

Peningkatan Capaian Torsi Motor BLDC untuk Implementasi Pada Robot Fisioterapi Pasien Pasca Stroke Dengan Modifikasi Rotor dan Jumlah Lilitan

Reza Humaidi¹, Dimas Adiputra², Isa Hafidz³

¹⁾²⁾³⁾ Fakultas Teknologi Elektro dan Industri Cerdas, Institut Teknologi Telkom Surabaya
Jl. Ketintang No. 156, Gayungan, Surabaya, Jawa Timur

Email: 1) rezahumaidi@student.itelkom-sby.ac.id, 2) adimas@ittelkom-sby.ac.id, 3) isa@ittelkom-sby.ac.id

ABSTRAK

Dalam upaya akselerasi SDG3, maka alat bantu kesehatan seperti Ankle Foot Orthosis (AFO) perlu dikembangkan dengan penambahan aktuator gerak sendi. AFO yang dimodifikasi ini kemudian disebut sebagai robot AFO. Aktuator yang dibutuhkan pada robot AFO harus memiliki capaian torsi yang cukup, tetapi dengan dimensi yang sekecil mungkin agar keseluruhan struktur AFO adalah padu. Ketersediaan aktuator tersebut, seperti motor BLDC, sulit ditemukan di dalam negeri, melainkan motor BLDC dengan dimensi dan capaian torsi kecil saja. Sehingga penelitian ini mengusulkan modifikasi motor BLDC pabrikan BM 5010-360KV untuk meningkatkan capaian torsinya. Urutan kegiatan adalah simulasi komponen utama motor BLDC, modifikasi motor BLDC, dan terakhir validasi performansi motor sebelum dan sesudah modifikasi. Empat jenis motor BLDC yang divalidasi yaitu: motor pabrikan, motor modifikasi stator, motor modifikasi rotor, dan motor modifikasi stator-rotor. Hasil pengujian putar kemudian menunjukkan bahwa motor dengan modifikasi stator memiliki daya yang lebih kecil daripada motor pabrikan yaitu 7.68 watt dibandingkan dengan 27 watt saat berputar dengan beban 50.5 gram. RPM motor juga menunjukkan bahwa motor dengan modifikasi stator memiliki capaian torsi yang lebih tinggi, di mana RPM motor stator baru adalah RPM 622.2 dan RPM motor pabrikan adalah 180.8 dengan beban yang sama. Sementara itu motor dengan rotor baru tidak dapat berputar sama sekali disebabkan oleh beban rotor baru yang lebih berat dari sebelumnya. Modifikasi stator telah berhasil meningkatkan capaian torsi motor, tapi modifikasi rotor belum berhasil dilakukan pada penelitian ini dan akan menjadi penelitian berikutnya. Modifikasi rotor kedepannya perlu dilakukan dengan mempertimbangkan jenis material untuk meminimalisir beban dari rotor modifikasi.

Kata Kunci : AFO, Motor BLDC, stator, rotor, torsi.

ABSTRACT

To accelerate SDG3, medical aids such as Ankle Foot Orthosis (AFO) need to be developed with actuators, which then referred to as robot AFO. The robot AFO requires actuator with sufficient torque capability, but small sizes to maintain the compactness. These actuators, such as BLDC motors, is difficult to find domestically in Indonesia, but only BLDC motors with small dimensions and torque attainment. Therefore, this research proposes a modification to the BM 5010-360KV manufactured BLDC motor to increase its torque output. The activities are simulation, modification, and validation of motor performance before and after modification. Four types of BLDC motor were validated, namely: factory motors, stator modified motor, rotor modified motor, and stator-rotor modifier motor. The results then showed that the stator modified motor had less power consumption than the factory motor, namely 7.68 watts compared to 27 watts when rotating with a 50.5 grams load. The motor RPM also shows that the stator modified motor had higher torque output, where the RPM of the stator modified motor is RPM 622.2, while the factory motor RPM is only 180.8 with the same load. Meanwhile, the modified rotor motor cannot rotate at all because the load on the new rotor is heavier than before. Modification of the stator has succeeded in increasing the torque achieved by the motor, but modification of the rotor has not been successful in this research. Future rotor modifications need to be carried out by considering the type of material to minimize the load from rotor modifications.

