

PENGENDALIAN POSISI AZIMUT ANTENA TRACKER BERBASIS GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) DENGAN KENDALI PD FUZZY

Satya Hadi Suroso

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : satyasuroso@mhs.unesa.ac.id

Puput Wanarti Rusimanto

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : puputwanarti@unesa.ac.id

Abstrak

Antena *tracker* merupakan alat yang berguna untuk melacak keberadaan sumber sinyal. Jenis antena untuk *tracking* pada umumnya ialah antena direksional yang hanya memancarkan gelombang elektromagnetik secara maksimal ke arah tertentu. Jika antena direksional tidak diarahkan, maka kehilangan data akan terjadi dan hal ini merupakan kerugian bagi sistem. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe dan mengetahui hasil pengujian sistem pengendalian posisi azimut antena *tracker* berbasis GPS dengan kendali PD Fuzzy. Skema pengendalian menggunakan *Multi Input-Single Output* (MISO) dengan dua variabel masukan adalah *error* sudut azimut dan turunan *error*. Sedangkan keluaran kendali adalah nilai PWM. Mesin inferensi Fuzzy yang digunakan adalah metode mamdani. Posisi sudut azimut dihitung menggunakan rumus haversine dari data koordinat posisi GPS pada *transmitter* dengan data koordinat *receiver*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengendalian posisi azimut antena *tracker* berbasis GPS dengan kendali PD Fuzzy berhasil dibuat. *plant* dapat bergerak mengikuti titik koordinat yang dikirim oleh *transmitter*. Dengan mengimplementasikan kendali PD Fuzzy pada *plant* dapat memperbaiki respon gerak *plant* dengan hasil analisis respon dinamik $E_{ss} = 0$, simpangan maksimum = 1,1 %, $t_d = 0,215$ detik, $t_p = 0,56$ detik, $t_s (2\%) = 0,5$ detik, $t_s (5\%) = 0,46$ detik, dan $t_r = 0,531$ detik.

Kata Kunci: Azimut, Antena Tracker, GPS, Kendali PD Fuzzy

Abstract

Antenna tracker is a useful device for tracking the presence of a signal source. The type of antenna for tracking in general is a directional antenna that only transmits maximum electromagnetic waves in a particular direction. If the directional antenna is not directed, the data loss will occur and this is a loss to the system. The purpose of this research is create and know the test result of azimuth positioning control of antenna tracker based on GPS using PD Fuzzy controller. The controller scheme used Multi Input-Single Output (MISO) with two input variables was azimuth angle error and derivative error. While the output control is PWM value. Mamdani method used in Fuzzy inference machine. Azimuth angle position was calculated using haversine formula of the GPS position coordinate data on the transmitter with the receiver coordinate data. The result showed that azimuth positioning control of antenna tracker based on GPS using PD Fuzzy controller was successfully established. Plant can move along the coordinate point transmitted by the transmitter. By implementing PD Fuzzy control on the plant can improve the plant response with dynamic response analysis $E_{ss} = 0$, maximum overshoot = 1,1 %, $t_d = 0,215$ s, $t_p = 0,56$ s, $t_s (2\%) = 0,5$ s, $t_s (5\%) = 0,46$ s, and $t_r = 0,531$ s.

Keywords: Azimuth, Antena Tracker, GPS, PD Fuzzy controller

PENDAHULUAN

Jenis antena pada sistem *Radio Control* yang umum digunakan adalah antena direksional yang hanya memancarkan gelombang elektromagnetik secara maksimal ke arah tertentu. Antena jenis ini mempunyai penguatan (*gain*) yang lebih besar dibanding antena omnidireksional sehingga dapat menangkap sinyal yang dikirimkan *transmitter* dengan jarak yang lebih jauh. Karena jarak yang ditempuh *transmitter* mungkin saja sangat jauh hingga tak terlihat, maka kita akan bingung untuk memposisikan arah antena. Jika antena direksional tidak diarahkan, maka kehilangan data akan terjadi dan hal ini merupakan kerugian bagi sistem.

Antena *Tracker* merupakan alat yang berguna untuk melacak keberadaan sumber sinyal. Alat ini memiliki kemampuan untuk mengikuti pergerakan sumber sinyal yang dilacak. Antena *tracker* seperti yang dikemukakan Banna (Banna, 2017) sejauh ini bekerja berdasarkan dengan dua cara, yang pertama berdasarkan data titik koordinat yang dihasilkan oleh *Global Positioning System* (GPS) atau berdasarkan kekuatan daya sinyal yang diterima.

Menurut Reznik (Reznik, 1997) Kendali PD Fuzzy merupakan pengembangan kendali Fuzzy untuk menyerupai kendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID). kendali PD Fuzzy terdapat dua variabel masukan yaitu *error* dan *delta error*. *Error* merupakan selisih antara nilai

masukan dengan nilai aktual, sedangkan delta *error* merupakan turunan differensial pertama dari *error*.

Penelitian mengenai antena *tracker* telah dilakukan oleh Omar adil (Adil, 2014). Kendali yang diimplementasikan pada antena *tracker* untuk mengatur gerak horizontal atau sudut azimut menggunakan kendali PID, Fuzzy, dan PID-Fuzzy. Penelitian dilakukan secara simulasi dengan model matematika antena *tracker* yang telah diketahui. Nilai parameter fisik ditentukan oleh peneliti. Nugraha dan Sumiharto (Nugraha dan Sumiharto, 2015) juga meneliti mengenai antena *tracker*. Peneliti menerapkan kendali PID pada antena *tracker* untuk mengatur gerak horizontal atau sudut azimut dan gerak vertikal atau sudut elevasi antena. Kendali PID menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols diimplementasikan pada alat, aktuator berupa motor servo dan juga menggunakan GPS pada *transmitter*-nya

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe dan mengetahui hasil pengujian sistem pengendalian posisi azimut antena *tracker* berbasis GPS dengan kendali PD Fuzzy. Skema pengendalian menggunakan *Multi Input-Single Output* (MISO) dengan dua variabel masukan adalah *error* sudut azimut dan turunan *error*. Sedangkan keluaran kendali adalah nilai PWM. Mesin inferensi Fuzzy yang digunakan adalah metode mamdani.

