RANCANG BANGUN KENDALI KETINGGIAN BALON ATMOSFER BERBASIS MULTIWII

Agus Mulyana[1)], Ginaldi Ari Nugroho[2)] Agit Zulharman[3)]

[1,3)]Jurusan Sistem Komputer, Fakultas Teknik dan Ilmu komputer, Universitas Komputer Indonesia

[2)]Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

[1)]bagus081@gmail.com, [2)]ginaldi.lapan@gmail.com, [3)]agitzulharman@yahoo.com

ABSTRAK

Balon atmosfer untuk keperluan pengamatan cuaca dan penelitian atmosfer sudah lama berkembang di Indonesia. Namun, kekurangan dari balon atmosfer yaitu sulit dikendalikan pergerakannya. Jika pergerakan vertikal balon dapat dikurangi, maka balon dapat diatur di ketinggian tertentu. Kendali ketinggian balon atmosfer ini menggunakan metode pengontrolan udara pada sebuah pemberat (*ballast*) berupa balon totex. Pengontrolan dilakukan dengan mengisi udara ke dalam kantung pemberat menggunakan motor *dual head pump* dan mengeluarkan udara secara alami dengan memanfaatkan tekanan udara di dalam balon pemberat yang di kendalikan dengan katup yang terintegrasi dengan motor servo sebagai aktuatornya. Bila daya angkat balon atmosfer yang diisi gas hidrogen mendekati nilai 0 maka balon melayang pada ketinggian tertentu di atas permukaan tanah. Proses aktivasi kendali pada *payload* dilakukan secara nirkabel melalui media transmisi sinyal radio pada frekuensi 433 MHz menggunakan modul radio 3DR V2. Penggabungan seluruh komponen dengan metode tersebut menghasilkan sistem kendali yang mampu melawan daya angkat balon atmosfer, namun masih belum stabil untuk melayang pada ketinggian yang diinginkan. Sehingga masih perlu dikembangkan sebuah metode yang mampu mengeluarkan dan memasukkan udara dari balon pemberat dengan kuat tanpa membocorkan udara yang sebelumnya sudah berada di dalam balon pemberat.

***Kata kunci**: Multiwii, Ballast, Payload, Kendali Ketinggian Balon, Dual Head Pump*.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kekurangan dari balon atmosfer yaitu sulit untuk dikendalikan pergerakannya, baik gerak horizontal maupun vertikal. Jika pergerakan vertikal balon dapat dikurangi, maka balon dapat diatur di ketinggian tertentu. Sehingga sangat berguna bagi pengukuran profil vertikal atmosfer maupun dalam penelitian aeronautik seperti UAV, *Radiosonde* dan sebagainya.

Penelitian yang dilakukan oleh beberapa institusi luar negeri telah berhasil mengembangkan pengamatan atmosfer dengan menggunakan balon pada ketinggian tertentu. Beberapa sistem yang dikembangkan oleh institusi luar negeri di antaranya *zero-pressure hellium ballon, superpressure hellium ballon, infrared montgolfiere* dan lain-lain. Pada intinya sistem tersebut membuat suatu sistem penyeimbang antara gerak angkat dari gas helium/hidrogen balon dengan sistem pemberat (*ballast*), sehingga dihasilkan sebuah balon yang dapat diatur pada ketinggian tertentu.

Penelitian ini berguna untuk membantu peneliti di bidang pengamatan atmosfer dan antariksa. Alat ini juga diharapkan mampu mengurangi biaya penelitian di bidang pengamatan atmosfer. Karena pada umumnya pengamatan atmosfer menghabiskan satu balon atmosfer dan seperangkat muatan (*payload*) sensor untuk sekali pengamatan. Sedangkan bilamana menggunakan alat yang akan dirancang ini, diharapkan balon mampu diturunkan kembali ke daratan atau dibiarkan mengambang di atmosfer. Sehingga balon atmosfer dan muatan (*payload*) sensor dapat digunakan kembali untuk pengamatan berikutnya.

1.2 Tujuan

Tujuan dari membuatan karya cipta ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sebuah sistem yang mampu mengendalikan pergerakan vertikal balon atmosfer di udara.

