Integrasi Sistem Kendali Lengan Robot pada Preparasi Mikrokapsul *Brachytherapy*

Integration of Robot Arm Control System in Brachytherapy Microcapsules Preparation

[1]Jasmine Q Z El Wahyu*), [1]Adi Abimanyu & [2]Rio N Wijaya

[1]Program Studi Elektro Mekanika, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia

*) *jasmineelwahyu@gmail.com*

Abstrak

Brachytherapy HDR menggunakan Ir-192 yang dibungkus mikrokapsul (*seed*). Penggunaan Ir-192 membutuhkan tingkat presisi yang tinggi selama proses preparasi untuk menghasilkan *seed* berkualitas baik. Inovasi teknologi lengan robot empat DoF berbasis LabVIEW dan Arduino MEGA, dilengkapi sistem *monitoring* kamera endoskopi agar memaksimalkan preparasi sehingga meminimalisir paparan radiasi. Kamera endoskopi membantu mengidentifikasi dan mengamati *seed* yang diambil oleh *vacuum gripper*. Sistem dimulai dengan mengambil *seed* di *conveyor* lalu diletakkan pada *chuck*. Hasil akurasi dan presisi lengan robot, diuji menggunakan analisis kuantitatif. Hasil pengujian sudut *linear motion* memiliki presisi 99,3% dan akurasi 100%; *base* memiliki presisi 98,4% dan akurasi 98,4%; *Link* 1 memiliki presisi 96,2% dan akurasi 97,2%; dan *Link* 2 memiliki presisi 72,4% dan akurasi 71,5%. Rerata *error* pengujian *inverse kinematics* diperoleh *linear motion* 0%, *base* 8,1%, *Link* 1 8,2%, dan *Link* 2 9,8%. Rerata *error* pengujian *forward kinematics* diperoleh posisi α dan z 0%, posisi x 25,1%, dan posisi y 18,9%. Hasil rerata keberhasilan pengujian pengambilan *seed* 87%, pengujian *monitoring* 80%, dan pengujian peletakan *seed* 86%. Hasil pengujian keseluruhan sistem menghasilkan 80% untuk *monitoring*, pengambilan, dan peletakkan *seed* dengan waktu akumulasi rerata sistem sebesar 83,6 detik.

Kata Kunci: brakhiterapi, empat derajat kebebasan (DoF), kinematika robot, lengan robot.

Abstract

HDR brachytherapy uses Ir-192 wrapped in microcapsules (seeds). Ir-192 requires high precision during the preparation process to produce good-quality seeds. The technological innovation of four DoF robot arms using LabVIEW and Arduino MEGA is equipped with an endoscope camera monitoring system to maximize preparation and minimize radiation exposure. The endoscope camera helps identify and observe seeds picked up by the vacuum gripper. The system starts by taking the seeds on the conveyor and placing them at the chuck. The robotic arm's test for accuracy and precision employs quantitative analysis. The linear motion angle test results in precision of 99.3% and accuracy of 100%; the base had 98.4% precision and 98.4% accuracy; Link 1 had 96.2% precision and 97.2% accuracy; and Link 2 had 72.4% precision and 71.5% accuracy. The average error of the inverse kinematics test was obtained: linear motion 0%, base 8.1%, Link 1 8.2%, and Link 2 9.8%. The average error of forward kinematics testing for positions α and z 0%, position x 25.1%, and position y 18.9%. The average success result for the seed collection test was 87%, the monitoring test result was 80%, and the seed placement test was 86%. The overall system test results yielded 80% for monitoring, picking, and placing seeds, with an average system accumulation time of 83.6 seconds.

Keywords: brachytherapy, four degrees of freedom (DoF), robot kinematics, robot arm.

Makalah diterima 28 Juli 2023 - makalah direvisi 29 September 2023 - disetujui 01 Oktober 2023

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi CC BY-SA.

Pendahuluan

The Global Cancer Observatory (GLOBOCAN) pada tahun 2020 melaporkan bahwa kanker merupakan salah satu penyakit yang dapat mengancam jiwa manusia. Kasus baru dan kematian akibat kanker di dunia mencapai total 19,3 juta kasus dan hampir 10 juta jiwa meninggal dunia pada tahun 2020 [1]. Di Indonesia, kasus baru dan kematian akibat kanker pada tahun 2020 mencapai total 397 ribu kasus dan 235 ribu jiwa meninggal dunia. Terdapat 35 jenis kanker di Indonesia di antaranya kasus kanker payudara menempati urutan pertama dengan 16,6%, kanker serviks menempati urutan kedua dengan 9,2%, dan kanker prostat menempati urutan ketiga dengan 3,4%. Metode *brachytherapy* merupakan salah satu upaya yang dilakukan untuk mengobati beberapa jenis kanker melalui radioterapi yang menempatkan bahan radioaktif di dekat jaringan terkena kanker.

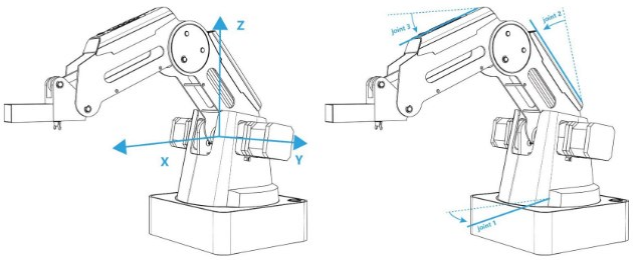
Brachytherapy high dose rate (HDR) menggunakan *seed* Ir-192 yang dibungkus oleh mikrokapsul bahan *stainless steel*. Penggunaan *seed* Ir-192 membutuhkan presisi yang tinggi selama proses preparasi berlangsung untuk menghasilkan mikrokapsul berkualitas baik [2]. Lengan robot empat DoF "DOBOT" dilengkapi sistem *monitoring* menggunakan kamera endoskopi, menjadi sebuah inovasi teknologi untuk memaksimalkan proses preparasi yang dapat meminimalisir resiko radiasi langsung ke pekerja radiasi. Kamera endoskopi membantu untuk mengidentifikasi dan mengamati *seed* yang diambil oleh *vacuum gripper suction pen* [3]. Sistem dimulai dengan mengambil *seed* mikrokapsul pada posisi *fix* di *conveyor* dan meletakkan *seed* pada *chuck*. Gerakan lengan robot dalam penelitian ini disesuaikan dengan titik koordinat posisi yang telah diketahui guna mendapatkan sudut jangkauan terhadap suatu posisi menggunakan metode *inverse kinematics*.

Penelitian terkait lengan robot *brachytherapy* telah dikembangkan pada penelitian tugas akhir. Hasil pengembangan penelitian tersebut menghasilkan dua modul rancang bangun lengan robot preparasi mikrokapsul *Brachytherapy* yaitu modul akuisisi citra dan modul lengan robot. Tugas Akhir yang dilakukan oleh Dhiyafath Anargyo Orion pada tahun 2021 menghasilkan modul akuisisi citra yang dikembangkan dengan *digital image processing* metode pengenalan pola [4]. Citra yang dideteksi diolah sesuai dengan kombinasi warna tertentu yang diolah oleh komputer sehingga modul ini digunakan sebagai penentu koordinat posisi mikrokapsul sumber Ir-192 pada *conveyor*. Pada tahun yang sama, Emil Akbari melakukan penelitian tugas akhir tentang rancang bangun modul lengan robot [5]. Penelitian tersebut berhasil menggerakkan lengan robot dengan gerakan lurus searah *linear motion*, gerakan melingkar pada *base*, serta gerakan *swing* pada *Link* 1 dan *Link* 2. Namun, kedua modul penelitian tersebut masih berjalan sendiri-sendiri sesuai fungsinya dan belum terintegrasi menjadi satu. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengintegrasikan modul kendali pada penelitian lengan robot preparasi mikrokapsul *brachytherapy* yang telah dikembangkan oleh Dhiyafath Anargyo Orion dan Emil Akbari.