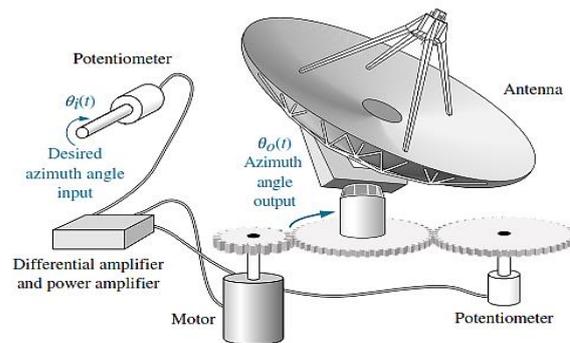
KAJIAN PUSTAKA

Pemodelan Dinamik Antena Tracker

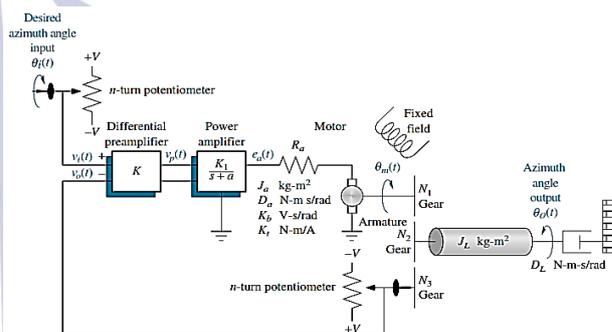
Kendali dasar dari sistem antena *tracker* ialah sistem kendali posisi dengan cara kerja mengkonversikan perintah posisi masukan menjadi respon posisi keluaran. Diharapkan posisi keluaran mendekati perintah posisi masukan. Sistem pengendalian posisi azimut antena *tracker* didekripsikan seperti cara kerja servomekanisme yang menggunakan roda gigi dan umpan balik dari potensiometer (Nise, 2011). *layout* sistem ditunjukkan pada Gambar 1 dan skema kendali posisi azimut antena *tracker* ditunjukkan Gambar 2.

Perintah masukan ialah berupa perpindahan angular. Kemudian potensiometer mengkonversi perpindahan angular menjadi tegangan. Perpindahan angular keluaran juga dikonversikan menjadi tegangan pada jalur umpan balik. kemudian terdapat penguat daya sinyal dan penguat diferensial sinyal untuk memperkuat selisih tegangan antara tegangan masukan dan keluaran. Tegangan sinyal tersebut diperkuat agar dapat menggerakkan motor penggerak (Nise, 2011).

Pada skema yang ditunjukkan Gambar 2, sistem terbagi atas 5 subsistem untuk memperoleh pemodelan dinamik secara keseluruhan yang dihitung dalam domain laplace (*s*) (Xuan *dkk*, 2009).



Gambar 1. *Layout* sistem kendali posisi azimut antena *tracker*
(Sumber : Nise, 2011)



Gambar 2. Skema kendali posisi azimut antena *tracker*
(Sumber : Nise, 2011)

1. Subsistem 1 dan 5

Masukan dan umpan balik potensiometer memiliki fungsi alih yang berhubungan dalam bentuk penguatan. Potensiometer mengubah sudut masukan $\theta_i(s)$ menjadi tegangan $V_i(s)$. Rasio potensiometer dideskripsikan oleh K_{pot} menggunakan Persamaan (1).

$$\frac{V_i(s)}{\theta_i(s)} = K_{pot} = \frac{V}{\pi} \tag{1}$$

Keterangan :

- $V_i(s)$ = Tegangan masukan potensiometer (V)
- $\theta_i(s)$ = Sudut masukan (radian)
- K_{pot} = Rasio penguatan potensiometer (V)
- V = Tegangan potesiometer (V)
- n = putaran potensiometer (radian)
- π = konstanta phi (3,14)

2. Subsistem 2

Menggunakan penguatan awal untuk mendapatkan tegangan sinyal masukan dan tegangan keluaran supaya dapat digunakan untuk masukan penguatan daya. penguatan awal adalah dimana tegangan masukan dikuatkan oleh *gain* *K* yang ditunjukkan Persamaan (2).

$$\frac{V_p(s)}{V_e(s)} = K \quad (2)$$

Keterangan :

- $V_p(s)$ = Tegangan keluaran penguatan (V)
- $V_e(s)$ = Tegangan masukan sinyal kesalahan (V)
- K = Rasio penguatan penguat awal (V)

3. Subsistem 3

Penguat daya mengambil tegangan keluaran dari penguat awal dan mengubahnya ke dalam tegangan yang dapat menggerakkan motor. Jenis dari penguat daya diberikan pada desain skematik dan pada blok diagram.

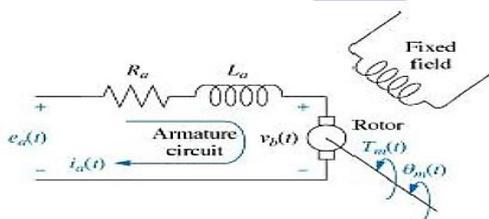
$$\frac{E_a(s)}{V_p(s)} = \frac{K_1}{s+a} \quad (3)$$

Keterangan :

- $E_a(s)$ = Tegangan masukan motor (V)
- $V_p(s)$ = Tegangan penguat awal (V)
- K_1 = Rasio penguatan penguat daya (V)
- s = konstanta laplace
- a = pole penguat daya (V)

4. Subsistem 4

Setelah penguat daya selanjutnya adalah motor, roda gigi, dan beban yaitu antena. Diasumsikan bahwa motor adalah sebuah armatur motor servo DC terkendali. Untuk menurunkan fungsi alih dari subsistem pertama harus menemukan persamaan KVL yang berhubungan dengan tegangan masukan ke motor dan posisi dari armatur. Gambar 3 menunjukkan rangkaian umum dari motor.



Gambar 3. Rangkaian motor secara umum
(Sumber : Xuan *dkk*, 2009)

Persamaan KVL yang dihasilkan ditunjukkan pada persamaan (4).

$$R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + V_b(s) = E_a(s) \quad (4)$$

Keterangan :

- R_a = Resistansi motor (ohm)
- $I_a(s)$ = Arus (A)
- L_a = Induktansi motor (H)
- $V_b(s)$ = Back EMF (Vs/rad)

Yang diketahui dari persamaan adalah tegangan masukan bukan arus masukan, dengan demikian berguna jika mengganti teori arus I_a dengan teori torsi yang setara seperti Persamaan (5).

