



TESIS - TF185471

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL
DISPLACEMENT PADA *EARTHQUAKE SHAKING*
TABLE BERPENGGERAK *BALLSCREW LINEAR*
GUIDE ACTUATOR BERBASIS ALGORITMA
BRESENHAM DAN PENGENDALI PROPORSIONAL**

**HALIMATUS SA'DIYAH
NRP. 023117 5001 2003**

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - TF185471

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL
DISPLACEMENT PADA *EARTHQUAKE SHAKING*
TABLE BERPENGERAK *BALLSCREW LINEAR*
GUIDE ACTUATOR BERBASIS ALGORITMA
BRESENHAM DAN PENGENDALI PROPORSIONAL**

HALIMATUS SA'DIYAH
NRP. 023117 5001 2003

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



THESIS - TF185471

***DESIGN OF DISPLACEMENT CONTROL SYSTEM
ON EARTHQUAKE SHAKING TABLE DRIVEN BY
BALLSCREW LINEAR GUIDE ACTUATOR BASED
ON BRESENHAM ALGORITHM AND
PROPORTIONAL CONTROLLER***

**HALIMATUS SA'DIYAH
NRP. 023117 5001 2003**

**Supervisor:
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.**

**MASTER PROGRAM
ENGINEERING INSTRUMENTATION OF INDUSTRIAL EXPERTISE
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Halimatus Sa'diyah
NRP : 02311750012003
Departemen : Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

dengan ini menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul **“Rancang Bangun Sistem Kontrol *Displacement* pada *Earthquake Shaking Table* Berpenggerak *Ballscrew Linear Guide Actuator* Berbasis Algoritma *Bresenham* dan *Pengendali Proporsional*”** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 28 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Halimatus Sa'diyah

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister
Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HALIMATUS SA'DIYAH
NRP. 02311750012003

Tanggal Ujian: 13 Juli 2020
Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:

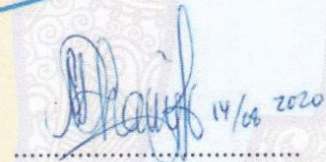
Pembimbing:

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.
NIP. 19620822 198803 1 001

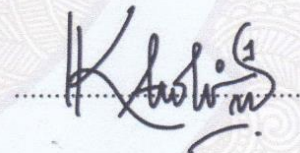


Penguji:

1. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.
NIP. 19731007 199802 1 001



2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIP. 19760523 200012 2 001



Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL *DISPLACEMENT* PADA *EARTHQUAKE SHAKING TABLE* BERPENGERAK *BALLSCREW LINEAR GUIDE ACTUATOR* BERBASIS ALGORITMA BRESENHAM DAN PENGENDALI PROPORSIONAL

Nama Mahasiswa : Halimatus Sa'diyah
NRP : 02311750012003
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

ABSTRAK

Earthquake Shaking Table (EST) merupakan salah satu alat yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu struktur bangunan terhadap gerakan gempa. EST yang digunakan diseluruh dunia memiliki penggerak yang berbeda-beda, dimulai dari EST satu sumbu, dua sumbu (*bi-axial*) hingga banyak sumbu penggerak (*multi-axial*). Saat ini, banyak dikembangkan EST dengan input berupa data gempa dan kemampuan penggerak yang sangat presisi mendapatkan gerakan gempa yang akurat. Pada tesis ini, dirancang sebuah EST dengan penggerak dua sumbu aktuator berbasis *Ball Screw Linear Guide Actuator* dan dapat menghasilkan gerakan dengan pola yang sesuai dengan input dari gerakan gempa tersebut. Perancangan sistem EST ini dibantu dengan menggunakan pemodelan dari perangkat keras secara empiris menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan untuk memodelkan perilaku dari kedua aktuator tersebut. Kemudian baik model maupun hardware ditanamkan algoritma untuk kontrol menggunakan pengendali Proporsional dan penentuan koordinat *trajectory* dengan menggunakan algoritma Bressenham dengan tujuan agar kedua penggerak dapat bergerak secara sinkron menuju titik koordinat yang telah ditentukan. Hasil dari pengujian performansi menggunakan *Integral Absolute Error* (IAE) terhadap 4 pola gerakan yaitu : gerakan dengan pola garis lurus gradien 3/5, pola ellips, pola lingkaran, pola dan gerakan *lissajous*, didapat persentase error IAE terbesar untuk model tanpa menggunakan pengendali dihasilkan pada pengujian input *lissajous*, dengan IAE posisi X dan Y model EST yang semula adalah 9,267% dan 23,558%, sementara untuk model dengan menggunakan pengendali didapatkan penurunan error terbesar terjadi pada pengujian dengan input elips, dengan IAE model EST yang semula adalah 0,925% dan 0,424% menjadi 0,2% dan 0,1638%. Pengujian data gempa pada hardware juga dilakukan, dan didapatkan error sebesar 12,29% untuk sumbu X dan 18,625 % untuk sumbu Y terhadap frekuensi data gempa asli.

Kata kunci: Algoritma Bressenham, *Ball screw Linear Guide Actuator*, *Earthquake Shaking Table*, Pengendali Proporsional

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF DISPLACEMENT CONTROL SYSTEM ON EARTHQUAKE SHAKING TABLE DRIVEN BY BALLSCREW LINEAR GUIDE ACTUATOR BASED ON BRESENHAM ALGORITHM AND PROPORTIONAL CONTROLLER

By : Halimatus Sa'diyah
Student Identity Number : 02311750012003
Supervisor : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

ABSTRACT

Earthquake Shaking Table (EST) is one of the tools used to test the strength of a building structure against earthquake movements. ESTs used throughout the world have different movers, starting from one-axis, two-axis (bi-axial) ESTs to multiple (multi-axial) axes. Currently, many ESTs are developed with input in the form of earthquake data and a very precise driving ability to obtain accurate earthquake movements. In this thesis, an EST with two-axis actuator-based Ball Screw Linear Guide Actuator is designed and can produce movements in a pattern that matches the input of the earthquake motion. The design of this EST system is assisted by using modeling of hardware empirically using Artificial Neural Networks to model the behavior of the two actuators. Then both the model and the hardware are implanted algorithms for control using the Proportional controller and the determination of the trajectory coordinates using the Bresenham algorithm with the aim that the two movers can move synchronously to the predetermined coordinates. The results of performance testing using Integral Absolute Error (IAE) on 4 motion patterns, namely: motion with a straight line gradient pattern 3/5, ellipse pattern, circle pattern, lissajous pattern and movement, obtained the largest IAE error percentage for the model without using a controller generated at lissajous input testing, with IAE position X and Y EST models which were originally 9.267% and 23.558%, while for models using controllers found the greatest error reduction occurred in testing with elliptical input, with IAE EST models that were originally 0.925% and 0.424% to 0.2% and 0.1638%. Earthquake data testing on hardware is also done, and an error of 12.29% for the X-axis and 18.625% for the Y-axis of the original earthquake data frequency is obtained.

Keywords: Ball screw Linear Guide Actuator, Bresenham algorithm, Earthquake Shaking Table, Proportional control

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah atas karunia Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, atas terselesaikannya tesis dengan judul “*Rancang Bangun Sistem Kontrol Displacement Pada Earthquake Shaking Table Berpenggerak Ballscrew Linear Guide Actuator Berbasis Algoritma Bresenham dan Pengendali Proporsional*”. Berbagai motivasi dan bantuan materil maupun non-materil telah diterima penulis selama melaksanakan Tesis. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih terutama kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika.
2. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. yang telah memberikan kesempatan pada penulis untuk melakukan penelitian tesis dibawah bimbingan beliau. Penulis berterima kasih atas bantuan, saran, dukungan, dan motivasi dari beliau selama mengerjakan tesis ini sampai selesai.
3. Bapak Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng. dan Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. sebagai dosen penguji yang telah memberikan umpan balik dan saran selama penelitian berlangsung.
4. Ibu Dr. Ing Doty Dewi Risanti, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah memberikan motivasi dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan pascasarjana.
5. Kedua orang tua, ibu mertua, suami dan saudara-saudara yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan secara moril, materil, maupun spiritual.
6. Segenap staf akademik maupun non-akademik Departemen Teknik Fisika ITS yang secara administratif membantu penulis selama proses studi magister serta dalam pengerjaan tesis.
7. Tim penelitian *Earthquake Shaking Table*, Murry Raditya, Fachrul Rizal, Dino, Wildan, Dana, Wima dan Halen yang telah menjadi teman diskusi sejak perencanaan dan pengerjaan penelitian ini
8. Seluruh teman-teman Pascasarjana Teknik Fisika FTI ITS.
9. dan segala pihak yang tidak dapat penulis sebut satu-persatu.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa laporan tesis ini tidak sempurna. Sehingga kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan laporan tesis ini sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, 28 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Perkembangan <i>Earthquake Shaking Table</i>	7
2.1.1 Persyaratan <i>Earthquake Shaking Table</i>	7
2.1.2 <i>State of The Art Earthquake Shaking Table (EST)</i>	10
2.2 <i>Ball screw Linear Guide Actuator</i> FUYU FLS80.....	12
2.3 Algoritma Bresenham	14
2.4 Pengendali P, PI, PD dan PID	16
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Pemodelan <i>Earthquake Shaking Table</i> Menggunakan JST	31
3.1.1 Pemodelan Meja 1 Menggunakan JST	36
3.1.2 Pemodelan meja 2 menggunakan JST	40
3.1.3 Model EST Menggunakan JST	42
3.2 Perancangan Sistem Kontrol	43
3.3 Perancangan Hardware	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Hasil Pengujian Model EST	54
4.2 Hasil Pengujian Model Sistem Kontrol.....	64

4.3 Pengujian Hardware.....	74
4.4 Hasil Pengujian Menggunakan Input Data Gerakan Gempa.....	87
4.5 Pembahasan	91
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	97
5.1 Kesimpulan.....	97
5.2 Saran	98
DAFTAR PUSTAKA.....	99
DAFTAR LAMPIRAN	103
BIODATA PENULIS.....	171

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	FUYU Ballscrew Linear Guide Actuator tipe FLS80	12
Gambar 2.2	Stepping Driver Model FMDD50D40NOM	13
Gambar 2.3	Blok diagram pengendali proporsional (Ogata, 1997)	17
Gambar 2.4	(a) Diagram blok pengendali Proporsional-Integral; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input unit-step dan output pengendali (Ogata, 1997)	19
Gambar 2.5	(a) Diagram blok pengendali Proporsional-Derivatif; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input unit-ramp dan output pengendali (Ogata, 1997)	20
Gambar 2.6	(a) Diagram blok pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID); (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input unit-ramp dan output pengendali (Ogata, 1997)	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	28
Gambar 3.2	Skema sistem EST dua sumbu secara keseluruhan	29
Gambar 3.3	Skema EST dua sumbu tampak samping	30
Gambar 3.4	Diagram alir pemodelan sistem menggunakan JST	32
Gambar 3.5	Skema Jaringan Syaraf Tiruan.....	36
Gambar 3.6	Model meja dengan variasi 4 hidden neuron.....	38
Gambar 3.7	Diagram blok model EST.....	43
Gambar 3.8	Diagram blok sistem kontrol displacement	44
Gambar 3.9	Blok diagram kontroler proporsional	44
Gambar 3.10	Diagram alir algoritma Bresenham.....	46
Gambar 3.11	Blok fungsi Bresenham pada Simulink	47
Gambar 3.12	Hasil pengujian fungsi Bresenham. (a) titik piksel perpindahan (b) model garis perpindahan.....	47
Gambar 3.13	Pergerakan aktuator secara sekuensial.	48
Gambar 3.14	Pergerakan kotak dengan menggunakan algoritma Bresenham ..	49
Gambar 3.15	Blok diagram sistem hardware secara keseluruhan.....	51
Gambar 3.16	Blok diagram MCU	52
Gambar 3.17	Sistem Hardware setelah dirancang.....	52

Gambar 4.1	EST dua sumbu dengan penggerak ball screw linear guide actuator (a) tampak atas (b) tampak samping	53
Gambar 4.2	Hasil pengujian model EST dengan input gerak garis gradien 3/5	55
Gambar 4.3	Hasil pengujian model EST dengan input gerak elips	58
Gambar 4.4	Hasil pengujian model EST dengan input gerak lingkaran	60
Gambar 4.5	Hasil pengujian model EST dengan input gerak lissajous.....	62
Gambar 4.6	Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak garis lurus gradien 3/5	65
Gambar 4.7	Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak elips	69
Gambar 4.8	Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak lingkaran	70
Gambar 4.9	Hasil pengujian model EST dengan input gerak lissajous.....	71
Gambar 4.10	Contoh pengukuran tegangan output dari dc-dc converter	74
Gambar 4.11	Titik Pengukuran (TP) yang diukur pada sistem hardware	75
Gambar 4.12	Hasil pengujian hardware menggunakan input garis gradien 3/5, dengan (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham tanpa pengendali Proporsional, dan (c) dengan Bresenham dan pengendali proporsional	77
Gambar 4.13	Hasil pengujian hardware menggunakan input elips, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional	80
Gambar 4.14	Hasil pengujian hardware menggunakan input lingkaran, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional	83
Gambar 4.15	Hasil pengujian hardware menggunakan input lissajous, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional	86
Gambar 4.16	Data displacement gempa bumi (CESMD, 2007).....	88

Gambar 4.17 Hasil pergerakan meja pada (a) sumbu X dan (b) sumbu Y..... 89

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Spesifikasi FUYU FLS80	13
Tabel 2.2 Konfigurasi Microstepping FMDD50D40NOM	14
Tabel 3.1. Data posisi meja 1 dengan input percepatan 50000 step/s ² , kecepatan input 50000 step/s dan posisi dalam step yang diubah-ubah.....	34
Tabel 3.2 Data posisi meja 2 dengan percepatan input 50000 step/s ² dan kecepatan input 50000 step/s dan posisi dalam step yang diubah-ubah.....	35
Tabel 3.3 Hasil pengujian model meja 1.....	38
Tabel 3.5 Hasil pengujian model meja 2.....	41
Tabel 3.6. Hasil perbandingan output model meja 2 dan sistem real meja 2.....	42
Tabel 3.7 Pergerakan titik koordinat menggunakan algoritma bresenham	49
Tabel 3.8 Perubahan koordinat menjadi perpindahan dalam step.....	49
Tabel 4.1 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian input Gradien 3/5	56
Tabel 4.2 Hasil perhitungan gradien dan error gradien output model EST	57
Tabel 4.3 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pengujian Elips ...	59
Tabel 4.4. Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pengujian Lingkaran.....	61
Tabel 4.5 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian lissjaous	63
Tabel 4.6 Output model EST dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gerak gradien 3/5.....	66
Tabel 4.7 Hasil perhitungan gradien dan error gradien output model EST dengan pengendali Proporsional	67
Tabel 4.8 Hasil perhitungan persentase IAE pada setiap sumbu	72
Tabel 4.9 Hasil pengukuran TP pada sistem hardware	75
Tabel 4.10 Hasil Pengujian sensor Laser PING dan KRISBOW Laser Meter	76
Tabel 4.11 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gradien 3/5	79
Tabel 4.12 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gerak elips.....	82

Tabel 4.13 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali	
Proporsional pada pengujian input geral lingkaran	84
Tabel 4.14 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali	
Proporsional pada pengujian input geral lissajous.....	87
Tabel 4.15 Hasil perhitungan frekuensi dan RMSE pada data akselerasi	90

DAFTAR NOTASI

a	= akselerasi atau percepatan
c_n	= amplitudo ke-n dalam deret fourier
dx	= selisih dri posisi x awal dan posisi x akhir
dy	= selisi posisi y awal dan posisi y akhir
e	= error
f^i	= Fungsi aktivasi bipolar sigmoid
K_d	= gain derivative
K_p	= gain proporsional
K_i	= gain integral
x	= posisi x atau titik pada sumbu X
y	= posisi y atau titik pada sumbu y
PGA	= <i>Peak groud acceleration</i>
PGV	= <i>Peak groung velocity</i>
PGD	= <i>Peak ground displacement</i>
Pk	= parameter keputusan Bresenham
$s(\omega)$	= spektrum daya
T	= durasi rekaman
T_D	= time derivative
T_I	= time integral
u	= sinyal kontrol
v	= velocity atau kecepatan
w	= nilai bobot
x_i	= nilai input untuk setiap layer
\emptyset_n	= <i>phase angle</i> ke-n dalam deret fourier
$ X(\omega) $	= spektrum amplitudo fourier
α	= <i>learning rate</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Earthquake Shaking Table (EST) atau yang sering disebut *Shake Table* adalah alat eksperimen yang mensimulasikan gerakan gempa bumi. Pengujian menggunakan EST adalah salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menginvestigasi respon sebenarnya dari struktur uji terhadap gempa bumi (Baran, et al., 2011). Pengujian EST semakin banyak digunakan di pusat penelitian teknik gempa di seluruh dunia. Hal ini dikarenakan pengujian EST ini adalah satu-satunya cara yang tersedia untuk memproduksi efek dinamis yang ditimbulkan gempa pada struktur. Pengujian EST adalah tes dinamis fisik yang strukturnya ditempatkan pada platform yang bergerak pada satu atau lebih sumbu. *Shaking* atau guncangan dimaksudkan untuk mensimulasikan gerakan gempa dan secara akurat mewakili gaya yang terlibat. Ini adalah pengujian yang paling dikenal luas dan sering digunakan untuk memvalidasi model dan analisis lainnya. Beberapa kode memerlukan pengujian multi-aksial pada simulator gempa (pengujian EST) untuk memenuhi syarat bahkan komponen non-bangunan, seperti peralatan gardu listrik. Pengujian EST terdiri dari platform, sistem pemandu dan aktuator. Simulasi yang merepresentasikan gerakan gempa secara tepat telah menjadi tantangan serius bagi para peneliti (Duarte, et al., 1994).

Penggunaan input berupa gerakan seismik yang representatif pada pengujian menggunakan EST dapat diterima apabila tujuannya untuk penelitian murni. Dalam banyak kasus, misalnya yang harus memenuhi kode persyaratan dan validasi produk industri, EST digunakan untuk memvalidasi benda uji terhadap gerakan input yang didefinisikan secara tepat. Input ini bisa berupa catatan waktu akselerasi, atau perpindahan yang diturunkan darinya, sejarah waktu buatan yang telah diperoleh dari spektra respons yang ditentukan, gerakan sinusoidal yang tepat dari variasi *sine-sweep* atau *sine-dwell* dan *noise* acak (Severn, 2011).

Gerakan tanah yang dihasilkan oleh gempa bumi memiliki komponen di semua enam derajat kebebasan (6DOF). Namun yang terekam dalam catatan waktu

hanya 3 komponen, yaitu dua gerak horizontal (X dan Y) dan satu gerak vertikal (Z). Gerakan gempa yang terekam ini adalah akselerasi, bukan perpindahan atau kecepatan (Severn, 2011). Namun saat ini, data akselerasi, kecepatan dan perpindahan gerakan gempa bisa didapatkan di *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD). CESMD adalah pusat koperasi yang didirikan oleh *US Geological Survey* (USGS) dan *California Geological Survey* (CGS) untuk mengintegrasikan data *strong-motion* gempa bumi dari *CGS California Strong Motion Instrumentation Program*, *USGS National Strong Motion Project*, dan *Advanced National Seismic System* (ANSS). CESMD menyediakan data *strong motion* mentah dan yang telah diproses untuk aplikasi rekayasa gempa. Data yang telah diproses terdapat file akselerasi, kecepatan dan perpindahan dari 3 arah referensi, sebagaimana diproses dan ditinjau oleh CGS atau USGS (Haddadi, et al., 2012).

Selama dekade terakhir banyak EST dalam skala yang berbeda telah dibangun dan dikembangkan terutama di Jepang, Amerika Serikat, dan Eropa. EST dikelompokkan menjadi skala kecil (lebih kecil dari $3\text{ m} \times 3\text{ m}$), skala sedang (dari $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ hingga $9\text{ m} \times 9\text{ m}$) dan skala besar (lebih besar dari $9\text{ m} \times 9\text{ m}$). EST skala besar adalah alat yang berharga untuk memahami perilaku struktur skala penuh di bawah beban seismik, tetapi sebaliknya itu membutuhkan biaya tinggi untuk konstruksi dan operasinya. Di sisi lain, untuk mensimulasikan gempa bumi sepenuhnya, EST harus mampu bergerak dalam tiga arah referensi. Namun, EST multi sumbu terlalu mahal dan membutuhkan pengetahuan dan pengalaman khusus untuk konstruksi dan operasi. Oleh karena itu, ukuran yang lebih kecil, tabel satu arah lebih cocok untuk analisis model skala kecil dan untuk tujuan pendidikan karena rendahnya biaya konstruksi dan operasional, terutama di negara-negara berkembang. Hal ini menjadi alasan (Baran, et al., 2011) membangun EST satu sumbu yang diberi nama CUSHAKE. CUSHAKE ini mampu melakukan perpindahan sejauh kurang lebih 7,5 cm dengan percepatan maksimal $1g$ atau sama dengan $9,81\text{ m/s}^2$. EST ini menggunakan data akselerasi gerakan gempa sebagai masukan. EST skala kecil dengan biaya rendah juga telah dibangun oleh (Sanghvi, et al., 2012) dan (Damcı & Şekerci, 2019) untuk tujuan pendidikan. EST yang

dibangun oleh Damci & Şekerci juga menggunakan data akselerasi gerakan gempa sebagai masukan.

Pengujian dengan EST satu sumbu memang sudah memuaskan. Namun EST yang mampu bergerak ke tiga arah referensi akan mensimulasikan gerakan gempa yang lebih lengkap. Karena EST tiga sumbu terlalu mahal dan membutuhkan pengetahuan dan pengalaman khusus untuk konstruksi dan operasi, EST yang bergerak ke dua arah sumbu dibangun (Tabar, et al., 2018) (Suluch, et al., 2019). Desain EST yang dapat digunakan untuk keperluan pendidikan telah dilakukan (Tabar, et al., 2018). EST yang didesain adalah EST yang mampu bergerak ke arah dua horizontal (X,Y) dengan masukan berupa data akselerasi gerakan gempa. Portable Shake Table untuk simulasi karakteristik bangunan dalam kondisi gempa bumi telah diusulkan (Suluch, et al., 2019). Portable Shake Table ini juga bergerak ke dua arah horizontal (X,Y). Aktuator yang digunakan untuk menggerakkan masing-masing arah digerakkan oleh motor DC. Dua aktuator ini dikendalikan oleh pengontrol yang terhubung ke perangkat lunak LabVIEW di komputer. Input yang digunakan adalah sinyal seismic yang dihasilkan dari *time-shifting trendline* yang dibuat dari database gempa bumi.

EST yang mampu merepresentasikan gerakan gempa secara tepat dibutuhkan untuk pengujian ketahanan struktur terhadap gempa bumi. Pada penelitian ini, EST dua sumbu dirancang. Penggerak yang digunakan adalah *ballscrew linear guide actuator*. Aktuator ini digerakkan oleh motor *stepper*. Posisi (X,Y) dari data gerakan gempa menjadi input dari EST ini. EST dua sumbu yang dirancang harus mampu bergerak ke dua arah horizontal (X,Y) sesuai dengan posisi (X,Y) yang dimasukkan.

EST ini dikontrol oleh satu unit *Microcontroller Unit* (MCU). Agar kedua penggerak dapat bergerak ke arah X dan Y secara bersamaan sesuai dengan input yang diberikan, sebuah algoritma garis dibutuhkan. Algoritma Bresenham diusulkan sebagai algoritma garis yang mengatur trajektori kedua motor agar bergerak sesuai dengan posisi yang diberikan. Algoritma Bresenham telah diaplikasikan sebagai kontrol koordinat multi-dimensi *stepper* motor (Dai, et al., 2017). Algoritma Bresenham yang semula dua dimensi, diperluas menjadi multi dimensi. Hasil eksperimennya menunjukkan bahwa gerakan koordinasi multi

dimensi motor telah akurat. Algoritma Bresenham juga telah diaplikasikan untuk pengendalian koordinasi gerakan dua motor *stepper* pada robot untuk simulator penusukan jarum medis oleh (Devina, et al., 2019). Kemampuan algoritma Bresenham dan *Digital Differential Analyzer* (DDA) dalam mengatur pemberian jumlah pulsa masukan pada kedua motor *stepper* sehingga diperoleh gerakan yang diinginkan dievaluasi oleh (Devina, et al., 2019). Berdasarkan analisa akurasi, presisi, linearitas dan getaran dari hasil pengujian, didapatkan bahwa algoritma yang lebih tepat digunakan untuk mengontrol koordinasi gerakan dua motor *stepper* pada robot untuk simulasi penusukan jarum medis adalah algoritma Bresenham.

EST yang dirancang pada penelitian ini diharapkan mampu bergerak ke arah sumbu X dan Y sesuai dengan posisi (X,Y) yang diberikan. Bresenham adalah algoritma garis. Algoritma ini berfungsi untuk menentukan koordinat gerakan dua aktuator agar dapat menuju posisi yang diinginkan. Apabila posisi meja tidak sesuai dengan input yang diberikan, algoritma ini tidak mampu memperbaiki error posisi tersebut. Agar posisi yang dihasilkan oleh EST sesuai dengan posisi yang dimasukkan, kontrol displacement diperlukan.

Kontrol proporsional, P, lebih dikenal sebagai gain/penguatan. Secara umum dapat dikatakan bahwa pengontrol P tidak dapat menstabilkan proses tingkat tinggi. Pengontrol proporsional hanya dapat menstabilkan proses orde pertama yang tidak stabil. Mengubah gain pengontrol K_P dapat mengubah dinamika loop tertutup (Rao & Mishra, 2014). Penambahan harga K_P akan menaikkan penguatan sistem sehingga dapat digunakan untuk memperbesar kecepatan tanggapan dan mengurangi e_{ss} atau *error steady state* (penyimpangan dalam keadaan mantap). Pada penelitian ini, sistem kontrol yang dapat mengurangi error posisi dibutuhkan. Dengan kemampuan pengendali Proporsional yang dapat mengurangi *error steady state*, maka pengendali Proporsional diusulkan sebagai pengendali displacement pada EST dua sumbu yang penggeraknya menggunakan *ballscrew linear guide actuator*. Harapannya pengendali Proporsional ini mampu mengendalikan displacement aktuator agar EST mampu bergerak ke posisi yang di inginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian tesis ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang EST dua sumbu yang berpengerak *ballscrew linear guide actuator*?
- b. Bagaimana merancang sistem kontrol yang dapat mengendalikan 2 *ballscrew linear guide actuator* agar menghasilkan gerakan ke dua arah horizontal (X,Y) yang sesuai dengan input?
- c. Bagaimana performansi sistem kontrol yang dirancang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tesis ini adalah:

- a. Merancang EST dua sumbu yang berpengerak *ballscrew linear guide actuator*.
- b. Merancang sistem kontrol yang dapat mengendalikan 2 *ballscrew linear guide actuator* agar menghasilkan gerakan ke dua arah horizontal (X,Y) yang sesuai dengan input.
- c. Menganalisa performansi sistem kontrol yang dirancang.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- Pengerak yang digunakan adalah *ballscrew linear guide actuator*
- EST yang dirancang berukuran 150 cm x 150 cm
- Perpindahan maksimum adalah ± 30 cm
- Kecepatan maksimum adalah 16 cm/s
- Percepatan maksimum adalah 16 cm/s²
- Beban maksimum yang dapat dimuat kurang lebih 40 kg

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Perkembangan *Earthquake Shaking Table*

Earthquake Shaking Table (EST) adalah salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menginvestigasi respon sebenarnya dari struktur uji terhadap gempa bumi (Baran, et al., 2011). Di dunia rekayasa gempa, EST sangat penting karena EST adalah satu-satunya alat eksperimen yang mencoba untuk menirukan gempa bumi yang sebenarnya. Dalam perkembangannya, alat eksperimen ini juga sering disebut sebagai *Earthquake Simulator*, *Seismic simulator* dan *Shake Table*. Perkembangan EST berdasarkan catatan sejarahnya telah dibahas oleh Severn dalam jurnalnya (Severn, 2011).

Sejarah EST dimulai dari EST yang digerakkan menggunakan tenaga tangan. EST ini dibangun di Jepang pada akhir abad ke-19. Perkembangan EST dimulai dari dibangunnya EST yang menggunakan roda putar dengan batang penggerak yang eksentrik untuk menghasilkan beberapa bentuk gerak osilasi. Kemudian, diikuti dengan EST yang diaktifkan oleh pendulum yang menabrak meja yang ditahan oleh pegas. Tidak sampai pertengahan 1930-an, catatan gempa bumi yang sebenarnya (Long Beach, 1933) tersedia. Catatan gempa bumi ini digunakan oleh Ruge (1 dalam Severn) dan (2 dalam Severn) dalam bentuk analog sebagai input ke ESTnya. Perangkat analog untuk menggunakan catatan gempa aktual sebagai input adalah inovasi yang penting dalam sejarah perkembangan EST ini. Inovasi lain yang penting adalah kontrol gerak berdasarkan *feedback loop* untuk mengontrol error secara elektrik (Severn, 2011).

2.1.1 Persyaratan *Earthquake Shaking Table*

Sejarah EST adalah perkembangan menuju kepuasan persyaratan ideal. Berdasarkan sejarahnya, Severn menentukan persyaratan EST dibagi berdasarkan jenis input, kontrol input dan efek skala.

a. Jenis Input

Gerakan tanah yang dihasilkan oleh gempa bumi memiliki komponen di semua enam derajat kebebasan (6DOF). Namun yang terekam dalam catatan waktu hanya 3 komponen, yaitu dua gerak horizontal (X dan Y) dan satu gerak vertikal (Z). Gerakan gempa yang terekam ini adalah akselerasi, bukan perpindahan atau kecepatan.

Cukup sering hanya salah satu komponen gerakan tanah yang ditentukan untuk pengujian. Karena itu, peneliti menganggap bahwa EST yang mampu mengendalikan gerakan dalam satu sumbu akan memuaskan. Tetapi hal ini menimbulkan pertanyaan tentang bagaimana gerakan di lima sisanya akan dihapus.

EST awal adalah varietas satu sumbu dengan pengekangan fisik pada DOF lain, seperti *guide rail* atau *roller-bearing support*. Pengekangan ini memasukkan pola gaya yang tidak diketahui ke dalam meja, dan memodifikasi gerakan *single-axis* yang diharapkan. Dapat dikatakan bahwa untuk tujuan penelitian murni, ini tidak penting. Karena peneliti hanya mengukur gerakan sebenarnya yang dimasukkan ke dalam benda uji, dan menggunakannya untuk perbandingan dengan analisis teoritis yang sesuai.

Gempa bumi yang sebenarnya tidak berulang dengan sendirinya, sehingga masuk akal untuk menguji benda uji pada gerakan seismik yang representatif. Namun dalam banyak kasus, memenuhi "*Code requirement*" dan validasi produk industri misalnya, EST digunakan untuk memvalidasi benda uji terhadap gerakan input yang didefinisikan secara tepat. Input ini bisa berupa catatan waktu akselerasi, atau perpindahan yang diturunkan darinya, sejarah waktu buatan yang telah diperoleh dari spektra respons yang ditentukan, gerakan sinusoidal yang tepat dari variasi *sine-sweep* atau *sine-dwell* dan *noise* acak. Semua jenis input ini digunakan untuk tujuan tertentu, seperti mendapatkan frekuensi natural dan redaman benda uji, dan tidak ada korupsi dari input yang diizinkan.

b. Kontrol Input

Idealnya, pada EST diperlukan kontrol akselerasi, kecepatan dan perpindahan dari keenam DOF. Perkembangan rekayasa kontrol telah membantu rekayasa gempa untuk mencapai kebutuhan ini. Persyaratan ini tersedia untuk

eksperimen pertama kalinya pada pertengahan 1970-an, namun tetap dalam kisaran linier. Karena transduser perpindahan kehilangan keakuratan di atas sekitar 10Hz, dan akselerometer paling akurat di atas nilai ini, perpindahan terdiferensiasi dan akselerasi terintegrasi digunakan untuk menghasilkan kecepatan. Sistem kontrol yang dihasilkan disebut sebagai TVC, *three variable control*. Pencarian untuk kontrol yang memuaskan ketika benda uji menjadi non-linear dalam perilakunya dimulai pada pertengahan 1980-an, dan telah bertemu dengan beberapa keberhasilan ketika non-linearitas terjadi pada tingkat yang berada dalam bandwidth frekuensi servo-katup dan aktuator yang menggerakkan meja. Kesulitan juga masih muncul ketika massa benda uji sebanding dengan, atau lebih besar dari, massa meja itu sendiri (Severn, 2011).

c. Efek Skala

Fakta bahwa energi dalam gempa bumi aktual sebagian besar terletak pada kisaran 0-8 Hz, berarti pengujian meja guncangan dari struktur uji skala penuh harus terjadi dalam kisaran ini. Tetapi jika struktur uji berada pada skala $1/n$ dari struktur sebenarnya, kesamaan dinamis mensyaratkan bahwa konten frekuensi input harus diperhitungkan oleh n , yang mengarah pada fakta bahwa semua, kecuali meja terbesar, beroperasi dalam range 0-100 Hz.

Efek lain dari penskalaan adalah:

1. Bilangan Froude dan Cauchy untuk model dan prototipe harus cocok. Pertama adalah rasio antara gravitasi dan gaya inersia dinamis, dan yang terakhir rasio antara gaya inersia dinamis dan kekuatan pemulihan elastis.
2. Umumnya mustahil untuk memasukkan detail realistis ke dalam model struktural, sehingga sangat berbahaya untuk menerima efek non-linear yang relevan dengan prototipe. Fakta bahwa perawatan teoritis non-linearitas sama-sama dicurigai, adalah salah satu pembenaran untuk konstruksi baru-baru ini dari EST terbesar di dunia (kapasitas testpiece 1200T dan rentang frekuensi 0-15 Hz) di Miki City di Jepang (Ogawa et al, 2001, dalam Severn (2011)).

2.1.2 State of The Art Earthquake Shaking Table (EST)

Karena pentingnya EST untuk menguji ketahanan sebuah struktur terhadap gerakan yang dihasilkan oleh gempa bumi, membuat para peneliti pada tahun-tahun terakhir ini melakukan pengembangan EST yang low cost sehingga cukup untuk kepentingan edukasi. Sebuah low cost uniaxial shake table skala kecil telah dirancang (Baran, et al., 2011). Shake table yang diberi nama CUSHAKE ini digerakan oleh Motor AC yang dikopel dengan continuous threaded steel bar (digunakan untuk melinearkan gerakan motor AC). Disebutkan bahwa pada CUSHAKE terdapat sistem kontrol. Sistem kontrol yang digunakan pada CUSHAKE adalah produk setempat. Berdasarkan hasil pengujian batas yang mampu dihasilkan oleh CUSHAKE dan validasi dengan data percepatan El-Centro sebagai data input, hasilnya menunjukkan bahwa shake table yang dibangun memiliki performansi yang dapat diterima meskipun terdapat penundaan yang dapat diabaikan dalam perpindahan meja yang diukur karena proses *filtering* saat mendapatkan sinyal perpindahan meja.

Dengan alasan yang sama, 2 buah low cost earthquake simulator skala laboratorium dengan kemampuan uni-axial telah dibangun (Sanghvi, et al., 2012). EST pertama menggunakan motor DC sikat, sedangkan EST kedua menggunakan motor servo. Hasil gerakan kedua meja dimonitor menggunakan sensor LVDT. Hasilnya dibandingkan dengan *accelerometer* dan *vibration analyzer* dan didapatkan perbedaan pembacaan displacement sekitar 9,57% untuk meja pertama dan sekitar 6,42% untuk meja kedua.

Kemudian sebuah low-cost EST single axis yang diberi nama SARSAR dengan menggunakan Arduino DUE, dan MEGA sebagai mikrokontroler utama, serta sensor akselerometer MPU6050 yang terhubung dengan Arduino NANO untuk membaca gerakan(motion) dari meja telah dibangun (Damcı & Şekerçi, 2019). Arduino DUE berfungsi untuk menghasilkan pulsa untuk mengontrol motor *stepper*, sementara arduino MEGA berfungsi untuk melakukan Data logging terhadap beberapa sensor analog (menggunakan potensiometer) yang nantinya akan dipasang pada struktur uji coba. EST ini menggunakan penggerak utama motor *stepper* dengan kemampuan rata-rata 8,5 Nm. Berdasarkan hasil pengujian dikatakan bahwa sistem masih kurang optimal akibat latency yang dihasilkan, dan

diduga disebabkan oleh resolusi dari data saat melakukan *scaling down*, pemrosesan dari data *real-to-integer* pada mikrokontroler dan *numerical integration losses*.

Sebuah *Portable Shake Table* untuk mensimulasikan gerakan tanah dua dimensi dari gempa bumi dikenalkan oleh (Suluch, et al., 2019). *Portable Shake Table* ini bergerak ke dua arah horizontal, yaitu X dan Y. Berfokus pada konsep desain, struktur, dan fitur dari simulator ini, (Suluch, et al., 2019) membahas implementasinya dan memverifikasi kelayakannya dengan hasil percobaan awal. *Portable Shake Table* ini memiliki dua aktuator, yang masing-masing digerakkan oleh motor DC. Dua aktuator ini dikendalikan oleh pengontrol yang terhubung ke perangkat lunak LabVIEW di komputer. Mekanisme pergerakan meja dan efektivitas pergerakan tabel diatur oleh *Human Machine Interface* (HMI) pada *Personal Computer* (PC). Dalam sistem *Portable Shake Table* yang diusulkan, referensi perpindahan meja untuk setiap aktuator dihasilkan berdasarkan input dari pengguna melalui HMI yang diteruskan oleh mikrokontroler. Pergerakan aktuator motor DC dikendalikan oleh motor *driver*.

Selain pengembangan konstruksi EST, beberapa peneliti juga mengembangkan sistem kontrol untuk EST. EST diharapkan menghasilkan gerakan yang sama dengan data gempa yang digunakan sebagai input. *Fuzzy supervisory* telah dirancang (Hamidizadeh, et al., 2016) untuk mengontrol gerakan dari EST uni-axial yang digerakkan menggunakan motor AC servo PMSM yang dihubungkan dengan ball screw. Kontrol utama dari *seismic table* ini merupakan sebuah controller PI. Tiga macam *Fuzzy Supervisory* controller (FLC1, FLC2, dan FLC3) telah dirancang secara terpisah yang menerima variasi 2 sinyal yang berbeda yaitu, *Displacement* dan *Velocity error*, *Displacement* dan *acceleration error*, serta *Velocity* dan *acceleration error*. Hasil yang didapatkan adalah apabila kontroler PI tidak digabungkan dengan *fuzzy supervisory*, didapatkan hasil *tracking error* yang lumayan besar, dan apabila menggunakan *fuzzy supervisory*, didapat penurunan yang drastis dari error. Untuk ketiga FLC yang digunakan, didapatkan performansi FLC3 lebih baik dibandingkan FLC2 tetapi FLC3 memiliki performansi yang buruk dalam hal *displacement error* jika dibandingkan dengan FLC1.

Sebuah *Tracking Trajectory Control* baru dengan menggunakan *sliding mode* dan EKF/UKF sebagai *online state estimation* diusulkan (Rajabi, et al., 2017). EST yang digunakan adalah *Uniaxial Shake table*, dengan motor PMSM dan aktuatornya adalah ballscrew. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perkiraan kecepatan meja, perpindahan, dan akselerasi cukup dekat dengan yang sebenarnya. UKF menunjukkan hasil yang lebih baik dari EKF. Dengan kontrol yang diusulkan, kecepatan meja yang tidak diketahui diperkirakan dengan baik menggunakan EKF/UKF dan semua getaran tingkat tinggi karena fleksibilitas yang melekat pada sistem secara efektif teredam.

2.2 Ballscrew Linear Guide Actuator FUYU FLS80

Ballscrew linear guide actuator seri FUYU FLS80 adalah aktuator yang dirancang sesuai standar industri dengan kemudahan integrasi dan pemeliharaan. Aktuator ini memiliki lebar 80mm. FLS80 memiliki *travel length* efektif ≤ 1500 mm. FLS80 adalah *linear guideway* yang dapat digunakan untuk gerakan horisontal dan vertikal (FUYU, 2017).



Gambar 2.1 FUYU Ballscrew Linear Guide Actuator tipe FLS80
(Gambar diperoleh dari FUYU, 2017)

Gambar 2.1 adalah bentuk fisik *ballscrew linear guide aktuator* tipe FLS80 yang diproduksi oleh FUYU. Ballscrew dan penggeraknya menjadi satu

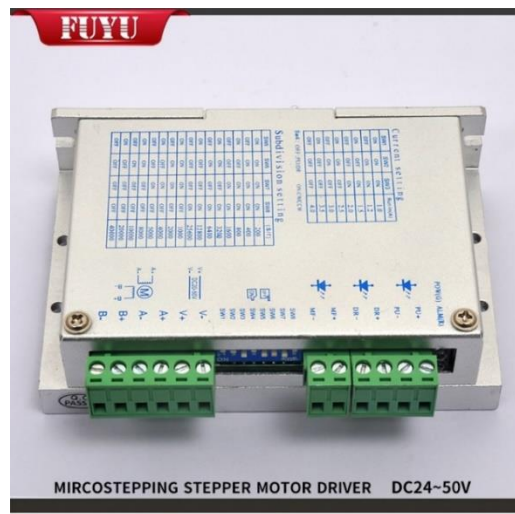
kesatuan. Aktuator ini, motor penggeraknya adalah motor *stepper*. Spesifikasi aktuator FLS80 (FUYU, 2017) ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Table 2.1 Spesifikasi FUYU FLS80

Series	FLS80
Profile Width	80 mm
Drive Type	Ballscrew
Screw Lead	10 mm
Bearing Type	Single Square Rail
Motor Type	2-Phase Nema24 Stepper Motor
Effective Travel Length (L)	(100-1500) mm
Max. Speed	200 mm/s
Normal Load Capacity	60 kgs

Sumber: (FUYU, 2017)

Tipe motor yang digunakan oleh FLS80 adalah *stepper* motor Nema 24 dua fasa. Berdasarkan parameter teknik yang disertakan pada datasheet FUYU FLS80 (FUYU, 2017), *stepping driver* yang cocok untuk FLS80 adalah *stepping driver* model FMDD50D40NOM. *Stepping driver* FMDD50D40NOM yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Stepping Driver Model FMDD50D40NOM (FUYU, 2017)

Pada FMDD50D40NOM ini, pengaturan *micro stepping driving* dikendalikan oleh terminal SW5 – SW8. Konfigurasi SW5-SW8 untuk menentukan

berapa *step*/revolusi yang mampu dioperasikan oleh driver ditunjukkan pada tabel *Micro Stepping* (pulsa/putaran) seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Konfigurasi Microstepping FMDD50D40NOM

	Subdivisions								
	1000	2000	4000	5000	8000	10000	20000	25600	40000
SW5	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF
SW6	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
SW7	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
SW8	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF

Sumber: FUYU, 2017

Stepping driver yang digunakan pada penelitian ini memiliki konfigurasi SW5 OFF, SW6 OFF, SW7 ON dan SW8 OFF. Dengan mencocokkan konfigurasi SW5-SW8 driver yang digunakan pada penelitian ini pada tabel konfigurasi *micro stepping* yang ditunjukkan pada Tabel 2.2, didapatkan bahwa *stepping driver* yang digunakan pada penelitian ini memiliki pengaturan *micro stepping* 5000 *step*/revolusi.

2.3 Algoritma Bresenham

Algoritma Bresenham adalah algoritma yang umum digunakan untuk menggambar garis lurus pada grafik komputer, dan ide dasarnya adalah rasterisasi linier (Dai, et al., 2017). Algoritma ini berfungsi untuk menentukan titik – titik yang perlu dilalui untuk membuat garis lurus dari koordinat awal ke koordinat akhir. Pada algoritme ini dikenal istilah driving axis (DA) dan passive axis (PA). DA merupakan sumbu ordinat/absis yang berperan sebagai pengontrol dan nilainya selalu bertambah 1, sedangkan PA merupakan sumbu ordinat/absis yang bersifat pasif dan bernilai antara 0 atau 1, bergantung pada nilai variabel keputusan Bresenham P_k (Devina, et al., 2019).

Algoritma ini dimulai dengan menentukan koordinat titik awal (x_1, y_1) dan titik akhir (x_2, y_2) . Kemudian menghitung dx dan dy dari input yang diberikan. Parameter ini dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$dx = x_2 - x_1 \quad (2.1)$$

$$dy = y_2 - y_1 \quad (2.2)$$

Selanjutnya parameter keputusan P_k dihitung dengan perhitungan sebagai berikut.

$$P_k = 2dy - dx \quad (2.3)$$

Misalkan titik saat ini adalah (x_k, y_k) dan titik berikutnya adalah (x_{k+1}, y_{k+1}) , poin berikutnya bergantung pada nilai parameter keputusan P_k .

Kasus pertama, jika $P_k < 0$ maka:

$$P_{k+1} = P_k + 2dy \quad (2.4)$$

Dengan

$$x_{k+1} = x_k + 1 \quad (2.5)$$

Dan

$$y_{k+1} = y_k \quad (2.6)$$

Kasus kedua, jika $P_k \geq 0$, maka:

$$P_{k+1} = P_k + 2dy - 2dx \quad (2.7)$$

Dengan

$$x_{k+1} = x_k + 1 \quad (2.8)$$

Dan

$$y_{k+1} = y_k + 1 \quad (2.9)$$

Langkah ini terus diulangi hingga titik akhir tercapai atau jumlah iterasi sama dengan $(dx - 1)$ kali (Devina, et al., 2019).

Kontrol koordinat *multi-step* motor *stepper* berbasis algoritma Bresenham telah dirancang oleh (Dai, et al., 2017). Dengan mempertimbangkan tingginya kepresisian dan kecilnya beban sistem kontrol *motion* 3D-printer, (Dai, et al., 2017) mengusulkan sebuah metode kontrol koordinat multidimensi motor *stepper*, dengan seluruh perancangannya berdasarkan algoritma Bresenham. Algoritma Bresenham yang semula dua dimensi, diperluas menjadi multi dimensi. Algoritma Bresenham digunakan untuk mewujudkan gerakan kooperatif motor *stepper* multidimensi. Berdasarkan modul perangkat keras driver motor *stepper* dan sirkuit perangkat keras dirancang oleh (Dai, et al., 2017), hasil eksperimennya menunjukkan bahwa gerakan koordinasi motor telah akurat.

Algoritma Bresenham juga telah diaplikasikan untuk pengendalian koordinasi gerakan dua motor *stepper* pada robot untuk simulator penusukan jarum medis oleh (Devina, et al., 2019). Robot simulator penusuk jarum digunakan untuk mensimulasikan teknik penusukan secara in-plane, sebelum diaplikasikan ke tubuh

pasien. Pada robot ini, koordinasi gerakan 2 motor *stepper* yang menjamin gerakan penusukan jarum berada pada trajektori berupa garis lurus untuk berbagai kombinasi kedalaman dan sudut penusukan sangat penting. (Devina, et al., 2019) melakukan evaluasi algoritma Bresenham dan *Digital Differential Analyzer* (DDA) dalam mengatur pemberian jumlah pulsa masukan pada kedua motor *stepper* sehingga diperoleh gerakan yang diinginkan. Dengan mengevaluasi akurasi, presisi, linearitas dan getaran dari hasil pengujian, (Devina, et al., 2019) mendapatkan bahwa algoritma yang lebih tepat digunakan untuk mengontrol koordinasi gerakan dua motor *stepper* pada robot untuk simulasi penusukan jarum medis adalah algoritma Bresenham.

2.4 Pengendali P, PI, PD dan PID

Pengendali PID menggunakan 3 tipe mode perilaku dasar, yaitu P-proporsional, I-integral dan D-derivative. Jenis kontrol yang dapat digunakan dalam pengontrolan variabel proses adalah Kontrol Proporsional (Kontrol P), Kontrol Proporsional Integral (Kontrol PI), Kontrol Proporsional Derivative (kontrol PD) dan Kontrol Proporsional Integral Derivative (Kontrol PID).

- **Kontrol Proporsional (P)**

Hubungan antara sinyal kontrol, $u(t)$, dengan *error* kontrol, $e(t)$, pada aksi kontrol Proporsional dinyatakan dalam persamaan berikut (Ogata, 1997).

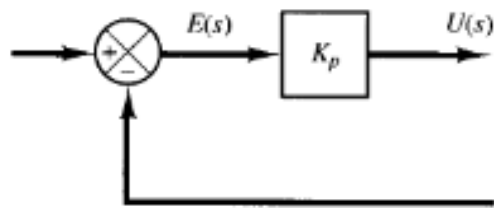
$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.10)$$

Atau, dalam transformasi Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.11)$$

dengan K_p adalah gain proporsional.

Apa pun mekanisme aktualnya dan apa pun bentuk daya pengoperasian, pengendali Proporsional pada dasarnya adalah penguat dengan penguatan yang dapat disesuaikan (Ogata, 1997). Diagram blok pengendali seperti ini ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Blok diagram pengendali proporsional (Ogata, 1997)

Dari persamaan (2.10) nampak bahwa besar sinyal kontrol u akan selalu sebanding dengan besar sinyal error kontrol. Gambar 2.3 menunjukkan blok diagram kontrol proporsional, dengan $E(s)$ adalah transformasi Laplace dari sinyal *error* dan $U(s)$ adalah transformasi Laplace dari sinyal output pengendali (Ogata, 1997).

Kontrol proporsional, P, lebih dikenal sebagai gain/penguatan. Secara umum dapat dikatakan bahwa pengontrol P tidak dapat menstabilkan proses tingkat tinggi. Pengontrol proporsional hanya dapat menstabilkan proses orde pertama yang tidak stabil. Mengubah gain pengontrol K_P dapat mengubah dinamika loop tertutup (Rao & Mishra, 2014). Penambahan harga K_P akan menaikkan penguatan sistem sehingga dapat digunakan untuk memperbesar kecepatan tanggapan dan mengurangi e_{ss} atau *error steady state* (penyimpangan dalam keadaan mantap). Pemakaian alat kendali tipe proporsional ini sering tidak memuaskan karena penambahan K_P selain akan membuat sistem lebih sensitif tetapi juga cenderung mengakibatkan ketidakstabilan. Disamping itu penambahan harga K_P terbatas dan tidak cukup untuk mencapai tanggapan sampai suatu harga yang diinginkan. Kenyataannya dalam mengatur harga K_P terdapat keadaan-keadaan yang bertentangan. Di satu pihak diinginkan mengurangi e_{ss} sebanyak mungkin tetapi hal ini akan mengakibatkan osilasi bagi tanggapan yang berarti memperlama “*setting time*” sedangkan dipihak lain tanggapan terhadap setiap perubahan masukan harus terjadi secepat mungkin tetapi dengan lonjakan dan osilasi sekecil mungkin. Tanggapan yang cepat memang dapat diperoleh dengan memperbesar K_P tetapi hal ini juga akan mengakibatkan ketidakstabilan sistem (Swain, 2012).

Secara eksperimen, pengguna pengendali proporsional harus memperhatikan ketentuan – ketentuan beriku (Hellerstein, et al., 2004)t:

1. Kalau nilai K_p kecil, pengendali proportional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya.
3. Namun, jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau menyebabkan sistem akan berisolasi.

- **Kontrol Proporsional Integral (PI)**

Tindakan kontrol dari pengendali Proporsional-Integral didefinisikan (Ogata, 1997) sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

atau,

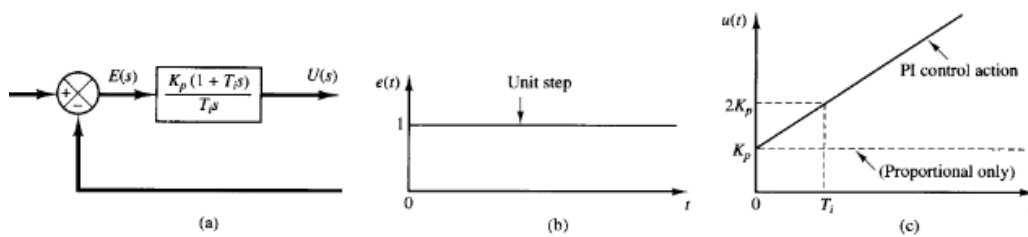
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

Fungsi transfer dari pengendali ini adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.14)$$

Dimana K_p adalah gain proporsional, dan T_i disebut sebagai *integral time*, dan K_i adalah gain integral.

Ketiganya, K_p , K_i , dan T_i , disesuaikan. *Integral time* menyesuaikan tindakan kontrol integral, sementara perubahan nilai K_p mempengaruhi bagian proporsional dan integral dari tindakan kontrol. Kebalikan dari waktu integral T_i disebut *reset rate*. *Reset rate* adalah berapa kali per menit di mana bagian proporsional dari tindakan kontrol digandakan. *Reset rate* diukur dalam hal pengulangan per menit (Ogata, 1997).



Gambar 2.4 (a) Diagram blok pengendali Proporsional-Integral; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input *unit-step* dan output pengendali (Ogata, 1997)

Gambar 2.4.a menunjukkan diagram blok pengendali Proporsional-Integral. Jika sinyal *error* yang digerakkan $e(t)$ adalah fungsi *unit-step* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.b, maka output pengendali $u(t)$ menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.c (Ogata, 1997).

Pengendali PI banyak diadopsi dalam aplikasi industri karena strukturnya yang sederhana, mudah dirancang dan biaya rendah. Namun, terlepas dari keuntungan ini, pengontrol PI gagal ketika objek yang dikontrol sangat tidak linier dan tidak pasti. Kontroler PI akan menghilangkan osilasi paksa dan kesalahan kondisi tunak (*error steady state*) yang dihasilkan pada operasi P controller. Namun, memperkenalkan mode integral memiliki efek negatif pada kecepatan respons dan stabilitas keseluruhan sistem. Dengan demikian, pengendali PI tidak akan meningkatkan kecepatan respons. Ini dapat diharapkan karena pengendali PI tidak memiliki sarana untuk memprediksi apa yang akan terjadi dengan kesalahan dalam waktu dekat. Masalah ini dapat diselesaikan dengan memperkenalkan mode turunan yang memiliki kemampuan untuk memprediksi apa yang akan terjadi dengan kesalahan dalam waktu dekat dan dengan demikian mengurangi waktu reaksi dari pengontrol. Pengontrol PI sangat sering digunakan dalam industri, terutama ketika kecepatan respon bukan masalah. Kontrol tanpa mode D digunakan ketika respon cepat dari sistem tidak diperlukan, gangguan besar dan kebisingan hadir selama operasi proses, hanya ada satu penyimpanan energi dalam proses (kapasitif atau induktif) dan ada penundaan transportasi yang besar didalam sistem (Rao & Mishra, 2014).

- **Pengendali Proporsional Derivatif (PD)**

Tindakan kontrol dari pengendali Proporsional-Derivatif didefinisikan (Ogata, 1997) sebagai,

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.15)$$

atau dapat ditullis juga dalam persamaan

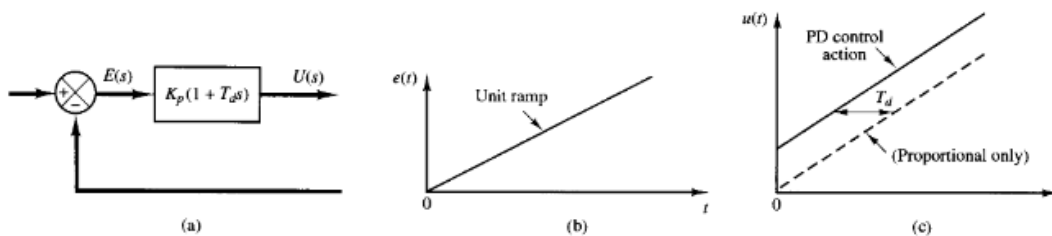
$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.16)$$

dan fungsi transfernya adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.17)$$

dimana K_p adalah gain proporsional dan T_d adalah konstanta yang disebut *derivative time*. K_p dan T_d dapat disesuaikan.

Tindakan kontrol turunan, kadang-kadang disebut *rate control*, adalah di mana besarnya output pengontrol sebanding dengan laju perubahan sinyal kesalahan penggerak. *Derivative time*, T_d , adalah interval waktu di mana tindakan laju meningkatkan efek dari tindakan kontrol Proporsional (Ogata, 1997).



Gambar 2.5 (a) Diagram blok pengendali Proporsional-Derivatif; (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input *unit-ramp* dan output pengendali (Ogata, 1997)

Gambar 2.5.a menunjukkan diagram blok pengendali proporsional-derivatif. Jika sinyal *error* yang digerakkan $e(t)$ adalah fungsi *unit-ramp* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.b, maka output pengontrol $u(t)$ menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.c. Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.5.c, tindakan kontrol turunan dapat memiliki karakter antisipatif. Sebagai hal yang biasa, bagaimanapun, tindakan kontrol turunan tidak pernah dapat mengantisipasi tindakan apa pun yang belum terjadi. Sementara tindakan kontrol turunan memiliki

keuntungan sebagai antisipatif, ia memiliki kelemahan yang memperkuat sinyal kebisingan dan dapat menyebabkan efek saturasi pada aktuator. perhatikan bahwa tindakan kontrol derivatif tidak pernah dapat digunakan sendiri karena tindakan kontrol ini hanya efektif selama periode sementara (Ogata, 1997).

- **Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID)**

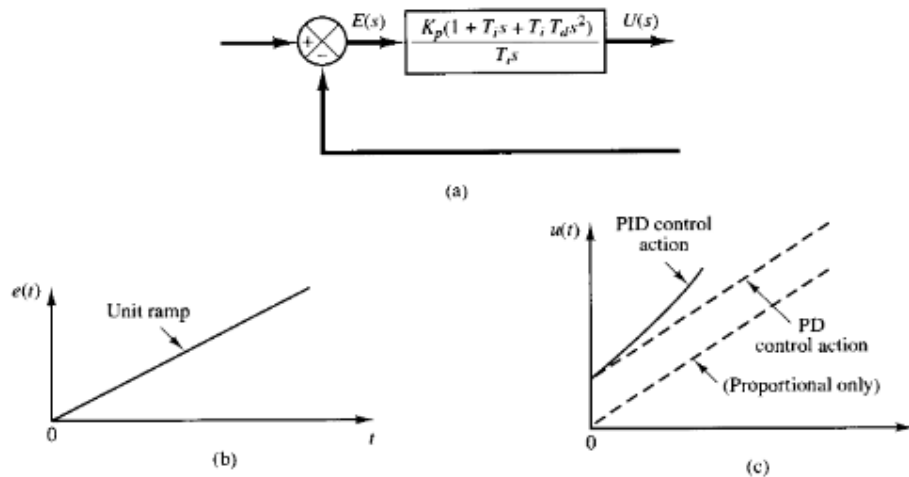
Kombinasi aksi pengendali Proporsional, pengendali Integral, dan aksi pengendali Derivatif, disebut aksi pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID). Tindakan gabungan ini memiliki keunggulan masing-masing dari tiga tindakan pengendali individu. Persamaan pengendali dengan aksi gabungan ini diberikan oleh persamaan berikut (Ogata, 1997).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.18)$$

Fungsi transfernya adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} T_d s \right) \quad (2.19)$$

di mana K_p adalah gain proporsional, T_i adalah *integral time*, T_d adalah *derivative time*.



Gambar 2.6 (a) Diagram blok pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID); (b) dan (c) diagram yang menggambarkan input *unit-ramp* dan output pengendali (Ogata, 1997)

Diagram blok pengendali Proporsional-Integra-Derivatif (PID), ditunjukkan pada Gambar 2.6.a. Jika $e(t)$ adalah fungsi *unit-ramp* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.b, maka output pengendali, $u(t)$, menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.c (Ogata, 1997).

2.5 Parameter Gerakan Tanah

Parameter gerakan tanah sangat penting untuk menggambarkan karakteristik penting gerakan tanah yang kuat dalam bentuk kuantitatif yang kompak. Parameter gerakan tanah ini adalah amplitudo, konten frekuensi dan durasi gerakan tanah (Maniyar & Khare, 2011).

a. Parameter amplitudo

Cara paling umum menggambarkan gerakan tanah adalah dengan sejarah waktu. Parameter gerak dapat berupa akselerasi, kecepatan atau perpindahan, atau ketiganya dapat ditampilkan. Biasanya, hanya satu dari jumlah ini yang diukur secara langsung, dengan yang lain dihitung darinya dengan integrasi dan / atau diferensiasi (Maniyar & Khare, 2011).

Peak ground acceleration (PGA) adalah ukuran yang paling umum digunakan untuk intensitas guncangan di suatu lokasi dan dianggap sebagai nilai absolut terbesar dari percepatan horizontal yang tercatat di suatu lokasi. PGA untuk komponen gerak tertentu hanyalah nilai percepatan horizontal (absolut) terbesar yang diperoleh dari accelerogram komponen itu (Maniyar & Khare, 2011).

$$PGA = \max|a(t)| \quad (2.20)$$

Gerakan tanah dengan akselerasi puncak tinggi biasanya, tetapi tidak selalu, lebih merusak daripada yang dengan akselerasi puncak lebih rendah. Durasi eksitasi puncak juga merupakan pertimbangan penting dalam memperkirakan potensi kerusakan gerakan tanah. Akselerasi puncak yang sangat tinggi yang hanya berlangsung dalam waktu yang sangat singkat dapat menyebabkan sedikit kerusakan pada banyak jenis struktur. Sejumlah gempa bumi telah menghasilkan

percepatan puncak lebih dari 0,5 g, tetapi tidak menyebabkan kerusakan signifikan pada struktur karena percepatan puncak terjadi pada frekuensi yang sangat tinggi dan durasi gempa bumi tidak lama. Meskipun akselerasi puncak adalah meteran yang berguna, ia tidak memberikan informasi tentang konten frekuensi atau durasi gerakan; akibatnya, itu harus dilengkapi dengan informasi tambahan untuk mengkarakterisasi gerakan tanah secara akurat (Maniyar & Khare, 2011).