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler Arduino Mega dan komunikasi serial LabVIEW sebagai metode integrasi sistem kendali lengan robot dan komputer. Penelitian ini secara umum bertujuan untuk menghasilkan sistem kendali lengan robot yang terintegrasi dengan Arduino dan LabVIEW untuk membantu proses preparasi mikrokapsul yang terdiri dari modul akuisisi citra, modul komunikasi data, kendali *gripper*, *conveyor*, dan modul kendali lengan robot berupa *linear motion*, *base*, *link* 1, dan *link* 2. Selain itu, juga menjadi solusi dari penanganan HDR memanfaatkan integrasi lengan robot dengan *image processing* yang akan diterapkan pada preparasi mikrokapsul *brachytherapy*. Dengan demikian, integrasi ini diharapkan memiliki tingkat akurasi dan presisi >95% untuk dapat memproses posisi mikrokapsul pada *conveyor* oleh sistem *image processing*, mengambil mikrokapsul oleh *vacuum gripper* lengan robot, dan memindahkan mikrokapsul menggunakan *vacuum gripper* pada lengan robot ke tempat *chuck*.

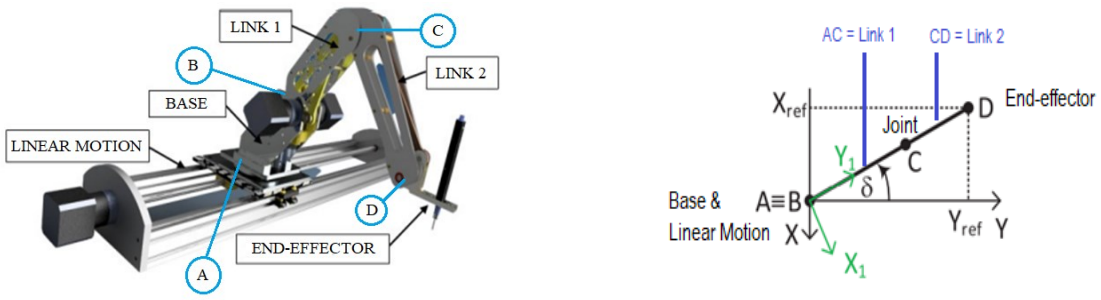
Metode

Lengan robot jenis "DOBOT" pada penelitian ini merupakan jenis lengan robot dengan 4 derajat kebebasan (DoF). Penggunaan DOBOT bergantung pada alat yang dipasang pada *end-effector*. Sistem mekanik lengan robot "DOBOT" terdiri dari 14 susunan *link* dan *joint* untuk menghasilkan gerakan terkontrol sesuai koordinat X, Y, dan Z. Koordinat X merupakan gerakan ke depan dan belakang, Y gerakan ke kiri dan kanan, dan Z gerakan ke atas dan bawah. Lengan robot memiliki pergerakan sesuai koordinat X, Y, dan Z, menggunakan kinematika dan kendali lengan robot sesuai *forward* dan *inverse kinematics* [6],[7].



Gambar 1. *Reference frame* lengan robot "DOBOT"

Kinematika merupakan metode pemodelan gerak robot tanpa mempertimbangkan gaya yang diberikan untuk menggerakkan robot [8]. Metode analisis kinematika pada penelitian ini dibagi menjadi *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Penerapan pemodelan kinematika pada desain lengan robot dapat menjadi efisien dengan mempertimbangkan pergerakan lengan robot pada sumbu x, y, dan z sesuai gambar 1. *Forward kinematics* mendeskripsikan gerak perpindahan robot berdasar sudut yang diketahui, sedangkan *inverse kinematics* lebih kompleks karena menggunakan metode analitik dan numerik [9].

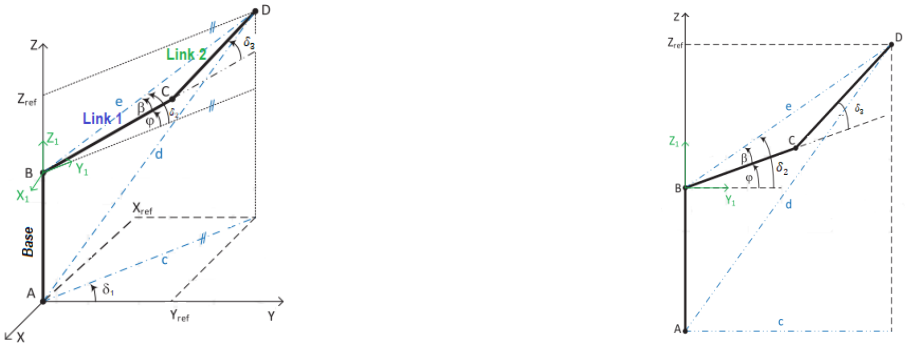


(a) (b)

Gambar 2. Lengan robot 4 DoF (a) pada posisi inisial; (b) representasi *base to gripper* tampak samping

Gambar 2 (a) merupakan gambaran bagian-bagian pada lengan robot yang digunakan pada proses preparasi mikrokapsul. Bagian tersebut terdiri *linear motion*, *base*, *Link* 1, *Link* 2, dan *end-effector*. Gambar 2 (b) merupakan representasi lengan robot tampak samping terhadap *base* ke *end-effector*, bahwa A dan B merupakan titik *base*, C merupakan titik *joint* antara *Link* 1 dan *Link* 2, dan D merupakan titik *end-effector*.

Orientasi absolut sistem kendali lengan robot didefinisikan dengan pemodelan yang mengekspresikan titik representasi dan skema kinematik lengan robot [10]. Orientasi tersebut dimodelkan sesuai gambar 3.



(a) (b)

Gambar 3. Skema kinematik DOBOT (a) representasi model 3D; (b) representasi sumbu-Z

Berdasarkan struktur kinematik lengan robot DOBOT pada gambar 3 (a), diketahui bahwa lengan robot DOBOT memiliki tiga *joint* rotasi dan tiga *link* (meliputi AB-*base*, BC-*link* 1, dan CD-*link* 2). Gambar 3 (a) tersebut menunjukkan bahwa $\overline{AB}$ merupakan panjang *fix* dari lengan robot yang tidak akan dihitung pergerakannya. $\overline{BC}$ merupakan *Link* 1 yang bergerak naik-turun sebesar sudut β dan φ yang dianggap δ_2 sebagai *output* pergerakan berdasar data posisi yang diterima. $\overline{CD}$ merupakan *Link* 2 yang menggerakkan *vacuum gripper* sebesar sudut δ_3 sebagai *output* pergerakan dari data posisi yang diterima. Dari gambar 3 (a), diperoleh persamaan (1) sampai dengan persamaan (3).

$$x_0^B = 0, \tag{1}$$

$$y_0^B = 0, \tag{2}$$

$$z_0^B = base. \tag{3}$$

Persamaan (1) sampai (3) merupakan persamaan untuk mendefinisikan posisi awal dari titik B pada lengan robot. Pada posisi sumbu x, y, dan z, *base* berada di titik (0,0,0). Setelah itu, perhitungan sudut pada titik C yang berada di antara *Link* 1 dan *Link* 2, diperoleh persamaan (4) sampai persamaan (6).

$$x_0^C = -L_1 \cos\varphi_1 \sin\delta_2, \tag{4}$$

$$y_0^C = L_1 \cos\varphi_1 \cos\delta_2, \tag{5}$$

$$z_0^C = z_0^B + L_1 sin\ \varphi_1. \tag{6}$$

Persamaan (4) sampai (6) merupakan persamaan yang mendefinisikan posisi di titik C pada lengan robot. Posisi sumbu x, y, dan z, diperoleh dengan menghitung berdasar sudut (δ_2) yang terbentuk. *Link* 1 merupakan L_1 dan *Link* 2 merupakan L_2. Setelah itu, perhitungan sudut pada titik D di *end-effector*, diperoleh persamaan (7) sampai persamaan (9).

$$x_0^D = -(L_1 cos\ \varphi_1\ + L_2 cos\ \varphi_2\ )sin\ \delta_1, \tag{7}$$

$$x_0^D = (L_1 cos\ \varphi_1\ + L_2 cos\ \varphi_2\ )cos\ \delta_1, \tag{8}$$

$$z_0^D = z_0^C + L_2 sin\ \varphi_2. \tag{9}$$

Persamaan (7) sampai persamaan (9) merupakan persamaan yang mendefinisikan posisi di titik D pada lengan robot. Di mana pada posisi sumbu x, y, dan z, diperoleh dengan menghitung berdasar sudut (δ_3) yang terbentuk. Pada Gambar 3 (b), $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ merupakan posisi yang akan disesuaikan dengan gerakan lengan robot. Pada perhitungan akan diasumsikan $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ sebagai c, d, e.

