

Robotic Glove Menggunakan *Hybrid Functional Electrical Stimulation (Fes)* dan *Exoskeleton* untuk Rehabilitasi Tangan Manusia

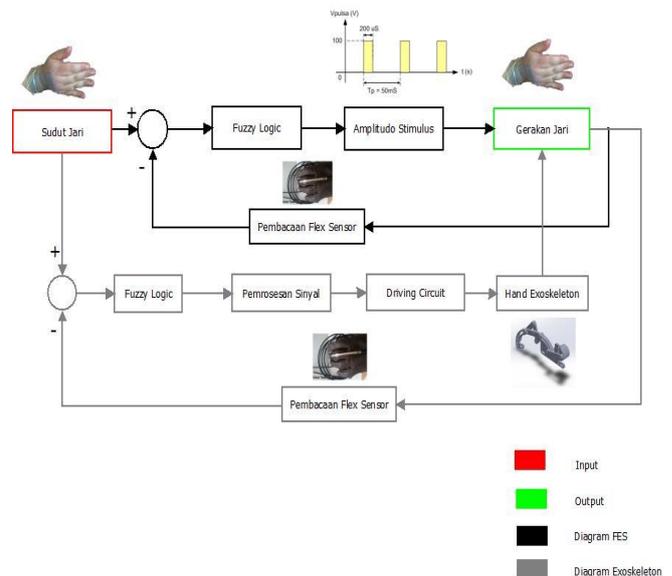
Achmad Ilham Fanany Al Isyrofie, Achmad Arifin, dan Fauzan Arrofiqi
Departemen Teknik Biomedik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: arifin@bme.its.ac.id

Abstrak—Disabilitas yang terjadi pada tangan manusia menunjukkan masalah yang serius bagi beberapa orang. Salah satu penyebab terjadinya disabilitas pada fungsi sistem gerak manusia ialah terjadinya kerusakan pada sistem saraf pusat, atau *Spinal Cord Injury (SCI)*. Penyakit stroke termasuk salah satu jenis SCI yang menyebabkan penderitanya mengalami penurunan pada sistem sensoris dan motorik pada tubuh. Pada penelitian ini, akan dikembangkan suatu alat yang merupakan gabungan dari *exoskeleton* dan *Functional Electrical Stimulation (FES)*. *Exoskeleton* adalah kerangka alat untuk dapat melatih gerakan menggenggam dan memperkuat daya genggam dengan bantuan *external power*. FES merupakan sebuah teknik yang memanfaatkan arus elektrik untuk mengaktifkan bagian saraf yang mengalami gangguan atau disfungsi karena berbagai gangguan neurologis. Sisi kebaruan dari metode rehabilitasi ini terletak pada optimasi penggunaan *exoskeleton* untuk mengurangi kelelahan otot akibat stimulasi yang berlebihan dari FES. *Exoskeleton* dengan panjang 77.2 mm dapat menghasilkan gerakan mekanik yang mendorong terjadinya gerakan fleksi dan ekstensi. *Electrical stimulator* menghasilkan *output* berupa gelombang kotak dengan karakteristik lebar pulsa 200 μ S, frekuensi 20 Hz, dan *range* amplitudo sebesar 0.2 V hingga 130 V. *Output* hasil stimulasi tersebut disalurkan menuju otot *Flexor Digitorum*, sehingga dapat menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi pada jari-jari tangan. Metode *hybrid FES* dan *exoskeleton* dengan amplitudo stimulasi yang berubah-ubah dan kecepatan motor sebesar 1.36 rpm dapat mencapai gerakan fleksi dalam rentang waktu 23.95 detik, sedangkan gerakan ekstensi dapat dicapai dalam rentang waktu 20.16 detik. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan metode kontrol yang digunakan agar dapat menghasilkan gerakan yang lebih *smooth* dan selaras, memilih sensor yang lebih akurat, dan memilih motor yang berukuran lebih kecil dengan torsi lebih tinggi.

