

Rancang Bangun Rotator Elevasi Satelit Nano untuk *Portable Ground Station*

Hendro Nurhadi^{#1}, Devy Kuswidiastuti^{*2}, Made Yudithia Krisnabayu^{#3}

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya
Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

¹ hdnurhadi@me.its.ac.id

² devy@ee.its.ac.id

³ ydt_uiyoungster@yahoo.co.id

Abstrak

Satelit buatan merupakan teknologi informasi yang hampir disetiap negara membutuhkannya, mulai dari manfaatnya dalam hal informasi seperti komunikasi, cuaca dan lingkungan, keamanan dan batas wilayah hingga bencana alam. Oleh karena itu banyak negara membutuhkan teknologi satelit buatan untuk memenuhi kebutuhan informasi tersebut. Indonesia sebagai negara berkembang telah lama memanfaatkan teknologi satelit buatan ini. Pada tahun 1976, untuk memenuhi akan kebutuhan informasi tersebut, Indonesia membeli satelit buatan dari sebuah perusahaan di negara lain. Kemudian pada tahun 2006, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (*LAPAN*) telah berhasil membuat satelit buatanya sendiri yang diberi nama *INASAT-1*. Untuk mencapai tujuan negara Indonesia sebagai bangsa yang mandiri dalam teknologi satelit, maka kedepannya akan dikembangkan teknologi satelit secara mandiri yakni dengan melibatkan pihak akademisi baik dosen maupun mahasiswa dalam wadah yang disebut *INSPIRE*.

Antena sebagai salah satu komponen dalam sistem komunikasi satelit, digerakan oleh rotator (salah satunya rotator elevasi). Fungsi rotator ini yakni dalam hal mendukung pengiriman dan penerimaan informasi dari dan menuju kendaraan luar angkasa (*spacecraft*) maka dari itu dibutuhkan teknologi penggerak antena yakni rotator dalam mendukung tujuan diatas.

Dalam penelitian ini dirancang sistem mekanika dan sistem kontrol dari rotator satelit nano yang mampu menggerakkan antena secara rotasi terhadap sumbu horizontal (*rotator elevasi*). Untuk tahap awal ini, proses pergerakan rotator dilakukan secara manual (*manual tracking*) terhadap pergerakan satelit. Metode perancangan yang digunakan yaitu memanfaatkan mekanika terapan berupa motor dan roda gigi pada sistem mekaniknya sedangkan pada sistem kontrolnya digunakan metode *close loop* dengan memanfaatkan sensor potensiometer dan mikrokontroler.

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan dan pengujian rotator elevasi ini, didapatkan bahwa ketelitian yang mampu dihasilkan oleh rotator elevasi ini yaitu sebesar 1.5° . Ketelitian tersebut sangat dipengaruhi oleh sensor potensiometer. Oleh karena itu untuk kedepannya jika diinginkan ketelitian rotator yang sangat tinggi maka dibutuhkan ketelitian sensor posisi yang tinggi juga.

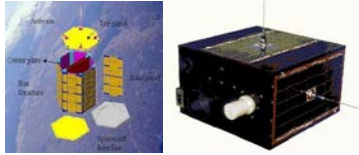
Keywords: satelit, rotator elevasi antena, manual tracking, sistem mekanika, sistem kontrol.

Pendahuluan

Bangsa Indonesia sebagai negara yang berkembang, sangat membutuhkan peranan dan perkembangan teknologi satelit. *LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Negara)* sebagai salah satu lembaga non departemen RI telah melakukan riset dan penelitian mengenai satelit, salah satunya yaitu satelit nano *INASAT-1* yang dibuat dan didesain sendiri oleh Indonesia untuk pertama kalinya. *INASAT-1* merupakan satelit metodologi penginderaan untuk memotret cuaca buatan. Dan setahun berikutnya

pembuatan satelit mikro pertama di Indonesia yakni *Tubsat* yang diorbitkan pada tanggal 10 Januari 2007 dari Pusat Antariksa Satish Dhawan di India. Dimana satelit mikro ini digunakan sebagai pemantauan langsung situasi di Bumi seperti kebakaran hutan, gunung berapi, banjir, menyimpan dan meneruskan pesan komunikasi di wilayah Indonesia, serta untuk misi komunikasi bergerak (*sumber: wordpress.com*). Menurut *Deputi Teknologi Aerospace Lapan ketika itu*, untuk kedepannya riset mengenai satelit nano tidak hanya dilakukan oleh *LAPAN* saja namun akan dilibatkan pihak akademisi seperti dosen dan

mahasiswa di beberapa perguruan tinggi di Indonesia. Melalui suatu wadah organisasi *INSPIRE* (Indonesian Nano-Satellite Platform Initiative for Research & Education) yang terdiri dari dosen dan mahasiswa di beberapa perguruan tinggi di Indonesia, diharapkan Indonesia nantinya mampu menjadi bangsa yang mandiri dari segi teknologi satelit.



