



Tersedia secara online di www.ijournalse.org

Jurnal Ilmu Pengetahuan yang Sedang Berkembang

(ISSN: 2610-9182)

Vol. 5, Edisi Khusus "COVID-19: Penelitian yang Sedang Berkembang", 2021



Berbasis PID dengan Odometri untuk Kontrol Pelacakan Lintasan pada Robot Aromaterapi Covid-19 Omnidirectional Roda Empat

Iswanto^{1,2*}, Alfian Ma'arif³, Nia Maharani Raharja⁴, Gatot Supangkat^{2,5},
Fitri Arofiati⁶, Ravi Sekhar⁷, Dhiya Uddin Rijalusalam¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia

² Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia

³ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta 55191, Indonesia

⁴ Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta 55281, Indonesia

⁵ Program Studi Agroteknologi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia

⁶ Program Studi Magister Keperawatan, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia

⁷ Institut Teknologi Simbiosis, Symbiosis International (Deemed University), Pune 412115, India

Abstrak

Terapi inhalasi adalah salah satu perawatan paling populer untuk banyak kondisi paru-paru. Robot aromaterapi Covid-19 yang diusulkan adalah jenis robot seluler Unmanned Ground Vehicle (UGV) yang mengirimkan minyak esensial yang diuapkan secara terapeutik atau obat-obatan yang diperlukan untuk mencegah atau mengobati infeksi Covid-19. Ini menggunakan empat roda omnidirectional dengan kecepatan terkontrol untuk dapat bergerak ke segala arah sesuai dengan lintasannya. Semua motor untuk arah lurus, kiri, atau kanan harus dikontrol, atau robot akan melenceng dari target. Makalah ini menyajikan kontrol pelacakan lintasan robot beroda empat omnidirectional berdasarkan PID dan odometri. Odometry digunakan untuk mendapatkan posisi dan orientasi robot, menciptakan peta global. Kontrol berbasis PID digunakan untuk tiga tujuan: kontrol kecepatan motor, kontrol arah, dan kontrol posisi. Robot omnidirectional telah berhasil mengendalikan pergerakan keempat rodanya dengan kecepatan rendah pada pelacakan lintasan dengan nilai kriteria kinerja 0.1 untuk IAEH, 4.0 untuk MAEH, 0.01 untuk RMSEH, 0.00 untuk RMSEXY, dan 0.06 untuk REBS. Berdasarkan hasil percobaan, tingkat kesalahan kecepatan linier robot adalah 2%, dengan nilai rata-rata pengujian sebesar 1,3 persen. Nilai kesalahan efektif arah robot pada semua lintasan adalah 0,6%. Arah robot dapat dimonitor dan dipertahankan pada lintasan yang telah direncanakan.

Kata kunci:

Kontrol PID;
Odometri;
Empat Roda Omni Directional;
Robot Aromaterapi; Kontrol
Pelacakan Lintasan; Kontrol
Umpan Balik.

Riwayat Artikel:

Diterima:	04	Juli	2021
Direvisi:	09	Oktober	2021
Diterima:	21	Oktober	2021
Diterbitkan:	15	November	2021

1- Pendahuluan

Meningkatnya jumlah pasien Covid-19 membuat para peneliti mengembangkan teknologi di bidang medis untuk mengobati pasien Covid-19. Banyak peneliti sebelumnya yang telah melakukan penelitian mengenai terapi untuk pasien. Sebagai contoh, terapi antiplatelet pada pasien Covid-19 diteliti oleh Banik [1]. Terapi antitrombotik pada pasien Covid-19 diteliti oleh Godino [2]. Dampak klinis dari terapi antitrombotik pra-rawat inap pada pasien rawat inap dengan Covid-19 dipelajari oleh Russo [3]. Terapi radiasi dosis rendah telah diteliti untuk mengobati pneumonia terkait kekebalan tubuh pasca Covid-19

* **KONTAK:** iswanto_te@umy.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/esj-2021-SPER-13>

© 2021 oleh penulis. Pemegang lisensi ESJ, Italia. Ini adalah artikel akses terbuka di bawah syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Atribusi (CC-BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

[4]. Terapi nutrisi untuk pasien Covid-19 ditemukan dapat mengurangi risiko malnutrisi dan meningkatkan hasil klinis pasien [5]. Terapi plasma untuk pasien yang sakit parah dan kritis yang didiagnosis dengan Covid-19 juga diteliti [6]. Ghasemiyah meneliti aspek farmakokinetik dan farmakodinamik dari terapi obat pada pasien dengan infeksi sedang hingga berat [7]. Terapi tocilizumab untuk COVID-19 juga diteliti oleh Kaminski [8].

Di antara banyak perawatan terapi, salah satu yang paling populer adalah terapi inhalasi. Gowrishankar melakukan studi *in silico* tentang potensi fitokimia dalam terapi inhalasi uap herbal tradisional India untuk memerangi Covid-19 [9]. Di sisi lain, keamanan dan kemanjuran terapi ozon pada pasien Covid-19 ringan hingga sedang dipelajari oleh Shah [10]. Juga diketahui bahwa inhalasi adalah rute pemberian yang paling disukai untuk pengobatan banyak kondisi paru [11]. Oleh karena itu, robot aromaterapi merupakan teknologi yang menjanjikan untuk dikembangkan, yang dapat digunakan untuk melakukan pengiriman inhalasi. Robot aromaterapi Covid adalah robot bergerak yang diusulkan untuk membawa minyak esensial terapeutik atau obat yang diperlukan untuk melakukan terapi untuk mencegah atau mengobati infeksi Covid-19.

Sebuah mobile robot biasanya dapat bergerak, tidak terbatas pada satu lokasi saja [12]. Ciri khas mobile robot adalah aktuatornya yang berupa roda yang mendorong seluruh tubuh robot, sehingga memungkinkannya untuk berpindah posisi. Namun, salah satu masalah pada mobile robot adalah mobilitas robot. Kebanyakan mobile robot beroda memiliki roda biasa, sehingga membuat pergerakannya menjadi sangat terbatas [13]. Kemudi Ackerman dan kemudi diferensial adalah dua jenis navigasi robot yang sering mengalami masalah mobilitas rendah. Keduanya dapat bergerak maju dan berbelok tetapi tidak dapat bergerak ke segala arah, menempatkan mereka dalam kategori robot non-holonomic. Pergerakan arah yang terbatas akan menghalangi kemampuan robot untuk melakukan perjalanan ke arah yang berbeda. Hal ini tidak ideal untuk digunakan pada robot aromaterapi Covid, karena diharapkan dapat digunakan di berbagai lingkungan seperti rumah sakit, rumah pasien yang mengisolasi diri, tempat penampungan darurat, atau tempat umum pada umumnya.

Oleh karena itu, robot beroda banyak digunakan karena dapat bergerak lebih bebas dan aman untuk menghindari menabrak rintangan atau dinding [14], yang banyak ditemukan di rumah sakit atau tempat umum. Idealnya, robot harus dapat menjangkau semua arah tanpa harus berpindah atau mengubah arah [15]. Robot harus dapat bergerak maju dan mundur; robot juga harus bergerak ke segala arah pada bidang Cartesial $x-y$ tanpa memutar tubuhnya. Robot Omnidirectional cocok untuk fungsi ini karena merupakan robot holonomic yang dapat bergerak ke segala arah tanpa harus mengubah orientasinya [16].

Robot Omnidirectional memiliki beberapa keunggulan dibandingkan robot beroda lainnya, termasuk kemampuan untuk bergerak ke segala arah dengan radius belokan minimum dan gerakan traksi yang hebat dibandingkan penggerak lain seperti Mecanum atau roda diferensial lainnya. Roda ini didesain agar terlihat seperti roda biasa tetapi memiliki sub-roda yang terpisah 90 derajat dari roda luar. Sebagai hasilnya, perangkat mekanis membantunya untuk bermanuver tanpa menggeser posisi tubuhnya.

Roda memiliki model matematika yang kompleks untuk menggerakkan robot ke lokasi yang diinginkan. Secara umum, model matematika ini melibatkan kontrol pemodelan robot, khususnya invers dan kinematika tingkat lanjut. Konfigurasi tiga roda dan empat roda adalah desain umum dari robot beroda banyak [17]. Robot beroda empat lebih umum digunakan karena kemudahannya untuk bermanuver daripada robot beroda tiga.

Selain konfigurasi roda, sensor eksternal dan internal juga perlu dikonfigurasi dan dipilih secara tepat. Sensor eksternal dan internal digunakan untuk menggerakkan robot. Sensor eksternal, seperti sensor garis dan dinding, digunakan untuk mengarahkan gerakan robot. Robot dapat berjalan di sepanjang garis dan dinding dengan menggunakan sensor ini. Sensor internal, seperti sensor lokasi berupa sensor rotary encoder, digunakan untuk menggerakkan robot menuju target [18]. Data yang diperoleh dari sensor-sensor ini digunakan dalam pengukuran odometrik untuk menilai posisi dan orientasi robot [19].

Tiga variabel yang diperoleh dari pengukuran odometrik mempengaruhi lokasi dan orientasi robot pada kerangka sumbu koordinat. Variabel pertama adalah posisi X dan Y , yang menandakan titik pusat gandar belakang. Variabel kedua adalah sudut antara tubuh robot mobile terhadap sumbu X . Sementara itu, variabel ketiga adalah sudut kemudi mobile robot.

Metode kontrol odometrik telah banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah pelacakan lintasan robot [20]. Kontrol pelacakan lintasan adalah metode kontrol robot bergerak otonom yang memungkinkan robot mengikuti pola yang telah ditentukan. Metode pengendalian pelacakan lintasan dikategorikan menjadi dua: offline dan online. Kontrol pelacakan lintasan secara offline menentukan lokasi, kecepatan, dan orientasi robot dengan menggunakan sensor odometrik. Sementara itu, kontrol pelacakan lintasan online menentukan lokasi dan orientasi robot menggunakan sensor jarak, termasuk sensor kamera, sensor lidar, dan sensor ultrasonik. Kontrol odometrik memiliki lebih banyak keunggulan dibandingkan kontrol kinematik dan algoritme kontrol lainnya, terutama untuk pelacakan lintasan. Selain kontrol PID, kontrol odometrik memiliki perhitungan matematis yang paling sederhana, yang mengarah pada proses komputasi yang cepat.

Beberapa peneliti telah menerapkan kontrol pelacakan lintasan dalam berbagai aplikasi. Sebagai contoh, kontrol pelacakan lintasan telah diterapkan pada multi-robot [22, 23]. Banyak aplikasi juga telah ditemukan di UAV [24-27].

Namun, dalam bidang robotika, beberapa peneliti juga telah menerapkan kontrol pelacakan lintasan untuk Robot Manipulator [28], Magnetic Microrobot [29], Robot Lunak yang Berinteraksi [30], dan robot Laparoscopi 4-DoF [31]. Serupa dengan desain robot yang diusulkan, beberapa peneliti juga telah menerapkan kontrol pelacakan lintasan untuk robot beroda [32]-[34]. Selain itu, beberapa algoritma kontrol yang kompleks juga telah digunakan untuk kontrol pelacakan lintasan, seperti model kontrol prediktif [13],

Fuzzy [26, 35], Algoritma Kurva [36]. Bahkan beberapa peneliti telah menerapkan Sliding Mode Controller tingkat lanjut [37-39]. Kontrol PID juga telah diterapkan untuk kontrol pelacakan lintasan [40], dan kombinasinya dengan algoritma kontrol lain seperti pada Neural Adaptive PID [41].

Makalah ini menyajikan robot Aromaterapi Covid, yang merupakan robot roda omnidirectional dengan konfigurasi empat roda dengan rotary encoder dan diffuser. Terkait dengan fungsi spesifiknya, penelitian ini secara khusus mengusulkan kontrol pelacakan lintasan pada robot berbasis PID dengan odometri dan mengevaluasi kinerjanya berdasarkan kriteria evaluasi kinerja. Kontrol PID yang digunakan pada robot omnidirectional untuk kontrol trajectory tracking dieksplorasi untuk mendukung desain sistem kontrol. Dalam kontrol pelacakan lintasan, kontrol berbasis PID digunakan untuk tiga tujuan: kontrol kecepatan motor, kontrol arah, dan kontrol posisi.

Struktur makalah dirancang sebagai berikut. Bagian pertama adalah pendahuluan. Selanjutnya, bagian kedua adalah metodologi, yang terdiri dari beberapa sub-bagian seperti pemodelan kinematik, inverse kinematik, forward kinematik, sistem odometri, dan teknik kontrol PID. Bagian selanjutnya menjelaskan tentang arsitektur sistem kontrol, yang terdiri dari penjelasan tentang perencanaan lintasan robot, implementasi PID untuk perencanaan lintasan, implementasi PID untuk pergerakan robot, implementasi PID untuk heading robot, desain arsitektur sistem secara keseluruhan, dan parameter evaluasi kinerja. Bagian keempat adalah eksperimen dan hasil, yang terdiri dari analisis dan pembahasan eksperimen secara detail. Kemudian, bagian kelima adalah kesimpulan dan pekerjaan selanjutnya. Bagian keenam adalah ucapan terima kasih. Bagian terakhir adalah referensi, yang berisi daftar semua referensi yang digunakan dalam penelitian.

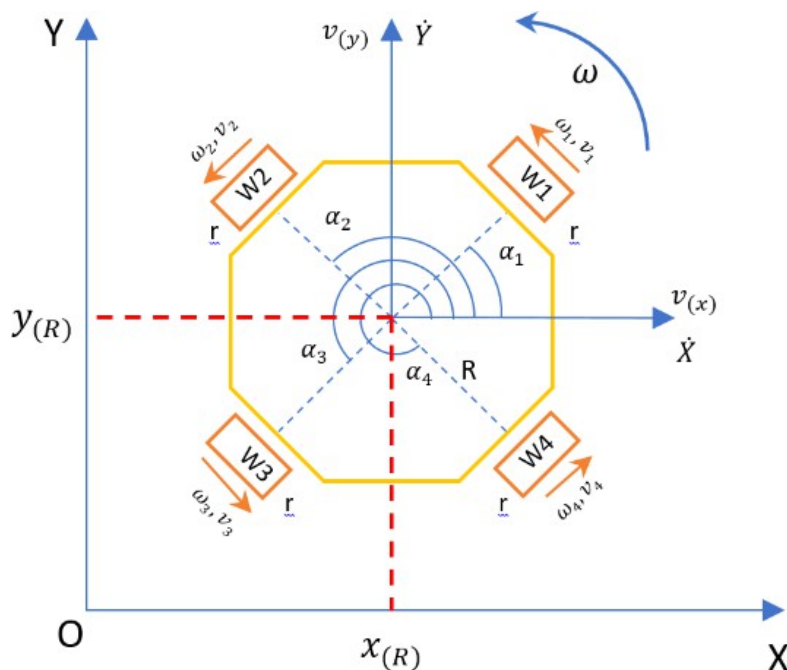
2- Metodologi Penelitian

2-1- Pemodelan Kinematik

Gambar 1 mengilustrasikan tampilan kerangka pemosisian roda robot Omnidirectional. Sudut yang terbentuk antara roda dan titik referensi robot dilambangkan dengan $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, and α_4 dalam diagram ini. Kecepatan sudut setiap roda dilambangkan dengan $\omega_w = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]^T$, dan kecepatan linier setiap roda adalah $v_w = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$.