Kata Kunci—*Exoskeleton, Functional Electrical Stimulation, Spinal Cord Injury, Stroke.*

I. PENDAHULUAN

DISABILITAS yang terjadi pada tangan manusia menunjukkan masalah yang serius bagi beberapa orang karena melemahnya fungsi sistem gerak pada manusia. Salah satu penyebab terjadinya disabilitas pada fungsi sistem gerak manusia ialah terjadinya kerusakan pada sistem saraf pusat, atau *Spinal Cord Injury (SCI)*. Penyakit stroke termasuk salah satu jenis SCI yang menyebabkan penderitanya mengalami penurunan pada sistem sensoris dan motorik pada tubuh. *Stroke* merupakan hilangnya fungsi otak dikarenakan adanya gangguan suplai darah ke otak [1]. Sebagai akibatnya, area yang terdampak pada otak tidak dapat bekerja secara normal, yang menyebabkan ketidakmampuan menggerakkan satu atau lebih anggota badan pada salah satu sisi tubuh. Ciri-ciri



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

penderita penyakit *stroke* diantaranya adalah kelumpuhan pada wajah serta beberapa anggota badan, berbicara tidak lancar, dan terjadinya gangguan penglihatan. Penyakit *stroke* ini juga memiliki kemungkinan untuk melumpuhkan seluruh bagian tubuh. Setelah pasien sembuh dari penyakit *stroke*, maka persendian pada anggota tubuh yang lumpuh akan menjadi lebih kaku. Jumlah penderita penyakit *stroke* di Indonesia tahun 2013 berdasarkan diagnosis Tenaga Kesehatan (Nakes) diperkirakan sebanyak 1.236.825 orang (7,0%), sedangkan berdasarkan diagnosis Nakes, gejala diperkirakan sebanyak 2.137.941 orang (12,1%) [2].

Beberapa akibat dari penyakit *stroke* yang melanda bagian *upper limb* dari tubuh manusia menyebabkan melemahnya gerakan jari tangan, dimana jari tangan lebih kaku dalam melakukan gerakan menggenggam. Oleh karena itu, beberapa metode untuk merehabilitasi pasien pasca stroke dikembangkan. Beberapa metode rehabilitasi untuk pasien pasca stroke yang dikembangkan yaitu *exoskeleton* yang dapat melatih fungsi gerak tangan dengan memanfaatkan *external power* dan FES yang menggunakan arus elektrik untuk mengaktifasi sel saraf yang menstimulasi bagian tangan yang mengalami disabilitas. Kedua metode ini dimanfaatkan untuk dapat mengembalikan fungsi tangan ke kondisi normal seperti mekanisme menggenggam dan membuka tangan sehingga dapat meningkatkan kualitas hidup dari orang dengan disabilitas pada *upper limb*.

FES adalah sebuah teknik yang menggunakan aliran elektrik untuk mengaktifasi sel saraf yang mengalami kelumpuhan sebagai hasil dari *Spinal Cord Injury (SCI)*, *head*

injury, stroke dan gangguan neurologis lainnya [3]. FES utamanya digunakan untuk mengembalikan fungsi pada orang dengan disabilitas. Namun, bila FES digunakan secara terus-menerus, otot objek yang distimulasi dapat mengalami kelelahan. Selain itu, penggunaan FES juga harus memperhatikan penempatan elektroda agar mendapatkan hasil yang diinginkan. Apabila penempatan elektroda tidak tepat, ketika proses stimulasi dilakukan, gerakan yang terjadi bisa saja tidak seperti yang diinginkan atau tidak terjadi gerakan dan menyebabkan kulit mengalami luka seperti luka bakar. *Exoskeleton* adalah kerangka alat yang dipasangkan pada sarung tangan untuk dapat melatih gerakan menggenggam dan memperkuat daya genggam dengan bantuan *external power*.

Pada penelitian ini, dilakukan penggabungan antara metode FES dan *Exoskeleton* dengan mengoptimalkan penggunaan *exoskeleton* untuk mengurangi kelelahan otot akibat stimulasi yang berlebihan dari FES. Hasil pengembangan ini diharapkan dapat membantu aktifitas dari orang-orang yang mengalami disabilitas, khususnya disabilitas pada bagian tubuh *upper limb*(tangan).

