

Sistem Navigasi Pada Balon Udara Menggunakan GPS dan Kontrol Logika *Fuzzy*

Dimas Arief Rahman K., Muhammad Rivai, dan Rudy Dikairono

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: muhammad_rivai@ee.its.ac.id

Abstrak—Saat ini, pesawat tanpa awak adalah sarana yang potensial untuk tujuan eksplorasi. Salah satu jenis pesawat tanpa awak adalah balon udara. Balon udara sangat cocok digunakan untuk eksplorasi pada kecepatan dan ketinggian yang rendah. Hal yang penting dalam pengembangan balon udara sebagai sarana eksplorasi adalah sistem navigasi. Sistem navigasi dapat mengarahkan balon udara ke tujuan yang ditentukan secara otomatis. Parameter yang diperlukan dalam sistem navigasi adalah informasi posisi dan arah objek yang akan dikontrol. Terdapat banyak metode sistem navigasi. Salah satunya adalah metode sistem navigasi dengan menggunakan GNSS (*Global Navigation Satellite System*) dan kompas. Metode ini menggunakan sensor GNSS mengetahui posisi, sedangkan kompas digunakan untuk mengetahui arah. Di dalam sistem ini digunakan filter kuarternion berbasis AHRS (*Attitude and Heading Reference System*) untuk mengkompensasi pembacaan data kompas terhadap kemiringan sensor. Dari data posisi dan arah yang didapatkan akan diolah menjadi informasi jarak dan derajat arah balon terhadap *waypoint*. Kemudian, informasi jarak dan derajat arah tersebut diolah untuk menggerakkan motor pada balon dan mengarahkan balon pada *waypoint*. Sistem ini menggunakan sensor GPS berbasis GNSS (*Global Navigation Satellite System*) untuk mengetahui posisi, sensor kompas berbasis IMU (*Inertial Measurement Unit*) untuk mengetahui arah, dan kontrol logika *fuzzy* sebagai pengatur kecepatan motor kemudi untuk pergerakan balon. Pada metode ini, akurasi dari sensor GNSS berkisar antara 9,5 sampai 20 meter. Galat maksimum dari kompas dengan kompensasi kemiringan adalah 7%. Terjadi osilasi pada arah Utara dengan simpangan berkisar antara 50-90 derajat dan arah Barat dengan simpangan sebesar 20-50 derajat.

Kata Kunci— Navigasi, Balon udara, *Waypoint*.

I. PENDAHULUAN

PENGEMBANGAN sistem navigasi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) untuk keperluan pemantauan dan eksplorasi semakin meningkat. Jenis UAV yang sering digunakan untuk keperluan ini adalah *quadcopter* dan pesawat *fixed wing*. *Quadcopter* memiliki bentuk yang ringkas sehingga dapat terbang di tempat yang sempit dan kecil. Pesawat *fixed wing* sering digunakan untuk pemetaan area yang luas karena strukturnya yang aerodinamis sehingga dapat terbang lebih lama daripada *quadcopter*.

Namun penggunaan kedua wahana tersebut kurang cocok untuk keperluan pemantauan dan eksplorasi. *Quadcopter* memiliki jangka terbang dan jarak tempuh yang pendek karena menggunakan perputaran rotor sebagai gaya angkatnya sehingga boros dalam penggunaan daya. Pesawat *fixed wing* jangka terbang dan jarak tempuh yang panjang, namun mempunyai kecepatan terbang yang tinggi. Selain itu, pesawat

fixed wing membutuhkan landasan pacu untuk lepas landas dan mendarat. Pesawat *fixed wing* juga memerlukan angin yang berlawanan arah agar pesawat dapat terangkat sehingga menjadikan pesawat ini harus tetap bergerak untuk dapat terbang.

Salah satu pilihan UAV alternatif untuk keperluan pemantauan dan eksplorasi adalah balon udara. Balon udara sangat cocok digunakan untuk aplikasi eksplorasi dalam kecepatan dan ketinggian yang rendah [1]. Gaya angkat balon udara menggunakan gas helium, sehingga balon udara dapat terbang lebih lama dan dengan jarak yang jauh. Balon udara juga tidak memerlukan landasan pacu untuk dapat terbang. Oleh karena itu pada tugas akhir ini merancang dan merealisasikan sistem navigasi balon udara menggunakan GPS (*Global Positioning System*) dan kompas sehingga balon udara dapat melakukan navigasi secara otomatis menuju *waypoint*. Dengan sistem navigasi otomatis, balon udara dapat melakukan monitoring dan eksplorasi tanpa bantuan operator.