Gambar 1. Satelit mikro dan nano pertama buatan LAPAN. (sumber: *lapanrb.org*)

Dalam kesatuan sistem kerjanya, sistem satelit terbagi atas *Space Segment*, *Ground Segment*, *Overall System* (Sumber: R. Elbert “*Sattelite Communication*” 2008). Dimana yang dimaksud dengan *Space Segment* yakni kendaraan luar angkasa (*Spacecraft*) yang diluncurkan untuk bergerak pada orbitnya diluar angkasa. Sedangkan stasiun bumi (*Ground Segment*) memberikan akses komunikasi antara kendaraan luar angkasa (*Spacecraft*) dengan pengguna di bumi. Didalam teknologi satelit, tidaklah cukup hanya melakukan peluncuran kendaraan luar angkasa (*Spacecraft*) dan membangun stasiun bumi saja, tetapi diperlukan *Overall System* yakni bagaimana muatan (*payload*) dari satelit tersebut bisa diterima oleh stasiun bumi melalui antena dan di siarkan menuju pengguna.

Antena sebagai media penerima dan pemancar gelombang radio berperan didalam stasiun bumi. Pada dasarnya antena harus mampu bergerak sesuai dengan arah pergerakan dari kendaraan luar angkasa (*Spacecraft*). Hal ini dikarenakan dengan posisi antena yang tepat mengarah ke manapun satelit bergerak maka muatan (*payload*) atau informasi yang di bawa oleh kendaraan luar angkasa (*Spacecraft*) dapat diterima dengan baik oleh pengguna di bumi. Oleh karena itu diperlukan sistem pendukung pergerakan antena yang baik. Dimana penggerak antena tersebut menggunakan mekanisme motor yang biasa disebut dengan rotator. Untuk pergerakan antena dengan sistem 2 bua h sumbu, digunakan dua jenis rotator yakni rotator elevasi dan rotator azimuth. Rotator elevasi mampu bergerak 180⁰ terhadap sumbu arah horizontal sedangkan rotator azimuth bergerak 360⁰ terhadap sumbu arah vertikal.

Dari tujuan yang disampaikan oleh petinggi LAPAN diatas maka untuk mewujudkan bangsa Indonesia yang mandiri akan teknologi satelit, maka penulis ingin merancang sebuah rotator khususnya rotator elevasi yang mampu mendukung pergerakan antena agar selalu bergerak menghadap kendaraan luar

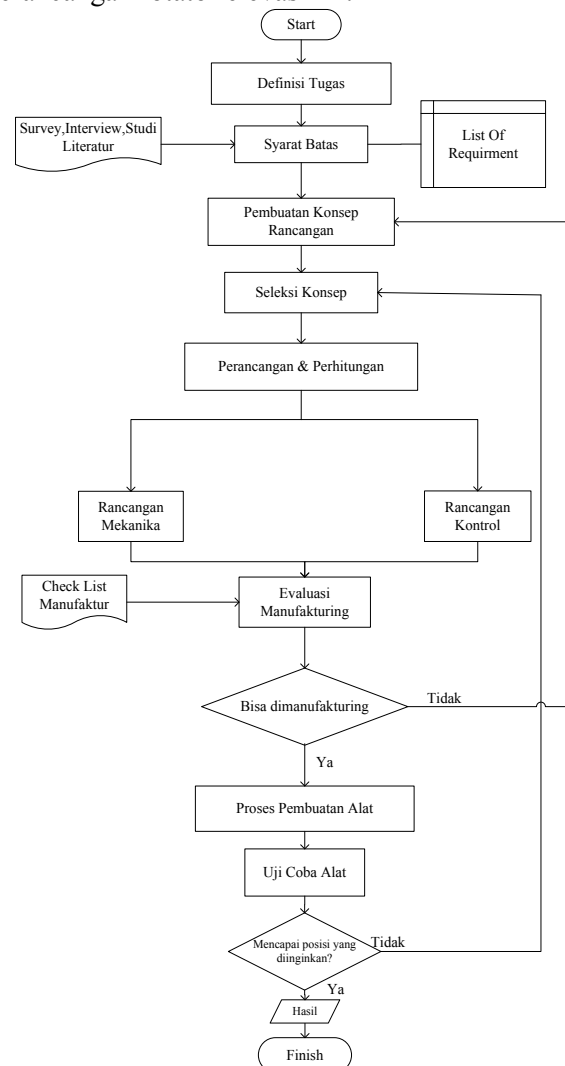
angkasa (*Spacecraft*) sehingga seluruh informasi yang dibawa dapat diterima oleh pengguna di bumi. Selain itu perancangan rotator ini dikhususkan akan diaplikasikan pada sistem stasiun bumi yang *portable*. *Portable ground station* yang dimaksud disini ialah sistem stasiun bumi yang memiliki fungsi yang sama pada stasiun bumi lainnya hanya saja stasiun bumi ini tidaklah menetap disuatu tempat melainkan dapat berpindah tempat (*mobilisasi*). Sehingga perlu dirancang juga rotator yang dapat mendukung stasiun bumi yang *portable* dan berdasarkan parameter-parameter satelit nano yang ingin di kembangkan oleh LAPAN dan akademisi Indonesia pada stasiun bumi.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Didalam melakukan perancangan rotator elevasi ini dilakukan dengan mengikuti proses perancangan sebagai berikut.

