

Pengembangan Autonomous UAV untuk Sistem Delivery dengan Optimator Adaptive Sliding Mode Control dan Kalman Filter

Mohammad Khusnul Khuluq¹, Adellia Pratahtya², Ramadhan Tegar Imansyah³, Ni'am Tamami⁴

¹Teknik Elektronika, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, email: ninnoelka@ee.student.pens.ac.id

²Teknik Mekatronika, Departemen Teknik Mekanika & Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, email: adelliapratahtya@me.student.pens.ac.id

³Teknik Mekatronika, Departemen Teknik Mekanika & Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, email: RamadhanTegarI@me.student.pens.ac.id

⁴ Teknik Elektronika, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, email: niam@pens.ac.id

Corresponding Author: Mohammad Khusnul Khuluq

INTISARI — Indonesia, dengan jumlah penduduk yang meningkat, mencatat sekitar 275,77 juta orang pada 2022. Berdasarkan informasi dari Badan Pusat Statistik, terjadi pertumbuhan sekitar 1,13% dibandingkan tahun lalu. Pada tahun yang sama, sekitar 168 juta individu terlibat dalam aktivitas transaksi digital. Hal ini memberikan dampak besar pada industri kurir, yang memegang peranan kunci dalam pengantaran produk e-commerce. Meski begitu, sektor pengiriman di negara ini menemui berbagai tantangan. Data dari Kementerian Perdagangan menunjukkan bahwa sekitar 20-30% dari pengiriman menghadapi keterlambatan dan kerusakan. Dengan latar belakang tersebut, teknologi UAV di Indonesia menjanjikan kemajuan dalam meningkatkan efektivitas dan keandalan pengiriman. Melalui implementasi kontrol sliding mode dan filter kalman untuk memaksimalkan potensi penerbangan UAV secara otonom, dapat dipastikan bahwa UAV memiliki penerbangan yang stabil dan andal. Kontrol sliding mode memastikan kestabilan sistem di hadapan gangguan, sedangkan filter kalman digunakan untuk mendukung sistem navigasi berbasis GPS. Makalah dengan judul "Optimasi dan Peningkatan Kemampuan UAV Otonom untuk Sistem Pengiriman Menggunakan Kontrol Sliding Mode dan Filter Kalman" diharapkan memberikan sumbangsih pada teknologi drone dan proses pengiriman di Indonesia, serta menjadi referensi untuk studi terkait lainnya.

KATA KUNCI — Unmanned Aerial Vehicle, Sliding Mode Control, Kalman Filter, Mission Planner, E Commerce.

I. PENDAHULUAN

Di era modern, pertumbuhan populasi yang signifikan di Indonesia serta peningkatan transaksi digital telah mendorong kebutuhan akan inovasi dalam sektor pengiriman. Data Bank Dunia mencatat bahwa populasi Indonesia mencapai hampir 270 juta jiwa pada tahun 2021 [2], dengan pertumbuhan transaksi digital yang mencapai angka dua digit setiap tahunnya [7]. Namun, tantangan tetap ada. Kondisi geografis Indonesia yang unik, ditambah dengan potensi kekuatan dan arah angin yang seringkali tidak menentu, serta curah hujan yang tidak dapat diprediksi, menjadi hambatan bagi penggunaan drone dalam mengirim barang.

Lebih jauh, ada urgensi dalam pengiriman barang-barang tertentu seperti obat-obatan medis yang memerlukan layanan tanpa batasan jam operasi. Data Kementerian Kesehatan menunjukkan bahwa dalam situasi darurat, keterlambatan pengiriman obat dapat berakibat fatal bagi pasien. Oleh karena itu, sistem pengiriman yang lebih cepat, efisien, dan dapat mencapai wilayah lokal, bahkan yang sulit dijangkau, menjadi sangat penting.

Namun, ada masalah lain yang perlu dihadapi. Pertama, kondisi lapangan dan rute pengiriman yang tidak selalu ideal untuk dilewati oleh drone, terutama di kota-kota besar seperti Jakarta yang sering mengalami kemacetan. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS), kemacetan di Jakarta dapat menimbulkan kerugian ekonomi hingga triliunan rupiah setiap tahunnya [3]. Selanjutnya, Indonesia, yang terletak di Cincin Api Pasifik, memiliki angka bencana alam yang tinggi, yang tentunya dapat menghambat operasi drone. Faktanya, Indonesia mengalami rata-rata 2.000 bencana alam setiap tahun, berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB).

Tambahan lagi, ada keterbatasan jarak operasional antara drone dengan ground control station. Menurut regulasi penerbangan sipil di Indonesia, drone memiliki batasan jarak operasional tertentu dengan stasiun kontrolnya. Terakhir, ada

tantangan dalam menentukan rute yang optimal bagi drone, terutama dengan adanya area-area yang dilarang atau dibatasi untuk dilintasi oleh drone [1].

Dengan berbagai masalah tersebut, penting bagi kita untuk memikirkan bagaimana cara mengoptimalkan penggunaan hayago drone delivery di Indonesia. Dengan berbagai masalah tersebut, penting bagi kita untuk memikirkan bagaimana cara mengoptimalkan penggunaan hayago drone delivery di Indonesia.

II. TUJUAN

Tujuan utama dari kajian ini adalah untuk memahami serta menganalisis potensi hayago drone delivery dalam menghadapi berbagai tantangan sistem pengiriman barang di Indonesia. Melihat Indonesia yang memiliki lanskap geografis yang kompleks, serta tantangan-tantangan seperti kekuatan angin, curah hujan, serta kondisi lalu lintas dan bencana alam, kajian ini akan fokus pada bagaimana teknologi drone dapat memberikan solusi efisien dan efektif. Selain itu, dengan urgensi pengiriman barang kritis seperti obat-obatan medis, penelitian ini akan mengkaji bagaimana hayago drone delivery dapat menyediakan layanan tanpa henti, memastikan keberlanjutan pasokan kebutuhan vital bagi masyarakat.