Harapan dari teknologi ini adalah balon udara dapat bergerak dengan sistem navigasi berbasis *waypoint* secara otomatis untuk keperluan pemantauan dan eksplorasi.

II. DASAR TEORI

A. Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*)

IMU adalah singkatan dari *Inertial Measurement Unit*, adalah sebuah sensor yang digunakan untuk mengukur sudut *roll*, sudut *pitch* dan sudut *yaw*. Ketiga sudut ini menentukan orientasi dari sebuah pesawat udara pada saat terbang relatif terhadap bumi. Dalam mengukur sudut orientasi pesawat udara, IMU memerlukan tiga sensor pendukung yaitu *gyroscope*, *accelerometer*, *magnetometer*. Sensor IMU adalah sensor gabungan yang terdiri dari sensor *gyro* 3 sumbu, sensor *accelerometer* 3 sumbu, sensor *magnetometer* 3 sumbu.



Gambar 1. Komponen sensor IMU

B. Akselerometer

Akselerometer adalah sensor yang digunakan untuk mengukur percepatan suatu objek. Akselerometer dapat mengukur percepatan dinamis dan statis [2]. Pengukuran

percepatan dinamis adalah pengukuran percepatan pada objek yang bergerak, sedangkan pengukuran percepatan statis adalah pengukuran percepatan gravitasi bumi. Akselerometer dapat digunakan untuk mengukur sudut kemiringan (*tilt*).

Data yang diperoleh modul sensor akselerometer adalah data mentah percepatan gravitasi yang direpresentasikan dalam *signed integer* 16 bit. Pada perancangan tugas akhir ini, skala penuh yang dipilih adalah 8g artinya data mentah sejumlah 65536 mewakili kecepatan sudut mulai 0g hingga 8g. Sensitifitas modul sensor saat skala penuh ini adalah 4 mg/digit.

C. Magnetometer

Magnetometer pada sensor IMU dapat mendeteksi medan magnet bumi sehingga dapat dijadikan acuan pada kompas digital. Sensor kompas digital dan sensor magnetometer pada hakikatnya memiliki prinsip kerja yang sama. Sensor kompas digital merupakan modul sensor magnetometer dengan keluaran berupa sudut yang menyatakan arah hadap. Sedangkan sensor magnetometer keluarannya berupa besar medan magnet bumi yang diukur dalam tiga sumbu yang dapat digunakan untuk menentukan sudut arah hadap dengan rumusan tertentu [3].

Data yang diperoleh modul sensor magnetometer adalah data mentah gaya medan magnet bumi yang direpresentasikan dalam *signed integer* 16 bit. Di perancangan, skala penuh yang dipilih adalah 8,1 gauss artinya data mentah sejumlah 65536 mewakili gaya medan magnet bumi mulai 0 gauss hingga 8,1 gauss.

D. Giroskop

Giroskop digunakan untuk mengukur orientasi berdasarkan prinsip momentum sudut. *Giroskop* mengukur kecepatan sudut kerangka acuan inersia. Sudut orientasi berupa gerak *roll*, *pitch*, dan *yaw* didapatkan dengan mengintegrasikan kecepatan sudut. Sehingga hasil *giroskop* adalah percepatan sudut.

Giroskop berbeda dengan akselerometer dan kompas. Akselerometer mengukur gerakan linear acuan gravitasi. Akselerometer dapat memberikan pengukuran sudut kemiringan (*tilt*) akurat ketika suatu sistem dalam keadaan diam (statis). Saat sistem berotasi atau bergerak, akselerometer tidak dapat mengikuti pergerakan yang cepat dikarenakan responnya lambat dan memiliki *noise*, sehingga tidak dapat digunakan untuk pengukuran sudut orientasi dalam kendaraan udara.

Sedangkan kompas mengukur gerakan linear dengan acuan medan magnet bumi. Kompas dapat mengukur gerak *yaw* atau arah mata angin namun tidak dapat mengukur gerak *roll* dan *pitch*.

Keluaran *giroskop* berupa data kecepatan sudut. Kecepatan sudut adalah besaran vektor yang menyatakan frekuensi sudut suatu benda terhadap sumbu putarnya. Satuan untuk kecepatan sudut adalah radian per detik.

E. Algoritma Madgwick AHRS

Madgwick AHRS adalah metode untuk proses orientasi dari sensor IMU dengan menggunakan algoritma *gradient descent* untuk mengestimasi nilai orientasi dari ketiga sumbu yang ada pada *giroskop*, akselerometer dan magnetometer. Dimana diketahui bahwa *giroskop* dan magnetometer pada IMU mempunyai nilai *drift*. *Drift* adalah pergeseran nilai derajat dari sumbu awal. Pada metode ini sudut-sudut *euler* diubah menjadi *Kuaternion* [4].