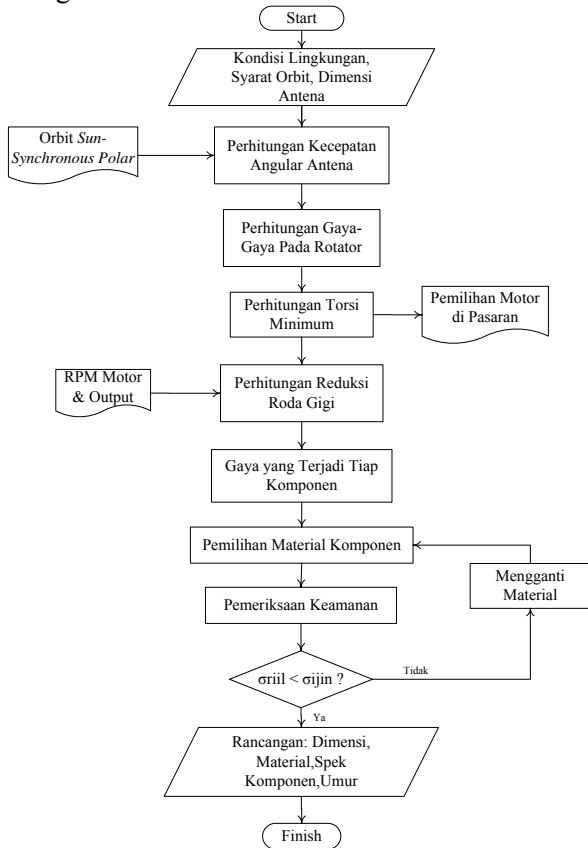
a. Diagram Alir Perancangan

Berikut ini akan ditunjukkan diagram alir dalam perancangan rotator elevasi ini:



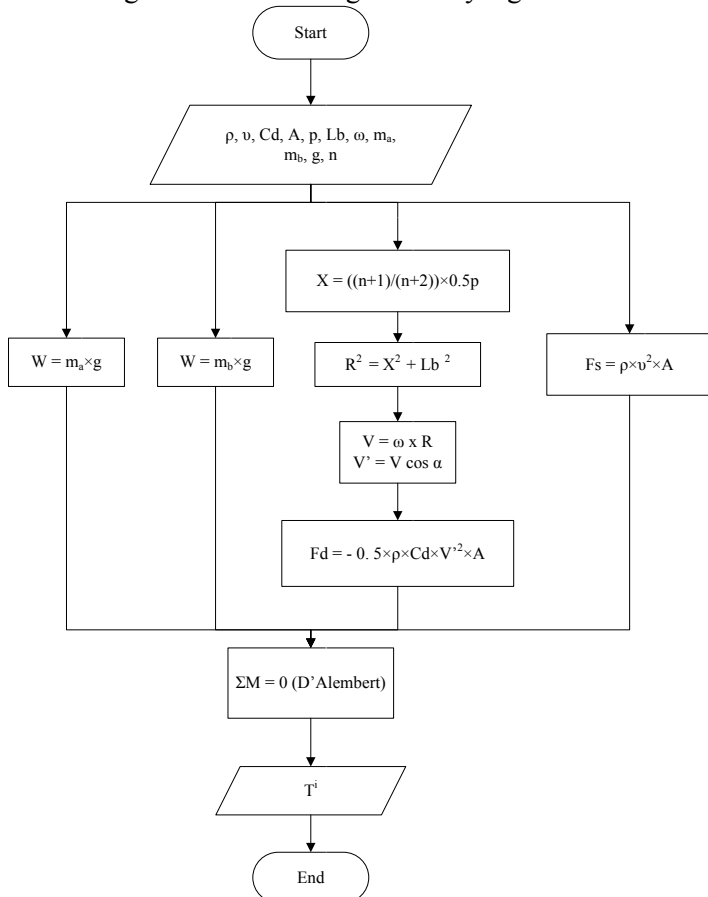
Gambar 2. Diagram Alir Rancang Bangun Rotator Elevasi.

