

## ADCS (ATTITUDE DETERMINATION AND CONTROL SUBSYSTEM) PADA NANOSATELLITE TEL-U MENGGUNAKAN MAGNETIC TORQUE

### ADCS (ATTITUDE DETERMINATION AND CONTROL SUBSYSTEM) ON NANOSATELLITE TEL-U WITH MAGNETIC TORQUE

Rizky Daryanto<sup>1</sup>, Erwin Susanto, S.T., M.T., Ph.D.<sup>2</sup>, Angga Rusdinar, S.T., M.T., Ph.D.<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung  
<sup>1</sup>[rizkydar@students.telkomuniversity.ac.id](mailto:rizkydar@students.telkomuniversity.ac.id), <sup>2</sup>[erwinelektro@telkomuniversity.ac.id](mailto:erwinelektro@telkomuniversity.ac.id),  
<sup>3</sup>[anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id](mailto:anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id)

#### ABSTRAK

*Satellite* adalah sebuah alat yang digunakan manusia untuk kebutuhan tertentu yang bergerak diluar angkasa dengan mengorbit pada suatu benda. Karena luar angkasa tidaklah sama dengan keadaan di bumi yang kita pijak ini. ADCS (*Attitude Determination and Control Subsystem*) menggunakan plant magnet torsi yang akan dikendalikan oleh mikrokontroler dengan kriteria kendali PID. Dalam perancangan sistem menggunakan metode PID, diperlukan mencari nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* untuk mendapatkan sistem yang stabil. Untuk mengetahui perubahan sudut hadap pada satelit nano, digunakan sensor magnetometer. Setelah mendapatkan pembacaan yang baik, data akan diproses dengan kontrolir PID untuk mengatur tegangan pada magnet torsi agar dapat mempertahankan orientasi sudut satelit nano. Dari hasil perhitungan didapat besar nilai maksimum medan dipol yang dihasilkan oleh magnet torsi sebesar Kekuatan dari magnet torsi yang dibuat sebesar  $m = 310,592$  ~~000~~. Parameter PID,  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0.5$ , dan  $K_d = 1$ .

**Kata Kunci :** PID, ADCS, Magnetic Torque

#### ABSTRACT

*Satellite is a tool used by humans for specific needs that move in space by orbiting at an object. Because the space is not the same as the circumstances in which we walk on this earth. ADCS (Attitude Determination and Control Subsystem) uses magnetic torque plant will be controlled by a microcontroller with PID control criteria. In designing the system using the PID, required looking for value proportional, integral and derivative to obtain a stable system. To determine the angle changes toward the nano satellites, used magnetometer sensor. After getting a good reading, the data will be processed by the PID controller to regulate the voltage on the magnet torque in order to maintain the angular orientation of nano satellites. From the calculation of the maximum value obtained large magnetic field generated by the magnet torque of  $m = 310,592$  ~~000~~. PID parameters,  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0.5$ , and  $K_d = 1$ .*

**Keywords :** PID, ADCS, Magnetic torque

#### 1. Pendahuluan

##### 1.1 Latar Belakang

Satellite merupakan sebuah alat yang diterbangkan ke luar angkasa dengan tujuan tertentu dan pada tempat tertentu. Pada satellite yang akan dibuat, tujuannya adalah satellite akan menghadapkan kamera ke arah bumi. Permasalahannya adalah bagaimana caranya agar kamera satellite tetap menghadap ke arah bumi. ADCS yang dirancang akan menggunakan aktuator magnet torsi. Magnet torsi disini sistemnya medan magnet yang akan dihasilkan akan bereaksi secara bersama-sama dengan medan magnet bumi. Sehingga nantinya medan magnet dari magnetic torque akan terus berubah-ubah seiring dengan perpindahan dari satellite itu sendiri.

Pengontrolan akan menggunakan metode PID. PID merupakan salah satu metode pengontrolan dengan memberikan nilai proporsional, integral dan derivative untuk kestabilan sebuah sistem. Nilai pengontrolan ini akan di program ke dalam sebuah *microcontroller* Arduino UNO sebagai pengontrol *plant*. *Satellite* akan terus dipantau arahnya oleh *sensor magnetometer*, dan terjadi interfacing antar *microcontroller* dengan sensor. Agar satellite tetap pada arah yang seharusnya, maka sensor disini berperan penuh untuk memantau arah pergerakan *satellite*. *Microcontroller* terus mengontrol *plant*, untuk menjaga kestabilan satellite.