2. Mengembangkan sistem kendali ketinggian balon atmosfer menggunakan algoritma kendali untuk aplikasi pengamatan dan penelitian profil atmosfer.

2. DASAR TEORI

2.1 Balon Atmosfer



Gambar 2.1 Balon atmosfer
Sumber: www.balloonchallenge.org

Balon atmosfer memiliki bahan yang lentur dengan bahan karet *latex* maupun *latex* sintetis menggunakan *polychloroprene*. Pada umumnya balon atmosfer diisi oleh gas yang memiliki massa jenis lebih ringan dibandingkan udara sekitar. Terdapat 2 jenis gas yang umum digunakan yakni gas helium dan hidrogen. Balon mampu mengangkat muatan lebih berat dibandingkan berat balon itu sendiri dengan cara memperbanyak gas yang akan memperbesar volume dari balon atmosfer.

2.2 Teori Pengontrolan Ketinggian

Gaya ke atas pada balon atmosfer diistilahkan sebagai daya angkat total (T). Nilai T dapat dihitung berdasarkan Persamaan 2.1. Nilai dari masing-masing parameter akan berubah seiring dengan ketinggian dari balon atmosfer.

$$T = V (\rho - \rho_g) \qquad (2.1)$$

Di mana:

T = daya angkat total
V = volume balon
ρ = massa jenis udara
ρ_g = massa jenis gas di dalam balon atmosfer (contoh: hidrogen, helium)

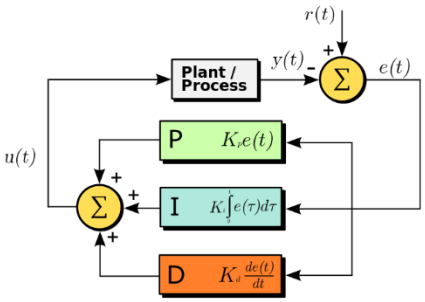
daya angkat bebas (free lift) adalah daya angkat yang diperlukan untuk membawa muatan dengan kecepatan tertentu. Nilai daya angkat bebas (L) adalah seperti pada Persamaan 2.2.

$$L = T - W \qquad (II.2)$$

Di mana W adalah berat total muatan yakni dari berat balon dan berat muatan. Jika L mendekati nol atau daya angkat total sama dengan berat total muatan maka balon atmosfer tidak dapat bergerak ke atas maupun ke bawah sehingga balon menjadi melayang di udara.

2.3 Kontrol Proportional Integral Derivatif (PID)

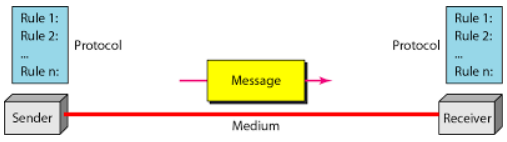
Sebuah kontroler *proporsional-integral-derivatif* (PID kontroler) adalah mekanisme kontrol umpan balik (*feedback controller*) yang biasa digunakan dalam sistem kontrol industri. Sebuah kontroler PID terus menghitung nilai *error* sebagai perbedaan antara variabel proses yang terukur dan *set point* yang diinginkan. *Kontroler* mencoba untuk meminimalkan kesalahan dari waktu ke waktu dengan menyesuaikan variabel kontrol, seperti posisi katup kontrol.



Gambar 2.2 Diagram blok kontrol PID
Sumber: www.en.wikipedia.org

2.4 Teori Komunikasi Data Radio

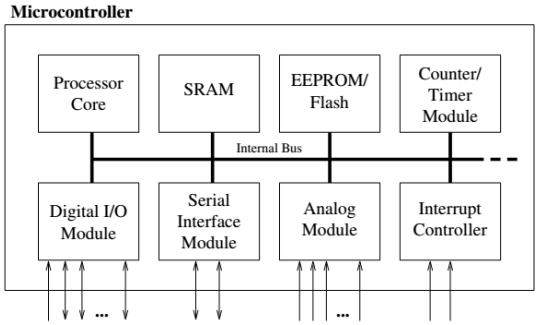
Komunikasi data adalah pertukaran data antara dua perangkat melalui beberapa bentuk media transmisi seperti kabel kawat. Agar komunikasi data terjadi, perangkat komunikasi harus menjadi bagian dari sistem komunikasi yang terdiri dari kombinasi *hardware* (peralatan fisik) dan *software* (program).