Keywords : AFO, BLDC motor, stator, rotor, torque

1 PENDAHULUAN

Stroke merupakan kondisi dimana terjadi penyumbatan atau terganggunya aliran darah ke otak yang dapat menyebabkan diantaranya lemas atau mati rasa pada bagian tubuh yang lain [1]. Setelah

melewati masa kritis stroke, pasien biasanya akan mengalami disabilitas motorik yang dapat dipulihkan melalui rehabilitasi. Rehabilitasi stroke sendiri merupakan suatu kegiatan dalam pemulihan yang membantu pasien dalam mempelajari kembali

segala keterampilannya yang sebelumnya hilang akibat mengalami stroke.

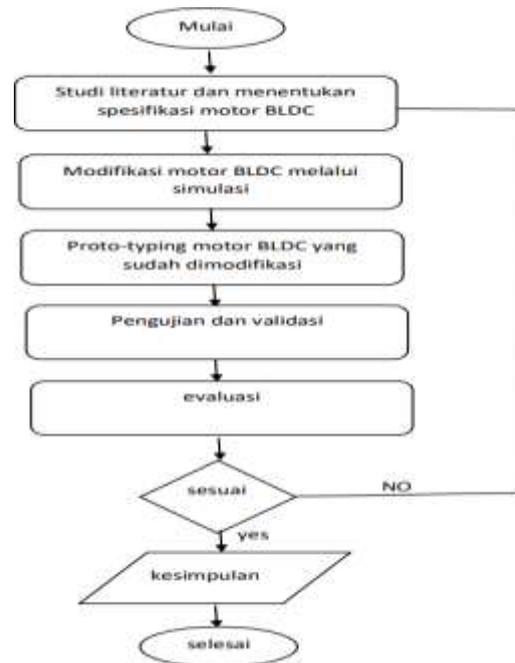
Di zaman ini, pasien yang menjalani rehabilitasi biasanya menggunakan alat bantu seperti ankle foot orthosis (AFO) yang biasanya digunakan untuk menahan posisi pergelangan kaki yang lemah karena kelenturan atau penurunan kekuatan kaki yang hilang akibat stroke. Kini AFO telah dikembangkan berbasis teknologi robotika dengan menambah fungsi bantuan daya pada sendi pergelangan kaki (selanjutnya disebut sebagai robot AFO). Bantuan ini dapat mencegah terjadinya *foot drop*, dengan secara aktif membantu dorsifleksi pergelangan kaki pada fase mengayun dan meminimalkan terjadinya *foot slap* pada kontak awal saat dilakukan fisioterapi [2]. Lebih lanjut lagi, satu siklus berjalan dapat dipandu oleh robot sehingga pasien pasca stroke dapat melakukan fisioterapi berjalan mandiri tanpa pendampingan langsung oleh fisioterapis.

Robot AFO merupakan suatu alat yang memberikan bantuan kepada pasien rehabilitasi tanpa membatasi gerakan pasien. Produk robot AFO sulit ditemukan di Indonesia karena minimnya produsen alat kesehatan elektro biomedis yang dapat dijumpai. Pengembangan robot AFO menggunakan aktuator sebagai penggerak menggantikan gerakan engkel pasien. Beberapa jenis aktuator yang pernah digunakan pada robot AFO adalah motor listrik, pneumatik, aktuator magnetorheologi, solenoida, dan pegas [2]. Aktuator yang menghasilkan gerakan akan menghasilkan robot AFO dengan kendali aktif. Sebaliknya, aktuator yang tidak menghasilkan gerakan akan menghasilkan robot AFO dengan kendali pasif.

Aktuator aktif yang biasanya digunakan adalah motor listrik, seperti motor *brushless DC* (BLDC). Motor listrik jenis ini populer dan biasa digunakan pada banyak bidang industri seperti otomotif, dirgantara, konsumen, medis, otomatisasi industri peralatan dan instrumentasi [3]. Motor BLDC memiliki kelebihan, yaitu torsi yang optimal, serta kebisingan yang rendah jika dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya. Robot AFO memerlukan aktuator yang memiliki torsi yang besar dan dimensi kecil. Maka dari itu, motor BLDC ini disarankan untuk implementasi pada robot AFO.

Akan tetapi, motor BLDC tersebut sulit ditemukan di *marketplace* Indonesia. Kalaupun ada, yang dapat dijumpai adalah motor BLDC dengan dimensi kecil dan torsi yang kecil juga. Oleh sebab itu, penelitian ini mengusulkan modifikasi motor BLDC sebagai aktuator pada robot AFO. Proses modifikasi motor BLDC pada penelitian ini meliputi aktivitas, simulasi desain menggunakan ANSYS motorcad, pembuatan prototipe motor BLDC yang

dimodifikasi, dan validasi performansi sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi (Gambar 1).



