

# Pemodelan Dinamik Robot Lengan 2-DOF Menggunakan *Denavit–Hartenberg* Untuk Evaluasi Torsi Sendi

Anisa Ulya Darajat<sup>1\*</sup>, Umi Murdika<sup>1</sup>, Aryanto<sup>1</sup> dan Ageng Sadnowo Repelianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

Jalan Soemantri Brojonegoro No 1, Bandar Lampung 35145

\*Corresponding author E-mail: anisa.ulya@eng.unila.ac.id

Naskah Masuk: Mei 2026; Diterima: Juni 2026; Terbit: Juli 2026

## ABSTRACT

The advancement of robotics demands robotic manipulators to operate with high precision and safety. Therefore, control design cannot rely solely on kinematic analysis but must incorporate dynamic modeling capable of describing the relationship between joint position, velocity, acceleration, and actuator torque. This research develops a dynamic model of a two-degree-of-freedom robotic arm based on Denavit–Hartenberg (DH) parameters and the Lagrange–Euler formulation to evaluate the joint torque requirements along a predefined motion trajectory. The dynamic model is derived symbolically, resulting in the formulation  $\tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q)$  and is evaluated numerically using a sinusoidal trajectory with parameters  $m_1 = 0.75 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 0.40 \text{ kg}$ ,  $L_1 = 0.19 \text{ m}$ ,  $L_2 = 0.20 \text{ m}$ , and  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  over a time interval of 0–5 s ( $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ ). Simulation results indicate that the joint position responses reach approximately  $q_1 \approx \pm 1 \text{ rad}$  and  $q_2 \approx 0.5 \text{ rad}$ . Meanwhile, the joint torques exhibit significant differences: the second joint torque is dominant, ranging between  $\tau_2 \approx 1.05$  and  $1.20 \text{ Nm}$ , whereas the first joint torque remains relatively small, around  $\tau_1 \approx -0.04$  to  $0.04 \text{ Nm}$ . These results indicate that the largest effective load is concentrated on the second joint. Therefore, actuator selection and dynamic compensation strategies should be prioritized for Joint 2.

**Keywords:** 2-DOF robotic arm, Denavit–Hartenberg method, Lagrange–Euler formulation, dynamic modeling, joint torque.

## ABSTRAK

Perkembangan robotika menuntut robot lengan bekerja dengan presisi dan aman, sehingga perancangan kendali tidak cukup hanya mengandalkan kinematika, tetapi memerlukan model dinamik yang mampu memetakan hubungan antara posisi, kecepatan, percepatan sendi, dan torsi aktuator. Penelitian ini merancang model dinamika robot lengan 2-DOF menggunakan parameter Denavit–Hartenberg (DH) dan pendekatan Lagrange–Euler untuk menganalisis kebutuhan torsi pada setiap sendi selama mengikuti lintasan gerak tertentu. Model dinamik diturunkan secara simbolik sehingga diperoleh bentuk  $\tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q)$ , kemudian dievaluasi secara numerik pada lintasan sinusoidal dengan parameter  $m_1 = 0,75 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 0,40 \text{ kg}$ ,  $L_1 = 0,19 \text{ m}$ ,  $L_2 = 0,20 \text{ m}$ , dan  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  selama 0–5 s ( $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ ). Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon posisi sendi mencapai sekitar  $q_1 \approx \pm 1 \text{ rad}$  dan  $q_2 \approx 0,5 \text{ rad}$ , sedangkan torsi sendi memperlihatkan perbedaan kebutuhan yang signifikan: torsi sendi kedua dominan dan berada pada kisaran  $\tau_2 \approx 1,05$ – $1,20 \text{ Nm}$ , sementara torsi sendi pertama relatif kecil di sekitar  $\tau_1 \approx -0,04$  hingga  $0,04 \text{ Nm}$ . Sehingga dari hasil penelitian mengindikasikan bahwa beban efektif terbesar berada pada sendi kedua, sehingga pemilihan aktuator dan strategi kompensasi dinamika, perlu diprioritaskan terutama pada Joint 2.