Nilai kecepatan roda akan menjadi positif ketika roda berputar searah jarum jam (CW) dan akan menjadi negatif ketika berlawanan arah jarum jam (CCW). Koordinat referensi global robot dilambangkan dengan huruf XOY. Linier

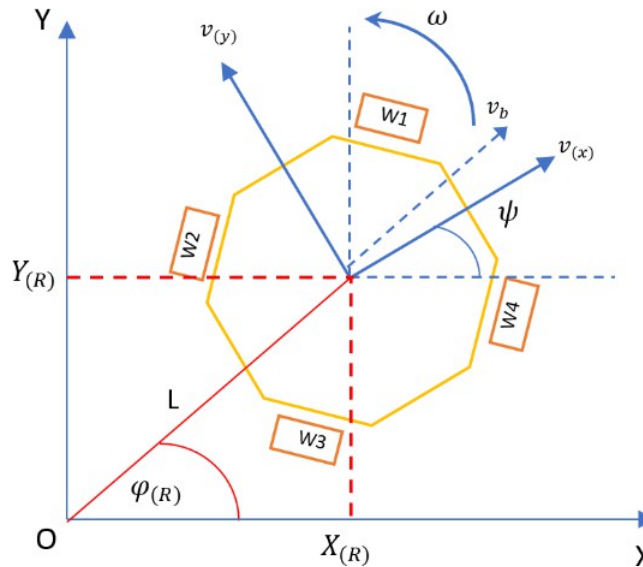
kecepatan dan kecepatan sudut robot ke koordinat global XOY diberitahukan menggunakan $v_{(g)} = [v_{(x)} \ v_{(y)} \ \omega]^T$. R menunjukkan jarak antara roda dan pusat robot, dan r menunjukkan jari-jari roda Omni.



Gambar 1. Penempatan roda robot omnidirectional.

Gambar 2 menunjukkan koordinat dan orientasi robot omnidirectional terhadap koordinat XOY global. Kecepatan

linier robot relatif terhadap kerangka tubuh robot dilambangkan dengan $v_{(R)} = [v_{(x)} \ v_{(y)}]^T$. Robot koordinat dan orientasi ke koordinat global dinotasikan dengan $X_{(g)} = [x_{(R)} \ y_{(R)} \ \psi]^T$. ω adalah notasi sudut kecepatan robot terhadap koordinat referensi global, $\varphi_{(R)}$ adalah arah pergerakan robot pada koordinat global, dan L adalah notasi koordinat resultan yang dilewati robot.



Gambar 2. Koordinat dan orientasi robot terhadap koordinat global XOY.

Dengan mengacu pada Gambar 2, beberapa persamaan dapat dirumuskan.

$${}_{(R)}\varphi = \tan^{-1} \frac{Y_{(R)}}{X_{(R)}} \quad (1)$$

$$L = \sqrt{X_{(R)}^2 + Y_{(R)}^2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{(x)} \\ v_{(y)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \omega \quad (4)$$

di mana ψ adalah notasi arah orientasi robot terhadap koordinat global, $v_{b(R)}$ adalah resultan kecepatan linier robot $v_{(x)}$ dan $v_{(y)}$

Ada dua jenis model kinematik dalam sistem pemodelan robot: kinematika terbalik (IK) dan kinematika maju (FK). Platform robot menggunakan IK untuk menentukan kecepatan linier roda $v_{(w)} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$ dan FK

untuk menentukan kecepatan linear robot dalam koordinat global $v_{(g)} = [v_{g(x)} \ v_{g(y)} \ \omega]^T$.

2-2-Robot Omnidirectional Kinematika Terbalik

Nilai kecepatan linier setiap roda $v_{(w)}$ dapat ditentukan berdasarkan perubahan pergerakan linier robot terhadap koordinat global yang dilambangkan dengan simbol $v_{(g)}$. Dengan mengacu pada Gambar 1 dan 2, maka diperoleh persamaan invers kinematik sebagai berikut:

$$v_w = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = T(\theta) v_{(g)} \quad (5)$$

di mana $T(\theta)$ adalah persamaan matriks rotasi untuk setiap roda pada Gambar 1 dan 2; dapat dituliskan sebagai Persamaan 6.

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\psi + \alpha)_1 & \cos(\psi + \alpha)_1 & R \\ -\sin(\psi + \alpha)_2 & \cos(\psi + \alpha)_2 & R \\ -\sin(\psi + \alpha)_3 & \cos(\psi + \alpha)_3 & R \\ -\sin(\psi + \alpha)_4 & \cos(\psi + \alpha)_4 & R \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$v_{(g)} = [v_{g(x)} \ v_{g(y)} \ \omega]^T \quad (7)$$

2-3-Robot Omnidirectional Kinematika Maju

Pergerakan linear robot $v_{(g)}$ ditentukan berdasarkan nilai kecepatan linear tiap roda v_w . Mengacu pada invers kinematik Persamaan 3, nilai $v_{(g)}$ diperoleh dengan $v_{(g)} = v_w \cdot T(\theta)^{-1}$. Namun, karena $T(\theta)$ pada Persamaan 6 merupakan matriks 4×3 , maka $T(\theta)^{-1}$ merupakan invers semu. Kesalahan perhitungan akan terjadi jika rumus ini digunakan. Oleh karena itu, dengan mengacu pada Gambar 1 dan 2, sebuah persamaan baru diusulkan seperti yang terlihat pada Persamaan 8:

$$V_{(g)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} D(\theta) \quad (8)$$

$D(\theta)$ adalah transposisi dari matriks rotasi pada Persamaan 6, yang dapat dituliskan sebagai;

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\psi + \alpha_1) \cos(\psi + \alpha_1) 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_2) \cos(\psi + \alpha_2) 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_3) \cos(\psi + \alpha_3) 2R^{-1} \\ -\sin(\psi + \alpha_4) \cos(\psi + \alpha_4) 2R^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

di mana R adalah jarak roda ke titik pusat robot.

2-4- Sistem Odometri

Odometri adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan data dari berbagai sensor gerak untuk memperkirakan perubahan posisi selama interval waktu tertentu. Dalam analisis ini, sensor odometrik diterapkan dengan menggunakan optical rotary encoder yang menghitung pulsa rotasi motor dalam satuan waktu. Selanjutnya, pulsa ini dapat diterjemahkan ke dalam variabel, seperti kecepatan roda, kecepatan robot orientasi, pergerakan robot, dan variabel navigasi lainnya. Kecepatan linier roda (v_n) perlu dibaca untuk mendapatkan data odometri untuk perubahan posisi robot menggunakan Persamaan 10:

$$v_n = \frac{P(n)}{PPR} \times K, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

di mana $v(n)$ adalah kecepatan linier roda, dan $P(n)$ adalah jumlah perubahan pulsa encoder dengan waktu yang dihitung menggunakan Persamaan 11, PPR adalah jumlah pulsa per revolusi yang ditentukan oleh spesifikasi optical rotary encoder, K untuk keliling roda, dan n untuk notasi nomor roda.

$$P(n) = \frac{dp(n)}{dt}, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

Kecepatan linier roda digunakan untuk menghitung nilai kecepatan linier robot ($v_{(g)}$) menggunakan Persamaan 5. Hasil dari persamaan FK, seperti pada Persamaan 8, digunakan untuk menghitung koordinat saat ini dan orientasi robot ($X_{(R)}$, $Y_{(R)}$, ψ) ke koordinat global, dengan menggunakan persamaan baru sebagai berikut;

$$X_{(R)} = \sum_{k=1}^n (X_{(n)}) = X_{(k)} + X_{(k+1)} + \dots + X_{(n)} \quad (12)$$

$$Y_{(R)} = \sum_{k=1}^n (Y_{(n)}) = Y_{(k)} + Y_{(k+1)} + \dots + Y_{(n)} \quad (13)$$

$$\psi = \sum_{k=1}^n (\omega_{(n)}) = \omega_{(k)} + \omega_{(k+1)} + \dots + \omega_{(n)} \quad (14)$$

2-5- Kontrol PID

Dalam penelitian ini, kontrol PID digunakan untuk tiga tujuan. Tujuan pertama adalah untuk mengontrol nilai kecepatan motor, yang kedua untuk mengubah koordinat tujuan robot, dan yang ketiga untuk mengontrol posisi target robot. Dengan demikian, kecepatan roda dan koordinat tujuan robot dapat dikoreksi dan dikontrol sesuai dengan lintasan yang dilalui.

Kontrol PID menggunakan umpan balik kontinu untuk menentukan ketepatan sistem [4]. Umpan balik tersebut kemudian dibandingkan dengan titik setel untuk mendapatkan kesalahan. Tiga parameter utama dalam kontroler adalah Proporsional, Integral, dan Derivatif [42]. Persamaan 15 adalah persamaan kontrol umum yang digunakan dalam Kontrol PID [43].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

$$e(t) = sp - pv \quad (16)$$

dimana $u(t)$ adalah notasi keluaran kontrol PID, K_p adalah notasi konstanta proporsional, K_i adalah notasi konstanta integral, p , K_d adalah konstanta turunan, $e(t)$ adalah selisih antara nilai set-point, sp , dan nilai pembacaan sensor arus. Setiap kombinasi nilai konstanta K_p , K_i , K_d akan memberikan respon keluaran yang berbeda. Tabel 1 menyajikan respon dari setiap kombinasi nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d .

Tabel 1. Respon dari setiap kombinasi nilai konstanta p, i, dan d.

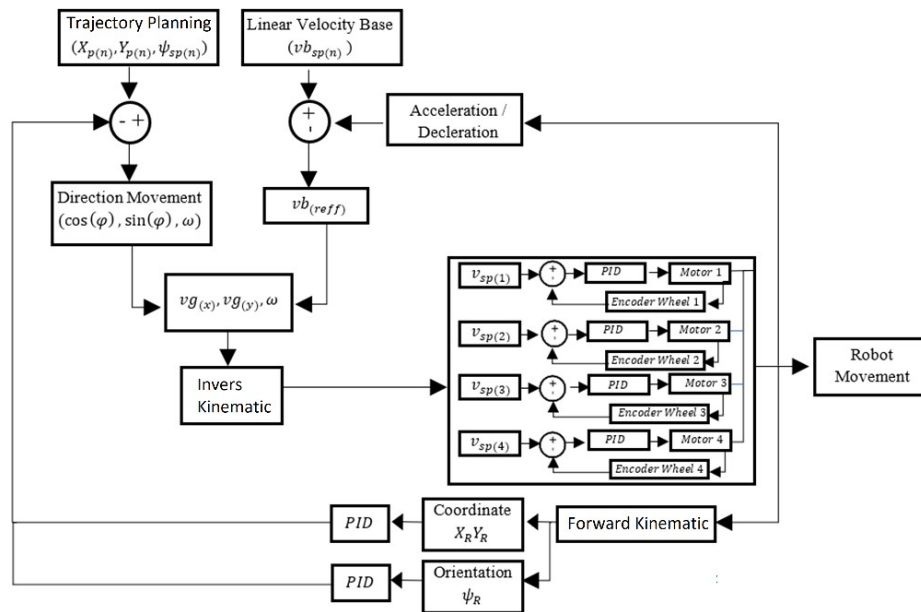
Respons Loop Tertutup	Waktu Bangun	Overshoot	Mengatur Waktu	Kesalahan Kondisi Tenang (Steady State Error)	Stabilitas
Meningkatkan K_p	Menurun	Meningkat	Peningkatan Kecil	Menurun	Merendahkan

Meningkatkan K_i	Penurunan Kecil	Meningkatkan Berkembang		Penurunan Besar	Merendahkan
Meningkatkan K_d	Penurunan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil	Ditingkatkan

3- Arsitektur Sistem Kontrol

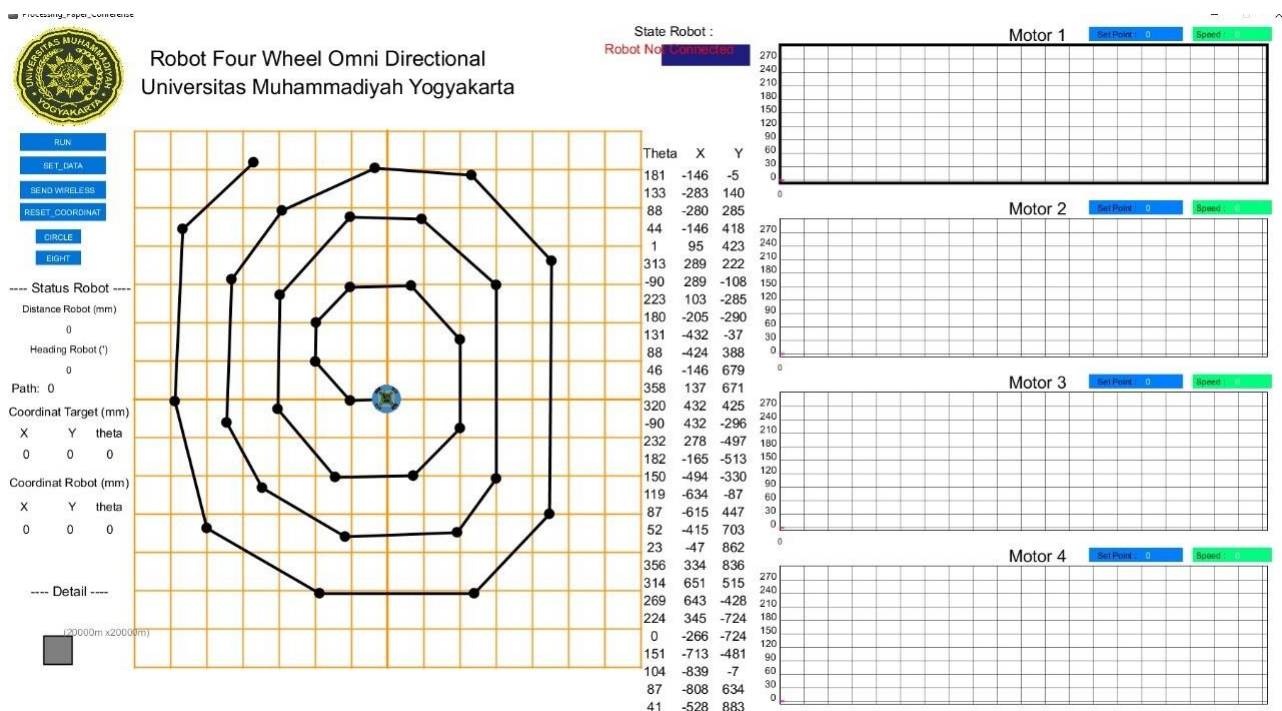
3-1-Sistem Kontrol Robot dan Perencanaan Lintasan

Diagram blok keseluruhan dari sistem kontrol untuk robot omnidirectional direpresentasikan pada Gambar 8. Sistem diinisialisasi dengan perencanaan lintasan, termasuk serangkaian koordinat sebagai nilai perencanaan lintasan, heading target sebagai nilai heading set-point, dan nilai kecepatan resultan robot (v_b). Beberapa data tersebut kemudian akan dikonversi menjadi arah dan kecepatan sudut robot. Nilai kecepatan yang direferensikan akan digunakan untuk menghitung set-point kecepatan dioperasikan oleh kontrol PID menggunakan Persamaan 22. Sementara itu, perangkat odometrik dapat mendeteksi perubahan nilai pergerakan robot dari waktu ke waktu setelah robot mulai bergerak. Koordinat dan orientasi robot dihitung menggunakan persamaan kinematik maju, seperti pada Persamaan 8. Data koordinat dan orientasi akan digunakan untuk mengoreksi arah, kecepatan, dan orientasi robot.



Gambar 8. Diagram Blok Kontrol.

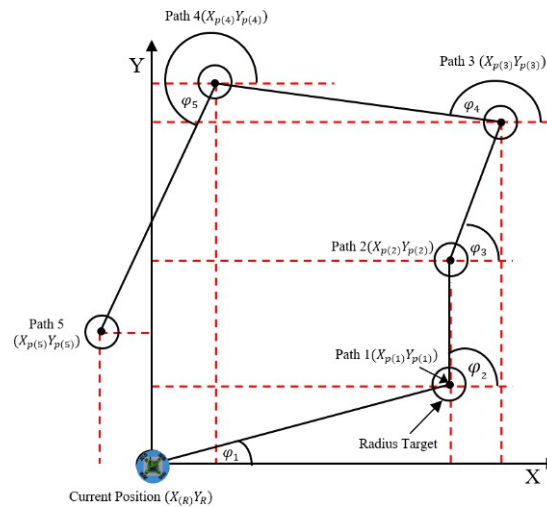
Pergerakan robot kemudian akan dikirim secara nirkabel ke komputer dengan menggunakan modul NRF. Graphical User Interface (GUI) dibuat untuk menyederhanakan perencanaan lintasan dan pelacakan pergerakan robot omnidirectional, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Semua status pergerakan robot akan ditampilkan di GUI.