Gambar 2.3 Komponen komunikasi data
Sumber: Forouzan (2007:4)

2.5 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah prosesor dengan memori dan komponen lainnya terpasang atau terintegrasi pada sebuah *chip* (*integrated chip*) (Gridling, 2007:2). Sebuah mikrokontroler berisi semua komponen yang memungkinkan untuk beroperasi secara mandiri, dan telah dirancang secara khusus untuk memantau dan/atau mengontrol suatu tugas. Sebagai tambahannya prosesor itu mencakup memori, berbagai kontroler antarmuka, satu atau lebih *timer*, sebuah *interrupt* kontroler, dan pin *general purpose* I/O yang memungkinkan untuk langsung berhadapan dengan lingkungannya. Mikrokontroler juga mencakup operasi bit yang memungkinkan untuk mengubah satu bit dalam byte tanpa menyentuh bit lainnya.



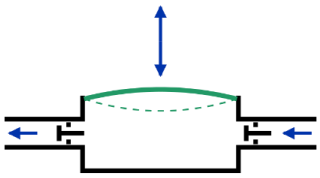
Gambar 2.4 Diagram blok mikrokontroler secara umum
Sumber: Gridling & Weiss (2007:5)

2.6 Multiwii

Multiwii adalah *general purpose software* untuk mengontrol berbagai *multirotor* model *radio control*. Awalnya dikembangkan untuk mendukung *gyroscopes* dan *accelerometer* konsol Nintendo Wii, namun sekarang dapat digunakan dengan berbagai sensor. Proyek multiwii ini adalah kesempatan untuk mengembangkan perangkat lunak sendiri pada platform Arduino.

2.7 Pompa Diafragma

Sebuah pompa diafragma (juga dikenal sebagai pompa Membran) adalah pompa perpindahan positif yang menggunakan kombinasi dari aksi resiprokasi pada diafragma karet, termoplastik atau teflon dan katup di kedua sisi diafragma (*check valve*, *butterfly valves*, *flap valves*, atau bentuk lain dari katup *shut-off*) untuk memompa cairan atau udara.



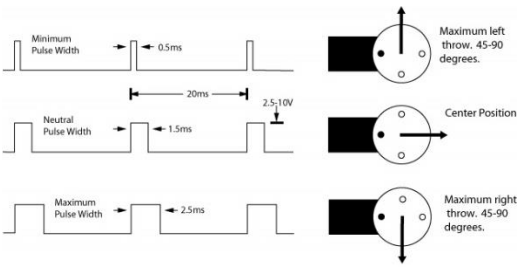
Gambar 2.5 Diagram pompa diafragma
Sumber: www.en.wikipedia.org

2.8 *Driver* Motor DC Dengan IC L298

L298 adalah sirkuit monolitik terintegrasi yang memiliki tegangan tinggi, *driver dual full-bridge* arus tinggi yang dirancang agar mampu bekerja pada *logic level* TTL yang rendah (standar) dan menginduksi beban seperti relay, solenoid, motor dc dan motor *stepper*. Dua *input enable* disediakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat secara independen dari sinyal *input*. Emitter dari transistor yang paling bawah dari setiap *bridge* terhubung bersama dan terminal eksternal yang sesuai dapat digunakan untuk koneksi dari sebuah *sensing* resistor eksternal. Sebuah pasokan daya tambahan disediakan sehingga *logic* TTL tetap bekerja pada tegangan rendah.

