

PERANCANGAN SISTEM KONTROL KAKI BIONIK MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

Muhammad Ritzky Novhar¹, Rifky Ismail^{1,2}, Joga Dharma Setiawan^{1,2}

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Center for Biomechanics Biomaterial Biomechatronics and Biosignal Processing, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: ritzky@students.undip.ac.id

Abstrak

Amputasi adalah penghilangan anggota tubuh yang disebabkan cedera atau penyakit. Salah satunya, amputasi transtibial, merupakan metode perawatan yang dipakai untuk kaki yang tidak bisa berfungsi kembali. Amputasi ini dilakukan pada bagian bawah lutut. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah alat yang dapat menggantikan fungsi tubuh yang hilang. Pada penelitian ini, dilakukan perancangan dan pengujian sistem kontrol untuk mengendalikan kaki bionik yang sudah dirancang sebelumnya menggunakan algoritma *fuzzy logic control*. Sistem kontrol menggunakan potensiometer sebagai *input* dan motor DC sebagai aktuator mekanik. Langkah yang pertama dilakukan adalah melakukan kajian terhadap gerakan kaki manusia yang normal. Kemudian pembuatan sistem kontrol, membuat sistem rangkaian elektrik, dan integrasi antara komponen mekanik dan elektrik dalam sistem kontrol. Algoritma *fuzzy logic control* menggunakan MATLAB Simulink. Kemudian dilakukan pengujian untuk mengambil data respons transien dari sistem kontrol, serta pengujian pola gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi. Berdasarkan hasil pengujian, sistem kontrol kaki bionik memiliki respons transien yaitu *delay time* sebesar 0,2 detik, *rise time* sebesar 0,3 detik, *peak time* sebesar 0,4 detik, dan *settling time* sebesar 0,7 detik. Sistem kontrol ini juga memiliki *steady state error* sebesar 0,02% dan *overshoot* sebesar 2,5°. Berdasarkan pengujian pola gerakan, kaki bionik dapat melakukan gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi secara berulang secara konsisten.

Kata kunci: amputasi transtibial; *fuzzy logic control*; kaki bionik

Abstract

Amputation is the loss of a limb caused by injuries or diseases. One type, transtibial amputation, is a treatment used for a non-functioning foot. It is an amputation done to the below-knee area. Therefore, a device that can replace the missing bodily function is needed. In this research, design and testing are done on a control system for a bionic foot that has been designed previously, using fuzzy logic control. The control system uses potentiometer as input and DC motor as mechanical actuator. The first step is studying a normal human gait cycle. Then, design of control system, manufacture of electrical circuits, and integration between the mechanical and electrical components in the control system is done. The fuzzy logic control algorithm is designed using MATLAB Simulink. Testing is done to acquire transient response data, and to test dorsiflexion and plantarflexion movement. Based on the results, the bionic foot has transient responses such as 0.2 seconds delay time, 0.3 seconds rise time, 0.4 seconds peak time, and 0.7 seconds setting time. The control system also has a steady state error of 0.02% and 2.5° of overshoot. Based on the movement pattern testing, the bionic foot can perform multiple movements of dorsiflexion and plantarflexion with sufficient consistency.

Keywords: bionic feet; *fuzzy logic control*; transtibial amputation

1. Pendahuluan

Pada tahun 2015, kenaikan jumlah amputee, atau orang yang kehilangan bagian badannya karena diamputasi diprediksi akan naik sebesar 9.000 orang per tahun. Pada tahun 2011 saja, jumlah amputee sekitar 1 juta orang [1]. Hilangnya bagian badan ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti kecelakaan, atau untuk mencegah suatu penyakit atau infeksi dari merambat ke seluruh tubuh. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Istiqomah dkk. [2] membahas tentang desain dan analisis dari kaki prosthesis dan ada juga yang membahas tentang review bionic prosthesis [3].