**Kata Kunci:** Robot lengan 2-DOF, Denavit–Hartenberg, Lagrange–Euler, pemodelan dinamik, torsi sendi.

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan robotika saat ini menuntut robot lengan untuk mampu bekerja secara presisi, adaptif, dan aman pada berbagai skenario aplikasi, seperti otomasi industri, layanan kesehatan, sistem edukasi, serta pengujian konsep kendali robotik. Perkembangan sistem aktuator, kendali servo, dan kendali perangkat elektronik juga menunjukkan bahwa aspek pengendalian presisi menjadi bagian penting dalam implementasi sistem otomatis modern [1], [2]. Dalam aplikasi tersebut, robot lengan tidak hanya dituntut mampu

mencapai posisi tertentu, tetapi juga harus mampu bergerak dengan respons dinamik yang sesuai. Oleh karena itu, perancangan sistem robot lengan tidak cukup hanya didasarkan pada analisis kinematika, melainkan juga memerlukan pemodelan dinamik yang mampu menggambarkan hubungan antara posisi, kecepatan, percepatan sendi, dan torsi aktuator [3], [4].

Robot lengan planar 2-DOF merupakan salah satu konfigurasi dasar yang banyak digunakan dalam kajian pemodelan dan pengendalian robot manipulator. Meskipun

memiliki struktur yang relatif sederhana, robot lengan 2-DOF tetap merepresentasikan karakteristik penting dari sistem robotik, seperti pengaruh massa *link*, panjang *link*, inersia, kopling antar-sendi, gaya *Coriolis-sentrifugal*, dan pengaruh gravitasi. Dengan demikian, pemodelan dinamik robot lengan 2-DOF menjadi penting karena dapat digunakan sebagai dasar untuk memahami kebutuhan torsi pada masing-masing sendi sebelum sistem diterapkan pada tahap perancangan aktuator dan sistem kendali [5].

Pendekatan yang dapat digunakan untuk menyusun model dinamik robot lengan adalah formulasi *Lagrange-Euler* [6]. Formulasi ini menurunkan persamaan gerak berdasarkan energi kinetik dan energi potensial sistem, sehingga menghasilkan persamaan dinamik yang menggambarkan hubungan antara torsi sendi dan variabel gerak robot. Melalui pendekatan ini, torsi aktuator dapat dievaluasi sebagai fungsi dari posisi sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut sendi. Model dinamik yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis performa robot, pemilihan aktuator, dan pengembangan strategi kompensasi dinamik pada sistem kendali [7], [8].

Selain formulasi dinamika, struktur kinematika robot lengan perlu direpresentasikan secara sistematis. Salah satu metode yang umum digunakan adalah parameter *Denavit-Hartenberg* (DH). Parameter DH memudahkan pendefinisian hubungan antar-*link* melalui matriks transformasi homogen, sehingga posisi dan orientasi setiap *link* dapat ditentukan secara terstruktur. Pada robot lengan 2-DOF, parameter DH digunakan untuk membangun hubungan antara *link* pertama dan *link* kedua, menentukan posisi pusat massa masing-masing *link*, dan menjadi dasar dalam penyusunan model dinamik berbasis formulasi *Lagrange-Euler* [9], [10], [11].

Perangkat lunak komputasi memberikan kemudahan dalam proses penurunan dan implementasi model dinamik. Persamaan dinamik yang melibatkan komponen inersia, *Coriolis-sentrifugal*, dan gravitasi dapat diturunkan secara simbolik serta dievaluasi secara numerik menggunakan parameter fisik robot. Hal ini membantu mengurangi potensi kesalahan aljabar dalam penurunan persamaan secara manual. Pendekatan komputasi pada penelitian digunakan untuk menyusun model dinamik robot lengan planar 2-DOF berdasarkan parameter *Denavit-Hartenberg* dan formulasi *Lagrange-Euler*, kemudian mengevaluasi kebutuhan torsi pada masing-masing sendi terhadap lintasan gerak tertentu [12].