Peak ground velocity (PGV) adalah parameter lain yang berguna untuk karakterisasi amplitudo gerak-tanah. Karena kecepatannya kurang sensitif terhadap komponen frekuensi yang lebih tinggi dari gerakan tanah, PGV lebih mungkin daripada PGA untuk mengkarakterisasi amplitudo gerakan tanah secara akurat pada frekuensi menengah. Untuk struktur atau fasilitas yang peka terhadap pemuatan dalam rentang frekuensi menengah ini (mis. Gedung tinggi, jembatan, dll.), PGV dapat memberikan indikasi yang lebih akurat tentang potensi kerusakan daripada PGA (Maniyar & Khare, 2011).

$$PGV = \max|v(t)| \quad (2.21)$$

Peak ground displacement (PGD) umumnya dikaitkan dengan komponen frekuensi yang lebih rendah dari gerakan gempa. Namun demikian, seringkali sulit untuk menentukan secara akurat, karena kesalahan pemrosesan sinyal dalam penyaringan dan integrasi accelerogram dan karena kebisingan jangka panjang. Akibatnya, perpindahan puncak lebih jarang digunakan sebagai ukuran gerakan tanah daripada kecepatan puncak atau percepatan puncak (Maniyar & Khare, 2011).

b. Parameter frekuensi konten (*content frequency*)

Respons dinamis struktur peka terhadap frekuensi di mana mereka dimuat. Gempa bumi menghasilkan pembebanan yang rumit dengan komponen gerakan yang terjadi pada berbagai frekuensi. Konstan frekuensi menggambarkan bagaimana amplitudo gerakan tanah didistribusikan di antara frekuensi yang berbeda. Karena konten frekuensi gerakan gempa akan sangat mempengaruhi efek gerakan itu, karakterisasi gerakan tidak dapat lengkap tanpa mempertimbangkan konten frekuensinya (Maniyar & Khare, 2011).

Fourier spectra

Setiap fungsi periodik (misalnya fungsi apa pun yang berulang persis pada interval konstan) dapat diekspresikan menggunakan analisis Fourier sebagai jumlah dari serangkaian istilah harmonik sederhana dari frekuensi, amplitudo, dan fase yang berbeda (Maniyar & Khare, 2011). Menggunakan deret Fourier fungsi periodik, $x(t)$, dapat ditulis seperti pada persamaan (2.20).

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.22)$$

dimana c_n dan ϕ_n adalah amplitudo dan *phase angle* masing-masing dari harmonik ke- n dalam deret Fourier. *Fourier series* memberikan deskripsi lengkap tentang gerakan tanah, karena gerakan dapat sepenuhnya didapatkan oleh fungsi invers Fourier. Plot amplitudo Fourier versus frekuensi dikenal sebagai spektrum amplitudo Fourier. Spektrum amplitudo Fourier dari gerakan yang kuat menunjukkan bagaimana amplitudo gerakan didistribusikan sehubungan dengan frekuensi (atau periode). Spektrum pita sempit menyiratkan bahwa gerakan memiliki frekuensi dominan yang dapat menghasilkan riwayat waktu yang halus dan hampir sinusoidal. Spektrum luas terkait dengan gerakan yang berisi berbagai frekuensi yang menghasilkan riwayat waktu bergerigi dan tidak beraturan (Maniyar & Khare, 2011).

Power Spectrum

Power spektrum adalah representasi alternatif dari konten frekuensi dari riwayat waktu. Ini terkait erat dengan spektrum amplitudo Fourier dari yang terekam sebagai:

$$s(\omega) = \frac{1}{2\pi T} |X(\omega)|^2, \quad (2.23)$$

di mana $s(\omega)$ menunjukkan spektrum daya, $|X(\omega)|$ spektrum amplitudo Fourier, dan T durasi rekaman (Maniyar & Khare, 2011).

c. Durasi

Durasi gerakan tanah yang kuat dapat memiliki pengaruh yang nyata terhadap kerusakan gempa bumi. Degradasi kekakuan dan kekuatan beberapa jenis struktur peka terhadap jumlah pembalikan beban atau tegangan yang terjadi selama

gempa bumi. Gerak dengan durasi pendek mungkin tidak menghasilkan pembalikan beban yang cukup untuk merusak respons untuk menumpuk dalam struktur, bahkan jika amplitudo gerak tinggi. Di sisi lain, gerakan dengan amplitudo sedang tetapi durasinya lama dapat menghasilkan pembalikan beban yang cukup untuk menyebabkan kerusakan substansial. Durasi gerakan tanah yang kuat terkait dengan waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan energi regangan yang terakumulasi dengan pecah di sepanjang patahan. Karena panjang, atau luas, kerusakan patahan meningkat, waktu yang dibutuhkan untuk patahan juga meningkat. Akibatnya, durasi gerakan yang kuat meningkat dengan meningkatnya magnitudo gempa. Durasi gerakan yang kuat telah dipelajari oleh interpretasi accelerogram dari gempa bumi dengan magnitudo berbeda. Durasi gempa dapat diperkirakan dengan berbagai cara, tetapi yang terpenting ialah waktu pengukuran antara kejadian pertama sampai dengan akhir dengan percepatan lebih besar dari 0,05 g (bracketed duration), frekuensi di atas 2 Hz dan durasi getar sesuai dengan jumlah total energi yang dilepaskan (Maniyar & Khare, 2011).

Halaman ini sengaja dikosongkan

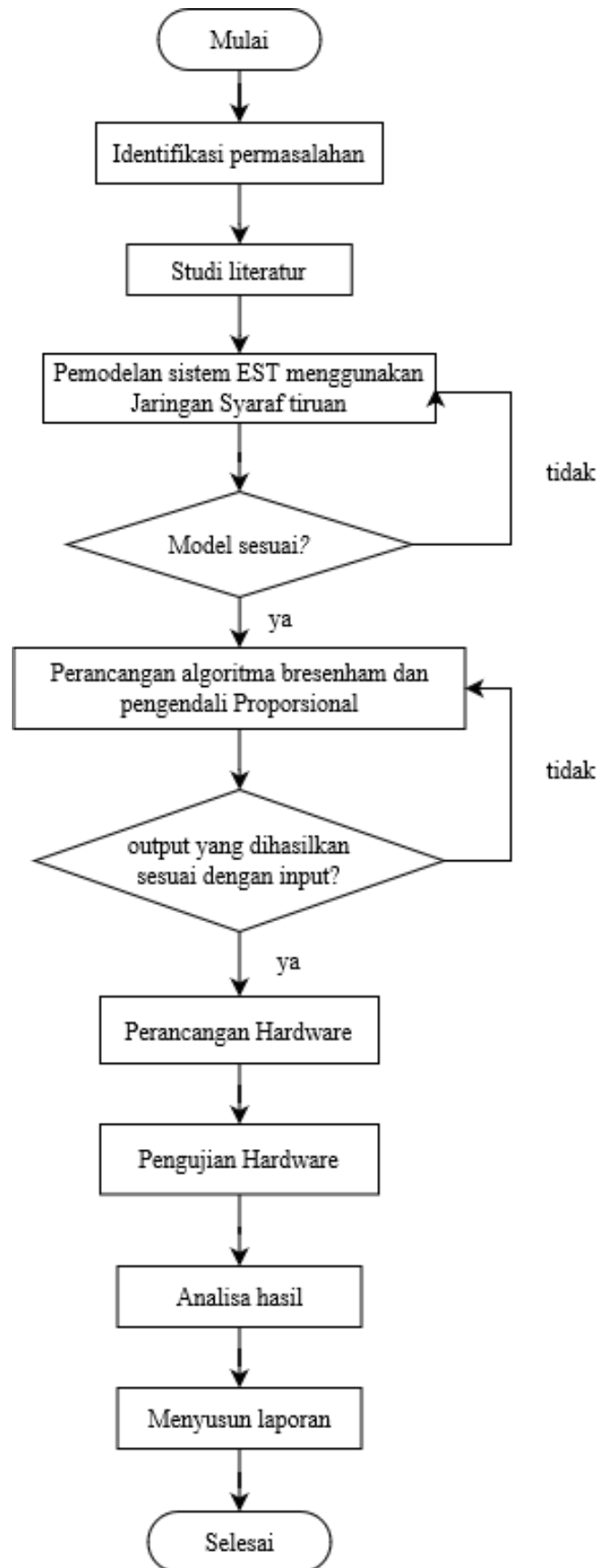
BAB 3

METODE PENELITIAN

Earthquake Shaking Table adalah alat eksperimen yang mencoba untuk menirukan gempa bumi yang sebenarnya. EST sering digunakan untuk memvalidasi benda uji terhadap gerakan input yang didefinisikan secara tepat. Input ini bisa berupa catatan waktu akselerasi, atau perpindahan yang diturunkan darinya. Gerakan tanah yang dihasilkan oleh gempa bumi memiliki komponen di semua enam derajat kebebasan (6DOF). Namun yang terekam oleh seismograf hanya 3 komponen, yaitu dua gerak horizontal (X dan Y) dan satu gerak vertikal (Z). Seismograf merekam displacement, kecepatan dan percepatan dari masing-masing komponen gerak. Untuk mensimulasikan gempa bumi yang sebenarnya secara lengkap, EST harus mampu bergerak dalam 3 arah referensi (X, Y, dan Z) sesuai dengan displacement, kecepatan dan akselerasi yang direkam oleh seismograf.

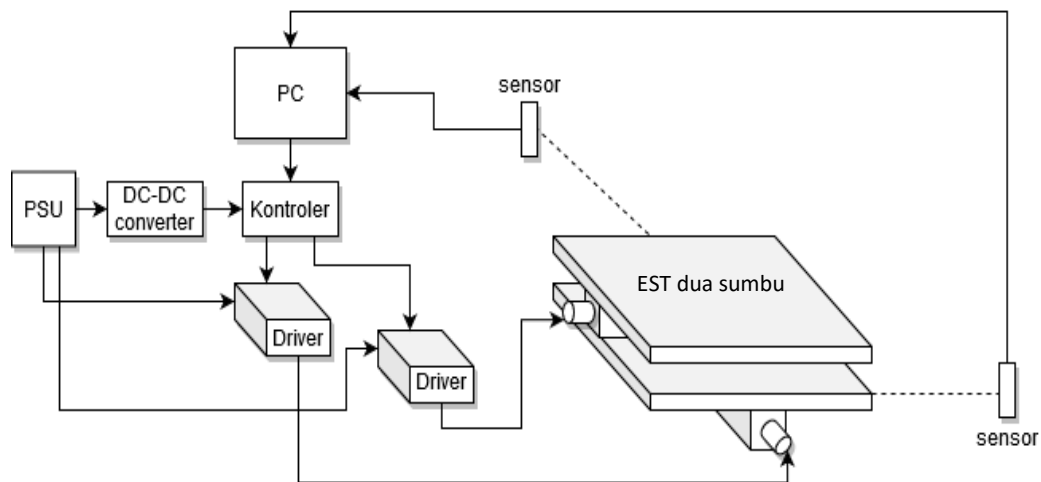
Pada penelitian ini, dilakukan perancangan EST dua sumbu yang mampu menghasilkan gerakan ke arah sumbu X dan sumbu Y. Input EST ini adalah posisi X dan Y yang didapatkan dari data displacement, yang direkam oleh seismograf. EST yang dirancang terdiri dari 2 meja dan 2 penggerak. Penggerak yang digunakan adalah *ballscrew linear guide actuator*. EST dua sumbu harus mampu menggerakkan meja ke arah X dan Y secara bersamaan menuju posisi yang diinginkan. Algoritma Bresenham diusulkan sebagai algoritma untuk menggerakkan aktuator secara bersamaan menuju koordinat yang ditentukan. Agar meja bergerak menuju posisi yang sesuai dengan input, pengendali PID diusulkan untuk memperbaiki error posisi.

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yaitu simulasi, rancang bangun sistem dan pengujian sistem, dengan tujuan akhir berupa prototipe sistem kontrol *displacement* untuk *Earthquake Shaking Table* yang digerakkan menggunakan *ball screw linear guide actuator*. Diagram alir penelitian ini secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.1.



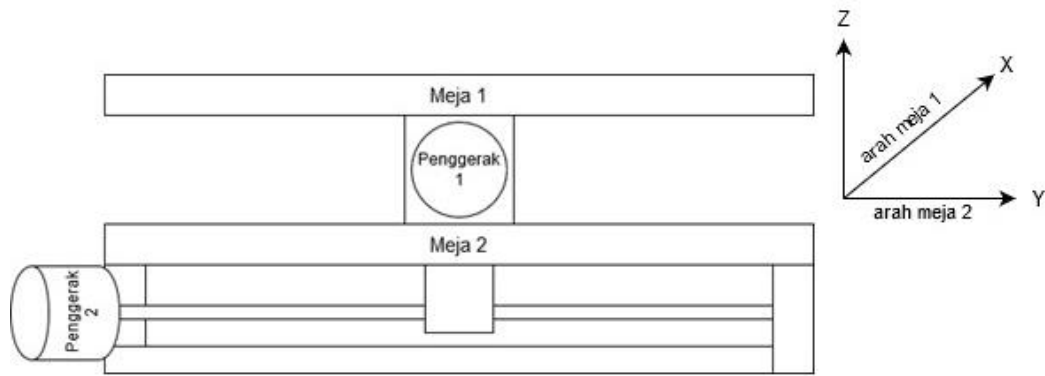
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir penelitian ini. Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah bagaimana merancang sistem kontrol *displacement* pada EST dua sumbu yang digerakkan menggunakan *ballscrew linear guide actuator* agar dapat menghasilkan gerakan ke arah X dan Y sesuai dengan posisi X dan Y yang diberikan. Sistem keseluruhan yang dirancang pada tesis ini ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema sistem EST dua sumbu secara keseluruhan

Gambar 3.2 menunjukkan bahwa sistem yang dirancang terdiri dari EST dua sumbu, *displacement sensor*, *stepping driver*, kontroler, power supply unit, DC-DC coverter dan PC. EST dua sumbu terdiri dari meja 1 yang digerakkan oleh penggerak 1 ke arah sumbu X dan meja 2 yang digerakkan oleh penggerak 2 ke arah sumbu Y. Sensor *displacement* dipasang di masing-masing meja. Posisi meja yang terbaca oleh sensor displacement dikirim menuju PC. Hasil pengkondisian sinyal di dalam PC menjadi masukan untuk kontroler. Sinyal yang dihasilkan kontroler digunakan sebagai masukan *stepping driver*. Di dalam *stepping driver* terjadi pengkondisian sinyal. Sinyal yang dihasilkan *stepping driver* digunakan untuk menggerakkan aktuator.



Gambar 3.3 Skema EST dua sumbu tampak samping

Gambar 3.3 adalah skema dari EST dua sumbu yang dirancang pada penelitian ini. EST dua sumbu terdiri dari 2 meja dan 2 penggerak. Meja 1 digerakkan oleh aktuator 1 ke arah sumbu X, sedangkan meja 2 digerakkan oleh aktuator 2 ke arah sumbu Y. Untuk menghasilkan gerak yang merepresentasikan gerakan gempal ke dua sumbu (X dan Y), EST dua sumbu harus dapat digerakkan secara bersamaan sesuai dengan arah sumbunya. Misalnya pada waktu t yang sama, meja 1 harus berpindah sejauh 2 cm ke arah sumbu X dan meja 2 harus berpindah sejauh 3 cm ke arah sumbu Y. Maka pada saat meja 2 berpindah sejauh 3 cm ke arah sumbu Y, penggerak 1 dan meja 1 menjadi beban dari penggerak 2. Sehingga penggerak 1 dan meja 1 ikut berpindah sejauh 3 cm ke sumbu Y dengan kondisi meja 1 juga sedang digerakkan oleh penggerak 1 berpindah sejauh 2 cm ke sumbu X.

Penggerak EST dua sumbu ini telah ditentukan, yaitu menggunakan *ballscrew linear guide actuator* tipe FLS80 yang diproduksi oleh FUYU. Kedua penggerak ini dioperasikan oleh 1 CPU. Agar kedua penggerak ini dapat bergerak secara bersamaan dan bergerak menuju posisi yang sesuai dengan input, algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional diusulkan pada penelitian ini. Sebelum mengimplementasikan algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional ke dalam mikrokontroler, algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional yang dirancang disimulasikan terlebih dahulu. Untuk melakukan simulasi, sistem yang akan dikontrol perlu dimodelkan terlebih dahulu. Setelah didapatkan model sistem, dibuat model dengan algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional. Model sistem dengan kontrol yang telah dirancang, kemudian disimulasikan. Jika hasil

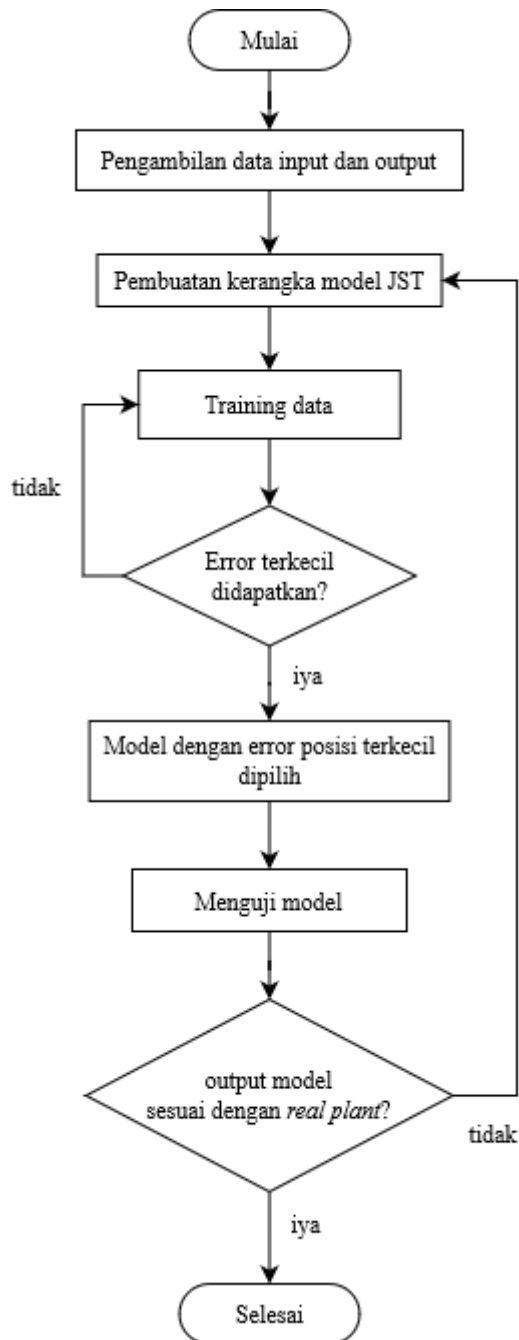
simulasi menunjukkan bahwa model dapat bergerak secara bersamaan dan mampu bergerak sesuai dengan posisi yang dimasukkan, maka selanjutnya rancangan algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional ini diimplementasikan ke dalam hardware. Hasil pengujian hardware dibandingkan dengan hasil simulasi.

3.1 Pemodelan *Earthquake Shaking Table* Menggunakan JST

EST dua sumbu yang dirancang pada penelitian ini dimodelkan ke dalam skema seperti pada Gambar 3.3. EST ini terdiri dari 2 meja dan 2 aktuator. Meja 1 digerakkan oleh aktuator 1 ke arah sumbu X, sedangkan meja 2 digerakkan oleh aktuator 2 ke arah sumbu Y. Untuk mendapatkan model EST dua sumbu, masing-masing meja dengan penggeraknya dimodelkan berdasarkan arah geraknya. Sistem dari penggerak 1 dan meja 1 dimodelkan dalam model meja 1. Sedangkan sistem dari penggerak 2 dan meja 2 dengan meja 1 dan penggerak 1 menjadi beban dari penggerak 2, dimodelkan dalam model meja 2.

Aktuator yang digunakan untuk menggerakkan EST ini telah ditentukan, yaitu menggunakan *ballscrew linear guide actuator* tipe FLS80 yang diproduksi oleh FUYU. Penggerak ini terdiri dari motor *stepper* dan ballscrew. Memodelkan sistem *ballscrew linear guide actuator* dengan meja ke dalam model matematis cukup sulit untuk dilakukan. Beberapa parameter seperti inersia motor, koefisien *viscous damping*, koefisien kekakuan, tidak disertakan dalam datasheet. Oleh karena itu, pada penelitian ini, pemodelan sistem secara empiris dipilih untuk memodelkan sistem ini.

Pemodelan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dipilih untuk memodelkan sistem penggerak dan meja dari EST dua sumbu yang akan dirancang. Diagram alir pemodelan EST menggunakan JST ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan sistem menggunakan JST

Gambar 3.4 menunjukkan diagram alir pemodelan menggunakan JST yang dilakukan pada penelitian ini. Pemodelan sistem secara empiris ini dilakukan dengan melakukan pendekatan melalui investigasi dan pengambilan data posisi dari masing-masing meja. Investigasi dilakukan terhadap *slip* yang dapat terjadi sewaktu-waktu setelah aktuator diberi input posisi tertentu. Pengambilan data dilakukan dengan cara mencatat input posisi yang dimasukkan ke dalam sistem dan

output posisi yang dihasilkannya. Setelah dilakukan pengambilan data input dan output dari sistem meja 1 dan meja 2, kerangka model JST dibuat, kemudian dilanjutkan dengan training data. Model JST meja 1 dan meja 2 yang menghasilkan error terkecil dipilih. Setelah itu model diuji dengan input yang sama seperti yang dimasukkan ke dalam sistem realnya. Hasil model dan real sistem dibandingkan. Jika error output model dengan output sistem real <5%, maka model meja 1 dan meja 2 menggunakan JST ini bisa digunakan untuk memodelkan sistem EST dua sumbu.

Untuk menggerakkan *ballscrew linear guide actuator* ini, perlu adanya *stepping driver*. *Stepping driver* yang digunakan pada EST ini adalah FUYU FMDD50D40NOM. Dari datasheet FUYU FMDD50D40NOM diketahui bahwa driver memiliki kemampuan 5000 *step/revolution*. 5000 *step/revolution* yang dimaksud adalah untuk menghasilkan 1 putaran dibutuhkan 5000 *step* motor. Untuk menghasilkan 1 *step* motor dibutuhkan 1 gelombang sinyal dengan duty cycle kurang lebih 5 μ s.

Lead adalah jarak tempuh linier yang dihasilkan oleh screw atau nut untuk satu rotasi penuh. FLS80 memiliki lead 10mm, berarti satu rotasi penuh jarak tempuh linear yang dihasilkan oleh screw adalah 10mm atau 1 cm. Sementara dari *stepping driver* memiliki kemampuan yaitu untuk menghasilkan 1 rotasi penuh dibutuhkan 5000*step*. Maka untuk menghasilkan 1 rotasi penuh kontroler harus memberi sinyal sebanyak 5000 sinyal. Dengan demikian, didapatkan bahwa untuk menggerakkan aktuator sejauh 1 cm dibutuhkan 5000 *step*.

$$\begin{aligned} \text{kemampuan driver} &= \frac{5000\text{step}}{\text{revolution}} \\ 1 \text{ revolution} &= 1 \text{ cm} \\ 1\text{revolution} &= 5000\text{step} \\ 1\text{cm} &= 5000\text{step} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dalam pengoperasiannya, aktuator membutuhkan input *step*. Sehingga perlu dilakukan konversi dari cm ke *step* terlebih dahulu. Persamaan (3.1) adalah persamaan konversi dari cm ke *step*. Pada pengambilan data yang dilakukan, posisi, kecepatan dan percepatan yang akan dijadikan sebagai input sistem diubah kedalam *step*. Kemudian posisi yang dihasilkan oleh aktuator dicatat.

Tabel 3.1. Data posisi meja 1 dengan input percepatan 50000 *step/s²*, kecepatan input 50000 *step/s* dan posisi dalam *step* yang diubah-ubah

Input			Output					
<i>Step/s²</i>	<i>Step/s</i>	<i>Step</i>	Cacah data (cm)					Rata-rata (cm)
			1	2	3	4	5	
50000	50000	-50000	-10	-9,9	-10	-10	-9,9	-9,96
50000	50000	-45000	-9	-9	-9	-9,1	-9	-9,02
50000	50000	-40000	-8	-8	-8	-8,1	-8,1	-8,04
50000	50000	-35000	-7	-7,1	-7	-7	-7	-7,02
50000	50000	-30000	-6	-6	-6	-6	-6,1	-6,02
50000	50000	-25000	-5	-5,1	-5	-5	-5	-5,02
50000	50000	-20000	-4	-4	-4	-4,1	-4	-4,02
50000	50000	-15000	-3	-3	-3	-3	-3	-3
50000	50000	-10000	-2,1	-2	-2	-2	-2	-2,02
50000	50000	-5000	-1	-1	-1,1	-1	-1	-1,02
50000	50000	5000	1	1	1,1	1	1	1,02
50000	50000	10000	2	2	2	2	2	2
50000	50000	15000	3,1	3	3	3	3	3,02
50000	50000	20000	4	4	4	4	4	4
50000	50000	25000	5	5,1	5	5	5	5,02
50000	50000	30000	6,1	6	6	6	6	6,02
50000	50000	35000	7	7	7	7,1	7	7,02
50000	50000	40000	8	8	8,1	8	8	8,02
50000	50000	45000	9	9	9	9	9	9
50000	50000	50000	10	10	10	10	10	10

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pada masing-masing variasi input percepatan, kecepatan dan posisi. Variasi input percepatan yang diberikan adalah 50000 *step/s²*, 80000 *step/s²* dan 100000 *step/s²*. Variasi input kecepatan yang diberikan adalah 50000 *step/s*, 80000 *step/s* dan 100000 *step/s*. Sedangkan variasi posisi yang diberikan adalah -50000 *step*, -45000 *step*, -40000 *step*, -35000 *step*, -30000 *step*, -25000 *step*, -20000 *step*, -15000 *step*, -10000 *step*, -5000 *step*, 5000 *step*, 10000 *step*, 15000 *step*, 20000 *step*, 25000 *step*, 30000 *step*, 35000 *step*, 40000 *step*, 45000 *step* dan 50000 *step*. Tabel 3.1 adalah cuplikan dari data posisi meja 1, sedangkan data posisi meja 2 disajikan pada Tabel 3.2.

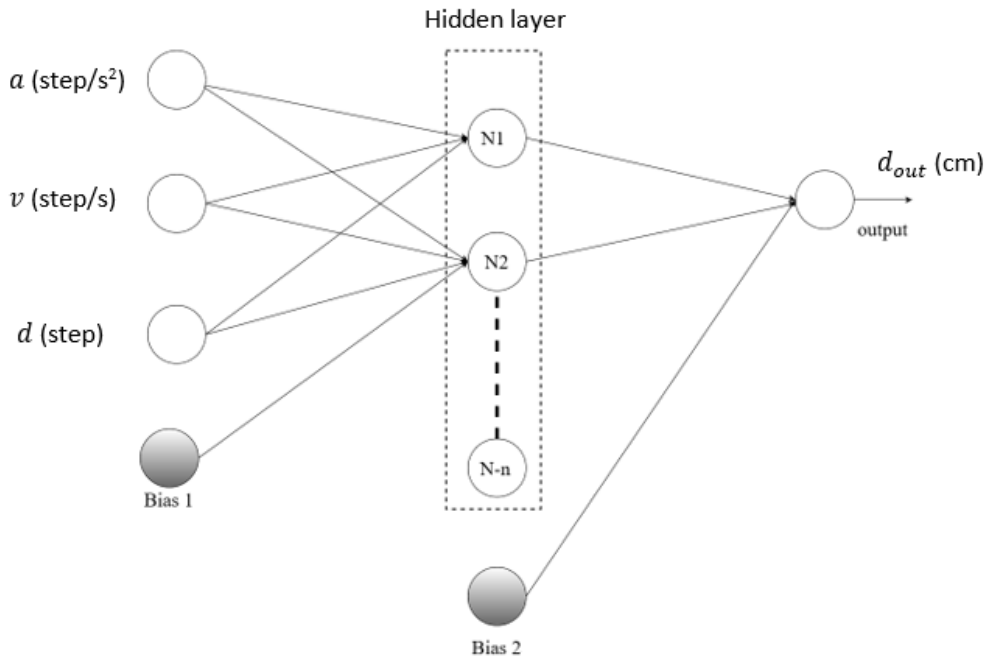
Tabel 3.2 Data posisi meja 2 dengan percepatan input 50000 $step/s^2$ dan kecepatan input 50000 $step/s$ dan posisi dalam $step$ yang diubah-ubah

Input			Output					
$Step/s^2$	$Step/s$	$Step$	Cacah data (cm)					Rata-rata (cm)
			1	2	3	4	5	
50000	50000	-50000	-10	-9,9	-10	-9,9	-10	-9,96
50000	50000	-45000	-9	-8,9	-9	-9	-8,9	-8,96
50000	50000	-40000	-7,9	-7,9	-8	-8	-8	-7,96
50000	50000	-35000	-7	-6,9	-7	-7	-6,9	-6,96
50000	50000	-30000	-6	-6	-6	-5,9	-6	-5,98
50000	50000	-25000	-4,9	-5	-4,9	-5	-5	-4,96
50000	50000	-20000	-3,9	-3,9	-3,9	-4	-4	-3,94
50000	50000	-15000	-3	-3	-3	-3	-3	-3
50000	50000	-10000	-2	-2	-2	-1,9	-2	-1,98
50000	50000	-5000	-1	-1	-1	-1	-1	-1
50000	50000	5000	1	0,9	1	1	1	0,98
50000	50000	10000	2	2	1,9	1,9	1,9	1,94
50000	50000	15000	2,9	2,9	3	3	2,9	2,94
50000	50000	20000	4	4	3,9	4	3,9	3,96
50000	50000	25000	4,9	5	5	4,9	5	4,96
50000	50000	30000	6	6	6	5,9	5,9	5,96
50000	50000	35000	7	7	6,9	6,9	7	6,96
50000	50000	40000	8	7,9	7,9	7,9	8	7,94
50000	50000	45000	9	9,1	9	9	8,9	9
50000	50000	50000	10,1	10	9,9	10	9,9	9,98

Tabel 3.1 dan 3.2 adalah sebagian dari data input dan output yang akan digunakan sebagai training data pada pemodelan sistem menggunakan JST. Untuk mendapatkan model EST menggunakan JST, yang perlu dilakukan terlebih dahulu adalah memodelkan masing-masing sistem meja berdasarkan arah geraknya. EST ini terdiri dari 2 sistem meja, yaitu meja 1 dan meja 2. Model EST didapatkan dari gabungan antara model meja 1 dan meja 2. Pemodelan meja 1 dan meja 2 akan dijelaskan pada sub bab 3.1.1 dan 3.1.2. Hasil pemodelan meja 1 dan 2 akan digabung dan menjadi model EST pada sub bab 3.1.3.

3.1.1 Pemodelan Meja 1 Menggunakan JST

Pemodelan sistem EST dua sumbu terdiri dari 2 model sistem, yaitu model meja 1 dan model meja 2. Pemodelan meja 1 menggunakan JST akan dibahas pada sub bab ini. Setelah data input dan output didapatkan, kerangka model JST dengan 1 *hidden layer* dirancang seperti tampak pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Jaringan Syaraf Tiruan

Gambar 3.5 menunjukkan kerangka model JST yang akan dirancang. Model JST ini memiliki tiga layer, yaitu 1 layer input, 1 *hidden layer*, dan 1 layer output. Pada layer input, terdapat tiga input, yaitu percepatan, kecepatan dan posisi, sedangkan pada layer output terdapat satu output, yaitu posisi. Pada *hidden layer*, terdapat *hidden neuron*. Untuk mendapatkan model JST dengan error terkecil, dirancang 4 macam model dengan jumlah *hidden neuron* yang berbeda – beda yaitu: 2, 5, 10 dan 50 *neuron* secara berturut – turut. Dari keempat model tersebut akan dipilih 1 model yang menghasilkan error terkecil. Model yang dirancang adalah model JST tipe *multi-layer perceptron* dengan propagasi balik. Langkah-langkah pemodelan JST adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi awal seluruh bobot dengan nilai *random*
2. Lakukan proses alur maju (*feed forward*) dengan menggunakan persamaan:

$$x_{out} = f^i(y_i) \quad (3.2)$$

dengan,

$$y_i = \Sigma w^i x_i \quad (3.3)$$

$$f^i = \frac{1 - e^{-2y_i}}{1 + e^{-2y_i}} \quad (3.4)$$

Dimana:

w^i = bobot untuk setiap layer

x_i = nilai input untuk setiap layer

f^i = Fungsi aktivasi bipolar sigmoid

3. Dari output proses alur maju, didapatkan error terhadap target, e
4. Dengan menggunakan error yang didapat, dilakukan propagasi balik untuk meng-*update* bobot semula dengan menggunakan persamaan seperti berikut:

$$w_{(k+1)} = w_{(k)} + \alpha_{(k)} e_{(k)} x_{(layer,i)} \quad (3.5)$$

Dimana:

$w_{(k+1)}$ = bobot baru

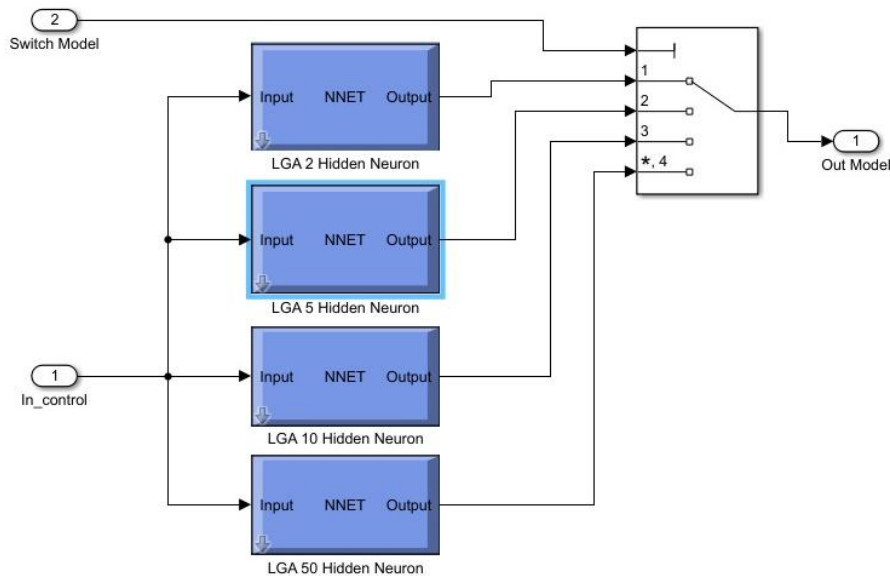
$\alpha_{(k)}$ = *learning rate*

$e_{(k)}$ = error

$x_{(layer,i)}$ = Input untuk setiap layer

5. Dilakukan alur maju seperti langkah pada nomor 2 hingga 4, kemudian berulang hingga didapat error terkecil.

Model meja 1 adalah model sistem dari meja 1 yang digerakkan oleh penggerak 1 ke arah sumbu X yang pemodelannya menggunakan JST. Rancangan model meja 1 menggunakan perangkat lunak ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Model meja dengan variasi 4 *hidden neuron*

Sistem meja 1 dimodelkan menggunakan JST. Rancangan model meja 1 ditunjukkan oleh Gambar 3.5. Gambar 3.5 adalah model JST yang telah dirancang dengan 4 variasi *hidden neuron* yaitu 2, 5, 10 dan 50 *hidden neuron*. Setelah model meja 1 dirancang, model ini diuji dengan cara memasukkan nilai input $step/s^2$, $step/s$, dan $step$. Nilai output yang dihasilkan oleh model dibandingkan dengan output sistem realnya. Kemudian dihitung %error untuk masing-masing variasi *hidden neuron*. Model terbaik adalah model yang menghasilkan nilai error terkecil Hasil pengujian rancangan model meja 1 ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Hasil pengujian model meja 1

Model Meja 1	Target	Output	% Error
2 <i>Hidden Neuron</i>	9	8,242	8,426
5 <i>Hidden Neuron</i>	9	9,019	0,214
10 <i>Hidden Neuron</i>	9	9,056	0,624
50 <i>Hidden Neuron</i>	9	9,056	0,624

Tabel 3.3 adalah hasil dari pengujian model JST meja 1 dengan memasukkan nilai input $50000\ step/s^2$, $50000\ step/s$ dan $45000\ step$. Nilai persentase error terkecil yaitu 0,214, didapatkan oleh model dengan 5 *hidden neuron*. Setelah didapat model dengan error terkecil, dilakukan penurunan persamaan dari model JST dengan 5 *hidden neuron* yang telah didapat. Adapun

langkah – langkah yang dilakukan untuk menurunkan persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Dilakukan pengambilan data bobot yang telah di-update untuk setiap layer.
2. Dengan menggunakan persamaan 3.2, didapatkan persamaan untuk setiap neuron pada hidden layer sebagai berikut:

$$Neuron1 = -4,12337a + 1,362553v - 0,82458x + 2,562103 \quad (3.6)$$

$$Neuron2 = -0,90542a + 0,099421v - 1,42895x - 1,73994 \quad (3.7)$$

$$Neuron3 = 0,686861a - 0,1464v - 0,21421x - 0,36854 \quad (3.8)$$

$$Neuron4 = -0,5435a + 2,936556v - 0,67484x - 1,32072 \quad (3.9)$$

$$Neuron5 = -0,54937a + 0,084257v - 1,52868x + 0,40696 \quad (3.10)$$

Dimana:

a = input nilai percepatan

v = input nilai kecepatan

x = input nilai posisi

3. Dengan mensubstitusi masing-masing persamaan (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) dan (3.9) ke dalam fungsi aktivasi (persamaan (3.3)), dilakukan perhitungan untuk setiap neuron, dan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$N_{(1)} = \frac{1 - e^{-2(-4,12337a + 1,362553v - 0,82458x + 2,562103)}}{1 + e^{-2(-4,12337a + 1,362553v - 0,82458x + 2,562103)}} \quad (3.11)$$

$$N_{(2)} = \frac{1 - e^{-2(-0,90542a + 0,099421v - 1,42895x - 1,73994)}}{1 + e^{-2(-0,90542a + 0,099421v - 1,42895x - 1,73994)}} \quad (3.12)$$

$$N_{(3)} = \frac{1 - e^{-2(0,686861a - 0,1464v - 0,21421x - 0,36854)}}{1 + e^{-2(0,686861a - 0,1464v - 0,21421x - 0,36854)}} \quad (3.13)$$

$$N_{(4)} = \frac{1 - e^{-2(-0,5435a + 2,936556v - 0,67484x - 1,32072)}}{1 + e^{-2(-0,5435a + 2,936556v - 0,67484x - 1,32072)}} \quad (3.14)$$

$$N_{(5)} = \frac{1 - e^{-2(-0,54937a + 0,084257v - 1,52868x + 0,40696)}}{1 + e^{-2(-0,54937a + 0,084257v - 1,52868x + 0,40696)}} \quad (3.15)$$

4. Selanjutnya dilakukan perhitungan layer output dengan persamaan (3.2) sebagai berikut:

$$x_{out_meja1} = f(-0,10706N_{(1)} - 0,61244N_{(2)} - 0,77742N_{(3)} + 0,014044N_{(4)} - 0,58826N_{(5)} - 0,48048) \quad (3.16)$$

5. Sehingga persamaan output dari model meja 1 dengan 5 *hidden neuron* adalah sebagai berikut:

$$x_{out_meja1} = \frac{1 - e^{-2(-0,10706N_{(1)} - 0,61244N_{(2)} - 0,77742N_{(3)} + 0,014044N_{(4)} - 0,58826N_{(5)} - 0,48048)}}{1 + e^{-2(-0,10706N_{(1)} - 0,61244N_{(2)} - 0,77742N_{(3)} + 0,014044N_{(4)} - 0,58826N_{(5)} - 0,48048)}} \quad (3.17)$$

Dari persamaan (3.17) yang telah diperoleh untuk model meja 1 tersebut, dirancang model blok menggunakan Simulink. Berikutnya dilakukan validasi model meja 1 dengan cara membandingkan output yang dihasilkan oleh model meja 1 dengan output dari sistem real meja 1. Nilai input dimasukkan ke dalam model kemudian nilai outputnya dicatat. Pada pengujian model JST meja 1 ini, input yang diberikan dan output yang dihasilkan oleh model ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 menunjukkan hasil perbandingan antara posisi yang dihasilkan oleh model meja 1 dengan posisi yang dihasilkan oleh sistem real meja 1. Dari Tabel 3.5 dapat dilihat bahwa error terbesar adalah 4,904%, yaitu pada input 50000 *step/s*², 80000 *step/s*, 5000 *step*.

3.2.2 Pemodelan meja 2 menggunakan JST

Model meja 2 adalah model sistem dari meja 2 yang digerakkan oleh penggerak 2 ke arah sumbu Y yang pemodelannya menggunakan JST. Hasil rancangan model meja 2 menggunakan perangkat lunak sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Baik model meja 1 maupun meja 2, rancangan model JSTnya sama, yaitu dengan 4 variasi *hidden neuron*, yaitu 2, 5, 10 dan 50. Seperti pengujian model JST meja 1, dari model yang telah dirancang, kemudian diuji dengan cara memasukkan nilai input percepatan dalam *step/s*², kecepatan dalam *step/s*, dan posisi dalam *step*. Output model dibandingkan dengan output sistem real meja 2, sehingga didapatkan % error. Model yang dipilih adalah model yang menghasilkan nilai error terkecil. Hasil pengujian rancangan model meja 2 ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Hasil pengujian model meja 2

Model Meja 2	Target	Output	% Error
2 <i>Hidden Neuron</i>	9	7,979	11,35
5 <i>Hidden Neuron</i>	9	9,062	0,685
10 <i>Hidden Neuron</i>	9	8,852	1,639
50 <i>Hidden Neuron</i>	9	9,117	1,302

Tabel 3.5 adalah hasil pengujian model meja 2 dengan memasukkan nilai input 50000 *step/s*², 50000 *step/s* dan 45000*step*. Didapatkan bahwa nilai % error terkecil didapatkan dari model meja 2 yang menggunakan 5 *hidden neuron* dengan nilai nya adalah 0,685%. Setelah didapat model dengan error terkecil, dilakukan penurunan persamaan dari model JST dengan 5 *hidden neuron* yang telah didapat. Langkah 1 hingga 5 pada Sub BAB 3.1.1 Pemodelan meja 1 menggunakan JST dilakukan untuk model meja 2 sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$N_{2(1)} = \frac{1-e^{-2(1,61944a-0,07122v-1,58156y-1,96977)}}{1+e^{-2(1,61944a-0,07122v-1,58156y-1,96977)}} \quad (3.18)$$

$$N_{2(2)} = \frac{1-e^{-2(4,462311a-0,00418v+0,513271y-0,27102)}}{1+e^{-2(4,462311a-0,00418v+0,513271y-0,27102)}} \quad (3.19)$$

$$N_{2(3)} = \frac{1-e^{-2(-0,31014a-0,06224v+2,037134y-3,31046)}}{1+e^{-2(-0,31014a-0,06224v+2,037134y-3,31046)}} \quad (3.20)$$

$$N_{2(4)} = \frac{1-e^{-2(1,400317a+0,001445v-0,71521y+0,917161)}}{1+e^{-2(1,400317a+0,001445v-0,71521y+0,917161)}} \quad (3.21)$$

$$N_{2(5)} = \frac{1-e^{-2(0,430551a+0,249412v+4,340352y+5,654888)}}{1+e^{-2(0,430551a+0,249412v+4,340352y+5,654888)}} \quad (3.22)$$

Dengan mensubstiusi persamaan (3.18) sampai (3.21) ke persamaan (3.2), diperoleh persamaan model meja 2 adalah sebagai berikut:

$$x_{out_meja2} = \frac{1-e^{-2(-0,56043N_{2(1)}+1,336893N_{2(2)}+4,396079N_{2(3)}-1,57732N_{2(4)}+3,219724N_{2(5)}+1,419813)}}{1+e^{-2(-0,56043N_{2(1)}+1,336893N_{2(2)}+4,396079N_{2(3)}-1,57732N_{2(4)}+3,219724N_{2(5)}+1,419813)}} \quad (3.23)$$

Dari persamaan (3.23) yang telah diperoleh untuk model meja 2 tersebut, dirancang model blok menggunakan Simulink. Pada pengujian model meja 2 juga dilakukan validasi dengan membandingkan output model meja 2 dengan output sistem real meja 2. Input yang diberikan dan output yang dihasilkan oleh model ditunjukkan pada Tabel 3.6.

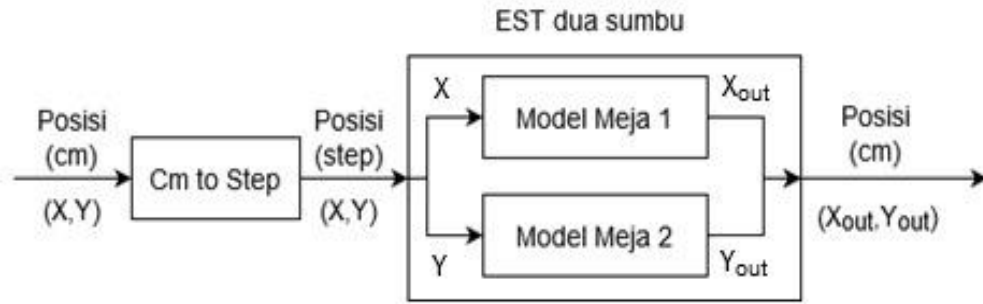
Tabel 3.6. Hasil perbandingan ouput model meja 2 dan sistem real meja 2

Input				Output sistem real meja 2 (cm)	Output model meja 2 (cm)	%error antara output sistem real dengan model meja 2
<i>a</i>	<i>v</i>	<i>y</i>				
<i>step/s²</i>	<i>step/s</i>	<i>step</i>	cm			
50000	80000	5000	1	1	0,997	0,3
50000	80000	10000	2	2	1,961	1,95
50000	80000	15000	3	3	2,908	3,067
50000	80000	20000	4	3,9	3,855	1,154
50000	80000	25000	5	5	4,824	3,52
50000	80000	30000	6	5,9	5,831	1,169
50000	80000	35000	7	7	6,872	1,829
50000	80000	40000	8	8	7,898	1,275
50000	80000	45000	9	8,9	8,807	1,045
50000	80000	50000	10	9,9	9,482	4,222

Tabel 3.6 menunjukkan hasil perbandingan antara posisi yang dihasilkan oleh model meja 2 dengan posisi yang dihasilkan oleh sistem real meja 2. Dari Tabel 3.6 dapat dilihat bahwa error terbesar adalah 4,222%, yaitu pada input 50000 *step/s²*, 80000 *step/s* 50000 *step*.

3.1.3 Model EST Menggunakan JST

Pada sub bab 3.1.1 dan 3.1.2, model meja 1 dan meja 2 telah didapatkan. Telah disebutkan sebelumnya bawa model EST terdiri dari sistem meja 1 dan meja 2, dengan sistem meja 1 dimodelkan dalam model meja 1 dan sistem meja 2 dimodelkan dalam model meja 2. Model EST didapatkan dari gabungan meja 1 dan meja 2. Diagram blok model EST ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Diagram blok model EST

Gambar 3.7 menunjukkan diagram blok model EST yang terdiri dari model meja 1 dan meja 2. Input model EST ini adalah posisi (X,Y) dalam satuan cm. Pada real plant, untuk mengoperasikan aktuator, perlu input dalam *step*. Sehingga input posisi (X,Y) dalam cm perlu diubah kedalam *step* dengan menggunakan persamaan (3.1). Setelah input posisi (X,Y) diubah kedalam *step*, komponen input posisi X menjadi masukan untuk model meja 1, dan Y menjadi masukan untuk model meja 2. Output model meja 1 adalah X_{out} , sedangkan output meja 2 adalah Y_{out} . Karena kedua aktuator digerakkan secara bersamaan, maka output model EST dinyatakan dalam posisi (X_{out} , Y_{out}). Persamaan output model EST dapat ditulis ke dalam persamaan berikut:

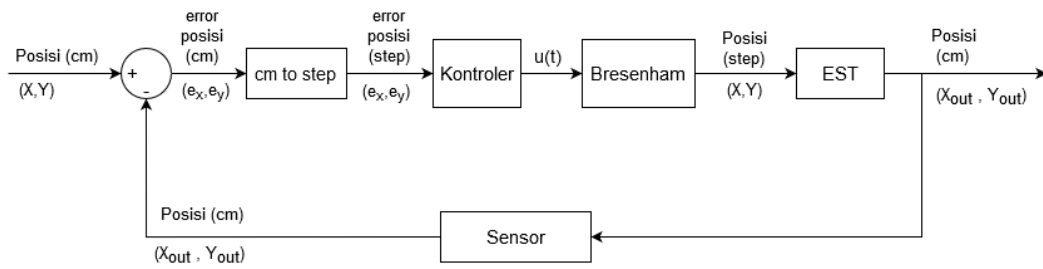
$$Output\ model\ EST = \begin{bmatrix} X_{out} \\ Y_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{out_meja2} \\ Y_{out_meja1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{out} \\ Y_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - e^{-2(-0,56043N_{2(1)}+1,336893N_{2(2)}+4,396079N_{2(3)}-1,57732N_{2(4)}+3,219724N_{2(5)}+1,419813)}}{1 + e^{-2(-0,56043N_{2(1)}+1,336893N_{2(2)}+4,396079N_{2(3)}-1,57732N_{2(4)}+3,219724N_{2(5)}+1,419813)}} \\ \frac{1 - e^{-2(-0,10706N_{1(1)}-0,61244N_{1(2)}-0,77742N_{1(3)}+0,014044N_{1(4)}-0,58826N_{1(5)}-0,48048)}}{1 + e^{-2(-0,10706N_{1(1)}-0,61244N_{1(2)}-0,77742N_{1(3)}+0,014044N_{1(4)}-0,58826N_{1(5)}-0,48048)}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Dengan $N_{1(1)} \sim N_{1(5)}$ adalah persamaan (3.11) sampai (3.15), dan $N_{2(1)} \sim N_{2(5)}$ adalah persamaan (3.18) sampai (3.22).

3.2 Perancangan Sistem Kontrol

Setelah model EST didapatkan dengan menggunakan JST, berikutnya dilakukan perancangan sistem kontrol. Secara keseluruhan, diagram blok sistem kontrol yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Diagram blok sistem kontrol displacement

Gambar 3.8 adalah diagram blok sistem kontrol displacement yang dirancang untuk mengendalikan *displacement* EST agar EST dapat menghasilkan posisi X dan Y yang sesuai dengan posisi X dan Y yang dimasukkan. Input yang digunakan pada sistem ini adalah posisi X dan Y dalam centimeter, input tersebut dikonversi oleh unit pengkonversi menjadi *step*. Kemudian data *step* tersebut menjadi input pengendali Proporsional bersama dengan error yang dihasilkan antara meja dan setpoint. Kemudian, data output dari pengendali Proporsional digerakan oleh model EST dengan menggunakan trajectory posisi yang diberikan oleh algoritma bresenham. Kontrol proporsional yang digunakan mengacu pada persamaan (3.24). Gambar 3.9 menunjukkan blok diagram dari kontroler proporsional yang dirancang.

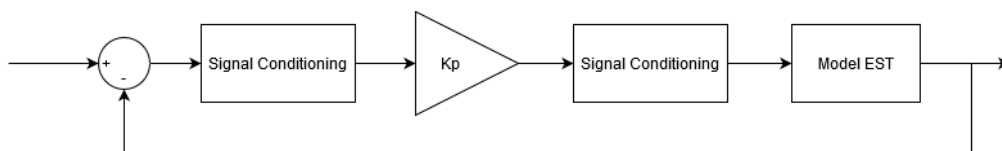
$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.24)$$

Dimana:

$u(t)$ = sinyal kontrol

$e(t)$ = sinyal error

K_p = gain *proportional*



Gambar 3.9 Blok diagram kontroler proporsional

Dari Gambar 3.9 diatas sinyal *feedback* X_{out} dan Y_{out} dijumlahkan dengan hasil konversi sinyal input dan menghasilkan nilai error $e(t)$. Nilai error ini menjadi masukan dari kontroler proporsional dan outputnya kemudian dijumlahkan

kembali dengan sinyal input dan menghasilkan sinyal kontrol $u(t)$ untuk menggerakkan model EST. Nilai K_p didapatkan dari trial and error. Setelah beberapa kali memasukkan nilai K_p , didapatkan nilai K_p untuk memperbaiki error posisi X, K_{p_x} adalah 0,5. Sedangkan nilai K_p untuk memperbaiki error posisi Y, K_{p_y} adalah 0,001.

Tahap selanjutnya adalah merancang algoritma Bresenham. Alur pemrograman untuk algoritma ini tampak pada diagram alir Gambar 3.10.

Diagram alir pada Gambar 3.10 menunjukkan alur proses pembuatan algoritma bresenham secara umum. Dari pemahaman pada diagram alir tersebut, dibuatlah program untuk menentukan titik *trajectory* menggunakan MATLAB. Pada awalnya, tentukan terlebih dahulu nilai koordinat awal (X_1, Y_1) dan koordinat tujuan (X_2, Y_2) lalu hitung jarak koordinat antara kedua titik sesuai dengan diagram alir diatas. Fungsi Bresenham tersebut dibuat dengan menggunakan MATLAB dengan *pseudo code* sebagai berikut:

```
function [x,y]=bresenham(x1,y1,x2,y2)
```

```
x1=round(x1);  
x2=round(x2);  
y1=round(y1);  
y2=round(y2);
```

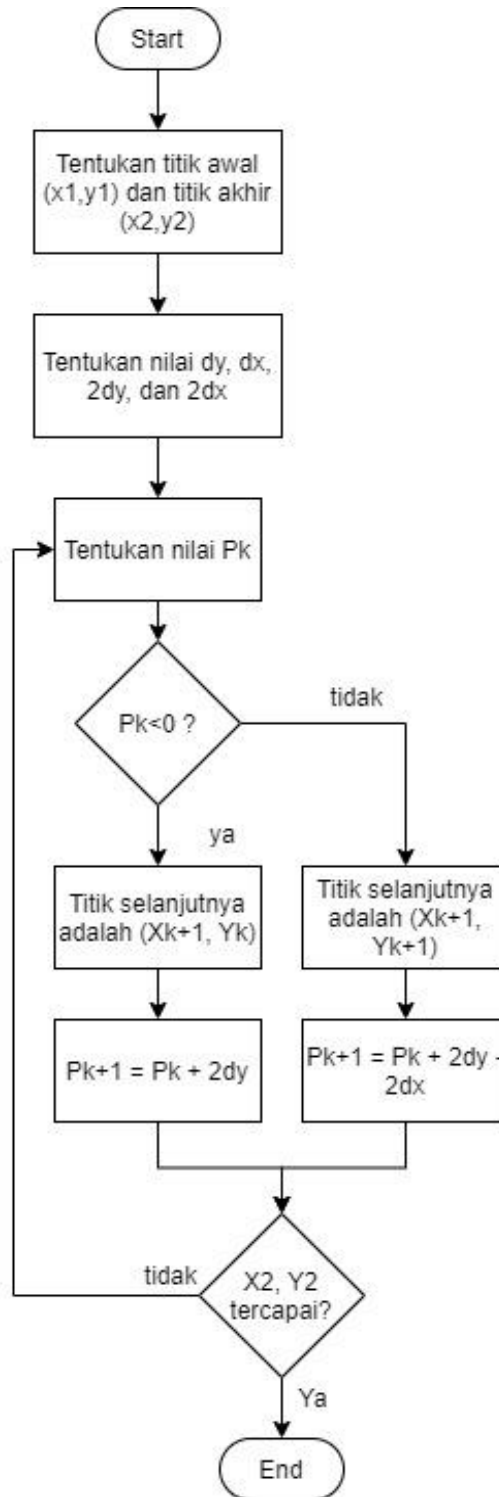
```
dx=abs(x2-x1);  
dy=abs(y2-y1);
```

Setelah itu, menentukan arah kecuraman (P_k dalam hal ini menjadi variabel *steep*) dan menggambar sesuai tingkat kecuraman dengan menggunakan *pseudo code* seperti berikut

```
steep=abs(dy)>abs(dx);
```

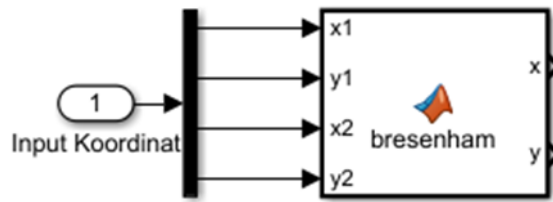
```
if steep  
    t=dx;  
    dx=dy;  
    dy=t;  
end
```

Kemudian hasil pemrograman matlab tersebut dimasukkan kedalam sebuah blok Simulink bernama *MATLAB Function* seperti pada Gambar 3.11 untuk kemudian diuji coba.



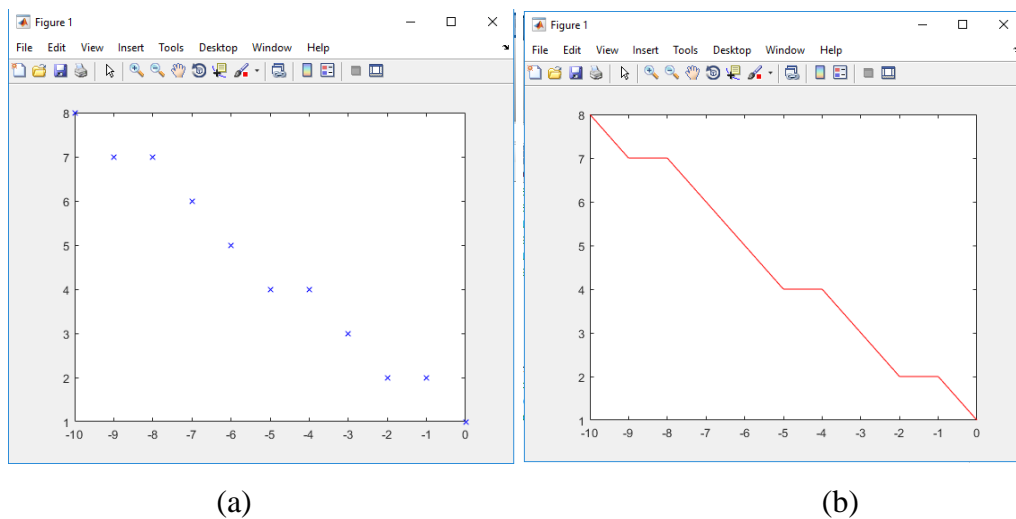
Gambar 3.10 Diagram alir algoritma Bresenham

Pada simulink, dirancang sebuah blok fungsi Matlab untuk algoritma Bresenham sesuai dengan alur diagram alir pada Gambar 3.10 sehingga menjadi suatu blok tersendiri seperti tampak pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Blok fungsi Bresenham pada Simulink

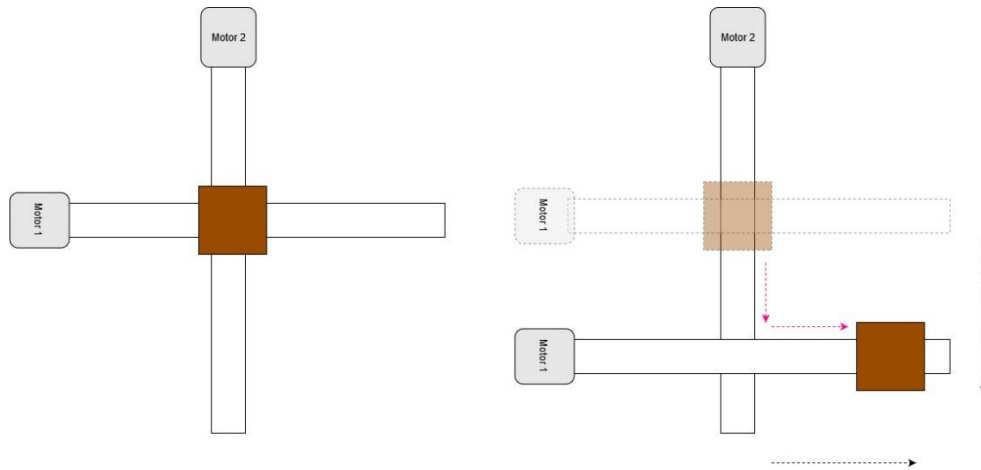
Dengan nilai x_1 , y_1 pada Gambar 3.11 di atas merupakan koordinat awal dan x_2 , y_2 adalah koordinat tujuan. Model blok tersebut kemudian diuji coba dengan memasukkan koordinat (0,1) sebagai posisi awal dan koordinat (-10, 8) sebagai koordinat tujuan. Hasil dari algoritma ini tampak pada Gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3.12. Hasil pengujian fungsi Bresenham. (a) titik piksel perpindahan (b) model garis perpindahan

Pada Gambar 3.12 menunjukkan hasil pengujian dengan Gambar 3.12(a) merupakan hasil perpindahan dalam bentuk titik piksel, sementara Gambar 3.12(b) menunjukkan hasil perpindahan dalam bentuk garis lurus. Hal ini menunjukkan bahwa model algoritma Bressenham telah berfungsi dengan baik.

Pergerakan linear aktuator antara koordinat input dan koordinat yang dituju, secara normal, akan bergerak secara sekuensial (bergantian). Pada Gambar 3.13 berikut tampak pergerakan sekuensial dari kedua aktuator.



Gambar 3.13 Pergerakan aktuator secara sekuensial.

Pada Gambar 3.13, tampak kotak yang dipindahkan oleh kedua aktuator menuju suatu koordinat tertentu menggunakan linear aktuator. Kotak tersebut bergerak sesuai pergerakan yang ditunjukkan oleh garis panah berwarna merah pada Gambar 3.13 diatas. Pergerakan secara sekuensial seperti yang ditunjukkan diatas terjadi karena tidak ada koordinasi yang dapat meng-kompensasi kedua aktuator agar dapat bergerak bersamaan.