Sebagai solusi bagi para amputee ini, beberapa alat pembantu sudah dikembangkan walaupun memiliki fungsi dan batasan yang berbeda-beda. Bentuk paling dasar dari solusi yang dapat dipakai oleh para amputee adalah passive prosthetic feet atau kaki buatan pasif, yang dirancang menyerupai kaki manusia sehingga dapat membantu menggantikan fungsi kaki yang diamputasi namun, memiliki fungsi yang terbatas karena tidak fleksibel dan tidak bisa bergerak mengikuti siklus gerakan kaki manusia. Karena hal ini, passive prosthetic feet dapat mengakibatkan kelelahan dan cedera pada penggunaannya [4]. Hal ini disebabkan karena passive prosthetic feet tidak dapat memberikan kerja tambahan, sehingga beban tersebut ditanggung oleh badan amputee.

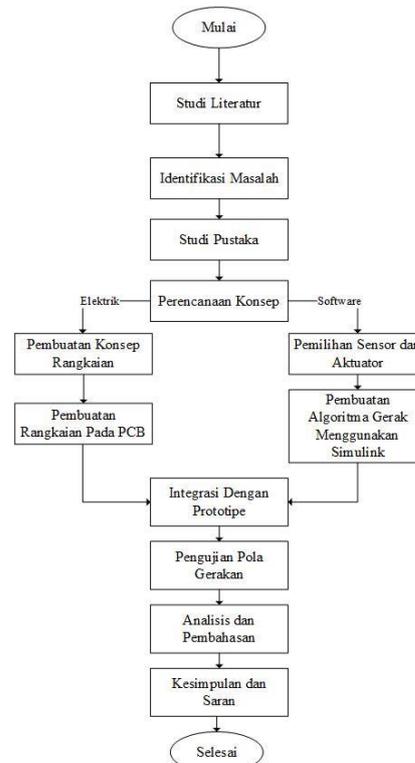
Dari passive prosthetic feet, dikembangkan tahap berikutnya yaitu bionic feet, atau kaki bionik. Alat ini menggabungkan dua unsur, yaitu unsur biologis (rancangan yang menyerupai kaki manusia), dan unsur mekanis (meniru gerakan kaki manusia). Alat ini memiliki sistem aktif yang dapat mengontrol beberapa elemen gerak dari alat tersebut, sehingga dapat memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi. Selain itu, alat bantu gerak ini dapat memberikan kerja tambahan dengan adanya motor penggerak, sehingga meminimalisir resiko cedera pada penggunaannya.

Untuk bisa berfungsi sebagai pengganti kaki yang memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi, sebuah kaki bionik harus dapat meniru gerakan kaki manusia. Gerakan ini dikenal dengan gait cycle. Gait cycle sendiri didefinisikan sebagai jeda waktu antara tiap bagian dari proses berjalan [5].

Dalam perancangan suatu model bionic feet yang baru, dibutuhkan beberapa tahap sebelum bionic feet ini bisa dipakai oleh khalayak massa. Beberapa tahap itu adalah pembuatan konsep rancangan, pembuatan sistem kontrol, dan manufacturing atau produksi alat tersebut. Pada penelitian ini, perancangan sistem kontrol dilakukan dengan menggunakan software Matlab Simulink. Perancangan sistem kontrol ini dilakukan dengan menggunakan data gait cycle.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan sebuah diagram alir untuk mempermudah proses penelitian. Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