2.9 Kontrol Servo

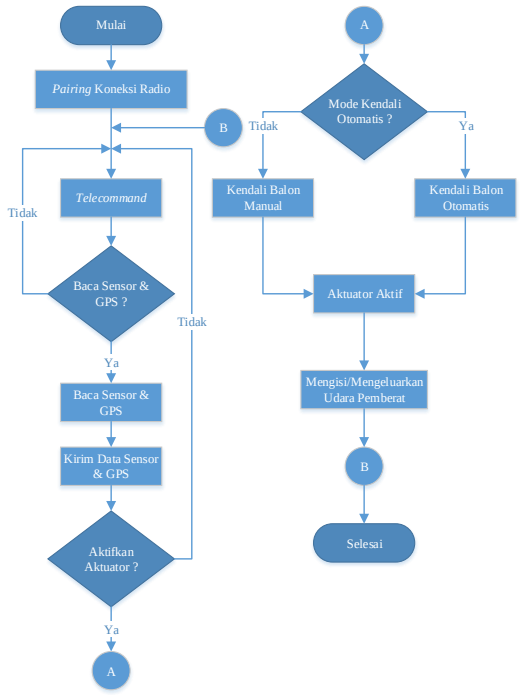
Lebar minimum dan maksimum pulsa pada motor servo dapat beragam dari setiap pabrik pembuatnya. Namun, bagaimanapun nilai untuk posisi netral berkisar 1.5ms. Biasanya lebar minimum pulsa bervariasi dari 0.5ms hingga 1ms, sedangkan varian dari lebar maksimal pulsa antara 2ms hingga 3ms. Umumnya frekuensi sinyal pulsa pada servo adalah 50Hz, namun ini pun dapat bervariasi antara 30Hz hingga 200Hz. Tegangannya pun bervariasi dari 2.5V hingga 10V.



Gambar 2.6 Lebar pulsa motor servo
Sumber: www.mitchr.me

3. PERANCANGAN

3.1 Perancangan Sistem Secara Umum

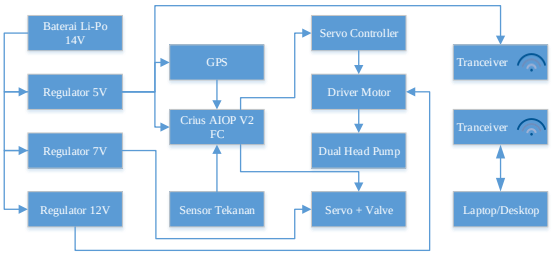


Gambar 3.1 Diagram alir sistem kendali ketinggian balon atmosfer

Gambar diatas merupakan diagram blok sistem kendali ketinggian balon atmosfer secara umum.

3.2 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras bertujuan untuk memetakan sistem kelistrikan pada muatan yang terdiri dari mikrokontroler dan beberapa sensor. Gambar di bawah ini menunjukkan hubungan antar komponen pada *payload* dan hubungan komponen radio sebagai sistem transmisi.



Gambar 3.2 Blok diagram sistem dengan pendekatan perangkat keras

Untuk mempermudah memahami sistem perancangan perangkat keras ini maka sistem perancangan dibagi ke dalam 4 sub sistem yakni:

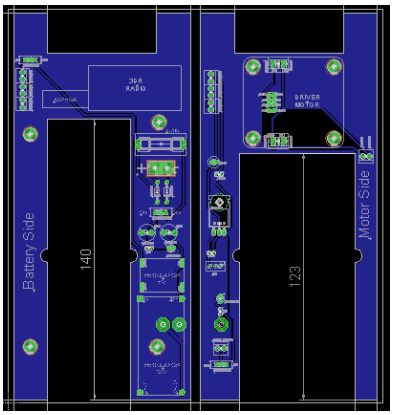
- Sistem catu daya
- Sistem pemroses
- Sistem aktuator
- Sistem *tranceiver*

Keempat sub sistem tersebut memiliki komponen yang berbeda dalam pembangunannya, juga memiliki fungsi yang berbeda. Namun keempat sub sistem ini memiliki hubungan untuk membentuk sistem yang utuh.

3.3 Perancangan *Embedded Board* Perangkat Keras Pada *Payload*

Perancangan *embedded board* perangkat keras ini bertujuan untuk mempermudah penempatan dan pemasangan berbagai komponen pada *payload*. Selain membantu memetakan letak komponen, *embedded board* ini juga memiliki rangkaian yang menghubungkan baterai dengan berbagai regulator yang digunakan pada perancangan alat ini.

Bentuk PCB yang dicetak membentuk huruf "H", tujuannya adalah mengoptimalkan penempatan komponen perangkat keras dengan bentuk *chassis* yang menyerupai tabung. Sehingga diharapkan dengan bentuk PCB yang seperti itu seluruh komponen perangkat keras *payload* akan termuat di dalam tabung. Berikut *layout* PCB yang dicetak.