II. METODE

Sistem gabungan antara FES dan *exoskeleton* mengombinasikan antara metode *external power* yang memanfaatkan *Exoskeleton* dan metode stimulasi elektrik yang memanfaatkan FES. *Exoskeleton* diaktuator menggunakan motor servo, dalam mengatur gerakan fleksi dan ekstensi. Sinyal input untuk *exoskeleton* berasal dari *switch* yang kemudian dilakukan pengolahan sinyal yang meliputi akuisisi sinyal, pengondisian sinyal, dan pemrosesan sinyal menggunakan STM32F103C8. Kemudian dilakukan sistem aktuasi dan kontrol menggunakan servo motor dan *Flex sensor* yang dihubungkan dengan mikrokontroler. Sinyal dari sensor dikonversi ke satuan tegangan melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) dan mikrokontroler. Kontroler menentukan perbedaan antara genggam pada benda dengan diameter besar (*Large Diameter*), genggam pada benda dengan diameter kecil (*Small Diameter*), genggam pada benda dengan diameter sedang (*Medium Warp*), dan mekanisme *release*. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur nilai *threshold* pada algoritma kontrol. Apabila nilai *threshold* memenuhi nilai yang diinginkan, sinyal keluaran akan dikirim dari mikrokontroler menuju ke aktuator.

Pada sistem FES, kontraksi otot akan mengakibatkan pergerakan tubuh sehingga terjadi perubahan nilai pada sensor. Perubahan nilai ini kemudian diolah oleh mikrokontroler, yang meliputi pengolahan sinyal dan kontroler *fuzzy*, selanjutnya *Digital to Analog Converter* (DAC) mengeluarkan tegangan yang mempengaruhi tegangan output stimulus. Diagram blok dari sistem gabungan FES dan *exoskeleton* ditunjukkan pada Gambar 1.

A. Desain Exoskeleton

Desain dari *exoskeleton* mempertimbangkan beberapa aspek, diantaranya adalah bentuk, ukuran, biaya, dan berat [4]. Berat dan biaya dari *exoskeleton* sangat penting untuk pengguna dalam desain yang diusulkan. Biaya yang terjangkau akan dapat bersaing dengan biaya terapi

Tabel 1.
Antropometri Jari Tangan Laki-Laki

No	Dimensi Tubuh	Rerata(mm)	Laki- Laki	
			Koefisien Korelasi	Persamaan Prediksi
1	TB	1704	-	-
2	Pij	61.4	0.645	-59.1 + 0.707 TB
3	Pjt	77.2	0.518	-16.1 + 0.548 TB
4	Pjtg	85.0	0.446	-9.4 + 0.554 TB
5	Pjm	80.7	0.408	3.4 + 0.453 TB
6	Pjk	63.6	0.280	13.8 + 0.292 TB

Tabel 2.
Antropometri Jari Tangan Wanita

No	Dimensi Tubuh	Rerata(mm)	Laki- Laki	
			Koefisien Korelasi	Persamaan Prediksi
1	TB	1573	-	-
2	Pij	57.0	0.442	-39.3 + 0.061 TB
3	Pjt	69.7	0.465	-19.6 + 0.057 TB
4	Pjtg	79.0	0.286	19.8 + 0.038 TB
5	Pjm	72.4	0.252	22.2 + 0.032 TB
6	Pjk	56.3	0.291	5.9 + 0.032 TB

konvensional. Berat dari *exoskeleton* kurang dari 45 gram. Desain dari *exoskeleton* harus pas di jari dan gerakannya harus dapat mengikuti jari orang yang mengalami disabilitas. *Input* torsi diatur sebesar 30 N-mm sesuai dengan motor yang dipilih. Pada penelitian ini, torsi dapat menggerakkan jari secara perlahan, sehingga cocok untuk penderita *stroke* ringan. Pada pasien dengan *stroke* sedang, torsi dari motor dapat ditingkatkan dengan ukuran yang sama namun sedikit menambah berat dari alat. Proses perancangan dan analisa sistem menggunakan *Solidworks*™ dan *Autodesk Inventor*™.

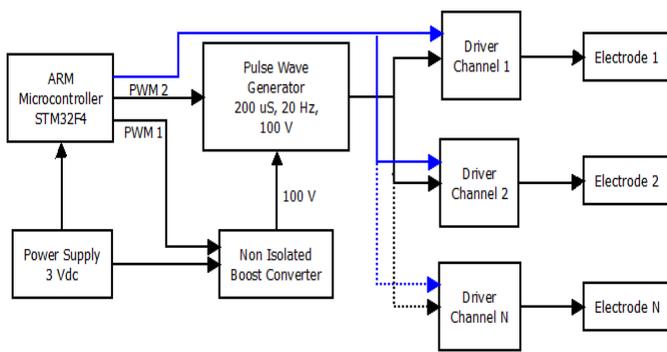
Prototype dari *robotic finger* sendiri memiliki 2 *slider*, 5 *links*, 10 *bolt*, dan 1 *motor*. Motor yang digunakan ialah *stepper motor* untuk mengaktuator *exoskeleton* dan mengunci posisi sendi pada tempatnya. *Stepper motor* digunakan karena dapat melakukan pergerakan rotasi dan pergerakan linear bidireksional.