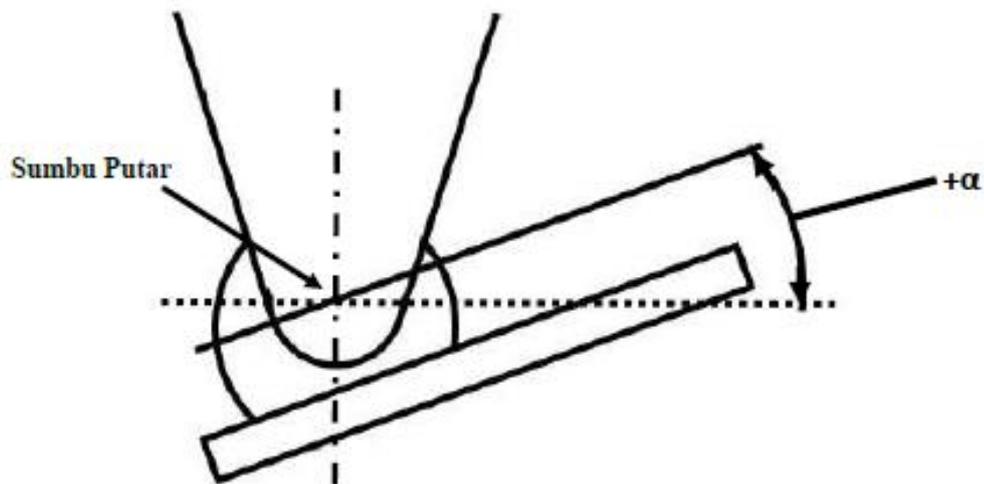
Berdasarkan Gambar 1, dapat dilihat bahwa tahap pertama yang dilakukan adalah melakukan studi literatur untuk mempelajari siklus berjalan manusia yang normal dan ideal. Data ini digunakan untuk menjadi dasar perancangan algoritma sistem kontrol. Tahapan berikutnya adalah merencanakan konsep sistem kontrol untuk kaki bionik, lalu membuat rangkaian elektrik dan mekanik, serta integrasi dari komponen perangkat keras dan perangkat lunak dari sistem

kontrol. Setelah semua perangkat terintegrasi, dilakukan pengujian respons transien dan pengujian siklus untuk melihat performa dari sistem kontrol yang sudah dibuat.

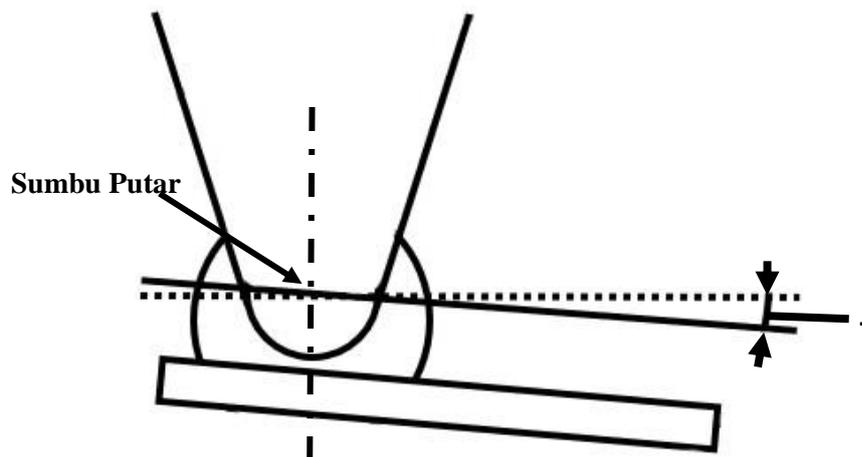
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Gerakan Kaki Manusia Normal

Pembuatan sistem kontrol kaki bionik ini dipusatkan pada korban amputasi transtibial. Amputasi transtibial adalah amputasi yang melalui *fibia* dan *fibula*, yang sering disebut amputasi bawah lutut [6]. Amputasi ini dapat disebabkan trauma, tumor, infeksi, atau defisiensi kaki [7]. Agar bisa meniru gerakan kaki yang normal, tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah mempelajari pola gerakan kaki manusia. Pola berjalan manusia adalah urutan gerakan yang menghasilkan gerakan badan ke arah depan [8]. Gerakan yang dipelajari tersebut, dan yang akan ditiru oleh kaki bionik hasil penelitian ini, adalah gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan kedua gerakan ini.