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \therefore I_a(s) = \frac{T_m(s)}{K_t} \quad (5)$$

Keterangan :

- $T_m(s)$ = Torsi motor (Nm/A)
- K_t = Torsi motor (Nm/A)

Teori torsi ini dapat diganti menggunakan teori yang berhubungan dengan torsi terhadap kecepatan motor, posisi, inersia, dan redaman. Salah satunya dapat mengganti teori back EMF V_b dengan teori yang menghubungkan back EMF dengan turunan kecepatan, yaitu posisi. Teori ini akan mendapatkan fungsi alih yang ditunjukkan Persamaan (6) dan (7).

$$V_b(s) = K_b s \theta_m(s) \quad (6)$$

$$T_m(s) = (J s^2 + D_m s) \theta_m(s) \quad (7)$$

Keterangan :

- $K_b(s)$ = back EMF (Vs/rad)
- $\theta_m(s)$ = sudut keluaran motor (radian)
- J = Inersia total (Kgm²)
- D_m = Redaman total (Nms/rad)

Kemudian mengganti variabel-variabel yang sesuai ke dalam Persamaan (4), sehingga menghasilkan Persamaan (8).

$$\frac{(J s^2 + D_m s)(R_a + L_a s) \theta_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (8)$$

Diasumsikan rangkaian ini merupakan medan motor tetap, yang membuat K_b dan K_t sama. Kedua nilai diberikan untuk tiga konfigurasi yaitu 1, dengan menarik $\theta_m(s)$ menjadi Persamaan (9).

$$\left[\frac{(J s^2 + D_m s)(R_a + L_a s) + K_b K_t s}{K_t} \right] \theta_m(s) = E_a(s) \quad (9)$$

Asumsikan bahwa $R_a > L_a$ dapat disederhanakan seperti pada Persamaan (10).

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{J R_a}}{s \left(s + \frac{D_m R_a + K_b K_t}{J R_a} \right)} \quad (10)$$

Komponen redaman dan inersia sistem yang terhubung ke motor melalui roda gigi. Hal ini mengubah nilai efektif seperti yang terlihat pada motor

dan diekspresikan ke dalam bentuk matematika pada Persamaan (12) dan Persamaan (13). Komponen redaman dan inersia dari antena diatur oleh rasio roda gigi pada Persamaan (11).

$$K_g = \frac{N_1}{N_2} \tag{11}$$

$$J = J_a + J_L(K_g)^2 \tag{12}$$

$$D_m = D_a + D_L(K_g)^2 \tag{13}$$

Keterangan :

K_g = Rasio roda gigi

N_1 = jumlah roda gigi

N_2 = jumlah roda gigi

J_a = Inersia motor (Kgm²)

J_L = Inersia beban (Kgm²)

D_a = Redaman motor (Nms/rad)

D_L = Redaman beban (Nms/rad)

Persamaan (10) merupakan bentuk fungsi alih yang sama pada motor dan beban. demikian dapat dihubungkan variabel K_m dan a_m .

$$K_m = \frac{K_t}{JR_a} \tag{14}$$

$$a_m = \frac{D_m R_a + K_b K_t}{JR_a} \tag{15}$$

Kendali PD Fuzzy

Untuk merancang pengendali Fuzzy seperti kendali P, PD, PI atau PID, maka kita harus memilih keadaan proses dan variabel keluaran proses. Menentukan pula isi dari aturan anteseden dan aturan konsekuen. Variabel keadaan proses mewakili isi aturan anteseden antara lain :

1. Sinyal kesalahan atau *error*, dilambangkan **e**.
2. Perubahan *error*, dilambangkan dengan **Δe**.
3. Jumlah kesalahan atau integral *error*, dilambangkan **Σe**.

Variabel keluaran kendali mewakili isi aturan konsekuen antara lain :

1. Perubahan keluaran kendali, dilambangkan **Δu**.
2. Keluaran kendali, dilambangkan **u**.

Jika dianalogikan dengan kendali konvensional variabel tersebut menjadi persamaan :

$$e(t) = y_{sp} - y(t) \tag{16}$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1) \tag{17}$$

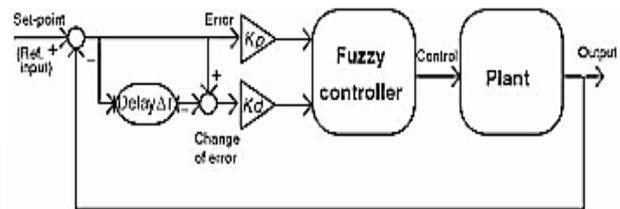
$$\Delta u(t) = u(t) - u(t - 1) \tag{18}$$

Pada persamaan diatas, y_{sp} menyatakan nilai keluaran yang diinginkan atau masukan, y adalah nilai variable

keluaran proses. k menunjukkan waktu saat ini. Persamaan untuk kendali PD adalah

$$u(k) = K_p \times e(t) + K_D \times \Delta e(t) \tag{19}$$

Dimana K_p dan K_D dimana merupakan konstanta proporsional dan konstanta diferensial. Pada kendali PD untuk setiap pasangan nilai *error* (e) dan perubahan *error* (Δe) menghitung sinyal kontrol (u). Diagram blok kendali PD Fuzzy ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok dari sistem kendali PD Fuzzy (Sumber : Reznik, 1997)

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif sebab penelitian ini membuktikan teori yang telah dikemukakan sebelumnya. penelitian ini banyak menggunakan angka-angka mulai dari pengumpulan data, penafsiran, sampai pada hasil atau penarikan kesimpulannya. Penelitian ini banyak menampilkan dan memaknai angka-angka disertai dengan gambar, tabel, grafik, atau tampilan lainnya. (Machali, 2016 : 17).

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler Arduino MEGA 2560 dengan Arduino IDE sebagai *software* pemrogramannya. Matlab 2015a digunakan untuk menjalankan simulasi kendali PD Fuzzy yang akan diterapkan pada *plant*.