Ukuran dari desain *exoskeleton* menyesuaikan dengan ukuran jari tangan manusia. Ukuran jari tangan manusia berbeda-beda sehingga diperlukan pengukuran antropometri tangan. Pengukuran antropometri tangan yang dibutuhkan meliputi ukuran panjang ibu jari (Pij), panjang jari telunjuk (Pjt), panjang jari tengah (Pjtg), panjang jari manis (Pjm), dan panjang jari kelingking (Pjk). Ukuran dari desain *exoskeleton* yang direalisasikan merujuk pada Tabel 1 dan Tabel 2.

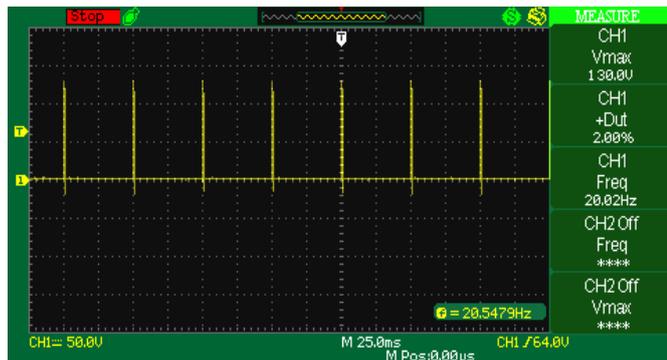
B. Desain FES

Perancangan *hardware* FES dapat dibagi menjadi 4 bagian. *Hardware* FES meliputi rangkaian *boost converter*, rangkaian *amplitude regulator*, rangkaian pembangkit pulsa, serta rangkaian *driver channel*. *Hardware* FES juga membutuhkan sinyal *Pulse Wave Modulator* (PWM) dan sinyal *Digital to Analog Converter* (DAC) yang diperoleh dari mikrokontroler STM32F103C8. Diagram blok FES dapat dilihat pada Gambar 2.

Rangkaian *boost converter* merupakan rangkaian *converter* yang menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan sumber atau masukannya. Rangkaian *boost converter* direalisasikan menggunakan non-isolated *boost converter* karena kemudahan dalam desain dan penggunaan komponen yang sedikit sehingga perangkat yang dihasilkan bisa berukuran kecil dan ringan. Pada penelitian



Gambar 2. Diagram Blok FES



Gambar 3. Keluaran pulsa 200µS, 20 Hz pada rangkaian pembangkit pulsa

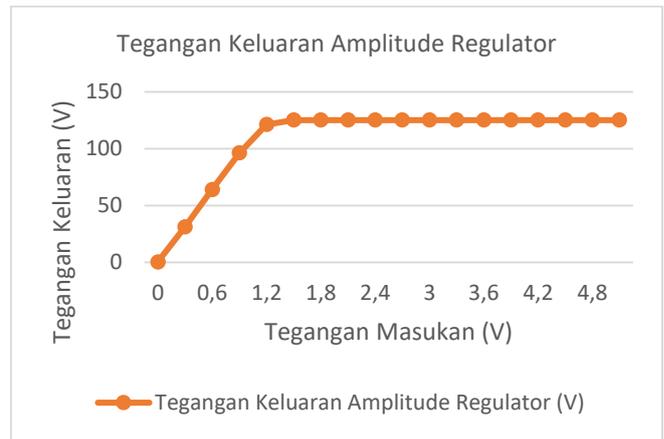
ini, rangkaian *boost converter* mendapatkan input frekuensi sebesar 20 KHz. Sementara itu, tegangan input yang diberikan sebesar 5 V. Pada rangkaian *boost converter*, transistor yang digunakan untuk pengaturan *Pulse Wave Modulator* (PWM) perlu memenuhi beberapa kriteria yaitu :

1. Tegangan V_{CE} lebih besar dari tegangan *output* maksimal *boost converter*
2. Arus yang dapat dilewatkan oleh transistor harus lebih besar dari arus *output boost converter*

Berdasarkan kedua kriteria tersebut, digunakan transistor tipe MP5A42 (NPN). Selain itu, perlu ditentukan jenis dioda yang akan digunakan dalam rangkaian *boost converter* ini. Pada rangkaian ini digunakan dioda tipe 1N4148 karena dioda ini memiliki kecepatan *switching* yang tinggi, sehingga dapat membantu menaikkan tegangan *output boost converter* menjadi lebih tinggi.