1 *Forward Kinematics*

Forward kinematics merupakan analisis hubungan *joints* robot manipulator dalam menentukan posisi dan orientasi *end-effector*. Parameter mekanis Denavit Hartenberg digunakan untuk menghitung konfigurasi robot [11]. Selain menggunakan parameter Denavit Hartenberg, perhitungan *forward kinematics* dapat dilakukan dengan analisis Pythagoras setelah sudut $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ diketahui [12].

Matriks transformasi yang digunakan dalam *forward kinematics* dapat disesuaikan dengan jumlah *joint* pada lengan robot. Dikarenakan jumlah *joint* ada 4 namun yang bergerak 3, maka nilai transformasi yang digunakan T_0^3 pada persamaan (10).

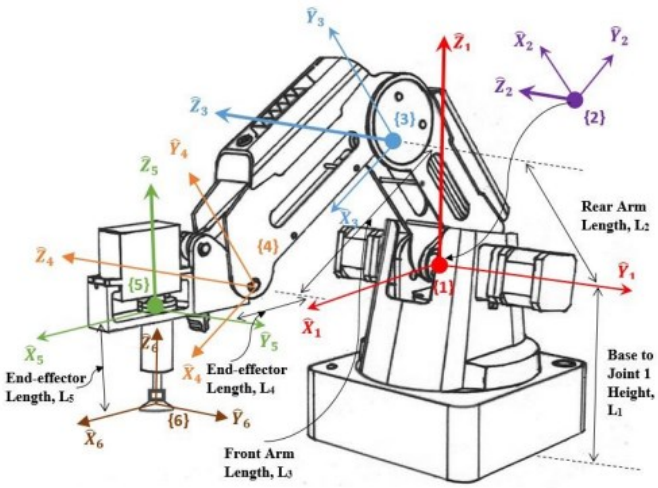
$$T_0^3 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 \tag{10}$$

Pada *linear motion* dapat diketahui berdasar matriks transformasi translasi vektor yang merupakan pergeseran koordinat *end-effector* pada posisi X, Y, dan Z, sehingga disesuaikan menggunakan persamaan (11).

$$T_{lm} = \begin{bmatrix} p_{xlm} & 0 & 0 & x_{lm} \\ 0 & p_{ylm} & 0 & y_{lm} \\ 0 & 0 & p_{zlm} & z_{lm} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

2 *Inverse Kinematics*

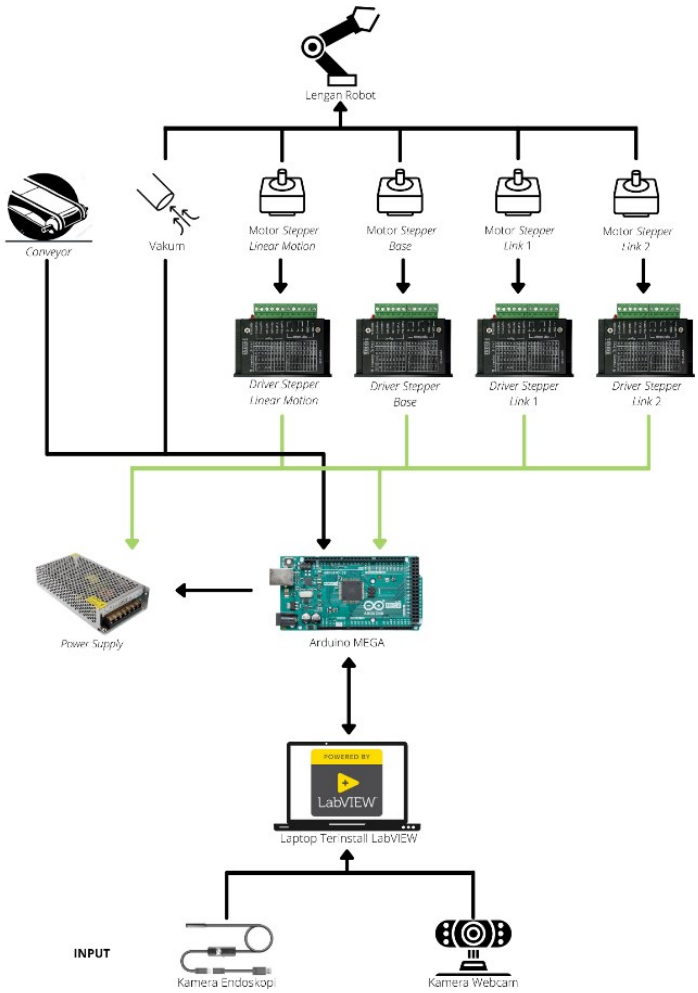
Modul lengan robot "DOBOT" memiliki spesifikasi komponen motor *stepper* NEMA, *driver* motor *stepper* TB6600, *vacuum suction pen*, dan *linear guide motion*. *Inverse kinematics* merupakan perhitungan matematis untuk menemukan sudut *joint* yang sesuai sesuai posisi dan orientasi *end-effector* yang diinginkan. Umumnya, *inverse kinematics* berbentuk nonlinier sehingga memerlukan penyelesaian numerik dan analitik [13]. Dalam penelitian ini, *inverse kinematics* digunakan untuk menemukan $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ [14]. Parameter δ_4 terkait dengan *end-effector* yang terpasang pada sistem robot. Analisis *inverse kinematics* pada gambar 4 berdasar metode Denavit Hartenberg.



Gambar 4. Koordinat lengan robot "DOBOT"

3 Perancangan Sistem Perangkat Keras

Perancangan sistem perangkat keras untuk mengintegrasi sistem kendali lengan robot seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 melibatkan tahapan sinkronisasi antara perancangan kontrol motor *stepper* menggunakan perangkat lunak LabVIEW, perancangan pada mikrokontroler Arduino MEGA, serta *monitoring* menggunakan kamera endoskopi. Perancangan sistem perangkat keras ini berperan penting dalam membangun integrasi yang efisien antara kendali motor *stepper*, mikrokontroler Arduino MEGA, dan *monitoring* kamera endoskopi dalam mencapai tingkat presisi dan akurasi yang dibutuhkan oleh lengan robot menjalankan keseluruhan sistem.

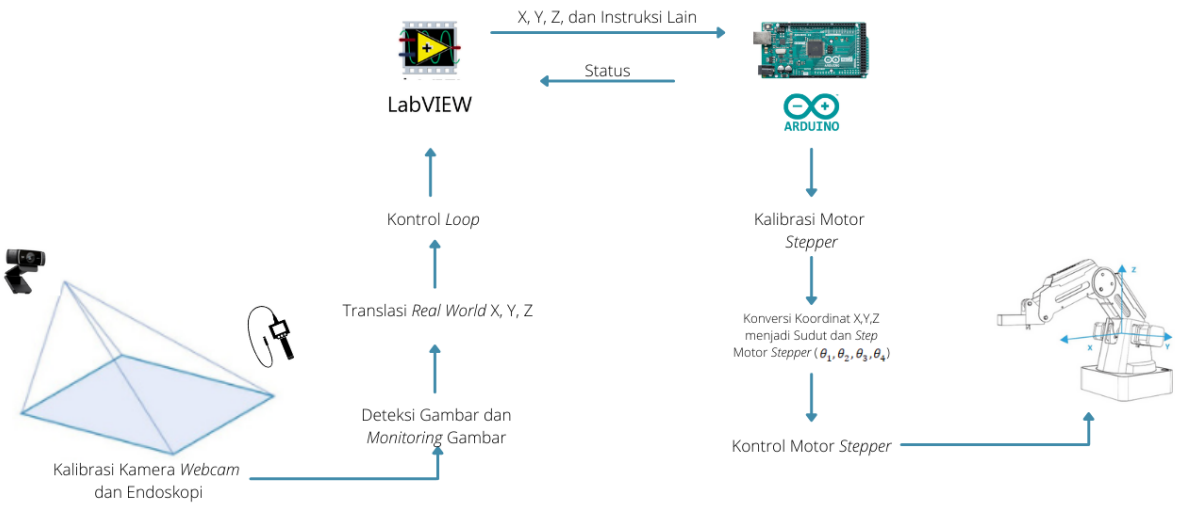


Gambar 5. Perancangan sistem *hardware*

Pengkabelan motor *stepper* tersambung pada *linear motion*, *base*, *link* 1, dan *link* 2 dengan *driver motor stepper* TB6600. Pengkabelan tersebut disesuaikan agar sistem dapat berjalan sesuai dengan program pada LabVIEW. Mikrokontroler Arduino mengirim tegangan (9~42 V) ke *driver* motor untuk mengatur *Pulse Width Modulation* (PWM). *Driver* motor juga mengirim tegangan pada motor *stepper* sebagai penggerak.