Dalam konteks teknis, kajian ini akan menjelaskan dan mendiskusikan teknik-teknik operasional yang mungkin diterapkan pada hayago drone delivery, seperti teknik kontrol sliding mode dan kalman filter, untuk memastikan operasional drone yang stabil dan andal. Melalui analisis ini, diharapkan dapat ditemukan solusi atas permasalahan-permasalahan yang ada dalam sistem pengiriman barang saat ini, termasuk potensi keterlambatan, kerusakan barang, dan biaya operasional yang tinggi [10].

Selanjutnya, kajian ini akan menyajikan dan membahas rancangan serta pengembangan dari hayago drone delivery yang

efisien dan andal, mempertimbangkan berbagai tantangan geografis dan regulasi yang ada di Indonesia. Melalui kajian komprehensif ini, diharapkan teknologi UAV dalam bentuk hayago drone delivery dapat memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengiriman barang di Indonesia.

Dalam membandingkan dengan tujuan yang telah dipaparkan sebelumnya, kedua karya tulis tersebut memiliki kesamaan dalam tujuannya untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pengiriman barang di Indonesia melalui teknologi UAV. Namun, fokus utama pada hayago drone delivery adalah mengatasi tantangan-tantangan khusus yang dihadapi oleh Indonesia, sementara karya tulis pertama lebih berfokus pada teknik kontrol dan pengembangan UAV itu sendiri. Meski begitu, keduanya memiliki visi yang sama: memberikan kontribusi positif bagi peningkatan kualitas hidup masyarakat Indonesia melalui inovasi teknologi.

III. METODE

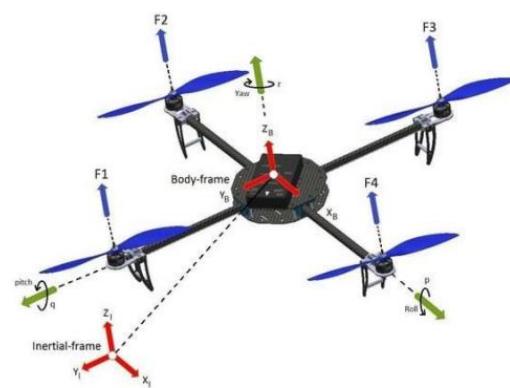
A. PENGEMBANGAN MODEL UAV

UAV yang digunakan yakni drone dengan tipe Quadcopter X (4 baling baling membentuk huruf X) hal ini dikarena kan untuk mempermudah membuat dinamik model dari drone dengan tipe tersebut. UAV dinamik model adalah model matematis yang menggambarkan perilaku sebuah Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dalam ruang udara. Model ini digunakan untuk mengukur dan memprediksi kinerja UAV selama melakukan penerbangan dan memberikan informasi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kinerjanya. Dalam proposal ini, dinamik model UAV digunakan sebagai dasar untuk merancang sistem kontrol yang akan membantu UAV melakukan tugas pengiriman dengan efisien dan aman, seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. 2023 didesain oleh tim Hayago menggunakan Inventor 3D desain gambar 3D desain Hayago quadcopter drone delivery

Sistem kontrol yang akan diterapkan melibatkan dua teknik, yaitu sliding mode control dan kalman filter. Sliding mode control digunakan sebagai teknik untuk mengatasi permasalahan trajectory obstacle dan memastikan bahwa UAV dapat mengikuti jalur yang telah ditentukan. Sementara itu, kalman filter digunakan untuk memperbaiki akurasi pengukuran dan memfilter kebisingan data yang masuk sehingga sistem kontrol dapat berfungsi dengan optimal.



Gambar 2. 2023 didesain oleh tim Hayago menggunakan Inventor 3D desain gambar 3D model dinamika dari quadcopter

Dengan demikian, UAV dapat melakukan tugas pengiriman dengan efisien dan aman karena memiliki sistem kontrol yang baik dan stabil. Proposal ini menunjukkan bahwa dengan menerapkan UAV dinamik model dan sistem kontrol yang baik, UAV dapat memainkan peran penting dalam memberikan solusi bagi berbagai masalah logistik dan pengiriman.

UAV dengan konfigurasi quadrotor memiliki 12 variabel kondisi yakni : $X = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \phi, \theta, \Psi, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}]$, dimana x, y, z merupakan posisi yang merepresntasikan 3 sumbu ruang yakni x (depan, belakang), y (kanan, kiri) dan z (atas, bawah). $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ merupakan nilai kecepatan perpindahan pada setiap sumbu, ϕ, θ, Ψ merupakan orientasi untuk quadcopter yakni roll, pitch dan yaw, $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}$ merupakan kecepatan orientasi UAV (Quadrotor) untuk roll, pitch, dan yaw

$$\hat{x} = \frac{\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\Psi) + \sin(\phi) + \sin(\Psi)}{m} U1 \quad (1)$$

$$\hat{y} = \frac{\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\Psi) - \sin(\phi) + \sin(\Psi)}{m} U1 \quad (2)$$

$$\hat{z} = -g + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} U1 \quad (3)$$

$$\hat{\phi} = \hat{\phi} \hat{\psi} \frac{Iy - Iz}{Ix} - \frac{Jr}{Ix} \hat{\theta} \Omega + \frac{1}{Ix} U2 \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = \hat{\phi} \hat{\psi} \frac{Iz - Ix}{Iy} - \frac{Jr}{Iy} \hat{\theta} \Omega + \frac{1}{Iy} U2 \quad (5)$$

$$\hat{\psi} = \hat{\phi} \hat{\psi} \frac{Ix - Iy}{Iz} + \frac{1}{Iz} U4 \quad (6)$$