Rangkaian *amplitude regulator* merupakan rangkaian yang berfungsi untuk mengubah nilai amplitudo input pembangkit pulsa berdasarkan nilai *input* rangkaian *amplitude regulator*. Pada rangkaian ini digunakan IC LM358 sebagai *amplifier* amplitudo. Output dari IC LM358 digunakan sebagai *input* basis transistor, dan dilakukan penguatan nilai *boost* oleh transistor. Selanjutnya dilakukan pengaturan tegangan dengan menggunakan metode pembagian tegangan antara *output* dari *boost converter* dengan *input* dari DAC sehingga didapatkan tegangan stimulator yang diinginkan

Rangkaian pembangkit pulsa merupakan rangkaian *half H-bridge* yang berfungsi untuk menghasilkan pulsa dengan lebar pulsa 200µS serta frekuensi 20 Hz. Proses menghasilkan pulsa menggunakan transistor PNP pada T7 serta transistor NPN pada T6. Kedua kaki kolektor transistor terhubung, sehingga nilai dari kedua transistor ini selalu berkebalikan. Pada bagian belakang kedua transistor ini diberikan IC inverter serta transistor T5.



Gambar 4. Grafik keluaran rangkaian *amplitude regulator*

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Pengujian Rangkaian Boost Converter

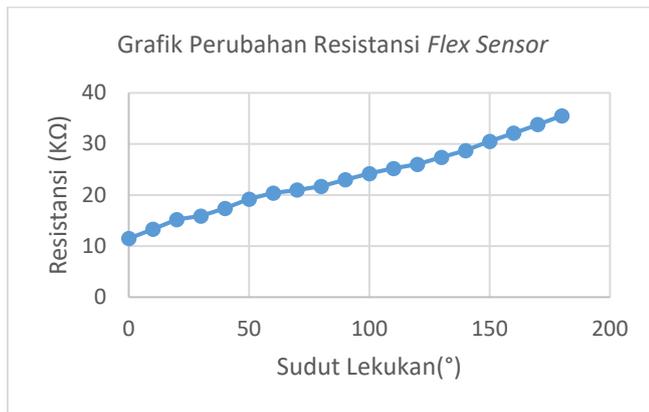
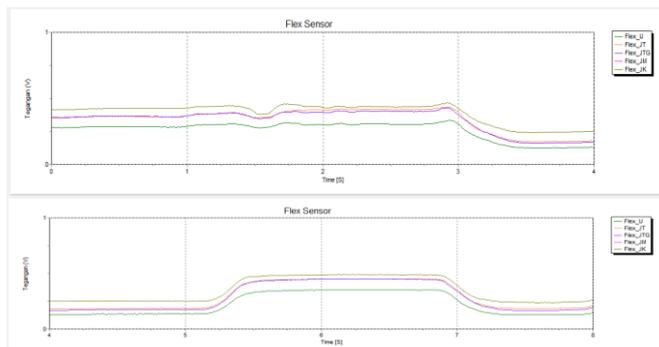
Pengujian terhadap rangkaian *boost converter* dilakukan dengan mengubah nilai frekuensi dan *duty cycle* sinyal PWM 1 untuk memperoleh tegangan keluaran *boost converter* yang sesuai. Berdasarkan data percobaan yang diperoleh, ketika frekuensi masukan pada sinyal PWM1 diubah-ubah terjadi perubahan tegangan keluaran *boost converter*. Tegangan keluaran yang dihasilkan pada saat *duty cycle* diatas 60% menunjukkan perubahan yang linier, dimana semakin tinggi frekuensi masukan maka semakin tinggi pula tegangan keluaran dari rangkaian *boost converter* yang dihasilkan. Kemudian, ketika *duty cycle* dibawah 60%, tegangan keluaran *boost converter* akan semakin menurun ketika nilai frekuensi masukan dinaikkan. Ketika *duty cycle* dari frekuensi masukan sinyal PWM1 diubah, tegangan keluaran *boost converter* juga mengalami perubahan, dimana semakin tinggi *duty cycle* yang diterapkan maka nilai tegangan keluaran *boost converter* juga mengalami kenaikan. Berdasarkan pengujian ini, rangkaian *boost converter* menghasilkan tegangan keluaran yang memuaskan pada frekuensi 20 KHz dan *duty cycle* 90%.