b. Diagram Alir Desain Mekanika Rotator Elevasi



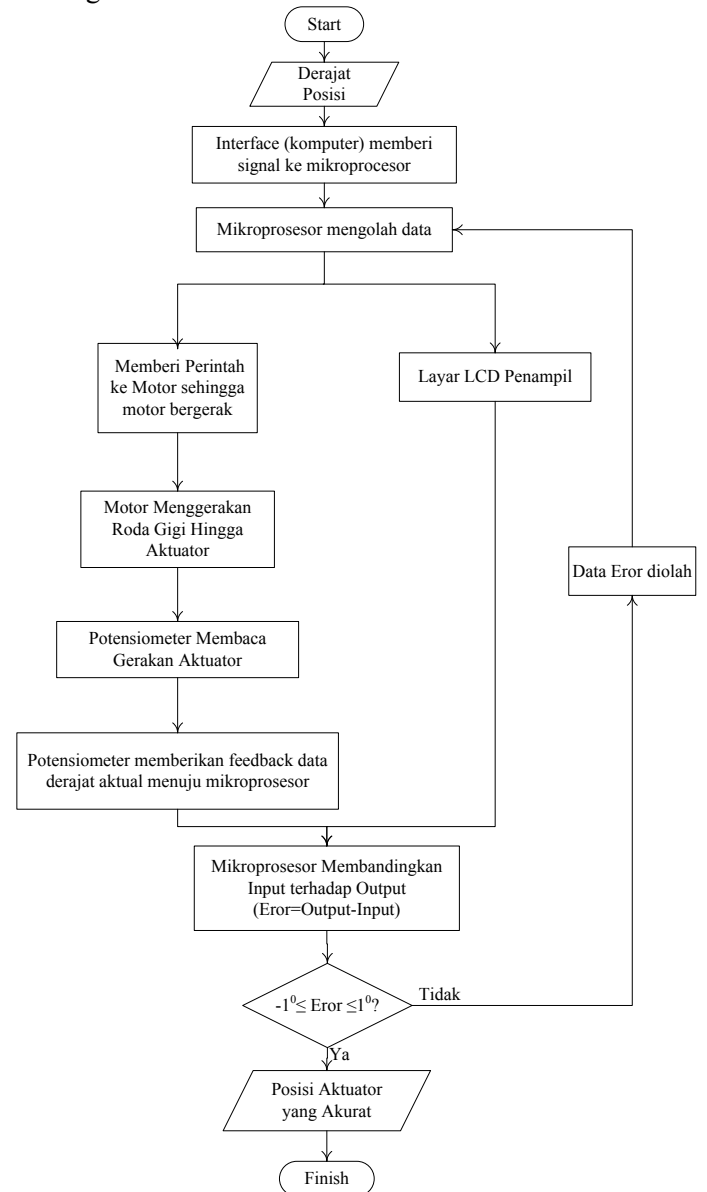
Gambar 3. Diagram Alir Perancangan Desain Mekanika.

c. Diagram Alir Perhitungan Torsi yang Dibutuhkan



Gambar 4. Diagram alir perhitungan torsi.

d. Diagram Alir Desain Kontrol Rotator Elevasi



Gambar 5. Diagram Alir Perancangan Desain Kontrol Rotator Elevasi.

Proses perancangan rotator elevasi ini pada umumnya akan mengikuti tahapan-tahapan pada diagram alir yang diberikan pada gambar 2. Selanjutnya untuk proses perancangan desain mekanika, perhitungan torsi motor minimum maupun desain kontrol dilakukan berdasarkan diagram alir yang diberikan pada gambar 3, gambar 4 dan gambar 5 diatas.

Hasil dan Pembahasan

a. Perhitungan Rancangan Mekanika

Seperti diagram alir yang telah dipaparkan sebelumnya, dalam merancang rotator elevasi ini dilakukan beberapa perhitungan. Untuk mengetahui berapa torsi motor yang dibutuhkan agar rotator mampu menggerakkan antenna sesuai dengan yang diinginkan, maka dilakukan perhitungan torsi tersebut berdasarkan data parameter-parameter seperti yang

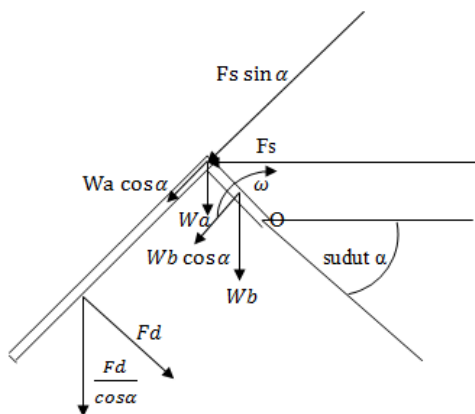
ditampilkan melalui tabel berikut ini.

Tabel 1. Parameter satelit IiNUSAT.