Sinyal input $U1$ merepresentasikan total hambatan dari roda-roda. $U2$, $U3$, dan $U4$ merupakan momen untuk pitch, roll, dan yaw secara berturut-turut. m adalah massa dari quadrotor, Jr adalah inersia rotor dan Ix , Iy dan Iz adalah inersia quadrotor dalam sumbu 'x', 'y', dan 'z' secara berturut-turut.

$$U1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (7)$$

$$U2 = b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \quad (8)$$

$$U3 = b(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \quad (9)$$

$$U4 = b(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (10)$$

Kecepatan sudut untuk setiap rotor ditandai sebagai $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$. l adalah jarak antara rotor dan pusat quadrotor, dan b adalah faktor hambatan. Semua parameter ini yang terlibat dalam persamaan (2) hingga (11).

$$\begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -b & 0 & b \\ -b & 0 & b & 0 \\ -d & d & -d & -d \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sehingga faktor Ω didapatkan sebagai berikut:

$$\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad (12)$$

Model ini akan dibangun dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti efisiensi, keandalan, dan kemampuan untuk mengintegrasikan teknik kontrol sliding mode dan kalman filter.

B. ALGORITMA SISTEM KONTROL

1) SLIDING MODE CONTROL

Dalam proposal ini, kita juga akan membahas tentang kontrol dan respon yang sudah ada pada kontrol sliding mode. Kontrol sliding mode adalah teknik kontrol non-linear yang memastikan bahwa sistem stabil dan dapat mengatasi hambatan. Dalam hal ini, kontrol sliding mode akan digunakan sebagai trajectory obstacle, memastikan bahwa UAV akan dapat mengatasi hambatan yang mungkin terjadi selama pengiriman.

Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (UAV) untuk sistem pengiriman dengan menggunakan teknik kontrol sliding mode dan kalman filter. Kontrol sliding mode adalah salah satu teknik kontrol yang efektif dan stabil dalam mengatasi permasalahan dinamika sistem yang non-linear.

Sliding Mode Control (SMC) merupakan teknik yang berasal dari Variable Structure Control (VSC). Tujuan SMC terdiri dari dua bagian: bagian pertama merancang hukum kontrol untuk memaksa vektor error menuju keputusan aturan, disebut sebagai permukaan sliding [4], selama fase pencapaian. Dalam bagian ini, kontrol beralih di sisi berbeda dari permukaan sliding. Bagian kedua, setelah vektor error dibatasi dalam permukaan sliding, ia melacak dinamika yang diberlakukan oleh persamaan yang menggambarkan permukaan sliding. Bagian kedua kontroler ini disebut kontrol setara.

Empat persamaan kontrol digunakan untuk menjaga quadrotor pada nilai referensi meskipun ada gangguan eksternal. Sinyal U_1 digunakan untuk menjamin bahwa ketinggian mengikuti nilai referensi, sementara sinyal U_2, U_3 , dan U_4 digunakan untuk mengontrol roll, pitch, dan yaw dari sistem. Dengan melihat persamaan pada model dinamika quadcopter, kita menemukan empat sinyal input kontrol [5]. Aksi dari sinyal input ini membuat quadrotor bergerak maju, mundur, ke kiri, ke kanan, ke atas, atau ke bawah [6].

$$s = \hat{e} + \lambda e \#slidingSurface \quad (13)$$

Di mana λ merupakan parameter tuning yang didesain lebih besar dari nol. (13) Hukum kontrol, $U(t)$, terdiri dari dua bagian: bagian kontinu, $ueq(t)$, dan bagian diskontinu, $uD(t)$. Dengan kata lain

$$U(t) = ueq(t) + uD(t) \#controlLaw \quad (14)$$

Bagian pertama adalah fungsi dari variabel yang dikontrol dan nilai referensinya. Bagian kedua mencakup elemen non linier yang berisi elemen switching

$$uD(t) = K_D \Theta(s(t)) \#discontinueControl \quad (15)$$

K_D adalah parameter tuning yang bertanggung jawab atas fase pencapaian, dan $\Theta(s(t))$ adalah fungsi non linier dari $s(t)$. Maka dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$uD(t) = K_D \text{sign}(s(t)) \#uDt \text{non-linear} \quad (16)$$

Permasalahan chattering dapat diatasi dengan mengganti rumus $uD(t)$ sebagai berikut:

$$uD(t) = K_D \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta} \#reduceChattering \quad (17)$$

δ digunakan sebagai tuning parameter untuk meminimalisir adanya masalah efek chattering, untuk menemukan nilai $ueq(t)$, maka control equivalent sebagai berikut:

Pada persamaan sliding surface, untuk mencari error pada altitude suatu quadrotor maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$e = z_d - z \quad (18)$$

nilai z merupakan nilai z altitude kondisi sekarang, dan Z_d merupakan nilai z altitude yang ditargetkan, sehingga persamaan sliding surface untuk nilai z yakni :

$$s = (\widehat{z}_d - \widehat{z}) + \lambda(z_d - z) \quad (19)$$

Ketika menerapkan kondisi sliding surface, $\widehat{s} = 0$, maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\widehat{s} = \widehat{e} + \lambda \widehat{e} = 0 \quad (20)$$

$$\widehat{s} = (\widehat{\widehat{z}}_d - \widehat{\widehat{z}}) + \lambda(\widehat{z}_d - \widehat{z}) \quad (21)$$