Konsep dasar dari *Magwick AHRS* adalah mencari antara relative *frame* atau yang biasa disebut perpindahan *frame*. Contoh dapat dilihat pada gambar di atas *frame A* relative terhadap *frame B*. Dimana nilai perpindahan *frame A* ke *frame B* dapat direpresentasikan dalam bentuk *kuaternion* seperti persamaan 1.

$${}^A_B \hat{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3] = \left[\cos \frac{\theta}{2} - r_x \sin \frac{\theta}{2} \ -ry \sin \frac{\theta}{2} \ -rz \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$${}^A_B \hat{q} * = {}^B_A \hat{q} = [q_0 \ -q_1 \ -q_2 \ -q_3] \quad (2)$$

Bahwa untuk mencari nilai matrik yang baru, kedua matrik tersebut dikalikan dengan aturan *cross product* dimana dengan menggunakan aturan *Hamilton*. Seperti persamaan 3.

$$a \otimes b = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3] \otimes [b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3] = \begin{bmatrix} a_0 b_0 & -a_1 b_1 & -a_2 b_2 & -a_3 b_3 \\ a_0 b_1 & +a_1 b_0 & +a_2 b_3 & -a_3 b_2 \\ a_0 b_2 & -a_1 b_3 & +a_2 b_0 & +a_3 b_1 \\ a_0 b_3 & +a_1 b_2 & -a_2 b_1 & +a_3 b_0 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

Pada gambar 2 dijelaskan alur dari metode *madgwick*. Untuk mengetahui representasi pergeseran *frame* berdasarkan sumbu garis normal gravitasi bumi menggunakan persamaan *gradient decent*. Dimana alogaritma *gradient decent* mempunyai fungsi seperti persamaan (4). Dengan demikian apabila di-*cross product* ketiga *quaternion* tersebut akan menghasilkan matrik baru (8).

$$f({}^S_E \hat{q}, E_{\hat{a}}, S_{\hat{s}}) = {}^S_E \hat{q} * \otimes E_{\hat{a}} \otimes {}^S_E \hat{q} - S_{\hat{s}} \quad (4)$$

$${}^S_E \hat{q} = [q_1 \ -q_2 \ -q_3 \ -q_4] \quad (5)$$

$$E_{\hat{a}} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (6)$$

$$S_{\hat{a}} = [0axayaz] \quad (7)$$

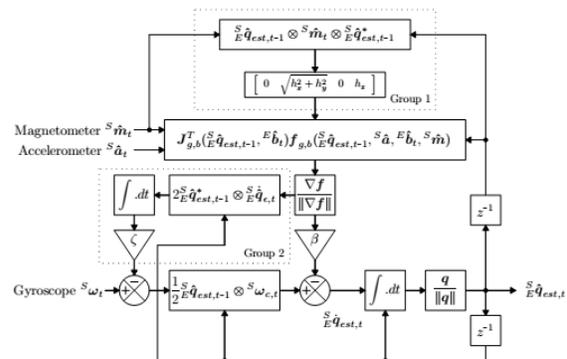
$$f_g({}^S_E \hat{q}, S_{\hat{a}}) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - ax \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_4) - ay \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - az \end{bmatrix} \quad (8)$$

Setelah proses untuk mencari nilai *f*, kemudian dicari hasil dari matrik *jacobi* sesuai dengan persamaan (9).

$$J_g({}^S_E \hat{q}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Kemudian setelah kedua matrik *f* dan *J* telah didapatkan hasil. Untuk mencari nilai dari matrik *gradient decent* adalah sesuai dengan persamaan (10).

$$\nabla f = j^T \times f \quad (10)$$



Gambar 2. Blok Diagram Madgwick AHRS

Untuk mencari nilai estimasi dari *kuaternion*, *kuaternion* pada *giroskop* dikurangkan dengan hasil *kuaternion* pada proses algoritma *gradient decent* yang sudah dibagi dengan

nilai normalisasi dan dikalikan dengan nilai pembobotan (beta), sesuai dengan persamaan (11).

$$\hat{S}_{E\dot{q}_{est}, t} = \hat{S}_{E\dot{q}\omega, t} - \beta \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (11)$$

Untuk mencari nilai β atau pembobotan dapat menggunakan persamaan (12).