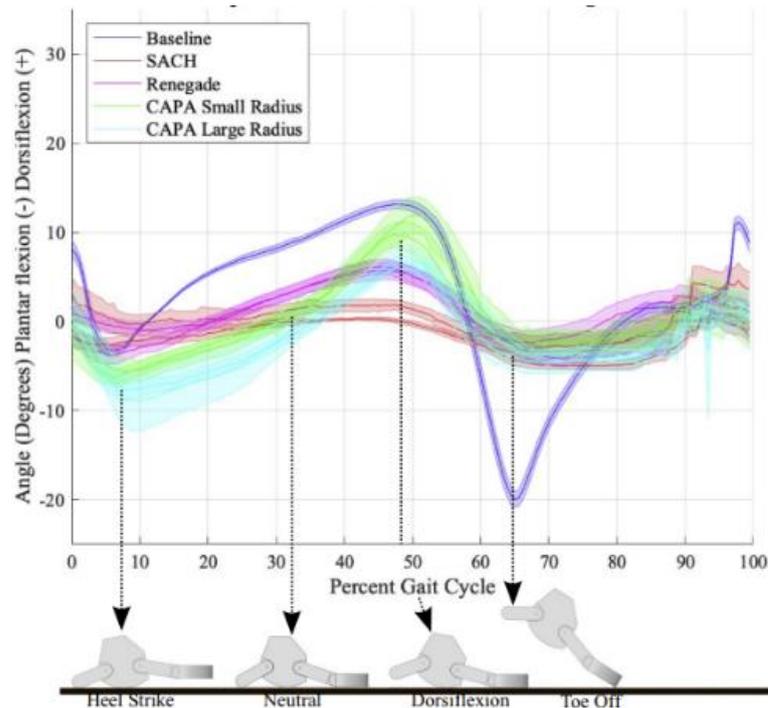


Gambar 2. Gerakan dorsifleksi



Gambar 3. Gerakan plantarfleksi

Berdasarkan kedua gambar tersebut, dapat dilihat bahwa sudut telapak kaki diukur relatif terhadap lutut bagian bawah. Selain melakukan kedua gerakan tersebut, kaki bionik juga harus memiliki kemampuan untuk mengendalikan tingkatan dari kedua gerakan tersebut, diukur dengan besaran sudut relatif telapak kaki dengan lutut bagian bawah. Sudut telapak kaki ini akan berubah-ubah sepanjang satu siklus gerakan berjalan, sehingga sistem kontrol kaki bionik pada penelitian ini harus mampu merubah sudut kaki bionik dengan cukup cepat dan akurat. Gambar 4 menunjukkan besarnya sudut yang dialami telapak kaki saat melakukan gerakan berjalan normal.



Gambar 4. Gerakan kaki manusia normal [9]

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat gerakan kaki manusia yang normal, ditandakan dengan garis berwarna biru. Dapat disimpulkan berdasarkan data tersebut bahwa kaki manusia perlu memiliki jangkauan gerakan antara $+5^\circ$ sampai dengan -20° .

3.2. Sistem Kontrol Kaki Bionik

Berdasarkan data yang sudah dikumpulkan pada tahapan sebelumnya, dirancang sebuah sistem kontrol yang dapat mengendalikan kaki bionik sehingga memenuhi persyaratan-persyaratan tersebut. Pada penelitian ini, sistem kontrol yang dibuat menggunakan dua buah potensiometer, satu buah mikrokontroler Arduino Mega 2560, satu buah modul pengendali motor L298N, dan satu buah aktuator berupa motor DC. Motor DC kemudian disambungkan dengan dua buah *spur gear* dan *lead screw* sehingga dapat menggerakkan kaki bionik.

Sistem kontrol pada penelitian ini menggunakan dua potensiometer untuk *input* dari pengguna dan *feedback* dari kaki bionik. Kedua data ini akan dibandingkan sehingga sistem kontrol dapat menghitung kecepatan motor DC yang ideal untuk mengubah sudut kaki bionik. Sinyal yang dikeluarkan oleh mikrokontroler kemudian akan diproses oleh *motor driver L298N* sehingga dapat menggerakkan aktuator motor DC.