Dari substitusi persamaan kecepatan nilai titik akhir koordinat z dan persamaan diatas, maka rumus diatas dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$\widehat{s} = \left(\widehat{\widehat{z}}_d + g - \frac{\cos(\phi) \cos(\psi)}{m} U_1 \right) + \lambda(\widehat{z}_d - \widehat{z}) \quad (22)$$

Memperhitungkan $U_1 = ueq$, mengingat sistem berada dalam kondisi sliding, persamaan di atas menjadi.

$$\widehat{s} = \left(\widehat{\widehat{z}}_d + g - \left(\frac{\cos(\phi) \cos(\psi)}{m} \right) Ueq \right) + \lambda(\widehat{z}_d - \widehat{z}) \quad (23)$$

Mulai dari, $\widehat{s} = 0$, maka ueq dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$ueq = \left[g + \lambda(\widehat{z}_d - \widehat{z}) + \widehat{\widehat{z}}_d \right] \frac{m}{\cos(\phi) \cos(\psi)} \#continuousControl \quad (24)$$

Dan, persamaan akhir untuk kontroler dapat ditulis sebagai berikut:

$$U_1 = [g + \lambda \hat{e} + \widehat{\bar{z}_d}] \frac{m}{\cos(\phi)\cos(\psi)} + K_D \text{sign}(s) \quad (25)$$

Untuk merancang persamaan uD , fungsi Lyapunov V didefinisikan harus positive-definite

$$V = \frac{1}{2}s^2 > 0 \quad (26)$$

Turunan fungsi V harus negative definite

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (27)$$

Dari persamaan turunan fungsi V diatas, maka persamaan uD yakni sebagai berikut:

$$uD = K_D \text{sign}(s) \quad (28)$$

Dimana S didefinisikan dari persamaan sliding surface, Kondisi pencapaian ditentukan oleh ketidaksamaan berikut, $\dot{V} > 0$. Oleh karena itu, untuk memenuhi kondisi tersebut:

$$K_D > 0 \text{ for all } t > 0 \quad (29)$$

untuk menghindari permasalahan chattering, uD didefinisikan ulang sebagai berikut:

$$uD(t) = K_D \frac{s}{|s|+\delta} \quad (30)$$

Maka, nilai kontroler yang akan digunakan untuk mengendalikan quadcopter yakni sebagai berikut:

$$U_1 = [g + \lambda \hat{e} + \widehat{\bar{z}_d}] \frac{m}{\cos(\phi)\cos(\psi)} + K_D \frac{s}{|s|+\delta} \quad (31)$$

Metode yang sama seperti diatas juga akan digunakan untuk kontrol orientasi drone secara realtime yakni dengan memberikan nilai kontrol sliding pada pitch, roll dan yaw.

$$Ueq\phi = [\lambda(\widehat{\phi_d} - \widehat{\phi}) + \widehat{\phi_d} - \widehat{\theta}\widehat{\psi} \frac{Iy-Iz}{Ix} + \frac{Jr}{Ix}\widehat{\theta}\Omega] \frac{Ix}{I} \quad (32)$$

$$Ueq\theta = [\lambda(\widehat{\theta_d} - \widehat{\theta}) + \widehat{\theta_d} - \widehat{\phi}\widehat{\psi} \frac{Iz-Ix}{Iy} + \frac{Jr}{Iy}\widehat{\theta}\Omega] \frac{Iy}{I} \quad (33)$$

$$Ueq\psi = [\lambda(\widehat{\psi_d} - \widehat{\psi}) + \widehat{\psi_d} - \widehat{\phi}\widehat{\psi} \frac{Ix-Iy}{Iz}] Iz \quad (34)$$

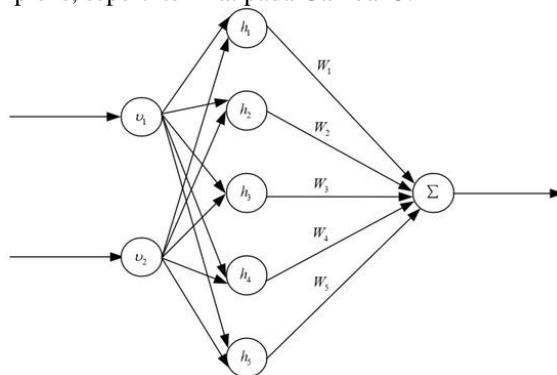
Respons kontrol sliding mode terhadap perubahan kondisi sistem juga sangat cepat dan akurat, memastikan bahwa sistem pengiriman UAV dapat berjalan dengan lancar dan efisien.

Dalam karya tulis ini, kami berharap dapat membangun UAV yang dapat beroperasi secara otomatis dan mengatasi hambatan yang mungkin terjadi saat pengiriman. Dengan menggunakan teknik kontrol sliding mode dan kalman filter, kita dapat memastikan bahwa UAV akan beroperasi dengan baik dan dapat memenuhi kebutuhan pengiriman yang efisien dan akurat.