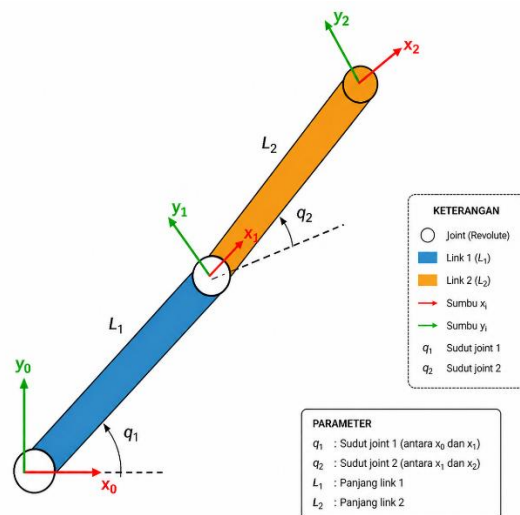
Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pemodelan, simulasi, dan pengendalian robot lengan dua link atau 2-DOF, baik menggunakan pendekatan kendali adaptif, *sliding mode*, *model predictive control*, maupun simulasi berbasis perangkat lunak. Namun, masih diperlukan pembahasan yang secara runtut menjelaskan hubungan antara parameter DH, pembentukan model dinamik *Lagrange-Euler*, dan evaluasi karakteristik torsi sendi pada lintasan uji tertentu. Pemodelan dinamik robot lengan 2-DOF pada penelitian ini menggunakan metode *Denavit-Hartenberg* untuk mengevaluasi torsi *Joint 1* dan *Joint 2*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pemilihan aktuator dan pengembangan strategi kendali yang sesuai dengan karakteristik dinamika robot lengan 2-DOF [13], [14].

## II. METODE

Robot lengan dapat dimodelkan melalui pendekatan kinematika maupun dinamika [15]. Pada penelitian ini

menggunakan pemodelan dinamika dengan tujuan utama adalah mengevaluasi torsi sendi yang dipengaruhi oleh inersia link, kopling antar sendi, dan gravitasi. Pendekatan yang digunakan adalah parameterisasi *Denavit-Hartenberg* (DH) untuk membangun transformasi antar-link, kemudian penurunan dinamika menggunakan formulasi *Lagrange-Euler* sehingga diperoleh persamaan torsi sebagai fungsi keadaan sendi [16].

*Plant* pada penelitian ini adalah robot lengan 2-DOF dengan dua sendi *revolute*, panjang *link* ( $L_1, L_2$ ), massa *link* ( $m_1, m_2$ ), dan variabel sendi ( $q_1, q_2$ ) [17], [18]. Ilustrasi konfigurasi robot ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema robot lengan planar 2-dof

Kinematika disusun menggunakan tabel DH dengan format  $[\theta \ \alpha \ a \ d]$ . Pada penelitian ini ditetapkan:

$$\text{Joint-1 : } \left[ \theta_1 = q_1, \alpha_1 = \frac{\pi}{2}, \alpha_1 = 0, d_1 = L_1 \right]$$

$$\text{Joint-2 : } \left[ \theta_2 = q_2, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = L_2, d_1 = 0 \right]$$

Matriks transformasi homogen standar DH digunakan untuk memperoleh transformasi antar link dan transformasi kumulatif basis-link. Tahap ini menjadi dasar untuk menghitung posisi pusat massa tiap link pada kerangka global.

Pusat massa didefinisikan pada kerangka lokal masing-masing link dalam koordinat homogen:

$$\text{Link-1; } R_1 = [0, 0, L_1/2, 1]^T$$

$$\text{Link-2; } R_2 = [L_2/2, 0, 0, 1]^T$$

Definisi pusat massa ini digunakan dalam penyusunan komponen gaya gravitasi serta pembentukan matriks inersia spasial pada proses penurunan model dinamik robot lengan. Model dinamik disusun dalam bentuk standar:

$$\tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) \quad (1)$$

dengan  $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$   $\tau$ : adalah vektor torsi sendi,  $D(q)$  matriks inersia,  $h(q, \dot{q})$  komponen *Coriolis-sentrifugal*, dan  $c(q)$  komponen gravitasi.

Pada implementasi, elemen  $D$ ,  $h$ , dan  $c$  dihitung secara sistematis melalui matriks turunan  $U_{ij}$  (berbasis operator  $Q$ ) dan matriks inersia spasial  $J_i$ , sehingga persamaan torsi dapat diturunkan secara simbolik dan disederhanakan.

Momen inersia tiap link diasumsikan mengikuti model batang homogen:

$$I_i = \frac{1}{3} m_i L_i^2 \quad (2)$$

Tensor inersia disusun diagonal, kemudian digabungkan dengan massa dan lokasi pusat *massa* untuk membentuk matriks inersia spasial  $J_i$  yang digunakan pada perhitungan komponen dinamik.