Jadi pengontrolan untuk ADCS *nanosatellite* menggunakan *plant magnetic torque* yang berbasis melihat refrensi gravitasi bumi, yang dikontrol dengan menggunakan *microcontroller* Arduino UNO dengan metode *PID controlled*.

##### 1.2 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

1. Membuat sebuah pengontrolan keseimbangan arah camera pada *nano satellite* Tel-U
2. Membuat plant pengontrol magnet torsi untuk *nanosatellite* Tel-U
3. Riset pengontrolan yang lebih baik untuk *nano satellite* Tel-U
4. Dapat berguna untuk pengontrolan *nanosatellite*

5. Dapat diimplementasikan pada Nanosatellite Tel-U

**1.3 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari tugas akhir ini yaitu:

1. Bagaimana memodelkan magnet torsi
2. Bagaimana menentukan nilai Kp, Ki, dan Kd
3. Bagaimana merancang magnet torsi
4. Bagaimana implementasi ke mikrokontroler
5. Bagaimana mengatur tegangan yang masuk ke lilitan tembaga
6. Bagaimana mendeteksi ketidakstabilan arah pada nano satellite

**1.4 Metodologi Penelitian**

Metodologi penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur dilakukan dengan mempelajari materi-materi yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini. Sumber yang digunakan adalah jurnal, text book, forum dan beberapa website terpercaya
2. Pengujian terhadap prototype sistem untuk monitoring, control dan performansi sistem
3. Penyusunan buku tugas akhir ini dilakukan seiringan dengan penerapan hasil perancangan tugas akhir

**2. Dasar Teori/Material dan Metodologi Penelitian**

**2.1 Pengendali PID**

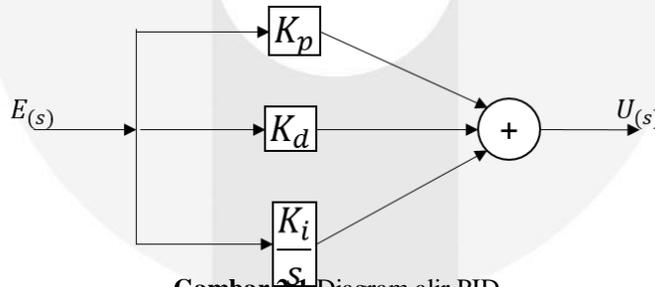
Pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan suatu metode pengontrolan yang berfungsi untuk menentukan kestabilan suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik umpan balik pada sistem tersebut. Pengendali PID terdiri dari tiga parameter pengendali yaitu P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*). Masing-masing parameter memiliki kelebihan dan kekurangan. Ketiga parameter tersebut, dalam implementasi dapat berkerja sendiri dan juga dapat berkerja secara bersama-sama (bergabung). Parameter P, I, dan D merupakan parameter yang akan diatur masing-masing nilainya untuk mencapai keluaran sistem yang diinginkan. Pengendali PID banyak digunakan dalam proses industry, seperti mengendalikan suhu ruangan, mengatur ketinggian air, mengatur kecepatan motor, dan lain sebagainya.

Pengendali PID merupakan gabungan dari tiga struktur pengontrolan penting dalam satu kemasan pengontrol. Bentuk paralel dari pengendali PID memiliki fungsi transer :

$$P(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

$$= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

dimana:  $K_p$  = Proportional Gain  
 $K_i$  = Integral Gain  
 $K_d$  = Derivative Gain  
 $T_i$  = Reset Time =  $\frac{1}{K_i}$   
 $T_d$  = Rate time atau waktu derivative



**Gambar 2.1** Diagram alir PID

Pengendali PID memiliki tiga parameter penyusun, yaitu:

1. Kontrol Proportional  
 Kontrol Proportional (Kp) berguna untuk memperbaiki waktu agar cepat mencapai titik kestabilan, dalam kata lain dapat mengurangi *rise time* sebuah sistem. Namun apabila nilai Kp diberikan terlalu berlebihan, akan mengakibatkan sistem berosilasi. Berikut adalah persamaan matematis dari kontrol Proporsional :

$$P = K_p \quad (3)$$

2. Kontrol Integral  
 Kontrol Integral (Ki) berguna untuk menghilangkan *error steady state*. Pemilihan nilai Ki harus diperhatikan karena apabila nilai yang dimasukkan terlalu besar, maka akan menimbulkan ketidakstabilan

sistem (mengakibatkan sistem berosilasi) karena bertambahnya orde pada sistem. Berikut adalah persamaan matematis dari kontrol Integral:

$$I = \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

### 3. Kontrol Derivative

Kontrol Derivative berguna untuk meredam osilasi, ini menyebabkan pemberian nilai Kp yang lebih besar. Kontrol Derivative hanya berubah saat ada perubahan error, sehingga saat error statis kontrol ini tidak akan bereaksi. Oleh karena itu kontroler Derivative tidak dapat dipakai sendiri. Berikut adalah persamaan matematis dari kontrol Derivative :

$$D = \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

## 2.2 MotoMama Driver Motor

MotoMama adalah H-Bridge motor driver shield berbasis chip ST L298N. *Motor driver* ini bertegangan tinggi, memiliki dua pengendali yang dirancang untuk dapat menerima *TTL logic levels* dan dapat mengendalikan beban induktif seperti relays, solenoid, motor DC dan motor stepper. MotoMama dirancang untuk mudah digunakan dengan sensor lain atau dengan modul nirkabel.

## 2.3 Magnetic Torque

Seperti yang diketahui bahwa arus yang mengalir pada sebuah konduktor dapat menimbulkan medan magnet dipol. Magnet dipol ini adalah momen magnet yang dapat digambarkan sebagai vektor. Vektor ini tegak lurus dengan lilitan dan menunjuk ke arah yang sama sebagaimana ibu jari tangan kanan ketika jari yang lainnya melingkar seperti arah arus (kaidah tangan kanan). Magnitude dari momen magnet yang dihasilkan dari sekali putaran relatif kecil, tapi juga sebanding dengan jumlah putaran.

Dengan membuat kawat yang dilingkarkan bergantian/menumpuk satu dengan yang lainnya sama seperti kumparan magnet. Untuk putaran yang banyak kita masih dapat menggunakan aturan kaidah tangan kanan untuk mengetahui arah momen magnet. Magnitude dari lain arah pada magnet torsi dapat digambarkan seperti

$$m = NIA \hat{n} \quad (6)$$

Dimana N adalah jumlah putaran kumparan, A adalah luas daerah yang tertutupi oleh kumparan, dan i adalah besar arus yang mengalir pada kumparan. Cross Product dari momen magnet dan medan geomagnetik menghasilkan sebuah torsi yang membuat satelit menjadi bermanuver. Tiga kumparan magnetik dapat di pasang di dalam satelit secara tegak lurus satu dengan yang lainnya untuk meningkatkan kontrol sudut yang lebih baik.

Berdasarkan sifatnya, sebuah kumpran hanya dapat menghasilkan momen magnet satu arah saja, lebih spesifiknya tegak lurus pada kumparan. Ini jelas meneapkan pembatasan bagaimana cara membuat algortima kontrolnya, pada saat sudut sudah dicapai, saat optimal, akan sangat jarang bertepatan pada setiap vektor kumparan. Sehingga momen magnetik yang diinginkan harus diurai dan dibagi dengan ketiga kumparan. Namun masalah terbesarnya berasal dari cara torsi yang dihasilkan. Hasil cross product dari dua vektor akan besar ketika kedua vektor saling tegak lurus, dan akan nol hasilnya ketika vektornya sejajar.

Gambar 2.2 Ilustrasi ketika satelit kehilangan kontrol

Pada gambar 2.2 arah hadap  $x+$  berorientasi terhadap bumi. Jika kasusnya operator ingin memutar satelit pada sumbu hadap  $z+$  terhadap bumi. Untuk melakukannya diperlukan torsi dari sumbu  $y$ . Mengalirkan arus

melewati hadap x- atau z-, akan terciptakan torsi pada masing-masing x- dan z-, saat mengalirkan arus melalui hadap y- kumparan tidak menghasilkan torsi sama sekali karena sumbu y tegak lurus dengan medan magnet bumi. Jadi jika satelit mengalami hal ini, semua kontrol harus dihilangkan.