2) CONTROL ADAPTIVE RADIAL BASIS FUNCTION

Adaptive Sliding Mode Control adalah metode kontrol yang mengkombinasikan keuntungan dari kontrol sliding mode dengan adaptasi untuk menangani ketidakpastian dan gangguan

yang mungkin tidak diketahui dengan tepat. Kontrol sliding mode memastikan bahwa sistem dapat mencapai kondisi yang diinginkan dalam waktu singkat dengan respons yang cepat, sedangkan adaptasi memungkinkan kontroler untuk menyesuaikan diri dengan perubahan pada sistem atau lingkungan. RBF Neural Network (RBFNN) merupakan jenis jaringan saraf tiruan yang memiliki fungsi dasar Radial Basis Function (RBF) sebagai neuron pada hidden layer-nya. Jaringan ini terdiri dari tiga lapisan: input layer, hidden layer, dan output layer. Keunggulan utama dari RBFNN adalah kemampuannya dalam menyesuaikan diri dengan fungsi nonlinier yang kompleks, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar arsitektur sistem Radial Basis Function untuk Adaptif Sliding Mode Control

Dalam konteks pengiriman dengan drone, ASMC dan RBFNN bisa digunakan untuk mengontrol sikap drone (misalnya: roll, pitch, yaw) di tengah kondisi yang berubah-ubah, seperti gangguan angin.

Algoritma input dan output dari satu bagian RBFNN didefinisikan sebagai berikut:

$$h_j(v) = \exp\left(-\frac{(|v - c_j|)^2}{2b_j^2}\right) \quad (35)$$

$$f_i(tk) = (W^*)^T h_j(v) + \eta \quad (36)$$

Di mana v adalah input dari neural network, j adalah node j dari hidden layer, c_j merupakan center vector dari setiap node hidden layer, b_j adalah lebar vector dari hidden layer neural network, W^* adalah jaringan perkiraan bobot ideal, $\eta \leq \eta_{\max}$ adalah error perkiraan neural network.

Untuk sistem control untuk attitude pada UAV, input neural network diambil sebagai $v_i = [x_{i1}(tk) \ x_{i2}(tk)]^T$, dan output estimasi dari RBFNN untuk sebuah sistem control nonlinear yang tidak diketahui $f_i(tk)$ yakni:

$$\hat{f}_i(tk) = \hat{W} i^T h_i(v_i) \quad (37)$$

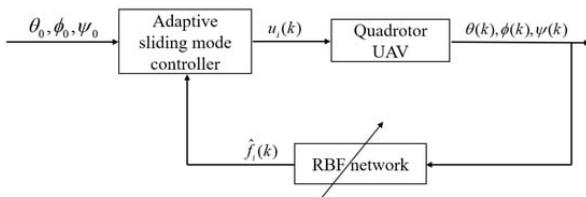
Dimana $\hat{W} i$ adalah lebar estimasi dari jaringan, $i = 1, 2, 3$. Adaptive adjustment law dari bobot estimasi jaringan dirancang dalam delta sebagai berikut.

$$\delta \hat{W} i(tk) = \gamma_i \sigma_i(tk) S_i B_i h_i(v_i) \quad (38)$$

Sehingga desain control dari Adaptive Sliding Mode Control yakni

$$ui(tk) = -(SiBi)^{-1}[SiAixi(tk) + SiBif_i(tk) + ei \text{ sign}(\sigma_i(tk)) + \beta i\sigma_i(tk)] \quad (39)$$

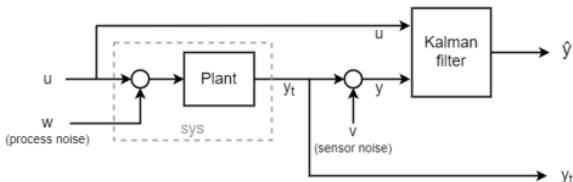
Diagram algoritma control Adaptive Sliding Mode berbasis RBFNN ditunjukkan pada gambar dibawah ini, di mana RBFNN digunakan untuk memperkirakan gangguan eksternal yang tidak diketahui. Adaptive Sliding Mode Control dirancang untuk mencapai control variabel penerbangan menggunakan informasi yang telah diperkirakan (Gambar 4).



Gambar 4. Gambar sistem algoritma dari Radial Basis Function untuk Sliding Mode Control

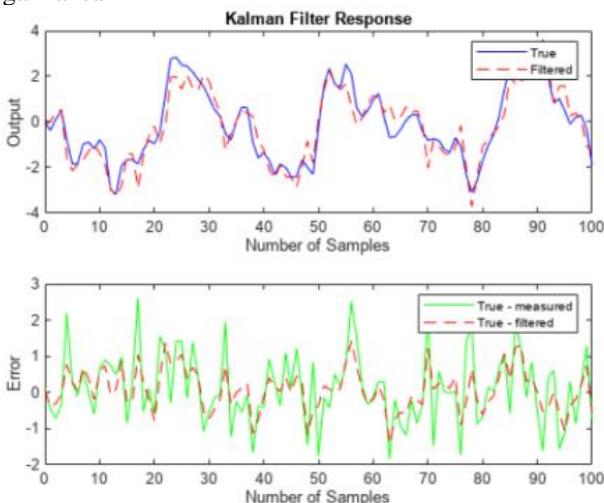
3) KALMAN FILTER

Dalam proposal ini, kita juga akan membahas tentang kontrol dan respon yang sudah ada pada kalman filter. Kalman filter adalah metode estimasi yang sering digunakan dalam sistem kendali dan navigasi. Ini membantu memperkirakan posisi dan kecepatan objek berdasarkan data masukan seperti sensor dan GPS [9]. Kontrol Kalman filter akan memastikan bahwa informasi posisi dan kecepatan objek yang diperkirakan akurat dan dapat digunakan untuk membuat keputusan pengendalian yang tepat (Gambar 5).



Gambar 5. Gambar sistem Kalman Filter untuk Sliding Mode Control dengan parameter sensor IMU dan GPS

Gambar 6 menunjukkan bahwa respons kalman filter terhadap perubahan kondisi sistem juga akan sangat cepat dan akurat, memastikan bahwa sistem pengiriman UAV dapat berjalan dengan lancar



Gambar 6. Gambar simulasi sistem Kalman Filter yang sudah dilakukan pada Matlab.