Gambar 3.3 Layout PCB *embedded board* kendali ketinggian balon atmosfer

3.4 Perancangan Bentuk Muatan

Perancangan ini menjadi salah satu perancangan yang penting karena pemilihan bentuk akan mempengaruhi banyak aspek saat melakukan pengendalian di udara. Bentuk yang dipilih untuk muatan ini adalah bentuk tabung. Pemilihan bentuk tabung ini dipilih agar muatan memiliki aerodinamis

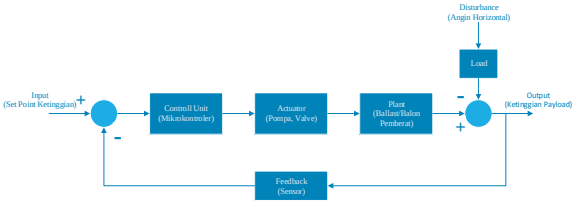
yang baik, selain itu juga agar seluruh komponen perangkat keras dapat dimuat oleh *payload*. Berikut adalah desain bentuk muatan kendali ketinggian balon atmosfer.



Gambar 3.4 Desain muatan kendali ketinggian balon atmosfer

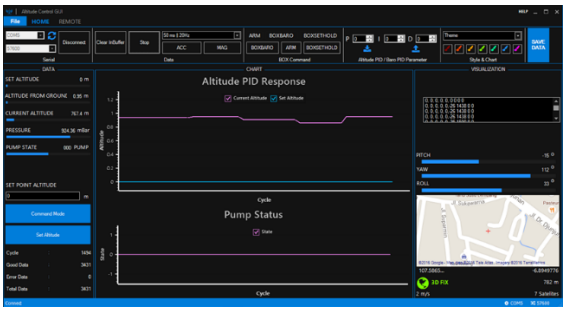
3.5 Perancangan Sistem Kendali

Perancangan ini bertujuan untuk menghasilkan sebuah sistem kendali yang mampu mengendalikan gerak vertikal balon agar mampu melayang pada ketinggian tertentu. Sistem kendali yang digunakan pada perancangan ini adalah sistem kendali PID (*Proporsional*, *Integral*, *Derivatif*). Sistem kendali PID ini dipilih dengan tujuan mempercepat respon aktuator untuk mengendalikan pergerakan vertikal balon.



Gambar 3.5 *Clossed loop* sistem kendali ketinggian balon

3.6 Perancangan GUI (*Graphical User Interface*) Kendali Balon

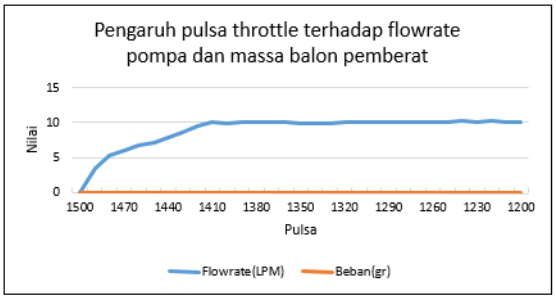


Gambar 3.6 Desain GUI (*Graphical User Interface*) kendali balon

Perancangan ini bertujuan untuk membuat sebuah algoritma pada GCS (*Ground Control Station*) agar *payload* dapat berkomunikasi dan mampu diberikan sebuah instruksi untuk melakukan operasi dengan GCS. GCS ini berupa GUI (*Graphical User Interface*) yang memantau dan mengendalikan *payload* di darat. GCS diharapkan mampu memberikan instruksi pada *payload* seperti instruksi untuk mengaktifkan dan menonaktifkan aktuator, meminta data sensor ketinggian dan sebagainya.