Persamaan torsi yang telah diperoleh secara simbolik disederhanakan dengan simplify, lalu dibentuk evaluator numerik:

$$\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, L, m, g) \quad (3)$$

Evaluator dibangun menggunakan substitusi (*subs*) dan konversi numerik (*double*) sehingga torsi dapat dihitung untuk setiap sampel waktu simulasi. Lintasan sendi didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} q(t) &= \begin{bmatrix} \sin(t) \\ 0.5\sin(0.5t) \end{bmatrix} \\ \dot{q}(t) &= \begin{bmatrix} \cos(t) \\ 0.25\cos(0.5t) \end{bmatrix} \\ \ddot{q}(t) &= \begin{bmatrix} -\sin(t) \\ -0.125\sin(0.5t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Pada setiap  $t_k$ , nilai  $q(t_k)$ ,  $\dot{q}(t_k)$ ,  $\ddot{q}(t_k)$  dihitung, kemudian torsi dievaluasi dengan (3) dan disimpan sebagai data  $\tau_1(t)$ ,  $\tau_2(t)$ . Data posisi sendi  $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$  juga disimpan untuk verifikasi lintasan.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pemodelan dinamik manipulator 2-DOF dilakukan melalui simulasi komputer untuk memperoleh respon posisi sendi dan respon torsi sendi pada lintasan uji yang telah ditentukan berdasarkan parameter pada Tabel 1.

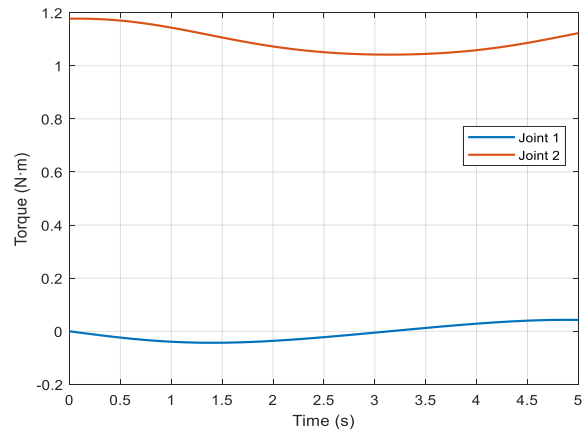
TABEL 1. PARAMETER SIMULASI DAN ROBOT

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa lengan pertama	$(m_1)$	0,75	kg
Massa lengan kedua	$(m_2)$	0,40	kg
Panjang lengan pertama	$(L_1)$	0,19	m
Panjang lengan kedua	$(L_2)$	0,20	m
Gravitasi	$(g)$	9,81	m/s <sup>2</sup>
Rentang durasi simulasi	$(t)$	0–5	s
Selang waktu perhitungan	$(\Delta t)$	0,01	s

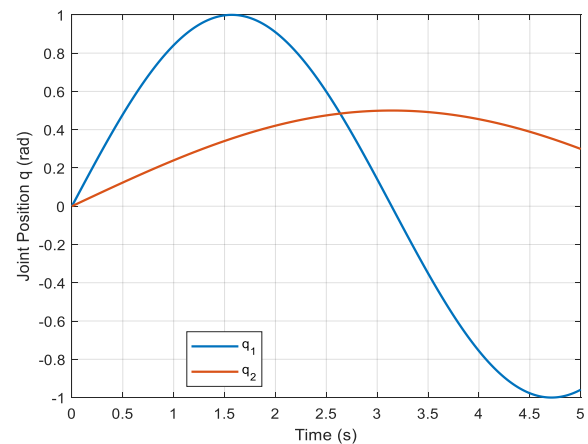
Respon torsi sendi yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2. Dari grafik terlihat bahwa torsi pada *Joint 2* secara konsisten lebih besar dibandingkan *Joint 1* sepanjang waktu simulasi. Torsi *Joint 1* berada pada kisaran kecil dan mendekati nol, yaitu sekitar  $\tau_1 \approx -0,04$  hingga  $0,04$  Nm. Sebaliknya, torsi *Joint 2* bersifat dominan dan berada pada kisaran  $\tau_2 \approx 1,05$ – $1,20$  Nm, dengan variasi yang mengikuti perubahan posisi dan percepatan sudut sendi. Perbedaan karakteristik ini menunjukkan bahwa beban dinamik utama robot lengan ditanggung oleh sendi kedua.