Algoritma bressenham merupakan suatu algoritma yang digunakan untuk melakukan proses penggambaran suatu garis berdasarkan nilai pixel (rasterisasi) yang bernilai *integer*. Hal ini sangat cocok digunakan untuk pergerakan motor *stepper* yang notabene bergantung pada gerakan *step/revolusi*. Sebagai contoh, sebuah kotak akan dipindahkan dari koordinat (0,0) menuju koordinat (5, 3). Maka kontroller akan menghitung jarak absolut dx dan dy pada tiap – tiap sumbu yaitu dx=5cm dan dy = 3 cm. Kemudian kontroller akan mengubah jarak tersebut menjadi nilai *step* pada motor *stepper*, dengan acuan bahwa 1 cm = 5000 *step*, maka dx = 25000 *step*, dan dy = 15000 *step*. Kemudian dengan perhitungan menggunakan algoritma bressenham, didapat inialisasi awal nilai $P = 2dy-dx = 1$ dan pergerakan seperti tampak pada Table 3.7 sebagai berikut:

Tabel 3.7 Pergerakan titik koordinat menggunakan algoritma bresenham

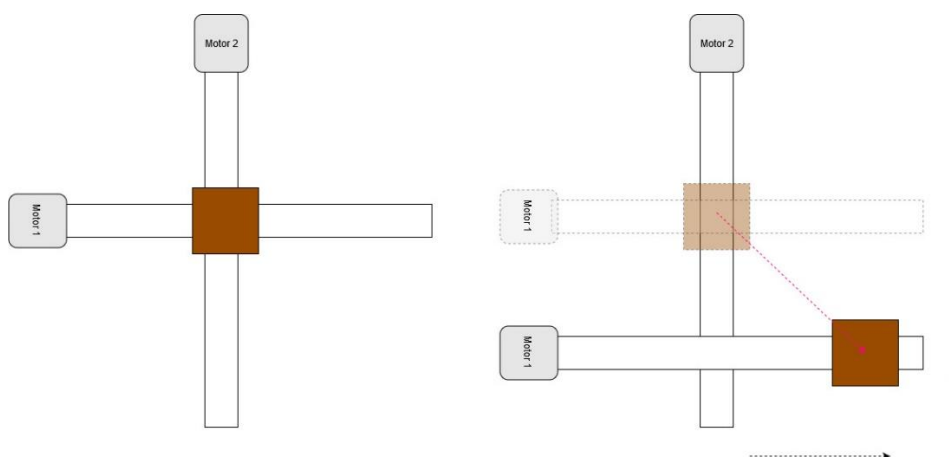
X	Y	P
0	0	1
1	1	-3
2	1	3
3	2	-1
4	2	5
5	3	1

Apabila koordinat pergerakan pada tabel 1 diatas diubah dengan mengikuti setting 1 cm = 5000 *step*, maka perpindahan tersebut tampak pada Table 3.8 sebagai berikut:

Tabel 3.8 Perubahan koordinat menjadi perpindahan dalam *step*

X	Y	Xstep	Ystep
0	0	0	0
1	1	5000	5000
2	1	5000	0
3	2	5000	5000
4	2	5000	0
5	3	5000	5000

Sehingga pergerakan kotak tersebut akan menjadi seperti tampak pada Gambar 3.14 sebagai berikut:



Gambar 3.14 Pergerakan kotak dengan menggunakan algoritma Bresenham

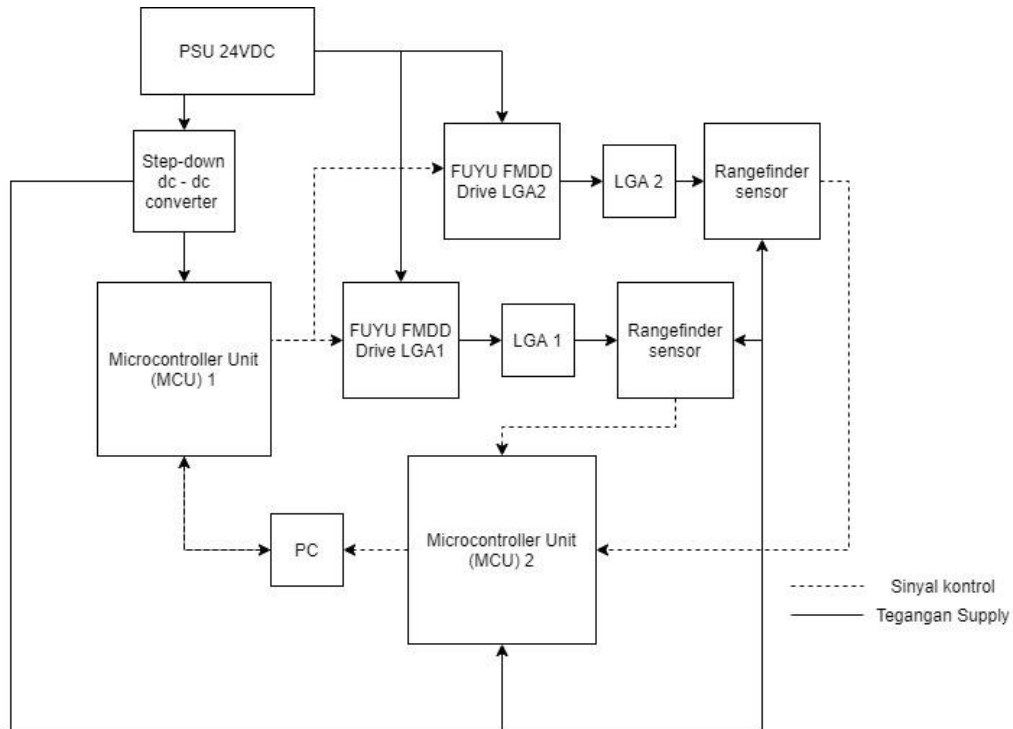
Pada gambar 3.14 tampak bahwa perpindahan kotak telah berbentuk garis lurus seperti yang ditunjukkan oleh garis panah merah, tetapi sebenarnya, algoritma tersebut hanya melakukan semacam kompensasi terhadap aktuator pada sumbu Y seperti tampak pada saat perpindahan dari koordinat (1,1) menuju koordinat (4,2) ada 2 kali proses kompensasi penghentian untuk aktuator pada sumbu Y sehingga mengakibatkan kedua aktuator sampai tujuan dalam waktu yang bersamaan dan seolah-olah kotak tersebut digerakkan dalam waktu bersamaan dan menghasilkan gerakan dengan lintasan garis lurus.

3.3 Perancangan Hardware

Setelah dilakukan perancangan sistem kontrol menggunakan model EST, tahap selanjutnya adalah merancang hardware. Pada perancangan hardware, terdapat 3 bagian utama yang akan dirancang, yaitu bagian supply tegangan, kontrol dan monitoring. Bagian tegangan supply terdapat PSU (*Power Supply Unit*) dan sebuah *dc-dc step down converter*. Untuk bagian kontrol, terdapat MCU 1, 2 buah driver, dan 2 buah aktuator. Sementara untuk bagian monitoring, terdapat sebuah MCU 2, dan 2 buah sensor jarak. Kemudian terdapat sebuah PC untuk mengontrol dan memonitor secara bersamaan seperti tampak pada Gambar 3.15 sebagai berikut.

Gambar 3.15 menunjukkan blok diagram perancangan hardware untuk sistem kontrol EST. Power Supply Unit (PSU) yang digunakan adalah PSU untuk tegangan 24 VDC karena mengikuti spesifikasi dari input standar motor *stepper* pada LGA dan sebagai input dari FUYU FMDD drive yaitu 24 VDC. *Step down dc-dc converter* berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 24 VDC menjadi tegangan kerja MCU yaitu sebesar 5 VDC. Sistem ini dilengkapi dengan monitoring posisi LGA menggunakan dua sensor jarak (*rangefinder sensor*) yang dibaca oleh sebuah MCU 2 dan data hasil pembacaan tersebut dikirim menuju PC. Selain untuk membaca data monitoring, PC juga berfungsi untuk berkomunikasi 2 arah (*full-duplex*) pada MCU 1 untuk menggerakkan meja dengan cara memberikan input data gempa dan perintah pada MCU 1, apabila meja telah selesai digerakkan, maka MCU 1 akan memberikan tanda ke PC bahwa meja telah selesai digerakkan.

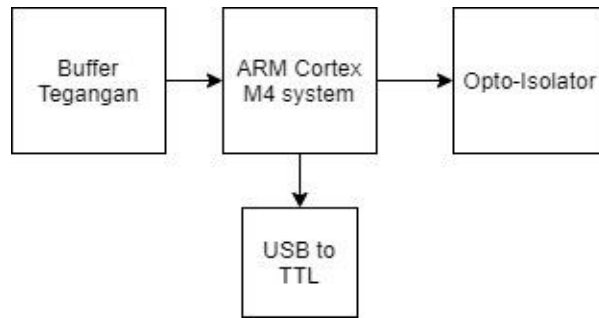
Pada Gambar 3.15 tampak ada sinyal komunikasi dua arah antara MCU 1 dan PC. Komunikasi tersebut menggunakan protokol serial antara USB (*Universal*



Gambar 3.15 Blok diagram sistem hardware secara keseluruhan

Serial Bus) dan TTL (*Transistor – Transistor Logic*). Tahap – tahap pengiriman dan penerimaan data adalah sebagai berikut:

- 1) PC akan mengirimkan data array gerakan dari EST.
- 2) MCU akan menyimpan data gerakan tersebut pada sebuah *buffer array*
- 3) PC kemudian akan mengirimkan perintah berupa kecepatan, percepatan, , besar *displacement* apabila akan digerakkan manual, dan “alamat” dari *buffer* yang berisi gerakan yang akan digerakkan apabila akan menggerakkan meja secara otomatis.
- 4) MCU membaca perintah tersebut lalu memilih antara mode gerakan manual atau otomatis.
- 5) MCU kemudian akan menggerakkan meja gempu, dan apabila sudah selesai pergerakannya, MCU akan mengirimkan tanda pada PC bahwa meja telah selesai digerakkan.



Gambar 3.16 Blok diagram MCU

Pada hardware MCU, menggunakan mikrokontroler ARM Cortex M4 MK256D series dari NXP semiconductor sebagai prosesor utama. Adapun blok diagram perancangan MCU pada sistem hardware tampak pada Gambar 3.16. Pada Gambar 3.16, ditunjukkan bahwa MCU menggunakan opto-isolator untuk melindungi prosesor utama dari tegangan balik dan *noise* yang timbul akibat *feedback* dari aktuator dengan *range* tegangan isolasi hingga 15000 VDC. Buffer tegangan digunakan untuk men-stabilkan tegangan masuk dengan range nilai sebesar 4,8 hingga 5,3 VDC menuju MCU dan bertujuan agar menjaga detak (*clock*) dari MCU tetap stabil dan tidak terganggu akibat tegangan masukan yang tidak stabil. *USB-to-TTL* digunakan mikrokontroler untuk berkomunikasi dengan PC dengan cara mengubah sinyal *Transistor-Transistor Logic* menjadi data komunikasi yang dapat dibaca oleh USB.



1. PSU (*Power Supply Unit*)
2. Fuyu FMDD Driver LGA 2
3. Fuyu FMDD Driver LGA 1
4. *Step down dc-dc converter*
5. *Microcontroller Unit (MCU) 1*

Gambar 3.17 Sistem Hardware setelah dirancang

Gambar 3.17 menunjukkan hasil perancangan sistem *hardware* dengan MCU dilengkapi dengan optoisolator sebagai penganan dari tegangan balik motor.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem kontrol untuk mengendalikan displacement dari EST dua sumbu yang berpengerak *ballscrew linear guide actuator* dengan menggunakan algoritma Bresenham dan pengendali proporsional. Pada penelitian ini, penggerak EST ini telah ditentukan, yaitu menggunakan *ballscrew linear guide actuator* tipe FLS80 yang diproduksi oleh FUYU. EST dua sumbu ini dibangun oleh dua aktuator dan dua meja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 EST dua sumbu dengan penggerak ball screw linear guide actuator (a) tampak atas (b) tampak samping

Penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu simulasi, rancang bangun dan pengujian. Untuk melakukan simulasi, model EST didapatkan melalui pemodelan sistem secara empiris, yaitu menggunakan JST. EST dua sumbu terdiri dari 2 sistem yaitu meja 1 dan meja 2, yang mana meja 1 adalah meja yang digerakkan ke arah sumbu X dan meja 2 adalah meja yang digerakkan ke arah sumbu Y. Pada penelitian ini, sistem meja 1 dan meja 2 dimodelkan menggunakan JST. Hasil pemodelan meja 1 dan 2 menggunakan JST diuji. Model dengan error terkecil dipilih sebagai model sistem. Pemodelan sistem menggunakan JST telah didapatkan dan diulas pada sub bab 3.1. Model EST yang terdiri dari model meja 1 dan meja 2 telah didapatkan, dan telah diulas pada sub bab 3.1.3.

Tahap berikutnya setelah melakukan perancangan model adalah perancangan sistem kontrol. Sistem kontrol yang dirancang bertujuan untuk mengendalikan kedua meja agar menghasilkan gerakan yang sesuai dengan input yang diberikan. Algoritma bressenham diberikan untuk mengendalikan penggerak meja 1 dan meja 2 agar dapat menggerakkan meja secara bersamaan sesuai dengan input yang diberikan. Sedangkan pengendali Proporsional diberikan agar dapat menentukan berapa displacement yang harus dilakukan oleh aktuator sehingga meja 1 dan meja 2 dapat berpindah menuju ke posisi yang sesuai dengan yang diinginkan.

Setelah model EST dan sistem kontrol telah berhasil dirancang, berikutnya dilakukan pengujian terhadap model EST dan sistem kontrol. Model EST diuji dengan variasi input, yaitu gerak garis lurus bergradien 3/5, gerak elips, gerak lingkaran, dan gerak lissajous. Kemudian, model EST dengan sistem kontrol diuji juga dengan menggunakan input gerak garis lurus bergradien 3/5, gerak elips, gerak lingkaran dan gerak lissajous. Hasil pengujian model EST dan model EST dengan sistem kontrol kemudian dibandingkan.

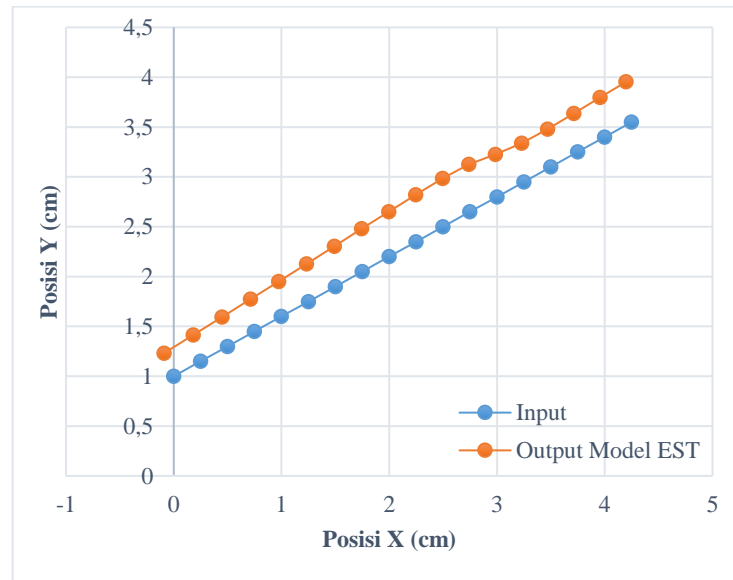
4.1 Hasil Pengujian Model EST

Model EST telah didapatkan dari pemodelan menggunakan JST. Untuk mengetahui apakah model EST mampu menghasilkan gerakan sesuai dengan input atau tidak, maka dilakukan pengujian. Pengujian model EST ini dilakukan dengan cara memasukkan beberapa input gerak ke dalam model. Input ini berupa gerak garis lurus bergradien 3/5, gerak elips, gerak lingkaran dan gerak lissajous. Gerakan yang dihasilkan oleh model EST kemudian dibandingkan dengan inputnya. Untuk mengetahui berapa besar kesalahan posisi X dan Y yang dihasilkan model, maka dilakukan perhitungan error pada masing-masing posisi.

a. Hasil pengujian model EST dengan input gerak garis gradien 3/5

Pada pengujian ini, yang diuji adalah model EST yang telah didapatkan dari pemodelan menggunakan JST. Model EST diberikan input berupa gerak garis lurus bergradien 3/5. Gerakan yang dihasilkan oleh model EST disimpan dan diolah. Gerakan ini terdiri dari data posisi X dan posisi Y. Gerakan ini kemudian

dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST menggunakan input gerak garis 3/5 ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil pengujian model EST dengan input gerak garis gradien 3/5

Gambar 4.2 menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan input berupa gerak garis bergradien 3/5. Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, tampak bahwa model EST telah menghasilkan sebuah garis. Grafik input pada Gambar 4.2 adalah data input yang dimasukkan ke dalam model. Data input ini berupa data posisi X dan Y. Kemudian grafik output model EST adalah data posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST. Data input garis lurus dengan gradien 3/5 beserta data output model EST secara lengkap disajikan di dalam Lampiran.

Dari Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa garis yang dihasilkan oleh model EST masih belum sesuai dengan inputnya. Pola gerakan garis yang dihasilkan oleh model EST tampak menjauhi garis input. Hal ini menunjukkan bahwa posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST terdapat error. Tampak pada Gambar 4.2, error terbesar terjadi pada posisi Y. Hasil perhitungan error ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian input Gradien 3/5

Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)	
	X	Y	Xout	Yout	Xout	Yout
1	0,000	1,000	-0,089	1,232	0,000	23,168
2	0,250	1,150	0,180	1,413	27,833	22,886
3	0,500	1,300	0,448	1,594	10,445	22,599
4	0,750	1,450	0,713	1,773	4,981	22,301
5	1,000	1,600	0,975	1,952	2,511	21,988
6	1,250	1,750	1,234	2,129	1,242	21,657
7	1,500	1,900	1,491	2,305	0,572	21,306
8	1,750	2,050	1,746	2,479	0,241	20,933
9	2,000	2,200	1,998	2,652	0,115	20,530
10	2,250	2,350	2,247	2,821	0,116	20,059
11	2,500	2,500	2,495	2,984	0,198	19,364
12	2,750	2,650	2,741	3,125	0,328	17,912
13	3,000	2,800	2,985	3,227	0,484	15,253
14	3,250	2,950	3,229	3,337	0,649	13,107
15	3,500	3,100	3,472	3,481	0,810	12,289
16	3,750	3,250	3,714	3,638	0,960	11,947
17	4,000	3,400	3,956	3,797	1,091	11,676
18	4,250	3,550	4,199	3,954	1,199	11,386
Rata-rata error					2,988	18,353

Tabel 4.1 menunjukkan data hasil perhitungan error posisi X dan Y yang dihasilkan oleh Model EST pada pengujian input gerak bergradien 3/5. Kolom input adalah data gerakan gradien 3/5 yang digunakan sebagai input pada pengujian ini. Kolom output model EST menunjukkan posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST pada pengujian ini. Pada kolom error output model EST menunjukkan data hasil perhitungan error posisi X dan Y. Error posisi X dan Y model EST didapatkan dengan menggunakan persamaan (4.1).

$$error (\%) = \left| \frac{\text{nilai terukur} - \text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai sebenarnya}} \right| \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

Nilai terukur adalah nilai yang didapatkan dari pengujian, sedangkan nilai sebenarnya adalah nilai input yang diberikan. Dari Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa error posisi Y yang dihasilkan oleh model EST lebih besar dari error posisi X.

Didapatkan bahwa rata-rata error posisi X pada pengujian ini adalah 2,988%, sedangkan error posisi Y adalah 18,353%.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, model EST telah mampu menghasilkan pola garis. Namun garis yang dihasilkan tidak lurus seperti input. Pada beberapa titik, tampak bahwa gradien yang dihasilkan tidak sama dengan 3/6. Untuk mengetahui gradien yang dihasilkan oleh model EST, maka dilakukan perhitungan gradien dari masing-masing garis lurus yang dihasilkan oleh dua titik. Gradien garis lurus yang dihasilkan dari dua titik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4.2)

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan persamaan (4.2), gradien garis dari beberapa posisi (X,Y) yang dihasilkan oleh model EST didapatkan. Tabel 4.2 menunjukkan error gradien yang dihasilkan oleh model EST terhadap input.

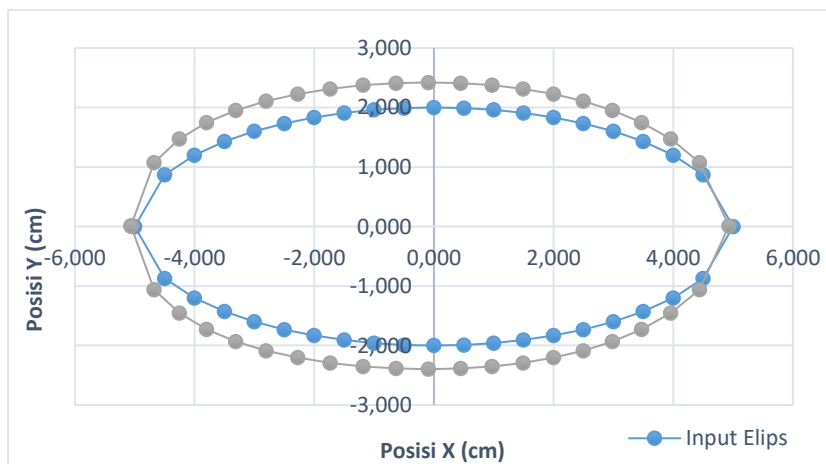
Tabel 4.2 Hasil perhitungan gradien dan error gradien output model EST

Garis lurus yang dihasilkan dari titik				Gradien output	Error gradien (%)
x_1	y_1	x_2	y_2		
-0,089	1,232	0,180	1,413	0,673	12,191
0,180	1,413	0,448	1,594	0,676	12,584
0,448	1,594	0,713	1,773	0,678	12,998
0,713	1,773	0,975	1,952	0,680	13,402
0,975	1,952	1,234	2,129	0,683	13,764
1,234	2,129	1,491	2,305	0,684	14,052
1,491	2,305	1,491	2,305	0,685	14,218
1,746	2,479	1,998	2,652	0,685	14,137
1,998	2,652	2,247	2,821	0,680	13,305
2,247	2,821	2,495	2,984	0,657	9,489
2,495	2,984	2,741	3,125	0,572	4,742
2,741	3,125	2,985	3,227	0,419	30,180
2,985	3,227	3,229	3,337	0,450	24,976
3,229	3,337	3,472	3,481	0,594	0,917
3,472	3,481	3,714	3,638	0,649	8,173
3,714	3,638	3,956	3,797	0,655	9,135
3,956	3,797	4,199	3,954	0,648	7,984

Tabel 4.2 menunjukkan hasil perhitungan gradien dan error gradien dari output model EST. Pada pengujian ini, didapatkan 18 data posisi X dan Y. Garis lurus akan terbentuk dari dua titik. Pada perhitungan gradien ini ditentukan terlebih dahulu titik pertama dan titik keduanya.ada 18 data posisi X dan Y. Posisi (X,Y) dapat dinyatakan sebagai titik (X,Y). Garis lurus pertama dihasilkan dari titik (X,Y) data pertama dan titik (X,Y) data kedua. Garis lurus kedua dihasilkan dari titik (X,Y) data kedua dan titik (X,Y) data ketiga. Garis lurus ketiga dihasilkan dari titik (X,Y) data ketiga dan titik (X,Y) data keempat, dan seterusnya. Formasi ini ditunjukkan pada kolom garis lurus hasil dari titik (x_1,y_1) dan (x_2,y_2) . Dengan menggunakan persamaan (4.2) gradien yang dihasilkan oleh garis lurus antar posisi didapatkan, seperti yang ditunjukkan pada kolom gradien output. Error gradien dihitung dengan menggunakan persamaan (4.1), dengan nilai sebenarnya adalah nilai gradien input, yaitu 0,6. Dari Tabel 4.2, tampak bahwa error gradien terbesar adalah 30,18%. Error gradien terbesar ini terjadi pada garis yang dihasilkan oleh posisi (2,714 , 3,125) dan (2,985 , 3,227) dengan inputnya adalah (2,75 , 2,65) dan (3, 2,8).

b. Hasil pengujian model EST dengan input gerak elips

Selanjutnya model EST diuji dengan input gerak elips. Sama seperti pengujian pada gerak garis lurus gradien 3/5, gerakan yang dihasilkan oleh model EST disimpan dan diolah, kemudian dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST dengan input gerak elips ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil pengujian model EST dengan input gerak elips

Gambar 4.3 menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan input yang diberikan adalah gerak elips. Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, tampak bahwa model EST telah menghasilkan pola gerakan elips. Grafik input pada Gambar 4.3 adalah data input yang dimasukkan ke dalam model. Data input ini berupa data posisi X dan Y gerakan elips. Kemudian grafik output model EST adalah data posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST. Data input gerak elips beserta data output model EST secara lengkap disajikan di dalam Lampiran. Dari Gambar 4.3, tampak bahwa pola elips yang dihasilkan oleh model EST lebih lebar dari pada pola elips input. Posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST menjauhi posisi X dan Y input. Error posisi X dan Y ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pengujian Elips

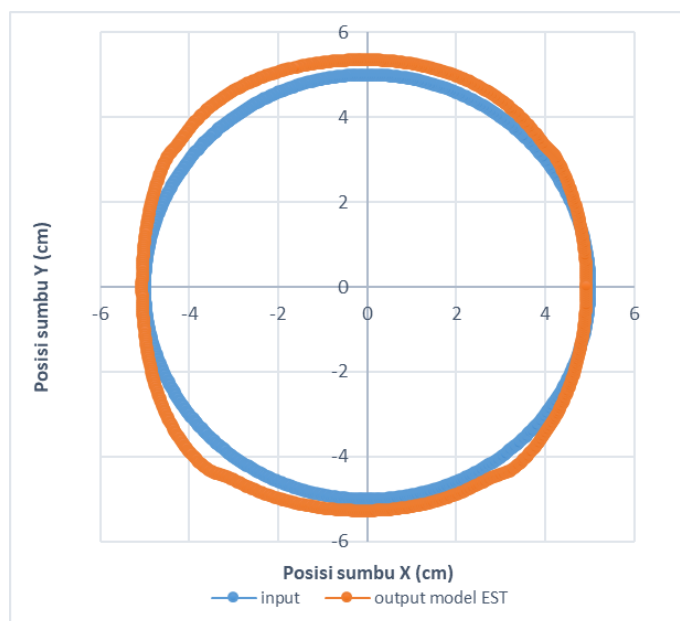
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y
1	-5,000	0,000	-5,063	0,008	1,269	0,000
2	-4,500	0,872	-4,674	1,076	3,861	23,414
3	-4,000	1,200	-4,252	1,473	6,308	22,791
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	-1,000	1,960	-1,183	2,374	18,334	21,161
10	-0,500	1,990	-0,634	2,410	26,813	21,085
11	0,000	2,000	-0,089	2,421	0,000	21,060
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	3,000	1,600	2,985	1,952	0,484	21,988
18	3,500	1,428	3,472	1,747	0,810	22,345
19	4,000	1,200	3,956	1,473	1,091	22,791
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	3,000	-1,600	2,985	-1,932	0,484	20,727
26	2,500	-1,732	2,495	-2,087	0,198	20,484
27	2,000	-1,833	1,998	-2,205	0,115	20,282
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	-1,000	-1,960	-1,183	-2,352	18,334	20,010
34	-1,500	-1,908	-1,732	-2,292	15,483	20,124
35	-2,000	-1,833	-2,275	-2,205	13,742	20,282
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
41	-5,000	0,000	-5,063	0,008	1,269	0,000
Rata-rata error (%)					6,595	19,663

Tabel 4.3 menunjukkan data hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian gerak elips. Posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST ini ditunjukkan dalam kolom output model EST. Kolom error model EST pada Tabel 4.3 menunjukkan hasil perhitungan error dari posisi X dan Y yang dihitung dengan menggunakan persamaan (4.1). Dari Tabel 4.3, diperoleh bahwa rata-rata error sumbu X yang dihasilkan oleh model EST adalah 6,595%, sedangkan pada sumbu Y adalah 19,663.

Pada elips terdapat dua diameter, diameter terkecil disebut sebagai sumbu minor, sedangkan diameter terbesar disebut sumbu mayor. Dari Gambar 4.3, elips yang digunakan sebagai input memiliki sumbu mayor sebesar 10 cm dan sumbu minor 4 cm. Elips yang dihasilkan oleh model EST memiliki sumbu mayor sebesar 9,993cm dan sumbu minor sebesar 4,82cm. Error sumbu mayor yang dihasilkan oleh model EST adalah 0,07%, sedangkan error sumbu minor adalah 20,5%.

c. Hasil pengujian model EST dengan input gerak lingkaran

Pada pengujian ini, model EST diberi input berupa gerak lingkaran. Sama seperti pengujian dengan variasi input sebelumnya, gerakan yang dihasilkan oleh model EST disimpan dan diolah, kemudian dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST dengan input gerak lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil pengujian model EST dengan input gerak lingkaran

Gambar 4.4 adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dibandingkan dengan inputnya. Input yang diberikan adalah gerak lingkaran seperti yang ditunjukkan oleh grafik berwarna biru pada Gambar 4.4. Kemudian grafik berwarna jingga adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST. Tampak bahwa model EST telah menghasilkan pola lingkaran. Namun pola lingkaran yang dihasilkan masih belum sesuai dengan input. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat error posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST pada pengujian ini. Data error posisi X dan Y model EST ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pengujian Lingkaran

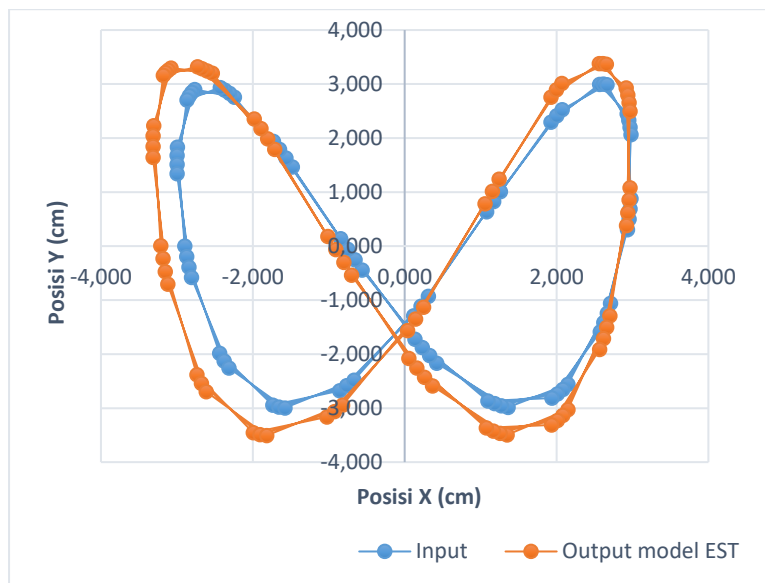
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y
1	5	0	4,930	0,008	1,409	0,000
2	4,999	0,044	4,929	0,062	1,409	39,938
3	4,999	0,088	4,929	0,116	1,409	31,440
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
120	2,478	4,342	2,474	4,747	0,189	9,308
121	2,439	4,364	2,436	4,768	0,173	9,239
122	2,401	4,385	2,397	4,788	0,158	9,172
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
240	-2,581	4,282	-2,928	4,667	13,427	8,977
241	-2,618	4,259	-2,966	4,644	13,269	9,035
242	-2,656	4,235	-3,005	4,621	13,111	9,094
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
320	-4,744	1,577	-4,879	1,875	2,831	18,872
321	-4,758	1,535	-4,889	1,825	2,752	18,859
322	-4,771	1,493	-4,899	1,775	2,675	18,839
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
400	-4,631	-1,884	-4,766	-2,312	2,901	22,692
401	-4,614	-1,924	-4,752	-2,359	2,979	22,535
402	-4,597	-1,965	-4,738	-2,406	3,059	22,379
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
710	4,999	-0,071	4,929	-0,080	1,409	12,377
711	4,999	-0,027	4,929	-0,026	1,409	4,864
712	4,999	0,017	4,930	0,029	1,409	66,692
713	4,999	0,061	4,929	0,083	1,409	35,183
Rata-rata error (%)					15,782	14,763

Tabel 4.4 menunjukkan hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian menggunakan gerakan lingkaran sebagai input. Tampak bahwa data posisi X dan Y input yang digunakan pada pengujian ini berjumlah 713 data. Kolom error model EST pada Tabel 4.4 menunjukkan hasil perhitungan error dari posisi X dan Y yang dihitung dengan menggunakan persamaan (4.1). Dari Tabel 4.4, diperoleh rata-rata error sumbu X yang dihasilkan oleh model EST adalah 15,782%, sedangkan pada sumbu Y adalah 14,763%.

Berdasarkan Gambar 4.4, tampak bahwa model EST telah menghasilkan pola lingkaran. Diameter gerakan lingkaran yang dijadikan input adalah 10 cm. Diameter sumbu X lingkaran yang dihasilkan oleh model EST adalah 9,993 cm, sedangkan diameter sumbu Y adalah 10,62 cm. Error diameter pada sumbu X yang dihasilkan oleh model EST adalah 0,07%, sedangkan error diameter pada sumbu Y adalah 6,2%.

d. Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous*

Selanjutnya model EST diuji dengan menggunakan input berupa gerakan *lissajous*. Gerakan yang dihasilkan oleh model EST disimpan dan kemudian diolah. Setelah itu hasil tersebut dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous* ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous*

Gambar 4.5 adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST saat diberikan input gerak *lissajous*. Grafik berwarna biru pada Gambar 4.5 adalah gerakan *lissajous* yang dijadikan sebagai input, sedangkan yang berwarna jingga adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa model EST telah bisa menghasilkan pola *lissajous*. Namun pola yang dihasilkan oleh model EST lebih besar dari *lissajous* yang dijadikan sebagai input. Error posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST pada pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan error posisi X dan Y model EST pada pengujian *lissajous*

Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	-2,898	0,000	-3,212	0,008	10,842	0,000
2	-2,993	1,835	-3,308	2,228	10,500	21,462
3	-2,768	2,903	-3,080	3,298	11,293	13,607
14	1,927	2,295	1,924	2,760	0,136	20,244
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	1,080	0,635	1,059	0,787	2,012	23,935
16	0,118	-1,291	0,038	-1,564	67,446	21,189
17	-0,857	-2,677	-1,026	-3,162	19,729	18,109
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
28	2,082	-2,652	2,079	-3,134	0,104	18,186
29	2,668	-1,240	2,660	-1,504	0,282	21,248
30	2,968	0,689	2,954	0,853	0,463	23,802
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
41	-2,837	2,781	-3,150	3,215	11,055	15,617
42	-2,369	2,889	-2,668	3,287	12,591	13,794
43	-1,648	1,790	-1,894	2,176	14,916	21,565
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
54	0,312	-0,930	0,247	-1,130	20,833	21,493
55	-0,669	-2,480	-0,819	-2,943	22,496	18,688
56	-1,578	-2,995	-1,817	-3,507	15,178	17,099
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
67	2,573	-1,583	2,567	-1,912	0,232	20,755
68	2,934	0,305	2,921	0,383	0,441	25,371
69	2,979	2,067	2,965	2,498	0,470	20,890
Rata-rata error (%)					10,694	19,062

Tabel 4.5 menunjukkan hasil perhitungan error posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST pada pengujian input gerak *lissajous*. Error posisi X dan Y model EST yang dihitung dengan menggunakan persamaan (4.1) ditunjukkan pada kolom error model EST. Didapatkan bahwa, pada pengujian input gerak lingkaran, rata-rata error posisi terbesar terjadi pada posisi Y. Rata-rata error posisi Y adalah 19,062%, sedangkan rata-rata error posisi X adalah 10,694%.

Dari Gambar 4.5, didapatkan bahwa input gerak *lissajous* memiliki amplitudo tertinggi pada kuadran I adalah 2,988 cm, kuadran II adalah 2,903 cm, kuadran III adalah 2,977 cm dan kuadran IV adalah 2,983 cm. Berdasarkan Gambar 4.5, amplitudo tertinggi kuadran I, II, III, dan IV dari gerakan *lissajous* yang dihasilkan model EST masing-masing adalah 3,371 cm, 3,287 cm, 3,507 cm dan 3,493 cm. Error amplitudo tertinggi oleh model EST pada kuadran I adalah 12,818%, kuadran II adalah 13,228%, kuadran III adalah 17,803% dan kuadran IV adalah 17,097%. Didapatkan bahwa error terbesar amplitudo tertinggi yang dihasilkan oleh model EST adalah pada kuadran III, dengan nilai errornya adalah 17,803%.

4.2 Hasil Pengujian Model Sistem Kontrol

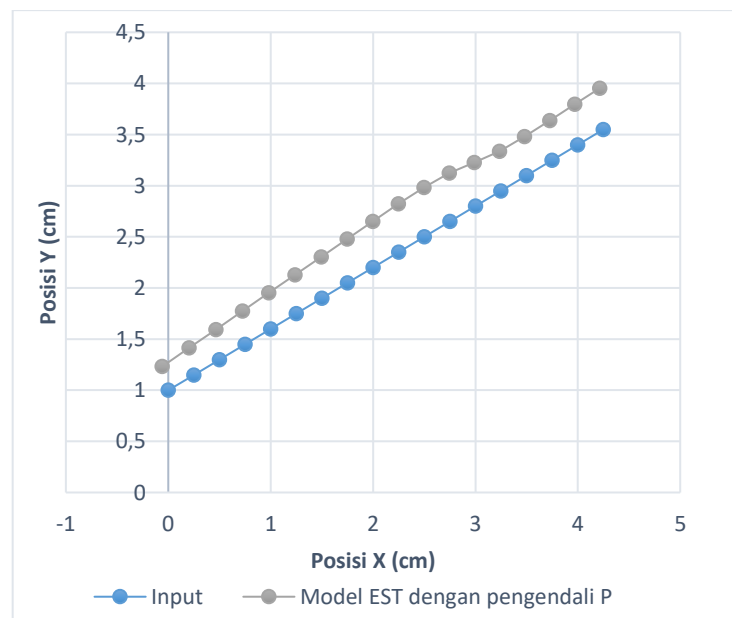
Model EST yang didapatkan dari pemodelan menggunakan JST telah diuji dengan variasi input yaitu gerak garis gradien 3/5, elips, lingkaran dan *lissajous*. Hasil pengujian model menunjukkan bahwa model EST telah mampu menghasilkan pola garis gradien 3/5 dengan error gradien sebesar 30,18%, pola elips dengan error sumbu mayor adalah 0,07% dan error sumbu minor 20,5%, pola lingkaran dengan error diameter pada sumbu $Y=0$ adalah 0,07% dan sumbu $X=0$ adalah 6,2%, serta pola *lissajous* dengan error amplitudo tertinggi pada kuadran II sebesar 18,803%. Adanya error pada hasil model EST menunjukkan terdapat kesalahan posisi X dan Y yang dihasilkan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol displacement untuk memperbaiki posisi yang dihasilkan oleh EST. Pengendali Proporsional diusulkan untuk memperbaiki error posisi yang dihasilkan oleh model EST. Perancangan sistem kontrol ini sebelumnya telah diulas pada sub bab 3.2. Sistem kontrol yang dirancang terdiri dari algoritma Bresenham dan pengendali

Proporsional. Algoritma Bresenham digunakan sebagai algoritma trajectory yang menentukan titik-titik koordinat yang harus dilalui oleh kedua penggerak agar dapat menuju posisi yang diinginkan. Sedangkan pengendali Proporsional berfungsi sebagai gain, agar dapat mengurangi error posisi yang dihasilkan oleh model EST. Model EST dengan sistem kontrol diuji juga dengan variasi input yang sama pada saat pengujian model EST. Hasil model EST dengan sistem kontrol ini dibandingkan dengan model EST sebelumnya yang tanpa sistem kontrol. Kemudian, *Integral Absolute Error* (IAE) hasil model EST dengan sistem kontrol ditentukan untuk mengetahui performansi dari sistem kontrol yang telah dirancang.

a. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak garis gradien 3/5

Pada pengujian ini, model EST dengan pengendali Proporsional diuji dengan menggunakan input gerak garis gradien 3/5. Input yang digunakan ini sama dengan input yang digunakan pada saat pengujian model EST. Pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional disimpan dan kemudian diolah. Setelah itu hasil tersebut dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous* ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak garis lurus gradien 3/5

Gambar 4.6 menunjukkan pola gerakan garis gradien 3/5 yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional. Tampak bahwa garis yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional masih menjauhi garis input. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali Proporsional yang dirancang belum dapat memenuhi fungsinya dalam memperbaiki error posisi X dan Y. Output model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan gerak gradien 3/5 sebagai input, ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Output model EST dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gerak gradien 3/5

Data ke-	Input (cm)		Output Model EST dengan pengendali Proporsional (cm)	
	X	y	Xout	Yout
1	0	1	-0,058	1,232
2	0,25	1,15	0,205	1,414
3	0,5	1,3	0,466	1,594
4	0,75	1,45	0,726	1,774
5	1	1,6	0,984	1,952
6	1,25	1,75	1,240	2,129
7	1,5	1,9	1,494	2,305
8	1,75	2,05	1,747	2,480
9	2	2,2	1,998	2,652
10	2,25	2,35	2,248	2,822
11	2,5	2,5	2,497	2,985
12	2,75	2,65	2,744	3,125
13	3	2,8	2,990	3,227
14	3,25	2,95	3,236	3,337
15	3,5	3,1	3,481	3,481
16	3,75	3,25	3,726	3,639
17	4	3,4	3,971	3,797
18	4,25	3,55	4,216	3,955

Tabel 4.6 menunjukkan data posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional, pada pengujian input gerak gradien 3/5. Pada pengujian ini didapatkan 18 data posisi X dan Y. Dari Tabel 4.6, tampak bahwa posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional

memiliki nilai yang berbeda dengan input yang diberikan. Dengan menggunakan persamaan (4.2), gradien garis dari beberapa posisi (X,Y) yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional didapatkan. Tabel 4.7 menunjukkan error gradien yang dihasilkan oleh model EST terhadap input.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan gradien dan error gradien output model EST dengan pengendali Proporsional

Garis lurus yang dihasilkan dari titik				Gradien output	Error gradien (%)
x_1	y_1	x_2	y_2		
-0,058	1,232	0,205	1,414	0,691	15,167
0,205	1,414	0,466	1,594	0,692	15,333
0,466	1,594	0,726	1,774	0,692	15,333
0,726	1,774	0,984	1,952	0,692	15,333
0,984	1,952	1,24	2,129	0,692	15,333
1,24	2,129	1,494	2,305	0,691	15,167
1,494	2,305	1,747	2,48	0,689	14,833
1,747	2,48	1,998	2,652	0,687	14,5
1,998	2,652	2,248	2,822	0,68	13,333
2,248	2,822	2,497	2,985	0,655	9,167
2,497	2,985	2,744	3,125	0,568	5,333
2,744	3,125	2,99	3,227	0,415	30,833
2,99	3,227	3,236	3,337	0,447	25,5
3,236	3,337	3,481	3,481	0,589	1,833
3,481	3,481	3,726	3,639	0,643	7,1667
3,726	3,639	3,971	3,797	0,648	8
3,971	3,797	4,216	3,955	0,642	7

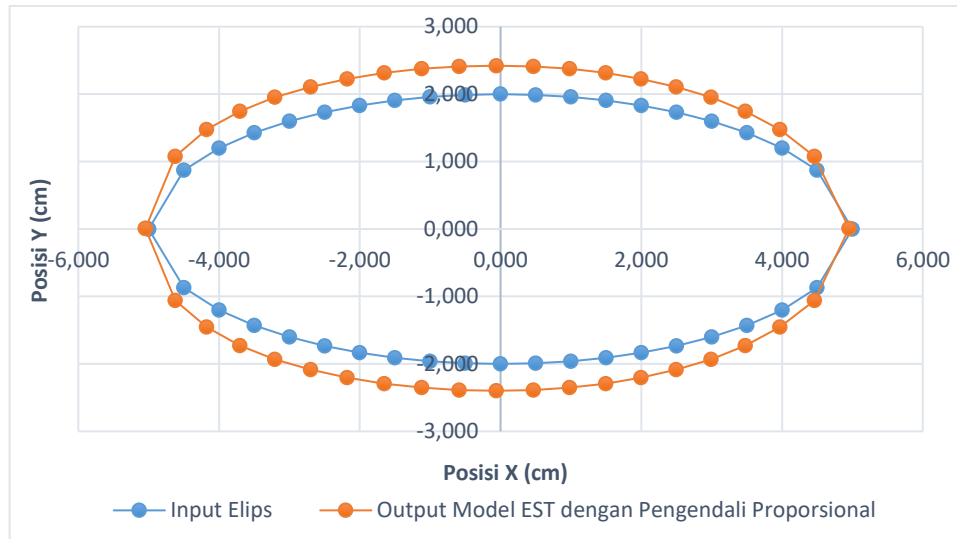
Tabel 4.7 menunjukkan hasil perhitungan gradien dan error gradien dari output model EST dengan pengendali Proporsional. Pada pengujian ini, didapatkan 18 data posisi X dan Y. Garis lurus akan terbentuk dari dua titik. Pada perhitungan gradien ini ditentukan terlebih dahulu titik pertama dan titik keduanya. Posisi (X,Y) dapat dinyatakan sebagai titik (X,Y). Garis lurus pertama dihasilkan dari titik (X,Y) data pertama dan titik (X,Y) data kedua. Garis lurus kedua dihasilkan dari titik (X,Y) data kedua dan titik (X,Y) data ketiga. Garis lurus ketiga dihasilkan dari titik (X,Y) data ketiga dan titik (X,Y) data keempat, dan seterusnya. Formasi ini

ditunjukkan pada kolom garis lurus hasil dari titik (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) Tabel 4.7. Dengan menggunakan persamaan (4.2) gradien yang dihasilkan oleh garis lurus antar posisi didapatkan, seperti yang ditunjukkan pada kolom gradien output. Error gradien dihitung dengan menggunakan persamaan (4.1), dengan nilai sebenarnya adalah nilai gradien input, yaitu 0,6.

Sebelumnya, pada pengujian model EST didapatkan error gradien sebesar 30,18% terjadi pada saat input yang diberikan adalah (2,75 , 2,65) dan (3, 2,8). Dengan input tersebut, posisi yang dihasilkan oleh model EST adalah (2,714 , 3,125) dan (2,985 , 3,227). Kemudian dari hasil perhitungan error gradien model EST dengan pengendali Proporsional yang ditunjukkan pada Tabel 4.2, didapatkan bahwa pada input yang sama, yaitu (2,75 , 2,65) dan (3, 2,8), posisi yang dihasilkan model EST dengan pengendali Proporsional adalah (2,744 , 3,125) dan (2,99 , 3,227), dengan error gradien sebesar 30,833%. Dengan diberikannya pengendali Proporsional, error gradien model EST yang semula 30,18% berubah menjadi 30,833%. Hal ini menunjukkan bahwa ada perubahan posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST yang diberikan pengendali Proporsional terhadap model EST yang sebelumnya tanpa ada pengendali Proporsional. Dilihat dari posisi (X,Y) yang dihasilkan oleh model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional saat terjadi error gradien terbesar, tampak bahwa pengendali proporsional telah memperbaiki posisi (2,714 , 3,125) menjadi (2,744 , 3,125) dan (2,985 , 3,227) menjadi (2,99 , 3,227). Pengendali Proporsional telah memperbaiki posisi X dari 2,714 menjadi 2,744 dan 2,985 menjadi 2,99. Sedangkan pada posisi Y, pengendali Proporsional yang diberikan belum dapat memperbaiki posisi Y.

b. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak elips

Selanjutnya model EST dengan pengendali Proporsional diuji dengan menggunakan input gerak elips. Gerak elips yang digunakan ini sama dengan yang digunakan pada pengujian model EST sebelumnya. Gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional disimpan dan diolah, kemudian dibandingkan dengan input. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak elips ditunjukkan pada Gambar 4.7.



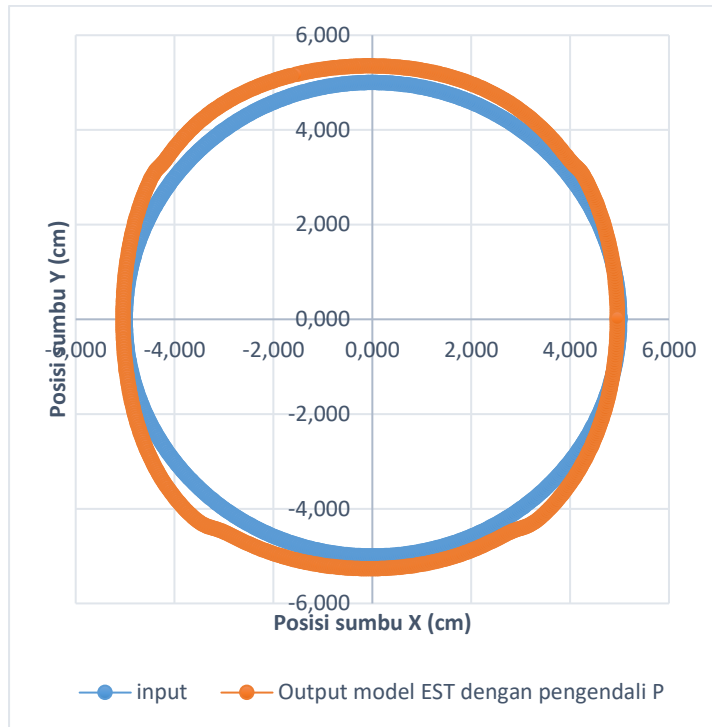
Gambar 4.7 Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak elips

Gambar 4.7 pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional, menggunakan input elips. Berdasarkan hasil pengujian ini, tampak bahwa model EST dengan pengendali Proporsional masih belum dapat menghasilkan pola gerakan elips yang sama dengan input.

Pada pengujian model EST sebelumnya, didapatkan error sumbu mayor elips yang dihasilkan adalah 0,07% dengan besarnya adalah 9,993cm. Kemudian error sumbu minornya adalah 20,5% dengan besarnya adalah 4,82 cm. Dengan diberikannya pengendali Proporsional, elips yang dihasilkan model EST memiliki sumbu mayor 10,049cm dan sumbu minor 4,82 cm. Dengan nilai sumbu mayor dan minor tersebut, didapatkan error sumbu mayor model EST dengan pengendali Proporsional adalah 0,49%, sedangkan sumbu minornya tetap, yaitu 20,5%.

c. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak lingkaran

Berikutnya, model EST dengan pengendali Proporsional diuji menggunakan input gerak lingkaran. Gerak llingkaran yang digunakan pada pengujian ini sama dengan yang digunakan pada pengujian model EST sebelumnya. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.8.



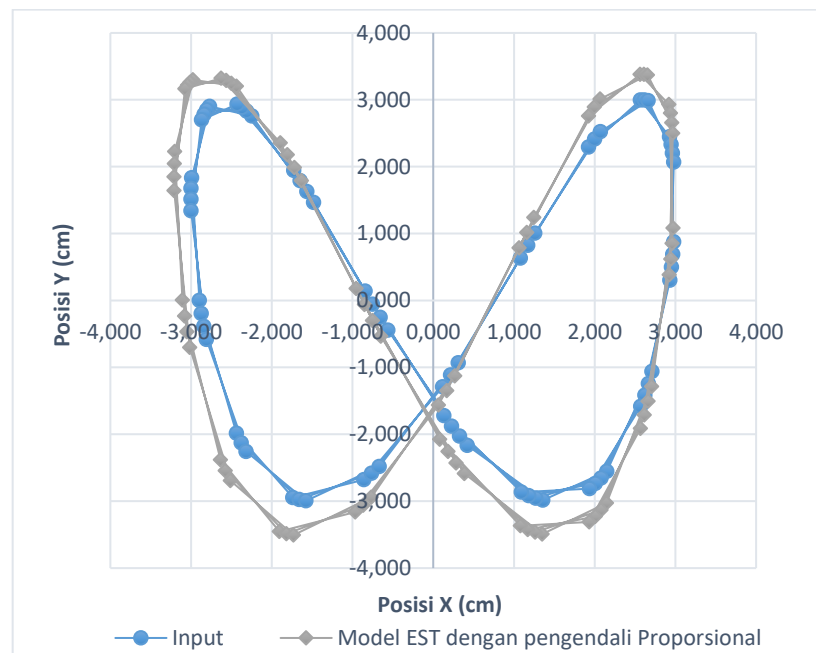
Gambar 4.8 Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak lingkaran

Gambar 4.8 menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional, menggunakan input lingkaran. Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa model EST dengan pengendali Proporsional masih belum dapat menghasilkan pola lingkaran seperti input. Pada pengujian model EST sebelumnya, didapatkan diameter lingkaran pada sumbu $Y=0$ adalah 9,993 cm dengan error sebesar 0,07%, sedangkan diameter pada sumbu $X=0$ adalah 10,62 cm dengan error 6,2%. Pada pengujian ini, model EST dengan pengendali Proporsional menghasilkan pola lingkaran dengan diameter lingkaran pada sumbu $Y=0$ adalah 9,996 cm dan pada sumbu $X=0$ adalah 10,69cm. Error diameter lingkaran pada sumbu $Y=0$ adalah 0,04%, sedangkan pada sumbu X adalah 6,9%.

Pengendali Proporsional yang dirancang telah memperbaiki diameter lingkaran model EST yang semula tanpa pengendali Proporsional adalah 0,07% menjadi 0,04%. Namun diameter pada $X=0$, semua errornya adalah 6,2%, setelah diberi pengendali Proporsional, menjadi 6,9%.

d. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input gerak *lissajous*

Pada pengujian ini, model EST dengan pengendali Proporsional diuji menggunakan input gerak *lissajous*. Gerak *lissajous* yang digunakan sama dengan yang digunakan pada pengujian model EST sebelumnya. Hasil pengujian model EST dengan pengendali Proporsional menggunakan input *lissajous* ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous*

Gambar 4.9 adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh model EST dengan pengendali Proporsional saat diberikan input gerak *lissajous*. Tampak dari Gambar 4.9 bahwa model EST dengan pengendali Proporsional masih belum bisa menghasilkan pola *lissajous* yang sama dengan input. Pada pengujian sebelumnya, pola *lissajous* yang dihasilkan oleh model EST memiliki amplitudo tertinggi pada kuadran I, II, III, dan IV masing-masing adalah 3,371 cm, 3,287 cm, 3,507 cm dan 3,493 cm. Error amplitudo tertinggi oleh model EST pada kuadran I adalah 12,818%, kuadran II adalah 13,228%, kuadran III adalah 17,803% dan kuadran IV adalah 17,097%. Didapatkan bahwa error terbesar amplitudo tertinggi yang dihasilkan oleh model EST adalah pada kuadran III, dengan nilai errornya adalah 17,803%. Dengan diberikannya pengendali Proporsional, model EST menghasilkan

amplitudo tertinggi di kuadran I, II, III, dan IV dengan masing-masing nilainya adalah 3,371 cm, 3,287 cm, 3,506 cm dan 3,494 cm. Error amplitudo tertinggi oleh model EST dengan pengendali Proporsional pada kuadran I adalah 12,818%, kuadran II adalah 13,228%, kuadran III adalah 17,77% dan kuadran IV adalah 17,13%.

Untuk menganalisa performansi sistem kontrol yang dirancang, pada masing-masing pengujian model, baik model EST maupun model EST dengan pengendali Proporsional, dilakukan perhitungan *Integral Absolute Error* (IAE). IAE biasa digunakan untuk melakukan *tuning* terhadap suatu sistem kontrol dengan mengacu pada performansi error yang dihasilkan. IAE dipilih sebagai parameter performansi dari penelitian ini karena parameter IAE bergantung murni pada total error yang dihasilkan oleh sistem dan tidak dipengaruhi oleh parameter lainnya seperti waktu, dan karena parameter waktu dalam proses pengujian model belum begitu diperhitungkan, maka dipilihlah parameter IAE untuk menguji performansi dari sistem kontrol yang dirancang. Hasil perhitungan IAE disajikan pada Tabel 4.3. Posisi X dan Y yang dihasilkan oleh model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional pada masing-masing pengujian disertakan di dalam Lampiran.

Tabel 4.8 Hasil perhitungan persentase IAE pada setiap sumbu

Pengujian	IAE (%)			
	Posisi sumbu X		Posisi sumbu Y	
	Model EST	Model EST dengan pengendali Proporsional	Model EST	Model EST dengan pengendali Proporsional
Garis Gradien 3/5	0,223	0,147	3,312	3,316
Gerakan Elips	2,561	1,707	6,55	6,55
Gerakan Lingkaran	8,593	5,803	24,611	24,612
Gerakan Lissajous	9,267	6,079	23,558	23,557

Tabel 4.8 menunjukkan hasil perhitungan IAE model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional berdasarkan posisi yang dihasilkan masing-masing sumbu. IAE adalah integral dari nilai absolut kesalahan kontrol selama periode waktu tertentu $t \in (t_1, t_2)$ (persamaan (4.3)). Dalam versi waktu diskrit sering

digunakan sebagai jumlah rata-rata dari kesalahan absolut seperti pada persamaan (4.4).

$$IAE = \int_{t_1}^{t_2} |\varepsilon(t)| dt \quad (4.3)$$

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} |\varepsilon(k)| \quad (4.4)$$

Dengan ε adalah error dan N adalah jumlah data. Indeks IAE tidak membedakan antara kontribusi positif dan negatif terhadap kesalahan. Indeks ini sesuai untuk respons langkah non-monotonik dan semua jenis data operasi normal (Domanski, 2019). Dengan menggunakan persamaan (4.4), IAE posisi X dan Y model EST dan Model EST yang telah diberik pengendali Proporsional telah didapatkan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

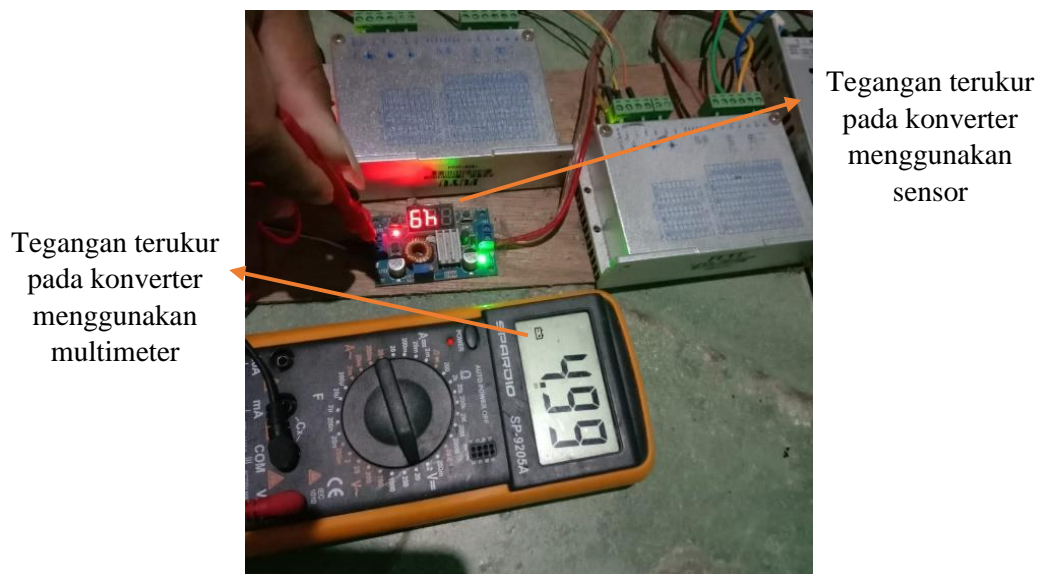
Pada pengujian garis gradien 3/5, posisi sumbu X yang dihasilkan oleh model EST memiliki IAE 0,223%. Kemudian dengan diberikannya pengendali Proporsional, posisi sumbu X yang dihasilkan oleh model EST memiliki IAE lebih kecil, yaitu 0,147%. Pengujian gerakan elips juga menunjukkan bahwa model EST menghasilkan IAE posisi sumbu X sebesar 2,561%. Kemudian dengan diberikannya pengendali Proporsional, model EST memiliki IAE lebih kecil, yaitu 1,707%. Selanjutnya pada pengujian gerakan lingkaran, model EST menghasilkan IAE posisi sumbu X sebesar 8,593%. Kemudian dengan diberikannya pengendali Proporsional, IAE yang dihasilkan model EST lebih kecil yaitu 5,803%. Pada pengujian gerakan lissajous, tampak bahwa IAE posisi sumbu X model EST adalah 9,267%, kemudian turun menjadi 6,079% karena diberikannya pengendali Proporsional. Tampak bahwa pengendali Proporsional yang dirancang untuk mengendalikan aktuator yang bergerak ke sumbu X telah mampu mengurangi IAE model EST sebesar 0,076% pada pengujian gerak gradien 3/5, 0,854% pada pengujian gerakan elips, 2,79% pada pengujian gerak lingkaran dan 3,188% pada pengujian lissajous.

Pada posisi sumbu Y, tampak dari Tabel 4.8, IAE model EST dari masing-masing pengujian memiliki nilai yang hampir sama dengan IAE model EST dengan pengendali Proporsional. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali Proporsional pada aktuator yang bergerak ke sumbu Y belum dapat memperbaiki

error posisi Y model EST dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai IAE posisi sumbu Y model dengan pengendali Proporsional pada pengujian garis gradien adalah 3,136%, pengujian gerak elips sebesar 6,55%, pengujian gerakan lingkaran sebesar 24,612% dan pengujian gerakan lissajous sebesar 23,557%.