Filter Kalman memperkirakan proses menggunakan bentuk kontrol umpan balik iteratif [8]. Persamaan pada Filter Kalman dibagi menjadi dua tahap, yaitu persamaan pembaruan waktu dan persamaan pembaruan pengukuran. Persamaan Filter Kalman untuk tahapan prediksi disajikan dalam Persamaan sebagai berikut.

$$\hat{x}_k = \cos(\hat{x}_{k-1}) + uD + Q \quad (40)$$

$$P_k = \cos(P_{k-1}) + C^T + Q \quad (41)$$

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (42)$$

Dimana \hat{x}_k adalah vektor prediksi, P_k adalah matriks prediksi kovarian, K_k merupakan kalman gain. Perubahan prediksi selanjutnya dengan menggunakan pengukuran nilai Zk

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (Z_k - H\hat{x}_k) \quad (43)$$

$$Z_k = Hx_k + vk \quad (44)$$

Maka pembaruan error kovarian yakni:

$$P_k = (I - K_k H)P_k \quad (45)$$

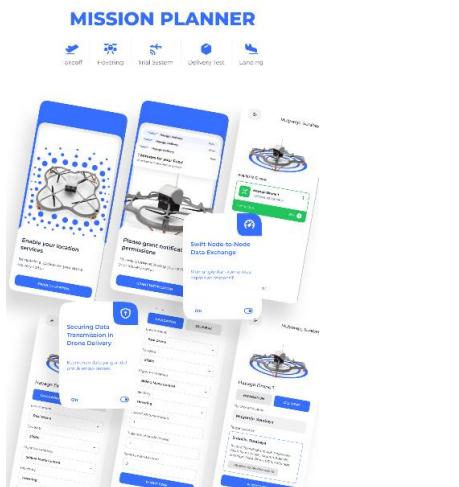
Variabel keadaan yang telah diperbarui akan digunakan untuk prediksi kondisi selanjutnya. Proses tahapan ini akan dilakukan berulang-ulang sebanyak diskritisasi waktu yang dibutuhkan

C. IMPLEMENTASI APLIKASI DRONE DELIVERY

Aplikasi / software drone delivery adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mengendalikan dan memantau operasi pengiriman Unmanned Aerial Vehicle (UAV) secara otomatis. Aplikasi ini memainkan peran penting dalam memastikan bahwa pengiriman dilakukan dengan efisien, aman, dan tepat waktu. Dalam karya tulis ini, aplikasi drone delivery akan digunakan sebagai bagian integral dari sistem pengiriman UAV yang akan diterapkan.

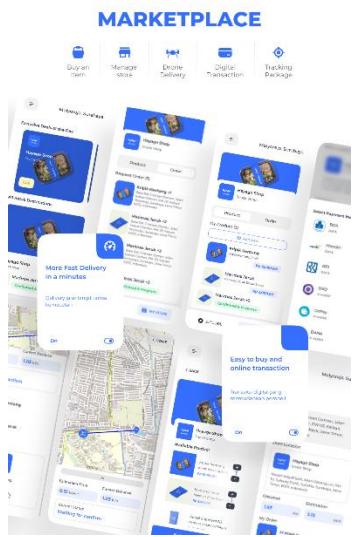
Aplikasi ini akan berfungsi untuk menentukan jalur penerbangan UAV, mengendalikan UAV untuk mengikuti jalur tersebut, memantau kondisi UAV saat melakukan penerbangan, dan memastikan bahwa paket diterima dengan benar oleh penerima. Aplikasi ini juga akan berkomunikasi dengan sistem kontrol UAV untuk memastikan bahwa pengiriman dilakukan dengan aman dan efisien. Hayago Drone Delivery memahami kebutuhan ini dengan menyajikan solusi pengiriman yang revolusioner melalui integrasi fitur Mission Planner dan platform E-commerce.

Mission Planner di Hayago Drone Delivery bukan sekadar alat navigasi biasa. Ia adalah otak di balik operasional drone yang memastikan setiap paket dikirimkan dengan tepat dan aman. Menggunakan algoritma navigasi canggih, fitur ini dapat merencanakan rute terpendek dan paling aman, menghindari rintangan, serta mempertimbangkan faktor-faktor eksternal seperti cuaca dan lalu lintas udara. Dengan kemampuan untuk menyesuaikan rute secara real-time berdasarkan data yang diterima, Mission Planner memastikan drone selalu berada pada jalur terbaik menuju destinasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. 2023 didesain oleh tim Hayago Gambar desain mockup sistem Mission Planner pada aplikasi

Sementara itu, integrasi dengan platform E-commerce memudahkan pengguna untuk memanfaatkan layanan pengiriman drone ini, seperti pada Gambar 8. Konsumen dapat dengan mudah memilih produk yang diinginkan, mengecek ketersediaan layanan pengiriman drone di wilayah mereka, dan melacak pengiriman secara real-time melalui aplikasi Hayago. Dengan sistem yang terintegrasi ini, proses pemesanan hingga pengiriman menjadi lancar dan transparan.



Gambar 8. 2023 didesain oleh tim Hayago Gambar desain mockup system Marketplace / ECommerce pada aplikasi

Kombinasi antara Mission Planner dan E-commerce di Hayago Drone Delivery menciptakan ekosistem pengiriman yang efisien, cepat, dan inovatif. Di tengah persaingan industri pengiriman yang ketat, Hayago mengambil langkah maju, mengubah cara kita memandang dan mengalami proses pengiriman. Dengan drone yang terbang cepat di langit, memastikan paket Anda tiba tepat waktu, Hayago menetapkan standar baru dalam dunia pengiriman masa depan (Gambar 9).