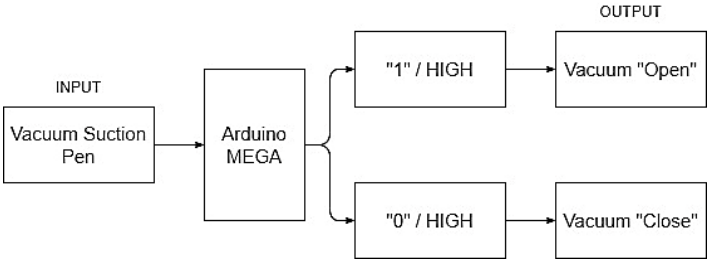
4 Perancangan Sistem Perangkat Lunak

Cara kerja sistem pada gambar 6, yaitu Arduino MEGA akan mengatur koordinat posisi motor *stepper* dan sudut yang digunakan untuk mengendalikan lengan robot sesuai dengan informasi pengolahan citra kamera endoskopi yang dikirim serial dari LabVIEW ke Arduino. Arduino juga digunakan untuk mengatur kecepatan putar dan *delay* motor *stepper* yang dihubungkan dengan *driver* motor sebelum ke motor DC [15]. Selain itu, Arduino menerima informasi dari *vacuum suction pen* apabila *seed* mikrokapsul Ir-192 telah diambil dan dikonfirmasi oleh kamera endoskopi untuk memastikan *seed* mikrokapsul tetap berada di *vacuum suction pen*.



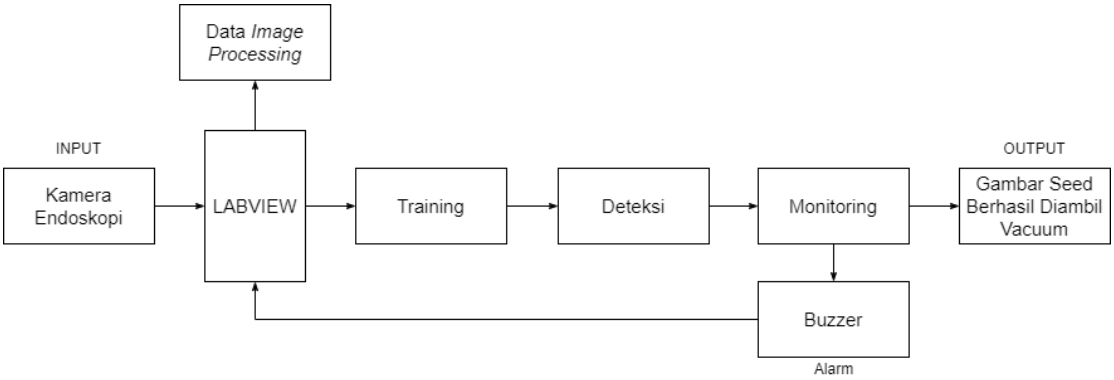
Gambar 6. Perancangan sistem *software*

Vacuum suction pen pada penelitian ini disesuaikan dengan peran aktuator pada lengan robot, sehingga sistem kendali dapat berjalan sebagaimana algoritma yang digunakan. Perancangan dilakukan agar kerja sistem kendali *vacuum* dapat dipahami. Diagram blok perancangan *vacuum* pada gambar 7 menjelaskan proses *logic* setelah program menerima perintah untuk mengambil *seed*. Saat program diproses untuk mengambil *seed*, *vacuum* akan mengambil mikrokapsul tersebut, kemudian memindahkannya ke *chuck*. Setelah *vacuum* berada di posisi *chuck*, program akan memproses untuk melepaskan *seed*.



Gambar 7. Diagram blok *vacuum suction pen*

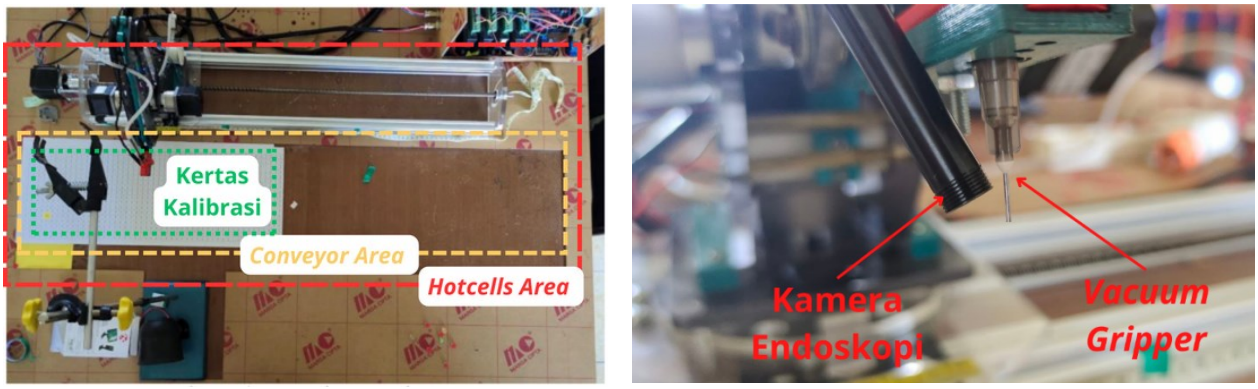
Kamera endoskopi pada penelitian ini digunakan sebagai fitur *monitoring* untuk memastikan *seed* mikrokapsul telah diambil oleh *vacuum gripper*. Perancangan algoritma kamera endoskopi dilakukan agar lebih memahami kerja fitur kamera endoskopi. Diagram blok pada gambar 8 menunjukkan kamera endoskopi sebagai *input* untuk mengambil citra selama proses pengambilan *seed* oleh *vacuum gripper*. Kegiatan mendeteksi dan *monitoring seed* mikrokapsul dilakukan melalui LabVIEW. Apabila *seed* mikrokapsul tidak terdeteksi saat diambil oleh *vacuum gripper*, maka muncul *buzzer* sebagai peringatan bahwa perlu mengetahui keberadaan *seed* mikrokapsul. LabVIEW akan menggunakan data *image processing* untuk mencari *seed* mikrokapsul yang terjatuh di area *conveyor* [16].



Gambar 8. Diagram blok kamera endoskopi

Hasil & Diskusi

Lengan robot memiliki area kerja pada *conveyor* di area *hot cells* yang direpresentasikan menggunakan kertas berukuran 50 x 18 cm. Jangkauan yang dapat dicapai oleh *base*, *Link* 1, dan *Link* 2 pada lengan robot dapat menjangkau melebihi area kertas, agar tidak melebihi area kertas maka masing-masing *joint* ditentukan limitasi sudut.



(a) (b)

Gambar 9. (a) Area kerja lengan robot; (b) posisi kamera endoskopi dan *vacuum gripper*

Penentuan kalibrasi area kerja lengan robot pada gambar 9 ditentukan dengan menggunakan 10 titik referensi untuk dilakukan pengujian mapping. Titik referensi tersebut mewakili salah satu dari lima rentang pada kertas kalibrasi. Masing-masing titik referensi disebut dengan *Case*[i], i merupakan jumlah urutan dari 10 titik yang digunakan.