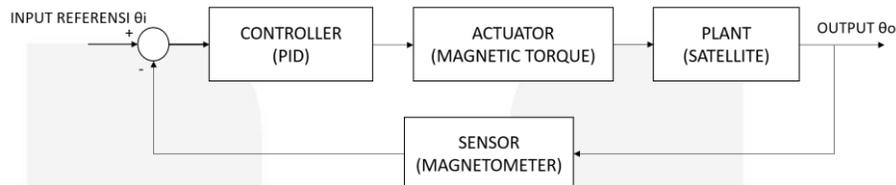
Beruntung itu semua hanya teori dari torsi gravitasi, perubahan medan geomagnetik dan banyaknya gangguan dari satelit adalah yang harus diperhatikan. Dalam praktiknya kita hanya perlu hati-hati pada masalah penghematan baterai ketika badan satelit dan medan geomagnetik mengalami gangguan.

**2.4 Sensor LSM303DLHC**

Sensor LSM303DLHC Accelerometer Magnetometer merupakan suatu modul akselerometer dan magnetometer yang menggunakan IC LSM303DLHC produksi STMicroelectronics ([www.st.com](http://www.st.com)). Modul ini mampu menghasilkan akselerometer dengan range  $\pm 2g$  s/d  $\pm 16g$  serta 3 sumbu pembacaan magnetometer dengan range  $\pm 1.3$  gauss s/d  $\pm 8.1$  gauss. Contoh aplikasi yang dapat dibangun dengan modul ini antara lain untuk membuat kompas dengan kompensasi kemiringan, rotasi peta digital secara otomatis, deteksi posisi, fungsi-fungsi yang diaktifkan dengan gerakan, deteksi freefall, pengenalan click/doubleclick, pedometer, aktivasi power saving untuk alat, pengaturan orientasi tampilan, alat kendali game atau virtual reality, dan lain sebagainya,

**2.5 Diagram Blok Sistem**

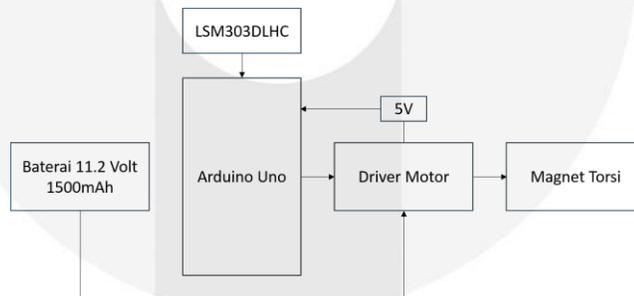
Secara sederhana, sistem ini terdiri dari *controller*, *sensor*, dan *actuator* yang akan mengatur arah dari kamera *nano satellite*. Input reference yang sudah ditentukan untuk menetapkan posisi kamera satellite menghadap ke Bumi. Pengontrolan dilakukan menggunakan PID controller untuk mengatur actuator agar menggerakkan satellite sesuai input yang telah ditentukan. Sensor yang digunakan untuk melihat posisi dari satellite adalah magnetometer. Sensor mendeteksi pergerakan satellite apakah sudah pada posisi yang benar atau belum. Informasi dari sensor dikirimkan ke input reference untuk diatur ulang kembali posisi dari satellite. Diolah dengan controller untuk menggerakkan actuator.



**Gambar 2.3** Diagram blok sistem

Dari gambar diagram blok diatas, masukan dari kontroler berupa *input reference* sudut. Dimana sudut masukan telah ditentukan terlebih dahulu dan terus dipantau perubahannya oleh sensor. Keluaran dari kontroler berupa arus. Arus ini akan mengalir alur tembaga yang sudah dibuat pada aktuator (magnet torsi) untuk menghasilkan medan magnet yang akan digunakan untuk menggerakkan posisi (sudut hadap) pada nanosatellite.

**2.6 Perancangan Perangkat keras**



**Gambar 2.4** Diagram blok perangkat keras

Gambar 2.11 merupakan diagram blok perancangan penelitian tugas akhir ini. Baterai 7.2 Volt 2200mAh menjadi catu daya seluruh perangkat keras yang ada pada prototype satelit nano. Arduino Uno menjadi otak penggerak dari satelit nano prototype ini. Pembacaan nilai Sensor LSM303DLHC akan diolah oleh Arduino untuk mengatur keluaran PWM pada driver motor. Magnet torsi dihubungkan dengan driver motor untuk mendapatkan input berupa PWM yang sudah diatur sehingga dapat mengendalikan arah hadap pada satelit nano.