Parameter	Nilai
<u>Orbit</u>	
Semi-major axis (km)	7071
Inclination (derajat)	98.2
Eccentricity	0
Altitude (km)	700
Orbital periode (menit)	98.63
Orbit velocity (km/s)	7.5
Groundtrack velocity (km/s)	6.765
<u>Atmosphere Related</u>	
Atmosphere density:	
Mean (kg/m ³)	2.36E-14
Maximum (kg/m ³)	2.73E-13

(Sumber: Preliminary design of IiNUSAT)

Data parameter tersebut digunakan dalam hal melakukan perhitungan kecepatan angular satelit ketika melewati Indonesia, gaya-gaya yang terjadi pada antenna yang nantinya dari gaya tersebut bisa didapatkan besar torsi yang dibutuhkan. Untuk pemilihan jenis motor yang digunakan pada rotator ini bisa dilakukan dengan berpatokan pada harga torsi minimum yang telah dihitung tersebut. Didalam perhitungan torsi tersebut dianalisa dengan *freebody diagram* sebagai berikut:



Gambar 6. Freebody diagram gaya-gaya yang terjadi pada antenna satu sisi saja.

Gaya-gaya yang terjadi pada *freebody diagram* diatas dianalisa pada antenna mikrostrip yang akan dipasang pada rotator elevasi. Dimana sudut kemiringan yang dipakai pada perhitungan ialah posisi dimana akan terjadi akumulasi gaya-gaya maksimum yang mungkin pada antenna.

$$\Sigma M = 0 \text{ (Persamaan D'Alembert benda kaku)}$$

$$W_a \left(b + \frac{a}{2} \right) \cos \alpha + W_b \left(\frac{b}{2} \right) \cos \alpha + F_s b \sin \alpha + 2 \times \frac{F_d R}{\cos \alpha} - T^i = 0$$

Untuk mendapatkan harga sudut α dimana nantinya akan menghasilkan nilai T^i terbesar dapat dilakukan dengan mencari turunan pertama dari persamaan diatas.

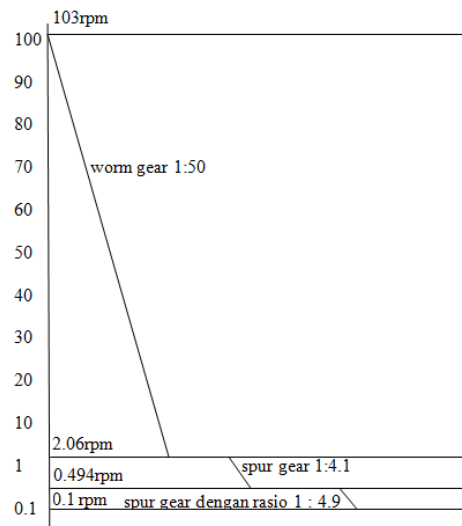
$$\frac{df(\alpha)}{d\alpha} = 0$$

Untuk penyelesaian persamaan diatas, dimana diinginkan mendapatkan nilai α dibantu dengan menggunakan program MATLAB untuk mempermudah penyelesaiannya. Adapun teori yang digunakan yakni teori *newton raphson* untuk mendapatkan akar-akar persamaannya.

Tabel 2. Hasil perhitungan.

Variabel yang dihitung	Nilai
Kecepatan angular aktuator	0.1 Rpm
Drag Force (Fd)	1.76E-07 N
Surface Force (Fs)	5.3 N
Gaya akibat berat antenna	9.8 N
Gaya akibat berat penyangga antenna	2.45 N
Torsi minimum	1.37 Nm

Untuk mendapatkan kecepatan angular pada aktuator dalam hal ini antenna, dibutuhkan sumber penggerak dengan torsi minimum sebesar 1.37 Nm dan dengan kecepatan angular yang besarnya sama dengan aktuator 0.1 rpm. Akan tetapi sedikit sulit untuk mendapatkan sumber penggerak dengan spesifikasi tersebut, karena pada umumnya motor dengan harga torsi 1.37 memiliki kecepatan putar jauh diatas 0.1 rpm. Maka dari itu dibutuhkan mekanisme roda gigi reduksi. Berdasarkan jenis motor yang telah dipilih pada desain rotator elevasi ini yakni motor DC *GM32-Series* dengan spesifikasi jumlah putaran yang dihasilkan sebesar 103 rpm. Maka dari itu perlu dirancang roda gigi reduksi agar dapat mentransmisikan putaran motor sebesar 103 rpm menjadi 0.1 rpm. Adapun rancangannya sebagai berikut:



Gambar 7. Diagram reduksi kecepatan.