Hasil simulasi pemodelan dinamik robot lengan planar 2-DOF ditunjukkan melalui respon posisi sudut sendi dan respon torsi sendi terhadap lintasan gerak yang diberikan. Gambar 3 memperlihatkan respon posisi sudut sendi  $q_1$  dan  $q_2$  selama interval waktu simulasi 0–5 s. Terlihat bahwa kedua sudut sendi mengikuti lintasan yang halus dan kontinu

tanpa adanya osilasi atau diskontinuitas yang signifikan. Amplitudo maksimum sudut sendi pertama mencapai sekitar  $q_1 \approx \pm 1$  rad, sedangkan sudut sendi kedua memiliki amplitudo yang lebih kecil, yaitu sekitar  $q_2 \approx 0,5$  rad. Hal ini menunjukkan bahwa sendi pertama berperan utama dalam mengatur orientasi global lengan, sementara sendi kedua berfungsi sebagai penyesuaian posisi ujung lengan.



Gambar 2. Respon torsi sendi untuk robot lengan 2-DOF



Gambar 3. Respon posisi sendi untuk manipulator 2-DOF

Keterkaitan antara Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa meskipun amplitudo gerak  $q_2$  lebih kecil dibandingkan  $q_1$ , kebutuhan torsi pada *Joint 2* tetap lebih besar. Hal ini menegaskan bahwa besarnya torsi tidak hanya dipengaruhi oleh amplitudo sudut gerak, tetapi juga oleh distribusi massa, panjang *link*, dan pengaruh inersia. Dengan demikian, hasil simulasi ini memberikan dasar yang jelas bahwa perancangan aktuator dan sistem kendali robot lengan 2-DOF perlu memprioritaskan *Joint 2* dari sisi kapasitas torsi dan penerapan strategi kompensasi dinamik, sementara *Joint 1* dapat menggunakan aktuator dengan spesifikasi torsi yang lebih rendah.

TABEL 2. HASIL SIMULASI RESPON POSISI DAN TORSI SENDI

Variabel	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Kisaran
$(q_1(t))$ (rad)	$\approx -1,0$	$\approx +1,0$	Amplitudo $\approx \pm 1$ rad
$(q_2(t))$ (rad)	$\approx 0,0 / \approx -0,5$	$\approx +0,5$	Amplitudo $\approx 0,5$ rad
$(\tau_1(t))$ (N·m)	$\approx -0,04$	$\approx +0,04$	Torsi kecil, mendekati nol
$(\tau_2(t))$ (N·m)	$\approx 1,05$	$\approx 1,20$	Torsi dominan, beban utama di <i>Joint 2</i>

Berdasarkan Tabel 2, amplitudo posisi sendi menunjukkan bahwa  $q_1$  lebih besar dibandingkan  $q_2$ . Namun, respons torsi memperlihatkan bahwa kebutuhan torsi pada *Joint 2* jauh lebih dominan, yaitu pada kisaran  $\tau_2 \approx 1,05\text{--}1,20$  Nm sedangkan torsi pada *Joint 1* relatif kecil, hanya sekitar  $\tau_1 \approx 0,04\text{--}0,04$  Nm. Oleh karena itu, pemilihan aktuator dan perancangan kompensasi dinamika perlu diprioritaskan pada *Joint 2*.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi model dinamik robot lengan planar 2-DOF menggunakan parameter *Denavit–Hartenberg* dan formulasi *Lagrange–Euler* untuk menghitung kebutuhan torsi sendi pada lintasan gerak tertentu. Hasil simulasi menunjukkan respons posisi sendi yang halus dan kontinu dengan amplitudo maksimum sekitar  $q_1 \approx \pm 1$  rad dan  $q_2 \approx 0,5$  rad. Evaluasi torsi memperlihatkan bahwa *Joint 2* membutuhkan torsi yang jauh lebih besar dibandingkan *Joint 1*. Dengan demikian, beban dinamik utama terkonsentrasi pada sendi kedua, sehingga pemilihan aktuator dan perancangan kompensasi dinamika sebaiknya diprioritaskan pada *Joint 2*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung (UNILA) atas dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Pendanaan penelitian ini bersumber dari DIPA FT Universitas Lampung Tahun 2025 dengan Nomor Kontrak 4155/UN26.15/LK.03/2025.