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \hat{q} \otimes [0 \ \bar{\omega}_{max} \ \bar{\omega}_{max} \ \bar{\omega}_{max}] \right\| \sqrt{\frac{3}{4}} \bar{\omega}_{max} \quad (12)$$

F. Kuarternion

Dalam matematika, *Kuarternion* merupakan perluasan dari bilangan-bilangan kompleks yang tidak komutatif, dan diterapkan dalam mekanika tiga dimensi. *Kuarternion* ditemukan oleh ahli matematika dan astronomi Inggris, William Rowan Hamilton, yang menurunkan aritmatika kompleks ke *kuarternion* [5].

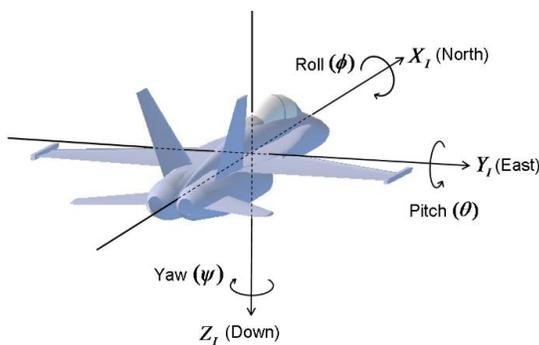
Sebagai himpunan, *kuarternion* berlambang **H** (dinotasikan sesuai orang yang menemukannya *Hamilton*), sama dengan \mathbf{R}^4 yang merupakan ruang vektor bilangan riil empat dimensi. **H** memiliki tiga macam operasi: penambahan, perkalian skalar dan perkalian *kuarternion*. Elemen-elemen *kuarternion* ditandakan sebagai *1, i, j* dan *k* (*i, j* dan *k* adalah komponen *imaginer*), dan dapat ditulis sebagai kombinasi linear, $a + bi + cj + dk$ (*a, b, c,* dan *d* adalah bilangan riil).

G. Sudut Euler

Sudut *Euler* merepresentasikan orientasi tiga dimensi dari suatu objek menggunakan kombinasi tiga rotasi sumbu yang berbeda. Informasi orientasi menggunakan sudut *Euler* lebih sederhana daripada *kuarternion*. Rotasi sudut *Euler* pada sumbu *x, y,* dan *z* dilambangkan dengan nama *roll* (Φ), *pitch* (θ), dan *yaw* (ψ).

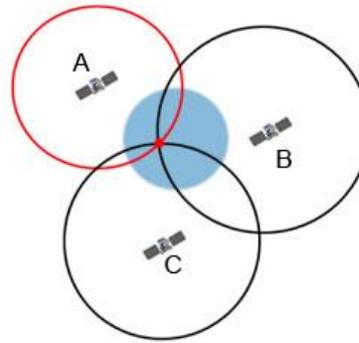
Keluaran dari Algoritma *Magwick AHRS* adalah berupa sudut *Euler*. Algoritma tersebut memproses data mentah sensor IMU dalam representasi *kuarternion*. Berikut ini adalah persamaan untuk mengkonversi satuan *kuarternion* menjadi sudut *Euler* [6]:

$$\begin{bmatrix} \Phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ \arcsin(2(q_0q_1 - q_2q_3)) \\ \text{atan2}(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{bmatrix} \quad (13)$$



Gambar 3. Rotasi sudut Euler

H. Sensor GNSS (Global Navigation Satellite System)



Gambar 4. Metode trilaterasi

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) merupakan suatu metode pengoperasian satelit yang terdiri dari gabungan beberapa sistem satelit navigasi seperti GPS (Amerika), GLONASS (Rusia), *Galileo* (Uni-Eropa), dan *Beidou* (Cina). GNSS disediakan untuk kepentingan sipil maupun militer di seluruh dunia. GNSS menyediakan informasi posisi, ketinggian, kecepatan, dan waktu dari *receiver*, sehingga memungkinkan pengguna untuk mengetahui lokasi tepat dimanapun di permukaan bumi.

Pada sistem navigasi satelit GPS, hanya satelit-satelit GPS saja yang dapat menyediakan informasi mengenai posisi, ketinggian, kecepatan, dan waktu dari *receiver*. Sedangkan pada GNSS, ia akan menggabungkan sistem navigasi satelit yang ada (misalnya GPS dan GLONASS) sehingga sinyal satelit yang diterima oleh suatu *receiver* semakin banyak. Semakin banyak sinyal satelit yang ditangkap oleh *receiver*, semakin banyak pula data yang didapat, sehingga mempengaruhi tingkat ketelitian informasi yang dibutuhkan.