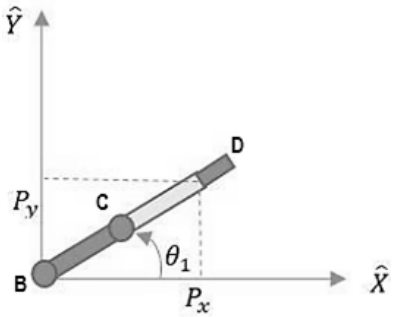
- *Case* 1 untuk posisi (x, y) = (5,5)
- *Case* 2 untuk posisi (x, y) = (1,10)
- *Case* 3 untuk posisi (x, y) = (7,14)
- *Case* 4 untuk posisi (x, y) = (11,20)
- *Case* 5 untuk posisi (x, y) = (10,26)
- *Case* 6 untuk posisi (x, y) = (10,30)
- *Case* 7 untuk posisi (x, y) = (4,33)
- *Case* 8 untuk posisi (x, y) = (11,40)
- *Case* 9 untuk posisi (x, y) = (5,45)
- *Case* 10 untuk posisi (x, y) = (12,50)

Lengan Robot 4 DoF "DOBOT" memiliki bentuk *rigid* pada *joint base* sehingga diasumsikan sesuai letak geometrinya. Sesuai persamaan yang telah didefinisikan pada persamaan (1) hingga persamaan (9), maka diperoleh persamaan:

$$({}^0_1A)^{-1}({}^0_5T) = {}^1_2A\,{}^2_3A\,{}^3_4A\,{}^4_5A \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & -s_1 d_3 \\ s_1 & 0 & c_1 & c_1 d_3 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} c_1 n_x + s_1 n_y & c_1 s_x + s_1 s_y & c_1 a_x + s_1 a_y & c_1 p_x + s_1 p_y \\ n_z & s_z & a_z & d_1 - p_z \\ c_1 n_x - s_1 n_y & c_1 s_x - s_1 s_y & c_1 a_x - s_1 a_y & s_1 p_x - c_1 p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$



Gambar 10. Geometri rotasi horizontal *joint* 1 tampak atas

Untuk mengetahui rotasi horizontal secara sumbu X-Y untuk *joint* 1 disesuaikan dengan gambar 10 pada persamaan (14) mengakibatkan persamaan (15) hingga persamaan (19).

$$\cos(a - 90^{o}) = \sin(a)$$
$$\sin(a - 90^{o}) = -\cos(a) \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} c_4 s_3 - s_4 c_3 & -c_4 s_3 - s_4 c_3 & 0 & a_3 s_3 + a_4 c_4 s_3 - a_4 s_4 c_3 \\ c_4 s_3 + s_4 c_3 & -c_4 s_3 + s_4 c_3 & 0 & -a_2 - a_3 c_3 - a_4 c_4 c_3 - a_4 s_4 s_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$c_1 p_x + s_1 p_y = a_3 s_3 + a_4 c_4 s_3 - a_4 s_4 c_3 \tag{17}$$

$$d_1 - p_z = -a_2 - a_3 c_3 - a_4 c_4 c_3 - a_4 s_4 s_3 \tag{18}$$

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0 \tag{19}$$

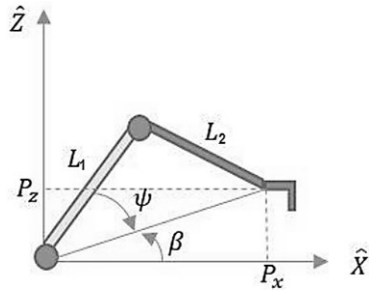
Melalui persamaan (19) diperoleh nilai θ_1.

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{P_y}{P_x} \tag{20}$$

$$\tan\theta_1 = \frac{P_y}{P_x} \tag{21}$$

$$\theta_1 = A\tan\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \tag{22}$$

Nilai sudut θ_2 dan θ_3 dapat diketahui dengan mengaplikasikan solusi geometri menggunakan gambar 11.



Gambar 11. Geometri rotasi *joint* 2 dan *joint* 3

Berdasar konsep hukum cosinus pada gambar 11, diperoleh nilai θ_3 sesuai persamaan (21) dan persamaan (22).

$$P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos(180^{o} - \theta_3) \tag{23}$$

Karena $\cos(180^{o} - \theta_3) = -\cos\theta_3$, maka

$$\cos\theta_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \tag{24}$$

Untuk memperoleh nilai θ_2 dari Gambar 11 diperoleh sudut bantu β dan Ψ dengan menggunakan konsep hukum cosinus pada Persamaan (23) hingga Persamaan (24).

$$\beta = \tan^{-1}\frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \tag{25}$$

$$L_2^2 = L_1^2 + P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - 2L_1\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}\cos\Psi \tag{26}$$

$$\cos\Psi = \frac{L_1^2 + P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}} \tag{27}$$

$$\sin\Psi = \pm\sqrt{1 - \cos^2\Psi} \tag{28}$$

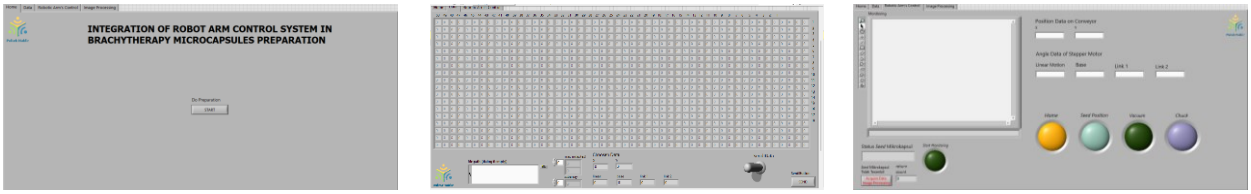
Dari persamaan (25) hingga persamaan (28) diperoleh nilai θ_2.

$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\Psi}{\cos\Psi}\right) \tag{29}$$

$$\theta_2 = \beta + \Psi \tag{30}$$

1 Hasil Pengembangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan pada integrasi sistem kendali lengan robot ini dikembangkan dengan menyesuaikan komunikasi serial antar Arduino dan LabVIEW. Pengembangan ini disesuaikan berdasarkan program kendali menggunakan Arduino untuk memproses posisi sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, dan θ_4 menjadi gerakan motor *stepper* pada *linear motion*, *base*, *Link* 1, dan *Link* 2. Sistem kendali menggunakan Arduino dilakukan dengan melakukan fungsi inisialisasi program, *setup*, *looping*, dan penerimaan data dari LabVIEW. Sistem kendali menggunakan LabVIEW dilakukan dengan komunikasi serial VISA untuk membaca data, mengirim data ke Arduino, dan *monitoring* pengambilan menggunakan kamera endoskopi. Keseluruhan sistem membutuhkan sinkronisasi nilai dan gerakan sehingga lengan robot dapat bergerak sesuai yang diharapkan.



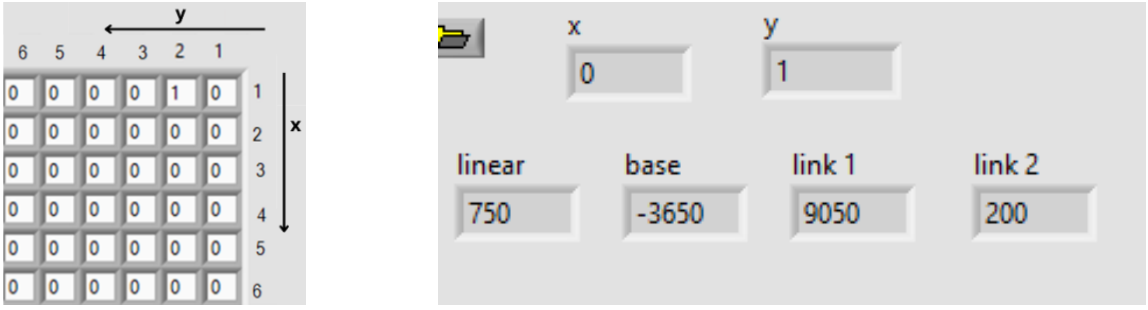
(a) (b) (c)

Gambar 12. Tampilan GUI (a) *home*; (b) *input* data; (c) kendali lengan robot

Hasil pengembangan integrasi sistem kendali lengan robot pada LabVIEW merupakan tampilan untuk *user* atau *Graphical User Interface* (GUI) yang berisi program sesuai dengan perancangan sesuai gambar 12 (a), (b), dan (c).

2 Hasil *Inverse Kinematics*

Nilai yang dimasukkan pada tabel di dalam tampilan gambar 13 (a) berupa nilai 1 atau 0 untuk dilakukan pengujian *mapping* menggunakan *Inverse Kinematics*. Nilai 1 menunjukkan posisi *seed* di *conveyor* dan nilai 0 menunjukkan kondisi *default* di *conveyor*. Apabila menginginkan posisi $(x, y) = (1,2)$ maka memberikan nilai 1 pada *array* melalui tampilan sesuai gambar 13 (a). *Input* posisi yang diinginkan akan disesuaikan dengan data yang telah dimasukkan ke dalam LabVIEW dengan format $(.\mathrm{csv})$.