4. PENGUJIAN

4.1 Pengujian *Flowrate* Motor Pompa *Dual Head*

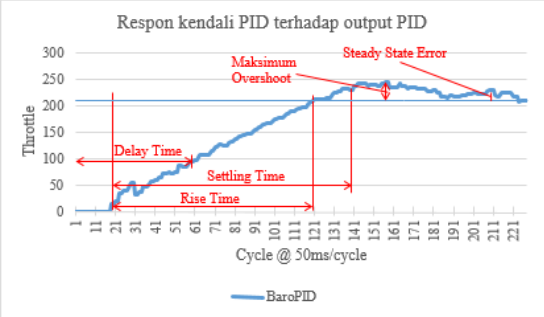


Gambar 4.1 Desain GUI (*Graphical User Interface*) kendali balon

Berdasarkan kurva pada gambar di atas, kenaikan *flowrate* motor pompa secara signifikan dari minimum ke maksimum ditunjukkan saat nilai pulsa berada pada rentang 1500-1400. Pada saat nilai pulsa lebih kecil dari 1400, besar *flowrate* motor pompa tidak menunjukkan perubahan yang signifikan yaitu berkisar antara 9.9 – 10.2 LPM (*Liter Per Minute*). Sehingga dengan melihat kurva tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk mengendalikan besar pemompaan udara (dari

flowrate minimum ke maksimum) ke balon pemberat hanya membutuhkan ± 100 step nilai pulsa.

4.2 Pengujian Respon Kendali PID Terhadap Aktuator



Gambar 4.2 Respon kendali PID terhadap *output* PID

Dengan melihat kurva di atas mengenai respon kendali PID terhadap nilai *output PID*, dapat disimpulkan bahwa kontrol ini dapat dikatakan sebagai kontrol yang memiliki respon *underdamped* atau respon yang memiliki redaman cukup. Maka untuk mengukur rise time sistem digunakan nilai 0% ke 100%. Dengan demikian, parameter respon transien sistem yang diukur secara kualitatif adalah sebagai berikut.

- *Delay time* sebesar 3 detik
- *rise time* sebesar 5.15 detik
- maksimum *overshoot* sebesar 6.80%
- *settling time* sebesar 6.05 detik
- *steady-state error* sebesar 3.80%

4.3 Pengujian Sensor Ketinggian berbasis GPS dan Tekanan



Gambar 4.3 Pengujian ketinggian dan tekanan dengan varian instrumen yang berbeda

Pengujian sensor ketinggian dilakukan di beberapa tempat yang memiliki ketinggian berbeda. Pengujian dilakukan dengan melakukan komparasi nilai tekanan dan ketinggian yang didapat dari berbagai instrumen pengukuran seperti yang ditunjukkan oleh gambar. Instrumen yang digunakan untuk melakukan komparasi antara lain GPS *Portable* merek Garmin, GPS GP-635T, barometer analog dari Yanagi Gauge & Instrumen Japan, dan sensor tekanan MS5611-01BA01 pada posisi ketinggian yang sama di daratan. Dengan membandingkan sensor MS5611-01BA01 yang digunakan untuk melakukan kendali, diharapkan hasil kendali akan mencapai nilai yang baik

4.4 Pengujian Komunikasi GCS (*Ground Control Station*) Dengan Muatan Kendali

Tingkat persentase keberhasilan pengiriman data mengacu pada nilai *checksum* dari data yang dikirim sama dengan *checksum* yang telah dihitung atau dengan kata lain, data diterima secara utuh tanpa ada potongan data yang hilang. Sehingga setiap data tidak utuh yang masuk akan dikatakan sebagai data *error*.

Tabel 4.1 Pengujian komunikasi

Percobaan Ke	Jarak LOS (meter)	Total Data Masuk	Data Baik	Data *Error*	Persentase Keberhasilan
1	10	96	96	0	100%
2	20	84	84	0	100%
3	30	88	88	0	100%
4	40	69	69	0	100%
5	50	69	69	0	100%
6	60	57	57	0	100%
7	70	57	57	0	100%
8	80	54	54	0	100%
9	90	46	46	0	100%
10	100	57	57	0	100%
11	110	61	61	0	100%
12	120	54	54	0	100%
13	130	57	57	0	100%
14	140	65	65	0	100%

Pengujian menunjukkan data hasil komunikasi radio dengan tingkat keberhasilan sebesar 100% pada 14 percobaan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa radio *tranceiver* dengan antena yang dimodifikasi dan metode pengiriman data dengan protokol MSP sangat handal menangani data yang membutuhkan transmisi cepat. Maka akan sangat cocok digunakan pada perangkat yang membutuhkan kendali secara *real time* seperti kendali ketinggian balon atmosfer ini.