Informasi posisi didapatkan sensor GNSS dengan metode trilaterasi. Metode trilaterasi akan menghitung jarak objek ke setiap satelit (minimal 3 satelit). Dari penghitungan jarak tersebut akan didapatkan posisi dari objek berupa koordinat *latitude* dan *longitude*.

I. Logika Fuzzy

Logika fuzzy adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah, yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, *embedded system*, jaringan PC, *multi-channel* atau *workstation* berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya [7].

J. Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan *fuzzy* diperlukan untuk proses *inferensi* atau penalaran. Dalam hal ini yang dioperasikan adalah derajat keanggotaannya. Derajat keanggotaan sebagai hasil dari operasi dua buah himpunan *fuzzy* disebut sebagai *fire strength* atau α -predikat.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy*, yaitu variabel *fuzzy*, himpunan, dan semesta pembicaraan. Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy* [8] [9].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Blok Diagram Sistem

Pada sistem navigasi yang dirancang (Gambar 5), sensor GNSS dan kompas digunakan untuk mengetahui posisi balon dan arah hadap balon terhadap *waypoint*. Informasi tersebut kemudian dimasukkan pada mikrokontroler (Arduino Mega) sehingga data dapat diproses pada kontrol logika *fuzzy* untuk menggerakkan motor balon. Motor tersebut akan mengarahkan balon ke koordinat *waypoint*. Pada sistem ini, *waypoint* dapat diinputkan dari antarmuka *user* dengan *mikrokontroler* menggunakan komunikasi serial.

B. Kalibrasi Magnetometer

Ketika mengakuisisi data magnetometer untuk dikonversi menjadi *heading*, perlu diketahui jenis kesalahan yang mempengaruhi pembacaan sensor.

Heading dapat ditentukan melalui penggunaan magnetometer dan akselerometer tiga sumbu yang tersedia di sensor IMU. Namun sistem kompas harus diterapkan dengan benar dan dapat mengkompensasi pengaruh elevasi dan kemiringan sudut.

Tanpa kalibrasi, data magnetometer akan terdistorsi sehingga pembacaan menjadi tidak tepat. Untuk melakukan kalibrasi dilakukan penghitungan *offset* yaitu dengan persamaan:

$$\alpha = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{y_{max} + y_{min}}{2} \quad (15)$$

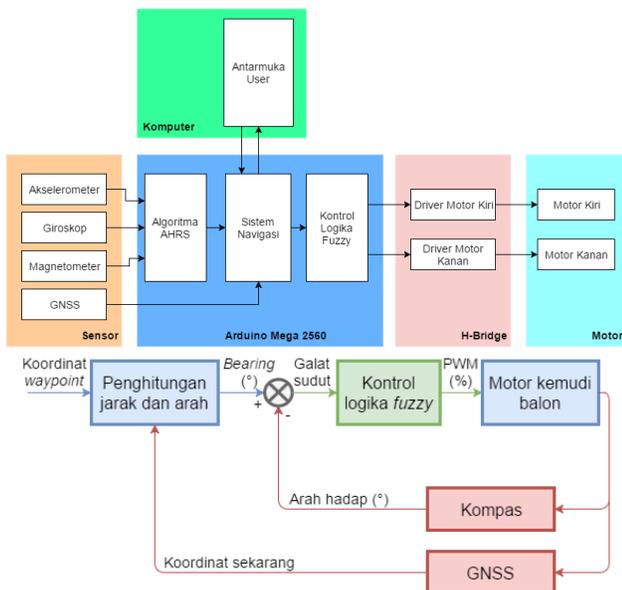
$$\gamma = \frac{z_{max} + z_{min}}{2} \quad (16)$$

Hasil dari persamaan di atas adalah besar *offset* pada sumbu x, y, dan z. Kemudian pembacaan setiap sumbu magnetometer dikurangkan dengan hasil tersebut.