(a) (b)

Gambar 13. (a) Tampilan *array input* posisi; (b) hasil pembacaan data di LabVIEW

Gambar 13 (b) merupakan hasil pembacaan data dari hasil *mapping* format $(.\mathrm{csv})$. Hasil pembacaan tersebut menjadi data pengujian yang akan dibandingkan dengan hasil perhitungan sesuai persamaan. Hasil kesesuaian antara perhitungan dan pengujian tersebut ditunjukkan pada tabel 1.

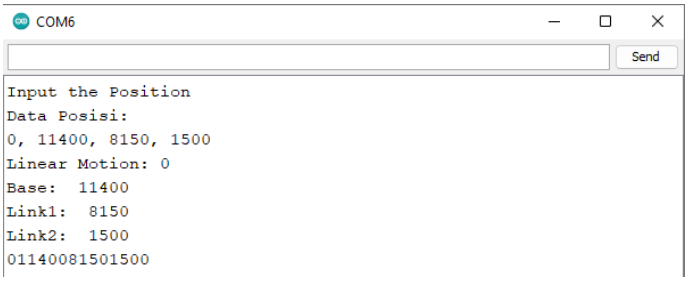
Tabel 1. Kesesuaian *output* sudut hasil perhitungan dan pengujian

Indikator		Sudut ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) [°]									
		Case 1	*Case* 2	*Case* 3	*Case* 4	*Case* 5	*Case* 6	*Case* 7	*Case* 8	*Case* 9	*Case* 10
Posisi *input* (cm)	a	0	-2	-14	-23	-29	-2	2	-4	-2	0
	x	5	1	7	11	10	7	8	11	5	12
	y	5	10	14	20	26	30	33	40	45	50
	z	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Output Sudut Hasil Perhitungan (°)	θ_1	0	-2	-14	-23	-29	-2	2	-4	-2	0
	θ_2	-40,0	-26,7	-47,4	-48,8	-68,9	12,9	28,7	45,7	36,7	55,1
	θ_3	94,7	84,3	99,3	72,8	97,9	76,9	92,7	72,3	97,9	73,3
	θ_4	16,0	0,5	3,3	1,3	0,5	22,3	13,7	28,1	1,7	0,5
Output Sudut Hasil Pengujian (°)	θ_1	0	-2	-14	-23	-29	-2	2	-4	-2	0
	θ_2	-38,3	-29,8	-47,8	-56,3	-53,4	11,3	19,1	33,8	39,4	56,8
	θ_3	97,3	99,6	101,3	99,6	98,4	73,7	95,6	73,7	98,4	99,0
	θ_4	3,4	0,0	2,8	1,7	0,0	30,9	14,1	30,9	1,1	0,0

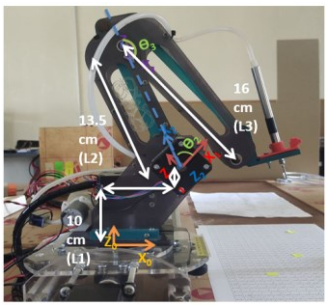
Hasil perbandingan sudut jangkauan perhitungan dan pengujian pada *linear motion*, *base*, *link* 1, dan *link* 2 masing-masing memiliki nilai *error* terbesar pada *case* yang berbeda. Hasil *error* pengujian sudut *base* terbesar terjadi saat pengujian menggunakan *case* 5 sebesar 22,44%. Hasil *error* pengujian sudut *link* 1 terbesar terjadi saat pengujian menggunakan *case* 4 sebesar 26,96%, dan hasil *error* pengujian sudut *link* 2 terbesar terjadi saat pengujian menggunakan *case* 6 sebesar 30,74%. Rata-rata hasil *error* pada pengujian sudut *linear motion* sebesar 0%, sudut *base* sebesar 8,08%, sudut *link* 1 sebesar 8,15%, dan sudut *link* 2 sebesar 9,78%. Hasil *error* pengujian *inverse kinematics* untuk memperoleh sudut, terjadi dikarenakan kurangnya perhitungan *linear motion* di dalam persamaan dan sifat karakteristik motor *stepper*.

3 Hasil *Forward Kinematics*

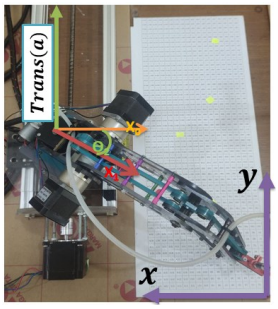
Pengujian *mapping* menggunakan *Forward Kinematics* dilakukan dengan memberikan *input steps* melalui Serial Monitor di Arduino. Tampilan *input steps* tersebut ditunjukkan pada gambar 14.



(a)



(b)



(c)

Gambar 14. Pengujian *forward kinematics*: (a) tampilan serial monitor untuk *input* posisi; (b) konfigurasi *input* sudut; (c) pergerakan posisi hasil *input* sudut

Sepuluh titik referensi yang telah ditentukan sebelumnya menjadi *input steps* dan sudut untuk menguji kesesuaian perhitungan dan pengujian. Hasil pembacaan tersebut menjadi data pengujian yang akan dibandingkan dengan hasil perhitungan sesuai persamaan. Hasil Kesesuaian antara perhitungan dan pengujian tersebut ditunjukkan pada tabel 2.

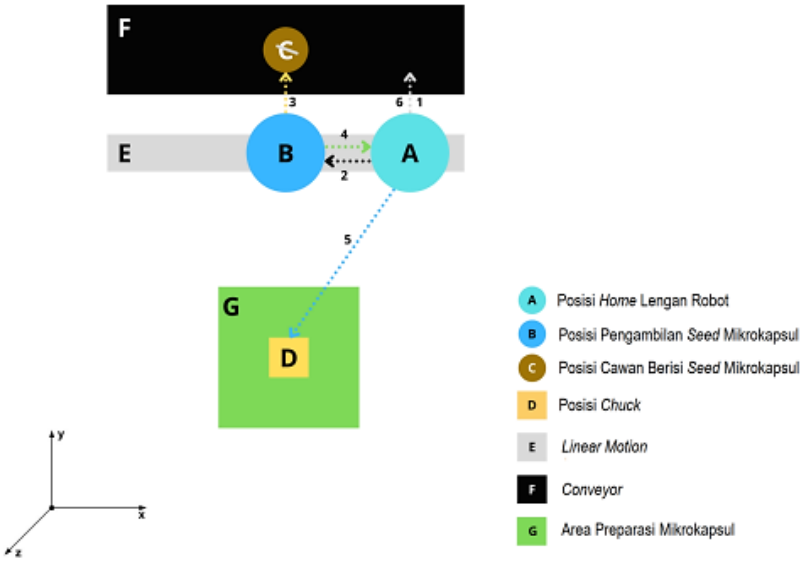
Tabel 2. Hasil kesesuaian *output* posisi perhitungan dan pengujian

Indikator		Posisi (a,x,y,z) [cm]									
		Case 1	*Case* 2	*Case* 3	*Case* 4	*Case* 5	*Case* 6	*Case* 7	*Case* 8	*Case* 9	*Case* 10
Joint input (°)	θ_1	0,0	-2,0	-14,0	-23,0	-29,0	-2,0	2,0	-4,0	-2,0	0,0
	θ_2	-38,3	-29,8	-47,8	-56,3	-53,4	11,3	19,1	33,8	39,4	56,8
	θ_3	97,3	99,6	101,3	99,6	98,4	73,7	95,6	73,7	98,4	99,0
	θ_4	3,4	0,0	2,8	1,7	0,0	30,9	14,1	30,9	1,1	0,0
Output Posisi Hasil Perhitungan (cm)	a	0	-2	-14	-23	-29	-2	2	-4	-2	0
	x	5,28	6,64	3,37	10,46	8,60	11,44	4,80	14,44	3,76	6,52
	y	13,28	9,52	14,67	26,74	32,26	30,85	40,39	43,58	45,94	52,58
	z	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Output Posisi Hasil Pengujian (cm)	a	0	-2	-14	-23	-29	-2	2	-4	-2	0
	x	5	1	7	11	13	7	4	11	5	12
	y	5	10	14	20	26	30	33	40	45	50
	z	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Berdasar informasi yang diperoleh dari tabel 2, hasil perbandingan posisi *end-effector* perhitungan dan pengujian pada $a, x, y,$ dan z masing-masing memiliki nilai *error* terbesar pada *case* yang berbeda. Hasil *error* pengujian posisi x terbesar terjadi saat pengujian menggunakan *case* 2 sebesar 39,04%, sedangkan hasil *error* pengujian posisi y terbesar terjadi saat pengujian menggunakan *case* 1 sebesar 15,74%. Rata-rata hasil *error* pada pengujian posisi a dan z sebesar 0%, posisi x sebesar 25,06%, dan posisi y sebesar 18,89%. Hasil *error* yang terjadi pada pengujian *forward kinematic*s dalam menentukan posisi *seed* disebabkan oleh karakteristik motor *stepper* yang beroperasi dalam sistem *open loop*, sehingga diperlukan umpan balik (*feedback*).