Berikut ini adalah daftar perangkat keras yang digunakan

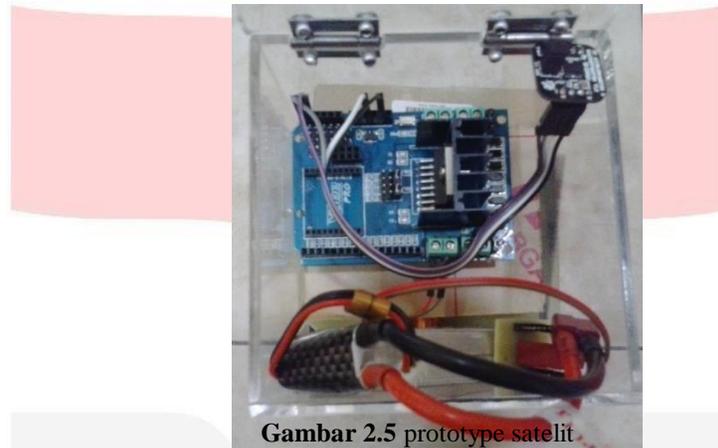
1. Arduino Uno
2. Baterai 11.2 Volt 1500 mAh
3. Driver motor

- 4. Magnet torsi
- 5. LSM303DLHC

**2.7 Magnet torsi dan Prototype Satelit Nano**

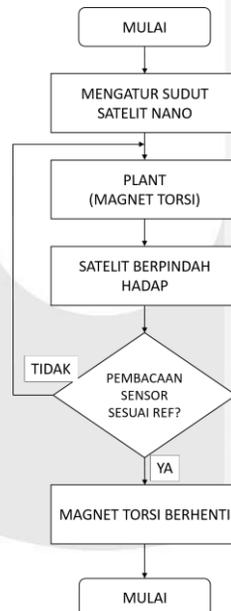
Magnet torsi yang digunakan harus sesuai dengan ukuran satelit nano. Karena satelit nano hanya berukuran 10 cm x 10 cm. Magnet torsi yang digunakan memiliki panjang 8 cm, dengan lebar 1 cm. kemudian magnet torsi diletakan pada PCB yang sudah di desain untuk meletakan magnet torsi. PCB magnet torsi memiliki panjang dan lebar sama yaitu 9.5 cm sehingga cukup untuk diletakan pada rumah satelit nano. Terdapat dua magnet torsi pada PCB tersebut, tapi kali ini yang dipakai hanya satu rod.

Setelah semua komponen sudah siap, semua komponen dihubungan seluruhnya dan diletakan pada kotak satelit nano yang sudah didesain. Semua komponen dihubungan berdasarkan pada diagram blok pada gambar 2.4.



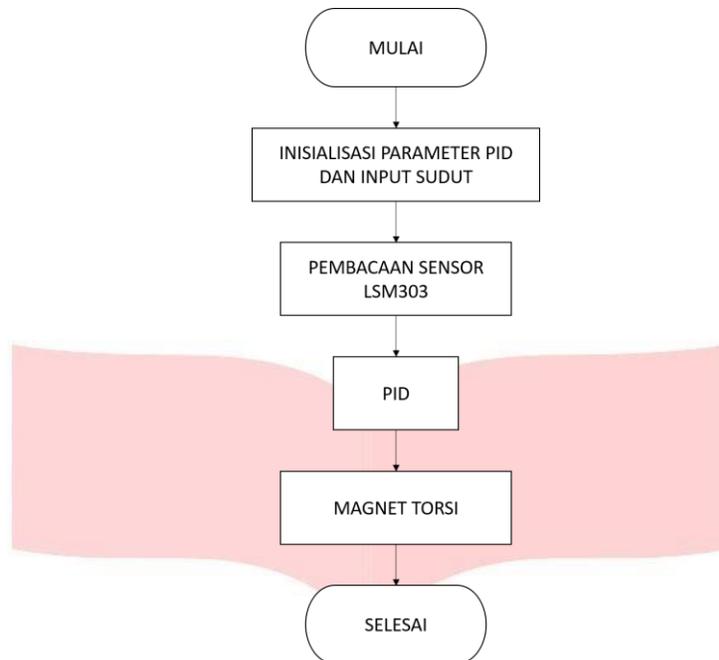
Gambar 2.5 prototype satelit

**2.8 Flowchart**



Gambar 2.6 Diagram alir sistem

Gambar 2.6 merupakan diagram alir kerja ADCS (Attitude Determination and Control Subsystem). Dimulai dari memasukan sudut yang telah ditentukan, kemudian sistem akan berkerja sesuai dengan yang sudah diprogram. Jika perpindahan hadap dari satelit sudah sesuai dengan masukan, magnet torsi akan berhenti menerima arus, dan satelit akan berhenti.