$$Mx = Mx - \alpha \quad (17)$$

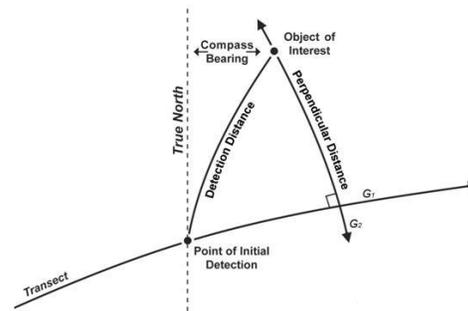
$$My = My - \beta \quad (18)$$

$$Mz = Mz - \gamma \quad (19)$$



Gambar 5. Blok Diagram Sistem yang Dirancang

C. Metode Pengukuran Geodistance



Gambar 6. Jarak pada permukaan bola

Geodesic Distance adalah jarak antara dua titik koordinat pada permukaan bumi. Gambar di atas merupakan ilustrasi dari pengukuran jarak pada permukaan bola. Permukaan bumi tidak planar/datar melainkan berbentuk bola, sehingga pengukuran jarak antara dua titik koordinat tidak dapat dilakukan dengan metode planar. Untuk mengukur jarak pada permukaan elips bumi digunakan persamaan *Haversine*. Persamaan tersebut menghitung jarak terpendek antara dua titik koordinat pada permukaan bumi. Persamaan *Haversine* dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (20)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (21)$$

$$d = R \cdot c \quad (22)$$

Dimana :

ϕ = *Latitude* dalam radian

λ = *Longitude* dalam radian

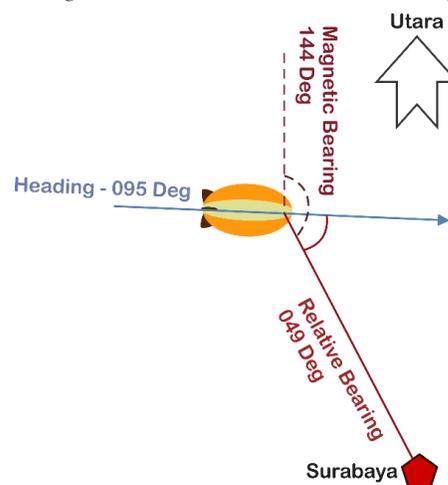
c = *Jarak angular*

R = *Jari-jari bumi* (6371 km)

d = *Jarak pada permukaan bumi*

D. Metode Pengukuran Geobearing

Secara umum, *relative bearing* adalah sudut antara arah hadap objek (*heading*) dengan target. Sedangkan *magnetic bearing* adalah sudut antara arah utara dengan target.



Gambar 7. Geodetic Bearing

Persamaan dibawah ini adalah persamaan yang diperlukan untuk menghitung *magnetic bearing* jika ditarik garis lurus dari posisi awal menuju target sepanjang busur bumi:

$$\theta = \text{atan2}(\sin \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_2, \cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda) \quad (23)$$

Dimana :

- φ = Latitude dalam radian
- λ = Longitude dalam radian
- θ = Bearing

E. Sistem Navigasi

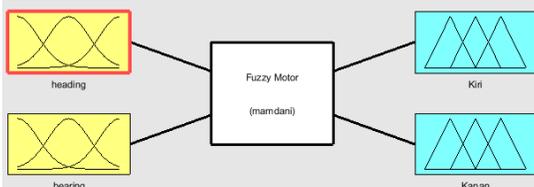
Langkah awal yang dilakukan oleh sistem adalah inialisasi sensor. Sensor yang digunakan adalah sensor GNSS dan sensor kompas. Kemudian setelah itu dilakukan inialisasi motor. Ada 2 motor yang digunakan sebagai motor kemudi yang berada di samping balon. Setelah inialisasi sensor dan motor, dilakukan pengambilan data *waypoint* yang dilakukan oleh *user* pada antarmuka. Data *waypoint* disimpan pada memori, kemudian balon udara tetap *standby* sampai tombol *start* ditekan.

Ketika tombol *start* ditekan, maka balon udara akan melakukan perhitungan *geodistance* (jarak posisi sekarang dan posisi target) dan *geobearing* (sudut antara posisi sekarang dan posisi target relatif terhadap arah utara). *Geobearing* akan dibandingkan dengan *heading* (sudut arah hadap balon udara relatif terhadap arah utara) yang terdeteksi dari sensor kompas. Balon udara akan mengetahui berapa galat sudut *heading* terhadap *geobearing*. Nilai galat tersebut dimasukkan pada kontrol logika *fuzzy*. Kemudian balon udara akan mengaktifkan motor kemudi yang kecepatannya diatur dari keluaran kontrol logika *fuzzy* untuk bergerak ke arah tujuan berdasarkan galat sudut *heading* terhadap *geobearing*. Pergerakan tadi akan mempertahankan nilai galat *heading* terhadap *geobearing* bernilai nol sehingga *track* yang akan dilalui oleh balon terarah menuju ke *waypoint*. Hal tersebut akan dilakukan berulang selama *geodistance* kurang dari nilai toleransi jarak tujuan yang ditentukan oleh *user*.