B. Pengujian Rangkaian Pembangkit Pulsa

Hasil pengujian rangkaian pembangkit pulsa dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, dapat diketahui bahwa keluaran dari rangkaian pembangkit pulsa yang dirancang sudah memenuhi ekspektasi, dimana rangkaian pembangkit pulsa ini dapat menghasilkan sinyal pulsa sebesar 130 V, 20 Hz. Keluaran dari rangkaian ini dapat dikatakan sudah memenuhi ekspektasi, sehingga dapat disalurkan menuju otot lengan manusia. Ketika nilai DAC yang digunakan sebagai masukan untuk rangkaian *amplitude regulator* diubah-ubah, maka nilai tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit pulsa juga mengalami perubahan.

C. Pengujian Rangkaian Amplitude Regulator

Hasil pengujian dari rangkaian *amplitude regulator* dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan gambar grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan rangkaian *amplitude regulator* sudah dapat membuat tegangan keluaran yang akan masuk ke rangkaian pembangkit pulsa menjadi linier, dan lebih mudah untuk mengatur tegangan keluarannya.

Gambar 5. Grafik perubahan resistansi *flex sensor*Gambar 6. Hasil pembacaan data *flex sensor*

D. Pengujian Flex Sensor

Pengujian flex sensor dilakukan dengan melakukan pengukuran nilai resistansi flex sensor terhadap perubahan sudut lekukan yang dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, dapat diketahui bahwa semakin tinggi besar sudut lekukan, maka resistansi flex sensor yang dihasilkan semakin besar. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan melakukan proses ADC Hasil pembacaan dari flex sensor dapat dilihat pada Gambar 6. Pada detik ke 0 hingga detik ke 3, kelima flex sensor berada dalam keadaan melengkung. Pada detik ke 3 hingga detik ke 5, kelima flex sensor berada dalam keadaan datar. Pada detik ke 5 hingga detik ke 7, kelima flex sensor berada dalam keadaan melengkung, sedangkan detik ke 7 hingga detik ke 8 kondisi flex sensor berada dalam keadaan datar.

E. Pengujian Exoskeleton

Prosedur pengujian dilakukan untuk menguji hasil dari gerakan mekanik *exoskeleton*. Hasil dari gerakan yang dihasilkan *exoskeleton* dapat dilihat pada Gambar 7. *Prototype exoskeleton* terhubung dengan *stepper motor* yang akan mengakomodasi gerakan *exoskeleton*. Perubahan kecepatan motor akan dipengaruhi *driving circuit* yang mendapatkan input dari pengolahan data oleh mikrokontroler. Desain *exoskeleton* yang direalisasikan memiliki panjang 77.2 mm. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, *exoskeleton* yang dipasang pada jari telunjuk dan jari manis telah mampu menghasilkan gerakan melengkung untuk gerak fleksi dan ekstensi jari tangan.

F. Pengujian Hybrid FES dan Exoskeleton

Pengujian *hybrid FES* dan *exoskeleton* diterapkan pada subjek dengan memakai sarung tangan yang telah dilengkapi

Gambar 7. Hasil gerakan mekanik *exoskeleton*

flex sensor dan *exoskeleton*, serta dipasang elektroda pada bagian otot *flexor digiorum*. Pengujian dilakukan dengan dua kali gerakan fleksi dan ekstensi. Pengujian diterapkan pada tiga subjek yang berbeda dan menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi dengan durasi yang bervariasi.

