

PERANCANGAN EKSOSKELETON JOINT BAHU UNTUK REHABILITASI FISIOTERAPI PADA PASIEN PASCA-STROKE DENGAN IMPLEMENTASI CYCLOIDAL DRIVE DAN KONTROL PD

*Note: Akses terbuka jurnal Mekanika dan Elektronika

1st Andi Muhammad Raehan Fathah
Penulis-Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
andirrae@gmail.com

2nd Husneni Mukhtar
Pembimbing-Teknik ELEktro
Telkom University
Bandung, Indonesia
husnenimukhtar@telkomuniversity.ac.id

3rd Willy Anugrah Cahyadi
Pembimbing-Teknik ELEktro
Telkom University
Bandung, Indonesia
wae.zze@gmail.com

Abstract—Stroke merupakan salah satu penyebab utama kematian dan gangguan kesehatan di dunia. Pasien pasca-stroke sering mengalami penurunan kemampuan motorik yang memerlukan rehabilitasi intensif melalui fisioterapi gerakan pasif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang eksoskeleton mekatronika yang mampu mendukung rehabilitasi pasien pasca-stroke pada fase awal terapi, dengan fokus pada gerakan pasif yang terukur dan aman, khususnya pada ekstremitas bahu dan lengan. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kontrol variabel. Sistem eksoskeleton dirancang menggunakan teknologi Cycloidal Drive dengan rasio reduksi 1:28 untuk meningkatkan torsi. Sistem ini dilengkapi kontrol PD (Proportional and derivative) yang memastikan kehalusan dan akurasi gerakan berdasarkan umpan balik dari encoder magnetik AS5600. Rentang Gerak Range of Motion (RoM) dirancang sesuai dengan kebutuhan terapi gerakan pasif pada sendi bahu dan lengan pasien. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eksoskeleton ini mampu mendukung terapi gerakan pasif dengan RoM dan torsi yang sesuai, sehingga memenuhi kebutuhan rehabilitasi pasien pasca-stroke. Pengujian menunjukkan sistem kendali berbasis PD meningkatkan presisi gerakan dan kecepatan eksoskeleton, sementara desain Cycloidal Drive memastikan performa torsi yang optimal. Alat ini diharapkan menjadi solusi efektif bagi pasien dan terapis dalam mempercepat proses rehabilitasi dengan pendekatan teknologi yang adaptif dan mandiri.

Index Terms—fisioterapi stroke, eksoskeleton, PD, Cycloidal Drive

I. PENDAHULUAN

Stroke merupakan penyebab utama kematian dan gangguan kesehatan di dunia [1]. Pasien pasca-stroke mengalami gangguan motorik, khususnya pada pergelangan tangan dan jari, sehingga membutuhkan fisioterapi pasif intensif untuk pemulihan awal [2]. Terapi konvensional memiliki kendala ketergantungan pada terapis, keterbatasan sumber daya, dan

minimnya teknologi pendukung. Desain eksoskeleton mekatronika berperan penting dalam rehabilitasi awal dengan kontrol motorik yang presisi dan responsif [3], [4]. Stroke menyebabkan gangguan tonus otot dan kontrol postural yang berdampak pada aktivitas sehari-hari [5]. Pasien mengalami kesulitan dalam gerakan dasar, memerlukan kontrol halus dengan Rentang Gerak (RoM) yang sesuai [6], [7]. Rehabilitasi konvensional memakan waktu lama dan subjektif, sehingga beban klinis meningkat. Oleh karena itu, eksoskeleton rehabilitasi harus mendukung gerakan sendi yang terkoordinasi, memiliki kontrol PD untuk stabilitas gerakan, serta aktuator Cycloidal Drive dengan motor Brushless DC (BLDC) dan Electronic Speed Controller (ESC) untuk menghasilkan torsi sekitar 30–35 Nm guna mendukung flektor dan ekstensor lengan atas [8], [9]. Eksoskeleton komersial saat ini masih berfokus pada gerakan sendi secara terpisah tanpa memenuhi kebutuhan fisioterapi pasif pada Aktivitas Kehidupan Sehari-hari (ADL). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan eksoskeleton adaptif yang mendukung gerakan sendi bahu pasif dalam RoM 0°–90°, dengan aktuator Cycloidal Drive berbasis BLDC, kontrol PD untuk mengurangi overshoot dan undershoot, serta komunikasi I2C antara ESP32 sebagai master dan slave. Sistem yang diusulkan diharapkan menjadi solusi rehabilitasi yang efektif dan aman bagi pasien serta menjadi dasar penelitian lebih lanjut di bidang eksoskeleton mekatronika.