Gambar 1. Alur aktivitas modifikasi motor BLDC.

2 METODOLOGI

Motor yang dimodifikasi pada penelitian ini adalah motor BLDC seri BM 5010-360KV dengan spesifikasi sebagai berikut: (1) diameter 50 mm, (2) tebal 10 mm, (3) ukuran poros 4 mm, (4) 360 KV (rpm/v), dan (5) tegangan operasional 5 – 24 Volt. Adapun kelebihan dari motor ini adalah memiliki rotor dengan bahan aluminium dengan lima lubang pendingin model kipas. Rotor ini adalah bagian yang bergerak dari sebuah motor BLDC [4]. Rotor motor yang akan dimodifikasi ini memompa udara melalui motor saat dijalankan sehingga motor tidak cepat panas. Motor BLDC ini biasanya digunakan pada drone sehingga memiliki RPM yang tinggi tapi torsi yang rendah. Modifikasi kemudian dilakukan agar motor memiliki peningkatan torsi terutama saat berputar pada RPM rendah [5]. Gambar 2 menunjukkan motor BLDC BM 5010-360KV yang dimodifikasi.



Gambar 2. Motor BLDC BM 5010-360KV.

Mula-mula, studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan hasil penelitian sebelumnya dengan topik yang sama dari jurnal atau buku untuk mengetahui karakteristik dari motor BLDC. Kemudian, kegiatan dilanjutkan dengan menentukan spesifikasi motor BLDC yang diinginkan. Dalam menentukan spesifikasi motor BLDC yang diinginkan, maka perlu dilihat untuk apa motor BLDC tersebut akan digunakan. Dalam hal ini, motor BLDC akan digunakan sebagai aktuator pada robot AFO yang bermanfaat dalam fisioterapi engkel.

Pada robot AFO, motor BLDC harus mampu, setidaknya untuk mengangkat kaki pengguna. Studi literatur menunjukkan massa kaki adalah 1.45% dari massa tubuh manusia [6]. Dengan asumsi massa orang Indonesia pada umumnya adalah 60 Kg, dan panjang kaki orang Indonesia adalah 0.1745 m [7]. Massa kaki (m) orang Indonesia adalah

$$m = 60 \text{ Kg} \times 1.45\% = 0.87 \text{ Kg}$$

kemudian torsi (τ) yang diperlukan adalah

$$\tau = m \times g \times r$$

$$\tau = 0.87 \text{ Kg} \times 10 \frac{m}{s^2} \times 0.474 \times 0.1745 \text{ m}$$

$$\tau = 0.72 \text{ Nm}$$

dengan 0.474 adalah faktor pengali panjang kaki untuk mendapatkan jarak pusat massa dari kaki terhadap engkel. Dapat disimpulkan bahwa massa kaki yang perlu diangkat adalah 0.87 kg dengan kebutuhan torsi minimal yaitu 0.72 Nm. Agar lebih kuat, maka motor BLDC yang direncanakan untuk memiliki torsi maksimal 1 Nm. Terdapat juga Batasan masalah bahwa alat bantu yang dikenakan pasien pasca stroke harus minimalis dan tidak terlalu besar. Alat bantu yang terlalu besar dikhawatirkan akan menjadi beban tambahan saat pasien melakukan latihan [8]. Sehingga dalam modifikasi motor BLDC ini, dimensi dari motor secara keseluruhan tidak diubah sama sekali (tetap mempertahankan diameter 50 mm dan tebal 10 mm).

Simulasi pada software ANSYS motorcad kemudian dilakukan dengan target torsi yang ditentukan, yaitu 1 Nm. Motor akan digambar ulang dengan variasi pada beberapa parameter seperti jumlah slot stator, jumlah lilitan, jumlah turns dan jumlah magnet rotor. Bentuk stator tidak mengalami perubahan, tetapi hanya jumlah lilitannya saja. Sementara itu karena jumlah magnet rotor akan divariasikan, maka fisik rotor perlu difabrikasi ulang

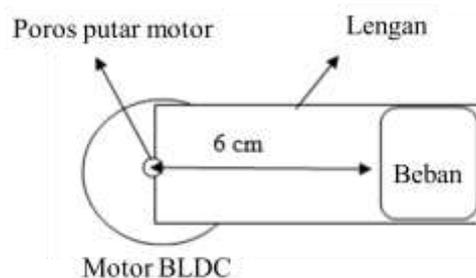
berdasarkan sketsa yang dicontohkan pada Gambar 3. Dapat dilihat bahwa modifikasi dilakukan pada slot magnet rotor.