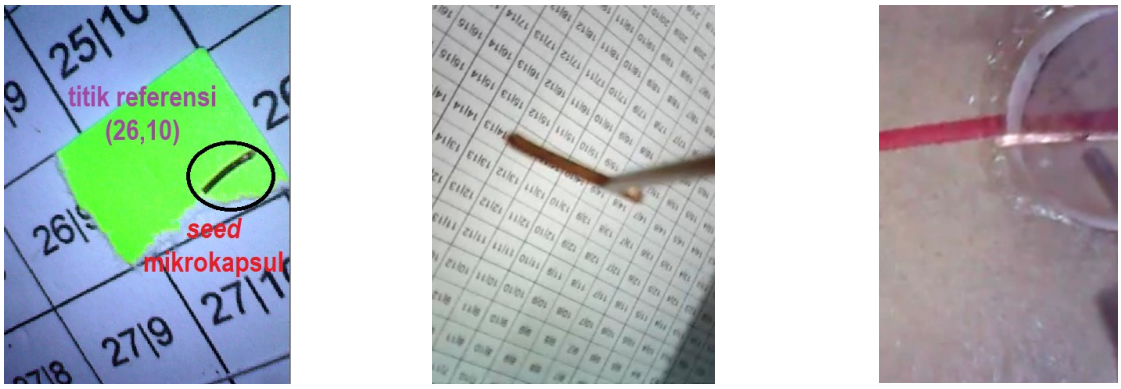
Uji Sistem Integrasi

Pengujian dan analisis dilakukan untuk mengetahui performa sistem. Diawali dengan pengujian motor *stepper* yang berfungsi sebagai limitasi *joint* pada lengan robot “DOBOT”, pergerakan *forward kinematic*s, dan pergerakan linier pada *linear motion*. Data pergerakan tersebut digunakan sebagai referensi untuk mengkalibrasi kinematik lengan robot "DOBOT" dalam pengambilan *seed* mikrokapsul dari *conveyor*. Proses kalibrasi dilakukan dengan menggabungkan data dari komunikasi serial dan *monitoring* untuk memastikan akurasi pergerakan lengan robot. Skema pengujian disesuaikan dengan pergerakan yang diharapkan seperti ditunjukkan pada gambar 15.



Gambar 15. Denah skema pengujian keseluruhan sistem integrasi

Pengujian ini dilakukan pada 900 titik berupa kotak berukuran 1 x 1 cm. Pada kertas kalibrasi, telah ditentukan 10 titik referensi yang dilakukan pengujian berulang masing-masing sebanyak 10 kali untuk mengetahui keakuratan hasil perhitungan dan hasil *real*. Seperti contoh *seed* yang diletakkan di titik referensi $(x, y) = (26,10)$ pada gambar 16 (a), titik referensi menjadi *input* yang diproses oleh LabVIEW sehingga lengan robot memproses data sudut agar menjangkau titik tersebut. Setelah mencapai titik referensi, *vacuum* akan mengambil *seed*. Kamera endoskopi melakukan pengamatan selama proses pengambilan hingga peletakan *seed* seperti yang ditunjukkan pada gambar 16 (b). Lengan robot yang telah membawa *seed* mikrokapsul di *vacuum gripper*, mulai berjalan menuju *chuck* untuk meletakkan *seed* pada *chuck* tersebut sesuai yang ditunjukkan pada gambar 16 (c). Setelah meletakkan *seed* di *chuck*, lengan robot kembali ke posisi *home*.



(a) (b) (c)

Gambar 16. Tampilan pengujian: (a) titik referensi *seed* di *conveyor*; (b) pengambilan *seed*; (c) peletakan *seed* di *chuck*

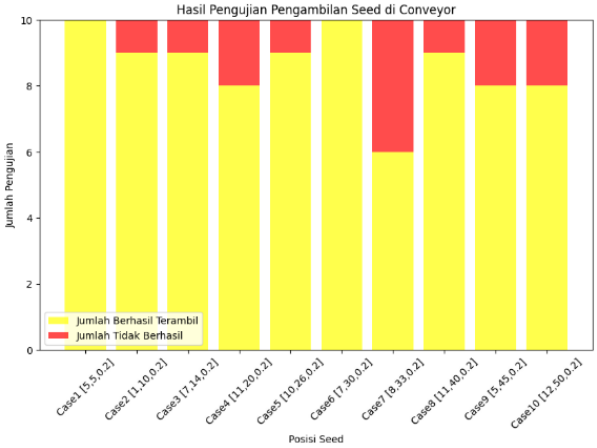
1 Pengujian Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan dengan skema dari posisi *home* ke posisi *seed* dan kembali ke posisi *home*. Pengambilan *seed* di kertas kalibrasi menggunakan *vacuum* untuk menguji keberhasilan *vacuum suction pen* mengambil *seed*, meletakkan *seed*, serta *monitoring* mengambil dan meletakkan *seed*. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali untuk masing-masing titik referensi.

1.1 Akurasi Pengambilan *Seed*

Persentase rata-rata keberhasilan *vacuum gripper* lengan robot pada gambar 17 untuk melaksanakan tugas pengambilan *seed* mencapai 87%. Hasil ini jauh lebih baik dibandingkan dengan data sebelumnya yang hanya mencapai 43%, hal ini dikarenakan telah dilakukan perbaikan dan pembersihan pada jalur *vacuum gripper*, terutama pada *vacuum suction pen*. Selain itu, hasil yang diperoleh menunjukkan tingkat keberhasilan yang

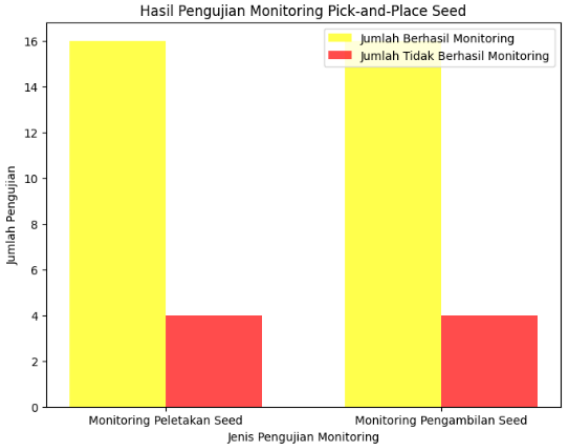
stabil. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan pembersihan berkala pada saluran *vacuum* agar kinerja *vacuum* dapat tetap optimal.



Gambar 17. Hasil pengujian pengambilan *seed*

1.2 Akurasi Monitoring *Seed*

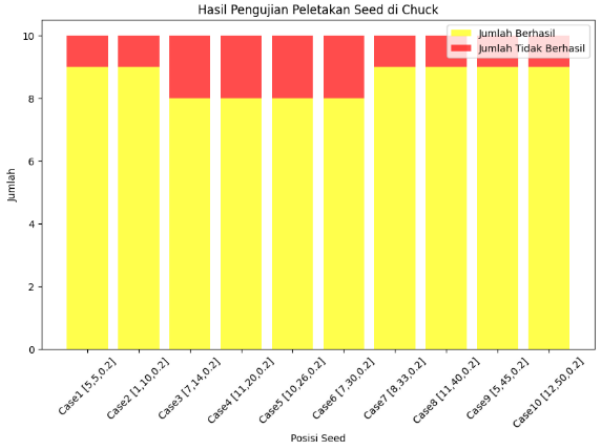
Keberhasilan kamera endoskopi, sebagaimana yang terlihat pada gambar 18, dalam mengamati pengambilan dan peletakan *seed* memiliki persentase keberhasilan sebesar 80%. Keberhasilan *monitoring* kondisi pengambilan dan peletakan *seed* ini dipengaruhi oleh posisi akhir kamera endoskopi. Hanya pada posisi tertentu yang mengakibatkan *seed* dapat diamati oleh kamera endoskopi, yaitu kondisi ketika kamera endoskopi berada di posisi yang sejajar dengan *vacuum suction pen*. Selain kondisi kamera yang sejajar dan *vacuum* tidak berhasil mengambil *seed*, maka sistem *monitoring* kamera endoskopi tidak berhasil melakukan *monitoring*.