#### REFERENSI

- [1] R. F. M. Asrizal, "Rancang Bangun Blower Otomatis Berbasis Sensor DHT11 untuk Efisiensi Pembakaran Gula Merah," *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, <https://ejournal.unida-aceh.ac.id/ajeetech/article/view/1057>.
- [2] D. S. E. A. and D. R. Samsuddin, "Sistem Kendali Listrik di Ruang Kerja Berbasis Aplikasi Blynk," *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 9–13, <https://ejournal.unida-aceh.ac.id/ajeetech/article/view/663>.
- [3] P. Corke, W. Jachimezyk, and R. Pillat, "Robotics, Vision and Control," vol. 147, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-07262-8.
- [4] C. Urrea, D. Saa, and J. Kern, "Automated Symbolic Processes for Dynamic Modeling of Redundant Manipulator Robots," *Processes*, vol. 12, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.3390/pr12030593.
- [5] M. Karahan, "International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Feedback Linearized Model Predictive Control of a Two Link Robot Arm," *ijmsit Research Article*, vol. 2024, no. 1, pp. 35–39, doi: 10.36287/ijmsit.8.1.6.
- [6] H. Karhan and Z. Bingül, "Automatic Determination of the Denavit–Hartenberg Parameters for the Forward Kinematics of All Serial Robots: Novel Kinematics Toolbox," *Machines* 2025, Vol. 13, Page 944, vol. 13, no. 10, p. 944, Oct. 2025, doi: 10.3390/machines13100944.
- [7] K. Üniversitesi, M. Ve, F. B. Dergisi, A. Becenen, and G. Tuna, "Simulation of Kinematic and Dynamic Model of Two Degrees of Freedom Robot Arm Using Simulink," *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 265–280, Dec. 2023, doi: 10.34186/klujes.1315919.
- [8] P. Mishra, M. K. Pandey, and R. N. Mahia, "Model Predictive Control for a 2-DOF Robotic Arm: Dynamics and Control," *IEEE International Conference on Modeling, Simulation and Intelligent Computing, MoSICom 2024 - Proceedings*, pp. 353–358, 2024, doi: 10.1109/mosicom63082.2024.10881967.
- [9] C. R. Rocha, C. P. Tonetto, and A. Dias, "A comparison between the Denavit–Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 4, pp. 723–728, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.rcim.2010.12.009.
- [10] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," *J. Appl. Mech.*, vol. 22, no. 2, pp. 215–221, Jun. 1955, doi: 10.1115/1.4011045.
- [11] S. Baressi Šegota, N. Anđelić, M. Šercer, and H. Meštrić, "Dynamics Modeling of Industrial Robotic Manipulators: A Machine Learning Approach Based on Synthetic Data," *Mathematics* 2022, Vol. 10, Page 1174, vol. 10, no. 7, p. 1174, Apr. 2022, doi: 10.3390/math10071174.
- [12] P. I. Corke, "A robotics toolbox for MATLAB," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 24–32, Mar. 1996, doi: 10.1109/100.486658.
- [13] H. M. Tuan, F. Sanfilippo, and N. V. Hao, "Modelling and Control of a 2-DOF Robot Arm with Elastic Joints for Safe Human-Robot Interaction," *Front. Robot. AI*, vol. 8, p. 679304, Aug. 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.679304/text.
- [14] H. M. Tuan, F. Sanfilippo, and N. V. Hao, "A Novel Adaptive Sliding Mode Controller for a 2-DOF Elastic Robotic Arm," *Robotics* 2022, Vol. 11, Page 47, vol. 11, no. 2, p. 47, Apr. 2022, doi: 10.3390/robotics11020047.
- [15] A. U. Darajat, U. Murdika, A. S. Repelianto, and R. Annisa, "Inverse Kinematic of 1-DOF Robot Manipulator Using Sparse Identification of Nonlinear System," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 10, no. 1, pp. 22–25, Apr. 2023, doi: 10.31963/intek.v10i1.4202.
- [16] M. Trojanová, T. Čakurda, A. Hošovský, and T. Krenický, "Estimation of Grey-Box Dynamic Model of 2-DOF Pneumatic Actuator Robotic Arm Using Gravity Tests," *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 4490, vol. 11, no. 10, p. 4490, May 2021, doi: 10.3390/app11104490.
- [17] O. Tokhi, G. Lodewijks, H. Kallel, and K. Iqbal, "Online Estimation of Manipulator Dynamics for Computed Torque Control of Robotic Systems," *Sensors* 2025, Vol. 25, Page 6831, vol. 25, no. 22, p. 6831, Nov. 2025, doi: 10.3390/s25226831.
- [18] H. Anwaar, Y. Yixin, S. Ijaz, M. Ashraf, and W. Anwaar, "Fractional Order Based Computed Torque Control of 2-link Robotic Arm," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 273–284, Mar. 2018, doi: 10.12913/22998624/85658.