Rancangan Penelitian

Urutan rancangan penelitian ditunjukkan pada Gambar 5.

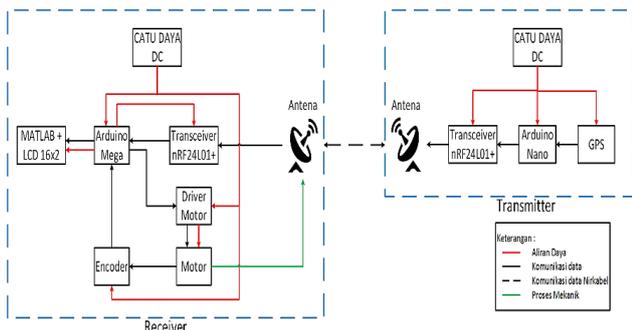


Gambar 5. Tahapan rancangan penelitian (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

Rancang Bangun Hardware

1. Desain Sistem

Desain sistem pengendalian posisi azimut antena tracker berbasis GPS menggunakan kendali PD Fuzzy ditunjukkan pada Gambar 6.

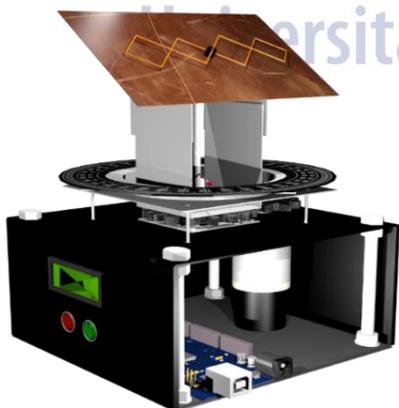


Gambar 6. Bagan desain sistem pengendalian posisi azimut antena tracker berbasis GPS (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

Pada blok receiver perangkat kerasnya terdiri dari catu daya DC, Arduino Mega, modul transceiver nRF24L01+, LCD 16 x 2, Driver Motor, Motor DC, Encoder, dan Antena. Terdapat MATLAB sebagai pengolahan data dan LCD 16 x 2 sebagai penampil data. Pada blok transmitter perangkat kerasnya terdiri dari catu daya DC, Arduino Nano, modul transceiver nRF24L01+, GPS, dan Antena.

2. Rancangan Plant Antena Tracker

Plant antena tracker terdiri dari kotak sebagai tempat hardware receiver yang berukuran Panjang 23 cm, lebar 23 cm dan tinggi 10 cm. di bagian atas sisi kotak terdapat gambar busur 360° sebagai pengukuran posisi sudut secara langsung. Di bagian paling atas terdapat reflektor antena yang terbuat dari bahan plat tembaga. Rancangan plant antena tracker seperti pada Gambar 7.

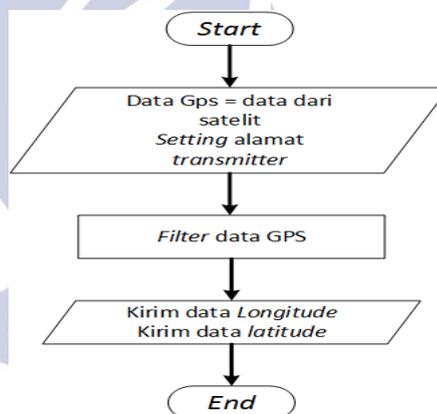


Gambar 7. Rancangan antena tracker (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

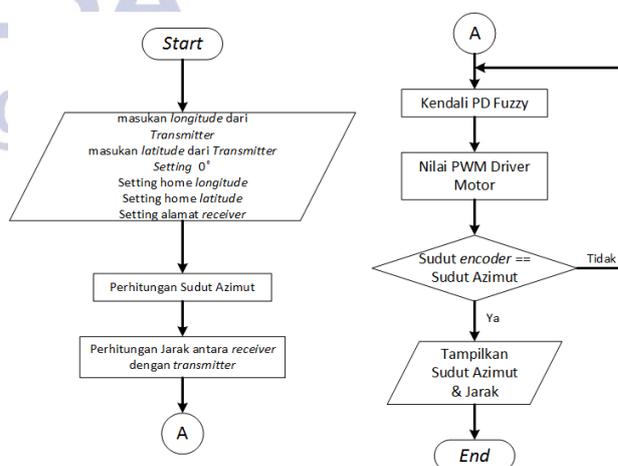
Rancang Bangun Software

Pada bagian transmitter, GPS akan menerima data mentah dari satelit referensi yang terhubung. Kemudian data GPS yang diterima diolah oleh controller untuk diambil data longitude dan latitude. Data longitude dan latitude selanjutnya akan dikirim melalui modul telemetri yang telah diberi alamat supaya tidak salah kirim. Algoritma transmitter ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada bagian receiver, Sudut 0° merupakan arah utara bumi, jadi plant harus dihadapkan ke arah utara dengan melihat kompas. Data yang telah diolah oleh transmitter akan dikalkulasi oleh mikrokontroler receiver untuk dirubah ke sudut azimut yang merupakan masukan bagi sistem. Algoritma controller PD Fuzzy yang terdapat dalam mikrokontroler akan menghasilkan sinyal PWM bagi driver motor DC. Jika sudut azimut yang dihasilkan tidak sesuai dengan pembacaan sudut dari encoder, maka nilai tersebut akan menjadi sinyal yang akan kembali diproses oleh kendali PD Fuzzy hingga nilai errornya mendekati 0. Jalannya program ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 9.



Gambar 8. Diagram alir rancangan software transmitter (Sumber : dokumen pribadi, 2018)



Gambar 9. Diagram alir rancangan software receiver (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dan analisis meliputi ; 1) Rancangan rangkaian *hardware*, 2) perhitungan Sudut Azimut dan Jarak, 3) Pengujian dan analisis *plant* tanpa kendali, dan 4) Pengujian dan analisis *plant* dengan kendali PD Fuzzy.

Rancangan Rangkaian Hardware

1. Blok Transmitter

Pengujian dilakukan untuk mengetahui seberapa cepat modul *GPS* U-Blox Neo 6M dalam mengunci koordinat posisi dan akurasi koordinat posisi. Pengujian penerimaan data *GPS* dilakukan di dalam ruangan dan luar ruangan dalam tempat yang berbeda dalam area kampus UNESA ketintang. Hasil pengujian waktu penerimaan di dalam ruangan ditunjukkan Tabel 1, sedangkan pengujian di luar ruangan pada Tabel 2. Hasil perbandingan data *latitude* dan *longitude* untuk masing-masing pengujian di dalam dan di luar ruangan ditunjukkan Tabel 3 dan 4.