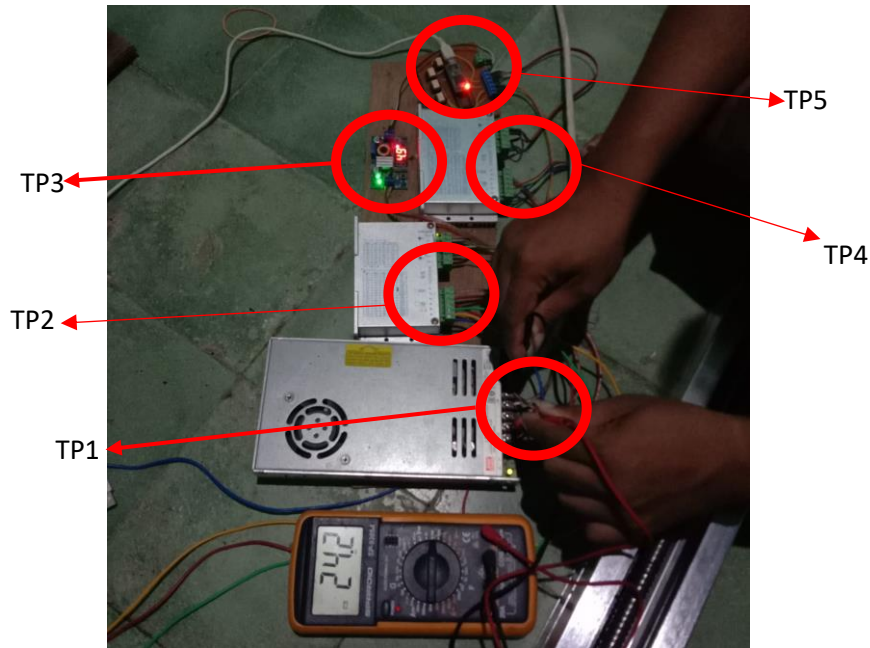
4.3 Pengujian Hardware

Hardware yang telah dirancang pertama-tama diuji terlebih dahulu distribusi tegangan yang diberikan oleh power supply. Hal ini untuk memastikan agar setiap komponen hardware telah mendapatkan suplai tegangan yang sesuai dengan spesifikasi tegangan kerja masing – masing. Sebagai contoh, Gambar 4.10 menunjukkan salah satu pengujian tegangan output dari dc-dc converter. Pengujian ini sangat penting karena apabila MCU mendapatkan tegangan yang tidak sesuai dengan spesifikasi, maka MCU tidak akan bekerja atau dapat terbakar dengan mudah.



Gambar 4.10 Contoh pengukuran tegangan output dari dc-dc converter

Selain titik pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, ada beberapa titik pengujian lain yang diukur seperti tampak pada Gambar 4.8 sebagai berikut.



Gambar 4.11 Titik Pengukuran (TP) yang diukur pada sistem hardware

Gambar 4.11 di atas menunjukkan titik pengukuran tegangan pada sistem hardware dengan hasil dan penjelasan titik pengukuran dijelaskan pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9 Hasil pengukuran TP pada sistem hardware

No. TP	Penjelasan	Nilai tegangan secara teori (VDC)	Nilai tegangan terukur (VDC)	% error
1	Power Supply Unit	24	24,2	0,83
2	LGA Drive 1	24	24,3	1,25
3	DC – DC Converter	5	4,99	0,2
4	LGA Drive 2	24	24,1	0,417
5	MCU	3,3	3,29	0,30

Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.9, tampak bahwa sistem hardware telah berfungsi dengan baik dan distribusi tegangan memiliki error terbesar 1,25%.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian validasi dari sensor jarak dengan cara membandingkan nilai pengukuran jarak dengan kalibrator yaitu menggunakan KRISBOW Laser Distance meter yang memiliki akurasi pengukuran hingga 1,5 mm dan resolusi pengukuran sebesar 1 mm serta dilengkapi dengan proteksi standar

IP54. Lima *sample* hasil pengukuran yang didapatkan, ditunjukkan pada Tabel 4.10.

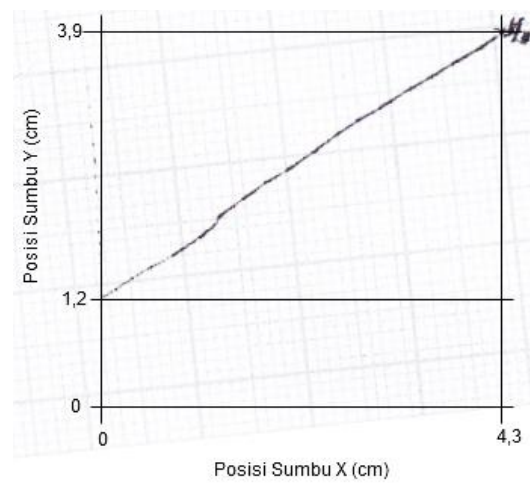
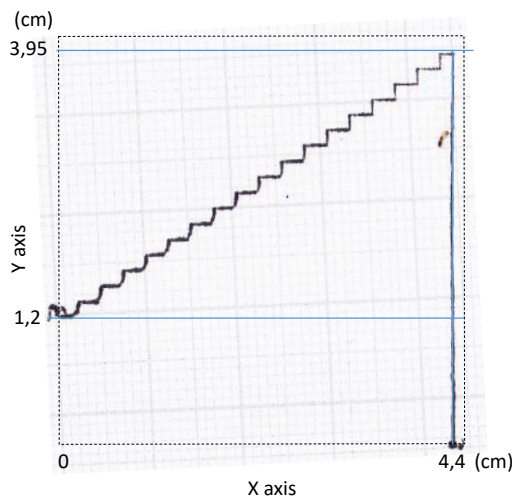
Tabel 4.10 Hasil Pengujian sensor Laser PING dan KRISBOW Laser Meter

No	Pengukuran (cm)	Parallax Laser PING (cm)	KRISBOW Laser Distance meter (cm)	% Error antara Parallax Laser dengan KRISBOW
1	2	1,98	2,002	1,09
2	4	4,05	4,001	1,225
3	6	5,87	6,027	2,6
4	10	10,35	10,032	3,17
5	20	19,55	20,017	2,33

Model sistem kontrol yang telah dirancang di dalam simulink, kemudian diimplementasikan ke dalam hardware. Hardware yang dirancang berupa sistem kontrol yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Kontrol Proportional dan algoritma Bresenham diimplementasikan ke dalam MCU. Hardware yang telah dirancang ini kemudian diuji dengan variasi input gerak. Variasi input yang digunakan pada pengujian ini adalah gerak garis gradien 3/5, gerak elips, gerak lingkaran dan gerak lissajous. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana algoritma Bresenham dan pengendali proporsional berkerja pada real hardware.

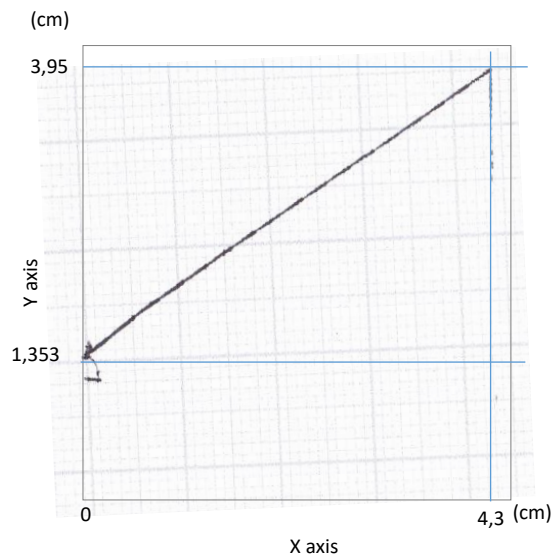
a. Pengujian hardware dengan input garis gradien 3/5

Pada pengujian ini, hardware yang telah dirancang diberikan input gerak lurus dengan gradien 3/5 yang sama dengan yang digunakan pada pengujian model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional di sub bab 4.1 dan sub bab 4.2. Pengambilan data gerakan yang dihasilkan oleh hardware dilakukan dengan cara manual. Sebuah pena dipasang di ujung meja 1. Kemudian sebuah kertas milimeter ditempatkan tepat dibawah pena. Saat meja digerakkan, pena akan ikut bergerak sesuai gerakan meja. Pena yang bergerak akan membentuk sebuah pola di kertas milimeter. Pola yang didapatkan ini lah yang menunjukkan hasil pengujian hardware. Hasil pengujian hardware dengan input gerak garis gradien 3/5 ditunjukkan pada Gambar 4.12.



(a)

(b)



(c)

Gambar 4.12 Hasil pengujian hardware menggunakan input garis gradien 3/5, dengan (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham tanpa pengendali Proporsional, dan (c) dengan Bresenham dan pengendali proporsional

Gambar 4.12 adalah pola atau gerakan hasil pengujian hardware tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, dengan Bresenham tapi tanpa pengendali proporsional, dan dengan Bresenham dan pengendali proporsional, yang menggunakan input berupa garis gradien 3/5. Gambar 4.12.a adalah gerakan yang dihasilkan oleh hardware tanpa Bresenham-pengendali Proporsional. Gambar 4.12.b adalah hasil gerakan oleh hardware dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional,

sedangkan Gambar 2.14.c adalah hasil gerakan oleh hardware dengan Bresenham dan pengendali proporsional. Input yang digunakan pada pengujian ini sama dengan yang digunakan untuk pengujian model seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Gambar 4.12.a menunjukkan bahwa kedua aktuator tidak bergerak secara bersamaan. Aktuator pertama bergerak menuju posisi X yang diinputkan, sedangkan pada saat yang sama aktuator kedua diam. Setelah aktuator pertama sampai di posisi X yang dimasukkan, aktuator ini diam, sedangkan aktuator kedua bergerak menuju posisi Y yang diinputkan. Proses tersebut berlanjut hingga kedua meja masing-masing menuju titik akhir dari gerak yang dimasukkan.

Gambar 4.12.b dan c menunjukkan hasil gerakan hardware yang telah diberi algoritma Bresenham. Tampak dari Gambar 4.12.b dan Gambar 4.12.c bahwa gerakan yang dihasilkan oleh hardware dengan algoritma Bresenham telah menyerupai garis lurus. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma Bresenham telah mampu melakukan kompensasi sehingga kedua penggerak yang semula bergerak secara skensial berdasarkan inputnya, kemudian menjadi seolah-olah bergerak secara bersamaan sehingga menghasilkan garis lurus. Proses algoritma Bresenham menentukan titik-titik koordinat yang perlu dilalui oleh aktuator untuk menuju posisi yang diinginkan telah dijelaskan pada sub bab 3.2.

Gambar 4.12.b adalah hasil gerakan hardware dengan Bresenham namun tanpa pengendali Proporsional. Tampak bahwa terdapat beberapa error posisi yang mengakibatkan garis lurus yang dihasilkan tidak persis dengan garis hasil gerakan input yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Kemudian, dengan diberikannya pengendali Proporsional, terdapat perbaikan posisi X dan Y, sehingga garis yang dihasilkan oleh hardware mendekati garis yang dihasilkan oleh input, seperti yang tampak pada Gambar 4.12.c. Berdasarkan hasil pengujian hardware, output posisi X dan Y hardware dengan Bresenham tanpa pengendali Proporsional dan hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional didapatkan. Pada pengujian ini, diambil 10 data posisi X dan Y, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gradien 3/5

Input (cm)		Output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional (cm)		Output hardware hanya dengan Bresenham (cm)	
x	y	x	y	x	y
0	1	0	1,35	0	1,2
0,5	1,3	0,5	1,65	0,55	1,5
1	1,6	1	1,95	1,15	1,8
1,5	1,9	1,5	2,3	1,6	2,15
2	2,2	2	2,55	2,1	2,5
2,5	2,5	2,5	2,85	2,5	2,8
3	2,8	3	3,15	3,1	3,1
3,5	3,1	3,5	3,45	3,6	3,45
4	3,4	4	3,75	4,1	3,8
4,25	3,55	4,25	3,95	4,3	3,9

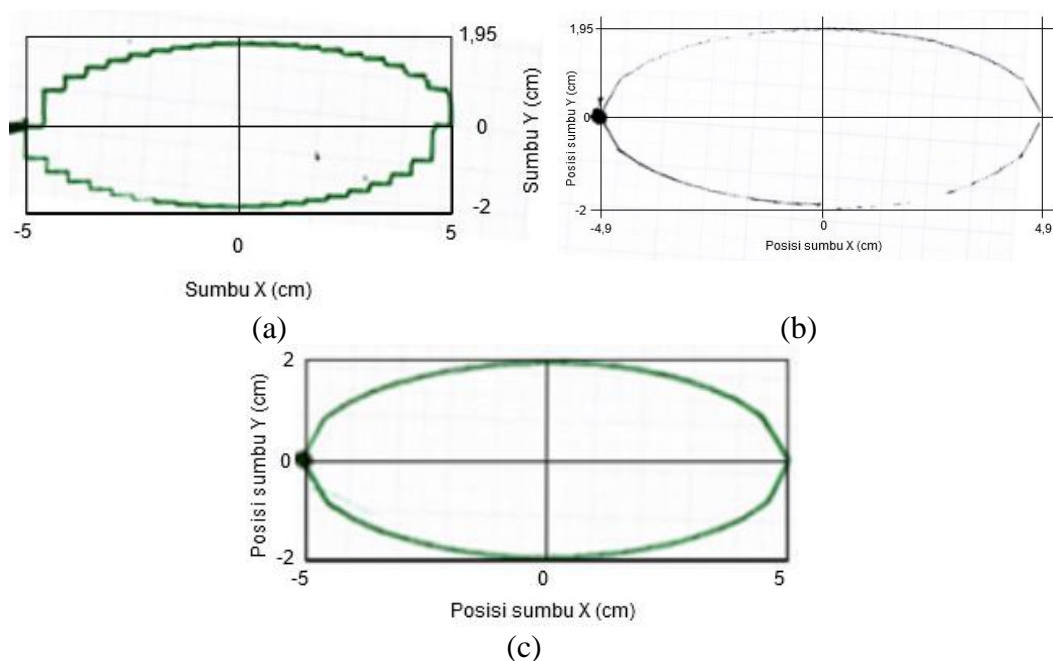
Tabel 4.11 menunjukkan data posisi X dan Y yang didapatkan dari pengujian hardware dengan input gerak gradien 3/5. Output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional menunjukkan posisi X dan Y dari garis yang dihasilkan dari gerakan hardware yang telah diberikan Bresenham dan pengendali Proporsional. Kemudian posisi X dan Y dari garis yang dihasilkan oleh gerakan hardware dengan Bresenham namun tanpa pengendali Proporsional, ditunjukkan pada kolom output hardware hanya dengan Bresenham.

Selanjutnya, untuk mengetahui performansi pengendali Proporsional dalam memperbaiki error posisi hardware, dilakukan perhitungan IAE. IAE dihitung dengan menggunakan persamaan (4.4). Hasil perhitungan IAE hardware dengan Bresenham saja (tanpa pengendali Proporsional), didapatkan IAE posisi sumbu X adalah 0,725% dan posisi sumbu Y adalah 2,575%. Sedangkan hasil perhitungan IAE dari hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional, didapatkan bahwa IAE posisi sumbu X adalah 0% dan posisi sumbu Y adalah 3,225%. Tampak bahwa pengendali Proporsional pada aktuator yang menggerakkan EST ke arah sumbu X telah mampu memenuhi fungsinya dalam memperbaiki error. Namun pada aktuator yang menggerakkan EST ke arah sumbu Y, tampak bahwa pengendali Proporsional yang ditanamkan ke dalam hardware belum mampu

memenuhi fungsinya dalam memperbaiki error posisi yang dihasilkan EST. Hal ini ditunjukkan dengan IAE tanpa pengendali Proporsional yang sebelumnya adalah 2,575%, setelah diberi pengendali Proporsional, IAE menjadi 3,225%.

b. Pengujian hardware dengan input elips

Berikutnya sistem kontrol yang dirancang diuji dengan cara memasukkan input berupa gerak elips. Gerak elips yang digunakan sebagai input sama dengan yang diberikan pada pengujian model EST, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Gerak elips ini dijadikan sebagai input pada pengujian hardware, kemudian gerakan yang dihasilkan oleh hardware dicatat dan diolah. Proses pengambilan data pada pengujian ini sama dengan yang dilakukan pada pengujian dengan input garis gradien 3/5. Gerakan yang dihasilkan hardware ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Hasil pengujian hardware menggunakan input elips, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional

Gambar 4.13 adalah gerakan yang dihasilkan oleh hardware yang dengan dan tanpa Bresenham-pengendali proporsional, dengan input yang digunakan adalah gerakan yang membentuk elips. Gambar 4.13.a menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh hardware tanpa algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional. Pada gambar 4.13.a tampak bahwa gerakan yang dihasilkan oleh

hardware tanpa sistem kontrol tidak membentuk pola elips dengan garis lurus. Meja bergerak ke arah X dan Y secara bergantian. Hal ini jelas menunjukkan bahwa, hardware yang dirancang tanpa algoritma Bresenham dan pengendali P tidak mampu menghasilkan gerakan elips sesuai dengan input yang diberikan.

Gambar 4.13.b menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh hardware yang diberikan algoritma Bresenham saja, tanpa pengendali Proporsional. Tampak bahwa gerakan yang dihasilkan oleh hardware telah menghasilkan pola elips. Hal ini menunjukkan bahwa, pada pengujian hardware dengan input elips, algoritma Bresenham telah mampu melakukan kompensasi, sehingga kedua aktuator sampai ke posisi tujuan dalam waktu yang bersamaan dan seolah-olah menghasilkan gerakan dengan lintasan garis lurus.

Selanjutnya, hasil gerakan oleh hardware dengan Bresenham dan pengendali proporsional ditunjukkan pada Gambar 4.13.c. Tampak bahwa pola elips yang dihasilkan oleh hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional menghasilkan elips dengan sumbu mayor sebesar 10 cm dan sumbu minor sebesar 4 cm. Tanpa pengendali Proporsional, sumbu mayor yang dihasilkan oleh hardware adalah 9,8 cm, sedangkan sumbu minornya adalah 3,95 cm. Hal ini telah ditunjukkan dalam Gambar 4.13.b. Dari gerakan yang dihasilkan oleh pengujian hardware ini, didapatkan beberapa posisi X dan Y seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.12.

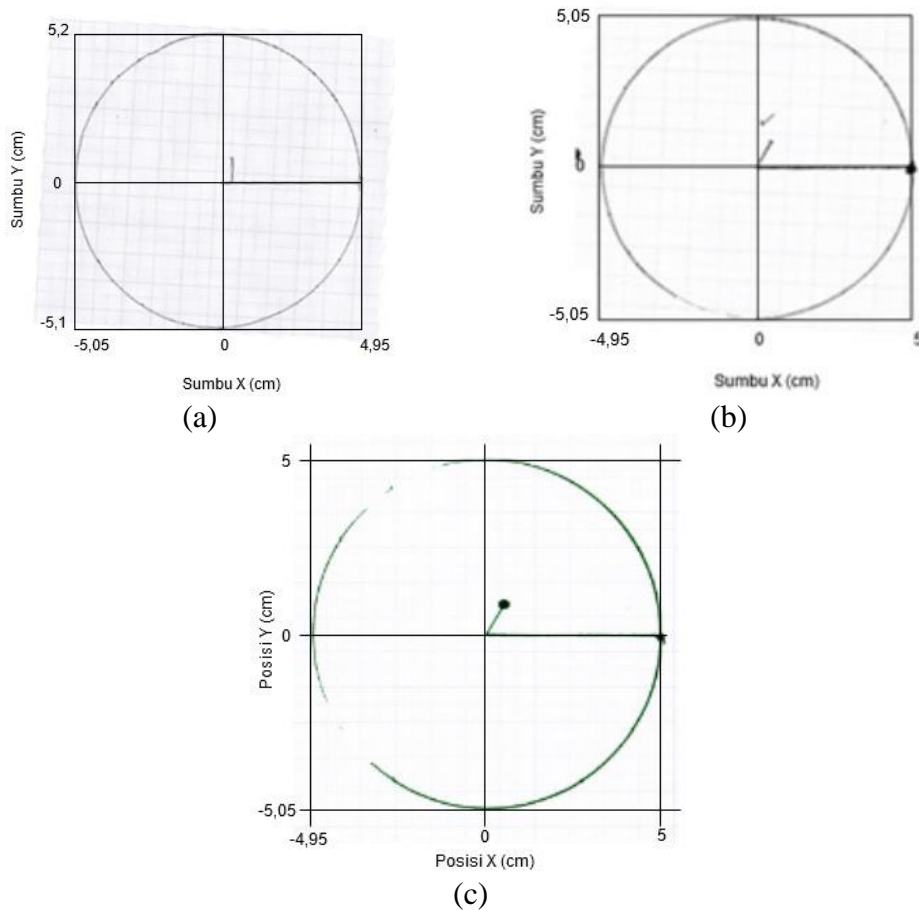
Tabel 4.12 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input gerak elips

Input (cm)		Output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional (cm)		Output hardware hanya dengan Bresenham (cm)	
X	Y	X	Y	X	Y
-5	0	-4,9	0	-5	0
-4,5	0,872	-4,3	0,9	-4,4	0,89
-3	1,6	-2,95	1,5	-3	1,6
-1,5	1,908	-1,4	1,8	-1,5	1,9
0	2	0	1,95	0	2
1,5	1,908	1,2	1,9	1,5	1,9
3	1,6	3,05	1,6	3	1,6
4,5	0,8718	4,5	0,8	4,6	0,8
5	0	5	0	5	0
4,5	-0,872	4,5	-0,9	4,5	-0,9
3	-1,6	2,9	-1,6	3	-1,6
1,5	-1,908	1,45	-1,9	1,5	-1,9
0	-2	0	-2	0	-2
-1,5	-1,908	-1,5	-1,9	-1,5	-1,9
-3	-1,6	-3	-1,6	-3	-1,6
-4,5	-0,872	-4,45	-0,9	-4,5	-0,9
-5	0	-4,9	0	-5	0

Tabel 4.12 menunjukkan posisi X dan Y yang didapatkan dari gerakan hasil pengujian hardware hanya dengan Bresenham dan hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional. Dari data posisi X dan Y yang telah didapatkan ini, kemudian dilakukan perhitungan IAE untuk hardware hanya dengan Bresenham dan hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional. Performansi dari kontroller dalam menghasilkan gerakan ellips dilihat dari index persentase IAE untuk setiap sumbu. Dari persamaan (4.4) didapatkan hasil untuk kontroller tanpa pengendali pada sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah 0,925% dan 0,4328%, dan setelah digunakan kontroler, didapat hasil untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah 0,2% dan 0,1638%. Dari hasil tersebut diketahui bahwa terdapat penurunan nilai IAE setelah menggunakan kontroler dan kontroller telah mengurangi error.

c. Pengujian hardware dengan input gerak lingkaran

Pada pengujian ini, hardware diuji dengan input berupa gerak lingkaran. Gerak lingkaran yang dijadikan sebagai input pada pengujian ini sama dnegan yang digunakan pada pengujian model EST, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Proses pengambilan data pengujian ini sama dengan yang dilakukan pada pengujian dengan input gerak lingkaran. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil pengujian hardware menggunakan input lingkaran, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional

Gambar 4.14 menunjukkan pola gerakan hasil pengujian hardware dengan input gerak lingkaran. Gambar 4.14.a adalah plot gerakan yang dihasilkan oleh hardware tanpa sistem kontrol. Tampak bahwa tanpa sistem kontrol, hardware mampu menghasilkan pola lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.a. Pola gerakan yang bergantian (skuensial) seperti yang dihasilkan oleh pengujian dengan input garis gradien 3/5 dan elips tidak didapatkan pada pengujian gerak

lingkaran ini. Hal ini disebabkan karena input gerak lingkaran yang digunakan, perpindahan dari posisi satu ke posisi yang lain cukup kecil.

Gambar 4.14.b menunjukkan pola gerakan yang dihasilkan oleh hardware yang hanya diberikan Bresenham saja. Kemudian, gerakan yang dihasilkan oleh hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional ditunjukkan pada Gambar 4.14.c. Dari gerakan yang dihasilkan oleh pengujian hardware ini, didapatkan beberapa posisi X dan Y seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input geral lingkaran

Input (cm)		Output hardware hanya dengan Bresenham (cm)		Output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional (cm)	
X	Y	X	Y	X	Y
5	0	5	0	5	0
4,5	2,179	4,5	2	4,55	2,05
2,996	4,003	3,1	3,9	3,15	3,9
1,508	4,767	1,65	4,7	1,75	4,7
0,029	4,999	0	5,05	0	5
-1,495	4,771	-1,7	4,75	-1,7	4,65
-2,985	4,011	-3,15	3,9	-3,15	3,8
-4,494	2,191	-4,5	2,1	-4,5	2
-4,999	0,013	-4,95	0	-4,95	0
-4,487	-2,207	-4,45	-2,15	-4,45	-2,2
-2,971	-4,022	-3,5	-3,5	-3,45	-3,5
-1,479	-4,776	-1,95	-4,6	-1,9	-4,6
0,487	-4,976	0,5	-5	0,5	-5
1,98	-4,591	1	-4,9	1,05	-4,9
3,51	-3,559	2,9	-4,05	3,05	-4,05
4,508	-2,164	4,4	-2,25	4,45	-2,25
4,999	0,017	5	0	5	0

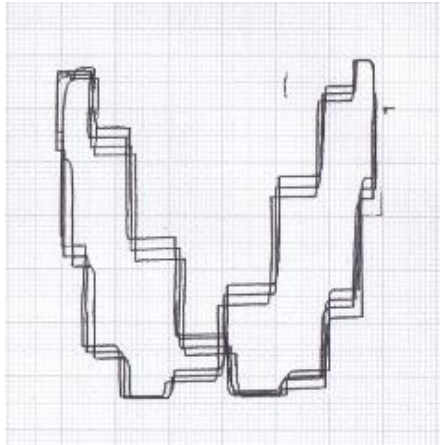
Tabel 4.13 menunjukkan posisi X dan Y yang didapatkan dari pola gerakan yang dihasilkan oleh pengujian hardware dengan menggunakan input gerak lingkaran. Posisi X dan Y dari pengujian hardware yang diberikan Bresenham saja, tanpa pengendali Proporsional, ditunjukkan pada kolom output hardware hanya dengan Bresenham. Sedangkan posisi X dan Y yang didapatkan dari hasil pengujian

hardware yang diberikan Bresenham dan pengendali Proporsional, ditunjukkan pada kolom output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional. Dengan menggunakan data posisi X dan Y seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13, selanjutnya dilakukan perhitungan IAE.

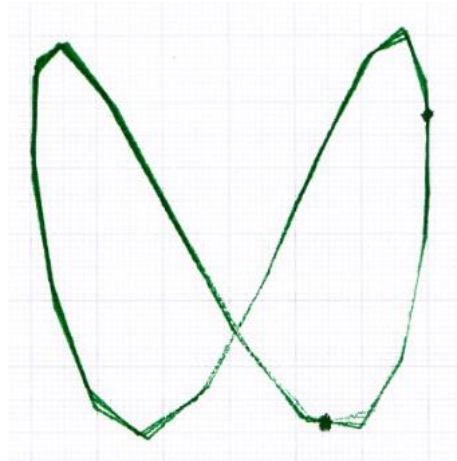
Dengan menggunakan persamaan (4.4), didapatkan IAE hardware yang hanya diberi Bresenham, untuk posisi sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah 3,449% dan 2,3089%. Sementara itu, untuk hardware yang telah diberikan Bresenham dan pengendali Proporsional, didapatkan hasil indeks IAE untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah 3,2986% dan 2,4589%. Dari hasil tersebut tampak bahwa pengendali Proporsional telah dapat mengurangi sedikit error yang terjadi pada sumbu X, sementara terjadi sedikit kenaikan error untuk aktuator pada sumbu Y.

d. Pengujian Hardware dengan Input Gerak Lisajjous

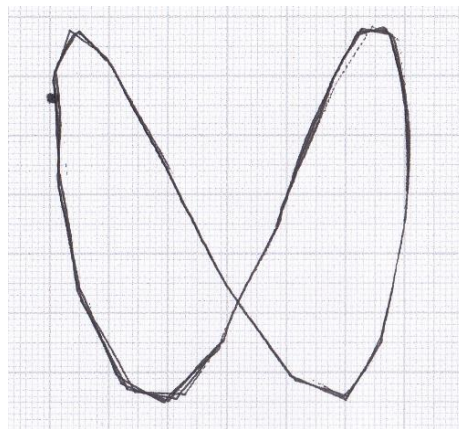
Pada pengujian ini, hardware yang telah dirancang diuji dengan memasukkan input berupa gerakan lissajous. Gerakan lissajous yang digunakan sebagai input pada pengujian ini, sama seperti input lissajous yang digunakan pada pengujian model EST. Gerak lissajous yang digunakan sebagai input ditunjukkan pada Gambar 4.5. Gerakan hasil pengujian hardware dengan input gerak lissajous ditunjukkan pada Gambar 4.15.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.15 Hasil pengujian hardware menggunakan input *lissajous*, (a) tanpa Bresenham-pengendali Proporsional, (b) dengan Bresenham, tanpa pengendali Proporsional dan (c) dengan Bresenham-pengendali Proporsional

Gambar 4.15 menunjukkan hasil pengujian hardware dengan menggunakan input gerak *lissajous*. Gambar 4.15.a adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh hardware tanpa Bresenham dan pengendali proporsional. Gambar 4.15.b adalah pola gerakan yang dihasilkan oleh hardware dengan Bresenham saja, tanpa pengendali proporsional. Sedangkan Gambar 4.15.c adalah gerakan yang dihasilkan oleh hardware yang telah diberikan Bresenham dan pengendali Proporsional. Dari gerakan yang dihasilkan oleh pengujian hardware ini, didapatkan beberapa posisi X dan Y seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Data posisi X dan Y hardware tanpa dan dengan pengendali Proporsional pada pengujian input geral lissajous

Input (cm)		Output hardware dengan Bresenham dan pengendali Proporsional (cm)		Output hardware hanya dengan Bresenham (cm)	
x	y	X	Y	X	Y
-2,89778	0	-2,85	0	-2,8	0
-2,99323	1,834544	-2,9	2,35	-2,9	1,75
-2,76763	2,903104	-2,6	3,5	-2,5	3,15
-2,24518	2,759519	-2,1	2,7	-2,1	3,1
0,422566	-2,16509	0,45	-2,15	0,4	-2,4
1,359493	-2,98298	1,5	-2,9	1,2	-3,15
2,150602	-2,55538	2,2	-2,25	1,85	-2,85
2,711038	-1,06082	2,7	-0,9	2,7	-1,3
2,980689	0,87667	3	1	3	0,6
2,930633	2,448117	2,95	2,7	3,1	2,4
2,566237	2,997392	2,5	3	2,7	3,15
1,926588	2,295154	1,8	2,1	2,15	2,55
0,118128	-1,2909	0,1	-1,4	0,1	-1,25
-0,85671	-2,67742	-1	-2,7	-0,9	-2,7
-1,73965	-2,94603	-1,85	-2,8	-1,8	-3
-2,43601	-1,98456	-2,5	-1,8	-2,35	-2,1

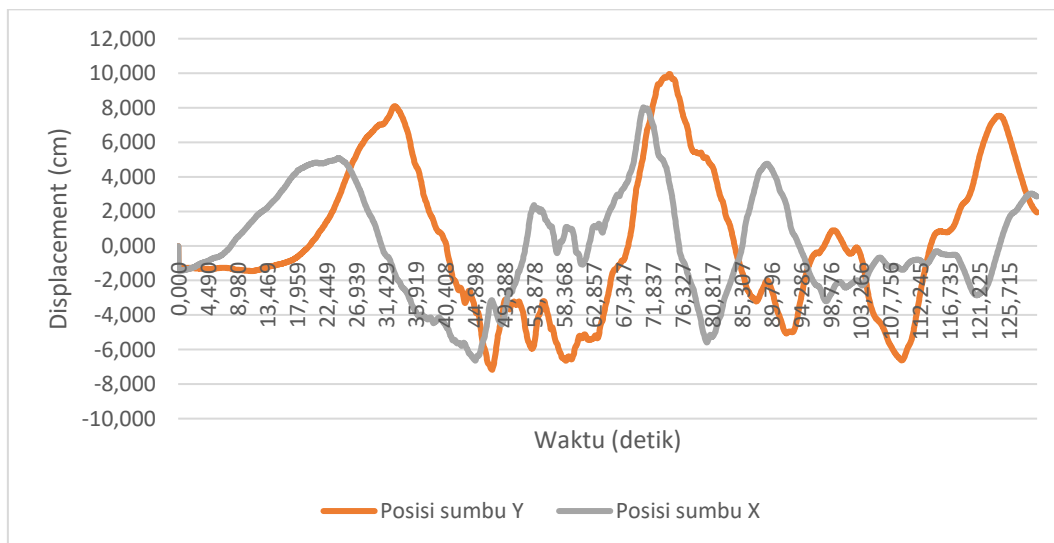
Pengujian berikutnya adalah pengujian performansi terhadap kontroler dengan menggunakan indeks IAE. Saat sistem belum diberi kontroler didapat nilai IAE untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah sebesar 1,7592% dan 2,5151% dan berikutnya saat sistem diberi kontroler didapat nilai IAE untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut – turut adalah 1,1936% dan 2,6791%. Dari hasil tersebut tampak bahwa kontroler dapat memenuhi fungsinya untuk memperbaiki error pada sumbu X, sementara untuk sumbu Y terjadi kenaikan error.

4.4 Hasil Pengujian Menggunakan Input Data Gerakan Gempa

Pada sub bab 4.1 dan 4.2 telah dibahas tentang pengujian model EST dan sistem kontrol yang dirancang. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, didapatkan bahwa model EST yang dirancang, sudah mampu menghasilkan pola gerakan sesuai dengan inputnya, namun terdapat error posisi yang cukup besar. Kemudian, dari sistem kontrol yang dirancang, kemudian diimplementasikan ke dalam

hardware. Hasil pengujian hardware menunjukkan bahwa hardware dengan sistem kontrol telah mampu menghasilkan pola yang sesuai dengan input yang diberikan dengan error yang kecil.

Pada bagian ini, dilakukan pengujian terhadap hardware EST dengan menggunakan data gerakan gempa sebagai input. Data gerakan gempa yang digunakan sebagai input adalah data displacement gempa ke arah sumbu X dan Y yang didapatkan dari *CESMD (Engineering Strong Motion Data Center)*. Data gempa yang digunakan pada pengujian ini adalah data gempa yang terjadi di Pulau Sikuai, Sumatera Barat, pada tanggal 12 september 2007 dengan kekuatan gempa sebesar 8,4Mw. Dari data ini, didapatkan bahwa durasi gempa adalah 80s, dengan frekuensi sebesar 16Hz. Akselerasi tertinggi (PGA) pada sumbu X adalah 0,041g dan pada sumbu Y adalah 0,038g. Data akselerasi, velocity dan displacement gempa ini secara lengkap disajikan di Lampiran. Namun yang digunakan pada pengujian ini hanyalah data displacement. Data displacement yang digunakan pada pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4.16.

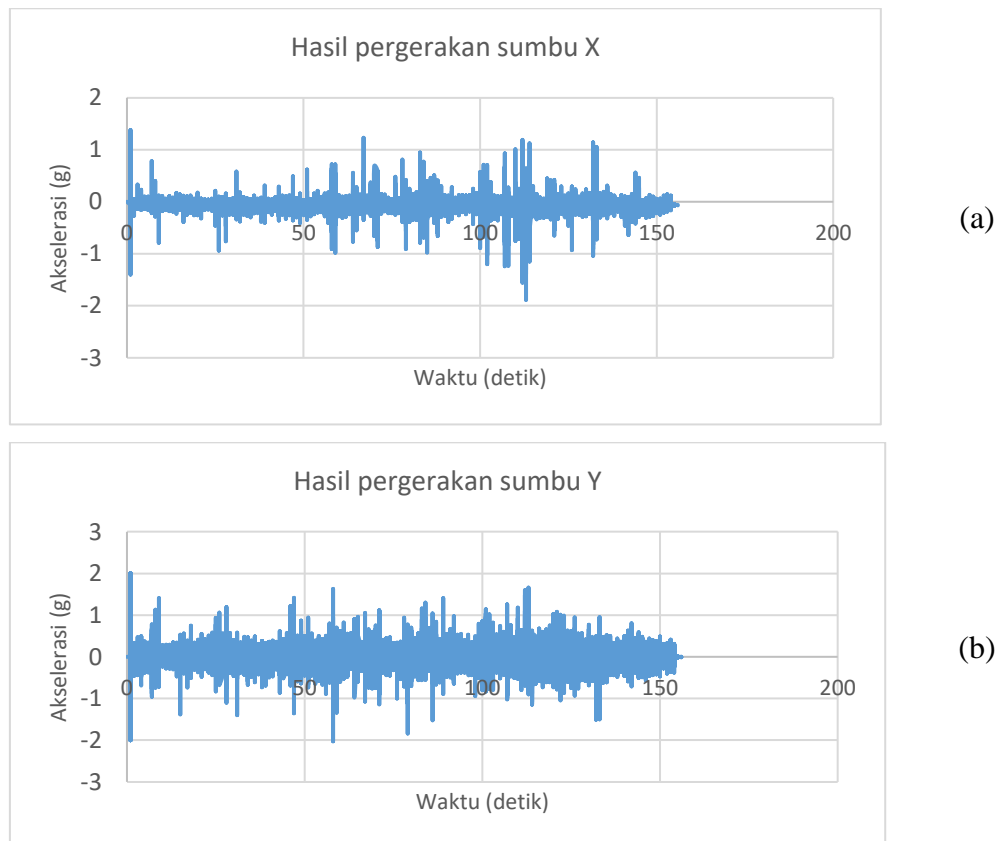


Gambar 4.16 Data displacement gempa bumi (*CESMD, 2007*)

Gambar 4.16 menunjukkan data displacement gempa yang digunakan pada pengujian ini. Dari data displacement tersebut, didapatkan posisi X dan Y pada waktu yang sama. Kemudian, data posisi X dan Y tersebut dijadikan sebagai input pada pengujian hardware EST yang telah diberikan algoritma bresenham dan

pengendali Proporsional. Dari gambar 4.16, didapatkan bahwa, waktu rekaman data gempa ini adalah 120 detik. Posisi X maksimum adalah 7,96 cm dan posisi Y maksimum adalah 9,955 cm.

Pada pengujian ini, dilakukan analisa parameter gerakan tanah. Parameter ini adalah amplitudo, konten frekuensi dan durasi gerakan tanah. Ketiga parameter ini menentukan kekuatan gempa yang dihasilkan oleh gerakan tanah. Parameter amplitudo yang digunakan pada analisa ini adalah PGA (Peak Ground Acceleration). Pada pengujian ini, *accelerogram* digunakan untuk mengukur percepatan permukaan meja yang dihasilkan oleh aktuator yang digerakkan berdasarkan input data gempa. Hasil pengukuran dengan *accelerogram* ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil pergerakan meja pada (a) sumbu X dan (b) sumbu Y

Gambar 4.17 menunjukkan hasil pergerakan meja ke sumbu X dan Y. hasil pergerakan ini didapatkan dari pembacaan *accelerogram*. Dari Gambar 4.17, tampak bahwa waktu yang dibutuhkan oleh aktuator untuk menjalankan gerakan gempa adalah ± 155 detik, dengan jumlah data sebesar ± 15487 data untuk kedua

sumbu. Didapatkan bahwa percepatan maksimum pada sumbu X terjadi pada detik ke 113s dengan nilainya adalah 1,88g. Percepatan maksimum pada sumbu Y terjadi pada detik ke 58s dengan nilainya adalah 2 g. Telah disebutkan sebelumnya, bahwa data gempa yang digunakan sebagai input memiliki akselerasi tertinggi pada sumbu X dan sumbu Y sebesar 0,041g dan 0,038g, dengan durasi gempa 80s. Dengan menggunakan input data displacement gempa ini, hardware yang dirancang menghasilkan akselerasi yang lebih besar dari data gempa yang sebenarnya. Waktu yang diperlukan oleh hardware untuk bergerak sesuai dengan gerakan gempa yang dimasukkan juga lebih lama, yaitu 155s, sedangkan waktu rekam data gempa ini adalah 130s. Dilihat dari Gambar 4.17, dari detik pertama hingga terakhir, percepatan yang dihasilkan oleh hardware lebih dari 0,05g. Dengan demikian didapatkan bahwa, pada pengujian ini durasi gempa yang dihasilkan oleh hardware ini adalah 155 detik.

Parameter selanjutnya adalah frekuensi. Untuk mendapatkan frekuensi dari data akselerasi pada gambar 4.17, digunakan perhitungan *mean frequency* atau frekuensi rata-rata. Sementara itu, nilai perhitungan *Root Mean Squared Error* (RMSE) digunakan sebagai indikator error dari gerakan akselerasi yang dihasilkan. *Filtering* juga coba dilakukan dengan menggunakan *Moving Average smoothing filter* untuk melihat bagaimana pengaruh hasil filter dengan *K-point* yang diubah-ubah terhadap perubahan estimasi frekuensi dengan frekuensi batas yaitu 16 Hz sesuai dengan frekuensi data gempa. Tabel 4.15 berikut menunjukkan hasil perhitungan frekuensi, RMSE dengan variasi nilai *K-point* pada filter.

Tabel 4.15 Hasil perhitungan frekuensi dan RMSE pada data akselerasi

<i>K-Point</i> pada filter	Estimasi frekuensi sumbu X (Hz)	Estimasi frekuensi sumbu Y (Hz)	% RMSE sumbu X	% RMSE sumbu Y
Tidak menggunakan filter ($K = 1$)	22,8311	27,6287	6,8311	11,6287
$K = 2$	9,906	17,7968	6,0940	1,7968
$K=3$	7,4508	16,0238	8,5492	0,0238
$K=4$	4,5024	12,0588	11,4976	3,9412
$K=5$	3,7422	12,3712	12,2578	3,6288

Dari data pada Tabel 4.15, tampak bahwa pada sumbu X, nilai RMSE terkecil didapat saat menggunakan filter dengan nilai *k-point* sebesar 2. Sementara untuk sumbu Y, nilai RMSE terkecil didapat saat nilai *k-point* sebesar 3.

4.5 Pembahasan

Tujuan utama tesis ini adalah merancang sistem kontrol untuk mengendalikan displacement pada EST. EST yang dirancang adalah EST dua sumbu. Penggerak yang digunakan adalah *ball screw linear guide actuator* yang diproduksi oleh FUYU. Sistem kontrol yang dirancang berbasis algoritma bresenham dan pengendali Proporsional. Algoritma bresenham digunakan sebagai algoritma trajectory agar kedua aktuator yang digunakan pada EST ini dapat bergerak secara bersamaan sesuai dengan input posisi yang diberikan. Kemudian, pengendali Proporsional digunakan untuk memperbaiki error posisi yang dihasilkan meja agar keluaran meja dapat menghasilkan posisi yang sesuai dengan inputnya.

Langkah pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah memodelkan sistem EST yang digerakkan oleh dua aktuator. Pemodelan dilakukan secara empiris, yaitu menggunakan JST. Proses pemodelan sistem secara empiris telah dijelaskan di BAB 3. EST yang dirancang terdiri dari 2 sistem, yaitu sistem meja 1 dan sistem meja 2. Sistem meja 1 terdiri dari meja 1 dan penggerak 1, sedangkan sistem meja 2 terdiri dari meja 2 dan penggerak 2. Untuk mendapatkan model EST, masing-masing sistem ini dimodelkan sendiri-sendiri terlebih dahulu. JST yang digunakan untuk pemodelan ini adalah *backpropagation* dengan satu hidden layer. Untuk mendapatkan model terbaik, dibuat empat variasi kerangka model JST berdasarkan jumlah hidden neuron. Empat variasi hidden neuron ini masing-masing adalah 2, 5, 10 dan 50 hidden neuron.

Data input dan output kedua sistem digunakan untuk training data. Dengan menggunakan 180 data input-output dari sistem meja 1 dan 180 data input-output dari sistem meja 2, model JST sistem meja 1 dan model JST meja 2 didapatkan. Karena pada pemodelan ini dibuat empat variasi model baik untuk sistem meja 1 maupun meja 2, maka dari keempat variasi model tersebut dipilih berdasarkan error terkecil yang didapatkan. Dengan menggunakan JST, model sistem meja 1 dan meja 2 telah didapatkan. Dari model sistem meja 1 dan meja 2, didapatkan model EST.

Persamaan model EST yang didapatkan dari pemodelan JST dinyatakan dalam persamaan (3.24).

Pengujian model JST sistem meja 1 dan meja 2 dilakukan dengan memasukkan input dengan target 9 cm. Hasil pengujian model JST sistem meja 1 ini ditunjukkan pada Tabel 3.3. Sedangkan hasil pengujian model JST sistem 2 ditunjukkan pada Tabel 3.5. Dari empat variasi model meja 1 yang telah dibuat, error terkecil didapatkan oleh model meja 1 yang menggunakan 5 hidden neuron, dengan nilai errornya adalah 0,214%. Kemudian, dari empat variasi model meja 2 yang dibuat, error terkecil dihasilkan oleh model meja 2 yang menggunakan 5 hidden neuron, yaitu sebesar 0,685%. Dengan demikian, untuk proses pemodelan EST selanjutnya, model meja 1 yang digunakan adalah model meja 1 dengan 5 hidden neuron, sedangkan model meja 2 yang digunakan adalah model meja 2 dengan 5 hidden neuron.

Model meja 1 dan model meja 2 yang didapat, kemudian diuji untuk memvalidasi apakah model yang didapatkan ini telah sesuai dengan sistem real-nya. Hasil pengujian model meja 1 ditunjukkan pada Tabel 3.4, sedangkan untuk yang meja 2 ditunjukkan pada Tabel 3.6. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 3.4, dari 10 data pengujian didapatkan bahwa error terbesar terjadi pada saat model diberikan input 5000 step, dengan besar errornya adalah 4,904%. Kemudian dari Tabel 3.6, didapatkan bahwa dari 10 data pengujian didapatkan bahwa model meja 2 menghasilkan error terbesar pada saat inputnya adalah 50000 step, yaitu sebesar 4,22%. Dengan demikian, model meja 1 dan meja 2 yang menggunakan model JST 5 hidden neuron menghasilkan error tidak lebih dari 5%. Sehingga model ini dapat digunakan pada penelitian ini sebagai model EST.

Model EST yang telah dirancang kemudian diuji dengan variasi input gerakan, yaitu gerakan garis lurus bergradien 3/5, elips, lingkaran dan lissajous. Hasil pengujian model EST dengan variasi input telah ditunjukkan pada sub Bab 4.1. Berdasarkan hasil pengujian model EST, didapatkan bahwa rata-rata error posisi X dan Y pada pengujian gerak garis gradien 3/5 adalah 2,988% dan 18,353%. Hasil pengujian model EST dengan input gerak elips, menunjukkan bahwa rata-rata error posisi X dan Y adalah 6,595% dan 19,663%. Kemudian pada pengujian model EST dengan input gerak lingkaran, didapatkan rata-rata error

posisi X dan Y adalah 15,782% dan 14,763%. Hasil pengujian model EST dengan input gerak *lissajous* menunjukkan bahwa rata-rata error posisi X dan Y adalah 10,694% dan 19,062%. Dari hasil pengujian ini, tampak bahwa posisi Y dari empat pengujian memiliki rata-rata error paling besar.

Setelah dicermati, pada setiap pengujian yang dilakukan, input posisi Y selalu diberikan nilai dalam desimal. Kembali ke pemodelean sistem menggunakan JST, data posisi yang digunakan untuk mentraining model hampir semua dalam bilangan bulat, yaitu 1 cm, 2cm, 3cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7cm, 8cm, 9cm dan 10cm. Dengan memasukkan nilai bulat ke dalam model, contohnya seperti pada input garis gradien 3/5, diberikan input posisi X = 2 cm, model menghasilkan posisi X output sebesar 1,998 cm. Didapatkan errornya adalah 0,115%. Dengan kurangnya pengetahuan model yang dirancang dengan input posisi dalam bentuk bilangan desimal, mengakibatkan model ini selalu menghasilkan error posisi yang besar pada saat model diberikan input bilangan desimal. Namun, jika ditinjau dari pola yang dihasilkan, model EST yang dirancang sudah dapat menghasilkan pola yang mendekati pola input, dengan rata-rata error seperti yang telah diulas sebelumnya.

Setelah didapatkan model EST, dilanjutkan perancangan sistem kontrol. Sistem kontrol yang dirancang telah dijelaskan pada sub BAB 3.2. Sistem kontrol ini terdiri dari pengendali Proporsional dan algoritma bresenham. Pengendali Proporsional diimplementasikan ke sistem ini dengan tujuan agar dapat mengurangi error posisi meja. Sedangkan algoritma bresenham diimplementasikan sebagai algoritma *trajectory* yang membantu sistem agar mampu menggerakkan kedua aktuator EST secara bersamaan sesuai dengan input yang diberikan. Setelah dirancang, sistem kontrol ini diuji. Pengujian dilakukan dengan cara memasukkan variasi input yang sama dengan pengujian model EST, ke dalam model EST yang telah diberi sistem kontrol. Hasil pengujian model EST dengan sistem kontrol telah ditunjukkan pada sub Bab 4.2.

Untuk menganalisa performasi sistem kontrol yang dirancang, pada masing-masing pengujian model EST dengan pengendali Proporsional, dilakukan perhitungan *Integral Absolute Error* (IAE). IAE biasa digunakan untuk melakukan *tuning* terhadap suatu sistem kontrol dengan mengacu pada performasi error yang dihasilkan. IAE dipilih sebagai parameter performansi dari penelitian ini karena

parameter IAE bergantung murni pada total error yang dihasilkan oleh sistem dan tidak dipengaruhi oleh parameter lainnya seperti waktu, dan karena parameter waktu dalam proses pengujian model belum begitu diperhitungkan, maka dipilihlah parameter IAE untuk menguji performansi dari sistem kontrol yang dirancang. Hasil perhitungan IAE model EST tanpa dan dengan pengendali Proporsional telah ditunjukkan dalam Tabel 4.8. Didapatkan bahwa pada pengujian input garis gradien 3/5, IAE model EST yang sebelumnya adalah 0,223% pada sumbu X dan 3,312% pada sumbu Y, setelah model EST diberi pengendali Proporsional, IAE posisi X menjadi 0,147% dan IAE posisi Y menjadi 3,316%. Tampak bahwa terjadi penurunan error sebesar 0,076% pada sumbu X dan peningkatan error sebesar 0,004% pada sumbu Y. Pada pengujian input gerak elips, didapatkan bahwa pengendali proporsional telah mampu menurunkan IAE model EST pada posisi X yang semula 2,256% menjadi 1,707%, sedangkan pada posisi Y, tidak ada perubahan, yaitu tetap 6,55%. Pada pengujian lingkaran juga menunjukkan bahwa pengendali Proporsional yang dirancang telah mampu memperbaiki error posisi X model EST, yang semula 8,593% menjadi 5,803%, sedangkan pada posisi Y terjadi peningkatan 0,001%, yaitu dari 24,611% menjadi 24,612%. Kemudian pada pengujian input gerak lissajous, didapatkan bahwa pengendali proporsional telah mampu mengurangi error sebesar 3,188% pada posisi X, yaitu yang semula 9,267% menjadi 6,079%. Sedangkan pada posisi sumbu Y, pengendali Proporsional hanya mampu menurunkan error sebesar 0,001%, yaitu dari 23,558% menjadi 23,557%. Hal ini menunjukkan bahwa, pengendali Proporsional yang dirancang pada aktuator yang bergerak ke arah sumbu X telah mampu memenuhi fungsinya dalam memperbaiki error, sedangkan pada aktuator yang bergerak ke arah sumbu Y masih belum.

Sistem kontrol yang telah dirancang tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam hardware. Hasil pengujian hardware telah diulas pada sub Bab 4.3. Berdasarkan hasil pengujian hardware, didapatkan bahwa algoritma bresenham yang diimplementasikan ke dalam hardware telah mampu melakukan kompensasi. Kompensasi yang dilakukan oleh bresenham, membuat dua aktuator yang semula bergerak secara bergantian (sekuensial), menjadi seolah-olah bergerak secara bersamaan menghasilkan pola dengan garis yang lurus yang tampak halus. IAE

kembali dipilih sebagai indikator performansi dari hasil gerakan pada hardware. Pada pengujian gerakan dengan input gradien 3/5, didapat hasil IAE kontroler tanpa pengendali untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut sebesar 0,725% dan 2,575%, dan nilai IAE kontroler dengan pengendali untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut-turut adalah 0 dan 3,225%. Hasil ini menunjukkan bahwa kontroler telah dapat menurunkan nilai error pada sumbu X tetapi belum berhasil pada sumbu Y. Kemudian hardware diuji dengan menggunakan nilai ellips dengan nilai IAE kontroler tanpa pengendali untuk sumbu X dan sumbu Y secara berturut – turut adalah 0,925% dan 0,4238%. Sementara itu, untuk kontroler dengan pengendali didapatkan nilai IAE sebesar 0,2% dan 0,1638% secara berturut-turut untuk sumbu X dan Y. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kontroler telah mampu untuk menurunkan nilai error yang terjadi. Pengujian berikutnya adalah menggunakan gerakan lingkaran. Untuk kontroler tanpa menggunakan pengendali, didapatkan nilai IAE untuk sumbu X dan Y secara berturut-turut adalah 3,449% dan 2,3089 %. Kemudian, untuk kontroller dengan menggunakan pengendali didapatkan nilai IAE sumbu X dan Y secara berturut-turut adalah 3,2986% dan 2,4589%. Dari nilai IAE tersebut, dapat diketahui bahwa kontroler telah mampu menurunkan nilai error pada sumbu X, tetapi belum mampu untuk memenuhi fungsinya pada sumbu Y. Pada pengujian selanjutnya, digunakan gerakan *lissajous* dan hasil IAE yang didapatkan tanpa menggunakan pengendali untuk sumbu X dan Y secara berturut-turut sebesar 1,7592 % dan 2,5151 %. Sementara untuk kontroler dengan menggunakan pengendali, didapat IAE untuk sumbu X dan Y secara berturut-turut adalah sebesar 1,1936 % dan 2,6791 %. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kontroler dapat menurunkan nilai error.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian untuk gerakan gempa. Dari hasil gerakan yang didapatkan, diketahui bahwa akselerasi dari kedua aktuator masih lebih tinggi daripada akselerasi dari input gempa tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, tetapi penyebab signifikan dari penambahan akselerasi tersebut yaitu *noise* akibat aktuator yang ikut bergetar saat bergerak sesuai dengan input gerakan gempa karena saat dilakukan pengujian, aktuator tidak diberi semacam peredam/*damp*er. Hal ini juga mempengaruhi frekuensi pembacaan dari akselerometer, karena kedua aktuator disusun secara tumpang tindih dengan

aktuator untuk sumbu X yang paling atas dan aktuator pada sumbu Y berada dibawah. Maka, dilakukan *filtering* hingga mendapatkan hasil terdekat dengan nilai frekuensi gempa yaitu 16 Hz. Hasil pembacaan frekuensi pada Tabel 4.15 menunjukkan nilai pada sumbu X memiliki RMSE terendah pada filter dengan nilai $k\text{-point} = 2$ dengan pembacaan sebesar 9,906 Hz. Dari data tersebut terjadi pengurangan frekuensi dari frekuensi data gempa, karena *filtering* ini bertujuan hanya memperhalus pembacaan dengan tanpa mengubah sifat/morfologi dari sinyal, maka dipilihlah nilai frekuensi pembacaan untuk sinyal tanpa menggunakan filter dengan nilai 22,8311 Hz karena dikhawatirkan dengan *filtering* menggunakan $k\text{-point} = 2$ mengubah sifat dari sinyal karena nilai yang didapat adalah pengurangan frekuensi. Sementara itu, untuk sumbu Y didapat RMSE terkecil pada $k\text{-point} = 3$ dengan hasil pembacaan 16,0238 Hz.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah diulas pada bab–bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Model EST berpengerak *ballscrew linear guide actuator* telah didapatkan dari pemodelan menggunakan JST. Hasil pengujian model EST menunjukkan bahwa model EST telah berhasil menghasilkan pola garis gradien 3/5 dengan rata-rata error posisi X dan Y adalah 2,988% dan 18,353%. Model EST juga telah berhasil menghasilkan pola gerakan elips dengan rata-rata error posisi X dan Y adalah 6,595% dan 19,663%, pola lingkaran dengan rata-rata error posisi X dan Y adalah 15,782% dan 14,763%, serta pola *lissajous* dengan rata-rata error posisi X dan Y adalah 10,694% dan 19,062%.
2. Sistem kontrol displacement berbasis algoritma Bresenham dan pengendali Proporsional telah berhasil dirancang dan diimplementasikan ke dalam EST dua sumbu yang menggunakan *ballscrew linear guide* sebagai aktuatornya. Berdasarkan hasil pengujian hardware dengan beberapa variasi input gerak, algoritma Bresenham yang dirancang telah mampu melakukan kompensasi, yang mengakibatkan dua aktuator yang semula bergerak secara skuensial menjadi seolah-olah bergerak secara bersamaan, sehingga menghasilkan pola yang sesuai input gerakan yang diberikan. Pengendali Proporsional yang dirancang telah mampu memperbaiki error posisi X pada pengujian input gradien 3/5, elips, lingkaran dan *lissajous*, masing-masing sebesar 0,725%, 0,725%, 0,15%, dan 0,576%. Pada posisi Y, penurunan error terjadi pada saat pengujian elips, yaitu sebesar 0,26%, sedangkan pada pengujian input gradien 3/5, lingkaran dan *lissajous* terjadi kenaikan error, masing-masing sebesar 0,65%, 0,15%, dan 0,164%.
3. Performansi pengendali Proporsional yang dirancang ditunjukkan dalam *Integral Absolute Error* (IAE). Berdasarkan hasil pengujian model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional, didapatkan penurunan error

terbesar terjadi pada pengujian input *lissajous*, dengan IAE posisi X dan Y model EST yang semula adalah 9,267% dan 23,558%, menjadi 6,079% dan 23,557% setelah model EST diberikan pengendali Proporsional. Berdasarkan pengujian hardware, didapatkan bahwa penurunan error terbesar terjadi pada pengujian dengan input elips, dengan IAE model EST yang semula adalah 0,925% dan 0,424% menjadi 0,2% dan 0,1638% setelah hardware diberi pengendali Proporsional.

5.2 Saran

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan memperbaiki algoritma kontrol yang masih menggunakan metode konvensional dan mengganti dengan *modern control algorithm* atau *modern intelligence control* yang memiliki kemampuan optimal. Sementara itu, untuk model aktuator EST masih dapat dioptimalkan lagi dengan menggunakan metode matematis ataupun empiris yang lebih kompleks dan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Baran, T., Tanrikulu, A. K., Dundar, C. & Tanrikulu, A., 2011. CONSTRUCTION AND PERFORMANCE TEST OF A LOW-COST SHAKE TABLE. *Experimental Technique*, pp. 8-16.
- CESMD, 2007. *CESMD String Motion Data Set*. [Online]
Available at: https://strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/iqr_dist_DM2.pl?IQRID=Sumatra_12Sep2007&SFlag=0&Flag=2
[Accessed 3 August 2018].
- Crowder, R., 2006. *Stepper Motor*. 2nd ed. s.l.:Newnes.
- Dai, M., Chen, Y., Zheng, C. & Yiming, G., 2017. *Design of Multi-step Stepper Motor Coordinated Control System Based On Bresenham Algorithm*. s.l., 2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP).
- Damcı, E. & Şekerci, Ç., 2019. Development of Low-Cost-Single-Axis Shake Table Based on Arduino. *Experimental Techniques*, Issue 43, pp. 179-198.
- Devina, H. et al., 2019. Evaluasi Algoritme Bresenham dan Digital Differential Analyzer (DDA) untuk Pengontrolan Koordinasi Gerakan Dua Motor Stepper pada Robot untuk Simulator Penusukan Jarum Medis. *J.Oto.Ktrl.Inst (J.Auto.Ctrl.Inst)*, 11(2), pp. 69-82.
- Duarte, R. T., Ritto-Correa, M., Vaz, C. T. & Campos-Costa, A., 1994. *Shaking table testing of structures*. Rotterdam, Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema.
- Elsodany, N. M., Rezeka, S. F. & Maharem, N. A., 2011. Adaptive PID control of stepper motor driving a flexible rotor. *Alexandria Engineering Journal*, Volume 50, pp. 127-136.
- Feng, G.-H. & Pan, Y.-L., 2012. Investigation of ball screw preload variation based on dynamic modeling of a preload adjustable feed-drive system and spectrumanalysis of ball-nuts sensed vibration signals. *International Journal of machine Tools & Manufacture*, pp. 85-96.
- Frey, S., Dadalau, A. & Verl, A., 2012. Expedient modeling of ball screw feed drives. *Production Engineering*, 6(2), pp. 205-211.
- FUYU, 2017. *FMDD50D40NOM Driver Manual*, Sichuan: Cengdu Fuyu Technology Co., Ltd.
- FUYU, 2017. *Product Manual*, Sichuan: Chengdu Fuyu Technology Co., Ltd.
- Guzman, V. M. H. & Serrano, R. V. C., 2011. Global PID position control og PM stepper motors and PM synchronous motors. *International Journal of Control*, 84(11), pp. 1807-1816.