4.5 Uji Tambat

Pengujian ini dikatakan uji tambat karena berdasarkan metode pengujiannya yang melakukan penambatan pada balon pengangkat agar tidak

bergerak terus ke udara, sehingga pengujian ini tidak dilakukan pada ketinggian lebih dari 16 meter. Uji tambat merupakan tahap akhir dari pengujian yang mana akan menjawab hasil perancangan kendali ketinggian balon atmosfer dengan *ballast* berupa kantung udara (dalam hal ini balon) yang diisi udara biasa untuk mendapatkan kondisi melayang pada balon pengangkat.



Gambar 4.4 Uji tambat

Saat melakukan uji tambat, diketahui bahwa sistem pengeluaran udara tidak berjalan baik pada balon pemberat 1000 gram di luar ruangan. Hal ini ditandai dengan kecilnya debit angin yang keluar dari leher balon saat katup udara dibuka, seakan-akan tekanan udara di dalam balon hampir sama besarnya dengan tekanan udara di luar balon. Sehingga peristiwa ini mengacaukan sistem kendali otomatis dengan algoritma PID yang telah dirancang sebelumnya. Maka kendali otomatis pada uji tambat ini gagal dilakukan. Namun untuk menguji kemampuan *ballast* dalam menangani daya angkat balon hidrogen, pengujian dilakukan dengan cara melakukan kendali aktuator secara manual pada GCS. Sehingga skenario uji tambat berubah dari sebelumnya.



Gambar 4.5 Kurva pengaruh kendali manual terhadap ketinggian berbasis GPS

Bila ketinggian 775 meter merupakan nilai ketinggian yang diinginkan (kurang lebih pada ketinggian 3 meter dari tanah), maka mengacu pada kurva yang ditunjukkan **Error! Reference source not found.** dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menurunkan ketinggian balon pada detik ke 1 hingga detik ke 57, namun balon tidak stabil pada ketinggian tersebut. Balon sempat stabil beberapa saat dari detik ke 58 hingga detik ke 78, namun setelah itu balon mengalami *bouncing* (melakukan pergerakan naik dan turun) kurang lebih sebanyak 3 kali pada detik ke 78 hingga detik ke 125. Hal ini kemungkinan diakibatkan dari adanya gangguan oleh angin horizontal yang menyebabkan turbulensi pada balon hidrogen maupun balon pemberat.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan dan data yang telah didapatkan dari beberapa pengujian, perancangan kendali ketinggian balon atmosfer berbasis multiwii dengan metode pengisian dan pengeluaran udara pada kantung pemberat ini menghasilkan beberapa kesimpulan yakni

- Berdasarkan hasil uji tambat dapat diketahui bahwa *ballast* berhasil melawan *free lift* balon atmosfer namun efek *bouncing* pada sistem kendali kemungkinan terjadi karena angin horizontal yang menyebabkan turbulensi pada balon pemberat maupun balon pengangkat. Sehingga ini akan mempengaruhi hasil *set point* ketinggian yang diinginkan.
- Berdasarkan data hasil uji komunikasi dapat diketahui bahwa pada sistem transmisi data dari *payload* ke GSC dan sebaliknya mampu dilakukan dengan baik dan handal karena mendapati nilai *error* data yang diterima sebesar 0%.
- Berdasarkan hasil pengujian sensor tekanan dapat diketahui bahwa tekanan pada sensor dapat terpengaruh oleh suhu permukaan papan PCB. Hal ini akan menyebabkan kesalahan pada hasil nilai konversi tekanan ke ketinggian. Sehingga

ini akan mempengaruhi hasil komputasi kendali PID, bahkan akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil dan menghasilkan respon *undamped* (berosilasi dengan amplituda yang semakin membesar).