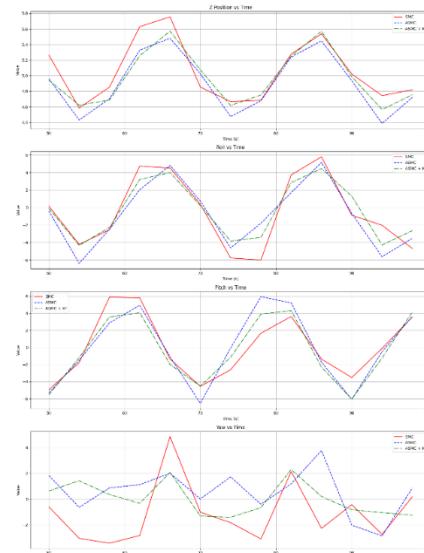
Dengan demikian, aplikasi drone delivery memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pengiriman UAV. Karya tulis ini menunjukkan bahwa dengan menerapkan aplikasi drone delivery yang baik, UAV dapat memainkan peran penting dalam memberikan solusi bagi berbagai masalah logistik dan pengiriman.



Gambar 9. 2023 pengujian drone oleh tim Hayago Gambar drone hayago pada environment indoor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam percobaan penerbangan drone delivery, kami menerapkan tiga pendekatan kontrol yang berbeda, yaitu: Sliding Mode Control (SMC), Adaptive Sliding Mode Control (ASMC) dengan Radial Basis Function Neural Network (RBFNN), dan integrasi antara ASMC dengan Kalman Filter (ASMC + KF). Melalui serangkaian tes, setiap pendekatan menunjukkan karakteristik dan performa yang unik, seperti terlihat pada Gambar 10.



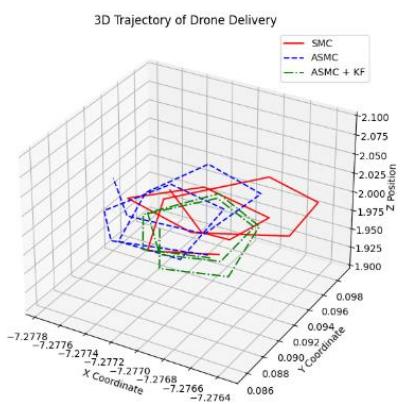
Gambar 10. 2023 hasil pengujian drone oleh tim Hayago Gambar drone karakteristik hasil respond dari SMC, ASMC dan Kalman Filter.

Pertama, dengan menggunakan SMC, drone mampu mengikuti trajektori yang diinginkan tetapi dengan adanya sedikit overshoot dan osilasi yang lebih besar, terutama saat menghadapi gangguan atau ketidakpastian model. Ini adalah karakteristik umum dari SMC, yang mampu menangani gangguan namun terkadang menghasilkan respons yang kurang halus. Pada percobaan ASMC dengan RBFNN, drone menunjukkan peningkatan signifikan dalam hal penyesuaian terhadap ketidakpastian model dan gangguan. RBFNN memungkinkan kontroler untuk beradaptasi dengan kondisi penerbangan yang berubah-ubah, menghasilkan trajektori yang lebih dekat dengan yang diinginkan dibandingkan dengan SMC murni. Namun, ada kemungkinan bahwa ASMC dengan RBFNN mungkin memerlukan waktu komputasi yang lebih lama, yang bisa menjadi kendala dalam aplikasi nyata.

Ketika menggabungkan ASMC dengan Kalman Filter (ASMC + KF), hasil penerbangannya menunjukkan performa

terbaik di antara ketiganya. Kalman Filter, dengan kemampuannya untuk memperkirakan keadaan sistem dengan presisi, membantu dalam meningkatkan akurasi dan kehalusan trajektori, khususnya dalam menghadapi gangguan. Dengan KF, prediksi dan koreksi keadaan sistem dilakukan secara berkala, memungkinkan kontroler untuk menerima informasi yang lebih akurat tentang keadaan saat ini dari drone.

Ketika menggabungkan ASMC dengan Kalman Filter (ASMC + KF), hasil penerbangannya menunjukkan performa terbaik di antara ketiganya. Kalman Filter, dengan kemampuannya untuk memperkirakan keadaan sistem dengan presisi, membantu dalam meningkatkan akurasi dan kehalusan trajektori, khususnya dalam menghadapi gangguan. Dengan KF, prediksi dan koreksi keadaan sistem dilakukan secara berkala, memungkinkan kontroler untuk menerima informasi yang lebih akurat tentang keadaan saat ini dari drone.



Gambar 11. 2023 hasil pengujian drone oleh tim Hayago Gambar plotting koordinat membentuk trajectory / rute drone terbang.

Dalam hal trajektori penerbangan, dengan SMC murni, trajektori cenderung memiliki deviasi yang lebih besar dari lintasan yang diinginkan, seperti terlihat pada Gambar 11. Sedangkan dengan ASMC, deviasi menjadi lebih kecil dan dengan ASMC + KF, trajektori hampir sempurna mengikuti lintasan yang diharapkan.

Selain itu, beberapa parameter tuning untuk SMC dan KF dijelaskan. Parameter-parameter ini telah disesuaikan berdasarkan percobaan untuk mengoptimalkan kinerja masing-masing metode kontrol dalam aplikasi drone delivery.

Namun, meskipun ASMC dengan RBFNN memperlihatkan performa yang meningkat, masih ada masalah dengan estimasi keadaan drone. Untuk mengatasinya, integrasi ASMC dengan Kalman Filter (KF) diusulkan. Kalman Filter dikenal dengan kemampuannya dalam mengestimasi keadaan sistem dengan akurasi tinggi, bahkan dalam kondisi noise atau gangguan yang tinggi. Dengan menggabungkan keunggulan ASMC dalam kontrol adaptif dan KF dalam estimasi keadaan, performa penerbangan drone menjadi lebih stabil dan akurat.