- Haddadi, H., Shakal, A., Huang, M. & Parrish, J., 2012. *Report on Progress at the Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD)*, Lisboa: 15 WCEE.
- Hamidzadeh, M., Soleymani, M., Moradzadeh, H. & Ghanbari, B. S., 2016. Fuzzy supervisory control of seismic shake table. *Scienta Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 23(6), pp. 2451-2457.
- Haykin, S., 2001. *Neural Network a Comprehensive Foundation*. 2nd ed. s.l.:Pearson Education.
- Hellerstein, J. L., Diao, Y., Parekh, S. & Tilbury, D. M., 2004. Proportional Control. In: *Feedback Control of Computing System*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., pp. 243-291.
- Kim, W., Shin, D. & Chung, C. C., 2012. The Lyapunov-based controller with a passive nonlinear observer to improve position tracking performance of microstepping in permanent magnet stepper motors. *Automatica*, Volume 48, pp. 3064-3074.
- Kim, W., Shin, D., Lee, Y. & Chung, C. C., 2016. Simplified torque modulated microstepping for position control of permanent magnet stepper motor. *Mechatronics*.
- Lantz, K. & Johansson, M., 2007. *Modeling of a step motor for position feedback in a climate system*, Sweden: University West, Department of Technology, Mathematics and Computer Science.
- Liu, G. F. & Li, H. W., 2017. *Design of stepper motor position control system based on DSP*. s.l., Atlantis Press.
- Maniyar, M. M. & Khare, R. K., 2011. Selection of ground motion for performing incremental dynamic analysis of existing reinforced concrete buildings in India. *Current Science*, 100(5), pp. 701-713.
- Luo, L. & Zhang, W., 2018. Electromechanical Co-Simulation for Ball Screw Feed Drive System. In: *New Trends in Industrial Automation*. s.l.:IntechOpen, pp. 39-57.
- Morar, A., 2003. Stepper Motor Model for Dynamic Simulation. *ACTA ELECTROTEHNICA*, Volume 44, pp. 117-122.
- Nakata, N., 2011. A multi-purpose earthquake simulator and a flexible development platform for actuator controller design. *Journal of Vibration and Control*, 18(10), pp. 1552-1560.
- Ogata, K., 1997. Basic Control Actions and Response of Control Systems. In: *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall, pp. 211-316.
- Rajabi, N., Hossein, A. & Soleymani, M., 2017. Sliding mode trajectory tracking control of a ball-screw-driven shake table based on online state estimations using EKF/UKF. *Struct Control Health Monit*, pp. 1-13.
- Rao, K. S. & Mishra, R., 2014. Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(2), pp. 2740-2744.

- Ricci, S. & Meacci, V., 2018. Simple Torque Control Method for Hybrid Stepper Motors Implemented in FPGA. *Electronics*, Volume 7.
- Sanghvi, C. S., Patil, H. S. & Shah, B. J., 2012. Development of low cost shake tables and instrumentation setup for earthquake engineering laboratory. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, III(1), pp. 46-49.
- Severn, R. T., 2011. The development of shaking tables-A historical note. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 40, pp. 195-213.
- Suluch, M. et al., 2019. *Development of the Portable Shake Table for Simulating Building Characteristic under Earthquake Condition*. Surabaya, International Conference on Engineering, Advance Science and Industrial Application (ICETESIA) 2018, IPTEK Journal of Proceedings.
- Swain, S., 2012. *COMPARISON OF PERFORMANCE ANALYSIS OF DIFFERENT CONTROL STRUCTURES*. s.l.:s.n.
- Tabar, A., Russ, G. & Mason, B., 2018. *Design of a Two-Axis Shaking Table to Simulate Earthquakes in an Educational Setting*. s.l., Proceedings of the 2018 ASEE North Central Section Conference, American Society for Engineering Education.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Data training untuk pemodelan EST menggunakan JST 105

LAMPIRAN B

Hasil pemodelan EST menggunakan JST 108

LAMPIRAN C

Hasil perancangan sistem kontrol model EST 109

LAMPIRAN D

Input gerakan pengujian 112

LAMPIRAN E

Listing program di hardware 115

LAMPIRAN F

Hasil pengujian model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional 153

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Data training untuk pemodelan EST menggunakan JST

Target	Data training dengan variasi percepatan 50000 step/s ² , kecepatan 50000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator						Data training dengan variasi percepatan 50000 step/s ² , kecepatan 80000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator				
	input			output			input			Output	
				Aktuator 1	Aktuator 2	Aktuator 1				Aktuator 2	
	step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm		
-10	50000	50000	-50000	-9,96	-9,96	50000	80000	-50000	-10,04	-9,96	
-9	50000	50000	-45000	-9,02	-8,96	50000	80000	-45000	-9,04	-8,98	
-8	50000	50000	-40000	-8,04	-7,96	50000	80000	-40000	-8	-7,96	
-7	50000	50000	-35000	-7,02	-6,96	50000	80000	-35000	-7,02	-6,92	
-6	50000	50000	-30000	-6,02	-5,98	50000	80000	-30000	-6,02	-5,94	
-5	50000	50000	-25000	-5,02	-4,96	50000	80000	-25000	-5,04	-4,96	
-4	50000	50000	-20000	-4,02	-3,94	50000	80000	-20000	-4,02	-3,98	
-3	50000	50000	-15000	-3	-3	50000	80000	-15000	-3,02	-2,98	
-2	50000	50000	-10000	-2,02	-1,98	50000	80000	-10000	-2	-1,96	
-1	50000	50000	-5000	-1,02	-1	50000	80000	-5000	-1,04	-0,98	
1	50000	50000	5000	1,02	0,98	50000	80000	5000	1,04	0,98	
2	50000	50000	10000	2	1,94	50000	80000	10000	2,02	2	
3	50000	50000	15000	3,02	2,94	50000	80000	15000	3	2,96	
4	50000	50000	20000	4	3,96	50000	80000	20000	4,02	3,96	
5	50000	50000	25000	5,02	4,96	50000	80000	25000	5,04	4,96	
6	50000	50000	30000	6,02	5,96	50000	80000	30000	6,04	5,96	
7	50000	50000	35000	7,02	6,96	50000	80000	35000	7,04	6,94	
8	50000	50000	40000	8,02	7,94	50000	80000	40000	8,04	7,94	
9	50000	50000	45000	9	9	50000	80000	45000	9,02	8,94	
10	50000	50000	50000	10	9,98	50000	80000	50000	10,02	9,94	

Target	Data training dengan variasi percepatan 50000 step/s ² , kecepatan 100000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator						Data training dengan variasi percepatan 80000 step/s ² , kecepatan 50000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator				
	input			output			input			Output	
				Aktuator 1	Aktuator 2	Aktuator 1				Aktuator 2	
	step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm		
-10	50000	100000	-50000	-9,64	-9,28	80000	50000	-50000	-10,02	-9,94	
-9	50000	100000	-45000	-8,62	-8,54	80000	50000	-45000	-9,04	-8,96	
-8	50000	100000	-40000	-7,66	-7,48	80000	50000	-40000	-8,04	-7,96	
-7	50000	100000	-35000	-6,96	-6,76	80000	50000	-35000	-7,06	-6,96	
-6	50000	100000	-30000	-6,02	-5,96	80000	50000	-30000	-6,04	-5,96	
-5	50000	100000	-25000	-4,98	-4,96	80000	50000	-25000	-5	-4,98	
-4	50000	100000	-20000	-3,98	-3,96	80000	50000	-20000	-4,04	-3,96	
-3	50000	100000	-15000	-3,02	-2,94	80000	50000	-15000	-3,04	-2,96	
-2	50000	100000	-10000	-2,02	-1,96	80000	50000	-10000	-2	-1,98	
-1	50000	100000	-5000	-1,04	-0,98	80000	50000	-5000	-1,02	-1,18	
1	50000	100000	5000	1,02	0,96	80000	50000	5000	1,02	1,36	
2	50000	100000	10000	2,04	2,02	80000	50000	10000	2,04	1,96	
3	50000	100000	15000	3,02	2,96	80000	50000	15000	3,06	2,96	
4	50000	100000	20000	4,04	3,96	80000	50000	20000	4,04	3,98	
5	50000	100000	25000	5,02	4,96	80000	50000	25000	5,04	4,96	
6	50000	100000	30000	6,06	5,96	80000	50000	30000	6,04	5,98	

Target	Data training dengan variasi percepatan 50000 step/s ² , kecepatan 50000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator					Data training dengan variasi percepatan 50000 step/s ² , kecepatan 80000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator				
	input			output		input			output	
				Aktuator 1	Aktuator 2				Aktuator 1	Aktuator 2
step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm		
7	50000	100000	35000	7,02	6,92	80000	50000	35000	7,02	6,96
8	50000	100000	40000	7,74	7,58	80000	50000	40000	8,04	7,96
9	50000	100000	45000	8,74	7,92	80000	50000	45000	9,04	8,96
10	50000	100000	50000	9,74	9,3	80000	50000	50000	10,04	9,98

Target	Data training dengan variasi percepatan 80000 step/s ² , kecepatan 80000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator					Data training dengan variasi percepatan 80000 step/s ² , kecepatan 100000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator				
	input			output		input			Output	
				Aktuator 1	Aktuator 2				Aktuator 1	Aktuator 2
step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm		
-10	80000	80000	-50000	-9,94	-9,9	80000	100000	-50000	-9,58	-8,52
-9	80000	80000	-45000	-8,94	-8,86	80000	100000	-45000	-8,64	-8,18
-8	80000	80000	-40000	-7,96	-7,84	80000	100000	-40000	-7,76	-7,4
-7	80000	80000	-35000	-6,98	-6,88	80000	100000	-35000	-6,8	-6,66
-6	80000	80000	-30000	-5,96	-5,92	80000	100000	-30000	-5,86	-5,84
-5	80000	80000	-25000	-4,74	-4,94	80000	100000	-25000	-4,92	-4,94
-4	80000	80000	-20000	-3,94	-3,96	80000	100000	-20000	-3,96	-3,96
-3	80000	80000	-15000	-2,96	-2,96	80000	100000	-15000	-2,96	-2,92
-2	80000	80000	-10000	-1,94	-1,96	80000	100000	-10000	-1,96	-1,98
-1	80000	80000	-5000	-1,02	-0,96	80000	100000	-5000	-0,98	-0,92
1	80000	80000	5000	1,02	0,94	80000	100000	5000	1,02	0,96
2	80000	80000	10000	1,96	1,94	80000	100000	10000	1,96	1,96
3	80000	80000	15000	2,98	2,96	80000	100000	15000	2,96	2,94
4	80000	80000	20000	3,98	3,92	80000	100000	20000	3,96	3,94
5	80000	80000	25000	4,96	4,88	80000	100000	25000	4,94	4,94
6	80000	80000	30000	5,98	5,9	80000	100000	30000	5,94	5,88
7	80000	80000	35000	6,94	6,96	80000	100000	35000	6,8	6,74
8	80000	80000	40000	7,92	7,84	80000	100000	40000	7,78	7,52
9	80000	80000	45000	8,92	8,9	80000	100000	45000	8,7	8,44
10	80000	80000	50000	9,98	9,84	80000	100000	50000	9,6	8,62

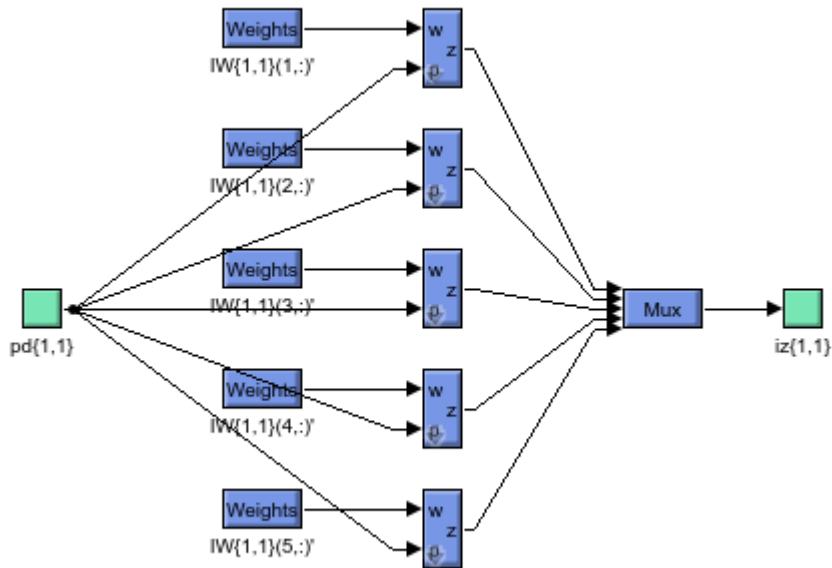
Target	Data training dengan variasi percepatan 100000 step/s ² , kecepatan 50000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator					Data training dengan variasi percepatan 100000 step/s ² , kecepatan 80000 step/s dan posisi dalam step yang divariasikan untuk aktuator				
	input			output		input			Output	
				Aktuator 1	Aktuator 2				Aktuator 1	Aktuator 2
step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm		
-10	100000	50000	-6,04	-9,58	-6,82	100000	80000	-50000	-6,04	-8,52
-9	100000	50000	-6	-8,64	-6,18	100000	80000	-45000	-5,9	-8,18
-8	100000	50000	-5,54	-7,76	-5,46	100000	80000	-40000	-4,92	-7,4
-7	100000	50000	-5,3	-6,8	-5,12	100000	80000	-35000	-4,7	-6,66
-6	100000	50000	-4,74	-5,86	-4,42	100000	80000	-30000	-4,52	-5,84

Target	Data training dengan variasi percepatan 100000 step/s ² , kecepatan 50000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator					Data training dengan variasi percepatan 100000 step/s ² , kecepatan 80000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator				
	input			output		output			output	
				Aktuator 1	Aktuator 2				Aktuator 1	Aktuator 2
	step/s ²	step/s	step	cm		step/s ²	step/s	step	cm	step/s ²
-5	100000	50000	-4,18	-4,92	-4,38	100000	80000	-25000	-4,16	-4,94
-4	100000	50000	-3,62	-3,96	-3,78	100000	80000	-20000	-3,96	-3,96
-3	100000	50000	-2,64	-2,96	-2,88	100000	80000	-15000	-2,96	-2,92
-2	100000	50000	-1,92	-1,96	-1,9	100000	80000	-10000	-1,96	-1,98
-1	100000	50000	-0,9	-0,98	-0,92	100000	80000	-5000	-0,98	-0,92
1	100000	50000	0,88	1,02	0,92	100000	80000	5000	1,02	0,96
2	100000	50000	1,86	1,96	1,9	100000	80000	10000	2,02	1,96
3	100000	50000	2,74	2,96	2,86	100000	80000	15000	2,96	2,94
4	100000	50000	3,68	3,96	3,74	100000	80000	20000	3,94	3,94
5	100000	50000	4,24	4,94	4,3	100000	80000	25000	4,22	4,94
6	100000	50000	4,48	5,94	4,88	100000	80000	30000	4,64	5,88
7	100000	50000	4,82	6,8	5	100000	80000	35000	4,86	6,74
8	100000	50000	5,24	7,78	5,68	100000	80000	40000	4,8	7,52
9	100000	50000	5,9	8,7	6,22	100000	80000	45000	6,16	8,44
10	100000	50000	5,92	9,6	6,18	100000	80000	50000	6,22	8,62

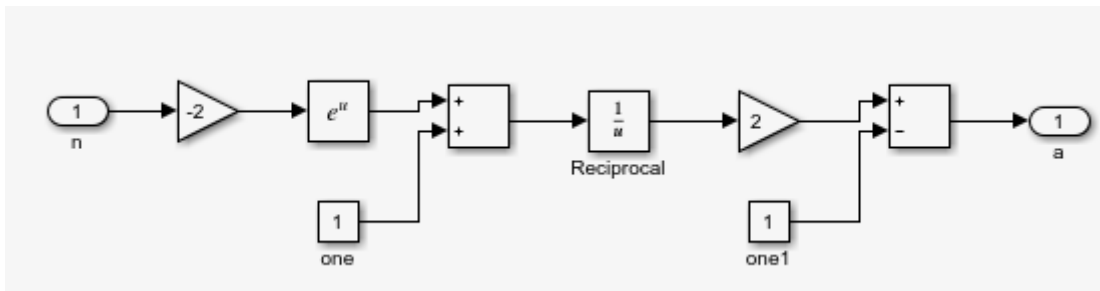
Target	Data training dengan variasi percepatan 100000 step/s ² , kecepatan 100000 step/s dan posisi dalam step yang divariasi untuk aktuator				
	input			output	
				Aktuator 1	Aktuator 2
	step/s ²	step/s	step	cm	
-10	100000	100000	-50000	-6,02	-5,86
-9	100000	100000	-45000	-3,3	-3,3
-8	100000	100000	-40000	-5,04	-5,12
-7	100000	100000	-35000	-4,64	-4,78
-6	100000	100000	-30000	-4,5	-4,78
-5	100000	100000	-25000	-4,26	-4,38
-4	100000	100000	-20000	-3,96	-3,46
-3	100000	100000	-15000	-2,94	-2,46
-2	100000	100000	-10000	-1,96	-1,84
-1	100000	100000	-5000	-0,98	-0,82
1	100000	100000	5000	0,98	0,86
2	100000	100000	10000	2	1,8
3	100000	100000	15000	2,96	2,5
4	100000	100000	20000	3,94	3,42
5	100000	100000	25000	4,44	4,16
6	100000	100000	30000	4,7	4,64
7	100000	100000	35000	4,96	5,16
8	100000	100000	40000	5,64	5,64
9	100000	100000	45000	6,04	5,96
10	100000	100000	50000	6,06	6,26

LAMPIRAN B

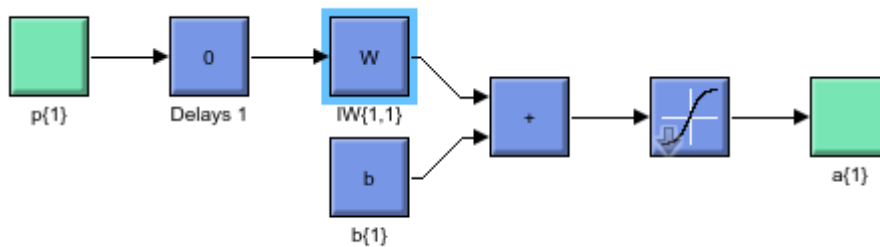
Hasil pemodelan EST menggunakan JST



Gambar kerangka layer input pemodelan EST menggunakan JST



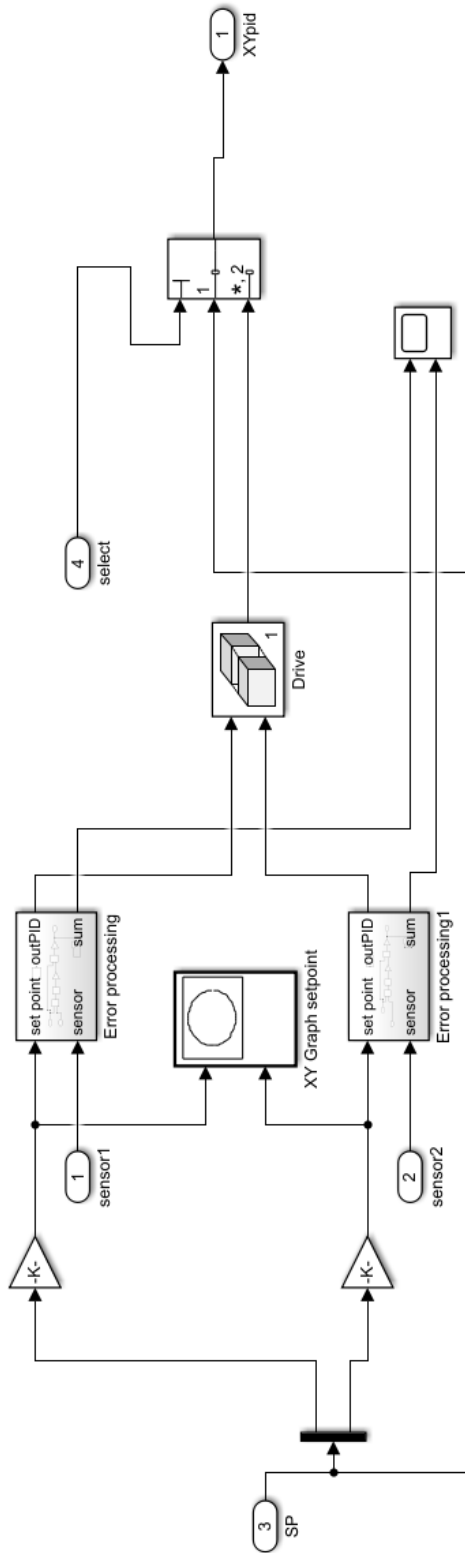
Gambar fungsi aktivasi sigmoid



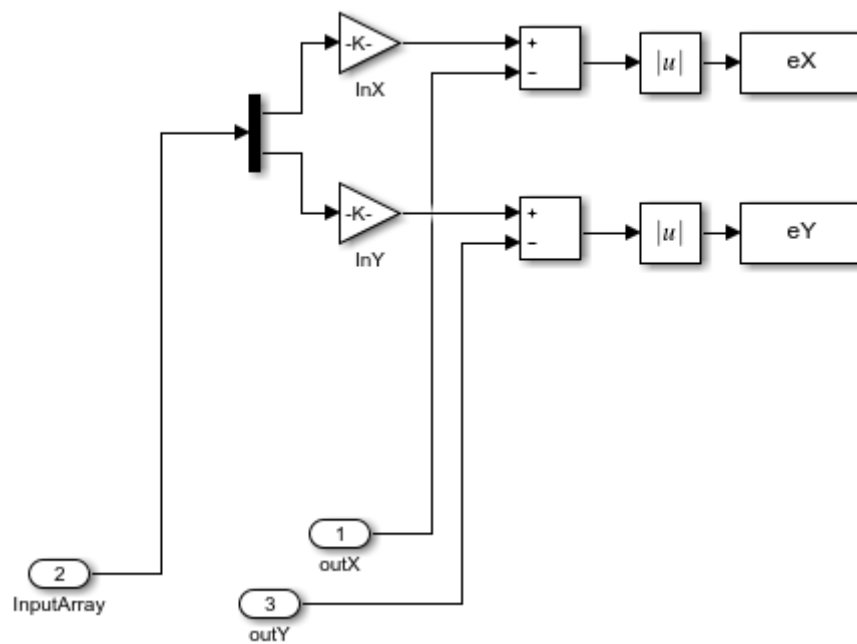
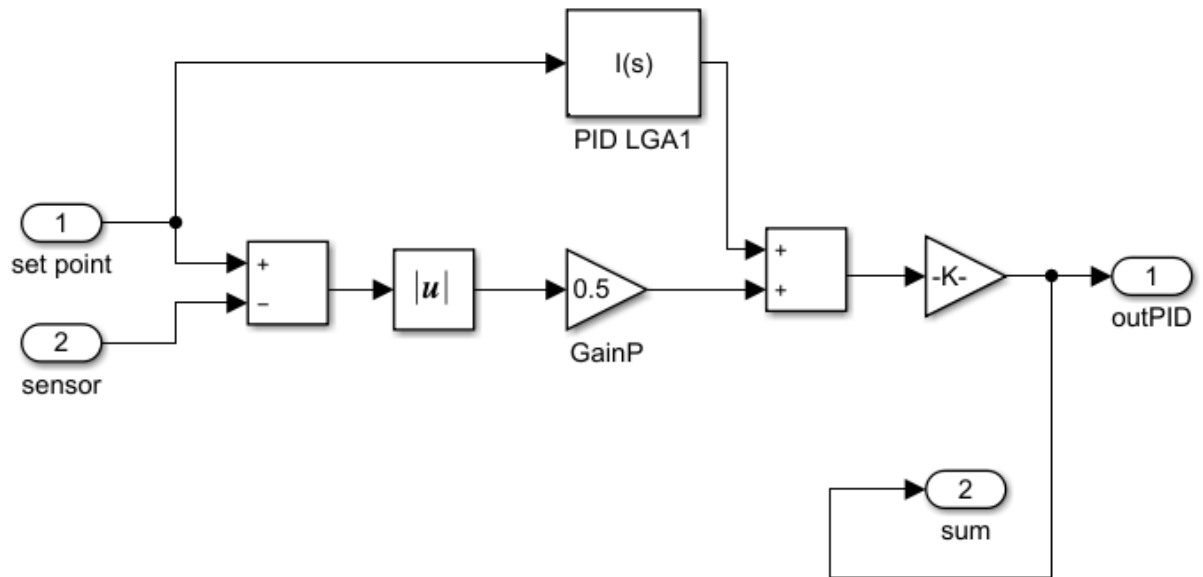
Gambar kerangka layer output pemodelan EST menggunakan JST

LAMPIRAN C

Hasil perancangan sistem kontrol model EST



Gambar perancangan sistem kontrol secara keseluruhan



Gambar hasil rancangan pengendali Proporsional

Sintaks program simulasi algoritma Bresenham:

```
function [x, y]=bresenham(x1, y1, x2, y2)
```

```
x1=round(x1); x2=round(x2);
y1=round(y1); y2=round(y2);
```



```

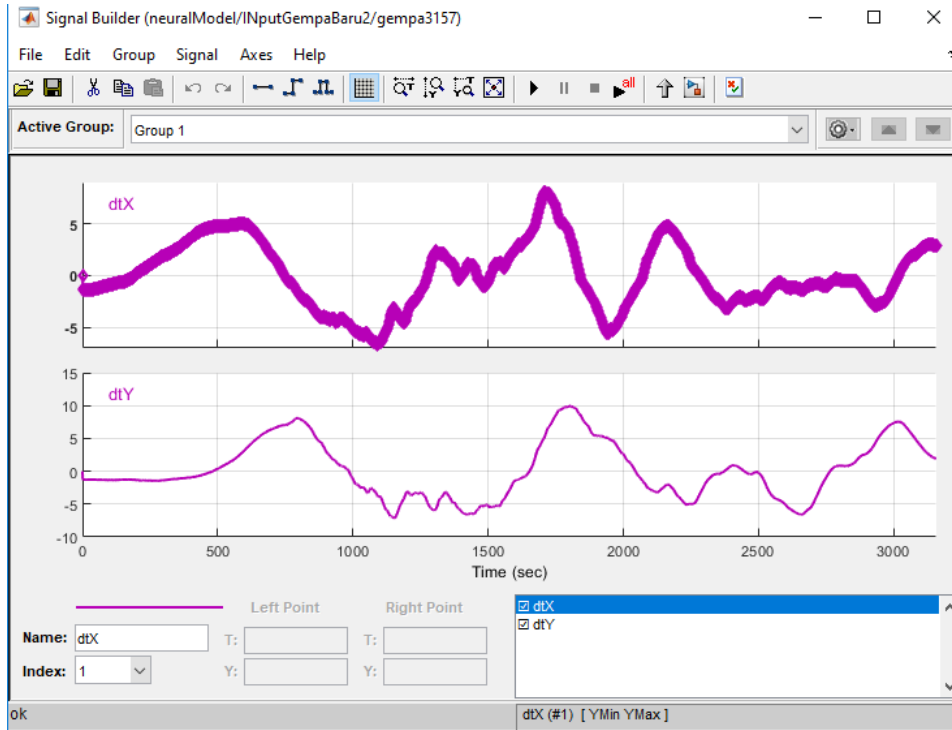
dx=abs(x2-x1);
dy=abs(y2-y1);

if steep t=dx;dx=dy;dy=t; end
%start program utama bresenham
if dy==0
    q=zeros(dx+1,1);
else
    q=[0;diff(mod([floor(dx/2)]));
end
%terakhir disini
if steep
    if x1<=x2 x=x1+cumsum(q);else x=x1-cumsum(q); end
else
    if x1<=x2 x=[x1:x2]'; else x=[x1:-1:x2]'; end
    if y1<=y2 y=y1+cumsum(q);else y=y1-cumsum(q); end
end

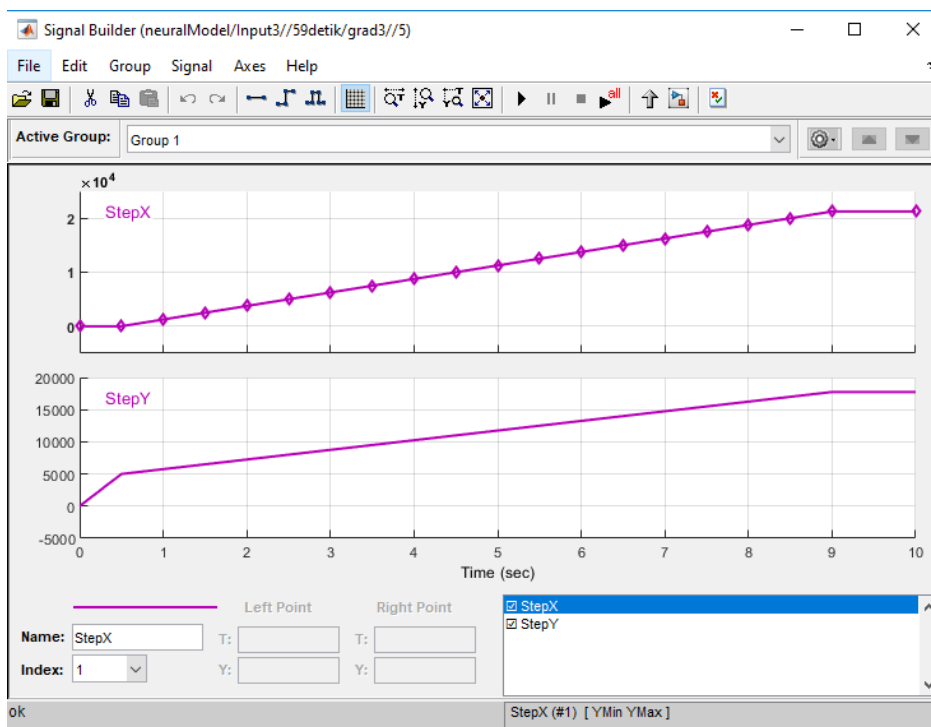
```

LAMPIRAN D

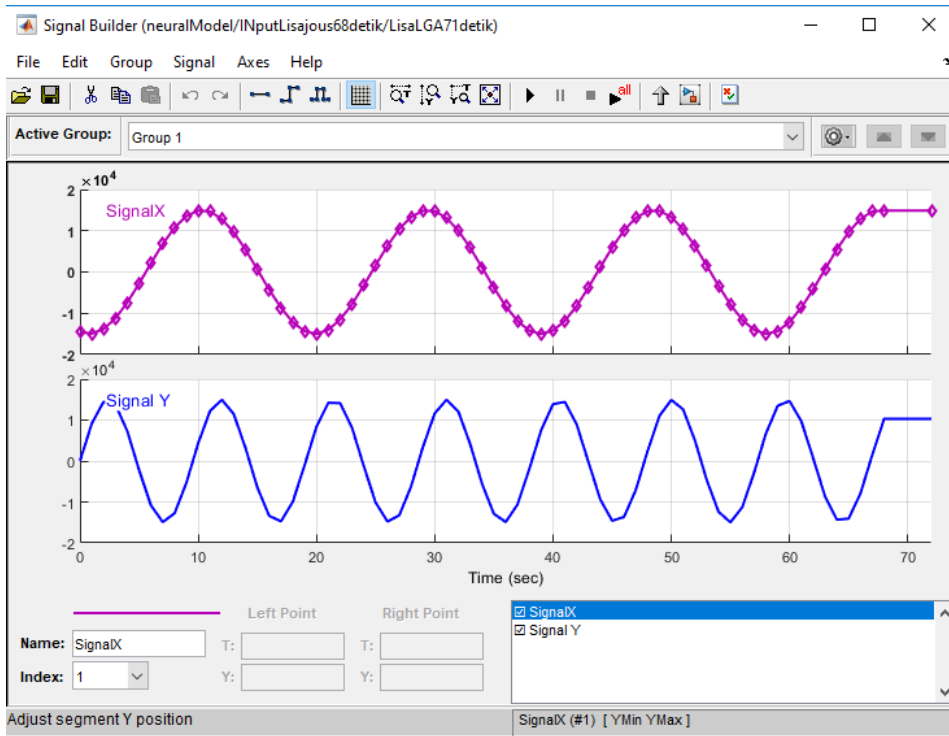
Input gerakan pengujian



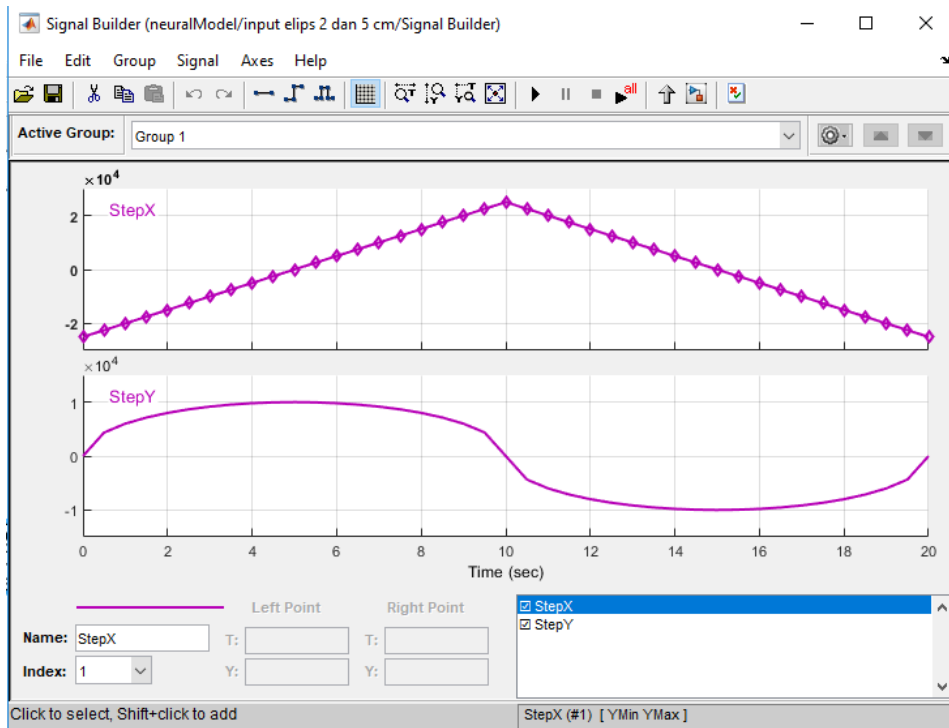
Gambar sinyal input gerakan gempa bumi Pulau Sikuai, 12 September 2007



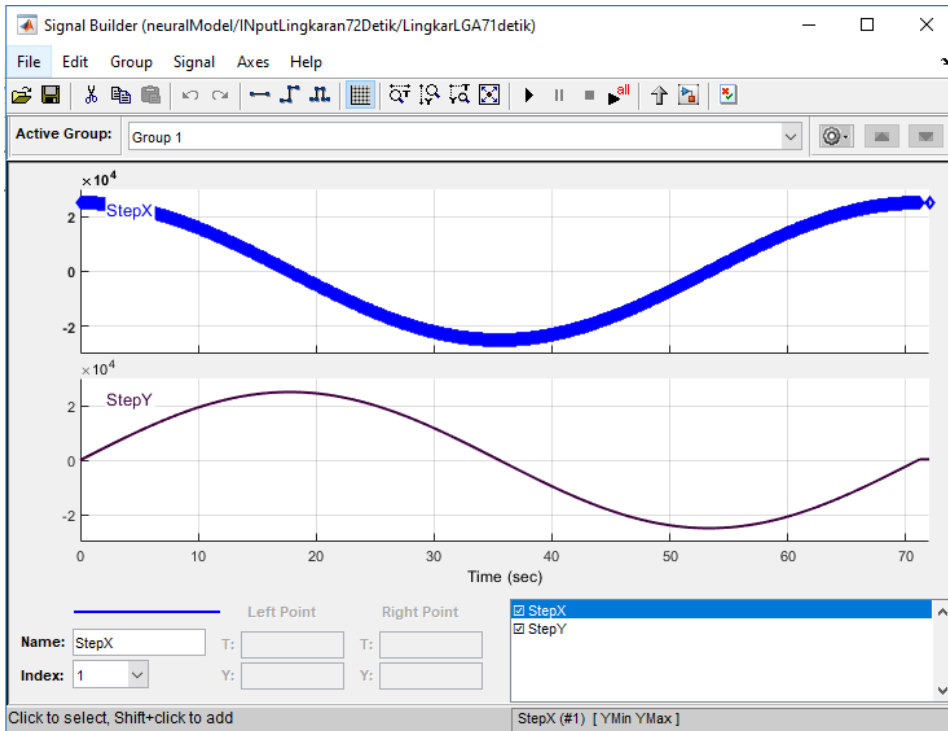
Gambar sinyal input gradien 3/5



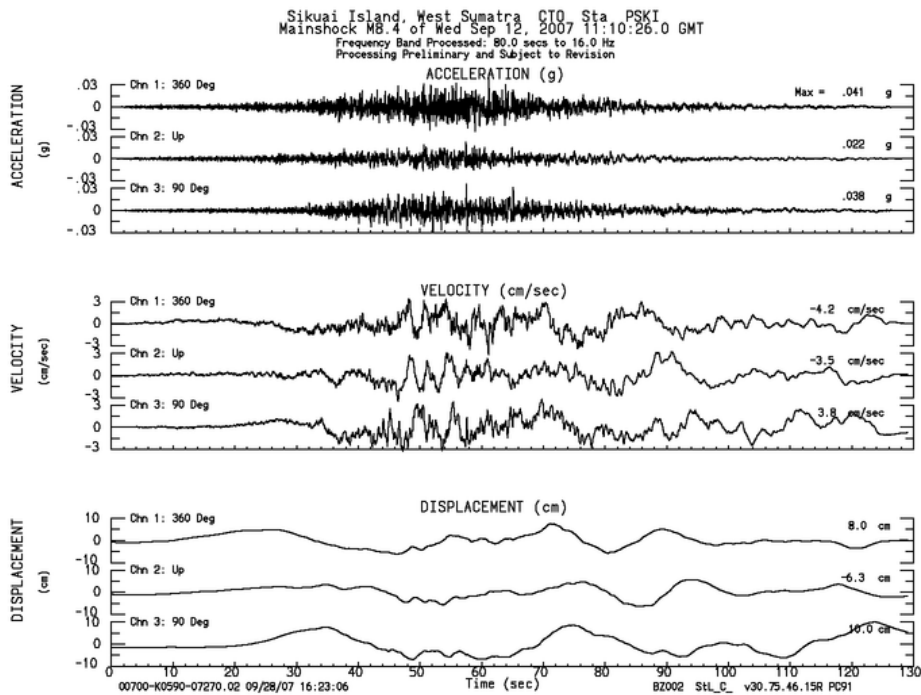
Gambar sinyal input lissajous



Gambar sinyal input elips



Gambar sinyal input lingkaran



Gambar data akselerasi, kecepatan dan displacement gempa bumi yang terjadi di pulau Sikuai, 12 September 2007.

Sumber: https://strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/iqr_dist_DM2.pl?IQRID=Sumatra_12Sep2007&SFlag=0&Flag=2

LAMPIRAN E

Listing program di hardware

```
int LED = 13;

Stepper motor_1(4, 5); //STEP pin = 4, DIR pin = 5
Stepper motor_2(2,3); //STEP pin = 2, DIR pin = 3

void setup()
{
  pinMode(LED, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);

  // setup the motors
  motor_1
    .setMaxSpeed(15000) // steps/s
    .setAcceleration(201105); // steps/s^2
  motor_2
    .setMaxSpeed(21000) // steps/s
    .setAcceleration(186390); // steps/s^2
}
//----- lingkaran -----
float lingkaran1[713] = {-
1.73651509111369,0.21795878629564,2.17241562381605,4.1267026231580
5,6.08066699928895,8.0341559924309,9.98701687994253,11.93909698829
88,13.890243705031,15.8403044906117,17.789126890435,19.73655854669
78,21.6824472103399,23.6266407529147,25.5689871784962,27.509334635
597,29.4475314289666,31.3834260315198,33.3168670961386,35.24770346
75394,37.1757841940562,39.100958539464,41.0230759947553,42.9419862
899122,44.8575394056388,46.7695855851271,48.6779753457122,50.58255
94905873,52.4831891204958,54.3797156453074,56.2719907956962,58.159
8666346836,60.0431955692547,61.9218303618327,63.7956241418578,65.6
644304172332,67.5281030857586,69.3864964465974,71.2394652116527,73
.0868645168921,74.9285499337238,76.7643774802636,78.5942036325796,
80.4178853359153,82.2352800159279,84.0462455897505,85.850640477139
7,87.6483236115782,89.4391544512218,91.222992989984,92.99969976840
66,94.7691358845732,96.5311630050128,98.2856433754823,100.03243983
1713,101.771415810184,103.502435358776,105.22536314739,106.9400644
7852,108.64640529783,110.344252204599,112.033472462132,113.7139340
08178,115.385505465241,117.048056150834,118.701456087718,120.34557
6014053,121.980287393493,123.605462425268,125.22097405414,126.8266
95980344,128.422502669488,130.008269362337,131.583872084564,133.14
9187656476,134.704093702618,136.248468661339,137.782191794311,139.
305143195943,140.817203802799,142.318255402846,143.808180644763,14
5.286863047055,146.754187007191,148.210037810659,149.654301639861,
151.086865583133,152.507617643427,153.916446747193,155.313242753,1
56.697896460133,158.070299617189,159.430344930486,160.777926072475
,162.112937690043,163.435275412769,164.74483586106,166.04151665424
1,167.325216418571,168.595834795144,169.853272447763,171.097431070
679,172.328213396304,173.545523202796,174.749265321574,175.9393456
44798,177.115671132664,178.278149820748,179.426690827133,180.56120
4359565,181.681601722428,182.787795323713,183.879698681852,184.957
22643248,186.0202943351,187.068819279688,188.102719293176,189.1219
13545863,190.126322357735,191.115867204706,192.090470724725,193.05
0056723871,193.994550182255,194.923877259944,195.837965302684,196.
736742847605,197.620139628803,198.488086582833,199.34051585411,200
```

.177360800213,200.998555997085,201.804037244176,202.593741569424,203.367607234208,204.125573738162,204.867581823908,205.593573481683,206.303491953891,206.997281739512,207.674888598471,208.336259555857,208.981342906073,209.610088216883,210.222446333344,210.818369381653,211.397810772898,211.960725206688,212.5070686747,213.036798464122,213.549873160986,214.046252653416,214.525898134748,214.988772106582,215.4348383817,215.864062086897,216.276409665721,216.671848881077,217.050348817754,217.411879884851,217.756413818081,218.083923681981,218.39438387202,218.687770116604,218.964059478964,219.223230358963,219.465262494771,219.690136964456,219.897836187465,220.088343925992,220.261645286256,220.417726719655,220.556576023836,220.678182343639,220.782536171954,220.86962935046,220.939455070263,220.992007872429,221.027283648411,221.045279640368,221.045994441385,221.029427995579,220.995581598105,220.944457895054,220.876060883272,220.790395909927,220.687469672326,220.56729021716,220.429866939987,220.275210584479,220.103333241581,219.914248348562,219.707970687969,219.484516386468,219.243902913588,218.98614908035,218.711275037795,218.419302275418,218.110253619478,217.784153231219,217.44102660498,217.080900566198,216.703803269318,216.309764195587,215.898814150748,215.470985262637,215.026310978667,214.564826063215,214.086566594898,213.591569963767,213.079874868366,212.551521312722,212.006550603205,211.445005345309,210.866929440312,210.272368081854,209.661367752392,209.033976219576,208.390242532512,207.730217017923,207.053951276215,206.361498177454,205.652911857214,204.928247712363,204.187562396723,203.430913816637,202.658361126449,201.869964723877,201.06578624529,200.245888560898,199.41033576982,198.559193195086,197.692527378524,196.81040607556,195.912898249928,195.000074068266,194.072004894628,193.128763284929,192.170422981239,191.197058906057,190.208747156399,189.205564997919,188.187590858801,187.154904323677,186.107586127368,185.045718148613,183.969383403613,182.878666039604,181.773651328231,180.654425658895,179.521076532003,178.373692552135,177.212363421106,176.037179930932,174.848233956784,173.645618449764,172.429427429654,171.199755977539,169.956700228444,168.700357363721,167.430825603527,166.148204199115,164.852593425083,163.544094571516,162.222809936095,160.888842816079,159.54229750024,158.183279260713,156.811894344741,155.428249966393,154.032454298187,152.624616462614,151.204846523615,149.773255477965,148.32995524662,146.875058665963,145.40867947894,143.930932326231,142.441932737249,140.941797121101,139.430642757525,137.908587787682,136.375751204938,134.832252845568,133.27821337937,131.713754300246,130.138997916692,128.554067342237,126.959086485836,125.354180042155,123.739473481855,122.115093041735,120.481165714918,118.837819240896,117.18518209552,115.523383481021,113.852553315821,112.17282224464,110.484321527332,108.787183230437,107.08154001506,105.367525227375,103.645272868074,101.914917581849,100.176594646833,98.4304399641333,96.6765900470964,94.9151820106599,93.1463535607072,91.370242983201,89.5869891334296,87.79673142514,85.9996098196316,84.19576481482,82.3853374342689,80.568469216123,78.7453022020673,76.9159789262703,75.0806424041184,73.23943612117,71.3925040218674,69.5399904982587,67.682040378786,65.8187989168982,63.9504117797369,62.0770250367023,60.1987851480917,58.3158389535929,56.4283336608423,54.5364168338965,52.6402363817251,50.7399405465949,48.8356778925263,46.9275972936666,45.0158479226484,43.1005792389078,41.181940977036,39.2600831350683,37.3351559627081,35.4073099496454,33.4766958137625,31.543464489343,29.6077671152743,27.6697550232566,25.729579725943,23.7873929051093,21.8433463997717,19.8975921943711,17.9502824068222,16.0015692766829,14.0516051531777,12.1005424834002,10.148533800264,8.19573171068987,6.24228888358266,4.28835803798211,2.33409193104671,0.379643346175726,-1.5748349189962,-3.5291900644952,-

5.48326929996983,-7.43691985666374,-9.38998899928629,-
11.3423240380544,-13.2937723405594,-15.2441813436926,-
17.1933985656287,-19.1412716177074,-21.087648216333,-
23.032376194933,-24.9753035158101,-26.9162782820313,-
28.8551487493351,-30.7917633379366,-32.7259706444675,-
34.6576194537156,-36.5865587504923,-38.5126377314664,-
40.435705816908,-42.355612662468,-44.2722081709435,-
46.185342504039,-48.0948660940121,-50.0006296554166,-
51.9024841967912,-53.8002810322432,-55.6938717931189,-
57.5831084396159,-59.4678432723049,-61.3479289437128,-
63.2232184698478,-65.0935652416629,-66.9588230365371,-
68.8188460297279,-70.6734888056817,-72.5226063695482,-
74.366054158374,-76.2036880524902,-78.0353643867602,-
79.8609399617853,-81.6802720551423,-83.4932184324971,-
85.2996373587848,-87.0993876091961,-88.8923284803313,-
90.6783198011144,-92.4572219437759,-94.2288958347963,-
95.9932029657466,-97.7500054041084,-99.4991658041072,-
101.240547417405,-102.974014103795,-104.699430341865,-
106.416661239586,-108.125572544846,-109.826030655953,-
111.517902632095,-113.201056203692,-114.875359782796,-
116.540682473322,-118.196894081313,-119.84386512512,-
121.4814668455,-123.109571215711,-124.7280509515,-
126.336779521072,-127.935631154956,-129.524480855878,-
131.10320440849,-132.671678389099,-134.229780175334,-
135.777387955703,-137.314380739132,-138.840638364425,-
140.356041509651,-141.860471701475,-143.353811324429,-
144.835943630082,-146.306752746204,-147.766123685789,-
149.213942356084,-150.650095567453,-152.074471042284,-
153.486957423735,-154.887444284443,-156.275822135169,-
157.651982433326,-159.015817591531,-160.367220985914,-
161.706086964576,-163.032310855746,-164.34578897601,-
165.646418638418,-166.934098160511,-168.208726872241,-
169.470205123886,-170.718434293814,-171.953316796196,-
173.174756088636,-174.382656679731,-175.576924136507,-
176.75746509184,-177.924187251718,-179.076999402498,-
180.215811417982,-181.340534266526,-182.451080017941,-
183.547361850424,-184.629294057288,-185.696792053704,-
186.749772383311,-187.788152724719,-188.811851897955,-
189.820789870819,-190.814887765124,-191.794067862886,-
192.758253612363,-193.707369634092,-194.641341726721,-
195.560096872872,-196.463563244786,-197.351670210006,-
198.224348336844,-199.081529399822,-199.923146385043,-
200.749133495363,-201.559426155611,-202.353961017565,-
203.13267596496,-203.895510118315,-204.6424038397,-
205.373298737399,-206.088137670482,-206.78686475325,-
207.469425359632,-208.135766127438,-208.785834962534,-
209.419581042918,-210.036954822694,-210.637908035938,-
211.222393700479,-211.790366121571,-212.341780895455,-
212.876594912854,-213.394766362318,-213.8962547335,-
214.381020820339,-214.849026724102,-215.30023585636,-
215.734612941849,-216.15212402122,-216.5527364537,-
216.936418919645,-217.303141422983,-217.652875293559,-
217.98559318939,-218.301269098781,-218.599878342373,-
218.881397575071,-219.145804787866,-219.393079309556,-
219.623201808364,-219.836154293445,-220.031920116302,-
220.210483972072,-220.371831900742,-220.515951288221,-
220.642830867348,-220.752460718734,-220.844832271598,-
220.919938304379,-220.977772945333,-221.01833167298,-
221.041611316463,-221.047610055794,-221.036327421994,-

221.007764297133,-220.961922914259,-220.898806857225,-
220.818421060408,-220.720771808321,-220.605866735127,-
220.473714824038,-220.324326406612,-220.157713161948,-
219.973888115774,-219.772865639423,-219.554661448717,-
219.319292602729,-219.066777502461,-218.797135889395,-
218.510388843955,-218.206558783857,-217.885669462359,-
217.547745966401,-217.192814714641,-216.820903455403,-
216.432041264488,-216.026258542915,-215.603587014543,-
215.164059723586,-214.707711032025,-214.23457661694,-
213.744693467704,-213.238099883089,-212.714835468293,-
212.17494113182,-211.618459082293,-211.045432825154,-
210.455907159265,-209.84992817339,-209.227543242622,-
208.588801024647,-207.933751455957,-207.262445747949,-
206.574936382909,-205.871277109918,-205.151522940649,-
204.41573014506,-203.663956247012,-202.896260019726,-
202.112701481266,-201.31334188978,-200.498243738728,-
199.667470752007,-198.821087878969,-197.959161289329,-
197.081758368007,-196.188947709852,-195.280799114276,-
194.357383579811,-193.418773298541,-192.465041650472,-
191.496263197783,-190.512513679018,-189.513870003128,-
188.500410243507,-187.472213631829,-186.42936055192,-
185.371932533422,-184.300012245432,-183.213683490067,-
182.113031195859,-180.998141411177,-179.869101297443,-
178.725999122351,-177.568924252981,-176.397967148749,-
175.213219354411,-174.014773492852,-172.802723257873,-
171.577163406853,-170.338189753344,-169.085899159591,-
167.820389528928,-166.54175979817,-165.250109929839,-
163.945540904373,-162.628154712209,-161.298054345829,-
159.955343791717,-158.60012802219,-157.232512987222,-
155.852605606171,-154.460513759375,-153.05634627978,-
151.640212944363,-150.212224465613,-148.772492482829,-
147.321129553424,-145.858249144094,-144.38396562199,-
142.898394245723,-141.4016511564,-139.893853368536,-
138.375118760857,-136.845566067168,-135.305314867001,-
133.754485576294,-132.19319943797,-130.621578512477,-
129.039745668222,-127.447824571962,-125.845939679177,-
124.234216224275,-122.612780210871,-120.981758401864,-
119.341278309621,-117.69146818588,-116.032457011857,-
114.364374488076,-112.687351024251,-111.001517729092,-
109.307006400071,-107.603949513086,-105.892480212147,-
104.172732298903,-102.444840222255,-100.708939067797,-
98.9651645472659,-97.2136529879281,-95.454541321953,-
93.6879670756389,-91.9140683587648,-90.1329838536585,-
88.3448528044901,-86.5498150062922,-84.7480107940792,-
82.9395810318492,-81.1246671015833,-79.3034108921966,-
77.4759547884314,-75.6424416597511,-73.8030148491198,-
71.9578181618745,-70.106995854414,-68.2506926229216,-
66.3890535921309,-64.5222243038734,-62.6503507057823,-
60.7735791398445,-58.8920563309584,-57.0059293754894,-
55.115345729726,-53.2204531984098,-51.3213999231302,-
49.4183343707555,-47.5114053218422,-45.6007618589974,-
43.6865533552045,-41.7689294621705,-39.8480400986155,-
37.9240354385402,-35.9970658995117,-34.0672821308799,-
32.1348350020162,-30.1998755905115,-28.2625551703568,-
26.3230252001413,-24.3814373111782,-22.4379432956703,-
20.4926950948575,-18.5458447871097,-16.5975445760341,-
14.6479467786121,-12.6972038132626,-10.7454681879244,-
8.79289248816349,-6.83962936519674,-4.88583152399951,-
2.93165171134387,-0.977242703869706,25000};


```

float lingkaran2[713] =
{221.040991014802,221.047704551382,221.037136707443,221.0092883091
74,220.964161533746,220.901759909143,220.82208831389,220.725152976
663,220.610961475812,220.479522738762,220.330847041316,220.1649460
06852,219.981832605418,219.781521152714,219.564027308968,219.32936
8077725,219.077561804507,218.80862817538,218.522588215419,218.2194
64287061,217.899280088358,217.562060651122,217.207832338974,216.83
6622845277,216.44846119097,216.043377722306,215.621404108475,215.1
82573339126,214.726919721794,214.254478879212,213.765287746531,213
.259384568424,212.736808896108,212.19760158425,211.641804787754,21
1.069461958496,210.480617841897,209.875318473454,209.253611175112,
208.615544551591,207.961168486563,207.290534138767,206.60369393800
6,205.900701581042,205.181612027416,204.446481495124,203.695367456
237,202.928328632423,202.145424990322,201.346717736882,200.5322693
14579,199.702143396506,198.85640488143,197.995119888687,197.118355
753042,196.226181019396,195.318665437459,194.395879956259,193.4578
96718635,192.50478905556,191.536631480447,190.553499683278,189.555
470524727,188.542622030136,187.515033383401,186.472784920812,185.4
15958124737,184.344635617279,183.258901153811,182.158839616421,181
.044537007268,179.916080441888,178.77355814236,177.617059430393,17
6.446674720404,175.26249551237,174.064614384737,172.85312498715,17
1.628122033149,170.389701292739,169.137959584943,167.872994770183,
166.594905742686,165.303792422696,163.999755748697,162.68289766951
8,161.353321136361,160.011130094732,158.656429476356,157.289325190
926,155.909924117856,154.518334097931,153.114663924829,151.6990233
36678,150.271523007428,148.832274538217,147.381390448659,145.91898
4168016,144.445170026371,142.960063245635,141.463779930604,139.956
437059827,138.438152476494,136.909044879205,135.369233812697,133.8
18839658506,132.257983625535,130.686787740611,129.105374838891,127
.513868554335,125.912393309954,124.301074308165,122.680037520935,1
21.049409679981,119.409318266837,117.759891502883,116.101258339349
,114.433548447203,112.756892207035,111.071420698852,109.3772656918
3,107.674559634015,105.963435641977,104.244027490393,102.516469601
582,100.78089703502,99.0374454767516,97.2862512288011,95.527451198
5117,93.7611828878544,91.9875843826412,90.2067943417715,88.4189519
863794,86.6241970889205,84.8226699623046,83.0145114488587,81.19986
29093578,79.3788662119732,77.5516637211622,75.7183982865499,73.879
2132317467,72.0342523431827,70.1836598588161,68.3275804568875,66.4
661592445991,64.5995417467748,62.7278738944806,60.8513020136343,58
.9699728134983,57.0840333753149,55.1936311407189,53.2989139002602,
51.4000297818129,49.497127239054,47.5903550397707,45.6798622543065
,43.7657982438795,41.8483126488827,39.9275553772422,38.00367659261
61,36.0768267027415,34.1471563476116,32.2148163877318,30.279957892
3114,28.3427321274539,26.4032905443382,24.4617847673908,22.5183665
823752,20.5731879246123,18.6264008670259,16.6781576082903,14.72861
04609193,12.7779118393955,10.8262142481726,8.87367026983702,6.9204
3255314275,4.96665380107515,3.01248675890383,1.05808420227913,-
0.896401074744062,-2.85081627166801,-4.80500859342283,-
6.7588252624264,-8.71211353040417,-10.6647206904418,-
12.6164940888339,-14.5672811370823,-16.5169293237959,-
18.4652862266194,-20.412199524133,-22.3575170078111,-
24.3010865938595,-26.2427563351375,-28.1823744330504,-
30.1197892493692,-32.0548493181559,-33.9874033575252,-
35.9173002815405,-37.8443892119831,-39.7685194901715,-
41.6895406887124,-43.6073026233025,-45.5216553644241,-
47.432449249096,-49.3395348925769,-51.2427632000145,-
53.1419853781335,-55.0370529468636,-56.9278177509113,-
58.8141319713977,-60.6958481373731,-62.572819137371,-
64.4448982308932,-66.3119390598804,-68.1737956601901,-

```

70.0303224729396,-71.8813743559549,-73.7268065950811,-
75.5664749154967,-77.4002354930126,-79.2279449652997,-
81.0494604430933,-82.8646395213727,-84.6733402905047,-
86.4754213473134,-88.2707418061618,-90.059161309935,-
91.8405400410411,-93.6147387323363,-95.3816186779986,-
97.141041744384,-98.8928703808306,-100.636967630388,-
102.373197140569,-104.101423173935,-105.821510618807,-
107.533324999753,-109.236732488105,-110.931599912481,-
112.617794769121,-114.295185232302,-115.963640164609,-
117.623029127226,-119.273222390068,-120.914090942013,-
122.545506500894,-124.167341523615,-125.77946921605,-
127.381763542995,-128.974099238018,-130.55635181324,-
132.128397569086,-133.690113603931,-135.241377823731,-
136.78206895155,-138.312066537055,-139.83125096593,-
141.339503469222,-142.836706132639,-144.322741905729,-
145.797494611106,-147.260848953458,-148.712690528588,-
150.152905832372,-151.581382269625,-152.998008162889,-
154.402672761174,-155.795266248631,-157.175679753109,-
158.543805354686,-159.899536094093,-161.242765981111,-
162.573390002792,-163.891304131739,-165.196405334191,-
166.488591578098,-167.767761841091,-169.033816118386,-
170.286655430607,-171.526181831494,-172.752298415608,-
173.964909325865,-175.163919761051,-176.349235983233,-
177.52076532508,-178.678416197108,-179.822098094855,-
180.951721605927,-182.067198417028,-183.16844132083,-
184.255364222796,-185.327882147943,-186.385911247433,-
187.429368805177,-188.458173244266,-189.472244133369,-
190.471502193024,-191.45586930181,-192.425268502488,-
193.37962400799,-194.318861207361,-195.242906671585,-
196.151688159327,-197.04513462258,-197.92317621222,-
198.785744283474,-199.632771401266,-200.464191345516,-
201.279939116292,-202.079950938913,-202.864164268927,-
203.632517796985,-204.38495145366,-205.121406414126,-
205.841825102769,-206.546151197674,-207.234329635032,-
207.906306613466,-208.5620295982,-209.201447325192,-
209.824509805146,-210.431168327395,-211.021375463728,-
211.595085072101,-212.152252300228,-212.692833589103,-
213.216786676392,-213.724070599754,-214.214645700024,-
214.688473624328,-215.145517329075,-215.585741082858,-
216.009110469236,-216.41559238944,-216.805155064953,-
217.177768039989,-217.533402183883,-217.872029693368,-
218.193624094741,-218.49816024594,-218.785614338505,-
219.055963899446,-219.309187793,-219.545266222239,-
219.764180730723,-219.965914203831,-220.150450870158,-
220.317776302737,-220.467877420161,-220.600742487614,-
220.716361117782,-220.814724271667,-220.895824259296,-
220.95965474032,-221.006210724508,-221.035488572141,-
221.047485994293,-221.042202053014,-221.019637161398,-
220.979793083557,-220.922672934475,-220.848281179775,-
220.756623635358,-220.64770746696,-220.521541189581,-
220.378134666829,-220.217499110141,-220.039647077911,-
219.844592474508,-219.632350549187,-219.402937894896,-
219.156372446985,-218.892673481795,-218.611861615158,-
218.313958800781,-217.998988328533,-217.666974822622,-
217.317944239669,-216.951923866683,-216.56894231892,-
216.169029537657,-215.752216787839,-215.318536655648,-
214.868023045936,-214.400711179604,-213.916637590812,-
213.415840124156,-212.898357931686,-212.36423146986,-
211.813502496375,-211.246214066896,-210.662410531705,-