Jika nilai *geodistance* lebih dari nilai toleransi jarak tujuan, balon udara akan berhenti karena posisi yang terdeteksi oleh balon udara dianggap sudah mencapai area *waypoint*. Proses navigasi oleh balon udara dinyatakan selesai.

F. Logika Fuzzy

Perhitungan kecepatan motor dilakukan dengan menggunakan bantuan logika *fuzzy* untuk mempermudah proses penentuan. Pada sistem yang dirancang digunakan sebuah *Fuzzy Interference System* (FIS), yaitu FIS untuk kontrol motor samping. Untuk FIS motor samping dirancang *fuzzy 2 input 2 output*. Input FIS berupa derajat sudut arah dari *heading* dan *bearing*, sedangkan keluaran berupa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk motor kanan dan kiri.



Gambar 8. Sistem *fuzzy* untuk motor samping

IV. HASIL DAN ANALISA

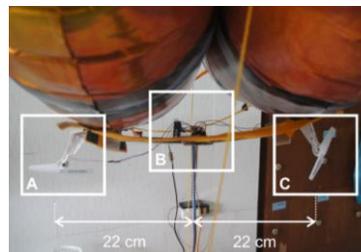
A. Realisasi Desain Balon Udara

Pada tugas akhir ini digunakan dua balon udara *air swimmer* yang diisi dengan helium dengan ukuran panjang 110 cm, lebar 60 cm, dan tinggi 60 cm.. Volume dari balon udara ini adalah 0,1274 m³. Dua balon udara *air swimmer* mempunyai volume untuk diisi helium sebesar 0,2548 m³. Sehingga balon udara *air swimmer* dengan volume 0.2548 m³ dapat mengangkat beban sekitar 240 gram jika diisi penuh gas helium.

Setelah dilakukan pengujian, Beban maksimal balon udara adalah 233 gram dan titik tengah gravitasi balon pada jarak 30 cm dari depan balon, 24 cm dari kanan balon, dan 36 cm dari kiri balon.



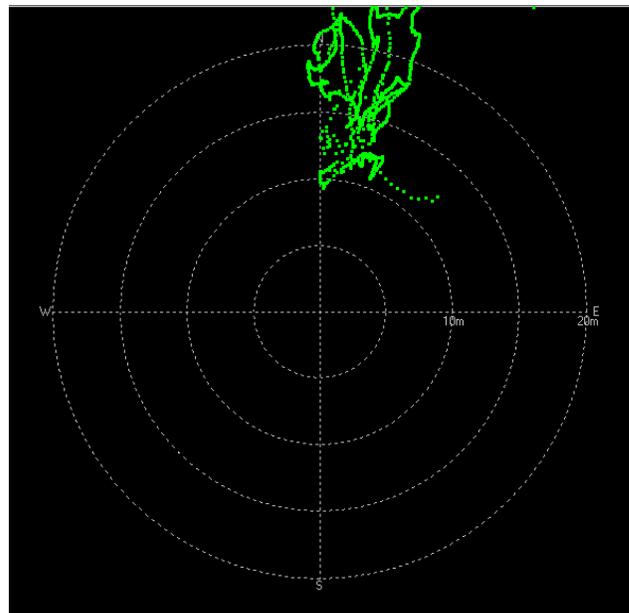
Gambar 9. Keseimbangan Balon



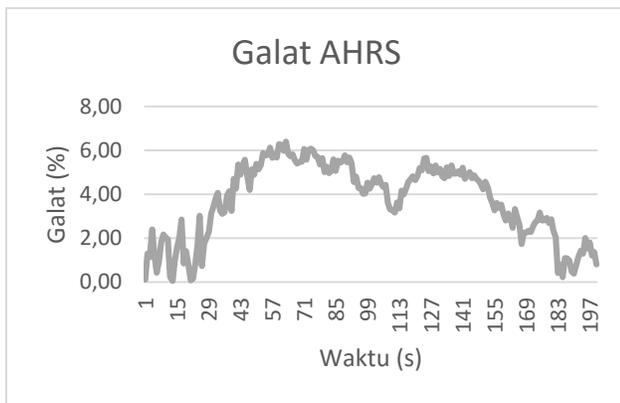
Keterangan:
 A = Motor Samping Kanan
 B = Kotak Sensor
 C = Motor Samping Kiri