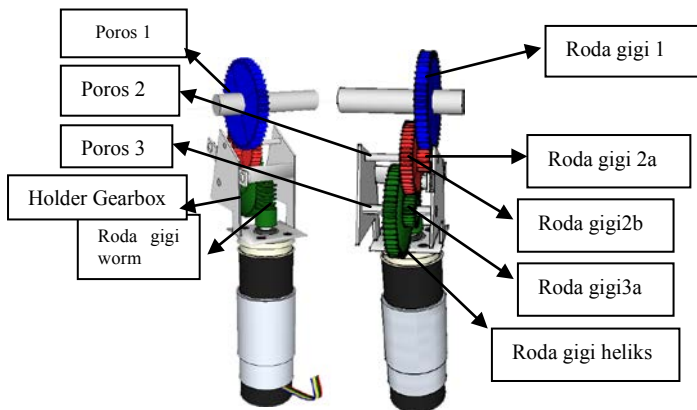
Tabel 3. Hasil perancangan roda gigi dan material amannya.

Roda Gigi	Material	Jumlah gigi
Spur gear1	VCN 150 <i>case hardened</i>	54
Spur gear2a	VCN 150 <i>case hardened</i>	11
Spur gear2b	VCN 150 <i>case hardened</i>	50
Spur gear3a	VCN 150 <i>case hardened</i>	12
Helix	Cast Iron	50
Worm	VCN 150	single

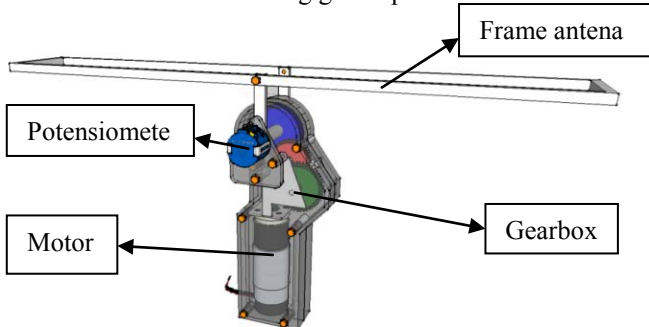
Selain merancang roda gigi, tentunya juga dirancang poros dan bantalannya guna mendapatkan desain mekanika yang aman dalam jangka waktu kerja yang diinginkan. Berikut hasil perancangan poros dan bantalannya.

Tabel 4. Hasil perancangan poros dan material amannya serta jenis bantalannya.

Poros	Sisi	Jenis Bantalan
Poros 1 (1.5 cm) (AISI 1010 HR)	Kiri	<i>single row deep groove ball bearing</i>
	Kanan	<i>single row deep groove ball bearing</i>
Poros 2 (5 mm) (AISI 1010 HR)	Kiri	<i>single row deep groove ball bearing</i>
	Kanan	<i>single row deep groove ball bearing</i>
Poros 3 (4 mm) (AISI 1010 HR)	Kiri	<i>single row deep groove ball bearing</i>
	Kanan	<i>single direction thrust ball bearing</i>



Gambar 8. Susunan roda gigi dan poros rotator elevasi.



Gambar 9. Hasil desain 3D rotator elevasi.

b. Sistem Kontrol Rotator

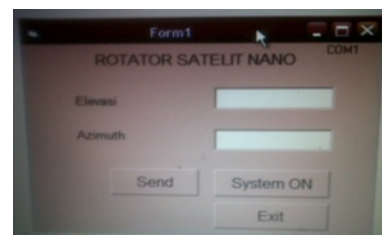
Komponen elektronik yang dipakai pada sistem kontrol ini meliputi motor DC, sensor potensiometer,

rangkaian relay sebagai driver motor, mikrokontroler ATMEGA 8535, layar LCD dan power supply.

c. Uji Unjuk Kerja Rotator Elevasi

Sebelum dilakukan pengujian pada rotator ini, perlu dilakukan semacam kalibrasi pada sistem kontrol termasuk sensor potensiometer pada aktuator. Proses ini dilakukan untuk menentukan berapa ketelitian sistem kontrol rotator ini. Proses ini dapat dilakukan dengan cara menjalankan program pada mikrokontroler untuk mendapatkan data-data dari pergerakan antenna pada posisi nol derajat hingga pada posisi 180°. Proses ini bisa diamati pada layar lcd, dimana pada layar tersebut akan muncul angka tertentu mulai dari posisi antenna 0° kemudian angka tersebut akan terus bertambah seiring dengan perpindahan posisi dari antenna. Angka tersebut merupakan suatu bilangan yang berasal dari signal analog yang dihasilkan sensor potensiometer ketika potensiometer berputar. Hal tersebut dapat terjadi karena karakteristik dari potensiometer sendiri, dimana hambatan pada potensiometer akan berubah seiring dengan pergeseran tuas pada potensiometer secara angular (*untuk potensiometer tipe angular*). Adapun dari hasil pengujian didapatkan pada posisi nol derajat dengan data analog sebesar 100 sedangkan pada posisi 180° didapatkan data analog sebesar 220 sehingga selisih dari keduanya didapat sebesar 120. Kemudian perhitungan ketelitian dari sensor ini dapat dilakukan dengan cara membagi 180° dengan selisih data analog sebesar 120 sehingga akan didapat ketelitian dari sensor ini sebesar 1.5°.