Berdasarkan Tabel 3 dan 4, *GPS* tidak dapat menerima data koordinat posisi secara akurat jika dibandingkan titik koordinat posisi referensi menggunakan *Google Maps*. kemampuan *GPS* dalam menentukan koordinat posisi *transmitter* dari data satelit lebih baik bila dilakukan di luar ruangan. selisih rata-rata kesalahan jarak *GPS* di dalam ruangan sebesar $\pm 12,85$ meter dan untuk luar ruangan sebesar ± 10 meter.

Tabel 1. Hasil pengujian waktu penerimaan data *GPS* di dalam ruangan.

No.	Lokasi Pengujian	Waktu Penerimaan (s)	Jumlah Satelit
1	Lab. Fisika Teknik	-	-
2	Lorong selatan Gedung A8 Lt. 3	-	-
3	Lorong selatan Gedung A8 Lt. 4	10,6	5-6
4	Lab. Mikrokontroller	29,5	5-9

Tabel 2. Hasil pengujian waktu penerimaan data *GPS* di luar ruangan.

No.	Lokasi Pengujian	Waktu Penerimaan (s)	Jumlah Satelit
1	Gedung A8 Lt. 5 (rooftop)	17,2	6-11
2	Gerbang belakang Unesa Ketintang	12,8	6-8
3	Halaman depan Gedung FT (E1)	25,1	6-10
4	Danau Unesa Ketintang	6	6-11

Tabel 3. Hasil perbandingan data *latitude* dan *longitude* dari *GPS* dan *Google Maps* yang dilakukan di dalam ruangan.

Lokasi ke-	<i>Latitude</i> GPS	<i>Longitude</i> GPS	<i>Latitude</i> Google Maps	<i>Longitude</i> Google Maps
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	-7,317702	112,726448	-7,317506	112,726486
4	-7,317528	112,726486	-7,317483	112,726431

Keterangan :

- Lokasi 1. Lab. Fisika Teknik
- Lokasi 2. Lorong selatan gedung A8 Lt. 3
- Lokasi 3. Lorong selatan gedung A8 Lt. 4
- Lokasi 4. Lab. Mikrokontroller

Tabel 4. Hasil perbandingan data *latitude* dan *longitude* dari *GPS* dan *Google Maps* yang dilakukan di luar ruangan.

Lokasi ke-	<i>Latitude</i> GPS	<i>Longitude</i> GPS	<i>Latitude</i> Google Maps	<i>Longitude</i> Google Maps
1	-7,317305	112,726341	-7,317289	112,726423
2	-7,317183	112,725402	-7,317222	112,725351
3	-7,315838	112,726806	-7,315872	112,726913
4	-7,314180	112,726341	-7,314090	112,72605

Keterangan :

- Lokasi 1. Gedung A8 Lt.5 (rooftop)
- Lokasi 2. Gerbang belakang Unesa Ketintang
- Lokasi 3. Depan halaman Gedung Fakultas Teknik (E1)
- Lokasi 4. Danau Unesa Ketintang

2. Blok Receiver

Pengujian pada blok *receiver* membutuhkan blok *transmitter* sebagai pengirim data. Dalam uji pengiriman data, peneliti mencatat jarak terjauh antara *transmitter* dan *receiver* selama data dapat diterima oleh *receiver*. Data yang dikirim merupakan data koordinat posisi dan satelit dengan nilai yang tetap sesuai format data yang akan diambil pada uji *tracking*. Uji pengiriman data menggunakan modul radio nRF 24L01+ yang dilakukan di dalam ruangan dan luar ruangan. Jarak terjauh disesuaikan dengan batas ruangan. Hasil pengujian jarak di dalam ruangan dan di luar ruangan ditunjukkan Tabel 5 dan 6.

Berdasarkan hasil pengujian pengiriman data pada Tabel 5 dan Tabel 6, baik di dalam dan di luar ruangan sistem komunikasi dapat berjalan dengan baik. Pada pengujian yang berada di dalam ruangan *receiver* mampu menerima data dari *transmitter* meski terdapat banyak dinding yang menghalangi dengan jarak terjauh sepanjang $\pm 73,22$ meter. Pada pengujian

di luar ruangan jarak terjauh yang ada sepanjang ±395 meter.

Tabel 5. Hasil pengujian pengiriman data di dalam ruangan.

No.	Lokasi Pengujian	Jarak Terjauh (m)
1	Lorong selatan gedung A8 Lt. 3	57,25
2	Lorong selatan gedung A8 Lt. 3 hingga tepi lorong barat	73,22
3	Lorong selatan gedung A8 Lt. 4 hingga tepi lorong barat	61,33

Tabel 6. Hasil pengujian pengiriman data di luar ruangan.

No.	Lokasi Pengujian	Jarak Terjauh (m)
1	Gerbang Unesa belakang hingga Danau Unesa Ketintang	394,75
2	Gerbang Unesa belakang hingga Gedung A8	134,22
3	Danau Unesa Ketintang	111,13

Perhitungan Sudut Azimut dan Jarak

Untuk mengetahui hasil perhitungan rumus manual, perlu diketahui koordinat posisi antena tracker dengan mengamati lingkungan sekitar kemudian menyesuaikan letak pada Google maps. setelah menentukan titik koordinat posisi, akan diketahui latitude dan longitude posisi antena tracker. Data yang dikirim transmitter akan diolah receiver dengan menggunakan algoritma rumus haversine seperti perhitungan yang dilakukan Veness (Veness, 2002). Didapatkan nilai sudut azimut sebagai nilai masukan. Kemudian dilakukan perhitungan selisih absolut error menggunakan rumus pada persamaan (20) dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7.

$$\text{Absolut error} = |\text{Output real} - \text{Output Simulasi}| \quad (20)$$