Gambar 18. Hasil pengujian *monitoring seed*

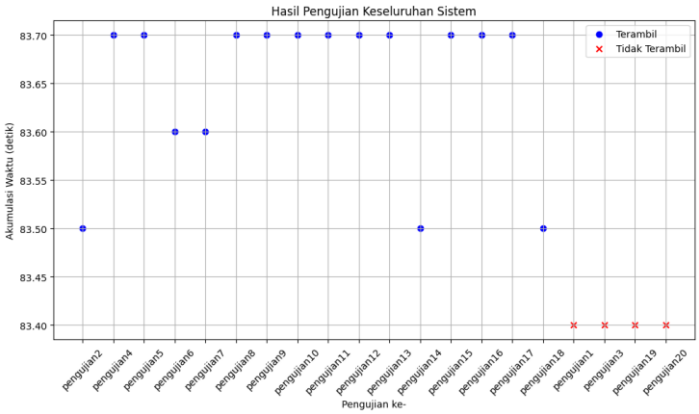
1.3 Akurasi Peletakan *Seed*

Mengacu pada gambar 19 ketika *vacuum* telah dilakukan perbaikan dan pembersihan, serta diberikan *delay* tambahan, diperoleh rata-rata keberhasilan dari pengujian sebanyak sepuluh kali pada setiap sepuluh titik referensi sebesar 86%. Dari kesepuluh pengujian tersebut, keberhasilan yang dapat diterima sebanyak enam *case*. Enam dari sepuluh *case* yang dapat diterima disebabkan oleh keberhasilan *vacuum suction pen* meletakkan *seed* di *chuck*. Ketidakberhasilan ini dapat disebabkan oleh faktor kesesuaian letak *chuck* dan kekuatan *suction pen* untuk melepas *seed*.



Gambar 19. Hasil peletakan *seed*

2 Pengujian Keseluruhan Sistem



Gambar 20. Hasil pengujian keseluruhan sistem

Informasi yang diperoleh dari gambar 20 merupakan hasil akumulasi waktu pengujian keseluruhan sistem. Rata-rata akumulasi hasil pengujian keseluruhan sistem membutuhkan waktu 83,6 detik. Terdapat dua percobaan yang dikatakan memiliki akumulasi waktu sama dengan rata-rata akumulasi. Tiga percobaan yang berhasil *monitoring*, mengambil, dan meletakkan *seed* namun memiliki akumulasi waktu di bawah rata-rata, sehingga perlu divalidasi terkait penyebab hal ini. Percobaan yang berhasil *monitoring*, mengambil, dan meletakkan *seed* dengan akumulasi waktu di atas rata-rata dianggap memenuhi sistem. Dengan ini, hasil hipotesis diterima, bahwa keseluruhan sistem lengan robot dapat melakukan kegiatan *pick-and-place seed* selama 85 detik. Waktu yang dibutuhkan oleh lengan robot selama 83,6 detik dilakukan dengan mempertimbangkan *safety* dan *delay* yang sesuai untuk lengan robot.

Kesimpulan

Proses pengujian dan *monitoring* sistem kendali secara keseluruhan, yang mengacu pada rumusan masalah dan tujuan penelitian, menghasilkan integrasi sistem kendali lengan robot dengan Arduino MEGA 2560 dan LabVIEW. Integrasi ini mencakup modul komunikasi data, kendali *vacuum gripper*, serta modul kendali lengan robot yang mencakup *linear motion*, *base*, *link* 1, dan *link* 2 dengan menggunakan metode *inverse kinematics* dan *forward kinematics*. Hal ini memungkinkan sistem untuk mencapai posisi *seed* mikrokapsul pada *conveyor*. Rata-rata hasil *error* pada pengujian sudut *linear motion* sebesar 0%, sudut *base* sebesar 8,08%, sudut *link* 1 sebesar 8,15%, dan sudut *link* 2 sebesar 9,78%. Rata-rata hasil *error* pada pengujian posisi α dan z sebesar 0%, posisi x sebesar 25,06%, dan posisi y sebesar 18,89%.

Hasil rerata keberhasilan dari pengujian pengambilan *seed* sebesar 87%, pengujian *monitoring* sebesar 80%, dan pengujian peletakan *seed* sebesar 86%. Hasil pengujian keseluruhan sistem menghasilkan 65% keberhasilan untuk *monitoring,* mengambil, dan meletakkan *seed* dengan waktu akumulasi rata-rata sistem sebesar 83,6 detik. Sistem pada kendali lengan robot menggunakan *open loop* sehingga menghasilkan keluaran motor *stepper* yang kurang stabil dan tidak konstan.

Referensi

[1] H. Sung *et al.*, "Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries," *CA. Cancer J. Clin.*, vol. 71, no. 3, pp. 209–249, May 2021, doi: 10.3322/caac.21660.

[2] A. Pujiyanto, M. Subechi, H. Lubis, and D. Ky, "Penentuan Parameter Pengelasan Las Laser untuk Pembuatan Sumber Iridium-192 (Ir-192) High Dose Rate (HDR)," *J. Radioisot. dan Radiofarmaka*, no. 2, pp. 443–448, 2013.

[3] H. Bethaningtyas, S. Suwandi, and C. D. Anggraini, "Sistem Klasifikasi Kondisi Pita Suara dengan Metode Decision Tree," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 8, no. 2, p. 168, 2019, doi: 10.22146/jnteti.v8i2.506.

[4] D. A. Orion, A. Abimanyu, and R. N. Wijaya, "Pengembangan Algoritma Kendali Berbasis Pengenalan Pola pada Lengan Robot 'DOBOT' untuk Preparasi Mikrokapsul Brachytherapy," ,Tugas Akhir, STTN - BATAN, Yogyakarta, 2021.

[5] E. Akbari, A. Abimanyu, and Suroso, "Pengembangan Prototype Mekanik Lengan Robot untuk Aplikasi Preparasi Mikro Sumber Iridium-192," Tugas Akhir, STTN - BATAN, Yogyakarta, 2021.

[6] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Second Ed. New York, US: Wiley India Pvt. Limited, 2008.

[7] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Second ed. New Jersey, US: John Wiley & Sons, 2020.

[8] T. R. Kurfess, *Robotics and Automation Handbook*, Vol. 414, First Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.

[9] O. Hock and J. Šedo, "Forward and Inverse Kinematics Using Pseudoinverse and Transposition Method for Robotic Arm DOBOT," *Kinematics*, 2017, doi: 10.5772/intechopen.71417.

[10] R. Gautam, A. Gedam, A. Zade, and A. Mahawadiwar, "Review on Development of Industrial Robotic Arm," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 1752–1755, 2017, [Online]. Available: https://irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3402.pdf.

[11] A. B. Dharmawan and L. Lina, "Penerapan Metode Denavit-Hartenberg pada Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot," *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, vol. 1, no. 1. 2017, doi: 10.24912/jmstkik.v1i1.441.

[12] F. Burlian, I. Yani, and D. I. Thamrint, "Desain Prototipe Sistem Pendorong Jenis Mea Sebagai Aktuator Pada Sistem Sortir Menggunakan Mikrokontroller," *Semin. Nas. avoER xii*, no. Prosiding AVoER XII Tahun 2020, pp. 592–597, 2020.

[13] S. Kücük and Z. Bingül, "The Inverse Kinematics Solutions of Industrial Robot Manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics 2004, ICM'04*, no. July, pp. 274–279, 2004, doi: 10.1109/icmech.2004.1364451.

[14] Sempaiscuba, "Inverse Kinematics for 4-DOF Articulated Manipulator," 2020. https://robotics.stackexchange.com/questions/20899/inverse-kinematics-for-4-dof-articualted-manipluator (accessed Dec. 21, 2021).

[15] A. Triansah, "Authentifikasi Login User pada Perangkat Lunak Menggunakan Arduino dan Enkripsi AES 256," *Expert J. Manaj. Sist. Inf. dan Teknol.*, vol. 7, no. 2, 2017, doi: 10.36448/jmsit.v7i2.968.

[16] D. Artanto, *Interaksi Arduino dan LabVIEW*, First Ed. Jakarta: Elex Media Komputindo, 2012.