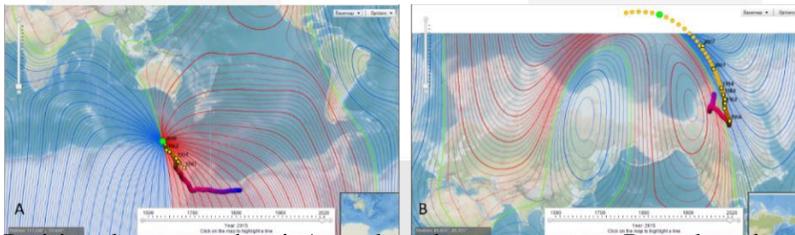
**Gambar 2.7** Diagram alir program

Gambar 2.7 menunjukkan urutan kerja dari program pada Arduino. Dimulai dari inialisasi parameter PID dan penetapan sudut referensi, kemudian sensor membaca sudut terkini pada satelit. Kondisi sudut terkini akan diproses oleh kontroler dengan metode PID, yang akan menghasilkan PWM untuk menggerakkan satelit dengan magnet torsi.

**3. Pembahasan.**

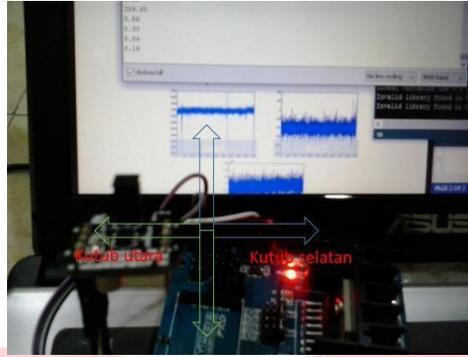
**3.1 Pengujian Arah Magnet Bumi**

Pengujian arah magnet bumi berguna untuk mengetahui posisi medan magnet utara dan selatan pada permukaan bumi. Pengujian dilakukan karena medan magnet utara dan selatan bumi sudah berpindah tempat, medan magnet selatan bumi tidak lagi berada tepat pada kutub utara, begitupula medan magnet utara bumi tidak lagi berada tepat pada kutub selatan. Karena pada setiap tahunnya, ada perpindahan medan magnet bumi.



**Gambar 3.1** Posisi medan magnet bumi, A untuk medan magnet utara, B untuk medan magnet selatan

Posisi medan magnet bumi seperti pada gambar 3.3 berpindah setiap tahunnya. Posisi kutub utara saat ini sudah berada dekat dengan benua Australia, sedangkan kutub selatan sudah bergerak melebihi titik yang sebelumnya. Hal ini akan menyebabkan bumi berputar melawan arah, pembacaan sensor yang tidak mengarah ke kutub utara, dan juga akan berpengaruh pada arah yang ditunjukkan pada magnet torsi nantinya.



**Gambar 3.2** Arah hadap sensor ketika 0 derajat pembacaan

Untuk melihat posisi hadap pada sensor, diperlukan komunikasi serial dengan mengubah-ubah arah pada sensor. Pada gambar 3.4 adalah hasil pembacaan pada sensor ketika berada pada arah/hadap 0 derajat. Meskipun tidak pasti 0, disebabkan terjadi goyang ketika mengubah-ubah arah sensor tersebut. Pada gambar 4.6 merupakan tampak hadap sensor. Jika diperhatikan, arah medan magnet utara dan selatan tidak lagi berada pada kutub selatan dan kutub utara. Telah terjadi kemiringan atau adanya perpindahan medan magnet bumi.

**3.2 Perhitungan Kekuatan Magnet Torsi**

Sebelum melakukan pengujian terhadap magnet torsi, diperlukan perhitungan besar kekuatan yang dimiliki oleh magnet torsi itu sendiri. Magnet torsi yang dibuat dalam penelitian ini memiliki spesifikasi:

- N = 240
- I = 2 Ampere (maksimal)
- A = 0.2 mm

$$m = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{I}_i$$

Dengan menggunakan persamaan  $m = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{I}_i$  kita dapat mencari momen dipol yang dihasilkan

oleh magnet torsi yang sudah didesain. Dengan N adalah jumlah putaran sebanyak 240 kali putaran, arus maksimal 2 Ampere, dan A adalah luas daerah yang tertutupi oleh lilitan tembaga. Karena medium yang digunakan seperti tabung, maka luas daerah yang tertutupi sama saja lebar lembaga, dikali dengan luas keliling lingkaran.