II. METODOLOGI

Rancang bangun sistem berfokus pada gerak motor bahu terlihat pada gambar 3. Gerak putar yang bekerja dengan poros putar X membantu mendukung ADL tertentu. Target sistem pada gerak motor bahu adalah rentang 0° - 90° dan dibatasi

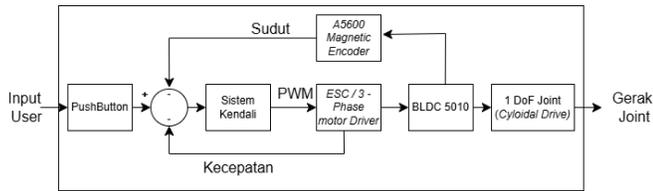


Fig. 1. Sistem Gerak Eksoskeleton

PWM / lebar pulsa selama periode yang diterima (μs), yaitu dari 1000 μs dan 2000 μs untuk 100% duty cycle kecepatan maksimum, dengan 1500 sekitar 5% duty cycle sebagai posisi netral atau berhenti.

A. Sistem Gerak Eksoskeleton

Pada rancangan eksoskeleton, derajat kebebasan / DoF bahu dibekali dengan 1 motor DC Brushless (BLDC) tipe 5010 (Diameter 50mm dan Tebal 10mm) 360KV yang dikendalikan oleh sebuah Motor Driver 3 fasa ataupun sebuah Electronic Speed Control (ESC) yang torsi dan kecepatannya disesuaikan berdasarkan PWM yang diproses pada mikrokontroler. Mikrokontroler yang digunakan pada rancangan eksoskeleton ini adalah tipe ESP 32 v1 sebagai pusat kendali, monitoring, dan penyesuaian pergerakan sudut dan kecepatan tiap aktuator Joint-nya berdasarkan feedback dari sensor yang terpasang pada setiap aktuator tersebut menggunakan encoder magnetik AS5600. Gambar 1 menunjukkan sistem kendali satu sendi eksoskeleton menggunakan motor BLDC dan penggerak cycloidal drive. Input dari pushbutton diproses oleh sistem kendali dengan bantuan A5600 Magnetic Encoder untuk kontrol presisi. Sinyal PWM dikirim ke ESC / 3-Phase Motor Driver yang menggerakkan motor BLDC 5010, mengendalikan sendi melalui 1 DoF Joint (Cycloidal Drive) untuk meningkatkan efisiensi dan torsi.

B. Desain Eksoskeleton

Sistem eksoskeleton memiliki kemampuan untuk mengatur dan mengendalikan RoM yang sesuai dengan gerakan bahu dan siku pada pasien yang telah disesuaikan dengan kebutuhan terapi pasien stroke secara umum yang dapat dilihat pada gambar 2.

C. Desain Perangkat Lunak

Algoritma sistem gerak eksoskeleton akan memenuhi Gerakan Activity daily of living / Gerakan aktivitas sehari-hari. Mikrokontroler master memberikan input perintah ke masing – masing mikrokontroler slave untuk menggerakkan sub-sub Joint gerak ADL. Sub Joint eksoskeleton yang peneliti gerakan berfokus pada algoritma gerak putar pada sistem gerak Joint bahu dengan rentang Range of Motion $0^\circ - 90^\circ$. ADL yang akan dipenuhi antara lain Gerakan posterior bahu, - aduksi bahu dan - fleksi yang terlihat pada gambar 4.

D. Pengujian Sistem

Proses pengaturan dan verifikasi komponen merupakan tahap awal yang dilakukan sebelum menjalankan keseluruhan