Tabel 7. Selisih error sudut azimut dan jarak

Sudut Azimut		Absolut error	Jarak		Absolut error
Ardui no	rumus		Ardui no	Jarak	
105	104,2	0,8	3	3,1	0,1
246	252	6	2	2,9	0,9
90	90,7	0,7	19	19	0
5	2,1	2,9	14	14,8	0,8
353	351	2	17	17,6	0,66
Rata-rata error		2,48	Rata-rata error		0,492

Hasil menunjukkan bahwa perhitungan dari algoritma rumus Haversine yang diterapkan ke Arduino memiliki selisih absolut error sudut rata-rata sebesar 2,48 derajat dengan hasil perhitungan rumus haversine secara manual. Sedangkan selisih absolut error jarak rata-rata

sebesar 0,492. Dapat dikatakan selisih absolut error sudut yang dihasilkan masih bisa ditoleransi karena antena direksional yang digunakan masih dapat mengikuti gerak transmitter pada uji antena tracker. Jenis mikrokontroler mempengaruhi hasil perhitungan sudut azimut dan jarak.

Pengujian dan Analisis Plant Tanpa Kendali

1. Pemodelan Dinamik Plant

Identifikasi plant digunakan untuk mencari fungsi alih sehingga dapat diketahui respon dari plant tanpa menjalankan alatnya. Identifikasi plant menggunakan pemodelan dinamik dengan mencari nilai dari parameter fisik plant. Parameter fisik diketahui berdasarkan datasheet motor DC yang digunakan dan pengukuran komponen lain. Didapatkan parameter fisik yang ditunjukkan Tabel 8.

Tabel 8. Parameter fisik plant

Parameter	Simbol	Nilai
Resistansi motor (Ω)	R_a	1,9
Inersia motor (kgm ²)	J_a	$5,7 \cdot 10^{-7}$
Redaman motor (Nms/rad)	D_a	0,00955
Back EMF (Vs/rad)	K_b	0,01337
Torsi Motor (Nm/A)	K_t	1,005
Roda Gigi penggerak	N_1	1/64
Roda Gigi digerakkan	N_2	19/48
Inersia beban (kgm ²)	J_L	0,00075
Redaman beban (Nms/rad)	D_L	0,00955

Berdasarkan Tabel 8, dapat dicari parameter fisik lain seperti rasio roda gigi (K_g), inersia total (J), redaman total (D_m). Dicari juga koefisien fungsi alih untuk motor dan beban yaitu a_m dan K_m yang ditunjukkan persamaan (21) hingga (25).

Pada motor DC yang dipakai terdapat gearbox dengan rasio roda gigi 1/64. sedangkan poros motor terpasang roda gigi yang terhubung dengan roda gigi beban dengan rasio 19/48. Maka rumus yang digunakan untuk mencari rasio roda gigi total ditunjukkan persamaan (21).

$$K_g = N_1 \cdot N_2 = 0,0062 \quad (21)$$

$$J = J_a + J_L(K_g)^2 = 6 \cdot 10^{-7} \quad (22)$$

$$D_m = D_a + D_L(K_g)^2 = 0,00955 \quad (23)$$

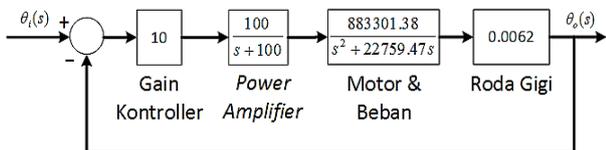
$$K_m = \frac{K_t}{JR_a} = 883301,38 \quad (24)$$

$$a_m = \frac{D_m R_a + K_b K_a}{JR_a} = 27759,47 \quad (25)$$

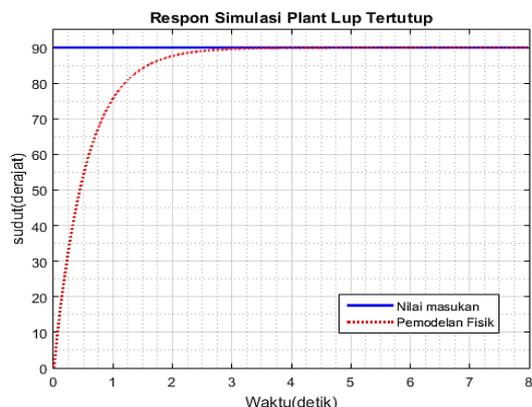
Selanjutnya mensubstitusikan nilai yang telah diketahui kedalam Persamaan (26)

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{JR_a}}{s(s + \frac{D_m R_a + K_b K_t}{JR_a})} = \frac{883301,38}{s^2 + 27759,47 s} \quad (26)$$

Dari Persamaan (26), kemudian dikalikan dengan perbandingan roda gigi yang ada pada *plant* dan *gain* controller. Pemodelan fisik disimulasikan secara lup tertutup menggunakan *software* SIMULINK/MATLAB untuk melihat respon fungsi alih. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat. Diagram blok sistem lup tertutup ditunjukkan Gambar 10. dan hasil respon simulasi *plant* lup tertutup ditunjukkan Gambar 11.



Gambar 10. Diagram blok fungsi alih *plant* lup tertutup (Sumber : dokumen pribadi, 2018)



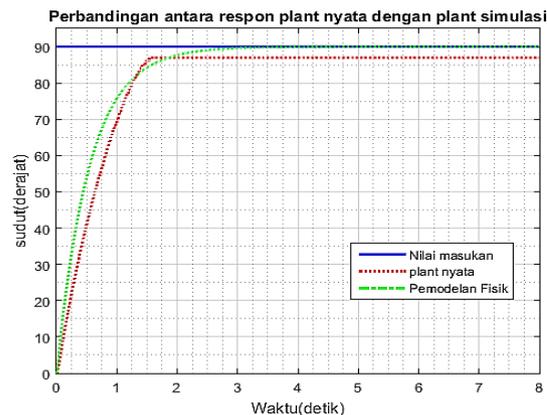
Gambar 11. Respon simulasi *plant* lup tertutup (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

2. Plant Nyata Tanpa Kendali

Pengujian *plant* nyata tanpa kendali dilakukan untuk melihat respon *plant* antena *tracker* untuk mencapai nilai masukan yang diinginkan tanpa menggunakan transmisi data dengan radio. Catu daya untuk motor menggunakan tegangan 12 V. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat. Pengujian dilakukan secara lup tertutup. Perbandingan antara respon *plant* nyata dengan *plant* simulasi ditunjukkan Gambar 12. Hasil respon dinamik dan selisih *error* ditunjukkan Tabel 9.