Untuk langkah pengujian selanjutnya rotator ini dilakukan dengan cara memasukan inputan posisi derajat elevasi yang diinginkan pada program *visual basic* seperti yang ditunjukkan pada tampilan dibawah ini. Pada kolom elevasi masukan data derajat kemudian langkah selanjutnya adalah tekan kotak "send". Dengan menekan kotak "send" ini maka pada layar lcd kontrol akan muncul posisi derajat elevasi yang diinginkan. Langkah berikutnya ialah menekan kotak "system on" dimana dengan menekan kotak ini maka melalui bahasa pemograman akan memerintah mikrokontroler untuk memberikan signal menuju rangkaian relay(*driver motor*) dan akhirnya akan memberikan tegangan pada motor sehingga motor akan berputar.



Gambar 10. Tampilan program visual basic untuk running rotator.



Gambar 11. Rangkaian relay sebagai driver motor.

Pada tahap motor bergerak, maka pada tampilan *lcd* kontrol akan muncul posisi dari aktuator rotator dalam satuan derajat, posisi ini dapat diketahui karena sistem sensor potensiometer yang telah dipasang pada *hardware*. Pada tahap ini mikrokontroler akan membandingkan posisi derajat aktuator dengan data derajat yang diinputkan. Ketika derajat yang diinginkan pada inputan telah sama dengan posisi derajat pada aktuator maka mikrokontroler akan segera memutuskan signal yang disalurkan menuju rangkaian relay dengan demikian tegangan menuju motor akan mati dan akhirnya motor akan mati. Namun jika saja terjadi posisi yang sedikit bergeser pada aktuator dimana akan ada selisih antara aktuator dengan inputan data yang diterima mikrokontroler, maka mikrokontroler akan memberi signal lagi menuju rangkaian relay, apakah untuk memutar motor menuju arah *cw* atau *ccw* agar posisi dari aktuator tepat menunjukkan posisi sesuai data inputan yang diinginkan.

Adapun untuk mengetahui apakah aktuator telah bergerak menuju posisi yang diinginkan, dapat diamati dengan melihat posisi batang penyangga antena pada busur derajat yang telah dipasang pada *hardware*, berikut gambarnya pada gambar 12 berikut:



Gambar 12. Penempatan busur derajat pada hardware sebagai visualisasi posisi sudut antena

Untuk proses pengambilan dan pengolahan data pada pengujian *performance* rotator ini diambil tiga buah *sample* sudut dengan masing-masing sudut dilakukan pengambilan data sebanyak 5 kali pengambilan data. Selanjutnya dengan melihat hasil pergerakan yang terjadi melalui busur derajat yang telah dipasang pada rotator ini akan didapat eror yang terjadi antara inputan dengan output pada aktuator. Dari seluruh pengambilan data tersebut akan dicari eror,

range eror, eror maksimum, eror minimum dan rata-rata eror yang terjadi. Adapun selama pengujian didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil pengujian eror pada 3 buah sample.

No	Sudut (derajat)								
	Sample 1 (10^0)			Sample 2 (60^0)			Sample 3 (135^0)		
	in	Out	Eror	in	out	Eror	in	out	Eror
1	10^0	10^0	0^0	60^0	61^0	1^0	135^0	136^0	1^0
2	10^0	9^0	1^0	60^0	61^0	1^0	135^0	136^0	1^0
3	10^0	10^0	0^0	60^0	58^0	2^0	135^0	137^0	2^0
4	10^0	11^0	1^0	60^0	59^0	1^0	135^0	136^0	1^0
5	10^0	10^0	0^0	60^0	59^0	1^0	135^0	136^0	1^0

Dari hasil pengujian dengan 3 buah sample tersebut didapatkan pula hasil eror maksimum, eror minimum, range eror dan average eror sebagai berikut:

- Eror maksimum : 2^0
- Eror minimum : 0^0
- Range Eror : $0^0 - 2^0$
- Average eror : 0.933^0

* Pengambilan data diatas dilakukan dengan visualisasi pada alat ukur dengan akurasi alat ukur derajat yang digunakan sebesar 1^0