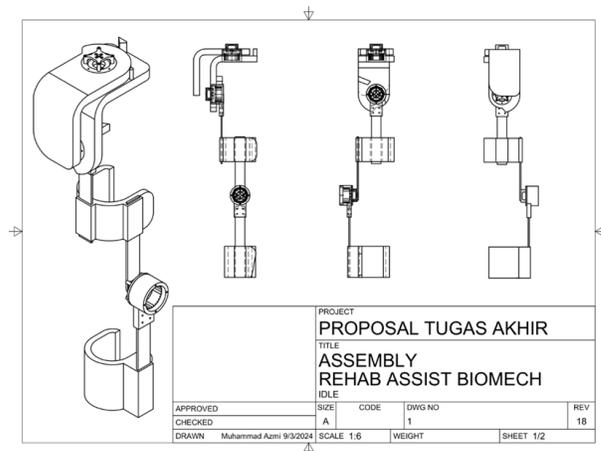


Fig. 2. Lengan Eksoskeleton

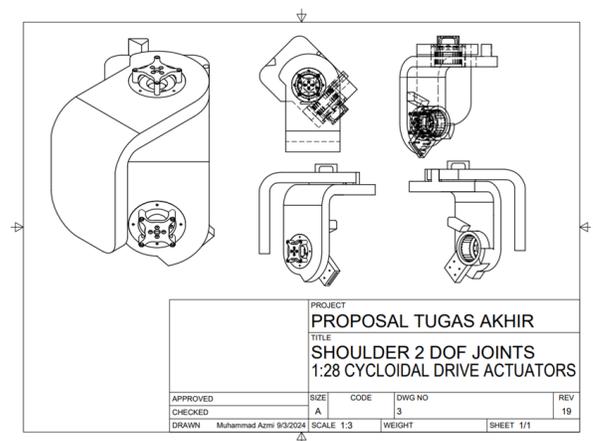


Fig. 3. Eksoskeleton Joint Bahu

sistem eksoskeleton pada Joint bahu, kalibrasi penting untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang diperoleh dalam penelitian.

Magnetic encoder AS5600 Kalibrasi magnetic encoder AS5600 sebagai alat ukur sudut yang digunakan, memastikan bahwa sistem ini akurat dan konsisten dalam pemberian informasi terkait sudut dalam batasan ROM ($0^\circ - 90^\circ$) yang digunakan pada Joint bahu. Perbandingan pengukuran dilakukan menggunakan hasil pembacaan encoder AS5600 dengan pengukuran manual menggunakan busur derajat. Gambar 5 menunjukkan bahwa akurasi yang diperoleh adalah 100% dengan ketelitian tiap 1 derajat perubahan sudut.

ESC 30A Bidirectional Data pada gambar 6 memperlihatkan bahwa Throttle dapat memberikan informasi sehingga actuator atau motor BLDC bergerak sesuai dengan perintah yang betul dan akurat, Dimana motor menjalankan pwm 100 μs untuk mundur, 1500 μs pada kondisi diam dan 2000 μs dengan status motor bergerak ke depan dengan kecepatan maksimum untuk kedua arah. Menunjukkan bahwa kalibrasi dapat diterima dan menjadi acuan bahwa ESC dapat terkontrol dengan baik.