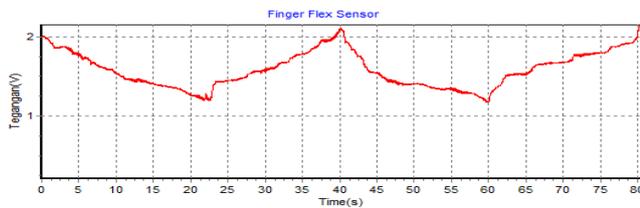
Hasil pengujian sistem pada subjek 1 dapat dilihat pada Gambar 8. Pengujian dilakukan dengan dua kali gerakan fleksi dan ekstensi. Gerakan fleksi dan ekstensi pertama membutuhkan waktu 40.24 detik. Gerakan fleksi pertama dapat dicapai setelah 22.54 detik, sedangkan gerakan ekstensi pertama dapat dicapai setelah 17.7 detik. Gerakan fleksi dan ekstensi kedua membutuhkan waktu 40.24 detik. Gerakan fleksi kedua membutuhkan waktu 19.84 detik, sedangkan gerakan ekstensi kedua membutuhkan waktu 20.04 detik. Kecepatan rotasi motor yang dihasilkan oleh *stepper motor* 28BYJ-48 yang terpasang pada *exoskeleton* sebesar 1.49 rpm.

Hasil pengujian sistem pada subjek 2 dapat dilihat pada Gambar 9. Gerakan fleksi dan ekstensi pertama membutuhkan waktu 47.3 detik. Gerakan fleksi pertama dapat dicapai setelah 22.55 detik, sedangkan gerakan ekstensi pertama dapat dicapai setelah 24.75 detik. Gerakan fleksi dan ekstensi kedua membutuhkan waktu 44.95 detik. Gerakan fleksi kedua membutuhkan waktu 21.85 detik, sedangkan gerakan ekstensi kedua membutuhkan waktu 23.1 detik. Kecepatan rotasi motor yang dihasilkan oleh *stepper motor* 28BYJ-48 yang terpasang pada *exoskeleton* sebesar 1.3 rpm.

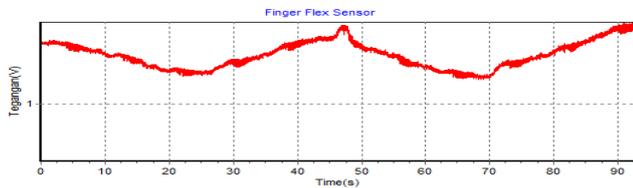
Hasil pengujian sistem pada subjek 3 dapat dilihat pada Gambar 10. Gerakan fleksi dan ekstensi pertama membutuhkan waktu 47.85 detik. Gerakan fleksi pertama dapat dicapai setelah 34.08 detik, sedangkan gerakan ekstensi pertama dapat dicapai setelah 13.77 detik. Gerakan fleksi dan ekstensi kedua membutuhkan waktu 44.44 detik. Gerakan fleksi kedua membutuhkan waktu 22.85 detik, sedangkan gerakan ekstensi kedua membutuhkan waktu 21.59 detik. Kecepatan rotasi motor yang dihasilkan oleh *stepper motor* 28BYJ-48 yang terpasang pada *exoskeleton* sebesar 1.3 rpm.

Gerakan yang dihasilkan stimulasi FES dan rotasi motor pada *exoskeleton* dapat berjalan dengan aman. Gerakan fleksi yang telah diujikan pada subjek rata-rata membutuhkan waktu 23.95 detik, sedangkan gerakan ekstensi membutuhkan waktu 20.16 detik. Kecepatan *stepper motor* yang dihasilkan rata-rata sebesar 1.36 rpm. Perbedaan waktu yang dibutuhkan setiap subjek untuk menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah, perbedaan ukuran otot subjek, penempatan elektroda, dan adanya friksi antar part pada *exoskeleton* yang menghalangi gerakan motor.

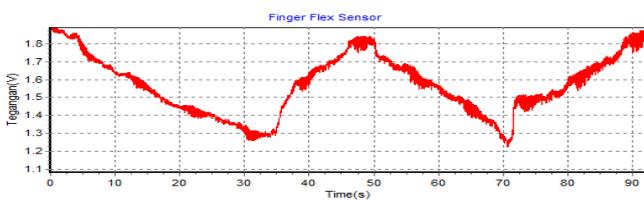
Perubahan tegangan keluaran *electrical stimulator* belum bisa menghasilkan perubahan nilai tegangan yang *smooth* karena kontrol yang digunakan masih memiliki *rule* yang terbatas. Penelitian selanjutnya dapat menerapkan metode kontrol dengan lebih baik sehingga dapat memperoleh hasil



Gambar 8. Hasil gerakan jari pada subjek 1



Gambar 9. Hasil gerakan jari pada subjek 2



Gambar 10. Hasil gerakan jari pada subjek 3

gerakan yang lebih *smooth* dan selaras antara stimulasi dari *electrical stimulator* dan *external power* dari exoskeleton yang menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi yang lebih optimal.