Gambar 4. Antarmuka Pengguna Grafis Robot Omnidirectional.

3-2-Implementasi PID untuk Perencanaan Lintasan

Gambar 3 mengilustrasikan dasar dari algoritma kontrol pergerakan robot. Gambar tersebut menunjukkan posisi robot yang dipetakan ke dalam perencanaan lintasan yang harus diselesaikan.



Gambar 3. Algoritma Perencanaan Lintasan.

Dengan mengacu pada Gambar 3, beberapa persamaan dapat dirumuskan.

$$X_t = X_{p(n)} - X_{(R)}, \quad (17)$$

$$Y_t = Y_{p(n)} - Y_{(R)}, \quad (18)$$

$${}_{(n)} \varphi = \tan^{-1} \frac{Y_t(n)}{X_t(n)} \quad (19)$$

$$Res = \sqrt{(X_t)^2 + (Y_t)^2} \quad (20)$$

Di mana $X_t(n)$, $Y_t(n)$ adalah jarak robot ke posisi target; $X_{p(n)}$, $Y_{p(n)}$ adalah titik lintasan ke koordinat global di mana n menunjukkan notasi urutan titik lintasan; $X_{(R)}$, $Y_{(R)}$ menunjukkan posisi saat ini dari koordinat ROB;

φ adalah arah pergerakan robot, dan Res adalah notasi jarak resultan robot ke titik lintasan. Target radius yang ditunjukkan pada Gambar 3 adalah nilai toleransi robot di mana robot dianggap telah mencapai nilai titik jalur yang ditentukan. Karena keterbatasan akurasi sensor odometri yang digunakan, akan sangat sulit bagi robot untuk benar-benar mencapai titik jalur yang telah ditentukan. Laju perubahan titik jalur ditentukan dengan membandingkan posisi titik jalur awal dengan target dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$e(t) = sp - pv \quad (21)$$

Dengan mengidentifikasi arah robot φ seperti yang dijelaskan pada Persamaan 19, kecepatan linier robot (v_{breff}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$v_{breff} = \cos(\varphi) v_{g(x)} + \sin(\varphi) v_{g(y)} \quad (22)$$

$$v_{g(x)} = \cos(\varphi) v_{breff} \quad (23)$$

$$v_{g(y)} = \sin(\varphi) v_{breff} \quad (24)$$

dimana $v_{g(x)}$ dan $v_{g(y)}$ adalah kecepatan linear robot terhadap koordinat global, dan v_{breff} adalah kecepatan linear robot. Dengan memasukkan hasil dari Persamaan 23 dan 24 ke dalam invers kinematik Persamaan 5, maka set-point dari linear

kecepatan untuk setiap roda dapat dihitung. Kecepatan setiap roda dihitung menggunakan kontrol PID, seperti pada Persamaan 15 dan 16.

Kontrol PID memiliki beberapa manfaat, seperti sensitivitas tinggi untuk merespons kesalahan pada pabrik yang ada. Namun, dalam kasus kontrol kecepatan motor, hal ini dapat menjadi kerugian. Ketika terjadi perubahan kecepatan yang signifikan, respons kontrol yang cepat akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil dengan adanya overshoot. Kondisi tunak juga akan menghasilkan kesalahan pembacaan odometrik karena selip roda. Untuk alasan ini, metode akselerasi dan deselerasi diterapkan pada kecepatan linier robot (v_{breff}), menyebabkan set-point setiap roda meningkat secara teratur dan memungkinkan kontrol kecepatan

motor dimonitor secara konsisten. Seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 25, ada perubahan dalam percepatan v_{breff} .

$$v_{b(reff)} = \begin{cases} v_{b(reff)} = \int_0^b a(t) dt, & \text{if } v_{b(reff)} < v_{b(sp)} \\ 0 & \\ v_{b(reff)} = v_{b(sp)}, & \text{if } v_{b(reff)} \geq v_{b(sp)} \end{cases} \quad (25)$$

di mana b adalah durasi waktu akselerasi, $a(t)$ adalah fungsi waktu dari akselerasi. Semakin kecil nilai a , perubahan kecepatan motor semakin halus, tetapi juga membutuhkan waktu lebih lama untuk berubah. Nilai set-point dari resultan kecepatan linier robot diwakili oleh $v_{b(sp)}$. Nilai ini merupakan variabel input pada setiap percobaan.

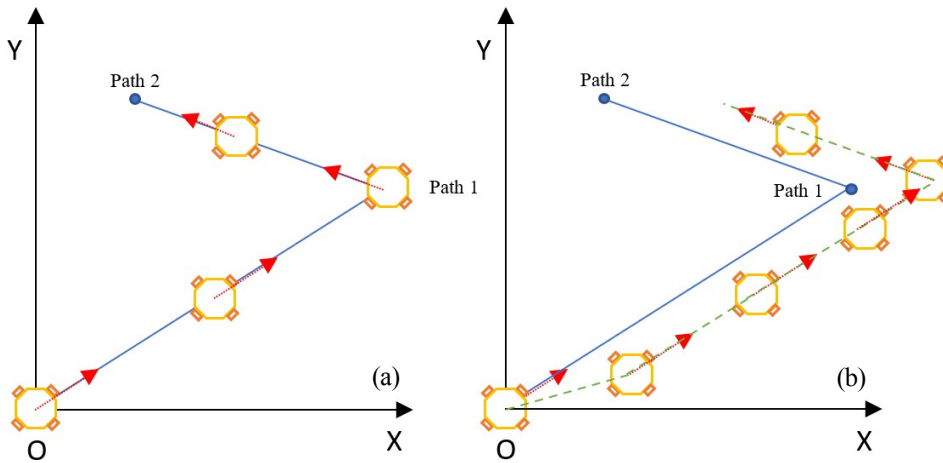
Ketika robot mencapai titik target, kecepatan motor akan melambat, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 26,

$$v_{b(reff)} = \int_0^c a(t) dt, \text{ if } Res < k \quad (26)$$

di mana c adalah waktu perlambatan, dan $a(t)$ adalah fungsi waktu perlambatan. Nilai $a(t)$ mempengaruhi waktu perlambatan: semakin besar nilai $a(t)$, semakin cepat perlambatannya. Pada Gambar 3 dan Persamaan 20, Res adalah jarak yang dihasilkan dari robot ke titik lintasan. Nilai k mewakili notasi jarak, titik di mana robot mulai melambat.

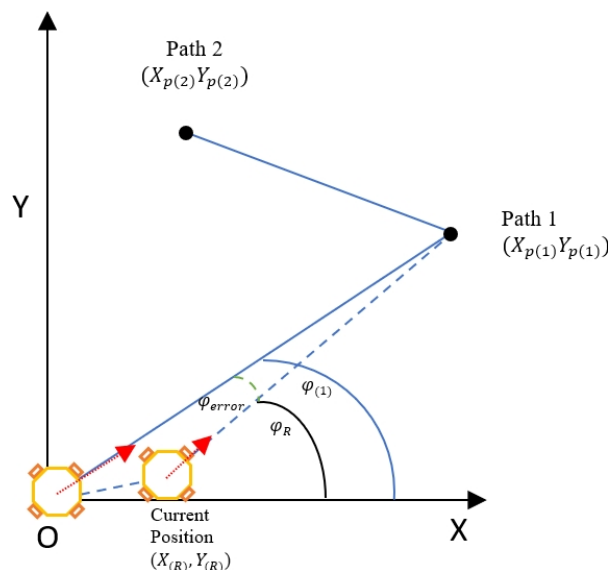
3-3-Implementasi PID untuk Pergerakan Robot

Kontrol PID diimplementasikan untuk mengontrol pergerakan robot agar tetap berada pada perencanaan lintasan yang telah ditentukan. Gambar 5(a) dan 5(b) menunjukkan ilustrasi kesalahan pergerakan robot omnidirectional terhadap lintasan.



Gambar 5. (a) Ilustrasi Pergerakan Robot Ideal (b) Kesalahan Pergerakan Robot.

Diperlukan untuk mendeteksi kesalahan dalam arah pergerakan robot saat ini φ_R dalam perencanaan lintasan yang ditentukan $(n)\varphi$, seperti yang ditampilkan pada Gambar 6. Gambar 6 mengilustrasikan kesalahan deteksi arah pergerakan robot.



Gambar 6. Kesalahan dalam Deteksi Arah Pergerakan Robot.

Dengan mengacu pada Gambar 6, beberapa persamaan di bawah ini diperoleh:

$${}_R \varphi = \tan^{-1} \frac{YP(n) - YR}{XP(n) - XR} \quad (27)$$

$$\varphi_{error} = \varphi(n) - \varphi_R \quad (28)$$

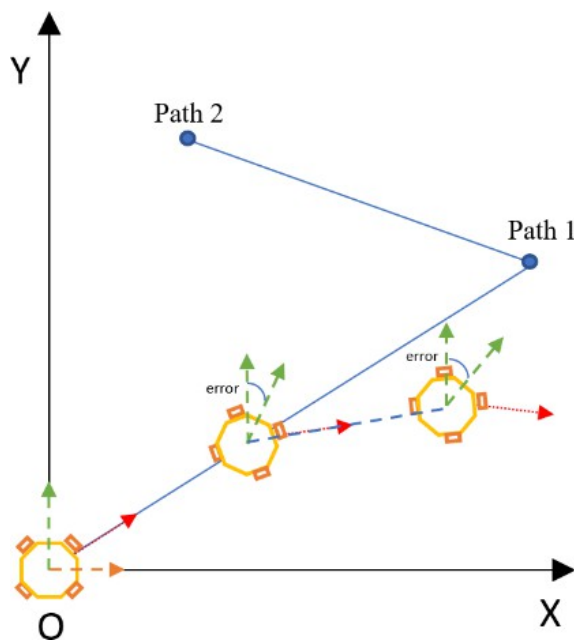
Nilai φ_{error} kemudian dimasukkan ke dalam persamaan PID, yaitu Persamaan 15 dan 16, yang menghasilkan output kontroler PID. Nilai ini kemudian digunakan untuk memperbaiki nilai arah pergerakan robot $\varphi(n)$ yang menghasilkan robot bergerak mendekati nilai perencanaan lintasan, seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$\varphi_{correction} = \varphi(n) + out_pid(m) \quad (29)$$

$out_pid(m)$ adalah output dari PID untuk pergerakan robot.

3-4-Implementasi PID untuk Pengarah Robot

Selain kecepatan dan arah gerakan robot, kontrol heading merupakan aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam kontrol gerakan robot omnidirectional. Hal ini dikarenakan perubahan heading robot akan menyebabkan robot bergerak ke arah yang salah. Gambar 7 memberikan contoh kesalahan gerakan robot yang dipicu oleh perubahan arah heading robot.



Gambar 7. Ilustrasi kesalahan gerakan yang disebabkan oleh perubahan arah robot.

Nilai error dari heading robot dihitung menggunakan data odometrik dengan membandingkan nilai heading robot ψ diperoleh dari FK Persamaan 8 ke nilai set-point heading $\psi(sp)$, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 30.

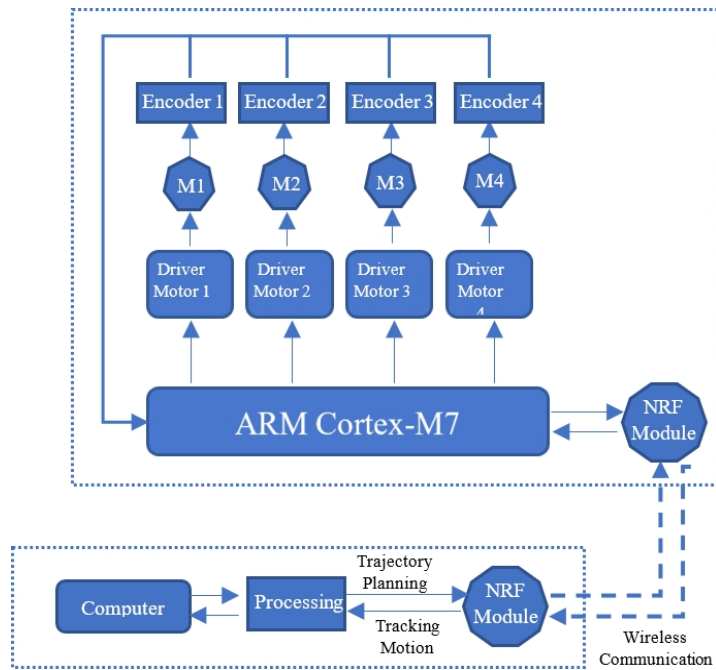
$$\psi_{error} = \psi(sp) - \psi_R \quad (30)$$

Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam Persamaan 15 sehingga output PID dapat mengoreksi arah heading robot $(\psi)_R$.

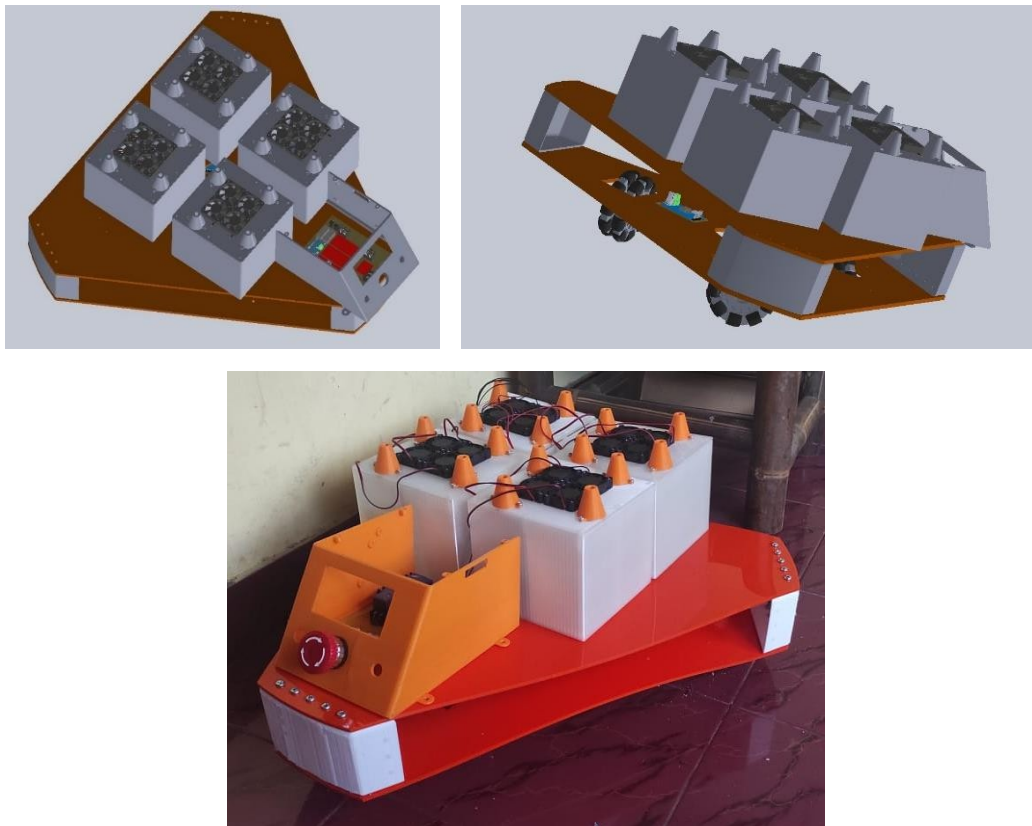
3-5-Desain Arsitektur Sistem Secara Keseluruhan

Gambar 9 mengilustrasikan diagram skematik untuk robot omnidirectional. Robot menggunakan mikrokontroler ARM Cortex-M7 untuk tujuan kontrol. Mikrokontroler kemudian membaca sensor encoder. Output mikrokontroler dimasukkan ke dalam driver motor untuk mengenali kecepatan motor DC. Robot omnidirectional ini dilengkapi dengan dukungan komunikasi menggunakan modul NRF. Data dari robot dikirim ke komputer untuk keperluan pelacakan.