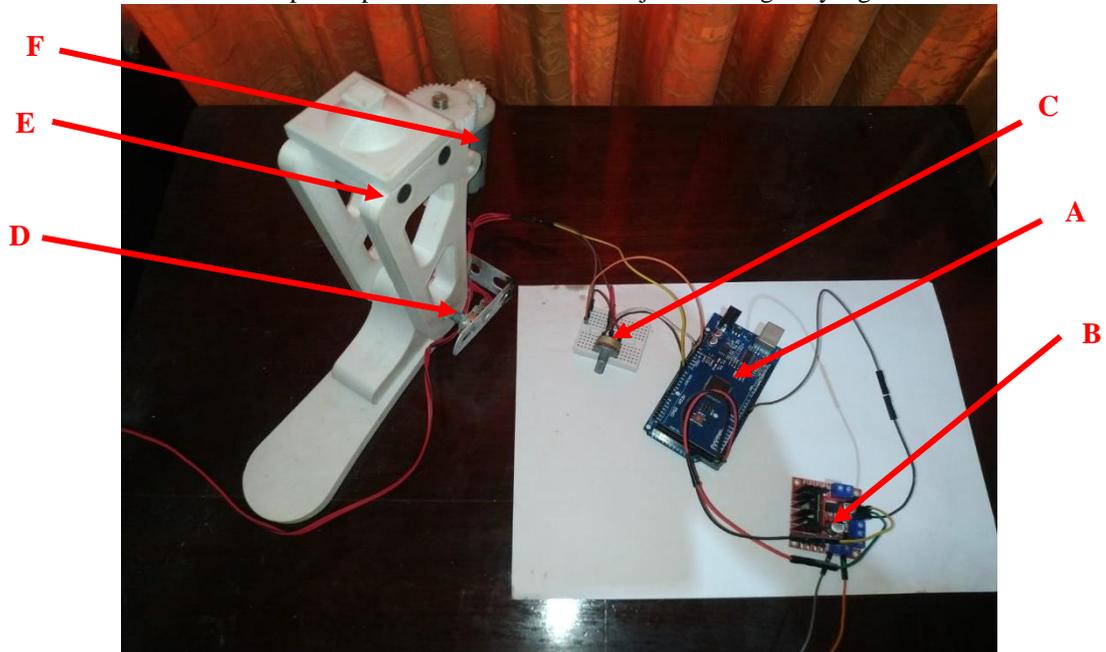
Untuk bisa mengendalikan sebuah sistem, mikrokontroler yang ada pada penelitian ini perlu diprogram. Pemrograman mikrokontroler ini dilakukan menggunakan *software* MATLAB dan modul Simulink. *Software* ini digunakan karena kemudahan dalam membuat algoritma kontrol. Adapun sistem yang digunakan untuk menghitung *input* dan mengeluarkan *output* adalah sistem *closed loop*, dimana *output* yang diberikan *controller* akan diberikan kembali kepada *controller* untuk dibandingkan [10]. Sistem ini dipakai karena dapat memberikan jangkauan nilai yang lebih baik dibandingkan *discrete logic* [11].

Algoritma sistem kontrol terbagi menjadi beberapa bagian, yaitu sub-bagian *Input* yang berisi algoritma pembacaan potensiometer, *Fuzzy Logic* yang berisi algoritma *fuzzy logic control*, *L298N (Output)* yang berisi algoritma *output* untuk *motor driver L298N*, dan *Monitor* yang berisi algoritma komunikasi serial dengan komputer menggunakan USB.