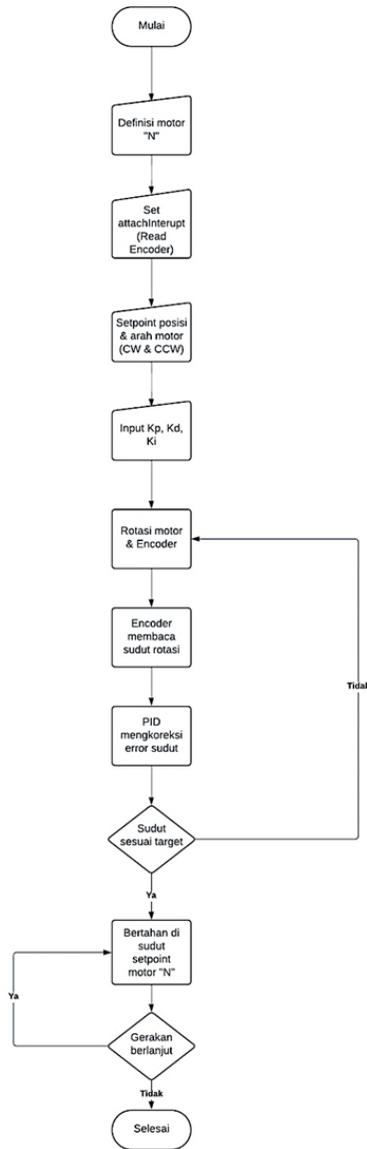


Fig. 4. Flowchart Algoritma Gerak

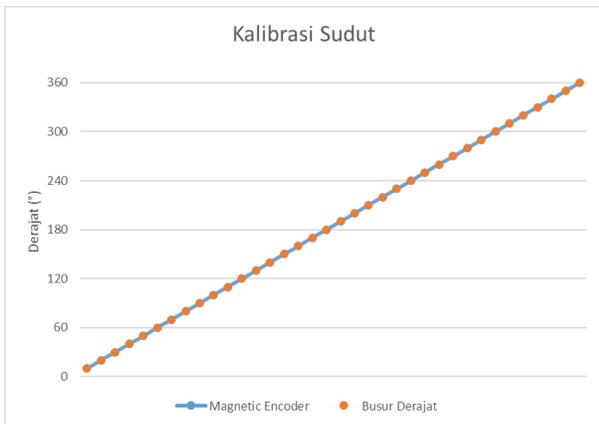


Fig. 5. Kalibrasi AS5600

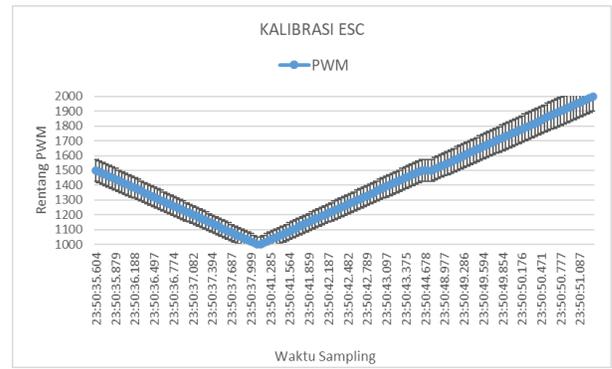


Fig. 6. Kalibrasi ESC 30A

PWM	RPM _{Motor}	RPM _{CycloidalDrive}	V	I	W
1300	2800	64	12.2	0.39	4.76
1400	2300	20	12.2	0.23	2.8
1500	-	-	12.2	0.03	0.3
1600	2600	21	12.2	0.24	2.93
1700	3000	70	12.2	0.46	5.61

Fig. 7. Tabel Parameter

Paramater Sistem Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa motor BLDC dan komponen terkait bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan dan untuk menilai kinerja keseluruhan dari sistem eksoskeleton yang dirancang. Pengukuran tegangan dilakukan secara paralel pada rangkaian dan sumber tegangan, arus diukur dengan membuat rangkaian seri antara beban yaitu ESC 30A dan sumber tegangan. Daya dihitung menggunakan rumus bahwa daya sebanding dengan hasil tegangan dan arus penggunaan pada ESC ($W = V \times I$) dan pengukuran RPM atau putaran motor per menit dilakukan secara manual dan dibandingkan dengan pengukuran menggunakan alat ukur digital Tachometer. Data pengukuran hubungan PWM, RPM, Tegangan, Arus dan Daya dapat dilihat gambar 7.

Secara keseluruhan, sistem ini dirancang dengan mempertimbangkan aspek-aspek penting seperti kemudahan penggunaan, keselamatan, dan efektivitas terapi. Eksoskeleton ini dapat menjadi alat bantu yang efektif dalam proses rehabilitasi pasien pasca stroke, memungkinkan mereka untuk melakukan latihan motorik secara lebih mandiri dan terkontrol, serta meningkatkan pengalaman dalam proses pemulihan.

III. HASIL

Secara keseluruhan "Perancangan Eksoskeleton Joint Bahu untuk Rehabilitasi Fisioterapi pada Pasien Pasca-Stroke dengan Implementasi Cycloidal Drive dan Kontrol PD" telah dilakukan sesuai desain perancangan perangkat keras Eksoskeleton. Desain eksoskeleton dan Cycloidal Drive pada sistem Joint bahu, dicetak menggunakan 3D Print berbahan filament (Acrylonitrile Butadiene Styrene) yang dapat dilihat pada



Fig. 8. Eksoskeleton Joint Bahu

gambar 8. Eksoskeleton Joint bahu teruji mampu menahan dan menopang motor dan Cycloidal Drive serta mampu membantu putaran motor, eksoskeleton joint bahu tersambung dengan eksoskeleton lengan bawah dan ditempatkan pada bagian bahu sebagai bantuan gerak lengan rentang ROM 0°– 90° pada Axis – X 1 DOF. Cycloidal Drive yang memiliki gear dengan gigi reduksi 1 : 28 telah terpasang sesuai desain dan spesifikasi rancangan, tiap gear, bearing dan baut diberikan pelumas untuk mendukung putaran yang licin dan terhindar gesekan ataupun hambatan sebagai antisipasi gagal putar pada poros. Sehingga gerak putar cyclo drive bekerja dengan optimal.