Berdasarkan Tabel 9. diketahui bahwa *plant* nyata tanpa kendali tidak dapat mengikuti nilai masukan yang diinginkan dan memiliki nilai E_{ss} sebesar 3 derajat. Sedangkan *plant* simulasi tanpa kendali dapat mengikuti nilai masukan. Hasil pemodelan fisik dapat mendekati *plant* nyata dengan selisih nilai absolut *error* sebesar 3,55. Perbedaan hasil simulasi dan *plant* nyata dapat disebabkan nilai parameter fisik yang tidak diketahui dan diabaikan. Rumus yang dikemukakan sebelumnya juga tidak

sepenuhnya sesuai dengan bentuk *plant* saat ini karena bentuknya yang berbeda.



Gambar 12. Grafik perbandingan antara respon *plant* nyata dan respon simulasi (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

Tabel 9. Respon dinamik dan selisih *error* antara sistem nyata dan simulasi

Parameter	Plant nyata	Simulasi	satuan
M_p (simpangan maksimum)	-	-	%
E_{ss} (<i>error steady state</i>)	3	0	derajat
t_p (waktu simpangan maksimum)	-	-	detik
t_s (waktu tunak) 2 %	1,43	2,148	detik
t_s (waktu tunak) 5 %	1,32	1,641	detik
t_r (waktu naik)	1,1	1.198	detik
t_d (waktu tunda)	0,53	0.38	detik
Absolut <i>error</i>		3,55	-

Pengujian dan Analisis Plant dengan Kendali PD Fuzzy

Mendesain kendali PD Fuzzy tidak diperlukan model matematika dari *plant*. Semesta pembicaraan dari nilai masukan dan keluaran serta karakteristik *plant* sangat penting untuk diketahui. Nilai K_P dan K_D bernilai 1. Semesta pembicaraan untuk variabel masukan PD Fuzzy *error* dan delta *error* merupakan besar *error* sudut dari sudut awal ke sudut masukan yang diberikan. Sehingga rentang nilai semesta pembicaraan nilai masukan dimulai dari -180° hingga 180° . Pada penelitian ini himpunan Fuzzy pada setiap variabel masukan *error* dan delta *error* dibatasi hanya 5 yaitu NB (*Negative Big*), NS (*Negatif Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*). Dengan bentuk fungsi keanggotaan kurva segitiga dan trapesium.

Semesta pembicaraan untuk variabel keluaran PD Fuzzy merupakan nilai PWM yang dapat dikeluarkan oleh Arduino yaitu 0 hingga 255. sehingga nilai semesta pembicaraan nilai keluaran dimulai dari -382 hingga 382.

Pada penelitian ini himpunan PD Fuzzy untuk variabel keluaran dan bentuk fungsi keanggotaan sama dengan variabel masukan.

Basis aturan dasar yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan aturan *IF-THEN* dengan metode implikasi “MIN” dan jumlah aturan yang dihasilkan sesuai dengan jumlah himpunan Fuzzy yang digunakan pada setiap variabel. Kemudian hasil dari setiap aturan PD Fuzzy digregasikan menggunakan metode “MAX”. Basis aturan PD Fuzzy yang direncanakan ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Basis aturan PD Fuzzy dasar.

de	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

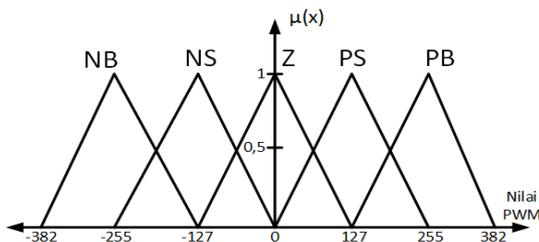
Metode defuzzifikasi yang digunakan ialah *center of gravity*, yaitu menghitung nilai keluaran sama seperti menghitung pusat area dari suatu kurva tertutup yang seperti persamaan (27). Semesta pembicaraan untuk nilai keluaran Fuzzy dilebihi karena dengan metode defuzzifikasi *center of gravity*, nilai keluaran tidak akan kurang dari -255 dan tidak lebih 255. bentuk fungsi keanggotaan keluaran ditunjukkan Gambar 16.

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (27)$$

Keterangan :

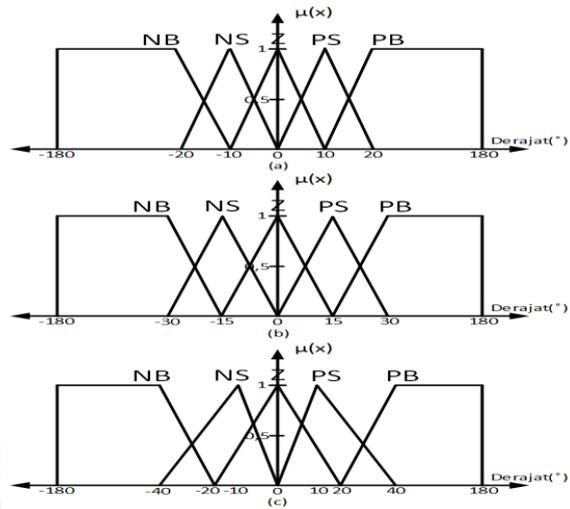
- a* = batas bawah nilai himpunan Fuzzy
- b* = batas atas nilai himpunan Fuzzy
- $\mu_A(x)$ = nilai derajat keanggotaan Fuzzy
- x* = nilai himpunan Fuzzy

Pada pengujian ini, bentuk fungsi keanggotaan pada setiap variabel masukan *error* dan *delta error* dirancang menjadi tiga model berbeda dengan basis aturan yang sama dan bentuk fungsi keanggotaan keluaran yang sama.