V. KESIMPULAN

Penerapan teknologi UAV dalam sistem pengiriman barang, khususnya drone delivery Hayago, telah membawa inovasi signifikan dalam dunia pengiriman. Dengan manfaatkan metode kontrol Sliding Mode Control (SMC), Adaptive Sliding Mode Control (ASMC), serta integrasi ASMC dengan Kalman Filter (ASMC + KF), drone delivery Hayago mampu mengatasi tantangan-tantangan yang dihadapi oleh metode pengiriman konvensional.

Adaptive Sliding Mode Control, dengan adaptabilitasnya, memastikan kestabilan drone, bahkan dalam kondisi lapangan

dan rute yang tidak menentu. Ini mendukung penemuan sebelumnya yang mengindikasikan keunggulan kontrol sliding mode, terutama dalam stabilitas dan penolakan gangguan, yang menjadi esensial dalam kondisi penerbangan yang dinamis. Pengiriman barang dengan drone, khususnya barang-barang penting seperti peralatan medis, menjadi lebih andal dengan penerapan teknik kontrol ini. Selain itu, dengan kapabilitas operasional 24 jam, drone delivery Hayago memaksimalkan potensi pengiriman tanpa keterbatasan waktu.

Tidak dapat diabaikan juga kemajuan signifikan dalam infrastruktur teknologi informasi. Aplikasi Android yang terintegrasi memungkinkan pelanggan untuk berinteraksi dengan sistem, mulai dari pemesanan barang, pelacakan posisi drone, hingga mendapatkan informasi estimasi waktu pengiriman. Penerapan teknologi cloud server memaksimalkan jarak terbang drone dengan efisiensi baterai yang optimal.

Penting pula untuk mencatat bagaimana metode kontrol dan teknologi lainnya bekerja dalam harmoni. Mission planner berfungsi sebagai penentuan rute optimal, memastikan drone mengikuti lintasan terbaik sambil memperhitungkan batasan-batasan seperti hambatan dan durasi baterai. Integrasi antara ASMC dengan Kalman Filter juga mendukung optimalisasi ini dengan memberikan estimasi posisi dan kecepatan yang akurat.

Dengan demikian, Drone Delivery Hayago, melalui inovasi teknologi dan metode kontrol yang tepat, menunjukkan sebuah solusi futuristik untuk tantangan pengiriman barang saat ini. Ini bukan hanya tentang kecepatan dan efisiensi, tetapi juga tentang bagaimana teknologi dapat diterapkan dengan bijak untuk menciptakan solusi yang aman, andal, dan berorientasi pada kebutuhan pelanggan.

REFERENSI

- [1] 3D Robotics, "Dronekit Python Readthedocs," 2016. [Online]. Available: https://dronekit.python.readthedocs.io/en/latest/examples/channel_overrides.html. [Accessed: 20-Jan-2023].
- [2] Badan Pusat Statistik (BPS), Statistik E-Commerce 2022, Jakarta, Indonesia: Badan Pusat Statistik/BPS-Statistics Indonesia, 2022.
- [3] BPS Indonesia, STATISTIK TRANSPORTASI DARAT 2021, Jakarta, Indonesia: BPS-Statistics Indonesia, 2021.
- [4] A. Eltayeb, M. F. Rahmat, and B. Ariffan, "Sliding mode control design for the attitude and altitude of the quadrotor UAV," Int. J. Smart Sens. Intell. Syst., vol. 13, no. 1, pp. 1-13, 2020, doi: 10.21307/ijssis-2020-011.
- [5] A. Faizal, E. Ismaredah, D. Mursyitah, and F.A. Zeqri, "Desain Pengendali Sliding Mode Control Untuk Mengendalikan Posisi Hover Pada Unmanned Aerial Vehicle Quadcopter," Jurnal SNTIKI Seminar Nas. Teknol. Inform. dan Industri, pp. 526-533, 2019, ISSN : 2579-5406.
- [6] Y. Jing, X. Wang, J. Heredia-Juesas, C. Fortner, C. Giacomo, R. Sipahi, and J. Martinez-Lorenzo, "PX4 Simulation Results of a Quadcopter with a Disturbance-Observer-Based and PSO-Optimized Sliding Mode Surface Controller," Drones, vol. 6, no. 9, p. 261, 2022, doi: 10.3390/drones6090261.
- [7] Katadata Media Network, "Databoks Katadata," 2022. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/05/tarif-jasa-pengiriman-barang-naik-034-pada-september-2022>. [Accessed: 31-Jan-2023].
- [8] Y. Marani, K. Telegenov, E. Feron, and M.-T.L. Kirati, "Drone reference tracking in a non-inertial frame using sliding mode control based Kalman filter with unknown input," 2022 IEEE Conf. on Control Tech. and Appl. (CCTA), Trieste, Italy, pp. 1-13, 2022, doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9966119.
- [9] V. Sazdovski, T. Kolemishevska-Gugulovska, and M. Stankovski, "KALMAN FILTER IMPLEMENTATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES NAVIGATION," IFAC Proc. Vol., vol. 38, no. 1, pp. 12-17, 2005, doi: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.02265.
- [10] Somadi, "Evaluasi Keterlambatan Pengiriman Barang dengan Menggunakan Metode Six Sigma," J. Logistik Indon., vol. 4, no. 2, pp. 81-93, 2020, E-ISSN: 2621-6442.