Proses pembuatan prototipe rotor kemudian dilakukan menggunakan mesin CNC. Magnet yang digunakan adalah magnet neodmium. Kemudian lilitan stator juga akan dililit ulang dengan konfigurasi star. Jumlah magnet dan lilitan dari prototipe yang difabrikasi sesuai dengan rekomendasi simulasi ANSYS motorcad. Pada akhir pembuatan prototipe akan didapatkan empat jenis motor BLDC, yaitu motor BLDC pabrikan, motor BLDC dengan modifikasi stator, motor BLDC dengan modifikasi rotor dan motor BLDC dengan modifikasi stator-rotor.

Pengujian dan validasi performansi motor BLDC tersebut dilakukan dengan memberikan beban putar. Variasi beban yang diberikan adalah 5.5 gram, 20.5 gram, 35.5 gram, dan 50,5 gram. Beban diletakkan pada lengan motor dengan Panjang 6 cm, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Motor kemudian diputar dengan menggunakan Arduino dan Electronics Speed Controller (ESC) dengan pengaturan yang sama namun dengan beban yang divariasikan. Pengujian ini mengukur besarnya daya yang dikonsumsi motor BLDC dan juga RPM motor saat memutar beban. Hipotesanya adalah motor yang dimodifikasi akan mengkonsumsi daya yang lebih rendah untuk dapat berputar dengan RPM yang lebih tinggi dengan beban yang sama jika dibandingkan dengan motor yang tidak dimodifikasi. Perlu diketahui juga bahwa tingginya RPM sebanding dengan torsi yang dikeluarkan motor BLDC.



Gambar 3. Sketsa modifikasi rotor akibat penambahan jumlah magnet..



Gambar 4. Skema pengujian motor BLDC.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil dan pembahasan yang dibagi menjadi tiga bagian yaitu hasil simulasi, hasil implementasi dan hasil validasi performansi.

Tabel 1 menunjukkan simulasi dari motor BLDC pada software ANSYS motorcad. Seperti yang sudah disebutkan bahwa tujuan modifikasi adalah untuk mendapatkan motor BLDC dengan torsi maksimal 1 Nm tanpa mengubah diameter motor, yaitu 50 mm. Walaupun demikian, dapat dilihat bahwa simulasi dilakukan sampai dengan diameter 100 mm. Hal ini disebabkan oleh hasil simulasi yang tidak memungkinkan saat jumlah magnet sama dengan 18 buah dengan dimensi 50 mm.

Peningkatan dimensi dapat menambah jumlah slot stator yang kemudian juga akan menambah jumlah lilitan yang memungkinkan untuk direalisasikan. Dengan mempertahankan ketebalan 10 mm dan hanya variasi dari diameter, maka torsi maksimal sebesar 1 Nm dapat diperoleh pada motor BLDC dengan diameter 100 mm, jumlah slot stator 18, lilitan 54, turns 5, dan jumlah magnet 28.

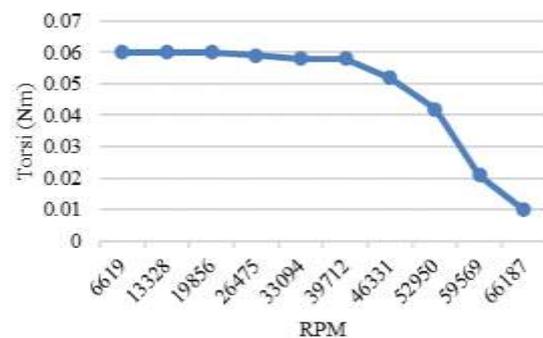
Akan tetapi, pada penelitian ini dimensi motor akan dipertahankan seluruhnya, sehingga parameter yang kemudian digunakan sebagai acuan pembuatan prototipe adalah jumlah slot stator 12, jumlah lilitan 34, jumlah turns 2 dan jumlah magnet 16. Dengan parameter tersebut, maka motor BLDC yang dimodifikasi akan memiliki capaian torsi maksimal 0.06 Nm atau sekitar 4.3 kali dari capaian torsi motor BLDC sebelum dimodifikasi (0.014 Nm).