210.062137532218,-209.445441997435,-208.812372140243,-
208.162977453681,-207.497308707041,-206.815417941927,-
206.117358468149,-205.403184859599,-204.672952949943,-
203.926719828296,-203.16454383472,-202.386484555693,-
201.592602819435,-200.782960691158,-199.957621468204,-
199.116649675125,-198.260111058587,-197.388072582296,-
196.500602421704,-195.597769958706,-194.679645776225,-
193.746301652667,-192.797810556338,-191.834246639708,-
190.855685233651,-189.862202841525,-188.853877133195,-
187.830786938988,-186.793012243495,-185.740634179332,-
184.673735020802,-183.592398177459,-182.496708187591,-
181.386750711599,-180.26261252531,-179.124381513189,-
177.972146661476,-176.805998051217,-175.626026851231,-
174.432325310978,-173.224986753345,-172.004105567356,-
170.769777200794,-169.522098152724,-168.261165965972,-
166.987079219474,-165.699937520592,-164.399841497318,-
163.08689279039,-161.761194045372,-160.422848904625,-
159.071961999194,-157.70863894061,-156.3329863127,-
154.945111663157,-153.545123495245,-152.133131259179,-
150.709245343714,-149.273577067423,-147.826238670001,-
146.367343303526,-144.897005023588,-143.415338780367,-
141.922460409674,-140.418486623865,-138.90353500273,-
137.377723984304,-135.841172855609,-134.294001743303,-
132.736331604334,-131.168284216426,-129.589982168633,-
128.001548851666,-126.403108448329,-124.794785923743,-
123.176707015646,-121.548998224487,-119.91178680359,-
118.265200749196,-116.609368790443,-114.944420379295,-
113.270485680456,-111.58769556116,-109.896181580956,-
108.196075981432,-106.487511675823,-104.770622238721,-
103.045541895524,-101.312405511999,-99.5713485837587,-
97.8225072255991,-96.0660181609164,-94.3020187110233,-
92.5306467843329,-90.7520408656965,-88.9663400054706,-
87.1736838087199,-85.3742124242417,-83.5680665336768,-
81.7553873404468,-79.9363165587456,-78.1109964024836,-
76.2795695741079,-74.4421792535104,-72.5989690867937,-
70.7500831750476,-68.8956660630902,-67.0358627281785,-
65.1708185686439,-63.3006793925524,-61.4255914062996,-
59.5457012031657,-57.6611557518518,-55.7721023850536,-
53.8786887878377,-51.9810629861859,-50.0793733353639,-
48.1737685083754,-46.2643974842722,-44.3514095365827,-
42.4349542215859,-40.5151813666271,-38.5922410584535,-
36.6662836313844,-34.7374596556729,-32.805919925635,-
30.871815447932,-28.9352974297108,-26.9965172668271,-
25.0556265319829,-23.1127769628802,-21.1681204503693,-
19.2218090265523,-17.273994852927,-15.3248302084576,-
13.3744674777263,-11.4230591389169,-9.47075775202757,-
7.51771594681122,-5.56408641095186,-3.61002187807026,-
1.65567511578774,0.298801086220919,2.25325392812738,4.207530611951
37,6.16147835349693,8.11494439425951,10.0677760134058,12.019820539
6955,13.9709253634392,15.9209379483837,17.8697058436956,19.8170766
958428,21.7628982604874,23.7070184144613,25.6492851675648,27.58954
66745242,29.5276512468372,31.4634473646038,33.3967836884221,35.327
5090711832,37.2554725699083,39.1805234575331,41.1025112347015,43.0
21285641531,44.9366966693706,46.8485945724788,48.7568298798178,50.
6612534066517,52.5617162662747,54.4580698815844,56.3501659967878,5
8.2378566888983,60.1209943793692,61.9994318455974,63.8730222324193
,65.7416190636577,67.6050762534796,69.4632481179069,71.31598938614
48,73.1631552119507,75.0046011849918,76.8401833420903,78.669758178
5047,80.4931826591419,82.3103142297514,84.1210108280284,85.9251308

```

94786,87.7225333849565,89.5130777786762,91.2966240922178,93.073032
888984,94.8421652903598,96.603882986612,98.3580482476791,100.10452
3933944,101.843173506964,103.573861040113,105.296451229271,107.010
809403328,108.716801534767,110.41429425012,112.103154840395,113.78
3251271459,115.454452194354,117.116626955568,118.769645607237,120.
41337891735,122.047698379774,123.672476224379,125.287585426981,126
.892899719282,128.488293598748,130.073642338422,131.648821996656,1
33.213709426833,134.768182286956,136.312119049257,137.845399009657
,139.36790229721,140.879509883522,142.380103591971,143.86956610703
4,145.347780983393,146.81463265507,148.270006444462,149.7137885712
91,151.145866161522,152.566127256159,153.974460820013,155.37075675
0392,156.754905885708,158.126800013961,159.4863318813,160.83339520
0298,162.167884658338,163.489695925811,164.798725664281,166.094871
534573,167.378032204755,168.64810735808,169.904997700804,171.14860
4969982,172.378831941121,173.595582435797,174.798761329163,175.988
274557396,177.164029125044,178.325933112312,179.473895682209,180.6
07827087701,181.727638678693,182.833242908959,183.924553343026,185
.001484662849,186.063952674598,187.111874315124,188.145167658538,1
89.163751922553,190.167547474868,191.156475839311,192.130459702055
,193.089422917599,194.033290514768,194.961988702536,195.8754448758
32,196.77358762117,197.656346722286,198.523653165585,199.375439145
559,200.211638070068,201.032184565578,201.83701448224,202.62606489
8917,203.399274128114,204.156581720781,204.897928471055,205.623256
420873,206.332508864531,207.025630353075,207.702566698679,208.3632
64978852,209.00767354059,209.635742004404,210.247421268274,210.842
663511466,211.421422198293,211.983652081734,212.529309206991,213.0
58350914904,213.570735845303,214.066423940235,214.545376447089,215
.007555921642,215.452926230971,215.881452556283,216.293101395646,2
16.687840566586,217.065639208631,217.426467785703,217.77029808843,
218.097103236366,218.40685768007,218.699537203125,218.975118924013
,219.233581297915,219.474904118399,219.699068518983,219.9060569746
27,220.095853303093,220.268442666216,220.423811571061,220.56194787
0974,220.682840766545,220.786480806434,220.872859888125,220.941971
258551,220.993809514626,221.028370603665,221.045651823702,0};
// -----

//----- ellipse -----
float elip1[41]={-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-
2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-2500,-
2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2
500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,0};
float
elip2[41]={4358.89894354067,1641.10105645933,1141.42842854285,858.
571571457151,660.254037844386,504.897352067293,374.240624257776,25
8.566956963256,151.915399933489,50.1256289337998,-
50.1256289337998,-151.915399933489,-258.566956963256,-
374.240624257776,-504.897352067293,-660.254037844386,-
858.571571457151,-1141.42842854285,-1641.10105645933,-
4358.89894354067,-4358.89894354067,-1641.10105645933,-
1141.42842854285,-858.571571457151,-660.254037844386,-
504.897352067293,-374.240624257776,-258.566956963256,-
151.915399933489,-
50.1256289337998,50.1256289337998,151.915399933489,258.56695696325
6,374.240624257776,504.897352067293,660.254037844386,858.571571457
151,1141.42842854285,1641.10105645933,4358.89894354067,0};

//-----

```

```

//-----lissajous-----
float
lisa1[69]={227.557875891942,1800.8273008066,3180.94061597247,4219.
86734736769,4806.17257524146,4876.96940483693,4424.66419284265,349
7.77103893348,2195.708180317,658.134426200682,-950.030597494799,-
2456.29566983331,-3699.09932320894,-4545.13887015103,-
4903.66840320512,-4736.23216939363,-4060.78932090154,-
2949.78762266119,-
1522.39273029099,68.2934766661765,1651.65454907652,3057.8597291891
,4136.07993862563,4770.66565285164,4893.55142894113,4491.556581304
94,3607.79893744009,2337.0700347546,815.667813244227,-
793.222654131248,-2317.03233559903,-3592.31793488198,-
4482.29276229254,-4891.49842747882,-4776.04367316174,-
4148.31213612105,-3075.63408262208,-1673.06458748184,-
91.042766773422,1500.74426942393,2931.56199741508,4047.94140549934
,4730.14002677129,4904.98547446084,4553.72388668018,3714.031459125
33,2475.97330943381,972.343124001945,-635.580246617144,-
2175.33150111228,-3481.75745562967,-4414.73131681364,-
4874.18263290965,-4810.83081560339,-4231.47095877821,-
3198.24499910878,-1821.97639355398,-
250.283233920403,1348.25521830605,2802.18028489591,3955.5444690497
7,4684.6383296486,4911.25951286762,4611.10070943979,3816.356848190
86,2612.27187917467,1127.99553724811,-477.269213556558,-
14488.887394336};
float
lisa2[69]={8806.44634395181,9443.76643684928,6137.99318687797,269.
39924077869,-5711.67804128513,-9307.93568472241,-
9017.81393920377,-
4962.44849047826,1164.90780405898,6805.8755122249,9605.15896187959
,8393.96220609418,3678.00104126993,-2573.65051974072,-
7750.71554802398,-9691.59350155776,-7585.90189268979,-
2312.83850977988,3925.91353051361,8525.46328744225,9565.3424660710
8,6611.36617903988,896.919888629571,-5192.02092847109,-
9113.11660708899,-9229.17648071399,-
5491.7416089302,538.681968549909,6344.18752223974,9500.77923925896
,8690.47283137186,4251.59875433368,-1962.46225229112,-
7357.12859319795,-9679.9437852586,-7961.05356727605,-
2918.15300519353,3343.17558189316,8208.61477790307,9646.6784133919
3,7056.9260617953,1520.66731770597,-4650.52169676444,-
8879.95989962782,-9401.71314444936,-5997.93172475518,-
89.8100280099115,5855.8104067587,9356.43104336446,8950.4238311337,
4807.31057541911,-1343.01817570147,-6932.59120892362,-
9627.57187505002,-8302.71418300038,-
3511.19123173922,2746.37335280377,7857.23375349296,9687.4321096536
2,7472.79842591745,2138.01750824907,-4089.45835905498,-
8609.44642058168,-9534.6980923646,-6478.88936566401,-
717.924206117779,5342.7987012251,9172.72162722934,0};
//-----

//-----gradien3/5-----
float
grad1[17]={1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,1250,
1250,1250,1250,1250,1250};
float
grad2[17]={750,750,750,750,750,750,750,750,750,750.000000000002,749.999999
999998,750,750,750,750,750,750};
//-----

```

```

//-----gempa-----
float gempal[121]={-19096.5,-5644.5,-7459.5,-6893.5,-
4635,1437,4679.5,6807,8456,3658,4763.5,3529.85,118.8,815.15,7193.4
,9905.3,12172.5,5309.5,798.999999999999,-3122.5,-5232,-2636.5,-
6602,-11019.05,-2028,-148.85,-3768.3,-
1880.3,3842.3,2431.95,2712.8,7449.95,11019,1773.5,-3324.5,-
6677.5,-4577,4638.5,-187.999999999999,-5141,-6908.3,-8838.2,-
7020,-7417,-4546.5,-1762.5,-451.000000000001,-8360,-7629.5,-
5829,465.499999999999,3098.5,10317.5,10881,12189,13023.85,4611.15,
2351,10244.5,8586,499.999999999998,-912.999999999999,2727,3248,-
75.5000000000017,-6689.5,-6642.5,841.000000000001,10168.5,-
6613.5,-6520.5,1216,1140.5,11772.5,3305,-9557,-7787,-
904.999999999998,-3098.5,-4186.5,-10179.35,-3082.2,-4786.95,-
6648,-7508,-8917,-5807.5,-
1760.999999999999,4140.999999999999,1131.5,2083,2581,3542,4806.5,530
9.5,5372.5,3785.5,3239.65,2787.5,2456.65,1954.9,1217.05,785.750000
000001,474.5,488.999999999999,699.500000000001,534,-
60.000000000001,-188.5,-300.5,-281.5,65.5000000000006,264,-
71.499999999999,-148,-135.5,43.499999999997,-23.499999999996,-
30.999999999999,-6347,0};
float gempa2[121]={811.499999999999,2912.35,4855.2,2643.95,-
1379.6,-1721.4,-6532.9,-501.1,314.25,3594.25,2644.65,-3702.7,-
3285.45,-1600.5,-2531,-168.5,-
1070,72.499999999998,5540.5,6259.4,4770.1,2285.5,3533,1583,3175,5
690,-101.499999999999,-3339.5,-2723.5,3970,6340,3441,2204,1075,-
1592.5,-1664.5,-1282.5,-167.5,-679.000000000003,-
768.499999999999,-2642.5,-1595,-1211,-62.0000000000021,1191.5,-
1505,-16.5000000000015,-890.500000000001,248.000000000002,-1430,-
1916.5,-2627,-1789,-1305.5,-1706,-2550,-3052.55,-1083.25,-
2296.02,-3210.13,-3244.55,-2388,-1891,-2655.5,-2926.5,-2489,-
2072.5,-2000,-1616,-733.999999999999,-
636.000000000001,510.5,303.999999999998,234.500000000004,387,80.99
9999999997,-
237.499999999997,246.499999999998,364,457.999999999998,559.5000000
00002,617.5,1134.5,1147.5,1577.5,1440.5,1392.5,1361,1108.5,1098.5,
985.500000000001,789.5,747.5,1287.5,1083,1300,1223.55,1128.4,1014.
95,1400.65,1561.5,933.7,876.25,517.6,249.8,487.5,570.55,292.05,427
.5,654.5,419.999999999999,391.5,218.5,192,35.5000000000005,-80.5,-
46.0000000000005,-260.5,-171.5,-6604.5,0};

//-----
-----

float gemp1[3156]={0,-6618.5,-
566,0.499999999999945,4.000000000000067,8.500000000000017,5.49999999
999999,4.000000000000067,10,12.4999999999997,11.9999999999998,6.000
00000000045,1.49999999999983,6.99999999999923,13.50000000000007,21.
499999999999,14.4999999999995,6.500000000000039,9.50000000000006,1
2.4999999999997,17.00000000000003,20.9999999999999,20,20.999999999
999,20.5,19.50000000000001,12.9999999999997,11.4999999999998,14.500
0000000006,27.50000000000003,32.4999999999998,30.9999999999999,18.0
00000000002,10.9999999999999,3.49999999999961,7.000000000000034,14
.4999999999995,15.0000000000006,19.5000000000001,18.4999999999991,
22.5000000000009,22.4999999999997,29.5000000000001,30.5,33.4999999
999996,36.5000000000004,38.5000000000002,35.4999999999994,34.50000
00000006,25.9999999999994,20.9999999999999,23.0000000000008,24.999
9999999995,34.4999999999995,31.5000000000001,30.5,23.9999999999996,
19.5000000000001,25.4999999999994,32.5000000000009,35.99999999999
4,34.5000000000006,40,42.999999999997,43.4999999999997,45.5000000

```

000005, 43.9999999999996, 54.4999999999995, 61.5000000000001, 61.999999
9999998, 55.4999999999994, 54.0000000000007, 48.4999999999991, 44.0000
0000000007, 35.9999999999994, 33.5000000000008, 34.9999999999995, 39.00
00000000001, 41.4999999999999, 46.5000000000004, 47.4999999999992, 45.
0000000000006, 41.4999999999999, 36.0000000000005, 30.9999999999999, 2
9.6499999999994, 26.9000000000003, 24.1000000000002, 22.9499999999999
, 22.2499999999998, 30.8999999999998, 23.2500000000002, 18.79999999999
99, 27.1500000000002, 28.1500000000001, 31.35, 27.9999999999997, 22.349
9999999999, 25, 28.9500000000004, 30.5, 15.25, 8.05, 10.6999999999996, 17
.8, 27.5000000000003, 28.55, 32.0500000000001, 37.3499999999999, 43.150
0000000001, 43.9, 42.8999999999996, 52.5000000000003, 56.6999999999995
, 51.8500000000005, 43.4499999999999, 37.3999999999997, 33.15000000000
01, 40.1000000000001, 38.6500000000001, 36.8999999999997, 37.300000000
0001, 29.4, 39.1000000000002, 43.1499999999996, 46.8500000000005, 39.74
99999999995, 34.4000000000005, 34.0499999999999, 41.7999999999996, 42.
6500000000002, 23.5000000000002, 11.3999999999997, 14.7000000000003, 3
3.1999999999999, 35.5499999999997, 27.4000000000002, 9.44999999999974
, -
2.04999999999955, 1.04999999999966, 11.2000000000001, 17.8, 20.2999999
999998, 21.4500000000001, 24.2999999999999, 24.0500000000005, 29.04999
9999999, 29.65, 37.3499999999999, 36.4500000000001, 36.4999999999999,
34.2999999999999, 37.8000000000001, 37.0500000000001, 49.0499999999999
9, 46.4000000000003, 43.7999999999999, 47.7, 52.4999999999998, 55, 46.49
99999999999, 39.4500000000003, 50.3499999999996, 64.5500000000002, 74.
3000000000002, 68.3999999999998, 58.4999999999999, 62.3500000000002, 6
5.9999999999999, 74.1, 73.3999999999998, 73.5000000000002, 69.84999999
99999, 74.1, 81.1000000000001, 77.1, 83.1000000000001, 79.05, 73.8, 71.54
99999999999, 57.75, 51.0999999999999, 56.65, 67.7, 76.1500000000001, 84.
5499999999999, 95.5, 105.1, 106.05, 104.335, 108.08, 117.43, 121.45, 118.0
035, 112.6815, 107.98, 112.045, 114.865, 121.78, 116.2, 111.55, 109.9, 111.
45, 110.15, 120.6, 113.95, 102.55, 93.4000000000001, 98.8999999999998, 10
6.55, 119.15, 107.65, 94.8499999999999, 81.1500000000001, 85.0500000000
001, 93.3999999999999, 99.2000000000001, 87.6499999999999, 78.19999999
99999, 63.9499999999998, 63.6000000000003, 73.3999999999996, 84.850000
000002, 78.0000000000003, 65.4499999999997, 61.0500000000003, 70.6499
99999999, 84.3499999999997, 88.4000000000001, 86.1000000000001, 76.6,
75.7000000000002, 85.6999999999997, 92.1500000000003, 86.99999999999
9, 71.2499999999999, 66.7000000000001, 75.7999999999998, 78.0000000000
003, 90.0000000000001, 88.7499999999997, 85.9000000000004, 89.94999999
99997, 102.2, 100.65, 90.8000000000003, 85.4999999999995, 91.1500000000
004, 97.6499999999997, 101, 99.5000000000001, 97.0000000000004, 93.4999
99999997, 88.0000000000003, 91.9999999999999, 108.5, 113.5, 104.5, 89.5
000000000001, 81.9999999999999, 74.0000000000007, 87.4999999999992, 97
.5000000000004, 104, 92.9999999999997, 84.5000000000007, 81.499999999
999, 79.5000000000001, 71.9999999999998, 73.9999999999996, 77.50000000
00003, 79.0000000000002, 74.9999999999995, 72.4999999999998, 82.500000
000009, 91, 103, 99.5000000000001, 93.9999999999996, 83.4999999999997,
89.5000000000001, 91.9999999999999, 97.0000000000004, 114, 122.5, 111, 1
02.000000000001, 87.4999999999992, 84.0000000000007, 91, 98.499999999
991, 88.0000000000003, 60.9999999999999, 49.5000000000001, 50.99999999
99999, 54.5000000000007, 57.9999999999992, 63.0000000000008, 62.999999
999997, 59.0000000000002, 58.9999999999991, 60.5, 55.0000000000006, 59
.0000000000002, 61.4999999999999, 51.9999999999998, 51.9999999999998,
56.5000000000004, 60.9999999999999, 64.5000000000007, 57.4999999999999
2, 52.4999999999998, 57.4999999999992, 51.0000000000001, 51.4999999999
99, 56.4999999999993, 52.4999999999998, 49.0000000000013, 52.999999999
9986, 59.0000000000002, 67.5000000000003, 57.5000000000014, 55.9999999
999983, 57.0000000000004, 72.4999999999998, 81.9999999999999, 79.00000
0000002, 69.5000000000001, 63.9999999999996, 68.0000000000014, 79.000

0000000002,100.499999999999,105,95.5000000000017,105.499999999998,
109.5,106.5,96.0000000000005,74.0000000000007,62.4999999999987,67.
5000000000003,79.0000000000002,81,70.5,78.4999999999991,79.0000000
000002,89.0000000000013,101,94.9999999999984,76.0000000000005,59.0
000000000002,60.9999999999999,64.5000000000007,63.4999999999986,79
.0000000000002,76.0000000000005,78.0000000000003,79.0000000000002,
86.5000000000005,91.4999999999999,98.4999999999991,86.500000000000
5,81.9999999999999,70.5,74.4999999999996,85.9999999999994,102.5000
0000001,132.5,148.999999999999,144.500000000001,125.999999999999,
110.000000000001,100.499999999999,96.5000000000016,105,105.5000000
00001,97.4999999999993,103.500000000001,112.999999999999,125,116.0
0000000001,94.4999999999996,79.0000000000002,81,94.4999999999996,
94.5000000000018,94.4999999999996,88.9999999999991,88.500000000000
2,88.5000000000002,93.4999999999997,110.000000000001,110.5,111.999
999999999,114.5,124,123.500000000001,119,113.000000000001,118.9999
9999998,124.500000000001,123,111.000000000001,114.5,120,122,117,1
14.5,113.5,121.500000000001,123.499999999999,106.5,93.000000000000
9,91.4999999999999,105.999999999999,107.999999999999,108.000000000
001,94.9999999999984,103.000000000002,106.5,110.999999999999,94.49
99999999974,72.000000000001,63.500000000003,70.9999999999988,75.49
99999999972,80.5000000000034,59.0000000000002,49.5000000000001,54.
999999999962,80.5000000000034,93.9999999999985,93.9999999999985,8
5.0000000000017,95.4999999999995,111.5000000000002,130.999999999997
,137,103.500000000003,58.4999999999969,39.5000000000012,39.0000000
000024,42.9999999999975,47.9999999999992,43.0000000000019,46.49999
99999982,49.5000000000001,60.5000000000011,64.5000000000007,57.499
999999992,52.5000000000002,47.4999999999959,29.5000000000023,17.49
9999999992,19.0000000000001,29.5000000000023,33.4999999999974,32.
0000000000009,24.9999999999995,17.0000000000003,36.0000000000005,5
6.50000000000015,57.9999999999981,55.0000000000006,57.4999999999992
,55.0000000000006,39.5000000000012,26.5000000000004,38.49999999999
91,55.4999999999994,57.4999999999992,41.5000000000001,34.4999999999
995,36.4999999999993,22.9999999999997,18.5000000000013,38.00000000
00003,57.0000000000004,51.4999999999999,25.4999999999983,3.0000000
000189,15.9999999999982,48.5000000000024,57.4999999999992,51.4999
999999999,20.4999999999966,7.50000000000028,16.5000000000015,9.500
00000000006,9.5000000000006,11.0000000000001,35.4999999999972,41.0
000000000021,30.0000000000011,25.4999999999983,22.9999999999997,31
.5000000000021,38.9999999999979,41.5000000000001,28.999999999999,5.
00000000000167,-
4.500000000000284,10.0000000000033,20.4999999999966,25.000000000003
9,19.0000000000001,6.49999999999817,3.99999999999956,-
3.00000000000189,-14.9999999999961,0.999999999997669,-
13.0000000000008,-38.9999999999979,-57.0000000000004,-
56.5000000000015,-22.5000000000009,-12.4999999999975,-
26.0000000000016,-33.4999999999974,-
17.5000000000036,8.00000000000356,45.9999999999994,34.499999999999
5,7.00000000000145,1.99999999999978,1.99999999999978,18.499999999
969,25.5000000000027,-7.50000000000028,-47.0000000000015,-
47.9999999999992,-
22.5000000000009,12.0000000000031,48.4999999999998,55.9999999999983
,24.5000000000006,15.0000000000006,31.5000000000021,13.99999999999
85,15.4999999999994,17.0000000000003,28.5000000000002,38.00000000
0003,41.9999999999998,29.4999999999979,28.5000000000002,25.0000000
000039,20.9999999999999,56.9999999999959,64.5000000000007,59.50000
0000034,24.4999999999962,20.0000000000022,17.0000000000003,-
7.00000000000145,6.50000000000261,18.4999999999969,22.500000000000
9,10.5000000000022,-4.50000000000284,-
6.99999999999701,9.5000000000006,34.9999999999984,40,24.500000000

0006,3.99999999999956,5.99999999999934,13.4999999999996,12.5000000
00002,5.50000000000005,5.499999999999606,14.50000000000017,32.4999999
999998,44.4999999999984,33.50000000000019,32.4999999999998,32.00000
00000009,40.4999999999989,36.4999999999993,21.50000000000032,42.499
999999986,48.499999999998,43.00000000000019,51.0000000000001,59.999
999999978,55.499999999994,40.4999999999989,28.00000000000014,11.0
00000000001,-0.499999999998835,-5.99999999999934,-
32.0000000000009,-50.5000000000022,-46.999999999997,-
37.00000000000026,-47.5000000000003,-64.999999999995,-
64.999999999995,-53.999999999985,-37.0000000000026,-
64.50000000000007,-75.499999999972,-54.5000000000018,-
59.499999999999,-66.5000000000005,-76.0000000000005,-
73.499999999975,-68.5000000000002,-54.0000000000029,-
55.999999999983,-25.499999999983,-8.00000000000356,-
29.999999999967,-65.5000000000028,-74.499999999996,-
76.499999999993,-93.0000000000009,-129.000000000001,-
118.999999999998,-93.499999999997,-87.0000000000015,-
80.999999999977,-127.99999999999,-150.000000000001,-127.5,-
108.000000000001,-103,-122,-137.49999999999,-137.49999999999,-
141,-138.000000000003,-126.499999999998,-136.500000000002,-
143.499999999999,-145.99999999997,-145.000000000004,-
132.499999999998,-144.500000000001,-183.49999999999,-
217.499999999999,-189.500000000002,-156.000000000001,-
129.999999999999,-129.999999999999,-164.499999999999,-
174.000000000003,-163.499999999999,-156.499999999999,-
176.000000000001,-172.000000000001,-149.5,-131.999999999999,-164,-
190.5,-170.000000000001,-153.5,-173.5,-190.5,-192.999999999999,-
173.000000000001,-180.499999999999,-187.5,-188.5,-
172.000000000001,-168.5,-173.999999999999,-175.5,-
183.500000000001,-175.5,-170.000000000001,-184.499999999999,-
212.000000000001,-244,-248.999999999999,-224.500000000001,-224,-
226,-238,-242,-246,-229.5,-237.000000000001,-236.000000000001,-
246.999999999999,-242,-212.999999999999,-154.5,-133.000000000001,-
141,-185,-225,-228.5,-192.000000000001,-172.999999999999,-140,-
145.500000000001,-167.999999999999,-187.5,-174.000000000001,-
179.999999999999,-143.500000000001,-150.5,-149.999999999999,-
144.000000000001,-110.5,-119.5,-101.5,-128.499999999999,-
133.500000000001,-142,-158.499999999999,-197.000000000001,-202.5,-
197.000000000001,-173,-150,-126.999999999999,-146.000000000001,-
156.999999999999,-159.5,-174.5,-187.5,-216.500000000001,-245.5,-
246.999999999999,-245.000000000001,-248.999999999999,-
237.250000000001,-218.45,-253.75,-283.95,-317.8,-274.25,-217.45,-
220.3,-234.85,-245.7,-262.2,-267,-259.75,-243.4,-222.85,-254.7,-
287.7,-304.33,-270.875,-209.955,-175.775,-205.895,-259.12,-
286.95,-239.85,-248.2,-234.15,-162.25,-102.85,-85.8,-
97.000000000001,-110.65,-113,-143.85,-121.7,-90.649999999999,-
65.149999999999,-79.699999999998,-109.55,-108.9,-
49.7000000000003,-18.149999999996,-13.3500000000003,-
36.999999999998,-79.750000000001,-106.9,-155.9,-141.15,-118.05,-
117.4,-180.55,-229.8,-257.3,-242,-180,-171,-175.999999999999,-
202.5,-256.000000000001,-301.5,-274.5,-231,-233,-270.5,-
257.999999999999,-194.000000000001,-136.499999999999,-158.5,-174,-
214,-241,-200.5,-177.5,-182,-187.999999999999,-155.500000000001,-
154.5,-156.500000000001,-142,-106.999999999999,-49.0000000000013,-
50.9999999999988,-96.0000000000005,-128.5,-119.499999999999,-
91.0000000000011,-82.4999999999987,-126.000000000002,-
186.999999999999,-215.5,-170.5,-143.500000000001,-150.5,-
178.999999999998,-153.000000000001,-122.500000000001,-
68.9999999999991,-36.0000000000005,-22.999999999997,-

40.4999999999989,-81.5000000000001,-66.9999999999993,-
69.5000000000001,-61.5000000000001,-97.4999999999993,-131.5,-
133.5,-139.5000000000001,-97.0000000000004,-68.9999999999991,-
67.9999999999992,-154.0000000000001,-163.5000000000001,-
138.4999999999999,-122.5000000000001,-172.9999999999999,-240,-209.5,-
169.9999999999999,-192.0000000000001,-212.5,-218.4999999999999,-
203.5000000000001,-139,-65.4999999999983,-72.5000000000002,-
197.4999999999999,-317.4999999999999,-322,-306.9999999999999,-
254.0000000000001,-194.0000000000001,-109.4999999999998,-
47.5000000000003,-63.9999999999996,-150.5,-230.5,-
214.5000000000002,-149.4999999999998,-126.0000000000002,-121,-
110.9999999999999,-144.5000000000001,-113.5,-61.9999999999998,-
93.0000000000009,-165.4999999999998,-224.0000000000002,-
204.4999999999999,-98.50000000000014,-65.4999999999983,-123,-
145.0000000000002,-105.9999999999997,-
36.50000000000038,8.500000000000239,-
1.500000000000095,7.000000000000145,15.9999999999982,51.0000000000001
,43.00000000000019,53.9999999999985,47.9999999999992,80.0000000000000
01,54.00000000000007,14.9999999999983,-16.9999999999981,-
21.9999999999998,-29.5000000000001,-51.4999999999999,-
55.00000000000028,-139,-186.4999999999996,-164,-130.0000000000003,-
50.4999999999978,37.4999999999997,79.00000000000024,42.9999999999975
, -60.4999999999967,-97.4999999999993,-69.50000000000023,-
50.4999999999978,-47.00000000000015,-83.0000000000002,-
99.4999999999999,-126.4999999999998,-71.00000000000033,-
33.9999999999963,6.49999999999817,36.9999999999981,48.0000000000003
6,61.9999999999976,30.00000000000011,26.9999999999992,78.499999999
991,108.5,90.50000000000022,41.9999999999998,-16.00000000000027,-
42.4999999999986,-52.4999999999975,-102.0000000000002,-
173.0000000000001,-239.4999999999997,-224.0000000000002,-
219.999999999998,-220.0000000000002,-196.0000000000001,-
152.0000000000001,-
41.9999999999998,89.00000000000013,186.5000000000001,139,29.49999999
99979,-10.9999999999966,52.9999999999964,68.00000000000014,-
14.4999999999973,-
57.0000000000004,66.9999999999993,200.4999999999999,274.00000000000
1,209.5,137.999999999998,98.00000000000025,87.5000000000004,68.4999
999999958,25.00000000000039,-1.500000000000095,12.4999999999975,-
2.99999999999745,-68.9999999999991,-111.5000000000002,-105,-
95.4999999999995,-106.0000000000002,-90.4999999999978,-
43.9999999999996,12.4999999999975,9.9999999999989,-
59.4999999999999,-139.999999999998,-150.0000000000001,-
150.9999999999999,-163.5000000000001,-142.5000000000001,-
124.4999999999998,-80.4999999999989,-41.9999999999998,-
45.5000000000005,-110.0000000000001,-144.0000000000002,-
155.4999999999997,-193.5000000000002,-148.9999999999999,-
89.00000000000013,-122,-164,-173.5,-91.9999999999987,-
47.00000000000015,-81.9999999999999,-73.4999999999975,-
83.0000000000002,-181.4999999999999,-227.5000000000003,-
244.4999999999999,-242.9999999999998,-285.5000000000001,-
310.0000000000001,-238,-154.0000000000001,-123.4999999999996,-
115.0000000000003,-131.0000000000001,-132.4999999999998,-173.5,-
225.5000000000003,-237.9999999999996,-179,-
25.50000000000027,87.9999999999992,87.5000000000004,27.0000000000003
7,-7.000000000000145,-38.4999999999991,-
9.500000000000006,6.49999999999817,-54.50000000000018,-
199.9999999999996,-218.0000000000003,-152.5,-106.0000000000002,-
122.4999999999999,-101,-51.4999999999999,-
7.99999999999912,63.4999999999986,68.9999999999991,23.5000000000003

, -10.5000000000022, -17.4999999999992, -7.00000000000145, -
40.4999999999989, -40.4999999999989, -51.9999999999987, -
32.4999999999998, -83.5000000000008, -127.5, -182.500000000001, -
173.5, -
119.5000000000001, 5.00000000000167, 122.499999999999, 174.000000000000
3, 183, 159.499999999997, 123.000000000002, 84.4999999999985, 92.500000
000002, 8.49999999999795, -70.0000000000012, -176.999999999996, -
145.0000000000004, -55.4999999999994, -24.9999999999995, -
135.0000000000001, -248.999999999997, -291.5, -274.000000000001, -
169.0000000000001, -122.999999999998, -58.5000000000013, -
78.9999999999998, -179, -268.000000000002, -272.000000000001, -192.5, -
154.9999999999998, -138.0000000000003, -145.999999999997, -
88.50000000000025, 9.50000000000006, 25.50000000000027, -
72.4999999999998, -123.000000000002, -144.500000000001, -
147.4999999999998, -142.000000000002, -66.5000000000005, -
49.5000000000001, -70.5, -138.499999999997, -156.000000000001, -
114.9999999999998, -116.500000000004, -141, -109.499999999998, -
35.5000000000016, -47.5000000000003, -109.999999999997, -
110.0000000000001, -
72.4999999999998, 53.9999999999985, 243.000000000002, 320.49999999999
9, 271.499999999998, 203.500000000001, 144.000000000002, 145.499999999
998, 68.5000000000002, -56.5000000000015, -78.999999999998, -
8.49999999999795, 44.9999999999973, 128.5000000000003, 118.49999999999
9, 112.0000000000001, 170.499999999998, 246, 291.999999999999, 300.50000
0000001, 314.5, 300.000000000003, 320.499999999999, 349.999999999997, 3
77.5000000000004, 362, 304.499999999996, 265.500000000003, 273.4999999
9998, 272.5, 257.000000000001, 190.000000000001, 92.4999999999976, 110.
5, 238, 347.5000000000003, 385.499999999999, 451.999999999999, 489.50000
0000001, 482.999999999998, 420.500000000001, 369.999999999999, 318.000
00000001, 401.000000000002, 545, 662.499999999997, 645.5000000000001, 5
89, 578.500000000002, 613.999999999999, 654.000000000001, 535.5, 444.49
9999999999, 396.000000000001, 364, 266.500000000001, 215.5, 184.4999999
99999, 162, 160, 112.000000000001, 15.4999999999994, -
153.999999999999, -239.500000000001, -199.499999999999, -
120.500000000001, -147.499999999998, -280.500000000001, -356.5, -
252.000000000001, -127.499999999998, -85.0000000000017, -
122.499999999999, -209.000000000001, -304.499999999999, -279, -229.5, -
293.5, -391.999999999999, -345.500000000001, -249.499999999998, -
163.000000000002, -175.999999999998, -247.500000000001, -
353.500000000002, -322.499999999999, -230.5, -127.000000000002, -
93.9999999999985, -115.500000000002, -107.999999999997, -
81.5000000000001, -97.9999999999981, -129.5, -104.500000000001, -
80.50000000000034, -94.4999999999974, -110.5, -
26.9999999999992, 116.999999999998, 233.500000000002, 232.99999999999
9, 148.999999999999, 106.999999999999, 183.500000000003, 308.5, 524.999
9999999998, 626.000000000002, 597.999999999999, 475.999999999999, 458.0
00000000001, 414.000000000001, 497.999999999998, 516.5, 492.0000000000
01, 487.500000000001, 451.999999999999, 391.5, 351.5, 398.000000000001,
400.499999999999, 393.5, 296.5, 163, 125.500000000001, 101, 78.499999999
9991, -23.999999999996, -2.9999999999967, 50.5, 162, 160, -
27.5000000000003, -209.999999999999, -197.000000000001, -
30.5, 183.500000000001, 291.999999999999, 281.499999999999, 283.000000
000002, 261.499999999999, 202, 222.500000000001, 223, 140.499999999999,
58.0000000000003, 81.999999999999, 154.000000000001, 264.49999999999
9, 262, 203.500000000001, 209.499999999999, 193.000000000001, 276.5, 446
, 527.000000000001, 493.5, 324.5, 203, 86.4999999999994, -20, -
33.4999999999996, 119, 209, 252.5, 252, 273, 246.999999999999, 181.5, 191,
259.5, 358.000000000001, 297.7, 209.3, 206.1, 309.35, 418.55, 423, 381.65,
297.85, 249, 350.55, 463.55, 546, 453.625, 370.35, 377.99, 433.635, 536.45,

506.65,398.35,326.25,380.75,554.2,620.2,632.85,668.1,625.5,580.000
000000001,584,508,429.000000000001,469.999999999999,434.5000000000
01,349.999999999999,281.5,144.000000000001,199.999999999999,291.5,
344.500000000001,298.000000000001,206.999999999999,167.9999999999
9,216.000000000001,229.5,151.999999999999,22.5000000000009,-
106.999999999999,-213.000000000001,-288.999999999999,-248.5,-
93.499999999997,60.000000000001,-31.499999999999,-140,-
159.500000000001,-45.500000000005,117,177,87.500000000004,-
22.500000000009,-148.999999999999,-208.5,-201,-165.500000000001,-
164,-158.499999999999,-
37.500000000003,184.000000000001,302,232.999999999999,58.00000000
00003,-78.000000000003,-105,-50.5,-60.500000000011,-
125.499999999998,-130.5,-82.999999999997,-94.000000000008,-
218.5,-294.5,-235,-197.000000000001,-234.5,-343,-414.5,-279,-100,-
31.999999999998,-87.500000000004,-118.499999999999,-
68.500000000002,-44.500000000007,-82.499999999998,-
187.999999999999,-214.500000000001,-205,-145.999999999999,-
87.000000000004,-60.999999999999,-102.5,-202.5,-209,-
105.000000000001,30,-20,-89.999999999999,-
38.000000000003,67.999999999992,82.5000000000009,-
28.500000000002,-145.000000000001,-258.499999999999,-451.7,-
555.8,-486.65,-364.8,-297.9,-382.1,-427,-513.3,-645.2,-643.585,-
563.71,-483.005,-391.95,-371.8,-305.6,-256.75,-158.05,-
4.95000000000023,125.5,257.5,252.2,187.95,176.3,212.05,292.2,338.2
45,333.37,367.57,407.515,314.75,121.4,-107.2,-
111.6,27.399999999999,84.700000000001,79.350000000001,165.45,21
0.4,175.25,177.4,190.15,240.45,292.5,345.6,358.55,380.75,458.9,519
.5,387.750000000001,240.499999999999,69.500000000001,-
51.999999999998,-70.5,-56.999999999993,-
68.000000000003,0.49999999999945,31.999999999998,21.9999999999
98,-48.500000000002,-81,-60.999999999999,-94.499999999996,-
121.9,-76.650000000003,-
49.099999999997,19.499999999995,90.850000000001,73.400000000000
1,0.100000000001,-3.4499999999984,-15.300000000003,-56.1,-
99.4,-168.55,-242.55,-288.55,-327.25,-331.85,-376.5,-517.9,-
526.95,-478.75,-521.5,-676.065,-817.15,-722.835,-444.2,-260.85,-
90.399999999999,23.799999999999,18.450000000001,-48.8,-106.5,-
75.349999999999,-31.4,-42.15,-111.7,-169.9,-251.6,-370.85,-465,-
534.05,-469.95,-345.65,-253.45,-
115.500000000001,40.5,156.000000000001,52.999999999997,-
99.000000000002,-135,-
40,103.5,144.500000000001,115.499999999999,56.249999999999,75.800
000000003,194.4,261.6,195.65,107.55,117.7,204.4,255.85,275.45,302
.75,273.65,322.9,369.8,379.3,355.85,409.8,455.52,400.33195,378.603
05,332.095,286.5,275.35,249.5,203,308.85,450.7,487.35,455.05,405.1
,399.8,434.1,371.95,266.000000000001,185.5,147.5,50,-
124.000000000001,-161.5,-
4.499999999995,166.499999999999,160.5,77.500000000003,-
25.000000000006,-78.499999999991,-141,-126.5,-68.000000000003,-
0.4999999999945,145.000000000001,212,184,155,150.5,128.5,69.0000
00000002,-43.499999999997,-109.5,-167.5,-216,-246.500000000001,-
294.5,-310,-319.5,-270.85,-151.55,-119.15,-151.6,-
122.55,2.5500000000005,166.05,270.35,290.7,258.3,200.750000000001
,216,308.000000000001,366,439.499999999999,430.5,337.000000000001,
204,127.499999999999,133.500000000001,187.499999999999,239,253,248
,276.999999999999,182,163,205.500000000001,206.999999999999,220.5,
168.5,147.499999999999,161.500000000001,149.999999999999,164.50000
0000001,209.999999999999,213.000000000001,125.999999999999,90.5,54
.000000000007,74.999999999984,142.000000000002,165.999999999999,

194.999999999999,233.500000000002,234.5,256.999999999998,273.00000
0000001,188.5,202.499999999999,238.500000000001,213.999999999999,1
45,103.500000000001,144.500000000001,203,187.999999999999,173.0000
00000001,120,64.999999999995,26.5000000000004,-73.0000000000008,-
165,-152.000000000001,-95.4999999999995,-
16.4999999999993,25.5000000000005,37.9999999999998,100,218,313.5,26
8.5,177.499999999999,169.000000000001,196.000000000001,185.4999999
99998,121,80.000000000001,82.999999999997,125.000000000002,105,8
0.000000000001,26.999999999992,25.999999999994,132.5,183,148.5,
123,152.000000000001,155.000000000001,146.499999999998,147.5,124,1
05.500000000001,141.500000000001,134.999999999998,105.500000000001
,112.000000000001,165.499999999998,258.500000000001,349.5,410.9999
9999999,396.5,327.999999999999,245.500000000001,177.999999999998,
144.000000000002,146.500000000001,123.500000000001,135.5,193.49999
999998,268.5,285.000000000002,301.999999999998,269.500000000003,2
26.500000000001,214.999999999996,261,322.500000000003,388.50000000
0001,405.499999999996,439.500000000002,480.499999999999,527.500000
000001,545,514.5,468.999999999999,476.000000000001,525.50000000000
1,530.499999999998,516.5,482,458.000000000003,475.999999999996,507
,542.000000000003,562.999999999998,558.5,543,521.500000000001,529.
500000000001,535.5,521.500000000001,520.999999999998,520,486.49999
9999999,411.000000000001,322.999999999998,293.500000000004,301.499
999999999,309.499999999998,261,222.500000000001,235.500000000002,1
95.999999999996,124.500000000003,-7.50000000000028,-
85.500000000005,-101.499999999994,-115.000000000003,-
90.4999999999978,-85.999999999994,-68.5000000000002,-
36.4999999999993,-52.0000000000032,-
4.49999999999839,63.9999999999974,117.000000000003,106.00000000000
2,32.4999999999998,-40.5000000000033,-103.499999999999,-
177.999999999998,-235.5000000000002,-207.000000000002,-194.5,-
213.999999999999,-249.000000000001,-284.999999999997,-
298.500000000002,-284.999999999997,-252.000000000003,-
277.499999999997,-268.000000000002,-240.499999999999,-
235.000000000003,-280,-292.999999999997,-249.999999999999,-
174.500000000002,-137.999999999998,-171.5,-253.000000000001,-
319.500000000001,-427.499999999998,-478.499999999999,-
476.000000000001,-485.500000000001,-491.000000000001,-
483.499999999997,-511.500000000003,-535.5,-558.5,-568,-533.5,-
481.500000000001,-442.999999999998,-388.500000000001,-
378.500000000002,-380.499999999997,-306.500000000001,-213.5,-
131.000000000001,-91.499999999999,-82.4999999999987,-
81.500000000001,-127.000000000002,-171.000000000001,-
142.499999999997,-72.000000000001,-29.5000000000023,-
14.9999999999961,-49.0000000000013,-93.4999999999997,-
41.0000000000021,-18.4999999999969,-47.0000000000015,-
150.999999999999,-220.500000000001,-198,-163.000000000002,-181,-
183,-202.999999999998,-203.000000000002,-196.000000000001,-
174.499999999997,-161.000000000002,-132.499999999998,-
174.500000000002,-246,-307.999999999997,-352.000000000001,-
374.500000000002,-417.5,-471.499999999998,-497.5,-
494.500000000002,-463.499999999999,-431.000000000001,-
423.499999999999,-397.000000000001,-365.499999999999,-
348.000000000002,-305.499999999999,-303,-346.500000000001,-403,-
451.999999999999,-456.000000000001,-453.000000000001,-
451.499999999998,-457.500000000002,-508.499999999998,-
557.000000000001,-630.999999999999,-682.500000000001,-
670.499999999998,-655.000000000001,-613,-560.499999999999,-
498.500000000001,-471.999999999999,-532,-586,-603,-618,-
584.000000000001,-530,-504.65,-542.75,-548.3,-534,-498.35,-532.1,-

602.18,-615.12,-609.1,-569.7,-465.95,-343.95,-250.7,-242.15,-261,-
275.75,-278,-225.95,-164.7,-155.85,-173.4,-158.45,-118.85,-
94.84999999999997,-82.7,-105.95,-137.15,-179.4000000000001,-174,-
184.5,-226.0000000000001,-275.5,-302,-320.5,-322,-316.5,-299.5,-
254.5,-194,-175.0000000000001,-174.5,-178,-218.9999999999999,-271,-
306.5000000000001,-312.5,-294.5,-249,-187.9999999999999,-
179.4999999999999,-194.0000000000001,-210.0000000000001,-
208.9999999999999,-209.5,-228.9999999999999,-202,-166.5000000000001,-
144,-115.0000000000001,-146.9999999999999,-221.5000000000001,-286,-
319,-343.4999999999999,-363,-393.0000000000001,-380.4999999999999,-
371.9999999999999,-341,-343,-384.5000000000001,-392.5,-
398.0000000000001,-388.9999999999999,-369.9999999999999,-316.5,-
246.0000000000002,-229.5,-226.4999999999998,-230.5,-
243.5000000000001,-250.9999999999999,-273.0000000000001,-316.5,-
335.5,-358.0000000000001,-394.5,-416.5000000000002,-
442.9999999999998,-473.5000000000002,-501.4999999999999,-
490.4999999999998,-459.4999999999999,-425,-386.5000000000001,-308.5,-
231.5000000000002,-176.4999999999997,-196.0000000000001,-
234.9999999999999,-280.5000000000004,-284.4999999999999,-
284.4999999999999,-274.9999999999999,-262.5000000000001,-
221.4999999999999,-194.5000000000004,-154.5,-99.0000000000002,-
62.9999999999997,16.00000000000027,103,174.4999999999997,218.0000000
00003,222.5000000000001,205.4999999999996,200.5000000000003,238,279.4
9999999999997,258.0000000000003,173.9999999999999,81.9999999999999,-
7.50000000000028,-68.00000000000014,-101.9999999999998,-
116.0000000000001,-130.5000000000002,-98.4999999999996,-
40,16.49999999999971,60.99999999999999,65.0000000000004,71.999999999
965,114.0000000000001,164,170.5000000000002,143.9999999999997,127.999
9999999999,133.5,150.5,173.5000000000004,219.9999999999998,260.500000
000001,301,341.9999999999998,378.0000000000003,373.9999999999999,347.
9999999999997,311.0000000000004,281.4999999999997,263,240,217.4999999
99999,177.5000000000004,153.9999999999996,149.0000000000004,145,139.9
99999999998,126.5000000000003,137.4999999999999,183.9999999999997,250
.5000000000002,322,371.9999999999999,397.0000000000001,420.499999999
99,418.4999999999999,405.5000000000001,398.4999999999999,393.5,399.50
0000000002,387,352.5,324.4999999999999,273.5,210.0000000000001,165.9
99999999999,181,190.5,213.5,228.9999999999999,223.5000000000001,200.
4999999999999,194.0000000000001,197.0000000000001,202,208.9999999999
9,221,231.0000000000001,220,197.9999999999998,194.0000000000001,199.4
99999999999,213.5,230.5,232.0000000000001,228.9999999999999,226.5000
000000001,233.5,227.0000000000001,223,244,251.5,248.5,259.4999999999
99,283,276.0000000000001,271,256.4999999999999,235,226.0000000000001,
203,196.9999999999999,214.0000000000001,228.4999999999999,209,203,212
,213,218.5,207.45,195.7,174.25,143.95,133.05,129.55,143.9,175.2,20
3.7,244.9,293.15,317.9,305.35,286.5,285.35,265.7,281.6,323.85,368.
65,439.415,502.855,532.48,533.8,526.8,534.65,554.4,567.25,568.7,53
4.35,515.1,496.5,486.5,476.0000000000001,446.5,416.5,368.0000000000
01,301.5,256,228,206,190,203,252,283,289.9999999999999,271.00000000
0001,271.9999999999999,293.0000000000001,314.5,338.0000000000001,354.
5,366,381,360.4999999999999,333.0000000000001,313.9999999999999,295.5
00000000002,272.9999999999999,267.9999999999999,272.5,281.5000000000
01,298.0000000000001,309.4999999999998,305.0000000000002,311.9999999
9999,318.0000000000001,325.4999999999999,315.0000000000001,316.000000
000001,311.9999999999999,320.5000000000001,317.9999999999998,303,295.
000000000001,300,293.5,289.5,281.9999999999998,269.5000000000003,250
.4999999999998,229.0000000000004,190.4999999999996,180.5000000000001,1
62,111.5000000000002,78.0000000000003,74.9999999999998,74.999999999
9984,66.5000000000005,59.50000000000034,67.9999999999997,94.00000000
0003,119.4999999999997,137,133.5,124,129.0000000000001,148.5,145,108

.999999999999,69.5000000000023,48.499999999998,56.5000000000015,67
.4999999999981,77.0000000000026,77.499999999997,72.000000000001,38
.4999999999991,21.5000000000032,26.999999999992,25.999999999971,
17.5000000000036,-10.0000000000033,-55.0000000000006,-
85.4999999999961,-101,-106.5,-119.500000000001,-125.999999999999,-
114.5,-110.5,-112.000000000001,-117.500000000001,-108.5,-110.5,-
109.999999999997,-115.500000000002,-129.000000000001,-127.5,-
124.499999999998,-137,-158.499999999999,-175.000000000001,-
176.499999999997,-183,-172.000000000003,-164.999999999997,-
179.500000000004,-172.499999999998,-159.500000000001,-
149.499999999998,-139.500000000001,-136.499999999999,-
132.000000000001,-155.5,-192.5,-222,-234.000000000001,-
254.999999999999,-268.5,-286.999999999999,-300,-302.500000000001,-
311.999999999999,-321,-305.500000000001,-268.999999999999,-
233.000000000001,-200,-158.999999999998,-134.500000000002,-
127.499999999998,-139.500000000001,-125.500000000001,-
98.4999999999991,-95.0000000000006,-117.499999999999,-
143.500000000001,-155.999999999998,-155.500000000002,-151.5,-163,-
182,-196.499999999999,-190.999999999999,-181.500000000001,-
195.000000000001,-226,-260.499999999999,-270.5,-287.999999999999,-
289.5,-294.000000000001,-299.499999999999,-329.5,-
362.500000000001,-380.999999999998,-392.000000000001,-
399.499999999999,-417.000000000001,-408.999999999999,-
416.000000000001,-434,-447.999999999999,-444.5,-423,-
398.500000000001,-367.499999999999,-329.5,-298.55,-263.3,-238.95,-
216.7,-198.5,-176.1,-148.75,-133.7,-134.35,-132.35,-113.4,-
98.0500000000001,-85.7000000000002,-93.1999999999999,-117.6,-
142.05,-162.55,-172.65,-180.7,-174.85,-170.95,-197.3,-212.85,-
210.55,-208.1,-192.55,-180.55,-179.11,-178.465,-178.585,-170.535,-
160.525,-145.93,-161.95,-207.55,-247,-235.95,-202.35,-183.65,-
184.4,-188.8,-189.95,-179.15,-162.85,-150.15,-156.2,-162.6,-
179.05,-205.1,-224.85,-217.8,-212.65,-233.4,-256.7,-268.2,-277.2,-
274,-257.500000000001,-222,-190.5,-188.999999999999,-
204.000000000001,-227.999999999999,-248,-252,-254.5,-251.5,-234,-
210,-194.5,-189,-170.5,-163,-166.500000000001,-169,-171.5,-155.5,-
147,-145,-138.5,-135.999999999999,-134.5,-144,-158,-150.5,-
134.000000000001,-118,-105.999999999999,-105.999999999999,-
97.5000000000015,-66.999999999993,-43.5000000000008,-
27.9999999999991,-37.0000000000004,-55.4999999999994,-
54.0000000000007,-35.4999999999994,-18.0000000000002,-
22.9999999999997,-29.9999999999989,-42.0000000000002,-
49.4999999999979,-53.0000000000008,-69.5000000000001,-
105.999999999999,-142,-183.500000000001,-194.5,-192.5,-
191.000000000001,-198.499999999999,-201.499999999999,-
208.000000000002,-213.5,-224.500000000001,-236.499999999999,-244,-
242.499999999999,-232.5,-212.000000000001,-185.999999999999,-
164.500000000001,-149.5,-122,-104.499999999998,-89.0000000000013,-
70.5,-62.4999999999987,-
40.5000000000011,5.5000000000005,36.0000000000005,45.4999999999983
,57.0000000000004,82.9999999999997,115.499999999999,143.5000000000
01,165,166.000000000002,158.999999999998,149.000000000001,151.5,15
6.000000000001,162.499999999999,149.000000000001,126.499999999998,
117.500000000001,107.999999999999,109.999999999999,123.0000000000
2,159.499999999999,185.500000000001,201,203.499999999999,197.50000
0000002,176.999999999998,159,152.000000000001,151.5,162,170.5,164,
149.5,129.999999999999,115.000000000001,97.4999999999993,83.999999
9999996,76.50};
float gemp2[3156]={0,-6137,-275,-
0.499999999999945,3.49999999999961,6.00000000000045,1.499999999999

83,1.4999999999983,1.4999999999983,-0.49999999999945,-
2.4999999999972,-0.49999999999945,0,0.9999999999989,-
4.9999999999945,-8.50000000000017,-
7.50000000000028,3.4999999999961,8.00000000000023,5.0000000000005
6,1.9999999999978,3.9999999999956,5.50000000000005,3.9999999999
56,1.9999999999978,-2.4999999999972,-
0.9999999999989,2.9999999999967,0.49999999999945,-
0.9999999999989,-3.9999999999956,-
1.9999999999978,2.9999999999967,8.00000000000023,13.4999999999
6,7.00000000000034,4.499999999995,0.9999999999989,0,-
0.49999999999945,4.00000000000067,6.9999999999923,4.000000000000
67,-6.50000000000039,-12.4999999999997,-12.9999999999997,-
8.50000000000017,-5.50000000000005,-0.49999999999945,-
1.9999999999978,-0.9999999999989,-
1.9999999999978,0.49999999999945,-0.9999999999989,-
4.50000000000061,-4.499999999995,-3.00000000000078,-
2.4999999999972,-8.00000000000023,-9.50000000000006,-
13.999999999996,-18.0000000000002,-15.999999999993,-
11.5000000000001,-6.4999999999928,-5.00000000000056,-
5.9999999999934,-8.00000000000023,-7.00000000000034,-
4.9999999999945,-9.50000000000006,-4.50000000000061,-
2.4999999999972,1.9999999999978,6.50000000000039,4.499999999995
, -3.4999999999961,-12.9999999999997,-16.50000000000004,-
16.499999999993,-18.5000000000002,-18.5000000000002,-
19.0000000000001,-15.0000000000006,-7.4999999999917,-
4.50000000000061,1.4999999999983,6.00000000000045,8.5000000000001
7,4.9999999999945,-1.9999999999978,-5.9999999999934,-
7.00000000000034,-6.50000000000039,-
3.4999999999961,0,0.49999999999945,2.9999999999967,4.5000000000
0061,2.4999999999972,-3.9999999999956,-
5.00000000000056,3.4999999999961,9.50000000000006,9.0000000000001
2,8.00000000000023,6.00000000000045,2.4999999999972,-
2.4999999999972,-10.999999999999,-18.5000000000002,-
16.0000000000005,-14.999999999995,-14.5000000000006,-
11.999999999998,-9.00000000000012,-
3.4999999999961,2.9999999999967,10.5,14.5000000000006,13.999999
999996,12.999999999997,7.50000000000028,4.499999999995,3.0000000
0000078,0.9999999999989,3.4999999999961,5.00000000000056,4.49999
9999995,0,3.9999999999956,12.0000000000009,20,26.499999999993,2
1.499999999999,15.0000000000006,12.499999999997,17.0000000000003
,16.499999999993,15.0000000000006,10.5,8.00000000000023,5.999999
9999934,6.00000000000045,2.9999999999967,3.50000000000072,7.99999
99999912,5.00000000000056,11.999999999998,13.499999999996,15.00
00000000006,11.999999999998,13.999999999996,13.0000000000008,6.4
9999999999928,2.00000000000089,-0.49999999999945,-
0.49999999999945,-5.00000000000056,-7.50000000000028,0,0,-
5.9999999999934,-
5.00000000000056,1.9999999999978,2.50000000000083,6.499999999992
8,10.999999999999,4.00000000000067,-11.499999999998,-
13.5000000000007,-9.00000000000012,-
6.4999999999928,1.9999999999978,8.00000000000023,-
0.49999999999945,-0.49999999999945,-5.00000000000056,-
4.9999999999945,-5.50000000000005,-5.9999999999934,-
5.00000000000056,-0.9999999999989,-3.4999999999961,-
1.0000000000001,-3.4999999999961,-5.4999999999939,-
7.50000000000028,-7.50000000000028,-11.999999999998,-
8.00000000000023,-12.499999999997,-16.5000000000004,-
21.499999999999,-26.5000000000004,-28.999999999999,-30,-
36.0000000000005,-42.499999999998,-36.5000000000004,-

29.5000000000001,-21.499999999999,-18.0000000000002,-
16.4999999999993,-19.0000000000001,-15.0000000000006,-
6.9999999999923,-2.00000000000089,-6.9999999999923,-
20.9999999999999,-28.0000000000002,-27.0000000000004,-
16.9999999999992,-2.50000000000083,0,-5.9999999999934,-
9.00000000000012,-
6.00000000000045,9.00000000000012,13.4999999999996,10.5,0.50000000
0001055,-11.0000000000001,-11.9999999999998,-7.4999999999917,-
6.00000000000045,-9.00000000000012,-8.50000000000017,-
10.9999999999999,-12.4999999999997,-9.50000000000006,-
7.00000000000034,-5.9999999999934,-4.00000000000067,-
2.9999999999967,-6.50000000000039,-10,-10,-4.9999999999945,-
3.50000000000072,-0.9999999999989,-3.4999999999961,-
11.9999999999998,-20.5,-18.0000000000002,-9.50000000000006,-
3.9999999999956,-2.50000000000083,-
4.9999999999945,0.4999999999945,-6.00000000000045,-
5.9999999999934,-4.50000000000061,-1.4999999999983,-
5.9999999999934,1.9999999999978,-7.50000000000028,-
11.4999999999998,-8.00000000000023,0,-4.9999999999945,-
9.00000000000012,-17.5000000000003,-25.5000000000005,-
20.9999999999999,-
6.4999999999928,7.4999999999917,1.0000000000001,-
1.50000000000095,1.0000000000001,-2.00000000000089,-
2.4999999999972,0.9999999999989,5.50000000000005,10.9999999999999
,12.4999999999997,7.50000000000028,8.00000000000023,7.9999999999999
12,11.5000000000001,17.4999999999992,24.5000000000006,22.4999999999999
997,19.5000000000001,14.9999999999995,18.0000000000002,21.4999999999999
9999,22.4999999999997,11.0000000000001,10,10,13.4999999999996,16.5
0000000000004,24.9999999999995,31.4999999999999,27.0000000000004,12
.4999999999997,5.00000000000056,3.4999999999961,7.00000000000034,
14.4999999999995,20.5,23.4999999999996,33.5000000000008,34.9999999999999
999995,31.4999999999999,30.5,29.5000000000001,24.5000000000006,28.
5000000000002,27.4999999999992,23.0000000000008,23.4999999999996,2
3.4999999999996,17.5000000000003,14.9999999999995,23.0000000000008
,22.4999999999997,18.0000000000002,20,35.9999999999994,39.50000000
00001,35.0000000000006,30.9999999999999,29.0000000000001,27.999999
999991,32.5000000000009,35.9999999999994,44.5000000000007,45.4999
999999994,31.4999999999999,17.5000000000003,-2.4999999999972,-
3.50000000000072,6.50000000000039,8.00000000000023,14.4999999999999
5,30,37.5000000000003,23.4999999999996,9.50000000000006,9.00000000
000012,15.0000000000006,8.4999999999906,4.50000000000061,0.999999
9999989,-0.9999999999989,-
6.00000000000045,2.50000000000083,15.4999999999994,21.4999999999999
9,25.5000000000005,30.9999999999999,30.9999999999999,30.5,25.49999
9999994,22.0000000000009,23.4999999999996,34.9999999999995,35.500
0000000005,32.9999999999997,21.4999999999999,19.5000000000001,19.5
000000000001,14.5000000000006,5.4999999999939,5.5000000000005,8.0
000000000023,20,33.4999999999996,33.4999999999996,30.5,20.5,18.50
0000000002,10.5,0,-
2.9999999999967,8.50000000000017,16.9999999999992,19.5000000000000
1,21.9999999999998,29.0000000000001,33.5000000000008,29.0000000000
001,20.5,15.9999999999993,21.4999999999999,35.4000000000004,35.649
999999998,21.9999999999998,16.9000000000002,24.1999999999998,19.4
500000000003,18.5999999999997,21.4000000000003,27.9999999999997,30
.7499999999999,41.3000000000002,45.9500000000002,38.2499999999997,
22.1500000000002,12.6500000000002,19.2999999999999,22.4999999999999
7,22.7500000000003,29.0499999999999,27.9499999999999,26.4000000000
003,26.2499999999999,23.6500000000001,23.1500000000001,27.54999999
99995,36.4000000000003,43.05,45.1000000000001,38.7499999999996,31.