Sub-bagian *Input* memiliki algoritma untuk membaca sinyal yang dikirimkan dari kedua buah potensiometer yang dipakai. Kedua sinyal tersebut kemudian disetarakan dan diteruskan kepada blok fungsi error, yang akan mengurangi nilai sudut *input* dengan nilai angka sudut *feedback*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *error* yang akan digunakan algoritma *fuzzy logic* untuk memberikan perintah penggerak motor DC. Perintah tersebut diteruskan kepada sub-bagian *L298N (Output)*, yang memiliki algoritma untuk mengendalikan *motor driver L298N*. Sub-bagian ini memiliki kemampuan untuk mengendalikan kecepatan motor DC menggunakan *Pulse Width Modulation* dan arah putaran motor DC. Sub-bagian *Monitor* memiliki algoritma untuk melakukan komunikasi langsung dengan sebuah komputer melalui komunikasi USB. Hal ini dilakukan dengan pertama merubah *sampling rate* dari data yang ingin dikirimkan melalui jalur USB, kemudian menggabungkan data tersebut melalui blok fungsi *multiplexer*.

3.3. Integrasi Sistem Kontrol dengan Prototipe Kaki Bionik

Setelah elemen-elemen sistem kontrol sudah dirancang, tahap berikutnya yang dilakukan adalah melakukan integrasi antara sistem kontrol dan prototipe fisik. Gambar 5 menunjukkan integrasi yang sudah dilakukan.



Gambar 5. Integrasi prototipe dengan sistem kontrol

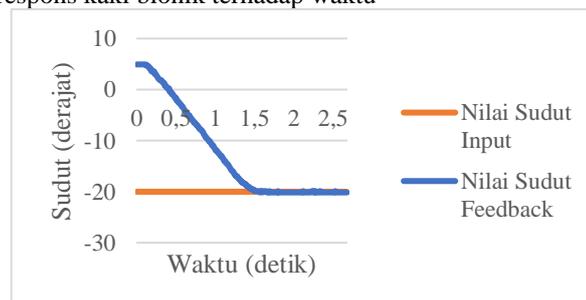
Berdasarkan Gambar 5, dapat dilihat integrasi yang sudah dilakukan antara komponen sistem kontrol dengan kaki bionik yang digunakan. Komponen-komponen tersebut adalah:

1. Komponen A: Mikrokontroler Arduino Mega 2560
2. Komponen B: *Motor Driver L298N*
3. Komponen C: *Breadboard* dengan potensiometer *input*
4. Komponen D: Potensiometer *feedback*
5. Komponen E: Kaki bionik
6. Komponen F: Motor DC

3.4. Pengujian Kaki Bionik

Setelah integrasi prototipe dengan elemen elektrik dan mekanik sistem kontrol dilakukan, tahap berikutnya yang dilakukan adalah melakukan pengujian. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa kaki bionik sudah dapat melakukan gerakan dengan baik, dan dapat merespon pada *input* yang diberikan.

Pengujian dilakukan dengan MATLAB Simulink, dimana respons dan gerakan dari kaki bionik dapat dilihat melalui grafik sudut kaki bionik, dihitung oleh potensiometer *feedback*. Gambar 9 menunjukkan grafik sudut kaki bionik saat diberikan *input*. Garis berwarna biru menandakan nilai sudut yang dihitung oleh potensiometer *feedback*, sedangkan garis berwarna jingga menandakan sudut yang diberikan oleh blok fungsi *step up input*. Untuk dapat mengukur respons dari kaki bionik, diperlukan pengukuran respons transien, terdiri dari *rise time*, *delay time*, *peak time*, dan *settling time* [12]. Gambar 6 menunjukkan grafik respons kaki bionik terhadap waktu



Gambar 6. Grafik respons kaki bionik terhadap waktu

Berdasarkan Gambar 6, dapat dilihat bahwa kaki bionik dapat merespon pada *input* yang diberikan setelah 0,2 detik. Selain respons dari kaki bionik yang cukup baik, dilakukan juga pengukuran respons transien sistem kontrol. Parameter-parameter yang diukur untuk mendapatkan data respons transien adalah:

1. *Delay Time* sebesar 0,8 detik;
2. *Rise Time* sebesar 1,3 detik;
3. *Peak Time* sebesar 1,4 detik; dan
4. *Settling Time* sebesar 1,5 detik.