Tabel 1 Hasil Simulasi Motor BLDC menggunakan software ANSYS motorcad.

Diameter (mm)	Jumlah slot stator	Lilitan	Turns	Jumlah magnet	Peak torque (Nm)
50	12	34	1	14	0,014
50	12	34	2	14	0,028
50	12	34	2	16	0,06
50	12	34	2	18	-
60	12	34	2	14	0,03
60	12	34	2	16	0,065
60	12	40	3	16	0,1
60	12	40	3	18	-
70	12	40	3	14	0,044
70	12	45	3	16	0,101
70	12	45	3	18	-
80	18	52	3	28	0,54

80	18	39	4	30	0,67
80	18	39	4	32	0,48
90	18	71	3	26	0,56
90	18	54	4	28	0,77
90	18	54	5	26	0,95
100	18	68	4	26	0,77
100	18	68	4	28	0,8
100	18	54	5	28	1

Gambar 5 menunjukkan capaian torsi dari motor BLDC yang dimodifikasi. Torsi puncak diperoleh ketika berada pada RPM kurang dari 30000 RPM. Lebih dari itu, maka capaian torsi akan terus menurun hingga mendekati 0 pada RPM 50000. Implementasi pada robot fisioterapi engkel tidak memerlukan motor BLDC berputar dengan RPM tinggi. Sehingga jika diperoleh torsi puncak terdapat pada RPM rendah, maka hasil desain adalah bagus.



Gambar 5. Simulasi torsi motor BLDC dengan modifikasi stator pada RPM rendah hingga RPM tinggi.

Kemudian prototipe dari motor BLDC dibuat dengan parameter yang telah ditentukan tadi, yaitu diameter 50 mm, jumlah slot stator 12, jumlah turns 2, dan jumlah magnet 16. Uji coba membandingkan 4 kondisi, yaitu motor pabrikan, motor dengan stator baru, motor dengan rotor baru dan motor dengan stator-rotor baru, seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Jumlah lilitan kemudian juga ditingkatkan mejadi 54. Hal ini memungkinkan karena ukuran kawat yang digunakan adalah 0.4 mm. Sehingga dapat dilihat bahwa stator baru memiliki jumlah lilitan yang lebih banyak daripada stator lama.

Hasil uji menunjukkan bahwa motor dengan rotor baru sama sekali tidak berputar. Penyebabnya terletak pada material, di mana rotor baru difabrikasi dengan menggunakan material stainless steel. Motor pabrikan dibuat dengan menggunakan material aluminium yang lebih ringan daripada stainless steel. Maka perbandingan atau uji performansi hanya

dilakukan antara motor pabrikan dan motor stator baru.

Tabel 2. Daftar motor yang difabrikasi

No.	Motor	Jumlah Stator	Jumlah Rotor	Lilitan	Ukuran kawat	Putar
1	Pabrik	12	14	34	0,5	Ya
2	Stator baru	12	14	54	0,4	Ya
3	Rotor baru	12	16	34	0,5	Tidak
4	Stator-rotor baru	12	16	54	0,4	Tidak

Tabel 3 menunjukkan perbandingan RPM, arus, tegangan dan daya konsumsi motor dengan stator baru dibandingkan dengan motor pabrikan. Semakin berat beban yang diberikan, maka semakin rendah RPM motor BLDC. Akan tetapi, dapat dilihat bahwa RPM motor dengan stator baru (MSB) adalah lebih tinggi daripada motor pabrikan (MP). Ketika beban 50.5 gram, RPM MSB adalah 622.2, sedangkan RPM MP adalah 180.8 saja. Ini adalah peningkatan yang tinggi, yaitu sebesar 244% dari RPM MP. Akan tetapi, penggunaan daya MSB adalah lebih rendah dibandingkan penggunaan daya MP, yaitu 7.68 watt dibandingkan dengan 27 watt untuk beban yang sama sebesar 50.5 gram (penurunan sebesar 71.5%). Hasil menunjukkan performansi dari motor BLDC yang dimodifikasi, di mana motor BLDC stator baru memiliki torsi yang lebih tinggi dengan penggunaan daya yang lebih rendah.

Tabel 3. Perbandingan performansi motor stator baru dengan motor pabrikan.