IV. KESIMPULAN

Peletakan posisi elektroda pada permukaan kulit otot tangan sangat berpengaruh terhadap kontraksi otot yang dihasilkan oleh pulsa listrik dari stimulator. Penempatan elektroda yang tepat untuk menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi jari adalah otot *flexor digitorum profundus* dan *extensor digitorum*. *Electrical stimulator* direalisasikan menggunakan rangkaian *boost converter*, rangkaian *amplitude regulator*, rangkaian pembangkit pulsa dan mikrokontroler STM32F103C8. Berdasarkan hasil pengujian, *electrical stimulator* dapat menghasilkan keluaran dengan *range* antara 0.2 V hingga 130 V. Sedangkan untuk *exoskeleton*, desain yang telah direalisasikan dengan panjang 77.2 mm sudah dapat menghasilkan gerakan yang dapat mendorong jari untuk melakukan gerakan fleksi dan ekstensi dengan memanfaatkan gerakan dari stepper motor 28BYJ-48. Desain *exoskeleton* yang direalisasikan ditempatkan pada jari

telunjuk dan jari manis untuk mengompensasi gerakan fleksi dan ekstensi.

Gerakan yang dihasilkan oleh stimulasi dari *electrical stimulator* dan *exoskeleton* dapat diamati perubahannya dengan melihat grafik perubahan sudut *flex sensor* yang terdapat pada *user interface*. Grafik yang terdapat pada *user interface* telah dapat menghasilkan nilai perubahan yang linear dengan perubahan sudut jari yang dibaca oleh *flex sensor*, sehingga dapat dilakukan analisa berdasarkan grafik yang ditampilkan.

Metode *hybrid FES* dan *exoskeleton* dengan amplitudo stimulasi yang berubah-ubah dan kecepatan motor sebesar 1.36 rpm dapat mencapai gerakan fleksi dalam rentang waktu 23.95 detik, sedangkan gerakan ekstensi dapat dicapai dalam rentang waktu 20.16 detik. Metode ini telah dapat menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi, namun tingkat keselarasan antara stimulasi dari *electrical stimulator* dengan *external power* dari *exoskeleton* masih rendah dikarenakan penerapan *logic control* dengan *rule* yang masih terbatas.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan elektroda yang lebih kecil sehingga dapat diperoleh keakurasian penempatan elektroda. Selain itu, *flex sensor* yang digunakan memiliki tingkat keakurasian yang kurang optimal, sehingga penelitian ke depan disarankan untuk meningkatkan keakurasian sensor atau menambahkan sensor lain untuk mendapatkan hasil yang optimal. Desain *exoskeleton* yang diterapkan bisa dirancang lebih minimalis dan menggunakan motor dengan ukuran lebih kecil dan torsi yang lebih besar sehingga dapat menghasilkan gerakan yang lebih optimal dan menjadikan alat lebih ringan serta nyaman bagi pengguna. Penelitian selanjutnya juga disarankan mengembangkan metode kontrol yang digunakan agar dapat menghasilkan gerakan yang lebih *smooth* dan selaras.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Nithya, S. D. Bharathi, and P. Poongavanam, "Design of orthotic assistive exoskeleton for human hand," in *2015 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, 2015, pp. 1–6.
- [2] "Kementerian Kesehatan Republik Indonesia." [Online]. Available: <https://www.kemkes.go.id/article/view/17051800002/sebagian-besar-penderita-hipertensi-tidak-menadarinya.html>. [Accessed: 09-May-2020].
- [3] D. K. Vilaili, "Sistem Closed Loop Functional Electrical Stimulus (FES) pada Aktivitas Menggenggam Menggunakan Informasi Sensori Posisi Jarak dan Gaya Haptic," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [4] T.-H. Hsu, Y.-C. Chiang, W.-T. Chan, and S.-J. Chen, "A finger exoskeleton robot for finger movement rehabilitation," *Inventions*, vol. 2, no. 3, p. 12, 2017.