Gambar 10 menunjukkan robot omnidirectional empat roda. Robot Aromaterapi Covid terdiri dari empat set diffuser mini; masing-masing terdiri dari wadah cairan, empat nosel mikro, kipas pendingin DC, dan pembuat kabut. Sistem diffuser secara otomatis aktif ketika sistem robot omnidirectional aktif. Wadah cairan akan membawa air suling yang telah ditambahkan dengan minyak esensial terapeutik, dan pembuat kabut akan menyemprotkan campuran tersebut. Uap akan disemprotkan ke luar melalui nosel untuk memberikan terapi inhalasi. Kipas pendingin akan mengontrol suhu di dalam wadah dan menyebarkan air yang menguap ke luar.



Gambar 9. Diagram Pengkabelan Elektronik.



Gambar 10. Robot Omnidirectional Empat Roda.

3-6-Parameter Evaluasi Kinerja

Pendekatan pengumpulan data berikut ini digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja pelacakan pergerakan robot:

- 1- Integral dari Kesalahan Absolut. IAE_{xy} dan IAE_D menunjukkan akumulasi kesalahan dari beberapa input set-point selama waktu pergerakan robot.

$$IAE_{xy} = \int_0^T (|X_e(t)| + |Y_e(t)|) dt \quad (31)$$

$$IAE_D = \int_0^T \psi_e(t) dt \quad (32)$$

2- Kesalahan Absolut Maksimum. MAE_{xy} dan MAE_H menunjukkan nilai error maksimum dari beberapa set-point selama waktu pergerakan robot.

$$MAE_{xy} = \max X_e(t), \max Y_e(t) \quad (33)$$

$$t \in [0, T] \quad (34)$$

$$MAE_H = \max \psi_e(t) \quad (35)$$

$$t \in [0, T] \quad (36)$$

3- Gambar 3. Kesalahan Kuadrat Rata-Rata Akar (Root Mean Square Errors). $RMSE_{xy}$ dan $RMSE_H$ menunjukkan nilai efektif error dari beberapa set-point selama waktu pergerakan robot,

$$RMSE_{xy} = \sqrt{\frac{1}{H} \int_0^T (|X_e(t)|^2 + |Y_e(t)|^2) dt} \quad (37)$$

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{1}{H} \int_0^T [\psi_e(t)]^2 dt} \quad (38)$$

di mana H adalah notasi dari jumlah sampel data yang diambil

4- Tingkat Kesalahan Kecepatan Dasar (RE_{BS}). Ini menunjukkan tingkat kesalahan (%) dari kontrol kecepatan keempat roda saat sistem berjalan. Rumus untuk (RE_{BS}) diperoleh dari persamaan berikut.

$$RE_{BS} = \frac{\overline{v_{ref}} - \overline{vD(R)}}{\overline{v_{ref}}} \times 100\% \quad (39)$$

dimana;

$$\overline{v_{ref}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_{ref}(n)) \quad (40)$$

$$\overline{vD_R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (vD_{R_n}) \quad (41)$$

4- Eksperimen dan Hasil

Pengujian eksperimental dibagi menjadi dua bagian untuk menilai keefektifan dan kelayakan kontrol PID pada setiap perangkat dalam mengendalikan pergerakan robot sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan. Bagian (A) menjelaskan penyetelan PID sebagai respons terhadap perubahan input yang dijelaskan pada Bab III. Kontrol PID secara keseluruhan dievaluasi pada bagian (B) untuk mengatur kecepatan robot, arah pergerakan, dan heading sesuai dengan perencanaan lintasan. Hasil akhir mengenai kriteria kinerja dianalisis sesuai dengan metode yang dijelaskan pada Bab III untuk mendapatkan kesimpulan penelitian. Gambar 8 menunjukkan sistem kontrol robot; Gambar 9 menunjukkan desain sistem arsitektur robot. Sementara itu, Gambar 10 dan Tabel 2 menunjukkan detail parameter dan dimensi robot.

Tabel 2. Data Parameter Robot dan Roda.

Parameter	Panjang	Unit
Roda Radius	50	mm
Keliling (K)	314.28	mm
Jarak Roda ke Pusat Robot (R)	165	mm
Robot Dimensi	400x400	mm
Massa Robot	3.73	kg
Baterai Tegangan Maks	24	V

4-1- Pengujian Penyetelan PID

Metode trial-and-error digunakan untuk menyetel setiap nilai K_p , K_i , dan K_d untuk setiap sub-sistem pada robot omnidirectional, dengan mempertimbangkan respon sistem terhadap perubahan parameter dengan melibatkan data pada Tabel 3. Hasil terbaik diamati dan diambil sebagai respon terhadap perubahan plant sebagai hasil dari proses ini.

4-2- Tes Kecepatan Motor

Kecepatan motor diukur pada tiga kecepatan yang berbeda dalam pengujian kontrol PID: 0,44, 0,6, 0,74 (m/s). Kemudian, bagaimana kontrol PID bereaksi terhadap perubahan kecepatan motor diamati. Metode tuning PID meneliti respon setiap perubahan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d . Hasil tuning yang paling memuaskan diperoleh setelah dilakukan banyak tuning telah diselesaikan, seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Hasil Penyetelan PID Kecepatan Motor.

Parameter	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
K_p	1.05	1.05	1.05	1.05
K_i	0.05	0.05	0.05	0.05
K_d	0.12	0.12	0.12	0.12
Pengambilan Sampel Waktu	100ms	100ms	100ms	100ms

Gambar 11 menunjukkan respons sistem terhadap perubahan referensi kecepatan motor tanpa menerapkan kontrol akselerasi. Diagram tersebut menunjukkan kecepatan masing-masing motor: garis berwarna merah menunjukkan kecepatan motor 1, garis berwarna hijau menunjukkan kecepatan motor 2, garis berwarna biru menunjukkan kecepatan motor 3, dan garis berwarna ungu menunjukkan kecepatan motor 4. Tiga pengujian dilakukan untuk setiap motor, dengan menggunakan titik kecepatan yang ditetapkan yaitu 0,44, 0,6, dan 0,74.

Gambar 11 (a) menunjukkan hasil pengujian untuk Motor 1. Pada kecepatan set-point 0,44, overshoot mencapai 9,31, overshoot terbesar di antara hasil pengujian untuk semua set-point pengujian kecepatan untuk Motor 1. Sedangkan pada kecepatan set-point 0,6, nilai overshoot sebesar 3,21. Nilai overshoot terkecil adalah 1,62, yang dicapai oleh Motor 1 pada kecepatan referensi 0,74. Nilai rata-rata overshoot pada Motor 1 adalah 4,71.

Hasil serupa ditunjukkan pada hasil uji kecepatan untuk Motor 2, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 (b). Overshoot terbesar dicapai pada kecepatan set-point 0,44, yaitu 7,05. Overshoot terkecil, yaitu 2,17, didapat pada kecepatan set-point 0,74. Pada kecepatan set-point 0,6, nilai overshoot adalah 3,21. Rata-rata overshoot yang sama juga ditunjukkan; nilai rata-rata adalah 4,14.

Gambar 11 (c) menunjukkan hasil pengujian kecepatan untuk Motor 3. Meskipun tidak dapat dilihat pada gambar, sedikit perbedaan dibandingkan dengan hasil pengujian Motor 1 dan Motor 2. Tidak seperti pada dua pengujian sebelumnya, overshoot terkecil ditemukan pada kecepatan set-point 0,6, yaitu 3,21. Pada kecepatan set-point 0,44, nilai overshoot sebesar 7,04 adalah yang terbesar. Pada kecepatan set-point 0,74, nilai overshoot adalah 3,52. Nilai overshoot rata-rata untuk Motor 3 adalah 4,54.

Hasil pengujian kecepatan untuk Motor 4 ditunjukkan pada Gambar 11 (d). Pada hasil pengujian, nilai overshoot yang serupa ditemukan pada kecepatan set-point 0,6 dan 0,74, yaitu 4,90 dan 4,93. Sementara itu, pada kecepatan set-point 0,44, nilai overshoot adalah 7,04. Nilai overshoot rata-rata untuk Motor 4 adalah 4,93.

Berdasarkan hasil pengujian kecepatan umum dari keempat motor, kinerja sistem berdasarkan analisis respons waktu adalah sebagai berikut: waktu naik adalah 0,2 detik, waktu menetap adalah 0,5 detik, dan rata-rata overshoot maksimum adalah 5%. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem kontrol PID bereaksi dengan cepat terhadap perubahan input. Namun, karena sistem menghasilkan nilai overshoot yang sangat tinggi, perubahan yang signifikan dan tiba-tiba pada nilai kecepatan motor membuat sistem tidak stabil, menyebabkan roda tergelincir, menghasilkan pembacaan odometrik yang tidak akurat.

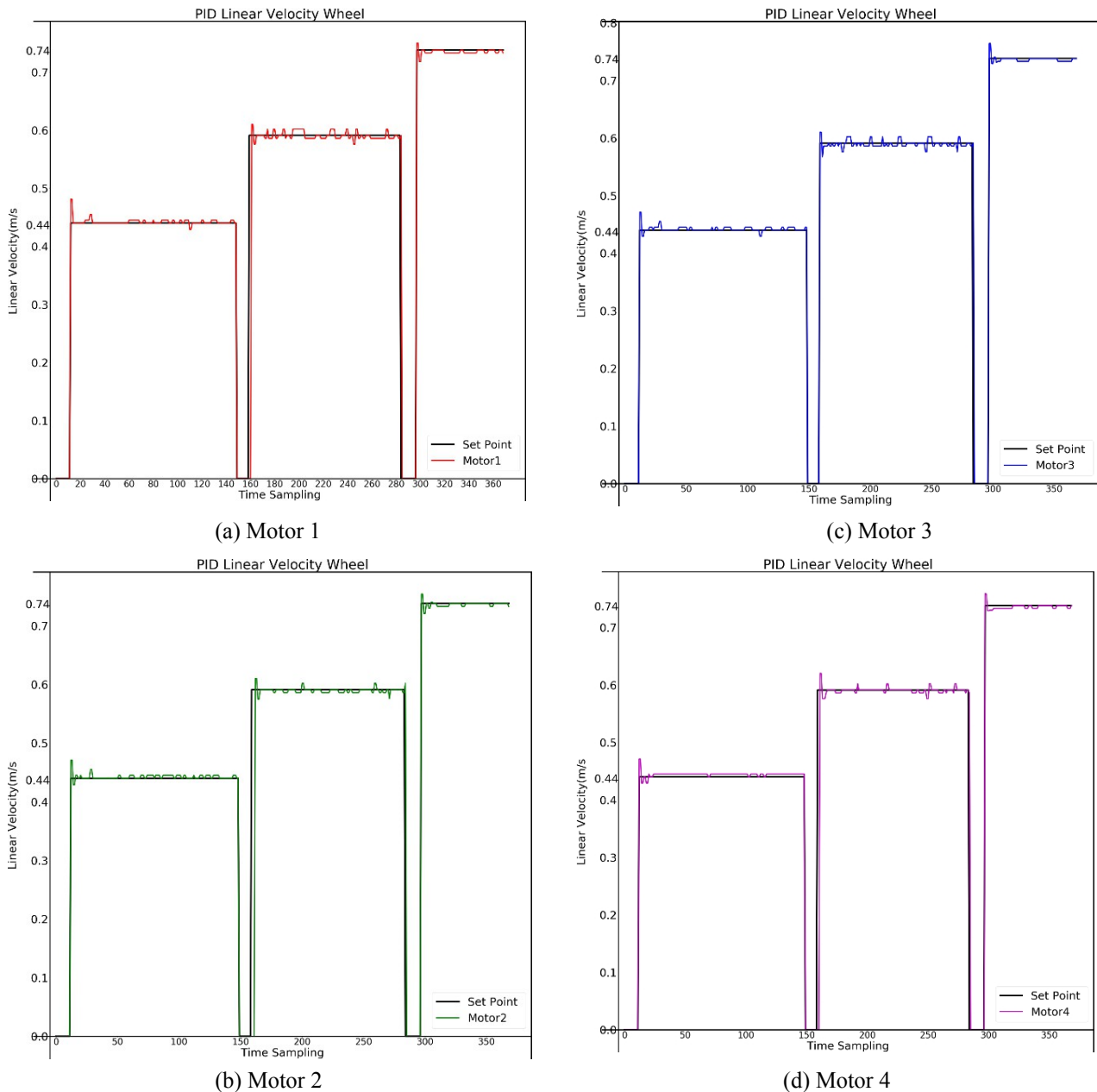
Gambar 12 mengilustrasikan respons kontrol kecepatan motor dengan kontrol akselerasi. Representasi warna garis dan kecepatan referensi yang digunakan dalam pengujian ini sama dengan pengujian sebelumnya.

Pengujian pertama dilakukan pada Motor 1, dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 12 (a). Sementara itu, Gambar 12(b), Gambar 12(c), dan Gambar 12(d) menunjukkan hasil pengujian untuk Motor 2, Motor 3, dan Motor 4 secara berurutan. Berdasarkan gambar-gambar tersebut, dapat dilihat bahwa kontrol akselerasi yang dibuat pada sistem roda memiliki bentuk kecepatan linier yang tumpul jika dibandingkan dengan hasil pengujian sebelumnya. Bentuk kurva yang tumpul menunjukkan efek dari kontrol akselerasi; roda cenderung bergerak lebih halus daripada tanpa kontrol akselerasi. Temuan ini sejalan dengan overshoot yang dibuat oleh sistem. Overshoot rata-rata untuk hasil uji kecepatan dengan kontrol akselerasi jauh lebih rendah daripada tanpa akselerasi. Nilai rata-rata overshoot untuk Motor 1 adalah 0,89, untuk Motor 2 adalah 0,67, untuk Motor 3 adalah 0,83, dan untuk Motor 4 adalah 0,53.

Bukti lain dari respon yang lebih mulus juga ditemukan berdasarkan parameter performa time-response secara umum. Temuan menunjukkan bahwa sistem merespons tanpa overshoot pada awal sistem. Sistem juga merespons lebih lambat daripada pengujian sebelumnya dengan waktu naik 0,8 detik dan waktu menetap 1 detik, yang biasanya terjadi pada pergerakan roda yang mulus.

Hasil pengujian yang lebih rinci dari overshoot yang disebabkan oleh perubahan pada setiap kecepatan set-point akan disebutkan sebagai berikut. Pada respon Motor 1, pada kecepatan set-point 0,44, overshoot adalah 1,59. Sedangkan pada kecepatan set-point 0.6, overshootnya adalah 0.68; dan pada kecepatan 0.74, overshootnya adalah 0.41. Berdasarkan hasil pengujian kecepatan pada Motor 2, maka

overshoot adalah 1,14 pada kecepatan titik setel 0,44. Overshoot adalah 0,34 pada kecepatan set-point 0,6 dan 0,54 pada kecepatan set-point 0,74. Sementara itu, Motor 3 memiliki overshoot 1,14 pada kecepatan set-point 0,44. Motor 3 memiliki overshoot 0,68 pada kecepatan set-point 0,6 dan overshoot 0,68 pada kecepatan set-point 0,74. Terakhir, pada respons Motor 4, pada kecepatan set-point 0,44, overshoot adalah 1,14. Pada kecepatan set-point 0,6, Motor 4 memiliki overshoot 0,17. Pada kecepatan set-point 0,74, overshoot 0,27.