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian rotator elevasi portable ini baik itu dari sistem mekanis maupun sistem kontrol dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Berdasarkan hasil pengujian, didapat bahwa ketelitian dari rotator ini didapat sebesar 1.5^0 . Hal yang paling berpengaruh atas ketelitian rotator ini ialah sensor potensiometer. Apabila semakin lebar bacaan hambatan yang dimiliki oleh potensiometer ini maka bilangan sebagai pembagi putaran sebesar 180^0 akan semakin besar juga, dengan demikian akan didapat ketelitian rotator yang akan semakin tinggi. Secara keseluruhan dengan eror sampai sebesar 1.5^0 ini masih memungkinkan berlangsungnya proses pengiriman informasi dari dan menuju *spacecraft* dengan baik, hal ini dikarenakan oleh antena yang digerakan oleh rotator elevasi satelit nano ini ialah jenis antena *mikrostrip*.
- Pada sistem kontrol rotator elevasi satelit nano ini menggunakan komponen elektrik yakni motor DC, driver motor berupa rangkaian 2 buah relay 12 V, sensor potensiometer, power supply 10 V, mikrokontroler jenis ATMEGA 8535 dengan keunggulan berupa memori yang

relatif besar dan terdapat port analog yang bisa digunakan untuk data sensor potensiometer, layar LCD yang digunakan sebagai tampilan inputan dan output yang terjadi, serta rangkaian resistor dan transistor tambahan untuk menghubungkan mikrokontroler dengan relay 12V. Dengan rangkaian tersebut, rotator antena elevasi ini sudah dapat di kontrol sesuai posisi derajat yang diinginkan. Pada kenyataannya sistem kontrol ini sangat signifikan sekali dalam menentukan posisi yang presisi sesuai dengan yang diinginkan terutama dari segi komponen sensor dan bahasa pemrogramannya.

- c. Gaya yang bekerja pada mekanisme rotator penggerak antena ini berupa gaya hambat, gaya permukaan akibat tekanan angin, gaya berat antena dan frame, gaya berat batang penyangga dan gaya hambatan dimana masing-masing bernilai 1.76×10^{-7} N, 5.3N, 9.8N, 2.45N. Pada perhitungan gaya-gaya pada mekanisme didapat torsi yang terjadi ialah 1.37 Nm pada saat antena berada pada posisi sudut 25.25° dari sumbu horizontal. Posisi tersebut didapat berdasarkan perhitungan dengan menggunakan *MATLAB* yakni melalui persamaan *newton raphson*. Untuk harga torsi tersebut, motor dc dengan jenis GM 320051 series ini mampu mengatasi beban yang ditanggung antena, dimana berdasarkan *datasheet* motor DC jenis ini diketahui bahwa memiliki torsi sebesar 2.2 Nm.

- R jarak pusat gaya terhadap pusat putar rotator (m)
O pusat putar antena
Lb panjang desain batang penyangga antena (m)
n (1,2,3,...)
V' proyeksi kecepatan gaya hambatan (m/s)

Referensi

- Achmad, Azis.1996. *Diktat Kuliah Dinamika Teknik*. Jurusan Teknik Mesin ITS: Surabaya
Berata, Wayan.1994. *Diktat Elemen Mesin*. Jurusan Teknik Mesin ITS : Surabaya
Deutschman, D. 1975. *Machine Design Theory and Practice*. Macmillan Publisher Co, inc: USA
Fox & MacDonalds. 1998. *Introduction To Fluid Mechanics*. Jhon Wiley& Sons, Inc: USA
INSPIRE,iiNUSAT-01. 2010. *Preliminary Design Review*. Indonesia:Surabaya
Gill Eberhard. 2005. *Satellite Orbits*. Springer Berlin Heidelberg: New York
J Louis. 2009. *Satellite Communications System Engineering*. Jhon Wiley& Sons, Inc: USA
Jhonson. C. *Process Control Instrumentation Technology*. Jhon Wiley& Sons, Inc: USA
R Bruce. 2008. *Introduction To Satellite Communication*. Artech House, Inc:Norwoos

Nomenklatur

- α sudut yang dibentuk oleh antena dan sumbu horizontal pada saat menghasilkan torsi maksimum
 F_s gaya permukaan yang timbul akibat angin sekitar (N)
 F_d gaya hambatan yang terjadi akibat antena yang bergerak (N)
a tebal antena dan frame (m)
b panjang batang penyangga antena (m)
M moment (Nm)
 T^i torsi inersia yang timbul (Nm)
 W_a berat antena dan frame (kg)
 W_b berat batang penyangga (kg)
R jarak gaya hambatan terhadap pusat putar antena (m)
 ρ massa jenis udara (1.23 Kg/m^3)
Cd coeffisien of drag ($Cd = 1.28 \rightarrow$ bidang kontak berupa *flat plate*)
A bidang luasan antena (m^2)
V kecepatan translasi antena (m/s)
v kecepatan angin rata-rata di Indonesia (m/s)
A luasan permukaan benda (m^2)
p panjang antena (m)
x jarak pusat gaya terhadap antena (m)