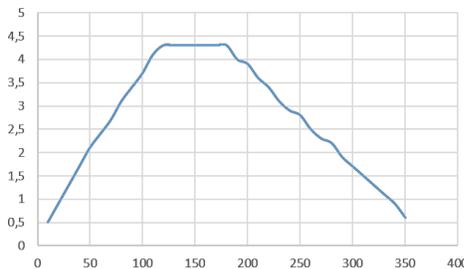
$$m = 240 \cdot 2 \cdot 0,222$$

$$m = 310,592$$

Jadi karena hanya menggunakan satu magnet torsi, didapatkan momen dipol untuk satu magnet torsi sebesar  $m = 310,592$ .

**3.3 Pengujian Kontrolir PID**

Pengujian Kontrolir PID dilakukan untuk melihat respon sistem terhadap masukan yang telah ditentukan. Pengujian ini berguna untuk melihat apakah kontrol PID mampu mengendalikan tegangan jika sudut satelit diubah-ubah.



**Gambar 3.3** Perubahan tegangan jika sudut hadap satelit berubah

Pada gambar 3.3 dapat disimpulkan, kontrolir PID mengatur tegangan yang masuk pada magnet torsi. Apabila sudut hadap satelit sudah cukup jauh dari masukannya, misalnya pada sudut hadap  $150^\circ$ , maka magnet torsi akan menerima tegangan maksimal, yaitu sebesar 4,5 Volt. Jika satelit sudah mulai mendekati sudut masukan, seperti ketika satelit menghadap ke sudut  $300^\circ$ , maka tegangan yang dikeluarkan oleh driver motor untuk magnet torsi akan berkurang.

Jadi kontrolir PID dapat berkerja dengan baik, mengatur tegangan yang dikeluarkan oleh motor driver, dan mendapatkan respon sistem yang cukup baik.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang dilakukan pada perancangan ADCS nano satelit menggunakan magnet torsi :

1. Kekuatan dari magnet torsi yang dibuat sebesar  $m = 310,592$  ~~0000~~
2. Kontrol PID dapat diterapkan pada ADCS satelit nano. Nilai parameter yang digunakan adalah  $K_p=3$ ,  $K_i=0,5$ , dan  $K_d=1$
3. Arah hadap satelit akan mengikuti medan magnet bumi. Hal ini dikarenakan magnet torsi menghasilkan momen dipole yang mengikuti gaya magnet bumi.
4. Perubahan nilai tegangan tiap hadap satelit, menunjukkan bahwa pengontrolan dengan menggunakan PID dapat mengatur tegangan yang diberikan kepada magnet torsi. Ketika satelit sudah menghadap jauh dari sudut yang ditentukan, tegangan akan meningkat. Jika sudah mulai mendekati sudut yang telah ditentukan, tegangan akan mulai menurun.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Retrieved from [https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical\\_declination/](https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical_declination/)
- [2] Graversen, T., Frederiksen, M. K., & Vedstesen, S. V. (2002). Attitude Control system for AAU CubeSat . In *Attitude Control system for AAU CubeSat* (pp. 27-40). Aalborg.
- [3] Greene, M. R. (2009). The Attitude Determination and Control System of the Generic Nanosatellite Bus. In *The Attitude Determination and Control System of the Generic Nanosatellite Bus* (pp. 82-86). Toronto.
- [4] *Historical Magnetic Declination*. (2016, Januari 15). Retrieved from NOAA: [https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical\\_declination/](https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical_declination/)
- [5] Steyn, P. W. (n.d.). Magnetic Attitude Determination and Control for Low Earth Orbiting Small Satellites . *Magnetic Attitude Determination and Control for Low Earth Orbiting Small Satellites* , 2-3.
- [6] *the magnetosphere*. (2015, desember 12). Retrieved from spof gsfc nasa: <http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/wms1.html>
- [7] Tudor, Z. (2011). Attitude control for the Norwegian student satellite NUTS. In Z. Tudor, *Design and Implementation of Attitude Control for 3-axes Magnetic Coil Stabilization of a Spacecraft* (pp. 23-26). Norwegia.