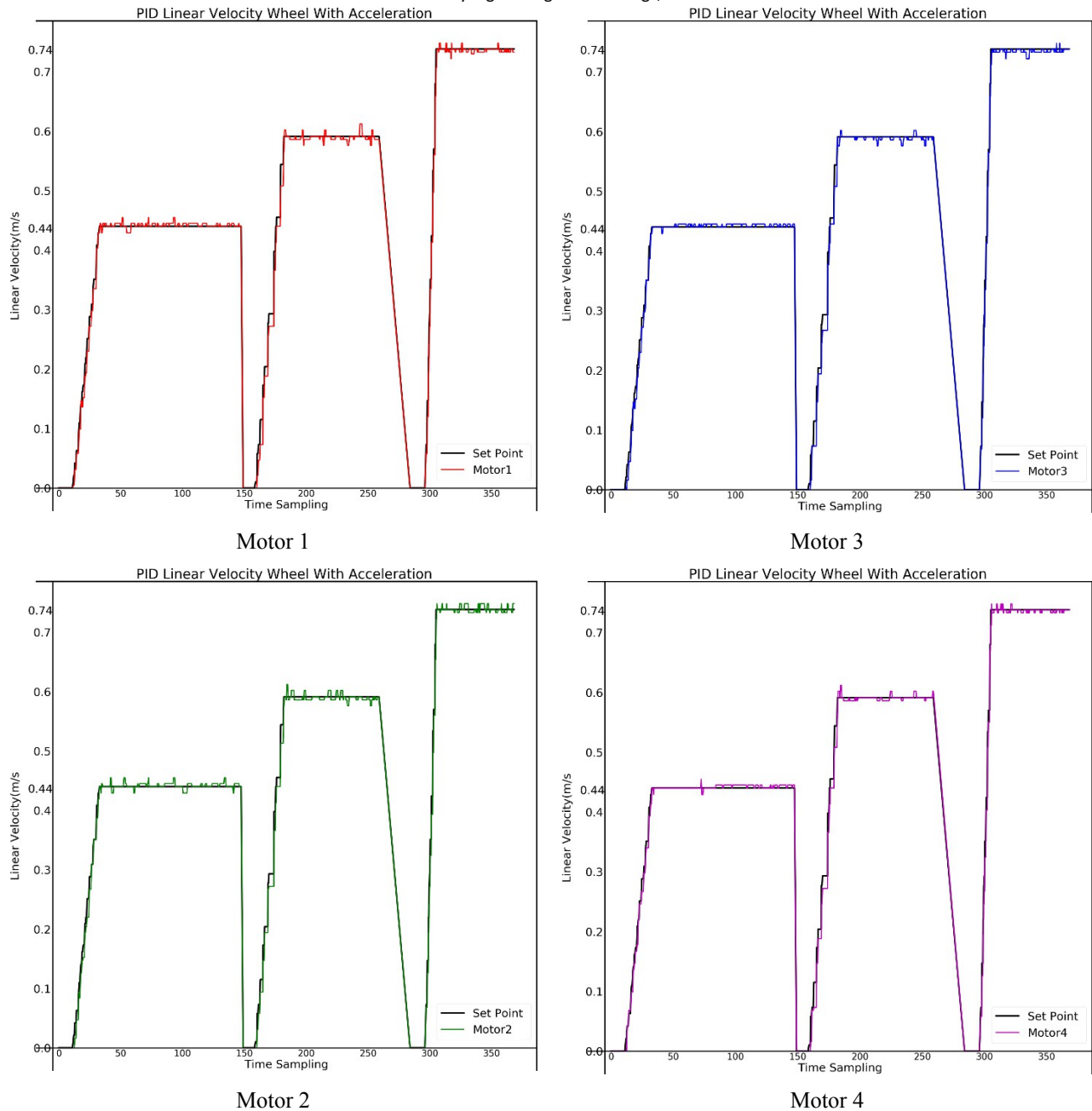


Gambar 11. Respon Kontrol Kecepatan Motor ke Berbagai Set-point tanpa Kontrol Akselerasi.

4-3- Uji Gerak Robot

Penentuan K_p , K_i , dan K_d untuk Kontrol Gerak PID dilakukan dengan menggunakan metode coba-coba, dan parameter hasil terbaik disajikan pada Tabel 4. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk respon sistem terhadap perubahan lingkungan yang diamati. Tiga pengujian dilakukan dalam pengujian ini. Semua pengujian dimulai dengan inisialisasi, yang mencakup tiga posisi: posisi awal robot, posisi awal perencanaan lintasan, dan posisi akhir perencanaan lintasan. Posisi awal dan akhir perencanaan lintasan ditetapkan dalam (0,0, 0,0) dan (0,0, 4,5) dalam satuan meter.

Sementara itu, posisi awal robot berbeda untuk setiap pengujian. Hasil pengujian diamati dan disajikan dalam grafik seperti pada Gambar 13 hingga 15. Warna merah pada grafik menunjukkan posisi awal robot menuju perencanaan lintasan, warna biru menunjukkan posisi awal perencanaan lintasan, dan warna kuning menunjukkan akhir lintasan.

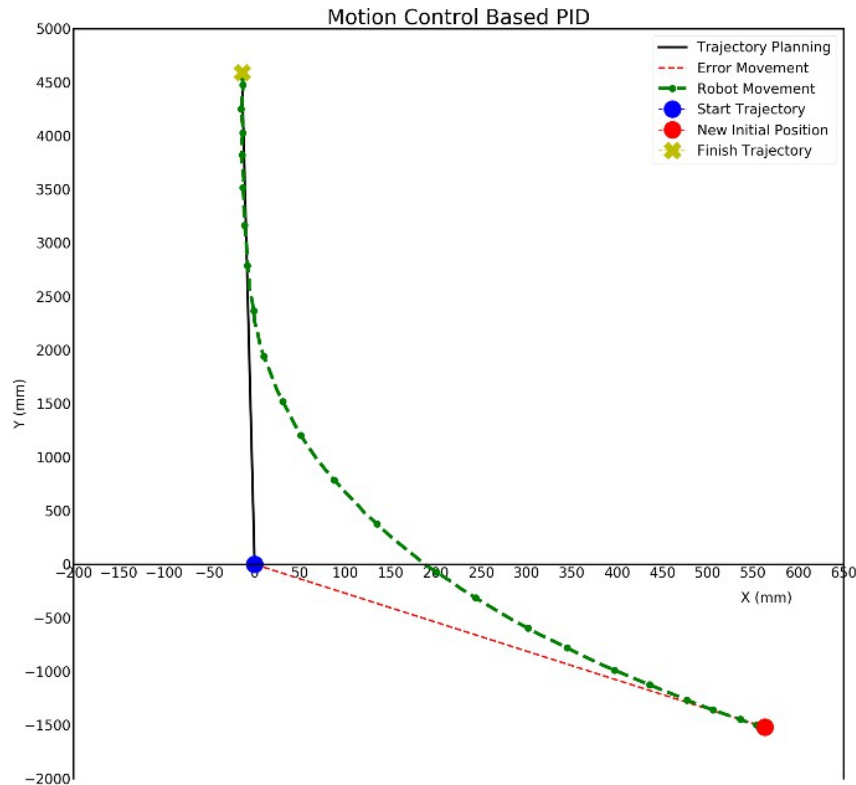


Gambar 12. Respons Kontrol Kecepatan Motor terhadap Set-point dengan Akselerasi.

Tabel 4. Parameter Hasil Penyetelan Gerak PID.

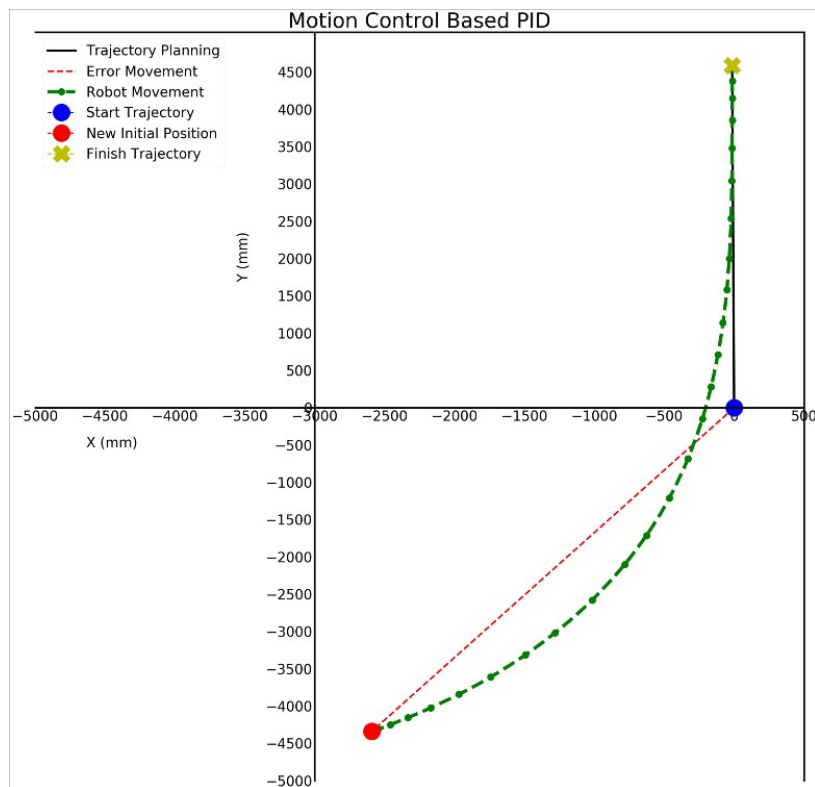
Parameter	Nilai
K_p	3.5
K_i	0.42
K_d	0.15

Pengujian pertama dilakukan dengan robot ditempatkan pada (0,5, -1,5) dalam satuan meter. Robot bergerak dari posisi ini ke posisi akhir perencanaan lintasan, seperti yang ditunjukkan dengan garis berwarna hijau pada Gambar 13. Pada pengujian pertama, robot mulai mengikuti lintasan pada (0.0, 2.5).



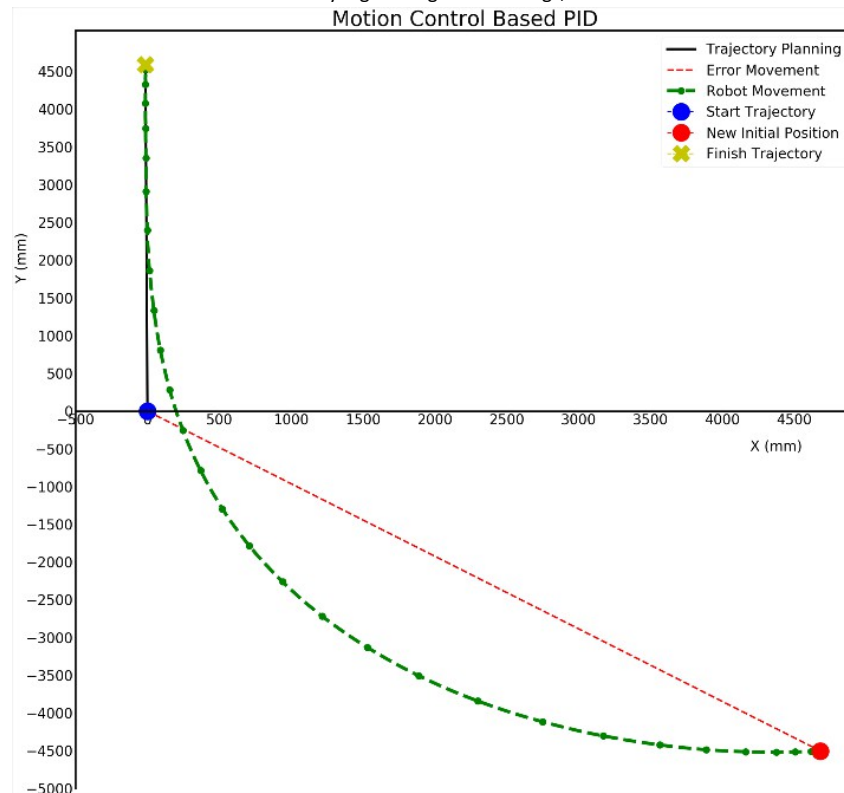
Gambar 13. Respon Sistem Kontrol Gerak PID dalam Koordinat Robot Eksperimen: Gerakan 1.

Pada pengujian kedua, robot ditempatkan pada (-2,5, -4,5) meter. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 14; robot mulai mengikuti perencanaan lintasan pada (0,0, 2,5) meter.



Gambar 14. Respon Sistem Kontrol Gerak PID dalam Koordinat Robot Eksperimen: 1. Gerakan 2. Gerakan 3. Gerakan 4. Gerakan 5. Gerakan 6. Gerakan 7. Gerakan 8. Gerakan 9.

Pengujian ketiga dilakukan dengan robot ditempatkan pada (4,5m, -4,5m). Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 15, robot mulai mengikuti lintasan pada (0,0, 2,0) meter.



Gambar 15. Respon Sistem Kontrol Gerak PID dalam Koordinat Robot Eksperimen: 1. Gerakan 1. Gerakan 2. Gerakan 3. Gerakan 4. Gerakan 5. Gerakan 6. Gerakan 7. Gerakan 8.

Semua hasil uji gerak menunjukkan bahwa robot dapat mencapai posisi finish. Namun, hasil uji gerak robot juga menunjukkan bahwa robot tidak melacak perencanaan lintasan dari posisi awal perencanaan lintasan; perlu beberapa waktu setelah robot mencapai posisi awal untuk melacak lintasan. Namun demikian, sistem merespons dengan cepat selama waktu tersebut. Hasil uji gerak robot juga mirip dengan respon eksponensial; perlu dicatat bahwa robot tidak melampaui garis lintasan. Dapat dilihat bahwa respons sistem memiliki karakteristik respons seperti eksponensial, tidak ada overshoot, dan waktu naik dan turun yang cepat.

4-4- Judul Robot

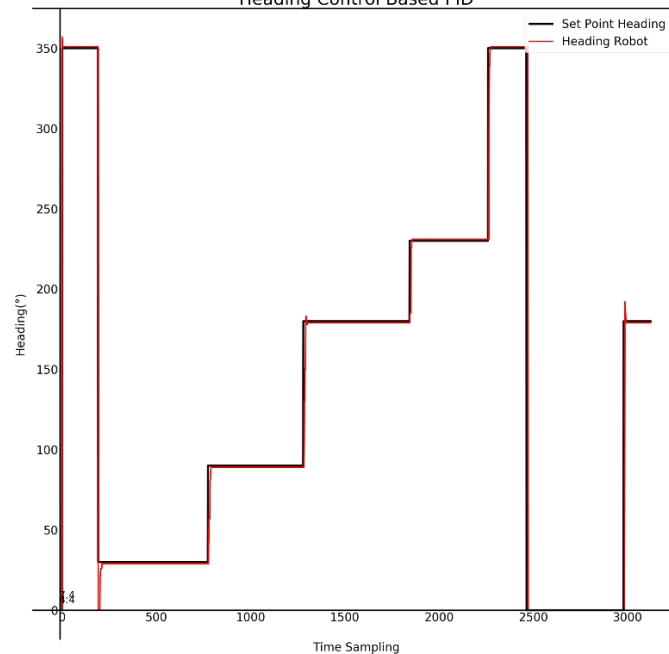
Kontrol PID untuk heading robot dievaluasi dengan mengubah input PID, yaitu posisi sudut heading robot, dan kemudian mengamati respon sistem. Proses tuning PID dilakukan dengan menggunakan metode tuning yang sama dengan Uji Kontrol Gerak Robot. Hasil terbaik dari tuning disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Hasil Penyetelan Heading PID.

Parameter	Nilai
K_p	3.0
K_i	0.15
K_d	0.23
Pengambilan Sampel Waktu	100ms

Gambar 16 menampilkan respons sistem dengan kontrol heading berbasis PID untuk perubahan sudut heading. Berdasarkan grafik pada Gambar 16, sudut heading robot dapat melacak set-point yang diberikan tanpa masalah. Garis berwarna merah, yang merupakan heading robot yang sebenarnya, bertepatan dengan garis berwarna hitam, yang merupakan sudut heading yang direferensikan.