95,29.2000000000003,40.6999999999996,38.9,33.4499999999999,24.9000
000000005,29.1499999999995,36.1,41.1,51.4000000000003,56.749999999
9999,58.4499999999999,65.5500000000003,62.5999999999999,57.2,51.64
9999999997,48.0000000000003,48.4499999999999,47.8000000000001,42.
9000000000002,35.3999999999999,40.1000000000001,55.7999999999997,7
2.45,78.3499999999998,80.0500000000004,72.3499999999999,64.7999999
999999,78.1500000000002,82.2499999999998,74.2999999999999,59.00000
00000002,52.2,51.4000000000001,52.8499999999998,54.7,66.3,74.45000
0000001,83.3,89.65,81.1000000000001,76.6,76.9999999999998,79.5499
999999999,91.4000000000001,93.6500000000001,83.6499999999998,70.45
,59.4,52.6000000000001,45.4499999999999,52.9500000000001,55.35,48.
6,56.6,69.4499999999999,81.3,93.8,99.9000000000001,91.3999999999999
9,84.5000000000001,91.755,86.64,78.92,78.855,79.933,80.597,83.42,9
1.465,94.8,114.31,128.605,133.75,134,131.3,120.65,104.15,98.299999
9999999,99.65,92.5500000000001,79.05,71.6,66.6999999999998,66.2500
00000002,83.0499999999998,102,103.2,86.4000000000001,78.5,83.1000
00000001,107.9,133.8,133.6,123.65,119.4,127.45,143.1,148.7,147.75
,139.55,135.4,117.45,109.65,102.75,84.9499999999997,95.79999999999
98,106.65,109,106.6,104.35,90.5,92.3000000000002,103.85,108.1,114,
117,119,109.5,104.5,103.5,106.000000000001,125.9999999999999,144.00
000000001,154.5,156.4999999999999,140.5,123.5000000000001,124,121,1
25,120,114.0000000000001,100,84.9999999999995,95.9999999999994,111,
114.5000000000001,132,137.5,138.9999999999999,136.0000000000001,133,1
37.5,156.4999999999999,179.5,182.5,165,134.0000000000001,132.5,148.5
,153,147,145.9999999999999,141,150.5,160.4999999999999,187.000000000
002,191.5,188.9999999999999,195.0000000000001,195.9999999999998,191.0
00000000001,178,179.4999999999999,179.5000000000001,188.49999999999
,191.5,181.5000000000001,162,163.5000000000001,168.4999999999998,173.
5,183.5000000000001,194.0000000000001,200.4999999999999,199.500000000
001,191.5,184,165.4999999999998,169.5,185.5000000000001,201,222.4999
99999999,240.5000000000001,229.9999999999999,224.5000000000001,232.5,
226.9999999999999,225.5000000000001,218.4999999999999,220.50000000000
1,220,209.9999999999999,188.9999999999999,186.0000000000002,186.49999
9999998,189.0000000000001,205,214.0000000000001,207.4999999999998,202
,198,203.5000000000001,204.5000000000001,200.4999999999999,211.999999
999999,212.5000000000002,215.5,207.9999999999999,198,187.49999999999
8,182.5000000000001,186.5000000000001,188.5,196.0000000000001,198.999
999999998,179.4999999999999,167.5,153.0000000000003,170.99999999999
,193.5000000000002,207.5,222.4999999999997,217.5000000000004,197.4999
99999997,177.4999999999999,159.0000000000002,134.4999999999997,113.00
0000000003,110.9999999999999,115.5000000000002,121.4999999999997,141.
5000000000003,157.4999999999997,165.9999999999999,158.5000000000004,16
4,182.4999999999997,210.0000000000004,207.5,193.9999999999996,172.000
000000003,164.4999999999999,167.9999999999999,177.4999999999999,166.5
00000000003,153.4999999999998,150.9999999999999,170.5000000000002,157
.5000000000002,134.4999999999997,131.9999999999999,123.5000000000001,1
13.0000000000003,126.4999999999998,118.9999999999998,125.0000000000002
,123.0000000000002,116.4999999999999,98.4999999999996,81.99999999999
99,96.50000000000016,112.0000000000001,124.4999999999998,125.50000000
0001,152.5,156.4999999999999,146.9999999999999,131.0000000000001,128.
5000000000003,114.5,105.9999999999997,113.5000000000002,133.5,116.000
000000001,107.9999999999997,97.50000000000037,80.99999999999977,65.49
99999999983,65.50000000000028,63.49999999999986,58.50000000000013,70.
0000000000012,82.49999999999987,100.5000000000001,83.9999999999996,7
5.49999999999972,66.00000000000016,73.50000000000019,84.9999999999973
,79.50000000000012,86.49999999999982,95.00000000000006,82.49999999999
87,71.00000000000033,93.00000000000009,91.49999999999999,85.999999999
9994,77.4999999999997,75.00000000000028,86.49999999999982,83.00000000
0002,76.00000000000005,73.49999999999975,78.00000000000003,104.500000

000001,105,95.999999999983,104.000000000002,120,107.499999999998,
90.5000000000022,80.000000000001,61.999999999976,54.500000000001
8,38.0000000000003,13.499999999996,5.00000000000167,62.499999999
964,105.000000000004,114.99999999998,87.999999999992,70.99999999
99988,50.5000000000022,19.49999999999,9.50000000000006,-
5.00000000000167,-13.499999999996,-
19.999999999978,2.4999999999861,11.499999999998,1.0000000000021
1,-
3.9999999999956,19.999999999978,18.5000000000013,38.99999999997
9,45.0000000000017,47.999999999992,56.5000000000015,62.999999999
997,51.999999999987,55.0000000000006,86.499999999982,113.5000000
00002,97.499999999993,89.99999999999,136.000000000003,164.999999
99997,167.000000000002,142.500000000001,121.499999999997,115.5000
0000002,104.500000000001,78.000000000003,74.499999999996,74.999
999999984,105,120.500000000003,128.99999999997,154.000000000001,
179,173.99999999999,131.000000000001,129.5,174.500000000002,200.9
9999999998,226.500000000001,236.49999999999,191.500000000002,185
.99999999997,205.000000000002,185.49999999998,158.49999999999,1
21.000000000002,89.499999999957,76.5000000000082,64.99999999995
,48.499999999935,48.0000000000036,20.499999999966,-
17.999999999936,-22.000000000002,-26.500000000004,-
47.5000000000048,-87.500000000004,-61.999999999976,-
56.0000000000027,-66.999999999948,-101,-124,-113.500000000002,-
131.5,-159.500000000001,-173.5,-137.49999999999,-
89.99999999999,-64.500000000007,-79.5000000000012,-
129.99999999999,-152.99999999999,-175.5,-182.000000000002,-
156.000000000001,-145.99999999997,-161.500000000001,-200,-
186.99999999999,-133.5,-135.000000000001,-182.500000000001,-
213.5,-205.500000000001,-190.99999999999,-183,-229.49999999998,-
227.000000000004,-240,-237.49999999997,-257.49999999999,-
257.000000000001,-226.99999999999,-205.000000000002,-206,-
203.500000000001,-218.49999999997,-214.500000000002,-
214.500000000002,-267.49999999998,-326,-320.49999999999,-
313.500000000002,-290.49999999998,-318.000000000001,-
359.000000000003,-369.99999999999,-378.49999999997,-436.5,-
456.000000000003,-427.49999999998,-390.000000000001,-
396.99999999998,-434.5,-385.49999999999,-314.5,-
285.500000000001,-289.000000000001,-295.99999999998,-
287.500000000001,-310.000000000001,-360.99999999998,-371.5,-360,-
305,-244,-216.000000000003,-166.49999999998,-157.500000000002,-
160.99999999998,-154.000000000001,-159.500000000001,-
118.99999999998,-114.000000000001,-129.99999999999,-
123.500000000001,-127.000000000002,-128.49999999998,-177,-259,-
326,-316.000000000001,-318.99999999998,-347.500000000003,-
372.99999999997,-361.500000000001,-387.500000000001,-
354.000000000001,-288.49999999998,-316.500000000002,-
379.99999999998,-421.500000000001,-428.500000000001,-
454.99999999999,-457.000000000001,-481.49999999999,-
457.000000000001,-374.99999999999,-294.000000000001,-
246.99999999999,-234.000000000001,-246,-258.49999999999,-
255.500000000002,-208.99999999999,-141.49999999999,-
162.000000000002,-202,-206.49999999998,-231.5,-277.500000000002,-
278.99999999998,-274.5,-250.000000000001,-239.49999999999,-
255.000000000001,-288.5,-247.49999999998,-180.500000000001,-
156.99999999999,-198,-194.5,-187.5,-185,-138.5,-129,-
166.99999999999,-166.500000000001,-114.5,-49.5000000000001,-
74.5000000000007,-201,-267.99999999999,-296.500000000001,-265.5,-
255,-249.5,-246.99999999999,-219.5,-219.5,-196.49999999999,-
167.5,-167.5,-210.5,-183.3,-122.05,-111.59999999999,-115.6,-

101.85,-116.95,-134.9,-164.1,-91.2000000000002,-
15.85,13.7500000000002,-20.4000000000004,-46.7499999999998,-36.1,-
12.0999999999999,-47.2,-65.0499999999998,-96.7499999999999,-
109.85,-83.4499999999999,-90.2500000000001,-132.65,-164.35,-
197.75,-217.65,-219.9,-243.4,-209.4,-126.4,-99.05,-137.05,-
200.45,-179.15,-115.95,-122.15,-219.15,-358.635,-423.153,-
461.452,-497.26,-502,-507.75,-539.1,-471.3,-390.6,-294.6,-200.05,-
208.45,-282.95,-365.85,-407.85,-416,-449.5,-464.5,-434.5,-437,-
397.500000000001,-411.5,-420.999999999999,-373,-307.500000000001,-
240,-182,-144,-97.5000000000004,-53.9999999999996,-
36.5000000000004,-3.49999999999961,-32.4999999999998,-122.5,-222,-
207.5,-172.5,-182,-230.000000000001,-252.5,-269.999999999999,-
268.5,-218,-232.999999999999,-212.000000000001,-182.499999999999,-
90.0000000000012,21.5000000000001,125.500000000001,194.5,210.999999
999999,159.500000000001,83.9999999999996,-18.0000000000002,-
116.000000000001,-170.5,-232.999999999999,-243.500000000001,-
205.500000000001,-192.999999999999,-222.500000000001,-281,-
298.499999999999,-300.499999999999,-369.5,-502,-517.5,-
428.000000000002,-288.499999999998,-
132.5,25.4999999999983,100.500000000001,147.999999999999,213.00000
0000001,285.499999999999,365.500000000001,461,496.000000000001,413
.999999999999,317.499999999999,246.500000000001,216.499999999999,1
66.500000000001,88.5000000000002,22.9999999999997,-
29.5000000000001,-51.9999999999987,-59.5000000000012,-100,-165,-
245.500000000001,-317.499999999999,-299.499999999999,-
298.000000000001,-307.999999999999,-299.500000000001,-
226.999999999999,-163.500000000001,-166.499999999998,-
219.500000000001,-249.5,-252.5,-247.499999999998,-
326.000000000002,-439.999999999998,-464.500000000001,-405,-
362.500000000001,-294.5,-259,-197.999999999998,-
79.0000000000002,65.4999999999983,134.500000000002,143,80.00000000
00001,-19.5000000000012,-69.5000000000001,-161.499999999999,-
256.499999999999,-362,-499.499999999999,-546.500000000001,-
573.000000000001,-553.499999999998,-518.5,-555.000000000003,-
614.999999999997,-651.5,-603.000000000002,-551.999999999997,-
577.500000000004,-576.999999999996,-539.500000000004,-
470.499999999996,-356.500000000004,-309.499999999998,-280,-
311.499999999998,-301,-201.000000000002,-129.999999999999,-150.5,-
238.999999999998,-266.500000000001,-273.500000000002,-
320.999999999998,-404.5000000000003,-475.499999999998,-
530.500000000003,-486.499999999999,-394.999999999999,-
335.000000000001,-262.500000000001,-207.999999999999,-
112.000000000001,-55.0000000000006,-26.9999999999992,-
53.9999999999985,-46.4999999999982,-98.5000000000014,-
205.500000000001,-272.5,-263,-212.500000000002,-141,-
106.4999999999996,-91.4999999999999,-102.500000000001,-
36.0000000000005,131.000000000001,250.499999999998,286.499999999999
8,293.5,267.5000000000003,343,425,483.500000000001,524.499999999999
,514.999999999999,502.000000000002,510.999999999999,596.0000000000
01,611.999999999999,602,545,532.999999999997,590.000000000002,619.
000000000001,595.499999999998,513.500000000002,411.5,310.00000000
001,286.499999999998,324.999999999997,416.500000000002,438.9999999
99998,416.000000000003,414.499999999998,403.000000000002,463,461.4
999999999999,405.000000000002,289.499999999996,244.500000000003,322
,476.000000000001,516.499999999997,562.500000000001,520.9999999999
98,524.500000000001,584,562.499999999999,465.500000000001,320,200,
122,85.9999999999994,55.4999999999994,13.0000000000008,-
86.5000000000005,-180,-265,-316.5,-374.000000000001,-382,-
349.999999999999,-255.000000000001,-125.999999999999,-

89.999999999999,-143.500000000001,-137,-95.499999999995,-
60.000000000001,59.499999999999,181.500000000001,306.500000000001
,320,220.499999999999,150.5,127.5,109.999999999999,59.500000000001
2,3.99999999999956,0,41.999999999998,109.5,133.5,154.000000000001
,192.999999999999,124,-91.499999999999,-245,-287.500000000001,-
150.5,-45.999999999994,-43.4999999999985,-45.5000000000005,-
77.0000000000004,-
19.5000000000012,103.500000000001,173.5,197.000000000001,149.99999
9999999,97.5000000000015,122,100.499999999999,31.000000000001,-
0.500000000001055,-57.0000000000004,-166.499999999998,-
238.500000000001,-254.5,-220.499999999999,-197.000000000001,-
246.500000000001,-240,-199.999999999998,-202.500000000001,-212.5,-
212.5,-251.5,-318.499999999999,-305.500000000001,-
322.500000000001,-432.999999999997,-574.500000000002,-
615.999999999999,-605.000000000002,-571.999999999999,-
574.499999999998,-591.500000000003,-498.499999999997,-
345.500000000003,-314.000000000001,-373.5,-416.999999999996,-
422.000000000002,-409.000000000002,-402,-351.999999999997,-
305.500000000003,-185,-117.499999999997,-77.5000000000014,-
182.000000000002,-244,-267.999999999997,-197.500000000002,-
108.000000000001,-64.4999999999962,-156.000000000001,-
224.000000000002,-196.000000000001,-84.9999999999973,-
33.0000000000003,-44.9999999999973,-
38.0000000000003,83.999999999996,180.500000000001,186.99999999999
9,152.5,207.5,295.999999999998,384.000000000002,433.999999999997,4
91.000000000001,546.500000000001,617.000000000001,638.999999999998
,621.499999999999,651.5,666.000000000002,683.499999999997,618.5000
00000002,549.499999999998,464.000000000002,370.999999999997,310.00
0000000001,282.499999999999,203.500000000001,127.5,92.000000000001
,143.499999999999,203,201,196.000000000001,203.500000000001,257.49
9999999999,344.500000000001,350.999999999999,355.5,351.000000000000
1,371.999999999999,364,305,197.499999999999,95.5000000000017,10.99
99999999998,-27.5000000000003,-8.50000000000017,-
77.9999999999981,-209.000000000001,-307.999999999999,-
303.500000000001,-333.5,-344.499999999999,-315.000000000001,-
243.499999999999,-280,-313.000000000001,-332.5,-352.5,-
309.999999999999,-314.500000000002,-301.499999999999,-312.5,-
309.499999999998,-335.5,-395.500000000002,-426.000000000002,-
479.999999999996,-508.000000000002,-450.499999999998,-
347.5000000000003,-
196.000000000001,55.499999999994,180.500000000001,257.49999999999
9,169.5,-15.0000000000006,-136.499999999997,-266.999999999999,-
336.000000000003,-403.499999999997,-416.500000000002,-
358.999999999998,-340.500000000001,-376.500000000002,-
417.999999999998,-436.5,-366,-284.500000000003,-222.499999999997,-
153.0000000000003,-78.999999999998,-70.0000000000012,-
91.0000000000011,-169.499999999996,-198.500000000004,-
226.999999999999,-310.999999999999,-316.5,-272.999999999999,-242,-
243.000000000002,-251.999999999999,-188.000000000002,-
149.499999999998,-117.500000000001,-116.000000000001,-
190.000000000001,-284.499999999999,-307.499999999998,-
266.500000000001,-164.499999999999,-133.5,-99.5000000000035,-
47.5000000000003,-14.9999999999961,-12.0000000000031,-
2.49999999999861,-18.0000000000025,-13.499999999996,-
20.4999999999966,-90.0000000000034,-141.499999999999,-
122.999999999998,-117.500000000001,-122,-
62.5000000000009,34.499999999995,127.5,241.000000000002,251.5,175
.999999999998,164,171.999999999999,77.0000000000026,-
55.4999999999994,-80.5000000000034,-

45.5000000000005,52.0000000000032,72.9999999999986,10.5000000000002
2,-99.0000000000002,-156.0000000000001,-140.0000000000002,-131.5,-
144.5000000000001,-
84.4999999999985,3.9999999999956,83.0000000000002,135.5,187.499999
999998,214.0000000000003,227.499999999998,194.999999999999,186.9999
99999999,242.5000000000003,347.999999999997,451.5,471.5000000000003,
395.999999999996,283.0000000000002,175.5,125.5000000000001,99.999999
9999979,86.50000000000027,130.499999999998,126.5000000000003,232.5,3
16.999999999998,327.999999999999,287.5000000000001,305.499999999999
,340.5000000000001,331.0000000000001,279.5000000000001,175.5,35.49999
9999972,-36.9999999999981,-49.5000000000001,-133.999999999999,-
231.5000000000002,-196.9999999999998,-83.9999999999996,-
15.00000000000006,26.9999999999992,24.5000000000006,32.499999999999
8,53.9999999999985,129.5,171.0000000000001,146.999999999999,160,186
.0000000000002,164,83.4999999999964,-3.49999999999628,-
54.50000000000018,-84.4999999999985,-130.0000000000003,-
125.499999999996,-149.5000000000002,-147.499999999998,-
167.999999999999,-188.0000000000002,-186.999999999999,-
167.999999999999,-138.0000000000003,-81.999999999999,-
25.4999999999983,36.0000000000005,65.4999999999983,28.999999999999
, -2.99999999999745,-17.0000000000003,-7.000000000000145,-
26.50000000000004,-
38.0000000000003,9.000000000000123,97.0000000000004,83.500000000000
8,33.4999999999974,-49.5000000000001,-
19.4999999999999,34.0000000000007,52.4999999999975,41.999999999998
,82.00000000000043,124,96.999999999996,36.50000000000038,78.00000000
00003,170.499999999998,192.0000000000001,147.499999999998,90.500000
0000022,26.5000000000004,-10.50000000000022,-113.499999999997,-
205.5000000000001,-255.0000000000001,-186.0000000000002,-
66.50000000000005,-
5.50000000000005,28.00000000000014,93.4999999999997,156.0000000000001
,225.499999999998,288.5000000000003,378.499999999997,486.0000000000
04,507.999999999997,552.999999999999,525.0000000000002,420.50000000
0001,329.499999999996,272.5,232.5000000000004,216.999999999996,149.
5000000000002,55.4999999999994,48.499999999998,192.0000000000001,411
.999999999999,506.5000000000001,472.999999999999,390.5000000000003,3
16.5,348.5,346.499999999998,359.5000000000001,394.999999999999,412.
0000000000001,380.499999999999,345.5000000000001,324.499999999999,31
7.5000000000002,332.999999999999,338.499999999999,370.5,346,329.000
000000002,300,299,330.999999999999,410.999999999999,436.0000000000
01,417.5,402.5000000000001,423.499999999999,500.499999999999,501,46
4.5000000000001,437.999999999999,431.5,413,373.5,297.999999999999,1
84.0000000000001,123,139,142.5,161.5,171,165,99.5000000000001,39.00
00000000001,0,-
5.00000000000056,34.0000000000007,90.0000000000001,125,84.00000000
00007,60.5,44.9999999999995,60.9999999999999,169.5,222.5,176.49999
9999999,119.5,69.5000000000001,54.5000000000007,14.4999999999995,-
10,29.00000000000001,93.4999999999997,127,125,117,151.65,176.9,190.
95,168.55,112.7,32.85000000000004,15.7499999999999,13.0999999999998
,7.9499999999999,-27.8499999999998,-
10.7499999999999,82.1499999999997,175.25,183.05,174.2,249.5,303.05
,288.6,294.95,295.95,310.25,334.15,292.75,234.05,192.45,234.3,306.
77,336.68,375.48,394.72,376.25,367.65,387.1,404.65,385.7,355.25,33
9.95,384.3500000000001,452.5,530.5,556.499999999999,588.0000000000
1,583,632.499999999999,685,684.5,687.5,715.5,745.0000000000001,758.
5,755.999999999999,704.5000000000001,649.499999999998,628.500000000
001,656.5,644.5000000000001,582,506,402,314.999999999999,266,262.50
0000000001,284.499999999999,322,362,406.5000000000001,423.500000000
001,425,457.5,469.499999999998,451.5,386.0000000000002,393.49999999

9998,414.000000000003,409.5,376.499999999997,321.000000000002,325.
499999999996,344.000000000002,324.499999999999,314.5,393.000000000
003,462.499999999997,499.000000000001,520,552.000000000001,557.499
9999999997,558.5,596.5,618.500000000002,602.999999999998,583,568.50
0000000003,560.499999999999,482.499999999999,415.5,358.49999999999
9,296.000000000003,250.499999999998,230.5,204,210.500000000002,223
,242.999999999998,255.5,270.000000000001,326.499999999998,382.0000
00000002,387.499999999998,371.000000000001,383.999999999998,442,45
9.000000000001,438.499999999999,412.000000000003,427.999999999997,
442.999999999998,430.000000000001,381,331.5,295.500000000004,283.4
9999999997,286,259.499999999999,257.500000000004,290.499999999998
,330.500000000002,400.999999999998,433.000000000003,443.49999999999
97,397.499999999997,371.500000000005,381.999999999998,366,330.0000
00000004,256.999999999996,172.999999999996,98.0000000000025,25.000
0000000039,-31.5000000000065,-42.9999999999975,-42.9999999999975,-
11.4999999999998,49.9999999999989,103.999999999997,138.50000000000
6,164.499999999999,173.499999999995,176.500000000006,187.499999999
998,157.499999999997,147.500000000003,143.499999999994,103.5000000
00007,88.9999999999969,65.9999999999972,78.0000000000047,106.99999
9999999,91.9999999999987,80.9999999999977,75.5000000000017,53.9999
999999985,-7.00000000000145,-74.4999999999951,-90.0000000000034,-
68.0000000000014,-
0.999999999997669,13.5000000000041,28.4999999999958,78.00000000000
47,107.499999999998,109.500000000002,96.999999999996,111.499999999
998,143.000000000004,130.499999999998,103.499999999999,68.500000000
00002,52.0000000000032,39.9999999999956,-8.49999999999795,-
74.4999999999951,-125.000000000002,-174.000000000003,-
205.5000000000001,-202.499999999999,-188.499999999996,-
186.5000000000001,-173.000000000005,-114.000000000001,-
20.9999999999955,9.49999999999562,15.9999999999982,16.0000000000007
1,-22.9999999999997,-70.0000000000056,-82.4999999999942,-
71.5000000000021,-112.000000000005,-206,-294.499999999998,-
365.000000000002,-375.499999999995,-406.500000000003,-
420.999999999996,-434.5,-442,-400,-365.500000000001,-
284.500000000003,-232.5,-206,-192.499999999995,-190.000000000001,-
212.500000000002,-236.999999999998,-244.999999999997,-
285.500000000001,-337.500000000004,-382.999999999996,-
440.000000000005,-471.500000000003,-440.999999999994,-
421.000000000005,-389.999999999997,-351.500000000002,-
337.999999999998,-320.499999999999,-315.000000000003,-
286.999999999997,-257.499999999999,-244.500000000003,-
251.999999999999,-231.499999999998,-208.500000000003,-
205.500000000001,-202.499999999999,-186.500000000001,-
175.000000000001,-179,-204,-200,-211.5,-244.999999999997,-276.5,-
309.500000000003,-340.499999999997,-396.500000000004,-
428.499999999996,-467.000000000004,-500.499999999997,-
528.500000000003,-520.499999999999,-473.999999999997,-
440.500000000004,-388.500000000001,-334.499999999998,-299,-
285.000000000002,-259.499999999999,-228.5,-193.999999999996,-
171.000000000001,-152.5,-136.000000000003,-118,-71.4999999999977,-
41.9999999999998,-31.5000000000021,-43.9999999999996,-
43.5000000000008,-13.4999999999996,6.50000000000261,-
5.99999999999934,-40.5000000000033,-46.4999999999982,-
23.4999999999985,-2.50000000000306,-8.49999999999795,-
28.9999999999999,-41.9999999999998,-51.4999999999999,-
76.0000000000005,-44.5000000000029,-11.4999999999998,-
3.50000000000072,-5.49999999999606,-7.00000000000145,-
11.0000000000001,-
7.00000000000145,29.5000000000023,48.4999999999998,55.0000000000006

,66.0000000000016,41.5000000000001,-15.4999999999994,-
89.5000000000001,-148.0000000000001,-181.499999999999,-
222.0000000000002,-254.499999999997,-232.5,-169.0000000000001,-
114.999999999998,-71.00000000000033,-38.9999999999979,-
7.500000000000028,3.500000000000072,36.00000000000005,59.499999999999
,53.4999999999997,30.9999999999988,-1.500000000000095,-
26.50000000000004,-45.9999999999994,-62.9999999999997,-
93.9999999999985,-119.0000000000002,-158.499999999999,-185,-
192.0000000000001,-183.999999999997,-181,-168.5000000000003,-
137.999999999998,-74.9999999999984,-49.00000000000013,-
78.00000000000003,-99.9999999999979,-111.0000000000003,-106.5,-
89.50000000000001,-88.9999999999969,-83.0000000000002,-
76.4999999999993,-87.00000000000015,-113.499999999997,-141,-
170.5000000000002,-198.999999999998,-204,-202.499999999999,-240,-
281.0000000000002,-316.999999999998,-339,-346.0000000000002,-
345.499999999999,-326,-318.5000000000002,-318.499999999999,-
326.999999999999,-328.999999999999,-348.5,-354.0000000000001,-344,-
331.999999999999,-344,-357.5000000000002,-348.999999999999,-335.5,-
316.0000000000001,-295.5,-280.499999999999,-276.5,-240,-225,-
237.0000000000001,-224,-198,-163.5000000000001,-118.499999999999,-
113.5,-122,-162.5000000000001,-196.0000000000001,-227.499999999998,-
291.0000000000001,-341,-384,-426.499999999999,-445.5000000000001,-
461.499999999999,-445.0000000000001,-397,-349.5,-301.5,-245.5,-
215.0000000000001,-188.499999999999,-164.5000000000001,-141.5,-
127.999999999999,-124.5000000000001,-140.5,-160.5,-175,-183,-
192.5,-198.5,-212,-241.5,-271.5,-295,-314,-301.4000000000001,-
324.1,-330.7,-327.2,-342.65,-362.05,-354.15,-342.65,-349.4,-
354.7,-359.65,-382.95,-389.55,-393.03,-386.575,-368.845,-358.5,-
366.9,-349.8,-330.15,-329.95,-311.3,-293.65,-275.899999999999,-
260.95,-228.3,-208.5,-201.15,-203.6,-227.85,-255.35,-262.05,-
272.5,-266.999999999999,-246.5000000000001,-247.999999999999,-
262.5,-271,-277.0000000000001,-275,-254.5,-241.5,-229.5,-206,-201,-
218.5,-234.5,-242.5,-261,-282.5,-306,-322,-348.5,-361,-365,-
338.499999999999,-302.5000000000001,-259.499999999999,-
216.499999999999,-172.0000000000001,-139.499999999999,-
124.5000000000001,-122.5000000000001,-118.999999999998,-
103.0000000000002,-109.5,-125,-150.5,-170.5,-185.999999999999,-
186.999999999999,-149.5,-136.499999999999,-124,-112.5000000000002,-
89.999999999999,-60.999999999999,-33.0000000000008,-
20.999999999999,-32.4999999999998,-43.9999999999996,-
73.0000000000008,-86.4999999999982,-88.00000000000014,-
98.4999999999991,-119.5000000000001,-110.999999999999,-114.5,-
119.5000000000001,-117.499999999999,-103.5000000000001,-
79.499999999999,-
36.0000000000005,2.50000000000083,23.9999999999996,48.500000000000
2,78.4999999999991,109.0000000000001,137.499999999999,147.5,140.499
999999999,127.5,151.5,183.5000000000001,212.999999999999,221.500000
000001,223,206.999999999999,196.0000000000001,197.499999999999,205,
201,184.5000000000001,151.999999999999,136.0000000000001,127.9999999
99999,128.5,148.5,178,183,179.5000000000001,182,192.999999999999,20
6,217.0000000000001,210.5,185,147.5,120.5000000000001,94.9999999999
84,77.50000000000014,74.4999999999996,80.4999999999989,48.50000000
0002,-0.49999999999945,-36.9999999999993,-77.50000000000014,-104,-
127.5,-162,-217.499999999999,-247.5000000000001,-242.499999999999,-
229.0000000000001,-207.999999999999,-200,-202.499999999999,-225,-
229.0000000000001,-214.999999999999,-203.0000000000002,-
222.499999999999,-253.0000000000001,-273.5,-281,-291.5,-
299.499999999999,-309.5,-322.499999999999,-338.5000000000002,-
355.999999999999,-365,-341.5000000000001,-318.499999999999,-320,-


```
331.999999999999,-329.000000000002,-302,-281.499999999999,-259,-
227.5,-204,-183.500000000001,-166.999999999999,-147.999999999999,-
152.5,-182.500000000001,-204.999999999997,-219.500000000004,-221,-
217.000000000001,-223.499999999999,-230.5,-230.5,-
225.999999999997,-224.500000000001,-239.000000000003,-
256.999999999996,-265.500000000003,-277.499999999997,-280,-
273.500000000002,-260.500000000001,-250.999999999997,-249.5,-
219.499999999999,-159.000000000002,-114.5,-93.0000000000009,-
91.0000000000011,-103,-103.999999999997,-75.0000000000028,-
43.4999999999963,-
12.0000000000031,28.5000000000002,60.5000000000011,76.000000000000
5,94.4999999999974,100.500000000001,81.999999999999,52.0000000000
032,40,29.4999999999979,7.50000000000028,-16.50000000000015,-
21.4999999999987,-19.499999999999,-22.0000000000002,-
15.9999999999982,-13.4999999999996,-11.4999999999998,-
20.5000000000011,-28.999999999999,-39.00000000000024,-
27.4999999999981,9.00000000000123,44.9999999999973,77.5000000000001
4,89.5000000000001,115.499999999997,150.5,179.500000000004,198.999
999999998,217.000000000001,253.999999999999,286.500000000003,309.9
9999999997,332.500000000002,354.999999999999,365.500000000001,360
.999999999998,365};
```

```
//-----gempa3-----
-----
```

```
//float gemp1[92]={0,-6137,-226.999999999999,-
515.5,10.5,5296.2,359.75,9044.05,7601.5,17235.5,7566,-17954.5,-
15181.5,-3510.35,-2121.75,-13534.4,-4476.5,747,2554,-5751.5,-
16875.5,2480.5,13342,1732,1416,-592.5,-854.999999999999,-
11321,9038.5,4543,-1813.5,-5697,-4619.5,-4364,-
228.999999999999,624.000000000002,5698.5,216.500000000002,3559,157
9.5,13662,1947,1580.7,7417.45,31107.85,12209,242.500000000003,1656
,1074.5,-10072,-12493.5,-1674,-2478,-30506.5,-
8594,812.999999999999,3809.5,-
13649.5,84.0000000000041,477.999999999996,22570.65,-
68.1999999999999,979.35,2653.15,2469.1,-3549.5,-1888.15,-
870.6,1134.95,-891.4,-4234.35,-14374,-2634.5,-5995,-3191,-
659.000000000001,609.000000000002,14528,13336.3,8521.9,297.95,236.
4,206.05,6442.9,4205.5,9350,7227.5,5696,-6953.5,-20009,-782.5,-
149.5};
```

```
//float gemp2[92]={0,-
6618.5,4103.8,11844.7,122,13225,282,1572,529.999999999999,-
16536.5,-17432.5,-11164,-2341.5,1037,-1186.5,-
5911,4.49999999999839,-949.499999999999,-1833.5,-1914,17351.5,-
1723.5,-5056.5,9378.5,-10.5,7323,1106.2,14720.8,871.500000000001,-
2064.5,-1256,-2685.7,-6847.2,7025,-3.34999999999974,-581.9,-
9754.85,2108.15,8288.35,-966.6,8061.6,2300,2445.5,4525.5,17855,-
13413,-298.000000000003,-2674.5,-5416.5,-20951.25,-10765.75,-
13591.5,1562.5,25664.2,19146.8,2283,2093.5,-12750,-6270.6,-
662.55,-14748.85,-22.9999999999997,-1861.5,-2507.5,4977.5,-
462.500000000001,-439.000000000001,715.5,948.000000000002,-573.5,-
389.5,6489.35,757.7,-2121.55,-349,-
433.5,53.5000000000008,2802.05,-1199.55,3610.35,-348.45,-
763.85,32.7500000000003,-2389.8,-6789.5,-
2284,1953,12954.5,7906,6113,-446,-96.4999999999994};
```

```
//-----
-----
```

```

//-----
//{5000,-6000,7000,-6000,4000,-9000,5000,-3000,7000,-4000,1000,-
8000,7000,-2000,5000,-3000,4000,-8000,4000,5000,-7000,2000,5000,-
5000,6000,-7000,1000,-4000,7000,-3000,5000,-9000,4000,-2000,6000,-
4000,1000,-3000,2000,-5000,8000,-3000,2000,-4000,2000,-8000,9000,-
1000,5000,-5000,5000,-6000,7000,-6000,4000,-9000,5000,-3000,7000,-
4000,1000,-8000,7000,-2000,5000,-3000,4000,-8000,4000,5000,-
7000,2000,5000,-5000,6000,-7000,1000,-4000,7000,-3000,5000,-
9000,4000,-2000,6000,-4000,1000,-3000,2000,-5000,8000,-3000,2000,-
4000,2000,-8000,9000,-1000,5000,-5000};
//1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-4000,5000,-5000,6000,-
6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-9000,8000,-8000,7000,-
7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-4000,5000,-
5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-9000,-
8000,7000,-7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-
4000,5000,-5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-
9000,8000,-8000,7000,-7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-
3000,4000,-4000,5000,-5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-
9000,9000,-9000,8000,-8000,7000,-7000,6000
//8000,-4000,5000,-6000,7000,1000,-3000,-2000,3000,-5000,6000,-
5000,7000,-2000,9000,-3000,8000,-2000,5000,-1000,3000,-4000,5000,-
3000,-6000,4000,7000,-7000,5000,-2000,8000,-5000,5000,-6000,2000,-
5000,6000,-4000,3000,-6000,4000,-5000,4000,3000,-7000,-5000,9000,-
3000,7000,-5000,6000,-3000,9000,-5000,8000,3000,-6000,-4000,5000,-
3000,6000,-5000,7000,-2000,4000,-4000,4000,-7000,4000,-3000,5000,-
1000,9000,-4000,-2000,4000,6000,-5000,-4000,5000,4000,-5000,-
1000,-4000,3000,5000,-6000,4000,9000,-7000,1000,-8000,5000,9000,-
4000,-5000,6000,-1000,4000,-4000
/*GERAKAN BOGENG*/ //{5000,-10000,5000,-15000,10000,5000,-
20000,5000,-5000,10000,-5000,15000,-5000,10000,-15000,10000,-
25000,10000,-5000,15000,5000,-10000,5000,-15000,5000,-5000,20000,-
5000,10000,-15000,10000,-20000,10000,-5000,15000,-5000,20000,-
10000,5000,-10000,10000,-5000,10000,-20000,5000,-
10000,5000,15000,-5000,5000,-10000,5000,-15000,10000,-20000,5000,-
10000,15000,-5000,15000,-15000,5000,-5000,10000,-5000,15000,-
5000,20000,-15000,5000,-10000,15000,-5000,10000,-10000,-
10000,5000,-5000,10000,-5000,5000,-10000,5000,-20000,15000,-
10000,20000,-5000,10000,-10000,5000,-10000,15000,-5000,15000,-
10000,5000,-10000,10000,-20000};
/*Gerakanku teranyar*///{10000,-10000,5000,-20000,15000,-
30000,35000,-5000,10000,-30000,20000,-10000,25000,-15000,5000,-
10000,5000,-10000,20000,-10000,5000,-5000,20000,-30000,10000,-
10000,20000,-20000,30000,-30000,5000,-5000,5000,-
10000,5000,20000,-30000,10000,20000,-30000,10000,-10000,40000,-
30000,5000,-5000,10000,-10000,-10000,10000,-10000,5000,-
20000,15000,-30000,35000,-5000,10000,-30000,20000,-10000,25000,-
15000,5000,-10000,5000,-10000,20000,-10000,5000,-5000,20000,-
30000,10000,-10000,20000,-20000,30000,-30000,5000,-5000,5000,-
10000,5000,20000,-30000,10000,20000,-30000,10000,-10000,40000,-
30000,5000,-5000,10000,-10000,-10000};
/*Mas Awe*///{15000,-10000,25000,-25000,60000,-35000,50000,-
75000,15000,-10000,25000,-20000,15000,-25000,65000,-60000,90000,-
75000,125000,-100000,100000,-150000,5000,-40000,115000,-
100000,75000,-50000,40000,10000,-125000,75000,-100000,150000,-
150000,150000,-60000,-90000,150000,-100000,100000,-50000,50000,-
75000,-50000,100000,-115000,85000,-75000,80000,-100000,150000,-
150000,150000,-130000,30000,25000,-50000,75000,-50000,125000,-
50000,25000,-75000,100000,-35000,25000,-125000,90000,-
80000,50000,-70000,145000,-140000,90000,-75000,25000,65000,10000,-

```

```

125000,150000,-135000,60000,-75000,-60000,85000,45000,-
105000,60000,-100000,150000,-150000,150000,-
85000,10000,25000,50000,-150000};
//{5000,-10000,5000,-7000,10000,5000,-20000,5000,-5000,10000,-
5000,7000,-5000,10000,-7000,10000,-25000,10000,-5000,7000,5000,-
10000,5000,-7000,5000,-5000,20000,-5000,10000,-7000,10000,-
20000,10000,-5000,7000,-5000,20000,-10000,5000,-10000,10000,-
5000,10000,-20000,5000,-10000,5000,7000,-5000,5000,-10000,5000,-
7000,10000,-20000,5000,-10000,7000,-5000,7000,-7000,5000,-
5000,10000,-5000,7000,-5000,20000,-7000,5000,-10000,7000,-
5000,10000,-10000,-10000,5000,-5000,10000,-5000,5000,-10000,5000,-
20000,7000,-10000,20000,-5000,10000,-10000,5000,-10000,15000,-
5000,15000,-10000,5000,-10000,10000,-20000};
//{7000,-4000,5000,-6000,7000};

```

```

//{1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-4000,5000,-5000,6000,-
6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-9000,8000,-8000,7000,-
7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-4000,5000,-
5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-9000,-
8000,7000,-7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-3000,4000,-
4000,5000,-5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-9000,9000,-
9000,8000,-8000,7000,-7000,6000,1000,-1000,2000,-2000,3000,-
3000,4000,-4000,5000,-5000,6000,-6000,7000,-7000,8000,-8000,9000,-
9000,9000,-9000,8000,-8000,7000,-7000,6000};
//{5000,-10000,5000,-7000,1000,5000,-2000,5000,-5000,1000,-
5000,7000,-5000,1000,-7000,1000,-25000,1000,-5000,7000,5000,-
1000,5000,-7000,5000,-5000,2000,-5000,1000,-7000,1000,-
20000,10000,-5000,7000,-5000,20000,-10000,5000,-10000,10000,-
5000,10000,-20000,5000,-1000,5000,7000,-5000,5000,-1000,5000,-
7000,1000,-2000,5000,-1000,7000,-5000,7000,-7000,5000,-5000,1000,-
5000,7000,-5000,2000,-7000,5000,-1000,7000,-5000,1000,-1000,-
1000,5000,-5000,1000,-5000,5000,-1000,5000,-2000,7000,-1000,2000,-
5000,1000,-1000,5000,-1000,1500,-5000,1500,-1000,5000,-1000,1000,-
2000};
//{7000,-4000,5000,-6000,7000,1000,-3000,-2000,3000,-5000,6000,-
5000,7000,-2000,7000,-3000,7000,-2000,5000,-1000,3000,-4000,5000,-
3000,-6000,4000,7000,-7000,5000,-2000,8000,-5000,5000,-6000,2000,-
5000,6000,-4000,3000,-6000,4000,-5000,4000,3000,-7000,-5000,3000,-
3000,7000,-5000,6000,-3000,5000,-5000,8000,3000,-6000,-4000,5000,-
3000,6000,-5000,7000,-2000,4000,-4000,4000,-7000,4000,-3000,5000,-
1000,7000,-4000,-2000,4000,6000,-5000,-4000,5000,4000,-5000,-
1000,-4000,3000,5000,-6000,4000,5000,-7000,1000,-8000,5000,9000,-
4000,-5000,6000,-1000,4000,-4000};
//{7000,-4000,5000,-6000,7000};

```

```

int i=0, langkah;
char data;
int x = 1000, y=0;

```

```

void loop()
{
    digitalWrite(LED,HIGH);
    if(Serial.available() > 0){//8000,-4000,5000,-6000,7000,1000,-
3000,-2000,3000,-5000,6000,-5000,7000,-2000,9000,-3000,8000,-
2000,5000,-1000,3000,-4000,5000,-3000,-6000,4000,7000,-7000,5000,-
2000,8000,-5000,5000,-6000,2000,-5000,6000,-4000,3000,-6000,4000,-
5000,4000,3000,-7000,-5000,9000,-3000,7000,-5000,6000,-3000,9000,-

```

```

5000,8000,3000,-6000,-4000,5000,-3000,6000,-5000,7000,-2000,4000,-
4000,4000,-7000,4000,-3000,5000,-1000,9000,-4000,-2000,4000,6000,-
5000,-4000,5000,4000,-5000,-1000,-4000,3000,5000,-6000,4000,9000,-
7000,1000,-8000,5000,9000,-4000,-5000,6000,-1000,4000,-4000

```

```

    data = Serial.read();

//=====PENGATURAN
STEP=====
    if(data == 'i'){
        langkah = Serial.parseInt();
    }
//=====
=====

//=====elipsnoPIDbress=====
=====
    if(data == 'r'){
        while(i<=41){

            motor_1.setTargetRel(elip1[i]-random(1,300));
            motor_2.setTargetRel(elip2[i]-random(1,300));
            controller.move(motor_1,motor_2);
        }
        else{
            controller.stop();

        }
        i++;
    }
    i=0;
    Serial.println("ellips No PID, Bressenham");
}
//=====
=====//

//=====elipsPIDnoBress=====
=====
    if(data == 'f'){
        while(i<=41){
            if(i<=41){
                motor_1.setTargetRel(elip1[i]);
                motor_2.setTargetRel(elip2[i]);
                controller.move(motor_1);
                controller.move(motor_2);

            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("ellips PID, no bressenham completed");
    }
//=====
=====//

```

```

//=====elipsPIDbress=====
=====
    if(data == 'v'){
        while(i<=41){
            if(i<=41){
                motor_1.setTargetRel(elip1[i]);
                motor_2.setTargetRel(elip2[i]);

            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("ellips PID bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====lingkaranNoPIDbress=====
=====
    if(data == 't'){
        while(i<=713){
            if(i<=713){
                motor_1.setTargetRel(lingkaran1[i]-random(1,300));
                motor_2.setTargetRel(lingkaran2[i]-random(1,300));
                controller.move(motor_1,motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("lingkaran no PID, Bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====lingkaranPID no
Bress=====
    if(data == 'g'){
        while(i<=713){
            if(i<=713){
                motor_1.setTargetRel(lingkaran1[i]);
                motor_2.setTargetRel(lingkaran2[i]);
                controller.move(motor_1);
                controller.move(motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;

```

```

        Serial.println("lingkaran PID, No Bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====lingkaran=====
=====
    if(data == 'b'){
        while(i<=713){
            if(i<=713){
                motor_1.setTargetRel(lingkaran1[i]);
                motor_2.setTargetRel(lingkaran2[i]);
                controller.move(motor_1,motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();
            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("lingkaran PID Bress completed");
    }
//=====
=====//

//=====lisajous no PID
bress=====
    if(data == 'y'){
        while(i<=67){
            if(i<=67){
                motor_1.setTargetRel(lisa1[i]-random(1,300));
                motor_2.setTargetRel(lisa2[i]-random(1,300));
                controller.move(motor_1,motor_2);
                //controller.move(motor_1);
                //controller.move(motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();
            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("lissajous no PID, Bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====lisajousPID no
bress=====
    if(data == 'h'){
        while(i<=67){
            if(i<=67){
                motor_1.setTargetRel(lisa1[i]);
                motor_2.setTargetRel(lisa2[i]);
                //controller.move(motor_1,motor_2);
                controller.move(motor_1);
                controller.move(motor_2);
            }
        }
    }

```

```

    }
    else{
        controller.stop();

        }
        i++;
    }
    i=0;
    Serial.println("lissajous PID no Bressenham completed");
}
//=====
=====//

//=====lisajousAll=====
=====

if(data == 'n'){
    while(i<=67){
        if(i<=67){
            motor_1.setTargetRel(lisa1[i]);
            motor_2.setTargetRel(lisa2[i]);
            controller.move(motor_1,motor_2);
            //controller.move(motor_1);
            //controller.move(motor_2);
        }
        else{
            controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("lissajous PID, bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====gradien3/5 no PID
bress=====
if(data == 'u'){
    while(i<=17){
        if(i<=17){

            motor_1.setTargetRel(grad1[i]-random(1,300));
            motor_2.setTargetRel(grad2[i]-random(1,300));
            controller.move(motor_1,motor_2);
            //controller.move(motor_1);
            //controller.move(motor_2);
        }
        else{
            controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("gradien3/5 no PID Bressenham completed");
    }
}

```

```

//=====
=====//

//=====gradien3/5 PID no
bress=====
    if(data == 'j'){
        while(i<=17){
            if(i<=17){

                motor_1.setTargetRel(grad1[i]);
                motor_2.setTargetRel(grad2[i]);
                //controller.move(motor_1,motor_2);
                controller.move(motor_1);
                controller.move(motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("gradien3/5 PID no bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====gradien3/5=====
=====
    if(data == 'm'){
        while(i<=17){
            if(i<=17){

                motor_1.setTargetRel(grad1[i]);
                motor_2.setTargetRel(grad2[i]);
                controller.move(motor_1,motor_2);
                //controller.move(motor_1);
                //controller.move(motor_2);
            }
            else{
                controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("gradien3/5 PID Bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//=====gempaAll=====
=====
    if(data == 'k'){
        while(i<=3156){
            if(i<=3156){
                motor_1.setTargetRel(gemp1[i]);
                motor_2.setTargetRel(gemp2[i]);
                controller.move(motor_1,motor_2);
            }
        }
    }

```



```

    }
    else{
        controller.stop();

        }
        i++;
    }
    i=0;
    Serial.println("gempa completed");
}
//=====
=====//

//=====gempaNoBress=====
=====

if(data == 'l'){
    while(i<=121){
        if(i<=121){
            motor_1.setTargetRel(gemp1[i]);
            motor_2.setTargetRel(gemp2[i]);
            controller.move(motor_1);
            controller.move(motor_2);
        }
        else{
            controller.stop();

            }
            i++;
        }
        i=0;
        Serial.println("gempa no bressenham completed");
    }
//=====
=====//

//motor 1
=====//
    else if(data == 'a'){
//setpoint
        motor_1.setTargetRel(langkah); // 1/4 revolution
        controller.move(motor_1); //Sinkron
        Serial.println("motor 1 gerak +");
    }
    else if(data == 'd'){
//setpoint
        motor_1.setTargetRel(-langkah); // 1/4 revolution
        controller.move(motor_1); //Sinkron
        Serial.println("motor 1 gerak -");
    }
}
//=====
=====//

//motor 2
=====//
    else if(data == 'w'){
//setpoint
        motor_2.setTargetRel(langkah);
        controller.move(motor_2); //Sinkron
        Serial.println("motor 2 gerak +");
    }
}

```

```
    }
    else if(data == 's'){
        //setpoint
        motor_2.setTargetRel(-langkah);
        controller.move(motor_2); //Sinkron
        Serial.println("motor 2 gerak -");
    }
//=====
=====

}

}
```

LAMPIRAN F

Hasil pengujian model EST dan model EST dengan pengendali Proporsional

Gerak Gradien 3/5								
Data ke-	Input (cm)		Model EST (cm)		Model EST dengan pengendali P (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	Xout	Yout	Xout	Yout	Xout	Yout
1	0	1	-0,089	1,232	-0,058	1,232	∞	23,168
2	0,25	1,15	0,180	1,413	0,205	1,414	27,833	22,886
3	0,5	1,3	0,448	1,594	0,466	1,594	10,445	22,599
4	0,75	1,45	0,713	1,773	0,726	1,774	4,981	22,301
5	1	1,6	0,975	1,952	0,984	1,952	2,511	21,988
6	1,25	1,75	1,234	2,129	1,240	2,129	1,242	21,657
7	1,5	1,9	1,491	2,305	1,494	2,305	0,572	21,306
8	1,75	2,05	1,746	2,479	1,747	2,480	0,241	20,933
9	2	2,2	1,998	2,652	1,998	2,652	0,115	20,530
10	2,25	2,35	2,247	2,821	2,248	2,822	0,116	20,059
11	2,5	2,5	2,495	2,984	2,497	2,985	0,198	19,364
12	2,75	2,65	2,741	3,125	2,744	3,125	0,328	17,912
13	3	2,8	2,985	3,227	2,990	3,227	0,484	15,253
14	3,25	2,95	3,229	3,337	3,236	3,337	0,649	13,107
15	3,5	3,1	3,472	3,481	3,481	3,481	0,810	12,289
16	3,75	3,25	3,714	3,638	3,726	3,639	0,960	11,947
17	4	3,4	3,956	3,797	3,971	3,797	1,091	11,676
18	4,25	3,55	4,199	3,954	4,216	3,955	1,199	11,386

Gerak Elips								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)		Output Model EST dengan pengendali Proporsional (cm)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-5,000	0,000	-5,063	0,008	1,269	0,000	-5,046	0,008
2	-4,500	0,872	-4,674	1,076	3,861	23,414	-4,623	1,076
3	-4,000	1,200	-4,252	1,473	6,308	22,791	-4,175	1,474
4	-3,500	1,428	-3,798	1,747	8,526	22,345	-3,703	1,748
5	-3,000	1,600	-3,314	1,952	10,476	21,988	-3,209	1,952
6	-2,500	1,732	-2,804	2,108	12,177	21,697	-2,700	2,108
7	-2,000	1,833	-2,275	2,226	13,742	21,465	-2,179	2,227
8	-1,500	1,908	-1,732	2,314	15,483	21,287	-1,650	2,314
9	-1,000	1,960	-1,183	2,374	18,334	21,161	-1,118	2,375
10	-0,500	1,990	-0,634	2,410	26,813	21,085	-0,587	2,410
11	0,000	2,000	-0,089	2,421	0,000	21,060	-0,058	2,422
12	0,500	1,990	0,448	2,410	10,445	21,085	0,466	2,410
13	1,000	1,960	0,975	2,374	2,511	21,161	0,984	2,375
14	1,500	1,908	1,491	2,314	0,572	21,287	1,494	2,314
15	2,000	1,833	1,998	2,226	0,115	21,465	1,998	2,227
16	2,500	1,732	2,495	2,108	0,198	21,697	2,497	2,108
17	3,000	1,600	2,985	1,952	0,484	21,988	2,990	1,952
18	3,500	1,428	3,472	1,747	0,810	22,345	3,481	1,748
19	4,000	1,200	3,956	1,473	1,091	22,791	3,971	1,474
20	4,500	0,872	4,442	1,076	1,286	23,414	4,461	1,076
21	5,000	0,000	4,930	0,008	1,409	0,000	4,953	0,008
22	4,500	-0,872	4,442	-1,059	1,286	21,510	4,461	-1,059
23	4,000	-1,200	3,956	-1,456	1,091	21,293	3,971	-1,455
24	3,500	-1,428	3,472	-1,728	0,810	21,003	3,481	-1,728
25	3,000	-1,600	2,985	-1,932	0,484	20,727	2,990	-1,931
26	2,500	-1,732	2,495	-2,087	0,198	20,484	2,497	-2,086

Gerak Elips								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Error Model EST (%)		Output Model EST dengan pengendali Proporsional (cm)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
27	2,000	-1,833	1,998	-2,205	0,115	20,282	1,998	-2,204
28	1,500	-1,908	1,491	-2,292	0,572	20,124	1,494	-2,291
29	1,000	-1,960	0,975	-2,352	2,511	20,010	0,984	-2,351
30	0,500	-1,990	0,448	-2,387	10,445	19,941	0,466	-2,386
31	0,000	-2,000	-0,089	-2,398	0,000	19,919	-0,058	-2,398
32	-0,500	-1,990	-0,634	-2,387	26,813	19,941	-0,587	-2,386
33	-1,000	-1,960	-1,183	-2,352	18,334	20,010	-1,118	-2,351
34	-1,500	-1,908	-1,732	-2,292	15,483	20,124	-1,650	-2,291
35	-2,000	-1,833	-2,275	-2,205	13,742	20,282	-2,179	-2,204
36	-2,500	-1,732	-2,804	-2,087	12,177	20,484	-2,700	-2,086
37	-3,000	-1,600	-3,314	-1,932	10,476	20,727	-3,209	-1,931
38	-3,500	-1,428	-3,798	-1,728	8,526	21,003	-3,703	-1,728
39	-4,000	-1,200	-4,252	-1,456	6,308	21,293	-4,175	-1,455
40	-4,500	-0,872	-4,674	-1,059	3,861	21,510	-4,623	-1,059
41	-5,000	0,000	-5,063	0,008	1,269	0,000	-5,046	0,008

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	5,000	0,000	4,930	0,008	4,953	0,008	1,409	#DIV/0!
2	5,000	0,044	4,929	0,062	4,952	0,062	1,409	39,938
3	4,999	0,088	4,929	0,116	4,952	0,116	1,409	31,440
4	4,998	0,133	4,928	0,171	4,951	0,171	1,409	28,606
5	4,997	0,177	4,926	0,225	4,950	0,225	1,409	27,185
6	4,995	0,221	4,925	0,279	4,948	0,279	1,408	26,329
7	4,993	0,265	4,923	0,333	4,946	0,334	1,408	25,754
8	4,990	0,309	4,920	0,388	4,943	0,388	1,407	25,338
9	4,987	0,353	4,917	0,442	4,940	0,442	1,407	25,021
10	4,984	0,397	4,914	0,496	4,937	0,496	1,406	24,769
11	4,980	0,442	4,910	0,550	4,933	0,550	1,405	24,562
12	4,976	0,486	4,906	0,604	4,929	0,604	1,404	24,387
13	4,972	0,530	4,902	0,658	4,925	0,658	1,403	24,235
14	4,967	0,573	4,897	0,712	4,920	0,712	1,402	24,101
15	4,962	0,617	4,892	0,765	4,915	0,766	1,401	23,979
16	4,956	0,661	4,887	0,819	4,909	0,819	1,400	23,868
17	4,950	0,705	4,881	0,873	4,904	0,873	1,399	23,765
18	4,944	0,749	4,875	0,926	4,897	0,926	1,397	23,668
19	4,937	0,792	4,868	0,979	4,890	0,979	1,396	23,575
20	4,930	0,836	4,861	1,032	4,883	1,033	1,394	23,486
21	4,922	0,880	4,853	1,085	4,876	1,086	1,392	23,399
22	4,914	0,923	4,846	1,138	4,868	1,139	1,391	23,315
23	4,906	0,966	4,838	1,191	4,860	1,191	1,389	23,232
24	4,897	1,010	4,829	1,244	4,851	1,244	1,387	23,149
25	4,888	1,053	4,820	1,296	4,842	1,296	1,385	23,068
26	4,878	1,096	4,811	1,348	4,833	1,349	1,383	22,987
27	4,868	1,139	4,801	1,400	4,823	1,401	1,381	22,906
28	4,858	1,182	4,791	1,452	4,813	1,453	1,378	22,824
29	4,848	1,225	4,781	1,504	4,803	1,504	1,376	22,743
30	4,837	1,268	4,770	1,555	4,792	1,556	1,373	22,661
31	4,825	1,311	4,759	1,607	4,781	1,607	1,371	22,578
32	4,813	1,353	4,747	1,658	4,769	1,658	1,368	22,494

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
33	4,801	1,396	4,736	1,709	4,757	1,709	1,365	22,410
34	4,789	1,438	4,723	1,759	4,745	1,760	1,362	22,324
35	4,776	1,481	4,711	1,810	4,732	1,810	1,359	22,238
36	4,762	1,523	4,698	1,860	4,719	1,860	1,356	22,151
37	4,749	1,565	4,685	1,910	4,706	1,910	1,353	22,063
38	4,735	1,607	4,671	1,960	4,692	1,960	1,350	21,973
39	4,720	1,649	4,657	2,009	4,678	2,010	1,346	21,882
40	4,706	1,690	4,642	2,059	4,663	2,059	1,342	21,791
41	4,691	1,732	4,628	2,108	4,648	2,108	1,339	21,698
42	4,675	1,773	4,613	2,156	4,633	2,157	1,335	21,604
43	4,659	1,814	4,597	2,205	4,617	2,205	1,331	21,509
44	4,643	1,856	4,581	2,253	4,602	2,253	1,326	21,412
45	4,626	1,897	4,565	2,301	4,585	2,301	1,322	21,314
46	4,609	1,937	4,549	2,348	4,569	2,349	1,317	21,215
47	4,592	1,978	4,532	2,396	4,552	2,396	1,313	21,115
48	4,574	2,019	4,515	2,443	4,534	2,443	1,308	21,013
49	4,556	2,059	4,497	2,489	4,516	2,490	1,302	20,910
50	4,538	2,099	4,479	2,536	4,498	2,536	1,297	20,805
51	4,519	2,139	4,461	2,582	4,480	2,582	1,292	20,698
52	4,500	2,179	4,442	2,628	4,461	2,628	1,286	20,589
53	4,481	2,219	4,423	2,673	4,442	2,674	1,280	20,476
54	4,461	2,258	4,404	2,718	4,423	2,719	1,274	20,359
55	4,441	2,298	4,385	2,763	4,403	2,763	1,267	20,236
56	4,420	2,337	4,365	2,807	4,383	2,807	1,261	20,106
57	4,399	2,376	4,344	2,850	4,362	2,851	1,254	19,964
58	4,378	2,415	4,324	2,893	4,342	2,893	1,246	19,806
59	4,357	2,453	4,303	2,935	4,320	2,935	1,239	19,626
60	4,335	2,492	4,282	2,975	4,299	2,976	1,231	19,415
61	4,313	2,530	4,260	3,015	4,277	3,015	1,223	19,161
62	4,290	2,568	4,238	3,052	4,255	3,052	1,215	18,851
63	4,267	2,606	4,216	3,087	4,233	3,087	1,206	18,469
64	4,244	2,643	4,193	3,119	4,210	3,120	1,197	18,003
65	4,221	2,681	4,170	3,149	4,187	3,149	1,188	17,447
66	4,197	2,718	4,147	3,175	4,163	3,175	1,178	16,809
67	4,173	2,755	4,124	3,199	4,140	3,199	1,168	16,115
68	4,148	2,792	4,100	3,222	4,116	3,222	1,158	15,408
69	4,123	2,828	4,076	3,245	4,091	3,245	1,147	14,735
70	4,098	2,865	4,051	3,270	4,067	3,270	1,136	14,137
71	4,072	2,901	4,027	3,296	4,042	3,297	1,125	13,635
72	4,047	2,937	4,002	3,325	4,016	3,326	1,113	13,233
73	4,021	2,972	3,976	3,356	3,991	3,357	1,100	12,921
74	3,994	3,008	3,951	3,389	3,965	3,390	1,088	12,683
75	3,967	3,043	3,925	3,423	3,939	3,424	1,075	12,502
76	3,940	3,078	3,898	3,458	3,912	3,459	1,061	12,362
77	3,913	3,113	3,872	3,494	3,885	3,494	1,047	12,251
78	3,885	3,147	3,845	3,530	3,858	3,530	1,033	12,160
79	3,857	3,181	3,818	3,566	3,831	3,566	1,019	12,082
80	3,829	3,215	3,791	3,602	3,803	3,602	1,003	12,012
81	3,800	3,249	3,763	3,637	3,775	3,638	0,988	11,948
82	3,772	3,283	3,735	3,673	3,747	3,673	0,972	11,887
83	3,742	3,316	3,707	3,708	3,718	3,708	0,956	11,827
84	3,713	3,349	3,678	3,743	3,689	3,743	0,939	11,768
85	3,683	3,381	3,649	3,777	3,660	3,778	0,921	11,709