Gambar 10. Posisi sensor dan motor

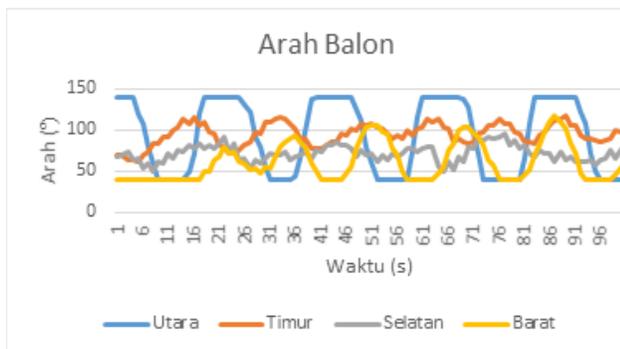
B. Pengujian GNSS



Gambar 11. Deviasi sensor GNSS



Gambar 12. Galat AHRS



Gambar 13. Grafik Arah Balon

Gambar 11 menunjukkan hasil pengujian pengukuran posisi sensor GNSS. Hasil yang didapatkan menunjukkan posisi yang terdeteksi rata-rata berada pada rentang 9,5-20 meter dari posisi sebenarnya. Hal ini normal karena sensor GNSS yang digunakan memiliki spesifikasi akurasi 10-25 meter.

C. Pengujian AHRS

Gambar 12 menunjukkan bahwa kompensasi kemiringan menggunakan filter *kuaternion* berbasis AHRS menghasilkan error pembacaan derajat arah yang relatif kecil. Error tertinggi adalah 6,41%.

D. Pengujian Sistem Navigasi

Pada gambar 13 terlihat bahwa respon sistem masih berosilasi untuk mempertahankan arah Utara dan Barat. Simpangan osilasi arah Utara berkisar antara 50-90 derajat. Sedangkan simpangan osilasi arah barat sebesar 20-50 derajat. Namun untuk arah Timur dan Selatan, sistem tidak menghasilkan galat yang terlalu besar.

V. KESIMPULAN

Telah dibuat dan dirancang sistem navigasi pada balon udara menggunakan GPS dan kontrol logika *fuzzy*. GPS digunakan untuk mendeteksi posisi didukung dengan kompas untuk mendeteksi arah hadap. Kontrol logika *fuzzy* digunakan pada sistem pengaturan motor kemudi untuk pergerakan balon. Berdasarkan pengujian beban yang telah dilakukan didapatkan titik tengah gravitasi balon pada jarak 40 cm dari depan balon, 24 cm dari kanan balon, dan 36 cm dari kiri balon. Berat maksimum yang dapat diangkat oleh balon adalah

233 gram. Akuisisi data sensor IMU untuk mengetahui derajat arah hadap menggunakan algoritma AHRS dapat menghasilkan kesalahan pengukuran kurang dari 7%. Pengukuran posisi objek menggunakan sensor GNSS menghasilkan posisi berada pada rentang 9,5-20 meter dari posisi sebenarnya. Penggunaan logika *fuzzy* dapat diterapkan pada sistem kontrol motor kemudi untuk pergerakan balon dengan *variable* yang digunakan berupa galat derajat arah hadap balon udara terhadap derajat *bearing*. Terjadi osilasi untuk mempertahankan arah Utara dengan simpangan berkisar antara 50-90 derajat dan arah Barat dengan simpangan sebesar 20-50 derajat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Rao, Z. Gong, J. Luo and S. Xie, "A flight control and navigation system of a small size unmanned airship," in *IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*, Canada, 2005.
- [2] P. Chaklos, "RC Blimp, Remote Control Airship, Inflatables," Above & Beyond Inc, 15 Januari 2010. [Online]. Available: <http://www.advertisingballoons.com/remote-control-blimps.htm>. [Accessed 15 Juni 2016].
- [3] W. Storr, "Hall Effect Sensor and How Magnets Make It Works," Electronics-tutorials.ws, 14 April 2016. [Online]. Available: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>. [Accessed 15 Juni 2016].
- [4] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," in *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Zurich, 2011.
- [5] W. R. Hamilton, *Elements of Quaternions*, Longmans: Green & Company, 1866.
- [6] L. Brits, "Conversion between quaternions and Euler angles," Wikimedia Foundation, Inc, 11 November 2007. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Conversion_between_quaternions_and_Euler_angles. [Accessed 15 Juni 2016].
- [7] F. Dai, W. Gao, N. Kushida and L. Shang, "Fuzzy control for the autonomous airship," in *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011.
- [8] S. Kusumadewi, *Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2003.
- [9] T. Sutojo, E. Mulyanto and V. Suhartono, *Kecerdasan Buatan*, Yogyakarta: Andi Offset, 2011.