Data pengamatan yang lebih rinci akan dijelaskan sebagai berikut. Ini menunjukkan bahwa overshoot adalah 1,428 untuk sudut 350°, 0 untuk 30°, 0 untuk 90°, 1,67 untuk 180°, 0 untuk 230°, 0 untuk 350°, 0 untuk 0°, dan 10 untuk 180°. Waktu penyelesaian adalah 10 ms untuk sudut 350°, 0 ms untuk 90°, 60 ms untuk 180°, 0 ms untuk 230°, 0 ms untuk 350°, 0 ms untuk 0°, dan 60 ms untuk 180°. Waktu naiknya adalah 20ms untuk sudut 350°, 100ms untuk 30°, 140ms untuk 90°, 160ms untuk 180°, 110ms untuk 230°, 140ms untuk 350°, 20ms untuk 10°, dan 150ms untuk 180°. Berdasarkan hasil tersebut, secara keseluruhan, sistem merespons dengan spesifikasi kinerja: $\pm 0,4$ detik waktu naik, 0,8 detik waktu menetap, dan overshoot maksimum 2%. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol heading berbasis PID dapat mengontrol heading robot dengan respon yang cepat dan error steady-state dan osilasi yang kecil. Dengan demikian, sistem kontrol heading dikatakan sebagai kontrol yang cukup stabil.



Gambar 16. Respon Sistem Kontrol Heading berbasis PID terhadap Perubahan Input.

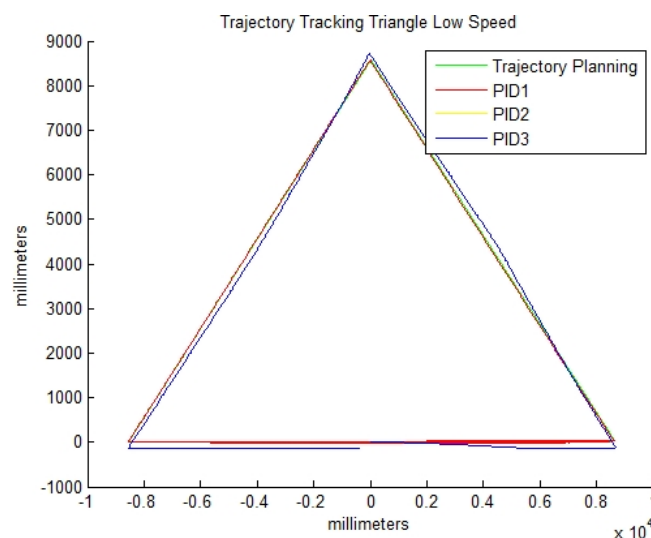
4-5- Uji Pelacakan Lintasan

Pada pengujian sebelumnya, masing-masing dari tiga kontrol berbasis PID yang diusulkan untuk kontrol pelacakan lintasan robot aromaterapi Covid-19 diuji dan dievaluasi secara individual. Namun, evaluasi untuk kombinasi ketiga kontrol berbasis PID yang diusulkan belum dilakukan. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas dan efisiensi ketiga kontrol berbasis PID yang diusulkan untuk kontrol pelacakan lintasan robot; untuk memeriksa kembali apakah menggunakan ketiganya secara bersamaan diperlukan atau tidak.

Pengujian pertama dilakukan dengan menguji kontrol berbasis PID untuk tiga skenario kontrol: PID 1, yang terdiri dari kontrol kecepatan motor, heading, dan gerak; PID 2, yang terdiri dari kontrol kecepatan motor dan gerak; dan PID 3, yang hanya kontrol kecepatan motor. Skenario kontrol ini diuji untuk pelacakan lintasan dengan model berbentuk segitiga.

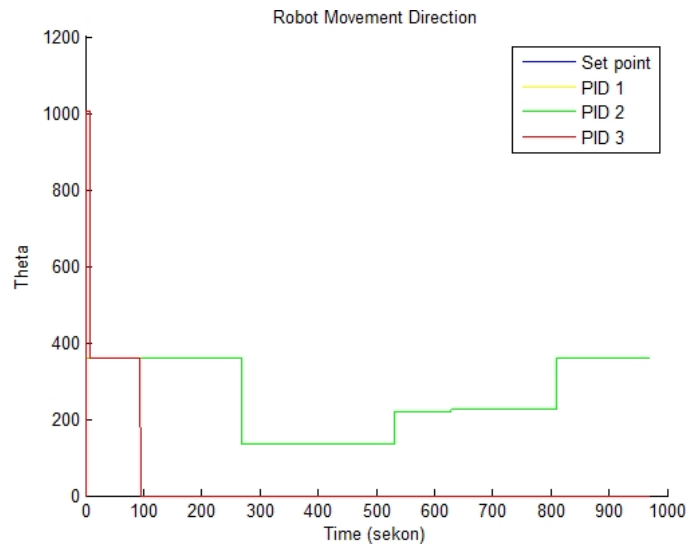
Dalam pengujian ini, grafik kecepatan robot basis linier ($vb_{(sp)}$) sebesar $0,41 \text{ m/s}$ diukur dengan menggunakan tiga skenario pada penjejak segitiga di lingkungan yang tidak diketahui, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17. Robot ditempatkan pada $(0,0; 0,0)$ dan bergerak

ke kanan untuk mengikuti perencanaan lintasan berbentuk segitiga. Garis berwarna merah menunjukkan skenario pertama; garis berwarna kuning menunjukkan skenario kedua; garis berwarna biru menunjukkan skenario ketiga. Garis berwarna hijau menunjukkan lintasan yang direncanakan. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa ada sedikit kesalahan pelacakan dari garis berwarna biru, yang berada di luar lintasan. Sementara itu, PID 1 dan PID 2 tidak memiliki masalah dalam melacak lintasan yang direncanakan.



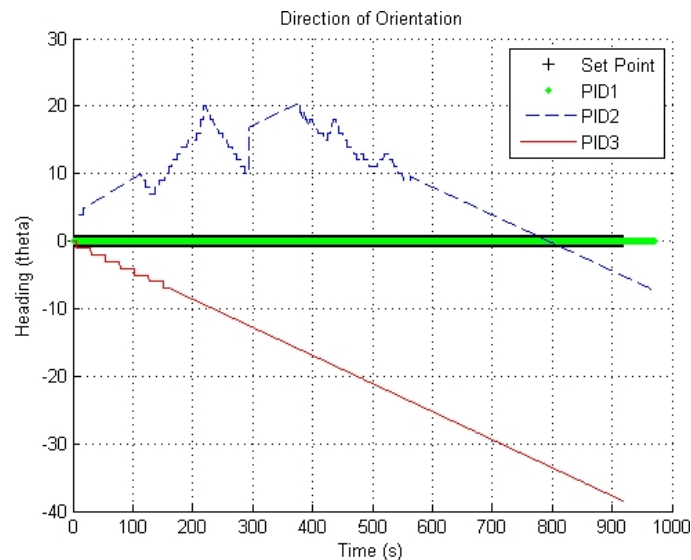
Gambar 17. Pelacakan Lintasan Tiga Skenario PID dengan Model Segitiga.

Kemudian, arah pergerakan robot dari tiga skenario kontrol saat melacak model lintasan berbentuk segitiga juga dievaluasi. Gambar 18 menunjukkan hasil pengujian. Representasi warna yang digunakan pada pengujian ini berbeda dengan pengujian sebelumnya. PID 1 direpresentasikan dengan warna kuning; PID 2 dengan warna hijau; PID 3 dengan warna merah; set-point dengan warna biru. Menurut gambar, garis berwarna hijau dan kuning bertepatan dengan garis berwarna biru. Ini berarti bahwa robot dengan skenario kontrol PID 1 dan PID 2 melacak arah yang diinginkan tanpa masalah. Namun, garis berwarna merah tidak dapat mengikuti garis berwarna biru; PID 3 tidak dapat melacak arah yang direferensikan.



Gambar 18. Arah Pergerakan Robot dari Tiga Skenario PID.

Orientasi pergerakan robot dari tiga skenario kontrol saat melacak model lintasan berbentuk segitiga juga dievaluasi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 19. Garis berwarna hijau memiliki nilai yang sama dengan garis berwarna biru, yaitu nol. Representasi warna yang digunakan pada pengujian ini berbeda dengan pengujian sebelumnya. PID 1 direpresentasikan dengan warna hijau; PID 2 dengan warna biru; PID 3 dengan warna merah; set-point dengan warna hitam. Dapat dilihat bahwa PID 1 bertepatan dengan set-point sementara yang lain tidak bertepatan dengan set-point.

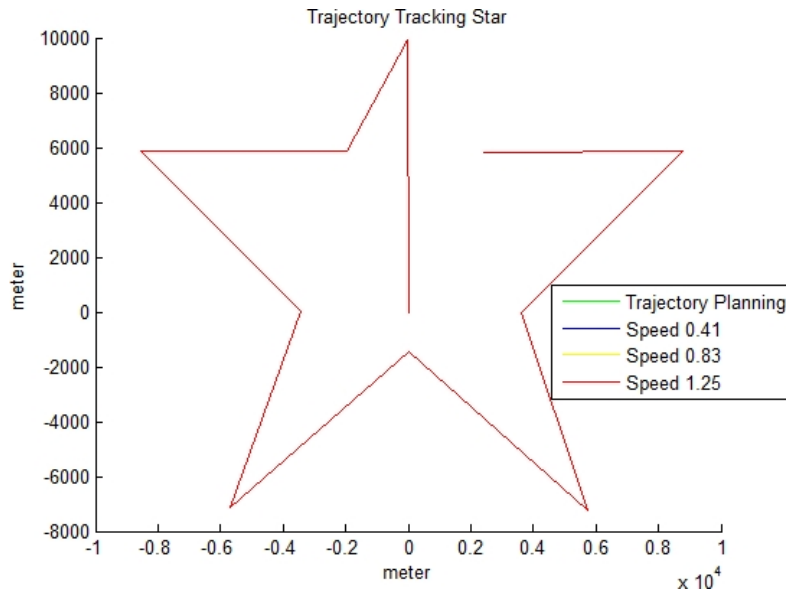


Gambar 19. Orientasi Pergerakan Robot dari Tiga Skenario PID.

Pengujian kedua dilakukan untuk menguji performa kontrol berbasis PID pada pelacakan lintasan, yang menggunakan model lintasan yang berbeda. Skenario untuk mengetahui respon PID pada perencanaan lintasan dilakukan sebanyak tiga kali dengan variasi nilai kecepatan robot basis linier yang berbeda yaitu kecepatan rendah, sedang, dan tinggi (0.41; 0.83; 1.25 m/s). Hasilnya juga akan dianalisa dengan menggunakan beberapa rumus kriteria performansi dengan IAE_H , IAE_{xy} , MAE_H , MAE_{xy} , $RMSE_H$, $RMSE_{xy}$, dan RE_{BS}

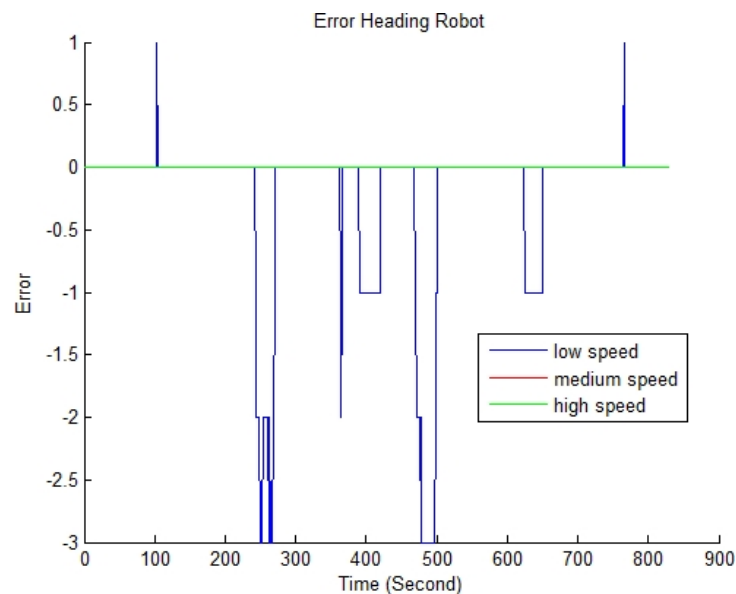
Kecepatan, pergerakan, dan kontrol heading PID pada kinerja pelacakan lintasan berbentuk bintang di lingkungan yang tidak diketahui diukur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20. Pengujian tiga kecepatan dilakukan pada bintang pelacakan lintasan:

0,41 m/s ditunjukkan dengan garis berwarna biru, 0,83 m/s ditunjukkan dengan garis berwarna kuning, dan 1,25 m/s ditunjukkan dengan garis berwarna merah. Robot ditempatkan pada posisi awal (0,0, 0,0) dan digerakkan untuk mengikuti pelacakan lintasan. Robot berhenti pada posisi (2,4, 5,8) meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan tiga kontrol PID, robot tetap berada pada lintasan yang telah ditentukan dengan kecepatan referensi 0,41, 0,83, dan 1,25 m/s.



Gambar 20. Pelacakan lintasan dengan model bintang.

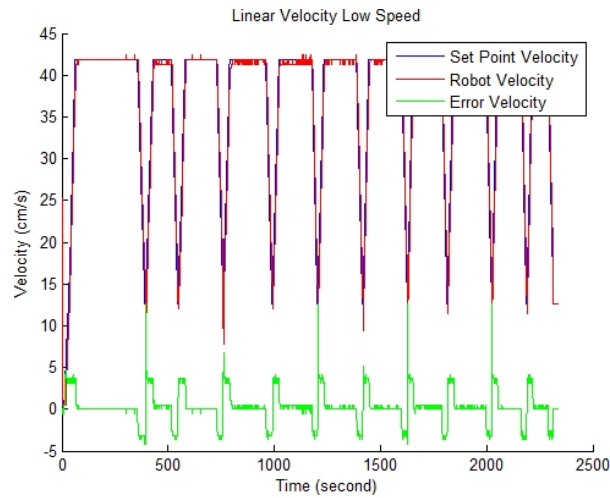
Kemudian, kesalahan heading robot diamati. Garis kesalahan antara respons sistem dengan tiga kecepatan referensi (rendah, sedang, tinggi) ditunjukkan pada Gambar 21. Kesalahan antara referensi kecepatan rendah dengan respon sistem direpresentasikan dalam garis berwarna hijau. Sementara itu, garis berwarna merah merepresentasikan kesalahan kecepatan sedang, dan garis berwarna biru merepresentasikan kesalahan referensi kecepatan tinggi. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa garis berwarna biru mengandung kesalahan heading, tetapi tidak dengan garis berwarna merah dan hijau.



Gambar 21. Kesalahan Robot Menuju.

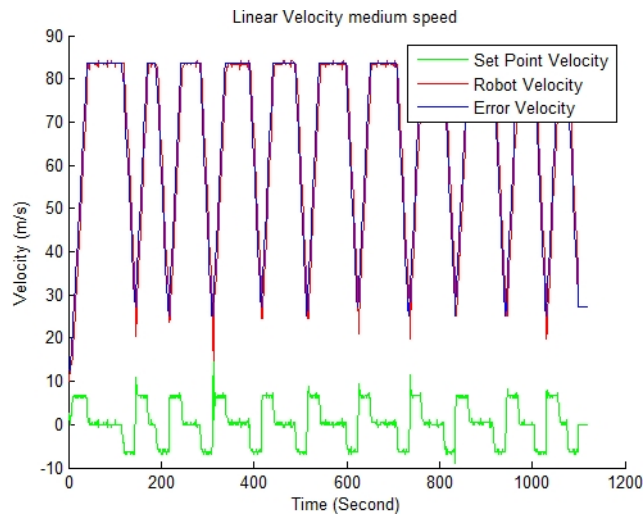
Kecepatan linier robot juga diamati. Performa pelacakan lintasan diukur dengan kecepatan rendah 0,4187 m/s. Garis berwarna biru pada Gambar 22 menunjukkan kecepatan set-point. Warna merah menunjukkan kecepatan robot, dan warna hijau menunjukkan kesalahan antara kecepatan robot dan set-point. Hasil yang didapatkan menunjukkan

bahwa nilai maksimum kecepatan robot pada kasus dengan normal adalah 0.4239 m/s . Nilai error terbesar yang ditunjukkan adalah 0.4125 m/s .