Pembuatan algoritma Kestabilan kerja sistem kecepatan dan capaian sudut dengan kontrol PD dilakukan dengan beberapa tahap hingga sistem berjalan stabil. Kd / Derivative digunakan untuk mengurangi dan merespon kesalahan eror dengan baik dengan respon peredaman. Sistem yang digunakan masih mengalami overshoot, sehingga penambahan nilai Kd dapat membantu sistem untuk bekerja menjadi lebih stabil. Penggabungan Proportional dan Derivative menjadi sistem lebih sensitif yang mengakibatkan eror menjadi lebih kecil. Rumus PD dan nilai PD yang digunakan sebagai berikut.:

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{dt}{de} \quad (1)$$

$$= K_p \cdot \text{angle} \cdot \text{error} + K_d \cdot \text{angle} \cdot \text{Derivative} \quad (2)$$

Nilai PD yang digunakan sebagai berikut berikut :

$$\mathbf{KP = 9.0 , KI = 0.0 , KD = 7.0 ;}$$

Hasil dari penggunaan kontrol PD sudah optimal, dimana sistem dapat mengontrol kecepatan dan menggunakan PWM maksimum yang diberikan dengan rentang 1440 μ s - 1590 μ s. Selain itu putaran motor untuk mencapai sudut ROM untuk gerak Joint bahu ROM 0° - 90° sudah dapat tercapai dengan toleransi 2° untuk meningkatkan keamanan penggunaan. Algoritma kontrol PD berhasil untuk mengurangi respon sistem yang undershoot dengan menggunakan Proportional

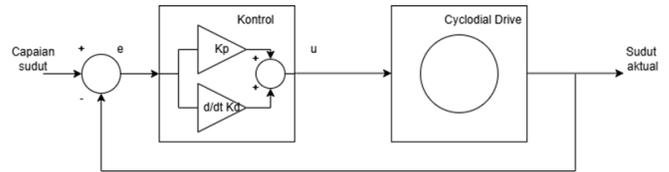


Fig. 9. Diagram kontrol PD

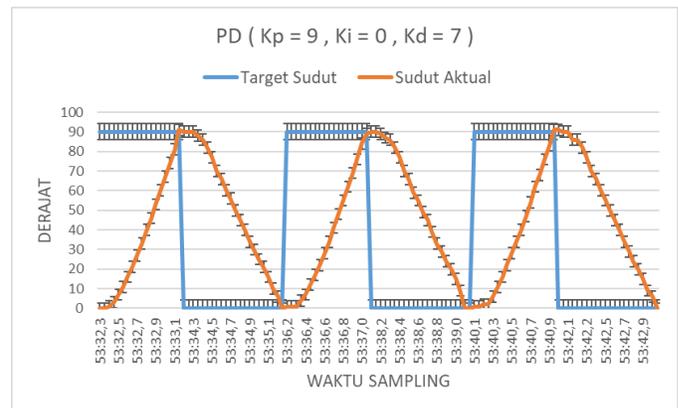


Fig. 10. Diagram Kestabilan Sudut

dan meredam overshoot serta osilasi dengan menggunakan Derivative. Dengan demikian algoritma PD memberikan kontribusi signifikan dalam pengontrolan kinerja sistem eksoskeleton fisioterapi Joint bahu 1 DoF. Hasil data dengan kontrol PD dapat dilihat pada gambar 10, 11 dan 12.

KESIMPULAN

Stroke merupakan penyebab utama kematian dan gangguan motorik global, memerlukan rehabilitasi intensif melalui fisioterapi gerakan pasif. Sistem eksoskeleton berbasis Cycloidal Drive (rasio 1:28) dirancang untuk meningkatkan torsi, dengan kontrol PD yang mengoptimalkan kehalusan dan akurasi gerakan melalui umpan balik encoder magnetik AS5600. Rentang Gerak (RoM) disesuaikan dengan terapi sendi bahu dan lengan. Analisis kuantitatif menunjukkan eksoskeleton ini mendukung terapi dengan RoM dan torsi optimal, sementara kontrol PD meningkatkan presisi dan kecepatan gerakan. Alat ini menawarkan solusi adaptif bagi pasien pasca-stroke, mempercepat rehabilitasi secara mandiri dan efektif.