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
86	3,653	3,414	3,620	3,812	3,631	3,812	0,904	11,650
87	3,623	3,446	3,591	3,845	3,601	3,846	0,886	11,590
88	3,592	3,478	3,561	3,879	3,571	3,879	0,867	11,529
89	3,561	3,510	3,531	3,912	3,541	3,912	0,848	11,467
90	3,530	3,541	3,501	3,945	3,510	3,945	0,829	11,404
91	3,499	3,572	3,470	3,977	3,480	3,978	0,810	11,340
92	3,467	3,603	3,440	4,009	3,449	4,009	0,790	11,275
93	3,435	3,633	3,409	4,041	3,417	4,041	0,769	11,210
94	3,403	3,664	3,377	4,072	3,386	4,072	0,748	11,143
95	3,370	3,694	3,346	4,103	3,354	4,103	0,727	11,076
96	3,337	3,723	3,314	4,133	3,322	4,133	0,706	11,008
97	3,304	3,753	3,282	4,163	3,289	4,163	0,684	10,940
98	3,271	3,782	3,249	4,193	3,256	4,193	0,663	10,870
99	3,237	3,810	3,217	4,222	3,223	4,222	0,640	10,801
100	3,204	3,839	3,184	4,251	3,190	4,251	0,618	10,730
101	3,170	3,867	3,151	4,279	3,157	4,280	0,595	10,660
102	3,135	3,895	3,117	4,307	3,123	4,308	0,573	10,589
103	3,101	3,922	3,084	4,335	3,089	4,335	0,550	10,518
104	3,066	3,950	3,050	4,362	3,055	4,363	0,527	10,446
105	3,031	3,977	3,016	4,389	3,021	4,390	0,504	10,374
106	2,996	4,003	2,981	4,416	2,986	4,416	0,481	10,302
107	2,960	4,030	2,946	4,442	2,951	4,442	0,458	10,230
108	2,924	4,056	2,912	4,468	2,916	4,468	0,435	10,158
109	2,888	4,081	2,876	4,493	2,880	4,493	0,412	10,086
110	2,852	4,107	2,841	4,518	2,845	4,518	0,390	10,014
111	2,816	4,132	2,805	4,543	2,809	4,543	0,367	9,943
112	2,779	4,157	2,769	4,567	2,773	4,567	0,345	9,871
113	2,742	4,181	2,733	4,591	2,736	4,591	0,323	9,799
114	2,705	4,205	2,697	4,614	2,700	4,614	0,302	9,728
115	2,668	4,229	2,660	4,637	2,663	4,638	0,281	9,657
116	2,630	4,252	2,623	4,660	2,626	4,660	0,261	9,586
117	2,593	4,275	2,586	4,682	2,588	4,683	0,242	9,516
118	2,555	4,298	2,549	4,704	2,551	4,704	0,223	9,446
119	2,517	4,320	2,511	4,726	2,513	4,726	0,205	9,377
120	2,478	4,343	2,474	4,747	2,475	4,747	0,189	9,308
121	2,440	4,364	2,436	4,768	2,437	4,768	0,173	9,239
122	2,401	4,386	2,397	4,788	2,399	4,788	0,158	9,172
123	2,362	4,407	2,359	4,808	2,360	4,808	0,145	9,104
124	2,323	4,427	2,320	4,828	2,321	4,828	0,134	9,038
125	2,284	4,448	2,281	4,847	2,282	4,847	0,123	8,972
126	2,245	4,468	2,242	4,866	2,243	4,866	0,115	8,906
127	2,205	4,488	2,203	4,884	2,203	4,885	0,109	8,842
128	2,165	4,507	2,163	4,902	2,164	4,903	0,105	8,778
129	2,125	4,526	2,123	4,920	2,124	4,921	0,103	8,715
130	2,085	4,544	2,083	4,938	2,084	4,938	0,104	8,653
131	2,045	4,563	2,043	4,955	2,043	4,955	0,107	8,591
132	2,005	4,581	2,002	4,971	2,003	4,972	0,114	8,531
133	1,964	4,598	1,962	4,988	1,962	4,988	0,124	8,471
134	1,923	4,615	1,921	5,004	1,921	5,004	0,137	8,412
135	1,882	4,632	1,879	5,019	1,880	5,020	0,155	8,355
136	1,841	4,649	1,838	5,034	1,839	5,035	0,176	8,298
137	1,800	4,665	1,796	5,049	1,798	5,050	0,203	8,242
138	1,759	4,680	1,755	5,064	1,756	5,064	0,234	8,187

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
139	1,717	4,696	1,713	5,078	1,714	5,078	0,271	8,134
140	1,676	4,711	1,671	5,091	1,672	5,092	0,314	8,081
141	1,634	4,725	1,628	5,105	1,630	5,105	0,363	8,029
142	1,592	4,740	1,586	5,118	1,588	5,118	0,420	7,979
143	1,550	4,754	1,543	5,131	1,545	5,131	0,484	7,930
144	1,508	4,767	1,500	5,143	1,503	5,143	0,557	7,881
145	1,466	4,780	1,457	5,155	1,460	5,155	0,640	7,834
146	1,424	4,793	1,413	5,166	1,417	5,167	0,732	7,788
147	1,381	4,805	1,370	5,178	1,374	5,178	0,837	7,744
148	1,339	4,817	1,326	5,188	1,330	5,189	0,953	7,700
149	1,296	4,829	1,282	5,199	1,287	5,199	1,084	7,658
150	1,253	4,840	1,238	5,209	1,243	5,209	1,230	7,617
151	1,210	4,851	1,194	5,219	1,199	5,219	1,393	7,578
152	1,167	4,862	1,149	5,228	1,155	5,229	1,575	7,539
153	1,124	4,872	1,104	5,237	1,111	5,238	1,779	7,502
154	1,081	4,882	1,060	5,246	1,067	5,246	2,006	7,466
155	1,038	4,891	1,015	5,255	1,023	5,255	2,261	7,432
156	0,995	4,900	0,969	5,263	0,978	5,263	2,547	7,399
157	0,951	4,909	0,924	5,270	0,934	5,271	2,867	7,367
158	0,908	4,917	0,879	5,278	0,889	5,278	3,228	7,337
159	0,864	4,925	0,833	5,285	0,844	5,285	3,634	7,308
160	0,821	4,932	0,787	5,291	0,799	5,292	4,095	7,280
161	0,777	4,939	0,741	5,297	0,754	5,298	4,618	7,254
162	0,734	4,946	0,695	5,303	0,709	5,304	5,215	7,229
163	0,690	4,952	0,649	5,309	0,663	5,309	5,901	7,205
164	0,646	4,958	0,603	5,314	0,618	5,315	6,692	7,183
165	0,602	4,964	0,556	5,319	0,572	5,319	7,614	7,163
166	0,558	4,969	0,510	5,324	0,527	5,324	8,695	7,143
167	0,514	4,973	0,463	5,328	0,481	5,328	9,978	7,126
168	0,470	4,978	0,416	5,332	0,435	5,332	11,518	7,109
169	0,426	4,982	0,369	5,335	0,389	5,336	13,396	7,094
170	0,382	4,985	0,322	5,338	0,343	5,339	15,728	7,081
171	0,338	4,989	0,275	5,341	0,297	5,342	18,693	7,069
172	0,294	4,991	0,228	5,344	0,251	5,344	22,575	7,058
173	0,250	4,994	0,180	5,346	0,205	5,346	27,860	7,049
174	0,206	4,996	0,133	5,348	0,158	5,348	35,453	7,042
175	0,161	4,997	0,085	5,349	0,112	5,349	47,248	7,036
176	0,117	4,999	0,038	5,350	0,065	5,350	67,996	7,031
177	0,073	4,999	-0,010	5,351	0,019	5,351	113,944	7,028
178	0,029	5,000	-0,058	5,351	-0,028	5,352	300,878	7,026
179	-0,015	5,000	-0,106	5,351	-0,074	5,352	589,675	7,026
180	-0,060	5,000	-0,154	5,351	-0,121	5,351	158,178	7,027
181	-0,104	4,999	-0,202	5,350	-0,167	5,351	94,422	7,030
182	-0,148	4,998	-0,250	5,349	-0,214	5,350	68,803	7,034
183	-0,192	4,996	-0,298	5,348	-0,261	5,348	55,001	7,040
184	-0,236	4,994	-0,346	5,346	-0,307	5,347	46,385	7,047
185	-0,280	4,992	-0,394	5,344	-0,354	5,345	40,502	7,056
186	-0,325	4,989	-0,442	5,342	-0,401	5,342	36,237	7,066
187	-0,369	4,986	-0,490	5,339	-0,447	5,340	33,007	7,077
188	-0,413	4,983	-0,539	5,336	-0,494	5,337	30,479	7,090
189	-0,457	4,979	-0,587	5,333	-0,541	5,333	28,449	7,105
190	-0,501	4,975	-0,635	5,329	-0,587	5,329	26,785	7,120
191	-0,545	4,970	-0,683	5,325	-0,634	5,325	25,397	7,138

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
192	-0,589	4,965	-0,731	5,321	-0,681	5,321	24,223	7,157
193	-0,633	4,960	-0,779	5,316	-0,727	5,316	23,218	7,177
194	-0,676	4,954	-0,828	5,311	-0,774	5,311	22,348	7,198
195	-0,720	4,948	-0,876	5,305	-0,821	5,305	21,588	7,221
196	-0,764	4,941	-0,924	5,299	-0,867	5,300	20,918	7,246
197	-0,808	4,934	-0,972	5,293	-0,913	5,293	20,324	7,272
198	-0,851	4,927	-1,020	5,287	-0,960	5,287	19,793	7,299
199	-0,895	4,919	-1,068	5,280	-1,006	5,280	19,315	7,328
200	-0,938	4,911	-1,115	5,273	-1,052	5,273	18,884	7,358
201	-0,982	4,903	-1,163	5,265	-1,099	5,265	18,491	7,389
202	-1,025	4,894	-1,211	5,257	-1,145	5,257	18,132	7,422
203	-1,068	4,885	-1,258	5,249	-1,191	5,249	17,803	7,456
204	-1,111	4,875	-1,306	5,240	-1,237	5,240	17,499	7,491
205	-1,154	4,865	-1,353	5,231	-1,283	5,231	17,217	7,528
206	-1,197	4,855	-1,400	5,222	-1,328	5,222	16,955	7,566
207	-1,240	4,844	-1,447	5,212	-1,374	5,212	16,710	7,605
208	-1,283	4,833	-1,494	5,202	-1,419	5,202	16,480	7,646
209	-1,326	4,821	-1,541	5,192	-1,465	5,192	16,263	7,687
210	-1,368	4,809	-1,588	5,181	-1,510	5,181	16,059	7,730
211	-1,411	4,797	-1,634	5,170	-1,555	5,170	15,865	7,775
212	-1,453	4,784	-1,727	5,147	-1,645	5,147	18,861	7,573
213	-1,495	4,771	-1,773	5,134	-1,690	5,135	18,583	7,611
214	-1,537	4,758	-1,819	5,122	-1,734	5,122	18,318	7,651
215	-1,579	4,744	-1,865	5,109	-1,779	5,109	18,063	7,692
216	-1,621	4,730	-1,910	5,096	-1,823	5,096	17,820	7,733
217	-1,663	4,715	-1,955	5,082	-1,867	5,082	17,585	7,776
218	-1,705	4,700	-2,001	5,068	-1,911	5,068	17,359	7,820
219	-1,746	4,685	-2,045	5,054	-1,955	5,054	17,140	7,864
220	-1,787	4,670	-2,090	5,039	-1,998	5,039	16,928	7,910
221	-1,829	4,654	-2,135	5,024	-2,042	5,024	16,722	7,956
222	-1,870	4,637	-2,179	5,008	-2,085	5,009	16,521	8,004
223	-1,911	4,621	-2,223	4,993	-2,128	4,993	16,326	8,052
224	-1,951	4,603	-2,266	4,976	-2,170	4,977	16,135	8,101
225	-1,992	4,586	-2,310	4,960	-2,213	4,960	15,948	8,151
226	-2,033	4,568	-2,353	4,943	-2,255	4,943	15,765	8,202
227	-2,073	4,550	-2,396	4,926	-2,297	4,926	15,585	8,254
228	-2,113	4,532	-2,439	4,908	-2,339	4,908	15,408	8,306
229	-2,153	4,513	-2,481	4,890	-2,381	4,890	15,233	8,359
230	-2,193	4,493	-2,523	4,871	-2,422	4,872	15,061	8,412
231	-2,233	4,474	-2,565	4,853	-2,463	4,853	14,891	8,467
232	-2,272	4,454	-2,606	4,834	-2,504	4,834	14,723	8,521
233	-2,311	4,434	-2,648	4,814	-2,545	4,814	14,557	8,577
234	-2,350	4,413	-2,689	4,794	-2,585	4,794	14,392	8,633
235	-2,389	4,392	-2,729	4,774	-2,626	4,774	14,228	8,689
236	-2,428	4,371	-2,770	4,753	-2,665	4,754	14,066	8,746
237	-2,467	4,349	-2,810	4,732	-2,705	4,732	13,905	8,803
238	-2,505	4,327	-2,849	4,711	-2,744	4,711	13,745	8,861
239	-2,543	4,305	-2,889	4,689	-2,783	4,689	13,585	8,919
240	-2,581	4,282	-2,928	4,667	-2,822	4,667	13,427	8,977
241	-2,619	4,259	-2,966	4,644	-2,861	4,645	13,269	9,035
242	-2,656	4,236	-3,005	4,621	-2,899	4,622	13,111	9,094
243	-2,694	4,212	-3,043	4,598	-2,937	4,598	12,954	9,153
244	-2,731	4,188	-3,080	4,574	-2,975	4,575	12,797	9,211

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
245	-2,768	4,164	-3,118	4,550	-3,012	4,550	12,641	9,270
246	-2,805	4,139	-3,155	4,526	-3,049	4,526	12,485	9,329
247	-2,841	4,114	-3,191	4,501	-3,086	4,501	12,330	9,388
248	-2,877	4,089	-3,228	4,475	-3,122	4,476	12,175	9,447
249	-2,913	4,064	-3,264	4,450	-3,158	4,450	12,020	9,505
250	-2,949	4,038	-3,299	4,424	-3,194	4,424	11,865	9,564
251	-2,985	4,011	-3,334	4,397	-3,230	4,398	11,710	9,622
252	-3,020	3,985	-3,369	4,371	-3,265	4,371	11,556	9,680
253	-3,055	3,958	-3,404	4,343	-3,300	4,344	11,402	9,737
254	-3,090	3,931	-3,438	4,316	-3,334	4,316	11,248	9,794
255	-3,125	3,903	-3,471	4,288	-3,368	4,288	11,094	9,851
256	-3,159	3,876	-3,505	4,260	-3,402	4,260	10,941	9,907
257	-3,193	3,847	-3,538	4,231	-3,436	4,231	10,787	9,962
258	-3,227	3,819	-3,570	4,202	-3,469	4,202	10,634	10,017
259	-3,261	3,790	-3,603	4,172	-3,502	4,173	10,481	10,070
260	-3,294	3,761	-3,634	4,142	-3,534	4,143	10,329	10,124
261	-3,327	3,732	-3,666	4,112	-3,567	4,112	10,177	10,176
262	-3,360	3,703	-3,697	4,081	-3,598	4,082	10,025	10,227
263	-3,393	3,673	-3,728	4,050	-3,630	4,051	9,873	10,277
264	-3,425	3,643	-3,758	4,019	-3,661	4,019	9,722	10,326
265	-3,457	3,612	-3,788	3,987	-3,692	3,987	9,571	10,374
266	-3,489	3,581	-3,818	3,955	-3,722	3,955	9,420	10,421
267	-3,521	3,550	-3,847	3,922	-3,753	3,923	9,270	10,466
268	-3,552	3,519	-3,876	3,889	-3,782	3,890	9,120	10,510
269	-3,583	3,488	-3,904	3,856	-3,812	3,856	8,971	10,553
270	-3,613	3,456	-3,932	3,822	-3,841	3,822	8,823	10,595
271	-3,644	3,424	-3,960	3,788	-3,870	3,788	8,675	10,636
272	-3,674	3,391	-3,987	3,753	-3,898	3,754	8,527	10,676
273	-3,704	3,359	-4,014	3,719	-3,926	3,719	8,381	10,715
274	-3,733	3,326	-4,041	3,684	-3,954	3,684	8,235	10,754
275	-3,763	3,293	-4,067	3,648	-3,981	3,649	8,089	10,794
276	-3,792	3,259	-4,093	3,613	-4,008	3,613	7,945	10,836
277	-3,820	3,226	-4,118	3,577	-4,035	3,577	7,801	10,882
278	-3,849	3,192	-4,143	3,541	-4,061	3,541	7,658	10,935
279	-3,877	3,158	-4,168	3,505	-4,087	3,505	7,516	10,999
280	-3,904	3,123	-4,192	3,469	-4,112	3,470	7,374	11,079
281	-3,932	3,089	-4,216	3,434	-4,137	3,434	7,234	11,185
282	-3,959	3,054	-4,240	3,400	-4,162	3,400	7,095	11,327
283	-3,986	3,019	-4,263	3,366	-4,187	3,367	6,957	11,519
284	-4,012	2,983	-4,286	3,335	-4,211	3,335	6,819	11,779
285	-4,039	2,948	-4,309	3,305	-4,235	3,305	6,683	12,122
286	-4,065	2,912	-4,331	3,278	-4,258	3,278	6,548	12,561
287	-4,090	2,876	-4,353	3,252	-4,281	3,253	6,414	13,098
288	-4,115	2,840	-4,374	3,229	-4,304	3,229	6,281	13,716
289	-4,140	2,803	-4,395	3,206	-4,326	3,206	6,150	14,380
290	-4,165	2,766	-4,416	3,182	-4,348	3,183	6,019	15,044
291	-4,189	2,729	-4,436	3,157	-4,370	3,157	5,890	15,664
292	-4,213	2,692	-4,456	3,129	-4,391	3,129	5,763	16,207
293	-4,237	2,655	-4,476	3,097	-4,412	3,098	5,636	16,662
294	-4,260	2,617	-4,495	3,063	-4,432	3,063	5,512	17,029
295	-4,283	2,580	-4,514	3,026	-4,452	3,027	5,388	17,320
296	-4,306	2,542	-4,533	2,988	-4,472	2,988	5,266	17,550
297	-4,328	2,503	-4,551	2,947	-4,492	2,948	5,145	17,733

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
298	-4,350	2,465	-4,569	2,906	-4,511	2,906	5,026	17,881
299	-4,372	2,426	-4,586	2,863	-4,530	2,864	4,908	18,003
300	-4,393	2,388	-4,604	2,820	-4,548	2,821	4,792	18,106
301	-4,414	2,349	-4,620	2,776	-4,566	2,777	4,678	18,196
302	-4,435	2,310	-4,637	2,732	-4,584	2,732	4,565	18,275
303	-4,455	2,270	-4,653	2,687	-4,601	2,687	4,454	18,346
304	-4,475	2,231	-4,669	2,642	-4,618	2,642	4,344	18,412
305	-4,494	2,191	-4,685	2,596	-4,635	2,596	4,236	18,472
306	-4,513	2,151	-4,700	2,550	-4,652	2,550	4,130	18,528
307	-4,532	2,111	-4,715	2,504	-4,668	2,504	4,025	18,579
308	-4,551	2,071	-4,729	2,457	-4,683	2,458	3,923	18,627
309	-4,569	2,031	-4,744	2,410	-4,699	2,411	3,822	18,671
310	-4,587	1,990	-4,757	2,363	-4,714	2,363	3,722	18,711
311	-4,604	1,950	-4,771	2,315	-4,728	2,316	3,625	18,747
312	-4,621	1,909	-4,784	2,268	-4,743	2,268	3,529	18,780
313	-4,638	1,868	-4,797	2,219	-4,757	2,220	3,435	18,808
314	-4,654	1,827	-4,810	2,171	-4,770	2,172	3,343	18,832
315	-4,670	1,786	-4,822	2,122	-4,784	2,123	3,253	18,851
316	-4,686	1,744	-4,834	2,074	-4,797	2,074	3,165	18,866
317	-4,701	1,703	-4,846	2,024	-4,809	2,025	3,078	18,875
318	-4,716	1,661	-4,857	1,975	-4,821	1,975	2,994	18,880
319	-4,730	1,620	-4,868	1,925	-4,833	1,926	2,911	18,879
320	-4,745	1,578	-4,879	1,875	-4,845	1,876	2,831	18,872
321	-4,758	1,536	-4,889	1,825	-4,856	1,826	2,752	18,859
322	-4,772	1,493	-4,899	1,775	-4,867	1,775	2,675	18,839
323	-4,785	1,451	-4,909	1,724	-4,878	1,725	2,601	18,811
324	-4,797	1,409	-4,919	1,673	-4,888	1,674	2,528	18,777
325	-4,810	1,366	-4,928	1,622	-4,898	1,623	2,457	18,733
326	-4,822	1,324	-4,937	1,571	-4,908	1,571	2,388	18,681
327	-4,833	1,281	-4,945	1,520	-4,917	1,520	2,321	18,620
328	-4,844	1,238	-4,954	1,468	-4,926	1,468	2,256	18,547
329	-4,855	1,195	-4,961	1,416	-4,935	1,417	2,193	18,464
330	-4,865	1,153	-4,969	1,364	-4,943	1,365	2,133	18,368
331	-4,875	1,109	-4,976	1,312	-4,951	1,312	2,074	18,258
332	-4,885	1,066	-4,984	1,260	-4,959	1,260	2,017	18,132
333	-4,894	1,023	-4,990	1,207	-4,966	1,207	1,962	17,990
334	-4,903	0,980	-4,997	1,154	-4,973	1,155	1,909	17,829
335	-4,912	0,936	-5,003	1,102	-4,980	1,102	1,859	17,646
336	-4,920	0,893	-5,009	1,049	-4,986	1,049	1,810	17,440
337	-4,927	0,849	-5,014	0,995	-4,992	0,996	1,763	17,205
338	-4,935	0,806	-5,019	0,942	-4,998	0,942	1,719	16,939
339	-4,942	0,762	-5,024	0,889	-5,003	0,889	1,676	16,636
340	-4,948	0,718	-5,029	0,835	-5,009	0,836	1,636	16,289
341	-4,954	0,675	-5,033	0,782	-5,013	0,782	1,597	15,891
342	-4,960	0,631	-5,037	0,728	-5,018	0,728	1,561	15,432
343	-4,965	0,587	-5,041	0,674	-5,022	0,674	1,527	14,897
344	-4,970	0,543	-5,045	0,620	-5,026	0,621	1,495	14,270
345	-4,975	0,499	-5,048	0,566	-5,029	0,567	1,464	13,525
346	-4,979	0,455	-5,051	0,512	-5,032	0,513	1,436	12,631
347	-4,983	0,411	-5,053	0,458	-5,035	0,458	1,410	11,538
348	-4,987	0,367	-5,056	0,404	-5,038	0,404	1,386	10,178
349	-4,990	0,323	-5,058	0,350	-5,040	0,350	1,364	8,439
350	-4,992	0,279	-5,059	0,296	-5,042	0,296	1,344	6,145

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
351	-4,994	0,234	-5,061	0,241	-5,043	0,242	1,327	2,981
352	-4,996	0,190	-5,062	0,187	-5,044	0,187	1,311	1,656
353	-4,998	0,146	-5,063	0,133	-5,045	0,133	1,297	9,101
354	-4,999	0,102	-5,063	0,078	-5,046	0,079	1,285	23,003
355	-5,000	0,058	-5,063	0,024	-5,046	0,024	1,276	58,194
356	-5,000	0,014	-5,063	-0,030	-5,046	-0,030	1,268	323,531
357	-5,000	-0,031	-5,063	-0,085	-5,046	-0,085	1,263	175,495
358	-4,999	-0,075	-5,062	-0,139	-5,045	-0,139	1,260	85,419
359	-4,999	-0,119	-5,061	-0,193	-5,044	-0,193	1,258	62,195
360	-4,997	-0,163	-5,060	-0,247	-5,043	-0,247	1,259	51,533
361	-4,996	-0,207	-5,059	-0,302	-5,041	-0,302	1,262	45,402
362	-4,994	-0,252	-5,057	-0,356	-5,039	-0,356	1,266	41,415
363	-4,991	-0,296	-5,055	-0,410	-5,037	-0,410	1,273	38,609
364	-4,988	-0,340	-5,052	-0,464	-5,034	-0,464	1,282	36,524
365	-4,985	-0,384	-5,050	-0,518	-5,031	-0,518	1,293	34,908
366	-4,982	-0,428	-5,047	-0,572	-5,028	-0,572	1,306	33,618
367	-4,978	-0,472	-5,043	-0,626	-5,024	-0,626	1,321	32,560
368	-4,973	-0,516	-5,040	-0,680	-5,020	-0,679	1,338	31,674
369	-4,969	-0,560	-5,036	-0,733	-5,016	-0,733	1,357	30,919
370	-4,963	-0,604	-5,032	-0,787	-5,011	-0,787	1,378	30,266
371	-4,958	-0,648	-5,027	-0,840	-5,007	-0,840	1,401	29,694
372	-4,952	-0,692	-5,023	-0,893	-5,001	-0,893	1,426	29,187
373	-4,946	-0,735	-5,017	-0,947	-4,996	-0,946	1,452	28,733
374	-4,939	-0,779	-5,012	-1,000	-4,990	-0,999	1,481	28,321
375	-4,932	-0,823	-5,006	-1,053	-4,984	-1,052	1,512	27,947
376	-4,924	-0,866	-5,000	-1,105	-4,977	-1,105	1,545	27,602
377	-4,917	-0,910	-4,994	-1,158	-4,971	-1,158	1,580	27,283
378	-4,908	-0,953	-4,988	-1,210	-4,963	-1,210	1,617	26,986
379	-4,900	-0,997	-4,981	-1,263	-4,956	-1,262	1,656	26,707
380	-4,891	-1,040	-4,974	-1,315	-4,948	-1,315	1,697	26,445
381	-4,881	-1,083	-4,966	-1,367	-4,940	-1,367	1,739	26,196
382	-4,872	-1,126	-4,958	-1,419	-4,931	-1,418	1,784	25,960
383	-4,861	-1,169	-4,950	-1,470	-4,923	-1,470	1,830	25,733
384	-4,851	-1,212	-4,942	-1,521	-4,914	-1,521	1,879	25,516
385	-4,840	-1,255	-4,933	-1,573	-4,904	-1,572	1,929	25,308
386	-4,829	-1,298	-4,924	-1,624	-4,894	-1,623	1,981	25,106
387	-4,817	-1,340	-4,915	-1,674	-4,884	-1,674	2,035	24,910
388	-4,805	-1,383	-4,905	-1,725	-4,874	-1,724	2,091	24,720
389	-4,793	-1,425	-4,896	-1,775	-4,863	-1,775	2,149	24,534
390	-4,780	-1,468	-4,885	-1,825	-4,852	-1,825	2,208	24,353
391	-4,767	-1,510	-4,875	-1,875	-4,841	-1,875	2,270	24,176
392	-4,753	-1,552	-4,864	-1,924	-4,829	-1,924	2,333	24,002
393	-4,739	-1,594	-4,853	-1,974	-4,817	-1,973	2,398	23,831
394	-4,725	-1,636	-4,841	-2,023	-4,804	-2,022	2,464	23,662
395	-4,710	-1,677	-4,830	-2,072	-4,792	-2,071	2,533	23,496
396	-4,695	-1,719	-4,817	-2,120	-4,778	-2,120	2,603	23,332
397	-4,680	-1,761	-4,805	-2,168	-4,765	-2,168	2,675	23,170
398	-4,664	-1,802	-4,792	-2,216	-4,751	-2,216	2,748	23,009
399	-4,648	-1,843	-4,779	-2,264	-4,737	-2,264	2,824	22,850
400	-4,631	-1,884	-4,766	-2,312	-4,723	-2,311	2,901	22,692
401	-4,615	-1,925	-4,752	-2,359	-4,708	-2,358	2,979	22,535
402	-4,597	-1,966	-4,738	-2,406	-4,693	-2,405	3,059	22,379
403	-4,580	-2,006	-4,724	-2,452	-4,677	-2,452	3,141	22,225

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
404	-4,562	-2,047	-4,709	-2,498	-4,661	-2,498	3,224	22,071
405	-4,544	-2,087	-4,694	-2,544	-4,645	-2,544	3,309	21,917
406	-4,525	-2,127	-4,679	-2,590	-4,629	-2,589	3,395	21,764
407	-4,506	-2,167	-4,663	-2,635	-4,612	-2,635	3,483	21,612
408	-4,487	-2,207	-4,647	-2,680	-4,595	-2,680	3,572	21,461
409	-4,467	-2,246	-4,631	-2,725	-4,577	-2,724	3,662	21,310
410	-4,447	-2,286	-4,614	-2,769	-4,559	-2,769	3,754	21,159
411	-4,427	-2,325	-4,597	-2,813	-4,541	-2,813	3,847	21,008
412	-4,406	-2,364	-4,580	-2,857	-4,522	-2,856	3,942	20,858
413	-4,385	-2,403	-4,562	-2,900	-4,504	-2,900	4,038	20,709
414	-4,363	-2,441	-4,544	-2,943	-4,484	-2,943	4,135	20,559
415	-4,342	-2,480	-4,525	-2,986	-4,465	-2,986	4,233	20,410
416	-4,320	-2,518	-4,507	-3,028	-4,445	-3,028	4,332	20,261
417	-4,297	-2,556	-4,488	-3,070	-4,424	-3,070	4,433	20,112
418	-4,274	-2,594	-4,468	-3,112	-4,404	-3,112	4,535	19,964
419	-4,251	-2,632	-4,448	-3,153	-4,383	-3,153	4,637	19,816
420	-4,228	-2,669	-4,428	-3,194	-4,361	-3,194	4,741	19,668
421	-4,204	-2,707	-4,408	-3,235	-4,339	-3,234	4,846	19,520
422	-4,180	-2,744	-4,387	-3,275	-4,317	-3,275	4,951	19,373
423	-4,156	-2,781	-4,366	-3,315	-4,295	-3,315	5,058	19,226
424	-4,131	-2,817	-4,344	-3,355	-4,272	-3,354	5,165	19,079
425	-4,106	-2,854	-4,322	-3,394	-4,249	-3,393	5,274	18,933
426	-4,080	-2,890	-4,300	-3,433	-4,225	-3,432	5,382	18,786
427	-4,055	-2,926	-4,277	-3,471	-4,201	-3,471	5,492	18,640
428	-4,029	-2,962	-4,254	-3,509	-4,177	-3,509	5,602	18,495
429	-4,002	-2,997	-4,231	-3,547	-4,153	-3,546	5,713	18,350
430	-3,976	-3,032	-4,207	-3,584	-4,128	-3,584	5,825	18,205
431	-3,949	-3,067	-4,183	-3,621	-4,102	-3,621	5,937	18,060
432	-3,921	-3,102	-4,159	-3,658	-4,077	-3,657	6,049	17,916
433	-3,894	-3,137	-4,134	-3,694	-4,051	-3,694	6,162	17,772
434	-3,866	-3,171	-4,108	-3,730	-4,024	-3,729	6,275	17,628
435	-3,838	-3,205	-4,083	-3,765	-3,998	-3,765	6,389	17,485
436	-3,809	-3,239	-4,057	-3,801	-3,970	-3,800	6,503	17,342
437	-3,780	-3,272	-4,031	-3,835	-3,943	-3,835	6,617	17,199
438	-3,751	-3,306	-4,004	-3,870	-3,915	-3,869	6,731	17,056
439	-3,722	-3,339	-3,977	-3,903	-3,887	-3,903	6,845	16,913
440	-3,692	-3,372	-3,949	-3,937	-3,858	-3,936	6,960	16,769
441	-3,662	-3,404	-3,921	-3,970	-3,830	-3,969	7,074	16,625
442	-3,632	-3,436	-3,893	-4,003	-3,800	-4,002	7,188	16,479
443	-3,602	-3,468	-3,865	-4,035	-3,771	-4,034	7,302	16,331
444	-3,571	-3,500	-3,836	-4,066	-3,741	-4,066	7,416	16,180
445	-3,540	-3,531	-3,806	-4,097	-3,711	-4,097	7,530	16,025
446	-3,508	-3,563	-3,776	-4,128	-3,680	-4,127	7,644	15,864
447	-3,477	-3,593	-3,746	-4,157	-3,649	-4,157	7,757	15,695
448	-3,445	-3,624	-3,716	-4,186	-3,618	-4,186	7,869	15,515
449	-3,413	-3,654	-3,685	-4,214	-3,586	-4,214	7,982	15,320
450	-3,380	-3,684	-3,654	-4,241	-3,554	-4,241	8,094	15,107
451	-3,347	-3,714	-3,622	-4,266	-3,522	-4,266	8,205	14,870
452	-3,314	-3,744	-3,590	-4,290	-3,489	-4,290	8,316	14,604
453	-3,281	-3,773	-3,558	-4,312	-3,456	-4,312	8,426	14,304
454	-3,248	-3,802	-3,525	-4,332	-3,423	-4,332	8,535	13,964
455	-3,214	-3,830	-3,492	-4,350	-3,389	-4,350	8,644	13,582
456	-3,180	-3,858	-3,458	-4,366	-3,355	-4,366	8,752	13,160

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	Y
457	-3,146	-3,886	-3,424	-4,380	-3,321	-4,380	8,859	12,701
458	-3,111	-3,914	-3,390	-4,392	-3,286	-4,392	8,965	12,216
459	-3,077	-3,941	-3,356	-4,403	-3,251	-4,403	9,070	11,720
460	-3,042	-3,968	-3,321	-4,414	-3,216	-4,414	9,174	11,227
461	-3,006	-3,995	-3,285	-4,425	-3,180	-4,425	9,277	10,754
462	-2,971	-4,022	-3,250	-4,436	-3,144	-4,436	9,380	10,315
463	-2,935	-4,048	-3,214	-4,449	-3,108	-4,449	9,481	9,919
464	-2,899	-4,074	-3,177	-4,463	-3,071	-4,463	9,580	9,568
465	-2,863	-4,099	-3,140	-4,479	-3,035	-4,478	9,679	9,263
466	-2,827	-4,124	-3,103	-4,495	-2,997	-4,495	9,777	9,000
467	-2,790	-4,149	-3,066	-4,513	-2,960	-4,513	9,873	8,776
468	-2,753	-4,174	-3,028	-4,532	-2,922	-4,531	9,968	8,583
469	-2,716	-4,198	-2,990	-4,551	-2,884	-4,551	10,062	8,416
470	-2,679	-4,222	-2,951	-4,571	-2,846	-4,570	10,155	8,272
471	-2,642	-4,245	-2,913	-4,591	-2,807	-4,591	10,246	8,144
472	-2,604	-4,268	-2,873	-4,611	-2,768	-4,611	10,336	8,031
473	-2,566	-4,291	-2,834	-4,631	-2,729	-4,631	10,424	7,928
474	-2,528	-4,314	-2,794	-4,652	-2,690	-4,651	10,511	7,833
475	-2,490	-4,336	-2,754	-4,672	-2,650	-4,671	10,597	7,746
476	-2,452	-4,358	-2,714	-4,692	-2,610	-4,691	10,682	7,664
477	-2,413	-4,379	-2,673	-4,711	-2,570	-4,711	10,765	7,586
478	-2,374	-4,400	-2,632	-4,731	-2,529	-4,731	10,847	7,512
479	-2,335	-4,421	-2,590	-4,750	-2,488	-4,750	10,927	7,440
480	-2,296	-4,442	-2,549	-4,769	-2,447	-4,769	11,006	7,371
481	-2,257	-4,462	-2,507	-4,788	-2,406	-4,787	11,084	7,304
482	-2,217	-4,482	-2,465	-4,806	-2,365	-4,806	11,161	7,239
483	-2,177	-4,501	-2,422	-4,824	-2,323	-4,824	11,237	7,175
484	-2,138	-4,520	-2,379	-4,842	-2,281	-4,841	11,311	7,113
485	-2,097	-4,539	-2,336	-4,859	-2,239	-4,859	11,385	7,052
486	-2,057	-4,557	-2,293	-4,876	-2,196	-4,876	11,457	6,992
487	-2,017	-4,575	-2,249	-4,892	-2,154	-4,892	11,529	6,933
488	-1,976	-4,593	-2,206	-4,909	-2,111	-4,908	11,600	6,875
489	-1,936	-4,610	-2,162	-4,924	-2,068	-4,924	11,670	6,819
490	-1,895	-4,627	-2,117	-4,940	-2,025	-4,940	11,739	6,763
491	-1,854	-4,644	-2,073	-4,955	-1,981	-4,955	11,808	6,709
492	-1,813	-4,660	-2,028	-4,970	-1,938	-4,970	11,877	6,655
493	-1,771	-4,676	-1,983	-4,984	-1,894	-4,984	11,946	6,603
494	-1,730	-4,691	-1,938	-4,998	-1,850	-4,998	12,014	6,551
495	-1,688	-4,706	-1,898	-5,011	-1,811	-5,010	12,406	6,466
496	-1,647	-4,721	-1,893	-5,012	-1,806	-5,012	14,920	6,168
497	-1,605	-4,735	-1,847	-5,026	-1,762	-5,025	15,074	6,128
498	-1,563	-4,749	-1,801	-5,039	-1,717	-5,038	15,233	6,089
499	-1,521	-4,763	-1,755	-5,051	-1,672	-5,051	15,399	6,051
500	-1,479	-4,776	-1,709	-5,064	-1,628	-5,063	15,571	6,013
501	-1,437	-4,789	-1,663	-5,075	-1,583	-5,075	15,750	5,977
502	-1,394	-4,802	-1,616	-5,087	-1,538	-5,087	15,939	5,942
503	-1,352	-4,814	-1,570	-5,098	-1,492	-5,098	16,137	5,908
504	-1,309	-4,826	-1,523	-5,109	-1,447	-5,109	16,346	5,874
505	-1,266	-4,837	-1,476	-5,120	-1,402	-5,119	16,567	5,842
506	-1,223	-4,848	-1,429	-5,130	-1,356	-5,129	16,803	5,811
507	-1,181	-4,859	-1,382	-5,139	-1,311	-5,139	17,054	5,781
508	-1,138	-4,869	-1,335	-5,149	-1,265	-5,149	17,324	5,751
509	-1,094	-4,879	-1,287	-5,158	-1,219	-5,158	17,614	5,723

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	Y
510	-1,051	-4,888	-1,240	-5,167	-1,173	-5,166	17,927	5,696
511	-1,008	-4,897	-1,192	-5,175	-1,127	-5,175	18,268	5,670
512	-0,965	-4,906	-1,145	-5,183	-1,081	-5,183	18,639	5,645
513	-0,921	-4,914	-1,097	-5,191	-1,034	-5,190	19,046	5,621
514	-0,878	-4,922	-1,049	-5,198	-0,988	-5,198	19,495	5,598
515	-0,834	-4,930	-1,001	-5,205	-0,942	-5,205	19,992	5,576
516	-0,791	-4,937	-0,953	-5,211	-0,895	-5,211	20,547	5,556
517	-0,747	-4,944	-0,905	-5,218	-0,849	-5,217	21,169	5,536
518	-0,703	-4,950	-0,857	-5,223	-0,802	-5,223	21,871	5,518
519	-0,659	-4,956	-0,809	-5,229	-0,756	-5,229	22,672	5,500
520	-0,616	-4,962	-0,761	-5,234	-0,709	-5,234	23,591	5,484
521	-0,572	-4,967	-0,713	-5,239	-0,663	-5,239	24,657	5,469
522	-0,528	-4,972	-0,664	-5,243	-0,616	-5,243	25,908	5,455
523	-0,484	-4,977	-0,616	-5,247	-0,569	-5,247	27,394	5,442
524	-0,440	-4,981	-0,568	-5,251	-0,523	-5,251	29,188	5,430
525	-0,396	-4,984	-0,520	-5,254	-0,476	-5,254	31,393	5,419
526	-0,352	-4,988	-0,472	-5,257	-0,429	-5,257	34,164	5,410
527	-0,307	-4,991	-0,423	-5,260	-0,383	-5,260	37,747	5,401
528	-0,263	-4,993	-0,375	-5,262	-0,336	-5,262	42,551	5,394
529	-0,219	-4,995	-0,327	-5,264	-0,289	-5,264	49,316	5,388
530	-0,175	-4,997	-0,279	-5,266	-0,242	-5,266	59,531	5,383
531	-0,131	-4,998	-0,231	-5,267	-0,196	-5,267	76,693	5,379
532	-0,087	-4,999	-0,183	-5,268	-0,149	-5,268	111,449	5,376
533	-0,042	-5,000	-0,135	-5,269	-0,103	-5,268	218,858	5,374
534	0,002	-5,000	-0,087	-5,269	-0,056	-5,268	4870,751	5,374
535	0,046	-5,000	-0,039	-5,268	-0,009	-5,268	185,595	5,374
536	0,090	-4,999	0,008	-5,268	0,037	-5,268	90,738	5,376
537	0,134	-4,998	0,056	-5,267	0,084	-5,267	58,309	5,379
538	0,179	-4,997	0,104	-5,266	0,130	-5,266	41,968	5,383
539	0,223	-4,995	0,151	-5,264	0,176	-5,264	32,142	5,388
540	0,267	-4,993	0,199	-5,262	0,222	-5,262	25,596	5,394
541	0,311	-4,990	0,246	-5,260	0,269	-5,260	20,933	5,402
542	0,355	-4,987	0,293	-5,257	0,315	-5,257	17,451	5,410
543	0,399	-4,984	0,340	-5,254	0,361	-5,254	14,759	5,420
544	0,443	-4,980	0,387	-5,251	0,407	-5,251	12,620	5,431
545	0,487	-4,976	0,434	-5,247	0,453	-5,247	10,884	5,443
546	0,531	-4,972	0,481	-5,243	0,499	-5,243	9,452	5,456
547	0,575	-4,967	0,528	-5,238	0,544	-5,238	8,254	5,470
548	0,619	-4,962	0,574	-5,234	0,590	-5,233	7,239	5,485
549	0,663	-4,956	0,621	-5,228	0,635	-5,228	6,371	5,502
550	0,707	-4,950	0,667	-5,223	0,681	-5,223	5,623	5,519
551	0,751	-4,943	0,713	-5,217	0,726	-5,217	4,974	5,538
552	0,794	-4,937	0,759	-5,211	0,771	-5,211	4,407	5,557
553	0,838	-4,929	0,805	-5,204	0,816	-5,204	3,909	5,578
554	0,881	-4,922	0,851	-5,197	0,861	-5,197	3,470	5,600
555	0,925	-4,914	0,896	-5,190	0,906	-5,190	3,082	5,623
556	0,968	-4,905	0,942	-5,182	0,951	-5,182	2,738	5,647
557	1,012	-4,897	0,987	-5,174	0,995	-5,174	2,432	5,672
558	1,055	-4,887	1,032	-5,166	1,040	-5,166	2,159	5,698
559	1,098	-4,878	1,077	-5,157	1,084	-5,157	1,915	5,726
560	1,141	-4,868	1,122	-5,148	1,128	-5,148	1,697	5,754
561	1,184	-4,858	1,166	-5,139	1,172	-5,138	1,502	5,783
562	1,227	-4,847	1,211	-5,129	1,216	-5,129	1,328	5,813

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	Y
563	1,270	-4,836	1,255	-5,119	1,260	-5,118	1,171	5,845
564	1,313	-4,825	1,299	-5,108	1,304	-5,108	1,031	5,877
565	1,355	-4,813	1,343	-5,097	1,347	-5,097	0,906	5,910
566	1,398	-4,801	1,387	-5,086	1,390	-5,086	0,795	5,945
567	1,440	-4,788	1,430	-5,074	1,433	-5,074	0,695	5,980
568	1,482	-4,775	1,473	-5,063	1,476	-5,062	0,606	6,016
569	1,525	-4,762	1,516	-5,050	1,519	-5,050	0,528	6,054
570	1,567	-4,748	1,559	-5,038	1,562	-5,037	0,458	6,092
571	1,608	-4,734	1,602	-5,024	1,604	-5,024	0,397	6,131
572	1,650	-4,720	1,645	-5,011	1,647	-5,011	0,343	6,171
573	1,692	-4,705	1,687	-4,997	1,689	-4,997	0,296	6,212
574	1,733	-4,690	1,729	-4,983	1,731	-4,983	0,256	6,254
575	1,775	-4,674	1,771	-4,969	1,772	-4,968	0,221	6,297
576	1,816	-4,659	1,813	-4,954	1,814	-4,954	0,192	6,341
577	1,857	-4,642	1,854	-4,939	1,855	-4,938	0,167	6,386
578	1,898	-4,626	1,895	-4,923	1,896	-4,923	0,147	6,432
579	1,939	-4,609	1,936	-4,907	1,937	-4,907	0,131	6,478
580	1,980	-4,591	1,977	-4,891	1,978	-4,891	0,119	6,526
581	2,020	-4,574	2,018	-4,874	2,019	-4,874	0,111	6,575
582	2,061	-4,556	2,058	-4,857	2,059	-4,857	0,106	6,624
583	2,101	-4,537	2,099	-4,840	2,099	-4,840	0,103	6,675
584	2,141	-4,518	2,139	-4,822	2,139	-4,822	0,103	6,727
585	2,181	-4,499	2,178	-4,804	2,179	-4,804	0,106	6,780
586	2,220	-4,480	2,218	-4,786	2,219	-4,786	0,111	6,835
587	2,260	-4,460	2,257	-4,767	2,258	-4,767	0,118	6,891
588	2,299	-4,440	2,296	-4,749	2,297	-4,748	0,127	6,950
589	2,338	-4,419	2,335	-4,729	2,336	-4,729	0,138	7,010
590	2,377	-4,399	2,374	-4,710	2,375	-4,709	0,150	7,074
591	2,416	-4,377	2,412	-4,690	2,414	-4,690	0,164	7,141
592	2,455	-4,356	2,450	-4,670	2,452	-4,670	0,179	7,212
593	2,493	-4,334	2,488	-4,650	2,490	-4,650	0,195	7,288
594	2,531	-4,312	2,526	-4,630	2,528	-4,629	0,212	7,371
595	2,569	-4,289	2,564	-4,609	2,566	-4,609	0,230	7,463
596	2,607	-4,266	2,601	-4,589	2,603	-4,589	0,249	7,566
597	2,645	-4,243	2,638	-4,569	2,640	-4,569	0,269	7,682
598	2,682	-4,220	2,675	-4,549	2,677	-4,549	0,289	7,816
599	2,720	-4,196	2,711	-4,530	2,714	-4,530	0,310	7,971
600	2,757	-4,172	2,747	-4,512	2,750	-4,511	0,332	8,153
601	2,793	-4,147	2,783	-4,494	2,787	-4,494	0,354	8,367
602	2,830	-4,122	2,819	-4,477	2,823	-4,477	0,376	8,619
603	2,866	-4,097	2,855	-4,462	2,859	-4,462	0,398	8,913
604	2,902	-4,071	2,890	-4,448	2,894	-4,448	0,421	9,252
605	2,938	-4,046	2,925	-4,435	2,929	-4,435	0,444	9,637
606	2,974	-4,019	2,960	-4,424	2,965	-4,424	0,467	10,063
607	3,009	-3,993	2,995	-4,413	2,999	-4,413	0,490	10,521
608	3,044	-3,966	3,029	-4,402	3,034	-4,402	0,513	10,998
609	3,079	-3,939	3,063	-4,391	3,068	-4,391	0,536	11,477
610	3,114	-3,912	3,097	-4,379	3,102	-4,379	0,559	11,942
611	3,149	-3,884	3,130	-4,365	3,136	-4,365	0,582	12,381
612	3,183	-3,856	3,164	-4,349	3,170	-4,349	0,604	12,782
613	3,217	-3,828	3,197	-4,331	3,203	-4,331	0,627	13,142
614	3,251	-3,799	3,229	-4,311	3,236	-4,310	0,649	13,461
615	3,284	-3,770	3,262	-4,288	3,269	-4,288	0,671	13,740

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	Y
616	3,317	-3,741	3,294	-4,264	3,302	-4,264	0,693	13,986
617	3,350	-3,712	3,326	-4,239	3,334	-4,238	0,714	14,202
618	3,383	-3,682	3,358	-4,212	3,366	-4,211	0,736	14,396
619	3,415	-3,652	3,389	-4,184	3,398	-4,183	0,757	14,571
620	3,447	-3,622	3,421	-4,155	3,429	-4,154	0,777	14,731
621	3,479	-3,591	3,452	-4,125	3,461	-4,125	0,797	14,881
622	3,511	-3,560	3,482	-4,095	3,492	-4,094	0,817	15,022
623	3,542	-3,529	3,513	-4,064	3,522	-4,063	0,837	15,157
624	3,573	-3,497	3,543	-4,032	3,553	-4,031	0,856	15,288
625	3,604	-3,466	3,573	-4,000	3,583	-3,999	0,875	15,415
626	3,635	-3,434	3,602	-3,967	3,613	-3,967	0,893	15,540
627	3,665	-3,401	3,631	-3,934	3,642	-3,934	0,911	15,664
628	3,695	-3,369	3,660	-3,901	3,672	-3,900	0,928	15,786
629	3,724	-3,336	3,689	-3,867	3,701	-3,866	0,945	15,908
630	3,754	-3,303	3,718	-3,832	3,729	-3,832	0,962	16,028
631	3,783	-3,270	3,746	-3,798	3,758	-3,797	0,978	16,149
632	3,812	-3,236	3,774	-3,763	3,786	-3,762	0,994	16,269
633	3,840	-3,202	3,801	-3,727	3,814	-3,726	1,009	16,388
634	3,868	-3,168	3,829	-3,691	3,841	-3,691	1,024	16,508
635	3,896	-3,134	3,856	-3,655	3,869	-3,654	1,039	16,627
636	3,924	-3,099	3,882	-3,618	3,896	-3,618	1,053	16,746
637	3,951	-3,064	3,909	-3,581	3,922	-3,581	1,067	16,864
638	3,978	-3,029	3,935	-3,544	3,949	-3,543	1,080	16,983
639	4,004	-2,994	3,961	-3,506	3,975	-3,506	1,093	17,101
640	4,031	-2,959	3,986	-3,468	4,001	-3,467	1,105	17,219
641	4,057	-2,923	4,011	-3,430	4,026	-3,429	1,117	17,336
642	4,082	-2,887	4,036	-3,391	4,051	-3,390	1,129	17,453
643	4,108	-2,851	4,061	-3,351	4,076	-3,351	1,140	17,569
644	4,133	-2,814	4,085	-3,312	4,101	-3,311	1,151	17,685
645	4,158	-2,778	4,109	-3,272	4,125	-3,271	1,162	17,801
646	4,182	-2,741	4,133	-3,232	4,149	-3,231	1,172	17,915
647	4,206	-2,704	4,156	-3,191	4,173	-3,190	1,182	18,029
648	4,230	-2,666	4,179	-3,150	4,196	-3,150	1,191	18,143
649	4,253	-2,629	4,202	-3,109	4,219	-3,108	1,201	18,255
650	4,276	-2,591	4,225	-3,067	4,241	-3,066	1,209	18,367
651	4,299	-2,553	4,247	-3,025	4,264	-3,024	1,218	18,478
652	4,321	-2,515	4,268	-2,983	4,286	-2,982	1,226	18,588
653	4,343	-2,477	4,290	-2,940	4,307	-2,939	1,234	18,697
654	4,365	-2,438	4,311	-2,897	4,329	-2,896	1,242	18,805
655	4,387	-2,400	4,332	-2,853	4,350	-2,853	1,249	18,912
656	4,408	-2,361	4,352	-2,810	4,370	-2,809	1,256	19,018
657	4,428	-2,322	4,372	-2,766	4,391	-2,765	1,263	19,123
658	4,449	-2,282	4,392	-2,721	4,411	-2,721	1,270	19,226
659	4,469	-2,243	4,412	-2,676	4,430	-2,676	1,276	19,329
660	4,488	-2,203	4,431	-2,631	4,450	-2,631	1,282	19,430
661	4,508	-2,164	4,450	-2,586	4,469	-2,586	1,288	19,529
662	4,527	-2,124	4,468	-2,540	4,487	-2,540	1,294	19,627
663	4,545	-2,084	4,486	-2,494	4,505	-2,494	1,299	19,724
664	4,563	-2,043	4,504	-2,448	4,523	-2,448	1,304	19,819
665	4,581	-2,003	4,521	-2,402	4,541	-2,401	1,310	19,912
666	4,599	-1,962	4,538	-2,355	4,558	-2,354	1,314	20,004
667	4,616	-1,922	4,555	-2,308	4,575	-2,307	1,319	20,094
668	4,633	-1,881	4,572	-2,260	4,592	-2,260	1,324	20,182

Gerak Lingkaran								
Data ke-	Input (cm)		Output Model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional (cm)		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
669	4,649	-1,840	4,588	-2,212	4,608	-2,212	1,328	20,268
670	4,665	-1,798	4,603	-2,164	4,624	-2,164	1,332	20,353
671	4,681	-1,757	4,619	-2,116	4,639	-2,116	1,336	20,435
672	4,696	-1,716	4,634	-2,068	4,654	-2,067	1,340	20,515
673	4,711	-1,674	4,648	-2,019	4,669	-2,018	1,344	20,594
674	4,726	-1,632	4,662	-1,970	4,683	-1,969	1,347	20,669
675	4,740	-1,590	4,676	-1,920	4,697	-1,920	1,351	20,743
676	4,754	-1,548	4,690	-1,871	4,711	-1,870	1,354	20,814
677	4,768	-1,506	4,703	-1,821	4,724	-1,821	1,357	20,883
678	4,781	-1,464	4,716	-1,771	4,737	-1,771	1,361	20,949
679	4,794	-1,422	4,728	-1,721	4,750	-1,720	1,364	21,012
680	4,806	-1,379	4,740	-1,670	4,762	-1,670	1,366	21,073
681	4,818	-1,337	4,752	-1,619	4,774	-1,619	1,369	21,130
682	4,830	-1,294	4,763	-1,568	4,785	-1,568	1,372	21,185
683	4,841	-1,251	4,774	-1,517	4,796	-1,517	1,374	21,236
684	4,852	-1,209	4,785	-1,466	4,807	-1,466	1,377	21,283
685	4,862	-1,166	4,795	-1,414	4,817	-1,414	1,379	21,327
686	4,872	-1,123	4,805	-1,363	4,827	-1,362	1,381	21,368
687	4,882	-1,080	4,815	-1,311	4,837	-1,310	1,384	21,404
688	4,891	-1,036	4,824	-1,258	4,846	-1,258	1,386	21,436
689	4,900	-0,993	4,832	-1,206	4,855	-1,206	1,388	21,463
690	4,909	-0,950	4,841	-1,154	4,863	-1,153	1,390	21,485
691	4,917	-0,906	4,849	-1,101	4,871	-1,101	1,391	21,501
692	4,925	-0,863	4,856	-1,048	4,879	-1,048	1,393	21,511
693	4,932	-0,819	4,864	-0,995	4,886	-0,995	1,395	21,515
694	4,940	-0,775	4,871	-0,942	4,893	-0,942	1,396	21,511
695	4,946	-0,732	4,877	-0,889	4,900	-0,889	1,398	21,499
696	4,952	-0,688	4,883	-0,836	4,906	-0,836	1,399	21,476
697	4,958	-0,644	4,889	-0,782	4,912	-0,782	1,400	21,443
698	4,964	-0,600	4,894	-0,729	4,917	-0,729	1,402	21,396
699	4,969	-0,556	4,899	-0,675	4,922	-0,675	1,403	21,334
700	4,974	-0,512	4,904	-0,621	4,927	-0,621	1,404	21,252
701	4,978	-0,468	4,908	-0,567	4,931	-0,567	1,405	21,146
702	4,982	-0,424	4,912	-0,514	4,935	-0,513	1,405	21,008
703	4,986	-0,380	4,915	-0,460	4,938	-0,459	1,406	20,830
704	4,989	-0,336	4,918	-0,406	4,941	-0,405	1,407	20,595
705	4,991	-0,292	4,921	-0,351	4,944	-0,351	1,407	20,280
706	4,994	-0,248	4,924	-0,297	4,947	-0,297	1,408	19,841
707	4,996	-0,204	4,925	-0,243	4,949	-0,243	1,408	19,202
708	4,997	-0,160	4,927	-0,189	4,950	-0,189	1,409	18,196
709	4,999	-0,115	4,928	-0,134	4,951	-0,134	1,409	16,406
710	4,999	-0,071	4,929	-0,080	4,952	-0,080	1,409	12,377
711	5,000	-0,027	4,929	-0,026	4,953	-0,026	1,409	4,864
712	5,000	0,017	4,930	0,029	4,953	0,029	1,409	66,692
713	5,000	0,061	4,929	0,083	4,952	0,083	1,409	35,183

Gerakan Lissajous								
Data ke-	Input (cm)		Output model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional		Error model EST (%)	
	X	Y	x	y	x	y	x	y
1	-2,898	0,000	-3,212	0,008	-3,106	0,008	10,842	#DIV/0!
2	-2,993	1,835	-3,308	2,228	-3,203	2,229	10,500	21,462
3	-2,768	2,903	-3,080	3,298	-2,974	3,298	11,293	13,607
4	-2,245	2,760	-2,537	3,202	-2,435	3,202	12,978	16,029
5	-1,482	1,464	-1,712	1,790	-1,631	1,790	15,558	22,273
6	-0,560	-0,443	-0,699	-0,537	-0,650	-0,536	24,977	21,071
7	0,423	-2,165	0,365	-2,588	0,385	-2,587	13,571	19,525
8	1,359	-2,983	1,347	-3,494	1,351	-3,494	0,894	17,138
9	2,151	-2,555	2,148	-3,027	2,149	-3,027	0,104	18,472
10	2,711	-1,061	2,703	-1,288	2,705	-1,288	0,306	21,418
11	2,981	0,877	2,967	1,082	2,971	1,082	0,471	23,405
12	2,931	2,448	2,918	2,929	2,922	2,930	0,439	19,652
13	2,566	2,997	2,560	3,379	2,562	3,380	0,229	12,747
14	1,927	2,295	1,924	2,760	1,925	2,760	0,136	20,244
15	1,080	0,635	1,059	0,787	1,066	0,787	2,012	23,935
16	0,118	-1,291	0,038	-1,564	0,066	-1,564	67,446	21,189
17	-0,857	-2,677	-1,026	-3,162	-0,966	-3,162	19,729	18,109
18	-1,740	-2,946	-1,994	-3,455	-1,904	-3,454	14,592	17,260
19	-2,436	-1,985	-2,738	-2,381	-2,634	-2,380	12,381	19,954
20	-2,871	-0,194	-3,185	-0,231	-3,079	-0,231	10,936	19,028
21	-2,998	1,677	-3,312	2,043	-3,208	2,043	10,482	21,820
22	-2,804	2,848	-3,117	3,258	-3,011	3,258	11,170	14,402
23	-2,309	2,830	-2,604	3,246	-2,501	3,246	12,781	14,707
24	-1,566	1,630	-1,804	1,988	-1,720	1,988	15,223	21,922
25	-0,655	-0,250	-0,804	-0,300	-0,751	-0,300	22,758	19,864
26	0,326	-2,026	0,262	-2,428	0,284	-2,428	19,647	19,859
27	1,272	-2,956	1,257	-3,465	1,262	-3,465	1,164	17,227
28	2,082	-2,652	2,079	-3,134	2,080	-3,134	0,104	18,186
29	2,668	-1,240	2,660	-1,504	2,663	-1,504	0,282	21,248
30	2,968	0,689	2,954	0,853	2,959	0,853	0,463	23,802
31	2,950	2,331	2,937	2,800	2,941	2,800	0,451	20,127
32	2,615	2,999	2,609	3,381	2,611	3,382	0,253	12,735
33	2,000	2,416	1,998	2,894	1,999	2,894	0,115	19,802
34	1,170	0,823	1,152	1,017	1,158	1,017	1,562	23,511
35	0,215	-1,113	0,143	-1,350	0,168	-1,350	33,528	21,376
36	-0,763	-2,584	-0,923	-3,059	-0,866	-3,059	20,931	18,388
37	-1,659	-2,977	-1,906	-3,487	-1,819	-3,487	14,874	17,159
38	-2,378	-2,126	-2,677	-2,543	-2,574	-2,543	12,564	19,621
39	-2,841	-0,388	-3,155	-0,469	-3,049	-0,469	11,040	20,865
40	-3,000	1,512	-3,314	1,847	-3,209	1,848	10,476	22,173
41	-2,837	2,781	-3,150	3,215	-3,045	3,215	11,055	15,617
42	-2,369	2,889	-2,668	3,287	-2,565	3,287	12,591	13,794
43	-1,648	1,790	-1,894	2,176	-1,807	2,177	14,916	21,565
44	-0,750	-0,056	-0,908	-0,061	-0,852	-0,061	21,129	9,411
45	0,229	-1,878	0,158	-2,257	0,183	-2,257	31,046	20,187
46	1,183	-2,917	1,165	-3,423	1,172	-3,422	1,506	17,356
47	2,010	-2,737	2,008	-3,228	2,009	-3,227	0,113	17,926
48	2,622	-1,415	2,615	-1,712	2,618	-1,712	0,257	21,022
49	2,952	0,498	2,939	0,619	2,943	0,620	0,453	24,342
50	2,966	2,203	2,952	2,655	2,957	2,656	0,462	20,521
51	2,662	2,988	2,654	3,371	2,657	3,371	0,278	12,806

Gerak Lissajous								
Data ke-	Input (cm)		Output model EST (cm)		Output model EST dengan pengendali Proporsional		Error model EST (%)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
52	2,072	2,526	2,069	3,011	2,070	3,011	0,105	19,191
53	1,259	1,009	1,244	1,242	1,249	1,242	1,208	23,152
54	0,312	-0,930	0,247	-1,130	0,270	-1,129	20,833	21,493
55	-0,669	-2,480	-0,819	-2,943	-0,766	-2,943	22,496	18,688
56	-1,578	-2,995	-1,817	-3,507	-1,732	-3,506	15,178	17,099
57	-2,317	-2,259	-2,613	-2,695	-2,511	-2,694	12,754	19,287
58	-2,809	-0,580	-3,122	-0,704	-3,016	-0,704	11,153	21,370
59	-2,999	1,341	-3,313	1,643	-3,208	1,643	10,481	22,519
60	-2,867	2,702	-3,181	3,164	-3,075	3,164	10,950	17,092
61	-2,428	2,935	-2,729	3,324	-2,625	3,324	12,406	13,250
62	-1,728	1,943	-1,981	2,354	-1,892	2,355	14,631	21,203
63	-0,843	0,139	-1,011	0,178	-0,952	0,178	19,883	28,346
64	0,132	-1,723	0,053	-2,076	0,081	-2,075	59,527	20,502
65	1,093	-2,865	1,072	-3,367	1,079	-3,366	1,941	17,523
66	1,937	-2,811	1,935	-3,308	1,936	-3,308	0,132	17,695
67	2,573	-1,583	2,567	-1,912	2,569	-1,912	0,232	20,755
68	2,934	0,305	2,921	0,383	2,925	0,383	0,441	25,371
69	2,979	2,067	2,965	2,498	2,970	2,499	0,470	20,890

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Halimatus Sa'diyah, lahir di Lamongan pada tanggal 15 Januari 1995. Memulai Sekolah Dasar pada tahun 2001 di SDN Maduran, kemudian melanjutkan sekolah di SMP Negeri 1 Maduran hingga tahun 2010. Di jenjang Sekolah Menengah Atas penulis bersekolah di SMA Negeri 2 Lamongan dari tahun 2010 hingga 2013. Di tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, ITS. Selama berstatus mahasiswa sarjana, penulis aktif di UKM Technopreneurship Development Center. Pada tahun 2016 penulis melaksanakan kerja praktik di PT Pembangkit Jawa Bali (PJB)-UP Gresik. Penulis menyelesaikan pendidikan program sarjana pada September 2017. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan magister di Departemen Teknik Fisika bidang Rekayasa Instrumentasi Industri. Penulis dapat dihubungi melalui email halsdiy@gmail.com.