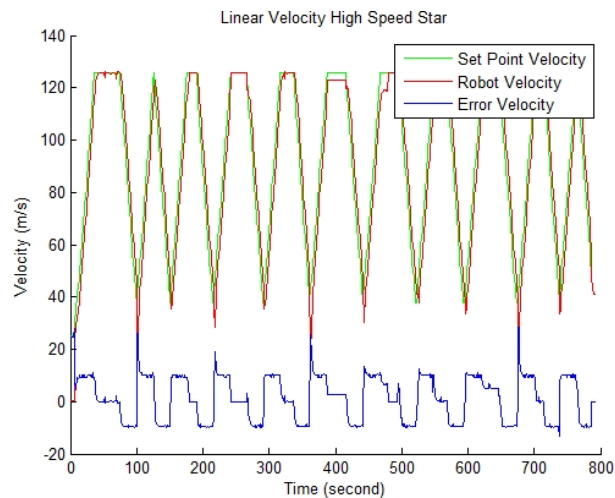
Gambar 22. Performa Kecepatan Rendah dalam Kecepatan Linier.

Kemudian, kinerja pelacakan lintasan dengan kecepatan sedang sebesar $0,8373 \text{ m/s}$ ditunjukkan pada Gambar 23. Berdasarkan hasil yang diperoleh, nilai maksimum dari kecepatan robot adalah 0.8426 m/s . Nilai error terbesar adalah 0.1465 m/s .



Gambar 23. Performa Kecepatan Sedang dalam Kecepatan Linier.

Performa robot pada kecepatan tinggi ($1,256 \text{ m/s}$) ditunjukkan pada Gambar 24. Nilai maksimum dari kecepatan robot adalah 0.8426 m/s , sedangkan error terbesar adalah 0.1465 m/s .



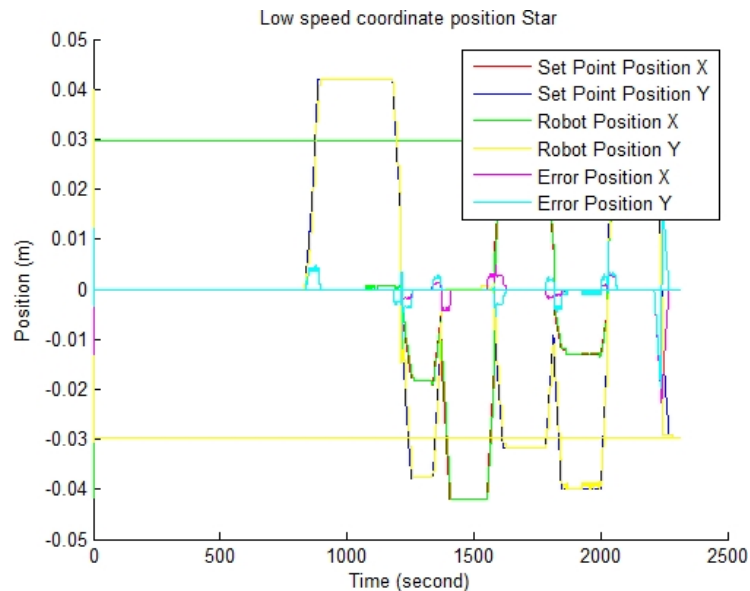
Gambar 24. Performa Kecepatan Tinggi dalam Kecepatan Linier.

Berdasarkan hasil pengujian mengenai kecepatan linier robot, robot dapat secara konsisten melacak lintasan dengan sedikit kesalahan dan osilasi. Kecepatan linier yang stabil berarti robot dapat bergerak dengan stabil dan konsisten tanpa guncangan atau gerakan yang tiba-tiba. Ini juga berarti robot aromaterapi Covid-19 dapat bekerja dengan baik dalam kecepatan rendah, kecepatan sedang, dan bahkan kecepatan tinggi, sehingga memiliki waktu tempuh yang cepat dengan pergerakan kecepatan yang stabil.

Sementara itu, kinerja kontrol posisi robot dalam konfigurasi kecepatan rendah, kecepatan sedang, dan kecepatan tinggi dapat dilihat pada Gambar 25, Gambar 26, dan Gambar 27. Posisi robot dan posisi referensi saat robot melacak lintasan model bintang direkam. Perbedaan antara posisi aktual dan posisi referensi dihitung sebagai kesalahan.

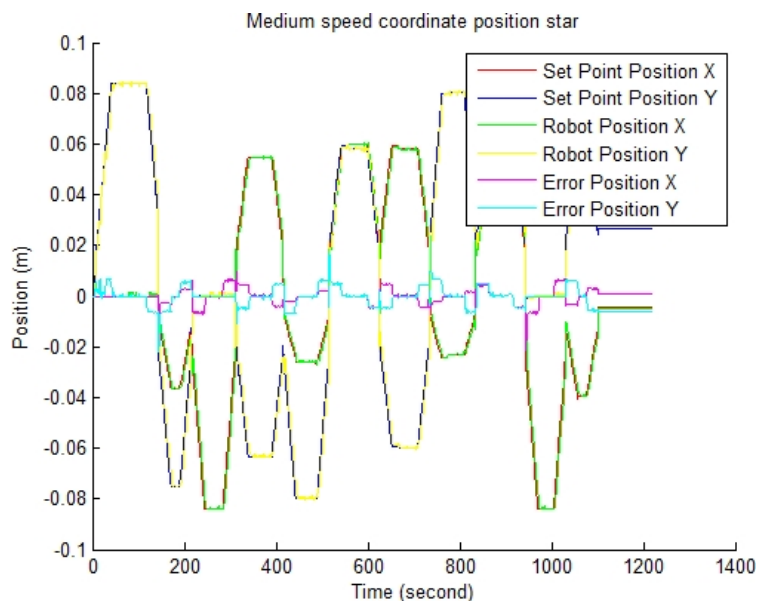
Kesalahan pada posisi sumbu X ditampilkan dalam garis berwarna merah muda, dan kesalahan pada posisi sumbu Y ditampilkan dalam garis berwarna biru muda. Sementara itu, garis berwarna merah mewakili posisi set-point pada sumbu X, dan garis berwarna biru mewakili sumbu Y. Warna hijau menunjukkan posisi aktual robot pada sumbu X, warna kuning menunjukkan posisi robot pada sumbu Y.

Performa kontrol posisi untuk konfigurasi kecepatan rendah ditunjukkan pada Gambar 25, dimana dapat dilihat bahwa posisi robot hampir sesuai dengan set-point. Kesalahan yang ditemukan kurang dari 1 cm.



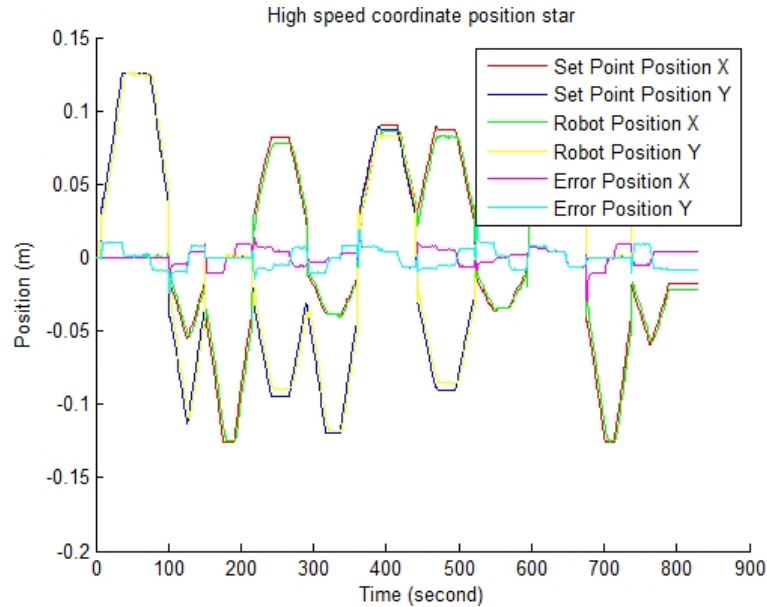
Gambar 25. Koordinat posisi untuk kecepatan rendah.

Sementara itu, kinerja kontrol posisi untuk konfigurasi kecepatan sedang ditunjukkan pada Gambar 26. Hasilnya ditemukan mirip dengan hasil konfigurasi kecepatan rendah, yang memiliki kesalahan posisi yang minimal.



Gambar 26. Koordinat posisi untuk kecepatan sedang.

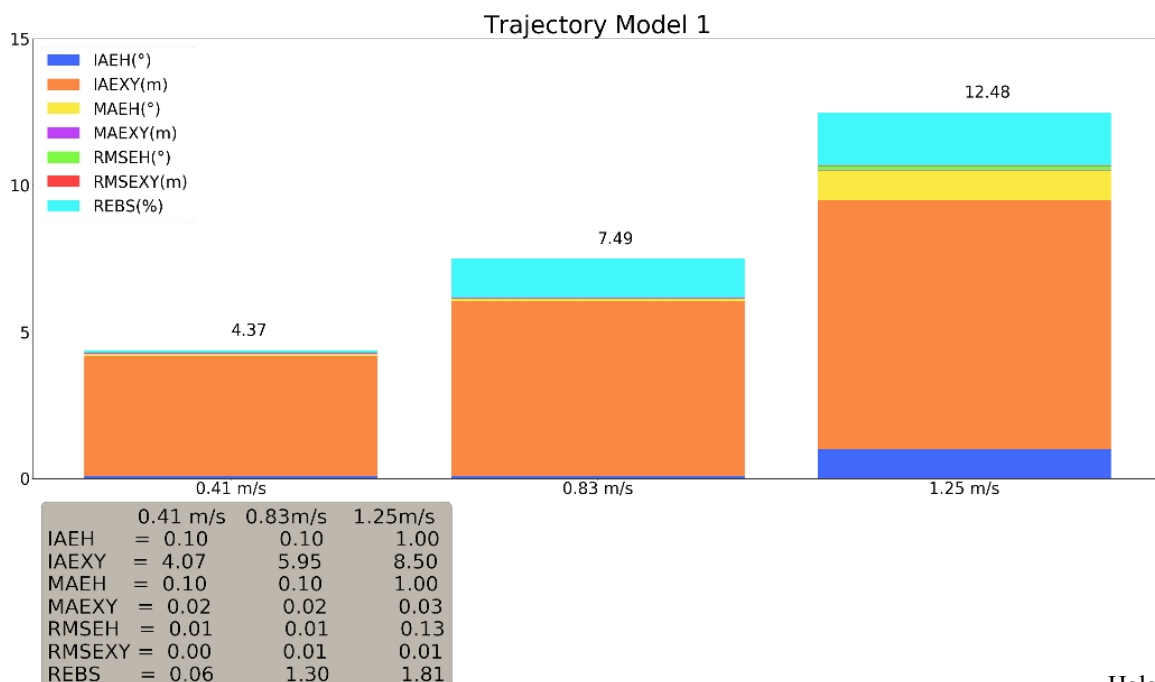
Sama halnya dengan hasil pengujian untuk konfigurasi kecepatan rendah dan sedang, hasil pengujian untuk konfigurasi kecepatan tinggi, seperti pada Gambar 27, memiliki kesalahan yang minimal. Namun, kesalahan posisi untuk konfigurasi kecepatan tinggi sedikit lebih besar daripada hasil pengujian sebelumnya, meskipun masih memiliki hasil yang mendekati nol.



Gambar 27. Posisi terkoordinasi untuk kecepatan tinggi.

Akhirnya, kontrol pelacakan lintasan berbasis PID yang diusulkan untuk robot aromaterapi Covid-19 dievaluasi berdasarkan parameter evaluasi. Gambar 28 menunjukkan tujuh parameter: IAEH ditampilkan dalam grafik biru, IAEXY dalam warna oranye, MAEH ditampilkan dalam warna kuning, MAEXY dalam warna ungu, RMSEH dalam warna hijau, RMSEXY dalam warna merah, dan REBS dalam warna cyan. Berdasarkan kriteria kinerja dari gambar grafik tersebut, nilai kinerja IAEH pada kecepatan rendah adalah 0.1, pada kecepatan sedang adalah 0.1, dan pada kecepatan tinggi adalah 1. Nilai kinerja IAEXY pada kecepatan rendah adalah 4.0, pada kecepatan sedang adalah 5, dan pada kecepatan tinggi adalah

8.50. MAEH menunjukkan nilai kinerja rendah 0,1 pada kecepatan rendah dan kecepatan sedang dan menunjukkan nilai kinerja tertinggi 1 pada kecepatan tinggi. Nilai kinerja tertinggi dari RMSEH adalah 0,13 pada kecepatan tinggi dan nilai terendah 0,01 pada kecepatan rendah dan sedang. Performa RMSEXY menunjukkan nilai tertinggi pada kecepatan tinggi dan sedang, sedangkan pada kecepatan rendah menunjukkan nilai performa yang rendah yaitu 0.00. Nilai kinerja REBS untuk kecepatan rendah adalah 0.06, untuk kecepatan sedang adalah 1.30, dan untuk kecepatan tinggi adalah 1.81.



5- Kesimpulan

Pada penelitian ini, metode kontrol pelacakan lintasan robot omnidirectional empat roda berhasil dikembangkan secara khusus untuk robot aromaterapi Covid-19. Kesalahan dalam mengatur kecepatan, arah pergerakan robot, dan perubahan orientasi robot semuanya dapat menyebabkan kesalahan pergerakan robot dalam suatu lintasan. Kontrol PID digunakan untuk mengontrol tiga parameter utama dalam penelitian ini: kecepatan motor, arah pergerakan robot, dan arah orientasi robot. Sistem PID dan akselerasi digabungkan menggunakan sistem odometri sebagai umpan balik dari pelacakan lintasan, sehingga robot dapat beroperasi dengan tepat dan stabil. Menurut hasil penelitian, tingkat kesalahan kecepatan linier robot adalah 2%, dengan nilai rata-rata pengujian sebesar 1,3%. Rata-rata kesalahan pergerakan robot pada koordinat X dan Y adalah 0,0059 m. Kesalahan arah robot pada semua lintasan adalah 0,6%. Robot dapat dikontrol dan dipertahankan untuk tetap berada pada lintasan tracking. Diharapkan dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan sensor IMU pada desain robot. Perbaikan ini bertujuan untuk mendeteksi pergerakan robot. Hal ini dapat dikombinasikan dengan sensor odometrik untuk mendeteksi gangguan gerakan seperti selip roda, kesalahan pemodelan kinematika akibat kesalahan konstruksi robot yang tidak tepat. Selain itu juga diharapkan dapat memperbaiki mekanisme penghantaran inhalasi robot sehingga dapat ditingkatkan menjadi robot nebulizer.

6- Deklarasi

6-1- Kontribusi Penulis

Konseptualisasi, I.; metodologi, NMR; perangkat keras dan perangkat lunak, DUR; validasi, R.S.; sumber daya, FA; persiapan draf awal penulisan, I.; tinjauan dan penyuntingan penulisan, AM; supervisi, GS. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

6-2- Pernyataan Ketersediaan Data

Data yang disajikan dalam penelitian ini tersedia dalam artikel.

6-3- Pendanaan

Para penulis menerima dukungan finansial untuk penelitian artikel ini dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

6-4- Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang telah mendukung penelitian ini dengan memberikan hibah penelitian.

6-5- Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan terkait publikasi naskah ini. Selain itu, isu-isu etika, termasuk plagiarisme, informed consent, pelanggaran, fabrikasi dan/atau pemalsuan data, publikasi dan/atau penyerahan ganda, dan redundansi telah sepenuhnya diperhatikan oleh penulis.