Beban (gr)	RPM		Arus (Ampere)		Tegangan (Volt)		Daya (Watt)	
	MS	MP	MSB	MP	MSB	MP	MSB	MP
5,5	925,4	677,1	0.21	0.53	12	12	2,52	6,36
20,5	771,2	590,3	0.36	1,04	12	12	4,32	12,48
35,5	680,7	380,5	0.43	1.23	12	12	5,16	14,76
50,5	622,2	180,8	0.64	2,25	12	12	7,68	27

*MSB: Motor stator baru

**MP: Motor pabrikan

4 KESIMPULAN

Penelitian telah melakukan modifikasi motor BLDC BM 5010 360 kv yang telah dilakukan dengan beberapa tahapan. Beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah:

- Simulasi ANSYS motorcad yang dilakukan untuk mendapatkan spesifikasi motor BLDC yang diinginkan tanpa mengubah dimensi menunjukkan bahwa torsi sebesar 1 Nm tidak dapat diperoleh pada diameter 50 mm. Jika ketebalan tetap dipertahankan, maka torsi sebesar 1 Nm hanya dapat diperoleh ketika motor BLDC memiliki diameter 100 mm, jumlah slot stator 18, jumlah lilitan 54, jumlah turns 5, dan jumlah magnet 28.
- Modifikasi motor BLDC telah dilakukan pada stator dan rotor. Untuk stator, modifikasi dilakukan pada jumlah lilitan dan turns. Peningkatan jumlah lilitan juga dilakukan dengan mengecilkan jenis kawat dari 0.5 mm ke 0.4 mm agar dapat menghasilkan jumlah lilitan sebanyak 54. Rotor yang dimodifikasi telah memiliki 16 slot magnet dengan fabrikasi menggunakan material stainless steel.
- Pengujian motor menggunakan variasi beban putar telah dilakukan dengan membandingkan 4 buah motor BLDC, yaitu motor pabrikan, motor stator baru, motor rotor baru, dan motor stator-rotor baru. Motor dengan rotor baru tidak dapat berputar disebabkan oleh massa yang terlalu berat akibat dari material fabrikasi yang digunakan. Namun, motor dengan stator baru menunjukkan hasil yang memuaskan. Motor dengan stator baru dapat berputar dengan torsi yang lebih tinggi namun dengan konsumsi daya yang rendah jika dibandingkan dengan motor pabrikan. Saat berputar dengan beban 50.5 gram, motor dengan stator baru berputar dengan RPM sebesar 622.2 dan konsumsi daya 7.68 watt. Sementara motor pabrikan hanya berputar dengan RPM sebesar 180.8 dengan konsumsi daya sebesar 27 watt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kemenkes RI, "Infodatin-stroke-dont-be-the-one." 2019.
- [2] D. Adiputra *et al.*, "A Review on the Control of the Mechanical Properties of Ankle Foot Orthosis for Gait Assistance," *Actuators*, vol. 8, no. 1, p. 10, Jan. 2019, doi: 10.3390/act8010010.
- [3] Lavitry, Riser, and Fourny, "Myasthénie guérie par l'ablation d'un thymus non tumoral,"

Bull. Mém. Soci  t  , vol. 69, no. 21–23, pp. 764–767, 1953.

- [4] A. Kristianto, “PERENCANAAN LILITAN MOTOR INDUKSI 3 FASA 220/380 V,” d3ta, Universitas Negeri Yogyakarta, 2016. Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://eprints.uny.ac.id/62072/>
- [5] Daifir Rohman Nurdiansyah, Surya Aditya Putra, Rafidan Azimansyah, Bagus Dwi Kurniawan, Andhika Dasilva, and Rustandy Putra, “PENGARUH DAYA DAN TORSI UNTUK PERFORMA SEBUAH MESIN EFFECT OF POWER AND TORQUE THE PERFORMANCE OF A MACHINE.” 2018.
- [6] David Winter, “Biomechanics as an Interdiscipline,” in *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009, pp. 1–13. doi: 10.1002/9780470549148.ch1.
- [7] A. S. Zamzamy, “DESAIN DAN PEMBUATAN MODEL KAFO (KNEE ANKLE FOOT ORTHOSIS) BERDASARKAN ANTROPOMETRI TUBUH ORANG INDONESIA,” *Univ. Islam Indones.*, Oct. 2018, Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/11251>
- [8] Muhammad Hablul Barri, Ardaputra Ryandika, Ardani Cesario, and Augie Widyotriatmo, “Desain dan Kontrol Posisi dari Arm Manipulator Robot Sebagai Alat Rehabilitasi Pasien Pasca Stroke | Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi,” *J. Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi*, vol. 9, no. 2, p. 485816, 2017.