- 1) Telah dirancang alat bantu gerak eksoskeleton untuk rehabilitasi pasca-stroke dengan 1 Degree of Freedom (DoF) pada pivot Rentang Gerak (ROM) 0° – 90° pada persendian bahu dan lengan atas manusia.
- 2) Implementasi sistem gerak menggunakan motor BLDC dengan aktuator Cycloidal Drive memungkinkan eksoskeleton melakukan gerakan putar untuk latihan pasif lengan manusia.
- 3) Algoritma kontrol PD telah diterapkan untuk meningkatkan kestabilan kinerja sistem mekatronika

fisioterapi, dengan tujuan mengurangi overshoot dan undershoot dalam gerakan.

- 4) Sistem komunikasi berbasis I2C telah dikembangkan untuk mengoordinasikan gerakan Joint bahu antara ESP32 sebagai Master dan Slave, memastikan sinkronisasi pergerakan.

SARAN

Dari penelitian ini ada beberapa kekurangan yang dapat diimplementasikan lebih lanjut untuk penelitian selanjutnya antara lain:

- 1) Membandingkan penggunaan motor BLDC lain.
- 2) Penerapan Cycloidal Drive berbahan selain 3D printing.
- 3) Pentuningan PD lebih komprehensif.
- 4) Penggunaan metode komunikasi ESP32 secara Bluetooth/WiFi untuk kontrol sistem jarak jauh.
- 5) Penerapan IoT pada sistem eksoskeleton.

Dari penelitian ini, terdapat beberapa aspek yang dapat ditingkatkan dan diimplementasikan lebih lanjut untuk penelitian selanjutnya. Dengan implementasi dari rekomendasi ini, diharapkan penelitian selanjutnya dapat lebih meningkatkan kinerja dan efisiensi dari sistem eksoskeleton fisioterapi, serta memberikan manfaat yang lebih besar bagi pengguna.

REFERENCES

- [1] N. Singh, M. Saini, N. Kumar, M. V. P. Srivastava, and A. Mehndiratta, "Evidence of neuroplasticity with robotic hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation: a randomized controlled trial," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, no. 1, May 2021. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00867-7>.
- [2] F. S. de, Luiz R.R. Carneiro, Davi, A. B. Soares, and R. de, "CULEX: a Cable-driven Upper Limb Exoskeleton for rehabilitation," *CULEX: a Cable-driven Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation*, Dec. 2021. doi: <https://doi.org/10.47573/xiiiseb.59>.
- [3] R. da S. Aramaki, "Análise da recuperação funcional no acidente vascular encefálico isquêmico após 30 dias de reabilitação em unidade pública de saúde," *Análise Da Recuperação Funcional No Acidente Vascular Encefálico Isquêmico Após 30 Dias De Reabilitação Em Unidade Pública De Saúde*, 2019. doi: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.978>.
- [4] E. Trigili et al., "Detection of movement onset using EMG signals for upper-limb exoskeletons in reaching tasks," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 16, no. 1, Mar. 2019. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0512-1>.
- [5] J. Howe et al., "The efficacy of a task model approach to ADL rehabilitation in stroke apraxia and action disorganisation syndrome: A randomised controlled trial," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 3, p. e0264678, Mar. 2022. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264678>.
- [6] H. Nguyen, K. Lebel, S. Bogard, E. Goubault, P. Boissy, and C. Duval, "Using Inertial Sensors to Automatically Detect and Segment Activities of Daily Living in People with Parkinson's Disease," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 197–204, Jan. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/tnsre.2017.2745418>.
- [7] S. Saranya, D. B. D. R., and A. Raghavan, "Assessing the Neuroplasticity of the Brain while Performing Reach and Grasp Tasks," *IEEE Xplore*, Apr. 01, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10126443>. [Accessed: Aug. 01, 2023].
- [8] D. Krisnawati and L. Anggiat, "Terapi Latihan Pada Kondisi Stroke: Kajian Literatur," *Jurnal Fisioterapi Terapan Indonesia*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 2021.
- [9] S. Brunnstrom, *Movement Therapy in Hemiplegia*. Facts and Comparisons, 1970.