7- Referensi

- [1] Banik, Jozef, Vojtech Mezera, Christian Köhler, dan Marco Schmidtmann. "Terapi Antiplatelet pada Pasien dengan Covid-19. Sebuah Studi Retrospektif: Sebuah Studi Observasional Retrospektif." *Pembaruan Trombosis* 2 (2021): 100026. doi:10.1016/j.tru.2020.100026.
- [2] Godino, Cosmo, Andrea Scotti, Norma Maugeri, Nicasio Mancini, Evgeny Fominskiy, Alberto Margonato, dan Giovanni Landoni. "Terapi Antitrombotik pada Pasien dengan COVID-19? -Dasar Pemikiran dan Bukti." *International Journal of Cardiology* 324 (Februari 2021): 261-266. doi: 10.1016/j.ijcard.2020.09.064.
- [3] Russo, Vincenzo, Marco Di Maio, Emilio Attena, Angelo Silverio, Fernando Scudiero, Dario Celentani, Corrado Lodigiani, dan Pierpaolo Di Micco. "Dampak Klinis Terapi Antitrombotik Pra-Rawat Inap pada Pasien Rawat Inap dengan COVID-19: Sebuah Studi Observasional Multisenter." *Pharmacological Research* 159 (September 2020): 104965. doi: 10.1016/j.phrs.2020.104965.
- [4] Russo, Vincenzo, Marco Di Maio, Emilio Attena, Angelo Silverio, Fernando Scudiero, Dario Celentani, Corrado Lodigiani, dan Pierpaolo Di Micco. "Dampak Klinis Terapi Antitrombotik Pra-Rawat Inap pada Pasien Rawat Inap dengan COVID-19: Sebuah Studi Observasional Multisenter." *Pharmacological Research* 159 (n.d.): 104965. doi:10.1016/j.phrs.2020.104965.
- [5] Formisano, Elena, Pasquale Di Maio, Cecilia Ivaldi, Elsa Sferrazzo, Lorenzina Arieta, Silvia Bongiovanni, dan Loredana Panizzi. "Terapi Nutrisi untuk Pasien dengan Penyakit Virus Corona 2019 (COVID-19): Protokol Praktis dari Satu Pusat yang Terkena Wabah Infeksi Sindrom Pernafasan Akut Parah Baru Coronavirus 2 (SARS-CoV-2)." *Nutrition* 82 (Februari 2021): 111048. doi:10.1016/j.nut.2020.111048.
- [6] Altuntas, Fevzi, Naim Ata, Tugce Nur Yigenoglu, Semih Basci, Mehmet Sinan Dal, Serdal Korkmaz, dan Sinem Namdaroglu. "Terapi Plasma Pemulihan pada Pasien dengan COVID-19." *Ilmu Transfusi dan Apheresis*, no. August (September 2020):

- [7] Ghasemiyeh, Parisa, dan Soliman Mohammadi-Samani. "Wabah COVID-19: Tantangan dalam Farmakoterapi Berdasarkan Aspek Farmakokinetik dan Farmakodinamik Terapi Obat pada Pasien dengan Infeksi Sedang hingga Berat." *Jantung & Paru* 49, no. 6 (2020): 763-73. doi: 10.1016/j.hrtlng.2020.08.025.
- [8] Kaminski, Monica A, Subin Sunny, Khayala Balabayova, Avneet Kaur, Aanchal Gupta, Marie Abdallah, dan John Quale. "Terapi Tocilizumab untuk COVID-19: Perbandingan Terapi Subkutan dan Intravena." *Jurnal Internasional Penyakit Menular* 101 (Desember 2020): 59-64. doi: 10.1016/j.ijid.2020.09.1447.
- [9] Gowrishankar, Shanmugaraj, Sankar Muthumanickam, Arumugam Kamaladevi, Chandrasekar Karthika, Ravi Jothi, Pandi Boomi, Dharuman Maniazahagu, dan Shunmugiah Karutha Pandian. "Fitokimia yang Menjanjikan dari Terapi Inhalasi Uap Herbal Tradisional India untuk Memerangi COVID-19 - Sebuah Studi in Silico." *Toksikologi Makanan dan Kimia* 148 (September 2020): 111966. doi: 10.1016/j.fct.2020.111966.
- [10] Shah, Mili, Jignasha Captain, Vidyadhar Vaidya, Arvind Kulkarni, Kedar Valsangkar, Pradeep M K Nair, dan Gayatri Ganu. "Keamanan dan Kemanjuran Terapi Ozon pada Pasien COVID-19 Ringan hingga Sedang: Uji Coba Kontrol Acak Fase 1/11 (Studi SEOT)." *Imunofarmakologi Internasional* 91 (Februari 2021): 107301. doi:10.1016/j.intimp.2020.107301.
- [11] Eedara, B B, W Alabsi, D Encinas-Basurto, R Polt, J G Ledford, dan H M Mansour. "Pemberian Inhalasi untuk Pengobatan dan Pencegahan Infeksi COVID-19." *Farmasi* 13, no. 7 (2021): 1077. doi:10.3390/pharmaceutics13071077.
- [12] Yan, Fanlei, Baoquan Li, Wuxi Shi, dan Dongwei Wang. "Pelacakan Lintasan Servo Visual Hibrida dari Robot Bergerak Beroda." *IEEE Access* 6 (2018): 24291-24298. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2829839.
- [13] Yang, Hongjiu, Mingchao Guo, Yuanqing Xia, dan Lei Cheng. "Pelacakan Lintasan untuk Robot Beroda Bergerak melalui Kontrol Prediktif Model dengan Kendala Pelunakan." *IET Control Theory & Applications* 12, no. 2 (January 2018): 206-214. doi: 10.1049/iet-cta.2017.0395.
- [14] Chang, Hongbin, Shuoyu Wang, dan Ping Sun. "Karakteristik Pendaratan Omniwheel dan Kontrol Jenuh Adaptif untuk Robot Pendukung Manusia." *IEEE Access* 6 (2018): 51174-51186. doi:10.1109/ACCESS.2018.2869836.
- [15] Li, Zhijun, Xiaoqing Cao, Yong Tang, Rui Li, dan Wenjun Ye. "Teleoperasi Bilateral Sistem Robotik Terkendala Holonomik dengan Penundaan yang Bervariasi Waktu." *Transaksi IEEE tentang Instrumentasi dan Pengukuran* 62, no. 4 (2013): 752-765. doi:10.1109/TIM.2013.2246906.
- [16] Huang, Hsu-Chih. "Algoritma ACO Paralel Berbasis SoPC dan Aplikasinya pada Desain Kontroler Gerak Optimal untuk Robot Bergerak Omnidirectional Cerdas." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9, no. 4 (2013): 1828-1835. doi:10.1109/TII.2012.2222033.
- [17] Rotondo, Damiano, Vicenc Puig, Fatiha Nejjari, dan Juli Romera. "Pendekatan Penyembunyian Kesalahan untuk Kontrol Toleransi Kesalahan Quasi-LPV Beralih dari Robot Bergerak Omnidirectional Beroda Empat." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, no. 6 (2015): 1-1. doi: 10.1109/TIE.2014.2367002.
- [18] Lee, Ming-Han, dan Tzuu-Hseng S Li. "Desain Kinematika, Dinamika, dan Kontrol Robot Bergerak 4WIS4WID." *The Journal of Engineering*, no. 1 (2015): 6-16. doi: 10.1049/joe.2014.0241.
- [19] Bresson, Guillaume, Thomas Feraud, Romuald Aufrere, Paul Checchin, dan Roland Chapuis. "SLAM Monokular Waktu Nyata Dengan Kebutuhan Memori Rendah." *Transaksi IEEE tentang Sistem Transportasi Cerdas* 16, no. 4 (2015): 1827-1839. doi: 10.1109/TITS.2014.2376780.
- [20] Sanchez, C M, J R G Sanchez, C Y S Cervantes, R S Ortigoza, V M H Guzman, J N A Juarez, dan M M Aranda. "Pembuatan Lintasan untuk Robot Bergerak Beroda Melalui Polinomial Bézier." *IEEE Latin America Transactions* 14, no. 11 (2016): 4482 - 4490. doi: 10.1109/TLA.2016.7795818.
- [21] Li, Luyang, Yun-Hui Liu, Tianjiao Jiang, Kai Wang, dan Mu Fang. "Pelacakan Lintasan Adaptif Robot Bergerak Nonholonomic Menggunakan Estimasi Posisi dan Kecepatan Berbasis Visi." *IEEE Transactions on Cybernetics* 48, no. 2 (2018): 571-582. doi:10.1109/TCYB.2016.2646719.
- [22] Pereida, Karime, Mohamed K Helwa, dan Angela P Schoellig. "Multirobot yang Efisien Data, Pembelajaran Transfer Multitask untuk Pelacakan Lintasan." *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, no. 2 (2018): 1260-1267. doi:10.1109/LRA.2018.2795653.
- [23] Saradagi, Akshit, Vijay Muralidharan, Vishal Krishnan, Sandeep Menta, dan Arun D Mahindrakar. "Kontrol Formasi dan Pelacakan Lintasan Robot Bergerak Nonholonomik." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 26, no. 6 (2018): 2250-2258. doi: 10.1109/TCST.2017.2749563.
- [24] Santos, Milton Cesar Paes, Claudio Dario Rosales, Mario Sarcinelli-Filho, dan Ricardo Carelli. "Pengontrol Pelacakan Lintasan UAV Berbasis Null-Space Berbasis Null-Space dengan Penghindaran Tabrakan." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22, no. 6 (2017): 2543-2553. doi:10.1109/TMECH.2017.2752302.
- [25] He, Wei, Tingting Meng, Shuang Zhang, Quanbo Ge, dan Changyin Sun. "Kontrol Pelacakan Lintasan untuk Sayap Fleksibel Kendaraan Udara Mikro." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 48, no. 12 (2018): 2431-2441. doi: 10.1109/TSMC.2017.2779854.

- [26] Kayacan, Erdal, dan Reinaldo Maslim. "Kontrol Penjejakan Lintasan Logika Fuzzy Tipe-2 pada Pesawat Quadrotor VTOL dengan Fungsi Keanggotaan Eliptik." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22, no. 1 (2017): 339–348. doi:10.1109/TMECH.2016.2614672.
- [27] Antonelli, Gianluca, Elisabetta Cataldi, Filippo Arrichiello, Paolo Robuffo Giordano, Stefano Chiaverini, dan Antonio Franchi. "Pelacakan Lintasan Adaptif untuk Quadrotor MAV dengan Adanya Ketidakpastian Parameter dan Gangguan Eksternal." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 26, no. 1 (2018): 248–254. doi: 10.1109/TCST.2017.2650679.
- [28] Baek, Jaemin, Soonwan Cho, dan Soohye Han. "Kontrol Tunda Waktu Praktis dengan Penguatan Adaptif untuk Pelacakan Lintasan Robot Manipulator." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65, no. 7 (2018): 5682–5692. doi:10.1109/TIE.2017.2782238.
- [29] Yang, Lidong, Qianqian Wang, dan Li Zhang. "Kontrol Pelacakan Lintasan Bebas Model dari Mikrorobot Magnetik Dua Partikel." *IEEE Transactions on Nanotechnology* 17, no. 4 (2018): 697–700. doi:10.1109/TNANO.2018.2815978.
- [30] Angelini, Franco, Cosimo Della Santina, Manolo Garabini, Matteo Bianchi, Gian Maria Gasparri, Giorgio Grioli, Manuel Giuseppe Catalano, dan Antonio Bicchi. "Kontrol Pelacakan Lintasan Terdesentralisasi untuk Robot Lunak yang Berinteraksi dengan Lingkungan." *IEEE Transactions on Robotics* 34, no. 4 (2018): 924–935. doi:10.1109/TRO.2018.2830351.
- [31] Wang, Zerui, Sing Chun Lee, Fangxun Zhong, David Navarro-Alarcon, Yun Hui Liu, Anton Deguet, Peter Kazanzides, dan Russell H Taylor. "Kontrol Pelacakan Lintasan Berbasis Gambar dari Instrumen Laparoskopi 4-DoF Menggunakan Penanda Pembeda Rotasi." *Surat Robotika dan Otomasi IEEE* 2, no. 3 (2017): 1586–1592. doi:10.1109/LRA.2017.2676350.
- [32] Chen, Jian, Bingxi Jia, dan Kaixiang Zhang. "Kontrol Pelacakan Lintasan Visual Adaptif Berbasis Tensor Trifokal untuk Robot Bergerak." *IEEE Transactions on Cybernetics* 47, no. 11 (November 2017): 3784–3798. doi:10.1109/TCYB.2016.2582210.
- [33] Ashrafiun, Hashem, Sergey Nersesov, dan Garrett Clayton. "Kontrol Pelacakan Lintasan Kendaraan Planar yang Tidak Diaktifkan." *Transaksi IEEE tentang Kontrol Otomatis* 62, no. 4 (2017). doi: 10.1109/TAC.2016.2584180.
- [34] Yu, Xiao, dan Lu Liu. "Penutupan Target dan Pelacakan Lintasan untuk Robot Bergerak dengan Gangguan Masukan." *IEEE Control Systems Letters* 1, no. 2 (2017): 221–226. doi:10.1109/LCSYS.2017.2712663.
- [35] Sakthivel, R, S Harshavarthini, R Kavikumar, dan Yong-Ki Ma. "Kontrol Pelacakan yang Kuat untuk Sistem Lompatan Markovian Fuzzy dengan Penundaan dan Gangguan yang Bervariasi Waktu." *IEEE Access* 6 (2018): 66861–66869. doi:10.1109/ACCESS.2018.2879379.
- [36] Yuan, Mingxing, Zheng Chen, Bin Yao, dan Jinfei Hu. "Perencana Lintasan Online yang Ditingkatkan dengan Algoritma Kurva Uji Kritis yang Dijamin Kestabilannya untuk Kendala Parametrik Umum." *IEEE/ASME Transaksi Mekatronika* 23, no. 5 (2018): 2459–2469. doi: 10.1109/TMECH.2018.2862144.
- [37] Chen, Gang, Yongduan Song, dan Yanfeng Guan. "Kontrol Pelacakan Konsensus Berbasis Mode Geser Terminal untuk Sistem Mekanik Tak Tentu Berjejaring pada Digraf." *Transaksi IEEE tentang Jaringan Syaraf dan Sistem Pembelajaran* 29, no. 3 (2018): 749–756. doi:10.1109/TNNLS.2016.2636323.
- [38] Wang, Yaoyao, Jiawang Chen, Kangwu Zhu, Bai Chen, dan Hongtao Wu. "Kontrol Pelacakan Praktis Robot yang Digerakkan dengan Kabel Menggunakan Mode Geser Terminal Cepat Nonsingular Adaptif." *IEEE Access* 6 (2018): 68057–68069. doi:10.1109/ACCESS.2018.2879903.
- [39] Fethalla, Nuradeen, Maarouf Saad, Hannah Michalska, dan Jawhar Ghommam. "Pengontrol Mode Geser Dinamis Berbasis Pengamat yang Kuat untuk UAV Quadrotor." *IEEE Access* 6 (2018): 45846–45859. doi:10.1109/ACCESS.2018.2866208.
- [40] Kern, John, Claudio Urrea, Rodrigo Mendez, dan Guillermo Gonzalez. "Pengembangan Sistem Kontrol Tertanam dengan Menggunakan DsPIC yang Diterapkan pada Robot 4 DOF." *Transaksi IEEE Amerika Latin* 14, no. 5 (May 2016): 2099–2106. doi: 10.1109/tla.2016.7530401.
- [41] Rosales, C, S Tosetti, C Soria, dan F Rossomando. "Kontrol PID Adaptif Neural dari Quadrotor Menggunakan EFK." *IEEE Latin America Transactions* 16, no. 11 (November 2018): 2722–2730. doi: 10.1109/tla.2018.8795113.
- [42] Khalifa, Mustafa, A.L. Hussein Amhedb, dan Mohammed Al Sharqawi. "Kontrol Posisi Motor DC Secara Real Time Menggunakan LabVIEW." *Jurnal Robotika dan Kontrol (JRC)* 2, no. 5 (2021). doi: 10.18196/jrc.25104.
- [43] Okelola, Muniru Olajide, David Oluwagbemiga Aborisade, dan Philip Adesola Adewuyi. "Analisis Performansi dan Konfigurasi Kontroler PID Anti-Windup Berbasis Tracking Time." *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika* 6, no. 2 (Januari 2021): 20. doi:10.26555/jiteki.v6i2.18867.