Setelah melakukan pengujian respons transien, tahap berikutnya adalah melakukan pengujian pola gerakan. Pengujian ini dilakukan dengan mengulangi gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi pada kaki bionik selama beberapa kali dan melihat konsistensi gerakan yang dilakukan kaki bionik. Berdasarkan pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa kaki bionik dapat melakukan gerakan dorsifleksi berulang kali dan konsisten.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuat sistem kontrol yang dapat digunakan untuk mengendalikan prototipe kaki bionik, sehingga kaki bionik dapat melakukan gerakan dorsifleksi dan plantarfleksi. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, sistem kontrol ini memiliki respons transien yaitu *delay time* sebesar 0,8 detik, *rise time* sebesar 1,3 detik, *peak time* sebesar 1,4 detik, *settling time* sebesar 1,5 detik, dan *steady state error* sebesar 0,02%. Selain itu, hasil pengujian siklus menunjukkan bahwa sistem kontrol ini dapat mengendalikan kaki bionik secara konsisten.

5. Daftar Pustaka

- [1]. Siswadi, A., "Korban Amputasi Bertambah, ITB Bikin Kaki Palsu", <https://tekno.tempo.co/read/712694/korban-amputasi-bertambah-itb-bikin-kaki-palsu>, diakses: 19 Januari 2021.
- [2]. Istiqomah AF, Ismail R, Fitriyana DF, Sulisty S, Fardinansyah AP, Safitri MAN, et al. Design and Analysis of The Energy Storage and Return (ESAR) Foot Prosthesis Using Finite Element Method. *Journal of Biomedical Science and Bioengineering* [Internet]. 2022 Jan 6 [cited 2023 Jan 23];1(2):59–64. Available from: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jbiomes/article/view/12717>
- [3]. Ismawan AR, Prahasto T, Ariyanto M, Setiyana B, Novriansyah R. A Review of Existing Transtibial Bionic Prosthesis: Mechanical Design, Actuators and Power Transmission. *Journal of Biomedical Science and Bioengineering* [Internet]. 2022 Jan 6 [cited 2023 Jan 23];1(2):65–72. Available from: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jbiomes/article/view/13266>
- [4]. Hill, D., & Herr, H., 2013, "Effects of a Powered Ankle-foot Prosthesis on Kinetic Loading of the Contralateral Limb: A Case Series", *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*.
- [5]. Laribi, M., Zegloul, S., 2020, "Human Lower Limb Operation Tracking Via Motion Capture Systems, Design and Operation of Human Locomotion Systems", Elsevier.
- [6]. Edelman, J., 2007, "Chapter 12: Amputations and Prostheses, Physical Rehabilitations", Saunders.
- [7]. Cherelle, P., Grosu, V., Matthys, A., Vanderborght, B., & Lefeber, D., 2014, "Design and Validation of the Ankle Mimicking Prosthetic (AMP-) Foot 2.0", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol 22, No. 1, January 2014.
- [8]. Shah, K., Solan, M., Dawe, E., 2020, "The Gait Cycle and its Variations with Diseases and Injury", *Orthopedics and Trauma*.
- [9]. Schlafly, M., Reed, K. B., 2019, "Novel Passive Ankle-Foot Prosthesis Mimics Able-Bodied Ankle Angles and Ground Reaction Forces", *Clinical Biomechanics* 72 (2020), pp. 202-210.
- [10]. Canete, J., Galindo, C., & Inmaculada, M., 2011, "Systems Engineering and Automation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [11]. Setiawan, A., Sukmasetya, P., Arumi, E. R., 2020, "Fuzzy Membership Functions Analysis for Usability Evaluation of Online Credit Hour Form", *Journal of Engineering Science and Technology*, October 2020.
- [12]. Ogata, K., 2010, "Modern Control Engineering: Fifth Edition", Prentice Hall.