otot

Saraf dan otot memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap frekuensi. Frekuensi rendah sering kali merangsang serabut saraf tipe C (tidak bermielin (unmyelinated), sehingga menghantarkan impuls lebih lambat dibandingkan serabut tipe A) yang berhubungan dengan sensasi nyeri, sedangkan frekuensi lebih tinggi dapat mengaktifkan serabut saraf tipe A (serabut yang terbungkus mielin (myelinated), sehingga memiliki konduksi impuls yang cepat) yang bertanggung jawab atas kontraksi otot.

3) Efek Samping dan Keamanan

Penggunaan frekuensi yang tidak sesuai dapat menyebabkan efek samping seperti kesemutan berlebihan, kram otot, iritasi kulit, atau bahkan gangguan ritme jantung jika diterapkan pada pasien dengan kondisi tertentu.

Karena itu, dalam desain dan penggunaan alat stimulator listrik, penyesuaian frekuensi harus dilakukan berdasarkan tujuan terapi, kondisi pasien, dan respons fisiologis yang diinginkan.

5. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan stimulator listrik portabel berbasis IoT yang terintegrasi dengan pemantauan EMG sebagai bagian dari rehabilitasi pasien stroke. Sistem ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan perangkat EMS konvensional melalui portabilitas dan kemampuan pemantauan jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rangkaian stimulator yang dirancang mampu menghasilkan frekuensi yang sesuai dengan standar medis internasional (IEC 60601-1), yaitu di bawah 50 Hz. Pengujian menunjukkan variasi frekuensi keluaran pada ± 9Hz, ± 15Hz, ± 23 Hz, ± 27 Hz, ± 31 Hz, dan ± 42 Hz. Integrasi dengan sensor EMG dan platform IoT (*ThingSpeak*) memungkinkan pemantauan aktivitas otot pasien secara *real-time*, yang juga divisualisasikan melalui serial plotter Arduino. Data EMG dan parameter stimulasi dikumpulkan

dan dipantau dari jarak jauh melalui platform ThingSpeak, memungkinkan evaluasi kemajuan rehabilitasi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi rehabilitasi yang lebih efektif dan mudah diakses, terutama bagi pasien yang kesulitan menjangkau fasilitas kesehatan secara rutin.

Untuk mengevaluasi keunggulan atau kekurangan sistem yang dikembangkan kedepannya peneliti menyarankan perbaikan:

(1) Desain perangkat yang lebih kompak dan ergonomis. Desain yang lebih kecil dan ringan perlu dipertimbangkan agar lebih nyaman digunakan oleh pasien dengan mobilitas terbatas.

(2) Sistem belum ditenagai baterai, karena keterbatasan waktu penelitian dan eror alat.

(3) Sistem belum menjadi satu interface sehingga bisa dikembangkan lagi.

(4) ThingSpeak kurang ideal untuk real-time monitoring EMG karena batasan interval pengiriman data (minimum 15 detik antara setiap pengiriman data, sedangkan Electromyography (EMG) adalah teknik untuk merekam aktivitas listrik otot yang terjadi dalam waktu milidetik (ms). Untuk penelitian lebih lanjut yang membutuhkan high-speed data logging, sebaiknya menggunakan platform lain seperti MQTT, WebSockets, atau Firebase yang dapat menangani data dalam hitungan milidetik.

(5) Integrasi dengan Sistem Kesehatan Digital, Platform IoT dapat diperluas untuk terhubung dengan aplikasi kesehatan lainnya, seperti rekam medis elektronik, sehingga data pasien dapat dianalisis secara benar.