- Berdasarkan hasil uji tambat, tekanan udara di dalam balon 1000 gram kemungkinan menyerupai tekanan udara di luar balon, sehingga pengeluaran udara dari balon pemberat melalui katup pengontrol tidak akan berjalan dengan baik. Selain itu, kemungkinan faktor elastisitas balon pada suhu tertentu mempengaruhi tekanan udara dalam balon. Sehingga sistem kendali otomatis tidak berjalan saat dilakukan uji tambat dikarenakan faktor tekanan dan elastisitas dalam balon pemberat yang tidak terduga.
- Berdasarkan hasil pengamatan pada uji tambat, lipatan leher balon saat terjadi guncangan menyebabkan terjadinya proses penyumbatan saat melakukan pengisian/pengeluaran udara ke/dari kantung pemberat. Sehingga ini akan menyulitkan proses kendali karena debit udara yang masuk ke kantung pemberat tersumbat. Bahkan ini akan menimbulkan kerusakan pada pompa karena menekan balik udara yang dipompa keluar.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] Artikel non-personal, 2013, *Understanding Interrupts in PIC Microcontrollers*, diakses pada tanggal 15 Oktober 2015, dari world wide web: http://microautomate.com/pic/interrupts/.

[2] Artikel non-personal, Januari 2015, *Multiwii Serial Protocol*, diakses pada tanggal 20 Agustus 2015, dari world wide web: http://www.multiwii.com/wiki/index.php?title=Multiwii_Serial_Protocol.

[3] Artikel non-personal, Januari 2015, *PID controller*, diakses pada tanggal 30 September 2015, dari world wide web: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.

[4] Artikel non-personal, September 2015, *Diaphragm pump*, diakses pada tanggal 29 Oktober 2015, dari world wide web: https://en.wikipedia.org/wiki/Diaphragm_pump.

[5] Brice, T. dan Todd Hall, NOOA, *Pressure Altitude*, diakses pada tanggal 27 Oktober 2015, dari world wide web: http://www.srh.noaa.gov/epz/?n=wxcalc_pressurealtitude

[6] *Datasheet u-blox 6 Receiver Description*, U-Blox, April 2013.

[7] Forouzan, Behrouz A., 2007, *Data Communications and Networking*, 4th Edition, McGraw Hill, New York.

[8] Garry, B., Januari 2006, *Controlling a Helium Balloon*, diakses pada tanggal 20 September 2015, dari world wide web: http://www.barrygray.pwp.blueyonder.co.uk/Tutoring/BGasBal.html.

[9] Gridling, Gunther dan Bettina Weiss, 2007, *Introduction to Microcontrollers*, Vienna University of Technology.

[10] Gunterus, Frans, 1997, *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta.

[11] Hirzel, Timothy, *PWM*, diakses pada tanggal 9 Oktober 2015, dari world wide web: https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM.

[12] Loflin, Lewis, *PICAXE 18M2 Microcontroller PWM Motor Speed Control*, diakses pada tanggal 3 Oktober 2015, dari world wide web: http://www.bristolwatch.com/picaxe/adc_pwm_demo.htm.

[13] NOOA-FRD, Maret 2011, *NOAA Smart Balloon*, diakses pada tanggal 15 Agustus 2015, dari world wide web: http://www.noaa.inel.gov/capabilities/smartballoon/smartballoon.htm.

[14] Ogata, K., 2002, *Modern Control Engineering*, 5th Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.

[15] Richling, Mitch, 2012, *R/C Control Signal*, diakses pada tanggal 5 Oktober 2015, dari world wide web: http://www.mitchr.me/SS/batteriesRequired/RCcontrolTheory/.

[16] Sfuptownmaker, *I2C*, diakses pada tanggal 13 Oktober 2015, dari world wide web: https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c.

[17] Siddharth, Mei 2013, *I2C Protocol (2-Wire Interface) in a nut shell*, diakses pada tanggal 16 Oktober 2015, dari world wide web: http://embedjournal.com/two-wire-interface-i2c-protocol-in-a-nut-shell/.

[18] Syahrul, 2014, *Pemograman Mikrokontroler AVR Bahasa Assembly dan C*, Informatika, Bandung.

[19] Tjahyadi, C., Januari 2015, *H-Bridge 4A dengan L298*, diakses pada tanggal 20 Oktober 2015, dari world wide web: http://christianto.tjahyadi.com/mikrokontroler/h-bridge-4a-dengan-l298.html.