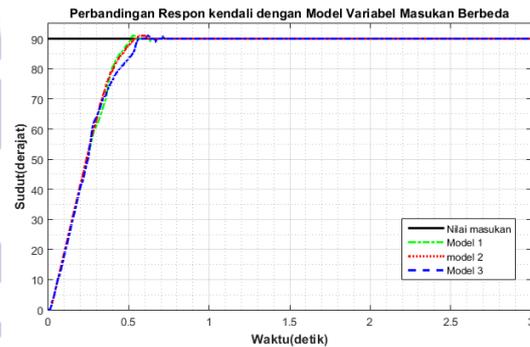


Gambar 16. Bentuk dasar fungsi keanggotaan variabel keluaran (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

Bentuk dari tiga model fungsi keanggotaan variabel masukan *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 17. Untuk basis aturan PD Fuzzy dasar yang digunakan seperti Tabel 11. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat. Grafik respon dinamik dari pengujian ditunjukkan Gambar 18 sedangkan analisis respon dinamik ditunjukkan Tabel 11.



Gambar 17. 3 model fungsi keanggotaan variabel masukan *error* dan *delta error* (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (Sumber : dokumen pribadi, 2018)



Gambar 18. Perbandingan respon *plant* dengan berbagai model variabel masukan (Sumber : dokumen pribadi, 2018)

Tabel 11. Respon dinamik *plant*

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3	Satuan
M_p (Simpangan Maksimum)	1,1	1,1	1,1	%
E_{ss} (Error Steady State)	0	0	0	derajat
t_p (waktu M_p)	0,517	0,56	0,595	detik
t_s (waktu tunak) 2%	0,458	0,5	0,538	detik
t_s (waktu tunak) 5%	0,424	0,46	0,498	detik
t_r (waktu naik)	0,488	0,531	0,568	detik
t_d (waktu tunda)	0,216	0,215	0,218	detik

Berdasarkan hasil analisis respon dinamik pengujian dapat diketahui semua model mengikuti nilai masukan dan memiliki nilai simpangan maksimum yang sangat kecil 1,1%. Model pertama memiliki respon dinamik yang paling cepat dari semua model namun memiliki osilasi yang lebih banyak dari model kedua. Sedangkan model ketiga memiliki respon dinamik yang paling lama dan memiliki osilasi lebih banyak dari semua model. Model kedua memiliki respon yang sedikit lebih cepat dari model ketiga dan hanya memiliki satu simpangan maksimum dari semua model. Model kedua merupakan model terbaik dibanding model yang lain karena memiliki keseluruhan respon dinamik yang cepat, osilasi yang sedikit, dan dapat mengikuti nilai masukan. Respon dinamik perbandingan antara *plant* dengan kendali PD Fuzzy dan tanpa kendali ditunjukkan Tabel 12.

Tabel 12. Respon dinamik *plant* dengan kendali PD Fuzzy dan tanpa kendali

Parameter	PD Fuzzy	Tanpa Kendali	Satuan
M_p (Simpangan Maksimum)	1,1	-	%
E_{ss} (Error Steady State)	0	3	derajat
t_p (waktu M_p)	0,56	-	detik
t_s (waktu tunak) 2%	0,5	1,43	detik
t_s (waktu tunak) 5%	0,46	1,32	detik
t_r (waktu naik)	0,531	1,1	detik
t_d (waktu tunda)	0,215	0,53	detik

PENUTUP

Simpulan

Prototipe antena *tracker* dengan pengendali PD Fuzzy berhasil dibuat dan bekerja dengan baik. Alat yang dibuat terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. *Transmitter* sebagai sumber sinyal yang berfungsi untuk mengirimkan koordinat dari GPS, sedangkan *receiver* yaitu antena *tracker* menjejak posisi *transmitter*.

Dari hasil Implementasi kendali PD Fuzzy pada *plant*. *Plant* dapat mengikuti posisi *transmitter* secara. Desain kendali PD Fuzzy yang terbaik mengacu pada Tabel 12 menghasilkan respon dinamik $M_p = 1,1 \%$, $E_{ss} = 0$ derajat, $t_p = 0,56$ detik, $t_s (2\%) = 0,5$ detik, $t_s (5\%) = 0,46$ detik, $t_r = 0,531$ detik, dan $t_d = 0,215$ detik.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran untuk pengembangan sistem pengendalian posisi azimuth antena *tracker*. Untuk menentukan arah utara dapat ditambahkan sensor *compass* agar tidak mengarahkan secara manual. *Plant* juga dapat ditambah pengendalian posisi elevasi. Untuk menggunakan kendali

PD Fuzzy, peneliti menyarankan untuk menggunakan mikrokontroller yang memiliki spesifikasi *clock* yang lebih tinggi dari Arduino MEGA 2560 karena untuk mengimplementasikan algoritma PD Fuzzy membutuhkan banyak perhitungan sehingga proses eksekusi program lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

Adil, Omar. 2014. "Combining PID & Fuzzy Controllers for Antenna Azimuth Position Control". *Journal of Cihan University College of Engineering*. Vol 21(1) : pp.97-108.

Banna, Muhammad Hanif Al. 2017. "Pengembangan Antena Tracker berbasis Global Positioning System (GPS) untuk Komunikasi Pesawat Tanpa Awak". Tugas Akhir tidak diterbitkan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Machali, Imam. 2016. "Metode Penelitian Kuantitatif". Yogyakarta : MPI Fakultas Ilmu Tarbiyah dan keguruan UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Nugraha, Mahendra B, dan Sumiharto, Raden. 2015. "Penerapan Sistem Kendali PID pada Antena Pendeteksi Koordinat Posisi UAV". *IJEIS*. Vol.5 (2) : pp. 187 – 198.

Nise, Norman S. 2011. "Control System Engineering. Sixth Edition". USA: John Wiley & Sons, Inc

Reznik, Leonid, 1997. "Fuzzy Controller". Oxford : Newnes

Tim Penyusun Buku Pedoman Penulisan Skripsi. 2014. "Pedoman Penulisan SKRIPSI". Surabaya : Universitas Negeri Surabaya

Xuan, Liu, dkk. 2009. "Project, Antenna Azimuth Position Control Analysis and Control System and Controller Implementation".(Online),(www.academia.edu/11404065/Antena_Azimuth_Position_Control_System_Analysis_and_Controller_Implementation_Approvals, diunduh 10 Januari 2018).

Veness, Chris. 2002. "Calculate distance, bearing and more between latitude/longitude points".(Online), (<https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>, diakses pada 8 maret 2018).