Referensi

Bao, S., Khan, A., Song, R., & Kai-yu Tong, R. (2020). Rewiring the Lesioned Brain: Electrical Stimulation for Post-Stroke Motor Restoration. *Journal of Stroke*, *22*(1), 47–63. https://doi.org/10.5853/jos.2019.03027

Barelli, R. G., Avelino, V. F., & Castro, M. C. F. (2022). STIMGRASP: A Home-Based Functional Electrical Stimulator for Grasp Restoration in Daily Activities. *Sensors*, *23*(1), 10. https://doi.org/10.3390/s23010010

Basri, I. Y., Arsyfadhillah, A., Irfan, D., & Thamrin, T. (2018). Rancang Bangun Media Pembelajaran Mini Trainer IC 555. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, *18*(2), 65–76. https://doi.org/10.24036/invotek.v18i2.332

Diéguez-Pérez, I., & Leirós-Rodríguez, R. (2020). Effectiveness of Different Application Parameters of Neuromuscular Electrical Stimulation for the Treatment of Dysphagia after a Stroke: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, *9*(8), 2618. https://doi.org/10.3390/jcm9082618

Ethne L. Nussbaum et al. (2017). *Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment: Critical Review and Recommendations for Clinical Practice | Physiotherapy Canada*. https://utpjournals.press/doi/10.3138/ptc.2015-88

Fang, Y., Li, J., Liu, S., Wang, Y., Li, J., Yang, D., & Wang, Q. (2023). Optimization of electrical stimulation for the treatment of lower limb dysfunction after stroke: A systematic review and Bayesian network meta-analysis of randomized controlled trials. *PLOS ONE*, *18*(5), e0285523. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285523

Fluke Biomedical. (2014, Maret). *An introduction to electrical safety testing in accordance with IEC 62353*. https://www.ebme.co.uk/articles/electrical-safety-testing-in-accordance-with-iec-62353/an-introduction-to-electrical-safety-testing-in-accordance-with-iec-62353

Gracia-Ibáñez, V., Mohseni, M., Kedgley, A. E., Jarque-Bou, N. J., Granell, P., Vergara, M., & Sancho-Bru, J. L. (2024). Electromyography Parameters to Discriminate Hand Osteoarthritis and Infer Their Functional Impact. *Sensors*, *24*(20), 6706. https://doi.org/10.3390/s24206706

Hodkin, E. F., Lei, Y., Humby, J., Glover, I. S., Choudhury, S., Kumar, H., Perez, M. A., Rodgers, H., & Jackson, A. (2018). Automated FES for Upper Limb Rehabilitation Following Stroke and Spinal Cord Injury. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *26*(5), 1067–1074. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2816238

Khan, M. A., Fares, H., Ghayvat, H., Brunner, I. C., Puthusserypady, S., Razavi, B., Lansberg, M., Poon, A., & Meador, K. J. (2023). A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery. *Frontiers in Neurology*, *14*, 1272992. https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1272992

Lee, Y., & Kim, K. (2022). The influence of gait training combined with portable functional electrical stimulation on motor function, balance and gait ability in stroke patients. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, *35*(6), 1171–1178. https://doi.org/10.3233/BMR-210154

Muslihun, M., Ulin Nuha Aba, M., & Ringaama Kromen3, Y. (2023). RANCANG BANGUN ELEKTROSTIMULATOR BERBASIS ARDUINO MEGA 2560. *MEDIKA TRADA*, *4*(2), 11–15. https://doi.org/10.59485/jtemp.v4i2.35

Utari, E. L., Buyung, I., & Putra, I. M. G. G. (2017). SIMULASI ALAT ELEKTROSTIMULATOR AKUPUNTUR BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA16. *Teknoin*, *23*(1). https://doi.org/10.20885/teknoin.vol23.iss1.art4

Wahyu Nasrullah. (2019). Efektivitas Latihan Stimulasi Motorik dan Koping Adaptif Terhadap Kapasitas Fungsional Pada Pasien Pasca Stroke. *Tanjungpura Journal of Nursing Practice and Education*, *1*(2). https://doi.org/10.26418/tjnpe.v1i2.35107

Wang, H.-P., Guo, A.-W., Zhou, Y.-X., Xia, Y., Huang, J., Xu, C.-Y., Huang, Z.-H., Lü, X.-Y., & 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

Widyasari, V., Rahman, F. F., & Ningrum, V. (2023). The Incidence and Prevalence of Stroke by Cause in Indonesia Based on Global Burden of Disease Study 2019. Dalam H. Nurdiyanto, I. Miladiyah, & N. A. Jamil (Ed.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Cardiovascular Diseases (ICCvD 2021)* (hlm. 435–446). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-048-0_50